

# 3Δ ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗ

Β' Έκδοση

Ανέστης Κουτσούδης  
Γεώργιος Παυλίδης

2019



# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>3Δ γραφικά υπολογιστών</b>	<b>1</b>
1.1	Εισαγωγή . . . . .	1
1.2	Απεικόνιση 3Δ μοντέλων . . . . .	7
1.3	Αναπαραστάσεις και δομικά στοιχεία 3Δ μοντέλων . . . . .	11
1.4	3Δ διακριτός χώρος . . . . .	17
1.5	Δυναμική διαμόρφωση απεικόνισης 3Δ σκηνών . . . . .	20
1.6	Προγραμματισμός 3Δ γραφικών . . . . .	23
	Βιβλιογραφία . . . . .	25
<b>2</b>	<b>3Δ ψηφιοποίηση</b>	<b>27</b>
2.1	Εισαγωγή . . . . .	27
2.2	Ορισμός της 3Δ ψηφιοποίησης . . . . .	31
2.3	Η 3Δ ψηφιοποίηση και τα χαρακτηριστικά των αντικειμένων . . . . .	33
2.4	Μέθοδοι 3Δ ψηφιοποίησης . . . . .	38
2.4.1	Μέγεθος αντικειμένων και 3Δ ψηφιοποίηση . . . . .	41
2.4.2	Τριγωνισμός ακτίνων λείζερ μικρών αποστάσεων . . . . .	50
2.4.3	Σχήμα από σιλουέτα . . . . .	63
2.4.4	Σχήμα από δομημένο φωτισμό . . . . .	76
2.4.5	Σχήμα από στερεοφωτογράφιση . . . . .	85
2.4.6	Δομή από κίνηση . . . . .	88
2.4.7	Σχήμα από φωτοσκίαση . . . . .	94
2.4.8	Σχήμα από υφή . . . . .	95
2.4.9	Σχήμα από φωτομετρία . . . . .	96
2.4.10	Σχήμα από μεταβαλλόμενη εστίαση . . . . .	97
2.4.11	Σχήμα από σκιά . . . . .	99
2.4.12	Συστήματα μέτρησης συντεταγμένων . . . . .	100
	Βιβλιογραφία . . . . .	103
<b>3</b>	<b>Επιλογή βέλτιστης μεθόδου ψηφιοποίησης</b>	<b>111</b>
3.1	Σκεπτικό της επιλογής μεθόδου . . . . .	111
3.1.1	Η ταχύτητα ψηφιοποίησης . . . . .	114
3.1.2	Οι τεχνικές βαθμονόμησης . . . . .	114
3.1.3	Η επαλήθευση της ακρίβειας των μετρήσεων . . . . .	115
3.1.4	Η απόσταση και οι συνθήκες . . . . .	115

3.1.5	Το οπτικό πεδίο . . . . .	116
3.1.6	Οι ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές . . . . .	117
3.1.7	Η μεταφορά του συστήματος ψηφιοποίησης . . . . .	117
3.1.8	Η τροφοδοσία ισχύος του συστήματος . . . . .	117
3.2	Κριτήρια επιλογής της βέλτιστης μεθόδου . . . . .	118
3.3	Κριτήρια επιλογής συστήματος 3Δ ψηφιοποίησης . . . . .	121
	Βιβλιογραφία . . . . .	125
<b>4</b>	<b>Οργάνωση ψηφιοποίησης</b>	<b>127</b>
4.1	Εισαγωγή . . . . .	127
4.2	Ροή εργασιών 3Δ ψηφιοποίησης . . . . .	130
4.2.1	Συλλογή γεωμετρικών δεδομένων . . . . .	131
4.2.2	Προ-επεξεργασία γεωμετρικής πληροφορίας . . . . .	133
4.2.3	Φιλτράρισμα του θορύβου στο νέφους σημείων . . . . .	134
4.2.4	Ομαδοποίηση και οργάνωση δεδομένων . . . . .	135
4.2.5	Ευθυγράμμιση και ενοποίηση τμημάτων . . . . .	135
4.2.6	Δημιουργία πλεγματοσειράς . . . . .	136
4.2.7	Απλοποίηση πλεγματοσειράς . . . . .	137
4.2.8	Απαλοιφή γεωμετρικών ασυνεχειών . . . . .	139
4.2.9	Δημιουργία υφής . . . . .	141
	Βιβλιογραφία . . . . .	143
<b>5</b>	<b>Λογισμικό</b>	<b>145</b>
5.1	Εισαγωγή . . . . .	145
5.2	Λειτουργικότητα των λογισμικών . . . . .	146
5.3	Διαχείριση δεδομένων και καταγραφή διεργασιών . . . . .	151
5.4	Σύγκριση 3Δ δεδομένων . . . . .	151
	Βιβλιογραφία . . . . .	153
<b>6</b>	<b>Μελέτη περιπτώσεων</b>	<b>155</b>
6.1	Εισαγωγή . . . . .	155
6.2	Ψηφιακός Μιχαήλ Άγγελος . . . . .	155
6.3	Ερμής του Πραξιτέλη . . . . .	158
6.4	Η Μαγδαληνή του Ντονατέλλο . . . . .	159
6.5	Αγάλματα Φαραώ Πέπι . . . . .	159
6.6	Παλαιολιθικά ευρήματα . . . . .	160
6.7	Το έργο 3D Murale . . . . .	160
6.8	Η Αθηνά του Αρέτσο . . . . .	161
6.9	Κυκλαδικό ειδώλιο . . . . .	162
6.10	Μπεκτασικός τεκές Κιουτουκλού Μπαμπά . . . . .	164
	Βιβλιογραφία . . . . .	167
	<b>Παραρτήματα</b>	<b>169</b>



<b>Παράρτημα Ι Δομή από κίνηση</b>	<b>171</b>
I.1 Εισαγωγή . . . . .	171
I.2 Πρακτική εφαρμογή της μεθόδου Δομή από κίνηση . . . . .	173
I.3 Απόσταση φωτογράφισης και διαστάσεις . . . . .	180
I.4 Βασικές παράμετροι φωτογράφισης . . . . .	184
I.5 Μοντέλο κάμερας οπής και εστιακή απόσταση . . . . .	185
I.6 Φωτοσταθερά, στόχοι και κλίμακες . . . . .	186
I.7 Υλικά συμβατά με τη μέθοδο Δομή από κίνηση . . . . .	187
I.8 Δείγματα προβλημάτων . . . . .	188
I.9 Αυτοματοποίηση διαδικασιών επίγειας συλλογής δεδομένων . . . . .	189
I.10 Αυτοματοποίηση διαδικασιών εναέριας συλλογής δεδομένων . . . . .	193
 <b>Παράρτημα ΙΙ Πολυεικονική γεωμετρία</b>	 <b>199</b>
II.1 Εισαγωγή . . . . .	199
II.2 Τριγωνισμός . . . . .	199
II.2.1 Προσέγγιση 1η . . . . .	200
II.2.2 Προσέγγιση 2η . . . . .	201
II.3 Δομή από κίνηση δύο όψεων . . . . .	202
II.3.1 Αβαθμονόμητη προβολική αποκατάσταση . . . . .	206
II.3.2 Αυτοβαθμονόμηση . . . . .	207
II.4 Παραγοντοποίηση . . . . .	211
II.4.1 3Δ ψηφιακό αντίγραφο αραιού ή πυκνού νέφους . . . . .	213
II.5 Αναδιάταξη δέσμης (bundle adjustment) . . . . .	215
Βιβλιογραφία . . . . .	221
 <b>Παράρτημα ΙΙΙ Αριθμητικές μέθοδοι</b>	 <b>225</b>
III.1 Εισαγωγή . . . . .	225
III.2 Αποσύνθεση πινάκων . . . . .	225
III.2.1 Ανάλυση ιδιζουσών τιμών . . . . .	225
III.3 Ανάλυση ιδιοτιμών . . . . .	226
III.3.1 Παραγοντοποίηση QR . . . . .	228
III.3.2 Παραγοντοποίηση Cholesky . . . . .	229
III.4 Γραμμικά ελάχιστα τετράγωνα . . . . .	230
III.5 Ολικά ελάχιστα τετράγωνα . . . . .	232
III.6 Μη-γραμμικά ελάχιστα τετράγωνα . . . . .	233
Βιβλιογραφία . . . . .	235
 <b>Παράρτημα ΙV Απεικόνιση 3Δ εικόνων</b>	 <b>237</b>
IV.1 Εισαγωγή . . . . .	237
IV.2 Τεχνικές λύσεις απεικόνισης 3Δ εικόνων . . . . .	238
IV.2.1 Οθόνες σωλήνα καθοδικών ακτίνων . . . . .	241
IV.2.2 Οθόνες υγρών κρυστάλλων LCD . . . . .	243
IV.2.3 Οθόνες πλάσματος . . . . .	248

IV.2.4	Οθόνες LED . . . . .	250
IV.2.5	Προβολικά συστήματα . . . . .	251
IV.2.6	Στερεοσκοπική ηλεκτρονική απεικόνιση . . . . .	254
IV.3	Επιλογή συστήματος 3Δ απεικόνισης . . . . .	259
IV.4	Αναπαραγωγή 3Δ δεδομένων . . . . .	260
IV.4.1	Συσκευές 3Δ εκτύπωσης με απόθεση υλικών . . . . .	260
IV.4.2	Συσκευές 3Δ σμίλευσης . . . . .	261
IV.4.3	Συσκευές στερεολιθογραφίας . . . . .	261
IV.5	Διαδραστικές εφαρμογές 3Δ εικόνων . . . . .	262
IV.6	Παρουσίαση 3Δ αντικειμένων στο διαδίκτυο . . . . .	263
IV.6.1	Εικονικά μουσεία . . . . .	264
IV.6.2	Εικονικά μνημεία και πόλεις . . . . .	265
IV.6.3	Εικονική πραγματικότητα . . . . .	266
	Βιβλιογραφία . . . . .	275
<b>Παράρτημα V</b>	<b>Δημοσίευση στον παγκόσμιο ιστό</b>	<b>279</b>
V.1	Εισαγωγή . . . . .	279
V.2	Παραγωγή του πρωτογενούς υλικού . . . . .	279
V.3	Δημιουργία του 3Δ ψηφιακού αντιγράφου . . . . .	280
V.4	Επεξεργασία του 3Δ ψηφιακού αντιγράφου . . . . .	285
V.5	Δημιουργία ιστοσελίδας 3Δ ψηφιακού αντιγράφου . . . . .	288
	<b>Κατάλογος Εικόνων</b>	<b>289</b>
	<b>Κατάλογος Πινάκων</b>	<b>295</b>
	<b>Ακρωνύμια</b>	<b>297</b>
	<b>Γλωσσάρι</b>	<b>299</b>
	<b>Ευρετήριο</b>	<b>305</b>





—Ψηφιοποίηση είναι η διαδικασία μετατροπής ενός φυσικού μεγέθους σε ψηφιακό, με στόχο την αποθήκευση, διαχείριση και επεξεργασία του σε ψηφιακά υπολογιστικά συστήματα.

## Πρόλογος

Η ψηφιοποίηση μπορεί να ορισθεί ως ένα μέσο για τη διατήρηση της πληροφορίας που αφορά στην ιστορία, στην παράδοση, στη γλώσσα, στην τέχνη, στη θρησκεία, εν γένει στον πολιτισμό, συμπεριλαμβάνοντας ακόμα τις επιστήμες και την τεχνολογία. Η δημιουργία ενός ψηφιακού αντιγράφου έχει στόχο να συμπληρώσει τα κενά που ενδεχομένως δημιουργούνται μετά την καταστροφή των φυσικών οντοτήτων, αλλά και να προσφέρει καινοτόμες προσεγγίσεις στον τρόπο μελέτης, χρήσης και προβολής των αντιγράφων. Θα μπορούσε να πει κανείς ότι η ψηφιοποίηση είναι ένα μέσο για την επιβίωση αλλά και την ενίσχυση του πολιτισμού και της ιστορίας.

Το παρόν σύγγραμμα έχει ως βασικό στόχο την εισαγωγή του αναγνώστη στο πεδίο της τριδιάστατης<sup>1</sup> (3Δ) ψηφιοποίησης και βασίζεται σε μια πληθώρα επιστημονικών πηγών. Στο επίκεντρο είναι μια προσπάθεια συγκέντρωσης και προβολής των βασικών ιδεών γύρω από τις αρχές λειτουργίας των διαφόρων μεθόδων ψηφιοποίησης, τον τρόπο εφαρμογής τους, καθώς και τις ανάγκες και προκλήσεις που προκύπτουν σε εξαιρετικά απαιτητικές εφαρμογές της στο χώρο της πολιτιστικής κληρονομιάς. Ο χώρος της πολιτιστικής κληρονομιάς έχει επιλεγεί ως ιδιαίτερα ενδεικτικός για τις προκλήσεις που μπορούν να εμφανιστούν κατά την ψηφιοποίηση, αλλά και για την πλούσια μελέτη περιπτώσεων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων σχετικά με την πρακτική εφαρμογή της ψηφιοποίησης.

Καθώς είναι εκτός του σκοπού του παρόντος συγγράμματος, το κείμενο δεν περιλαμβάνει λεπτομέρειες υλοποίησης για κάθε μια από τις μεθόδους 3Δ ψηφιοποίησης, αλλά συγκεντρώνει ένα μεγάλο πλήθος αναφορών από τη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία και πρακτική, μέσα από την οποία ο αναγνώστης μπορεί να συνεχίσει την προσωπική του μελέτη σε όποια από τα ειδικά θέματα επιθυμεί να επικεντρώσει την ερευνητική του δραστηριότητα.

Το σύγγραμμα καλύπτει επίσης μια σειρά από ειδικά θέματα, όπως είναι τα κριτήρια επιλογής της βέλτιστης μεθόδου σύμφωνα με τις ανάγκες ενός έργου ψηφιοποίησης, τα χαρακτηριστικά και η λειτουργικότητα των λογισμικών που σχετίζονται με την επεξεργασία και μετατροπή 3Δ δεδομένων, παραδείγματα 3Δ ψηφιοποίησης που συναντιούνται στη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία αλλά και γενικότερα θέματα που αποβλέπουν στην καλύτερη κατανόηση της

---

<sup>1</sup> Παρατηρήστε ότι ο ορθός όρος είναι τριδιάστατη και όχι τρισδιάστατη που έχει εσφαλμένα επικρατήσει. Το ίδιο ισχύει και για τη διδιάστατη σε αντίθεση με την εσφαλμένη δισδιάστατη.

3Δ ψηφιοποίησης και σχετίζονται με βέλτιστες πρακτικές συλλογής δεδομένων και 3Δ αναπαραστάσεων.

Η παρούσα Β' έκδοση του συγγράμματος διαφοροποιείται από την Α' έκδοση, καθώς έχει γίνει σημαντική προσπάθεια βελτίωσης όλου του κειμένου, αλλαγή και βελτίωση όλων των εικόνων, ανανέωση των κειμένων σύμφωνα με τις σύγχρονες εξελίξεις, αλλά και προσθήκη νέων πληροφοριών, όπως για παράδειγμα η ειδική αναλυτική παρουσίαση με πρακτικές συμβουλές για την εφαρμογή της πλέον διαδεδομένης, σήμερα, φωτογραμμετρικής μεθόδου με τον τίτλο Δομή από κίνηση, όπου περιλαμβάνονται πλέον πρακτικές συμβουλές εφαρμογής ακόμη και στην περίπτωση χρήσης συστημάτων μη επανδρωμένων αεροσκαφών (ΣμηΕΑ) ή drones.

*Ανέστης Κουτσούδης & Γιώργος Παυλίδης,  
2019.*

*—Computer graphics started with the display of data on hardcopy plotters and cathode ray tube screens soon after the introduction of computers themselves. It has grown to include the creation, storage, and manipulation of models and images of objects. These models come from a diverse and expanding set of fields and include physical, mathematical, engineering, architectural and even conceptual structures, natural phenomena and so on.*

Foley, van Dam, Feiner, Hughes



## 3Δ γραφικά υπολογιστών

### 1.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται μια σύντομη εισαγωγή στο αντικείμενο των 3Δ γραφικών υπολογιστών. Βασικός λόγος ύπαρξης του κεφαλαίου είναι η παρουσίαση κάποιων εισαγωγικών εννοιών, οι οποίες είναι απαραίτητες για τη μετέπειτα κατανόηση των μεθόδων 3Δ ψηφιοποίησης και των δεδομένων που προκύπτουν από αυτές. Το κεφάλαιο περιλαμβάνει μία σύντομη ιστορική αναδρομή στο χώρο των γραφικών υπολογιστών ενώ περιγράφει τα πλεονεκτήματα των 3Δ γραφικών σε σχέση με τα ψηφιογραφικά (bitmap) διδιάστατα (2Δ) γραφικά. Συνεχίζει με αναφορές σε τεχνολογίες απεικόνισης 3Δ γραφικών και στα βασικά δομικά στοιχεία ενός 3Δ μοντέλου, καθώς και στις λογικές αναπαραστάσεις σε προγραμματιστικό επίπεδο. Περιλαμβάνει αναφορές σε ειδικές τεχνικές δυναμικής διαμόρφωσης των 3Δ μοντέλων, ενώ γίνονται περιγραφές των μεθόδων δόμησης 3Δ διακριτών επιφανειών (3D models data structures) καθώς και των διαδικασιών απεικόνισης ή «οπτικοποίησής» τους (visualisation). Επίσης, γίνεται μία εισαγωγή στην ορολογία που χρησιμοποιείται στο χώρο των 3Δ γραφικών. Καθώς η ορολογία αυτή έχει τις ρίζες της στην Αγγλική γλώσσα και η απόδοση της στην Ελληνική είτε δεν έχει οριστικοποιηθεί είτε δεν επικράτησε, θεωρείται χρήσιμο να υπάρχει μια παράγραφος που συγκεντρώνει τους βασικούς ορισμούς, αυξάνοντας έτσι την αυτονομία του κειμένου. Το κεφάλαιο καταλήγει σε απλό παράδειγμα προγραμματισμού 3Δ γραφικών με τη χρήση της βιβλιοθήκης Open Graphics Language (OpenGL). Οι τεχνολογίες γραφικών περιγράφονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να δώσουν στο μέσο αναγνώστη μια πρώτη γεύση. Για μεγαλύτερη ανάλυση της υλοποίησης των τεχνολογιών αυτών θα πρέπει κανείς να ανατρέξει στη σχετική βιβλιογραφία.

*Ως γραφικά υπολογιστή (computer graphics) ορίζουμε τις συνθετικές απεικονίσεις αντικειμένων και δεδομένων με τη χρήση υπολογιστή. Πρακτικά, σε ένα ψηφιακό υπολογιστικό σύστημα, οτιδήποτε δεν είναι κείμενο και ήχος είναι γραφικά.*

Για τους ειδικούς του χώρου, ο όρος αυτός συνήθως εμπλέκει και τη δράση ανθρώπου-υπολογιστή, συμπεριλαμβάνοντας τη δημιουργία, το χειρισμό, την ανάλυση και την αλληλεπίδραση ψηφιακών απεικονίσεων με τη χρήση υπολογιστή. Πιο τεχνικά, τα γραφικά ορίζονται ως η δημιουργία, επεξεργασία και παρουσίαση συνθετικών εικόνων με τη χρήση υπολογιστή (Akenine-Möller and Haines, 2002; Foley et al., 2005; Spalter, 1998). Κάποιοι από τους τομείς στους οποίους βρίσκουν εφαρμογή τα 3Δ γραφικά είναι τα ηλεκτρονικά παιχνίδια, η τηλεόραση, ο κινηματογράφος (π.χ. τα ειδικά οπτικά εφέ), τα γεωγραφικά πληροφοριακά συστήματα (Geographical Information Systems (GIS)), η οπτικοποίηση δεδομένων (π.χ. 3Δ οπτικοποίηση χημικών ενώσεων), ο βιομηχανικός σχεδιασμός (π.χ. αντίστροφη μηχανική, κατασκευή προτύπων), η ιατρική (π.χ. 3Δ ογκομετρική οπτικοποίηση αξονικών τομογραφιών), οι προσομοιώσεις (π.χ. ρευστοδυναμική), η εικονική πραγματικότητα (π.χ. διαδραστικές 3Δ περιηγήσεις), καθώς και η διάδοση του πολιτιστικού αποθέματος. Οι δύο βασικές κατηγορίες στις οποίες θα μπορούσε κανείς να διαχωρίσει τα 2Δ γραφικά (Εικόνα 1.1), είναι (α) αυτά των διανυσματικών εικόνων (vector graphics), οι οποίες αποτελούνται από αντικείμενα σχεδίασης (γραμμές, ορθογώνια, ελλείψεις, τόξα, κλπ.) που βασίζονται σε ειδικά μαθηματικά μοντέλα, και (β) οι χαρτογραφικές ή ψηφιογραφικές εικόνες (bitmap graphics) που αναπαρίστανται ως ένας διδιάστατος πίνακας διακριτών τιμών με διαστάσεις  $N \times M$  εικονοστοιχείων (pixels<sup>1</sup>). Οι εικόνες αυτές χαρακτηρίζονται από:

- **Διαστάσεις**, για παράδειγμα  $1024 \times 768$  pixels.
- **Ανάλυση** (resolution) σε μονάδες pixels per inch (ppi): πρόκειται για την πυκνότητα των εικονοστοιχείων ανά μονάδα μήκους/πλάτους σε μια οθόνη. Αντίστοιχα η ανάλυση κατά την εκτύπωση (πυκνότητα εκτύπωσης) στο χαρτί ορίζεται σε μονάδες dots per inch (dpi).
- **Χρωματικό βάθος** (colour depth): το πλήθος των διακριτών φασματικών συνιστωσών και το εύρος της δυναμικής περιοχής των τιμών των pixel. Για παράδειγμα, σε μια τυπική συσκευή απεικόνισης υπάρχουν τρεις συνιστώσες χρώματος (κόκκινο, πράσινο, μπλε) με 0-255 διαβαθμίσεις για κάθε συνιστώσα. Η συσκευή αυτή λέγεται ότι έχει βάθος χρώματος 24 bits per pixel (bpp), καθώς κάθε συνιστώσα απαιτεί 8 bpp και συνεπώς η συσκευή αυτή μπορεί να απεικονίσει συνολικά  $(2^8)^3 = 2^{24} = 16.777.216$  διαφορετικά χρώματα.

<sup>1</sup>Ο όρος pixel προέρχεται από τη σύντμηση των όρων [pict]ure [el]ement  $\rightarrow$  pictel  $\rightarrow$  pixel.





Εικόνα 1.1. Ψηφιογραφικές και διανυσματικές εικόνες.

Αντίθετα με μια ψηφιακή εικόνα δύο διαστάσεων, μια εικόνα 3Δ γραφικών δεν είναι δυνατό να αναπαρίσταται ως ένας πίνακας από pixels αλλά ως μια λογικά δομημένη συλλογή από 3Δ αντικείμενα που περιγράφονται από επιφάνειες (facets) και κορυφές (vertices) ορισμένες στον 3Δ χώρο. Βέβαια, κάθε 3Δ εικόνα τελικά προβάλλεται σε μια τυπική οθόνη με δυνατότητα διδιάστατης προβολής. Αυτό γίνεται με τη χρήση ειδικών αλγορίθμων και μαθηματικών μετασχηματισμών που προβάλλουν μια κατάλληλη όψη της 3Δ εικόνας στο επίπεδο απεικόνισης της οθόνης.

Γενικά, τα 3Δ γραφικά περιέχουν πληροφορία που αφορά στη γεωμετρική δομή και στην υφή<sup>2</sup> των αντικειμένων που απεικονίζουν. Τα 3Δ γραφικά δημιουργούνται είτε εκ του μηδενός με τη βοήθεια ειδικευμένου λογισμικού σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, είτε μέσω διαδικασιών 3Δ ψηφιοποίησης. Τα 3Δ γραφικά αποτελούν ένα πολυποίκιλο πεδίο έρευνας με μία από τις βασικές του περιοχές να αφορά στην απόδοση φωτορεαλιστικών ψηφιακών απεικονίσεων με όσο το δυνατό μεγαλύτερη πιστότητα και ακρίβεια.

Η χρήση 3Δ γραφικών παρέχει μια ευχέρεια παρεμβάσεων από το χρήστη. Οι παρεμβάσεις αυτές μπορεί να είναι δομικές ή απεικονιστικές και να επιτρέπουν (α) την εισαγωγή, αφαίρεση, μετακίνηση και παραμόρφωση αντικειμένων, (β) τη διαμόρφωση του φωτισμού και της σκίασης (shading) αντικειμένων, (γ) τη χαρτογράφηση υφής (δηλαδή την αντιστοίχιση μιας ψηφιογραφικής εικόνας στην επιφάνεια ενός αντικειμένου, με αποτέλεσμα ένα γεωμετρικό αντικείμενο να αποκτά την «υφή» κάποιου υλικού), (δ) τη φωτορεαλιστική απόδοση (rendering), δηλαδή η μετατροπή του 3Δ μοντέλου σε μια 2Δ εικόνα, ή εικονοσειρά (βίντεο), με συγκεκριμένες προδιαγραφές ή επιθυμητά αποτελέσματα (ανάλυση, βάθος χρωμάτων, κλπ.).

Οι τεχνολογίες απεικόνισης 3Δ γραφικών μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις γενικές κατηγορίες, οι οποίες σήμερα, δεδομένης της εξέλιξης της τε-

<sup>2</sup>Στο χώρο των γραφικών με υπολογιστή, ο όρος «υφή» χρησιμοποιείται για να ορίσει την τελική μορφή με την οποία εμφανίζεται ένα αντικείμενο και ως εκ τούτου σημαίνει ουσιαστικά το «χρώμα».

χνολογίας και των αλγορίθμων γραφικών υπολογιστών, παρουσιάζουν κοινά σημεία:

- **Η απεικόνιση σε πραγματικό χρόνο (real time 3D graphics)** βασίζεται σε τεχνικές και υλοποιήσεις ειδικών αλγορίθμων σε υλικοτεχνικό εξοπλισμό (hardware) και συγκεκριμένα στις κάρτες-επιταχυντές γραφικών (3D hardware accelerators graphics cards). Η πρόοδος της συγκεκριμένης υλικοτεχνικής υποδομής επιτρέπει σήμερα την εκτέλεση δαπανηρών υπολογισμών φωτισμού και χρωματισμού πολύπλοκων επιφανειών σε πολύ γρήγορους ρυθμούς (τυπικά σε πραγματικό χρόνο). Ως εκ τούτου, η ποιότητα των απεικονιζόμενων γραφικών που σε προηγούμενες δεκαετίες θεωρούνταν «κινηματογραφική», μπορεί σήμερα να επιτευχθεί σε πραγματικό χρόνο σε έναν τυπικό προσωπικό υπολογιστή. Αν θα έπρεπε να αναφερθούν μερικές από τις δυνατότητες της ολοένα και αυξανόμενης λίστας δυνατοτήτων που παρέχουν οι σημερινές κάρτες γραφικών, τα παρακάτω θα μπορούσαν να συνοψίσουν τις εξελίξεις: (α) υπολογισμοί σκίασης σε κάθε εικονοστοιχείο που σχεδιάζεται, (β) γεωμετρικοί μετασχηματισμοί, (γ) πολλαπλά «περάσματα» χρώματος (lightmaps, detail textures), (δ) μεγάλο δυναμικό εύρος παλέτας (48-128 bpp χρώμα), (ε) απεικόνιση ανάγλυφου (πληροφορία υψής), (στ) εξομάλυνση επιφανειών και γραμμών (MIP mapping ή mipmapping), (ζ) έξυπνη απόκρυψη περιττών επιφανειών, (η) προγραμματιζόμενα εφέ (shaders, normal mapping, displacement mapping, κλπ.). Ο Πίνακας 1.1 δίνει μια συγκριτική εικόνα χαρακτηριστικών επιδόσεων σύγχρονων επιταχυντών 3D γραφικών.
- **Η φωτορεαλιστική απόδοση** είναι η οπτικοποίηση μιας «σκηνής» 3D γραφικών με ρεαλιστικό τρόπο, έτσι ώστε να επιτευχθούν υψηλής ποιότητας και πιστότητας αισθητικά αλλά και ρεαλιστικά αποτελέσματα που σχετίζονται με το φωτισμό, τη φωτοσκίαση, τις ανακλάσεις φωτός, τις ανάγλυφες επιφάνειες, την τεχνητή απόδοση υγρών, αερίων και διαφάνειας ή ημιδιαφάνειας. Η φωτορεαλιστική απόδοση βασίζεται σε αλγορίθμους που απαιτούν υψηλή υπολογιστική ισχύ και επεξεργαστικό κόστος για την επίτευξη της προσομοίωσης μαθηματικών μοντέλων φωτισμού, σκίασης αλλά και κίνησης βάσει των νόμων της φυσικής. Οι αλγόριθμοι φωτορεαλιστικής απόδοσης είναι στην πραγματικότητα προσομοιωτές της διάδοσης και διάχυσης του φωτός μέσα σε ένα διακριτό 3D περιβάλλον. Ένας από τους διαδεδομένους αλγορίθμους φωτορεαλισμού βασίζεται στην ιχνηλασία της διαδρομής που ακολουθεί μέσα στην 3D σκηνή μια δέσμη φωτός (ray tracing), η οποία ξεκινά από μια συνθετική πηγή φωτός και συνεχίζει την πορεία της στο χώρο καθώς υφίσταται ανάκλαση, διάθλαση ή περίθλαση από τα αντικείμενα της 3D σκηνής. Η υλοποίηση της φωτορεαλιστικής απόδοσης σε ιδιαίτερα πολύκλοκες 3D σκηνές απαιτεί πολλές φορές τη χρήση συστοιχιών υπολογιστών, γνωστών ως rendering farms. Μια διαδεδομένη προσέγγιση κατά τη χρήση

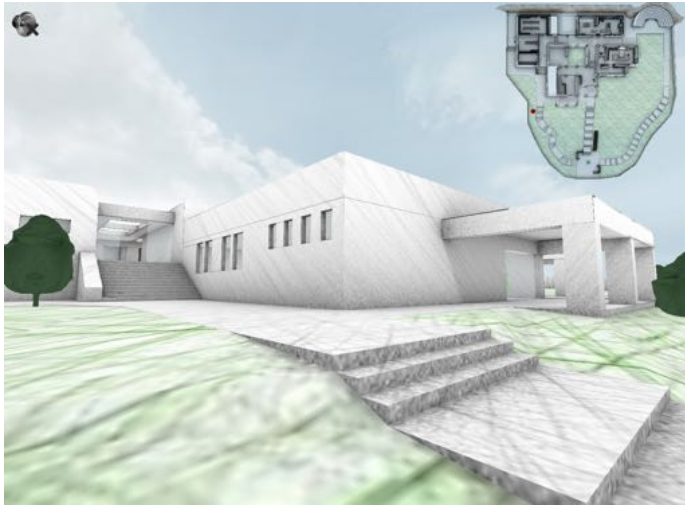
**Πίνακας 1.1.** Ενδεικτικός συγκριτικός πίνακας σύγχρονων επιταχυντών 3Δ γραφικών.

Feature	Nvidia GeForce GTX 1050 3GB	AMD Radeon RX 580	Nvidia GeForce GTX 1070	Nvidia GeForce GTX 1080	Nvidia GeForce GTX 2080 Ti
GPU	GP107	Polaris 10 (GCN 4.0)	Pascal (GP104)	Pascal (GP104)	Turing (TU102)
Process	14 nm	14 nm	14 nm	14 nm	14 nm
Shader Units	768	2304	1920	2560	4352
Texture Units	48	144	160	160	272
ROPs	24	32	64	64	88
Core Clock	1392 MHz	1411 MHz	1506 MHz	1607 MHz	1350 MHz
Memory Data Rate	7 Gbps	8 GT/s	8 Gbps	11 Gbps	14 Gbps
Memory bus	96-bit	256-bit	256-bit	256-bit	352-bit
Memory bandwidth	84.1 Gbps	256 Gbps	256 Gbps	256 Gbps	616 Gbps
Memory Capacity	3 GB	4 GB or 8 GB	8 GB	8 GB	11 GB GDDR5X
3D APIs	DirectX 12, OpenGL 4.5, Vulkan	DirectX 12, OpenGL 4.5, Vulkan	DirectX 12, OpenGL 4.5, Vulkan	DirectX 12, OpenGL 4.5, Vulkan	DirectX 12, OpenGL 4.5, Vulkan
TDP	75 W	185 W	150 W	180 W	260 W
Power Connections	-	1x 8-pin, 1x 6-pin	1x 8-pin	1x 8-pin	2x 8-pin
Power Supply	300 W	500 W	500 W	500 W	600 W

των rendering farms είναι η κατάτμηση των εργασιών φωτορεαλιστικής απόδοσης και η κατανομή των τμημάτων σε διαφορετικούς υπολογιστές (τμήμα μιας εικόνας ή ενός ολόκληρου καρέ σε περίπτωση εικονοσειρών ανατίθεται σε συγκεκριμένο υπολογιστή). Κάποια δημοφιλή λογισμικά 3Δ μοντελοποίησης με ενσωματωμένους αλγορίθμους φωτορεαλιστικής απόδοσης είναι τα 3D Studio Max, Blender και Cinema 4D.

- **Η μη φωτορεαλιστική απόδοση** αφορά εναλλακτικές μεθόδους οπτικοποίησης 3Δ γραφικών με κεντρικό στόχο την επίτευξη διαφορετικών αισθητικών, όπως για παράδειγμα συνθετικές νερομπογιές, σκίτσο από μολύβι, πινέλο ζωγραφικής, οπτικοποίηση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών της 3Δ γεωμετρίας (σιλουέτα), οπτική ενίσχυση του ανάγλυφου μίας επιφάνειας, προσομοίωση ακτίνων-X, κλπ.

Στην Εικόνα 1.2 παρουσιάζεται παράδειγμα μη-φωτορεαλιστικής απόδοσης στη δημιουργία μιας διαδραστικής εφαρμογής εικονικού μουσείου, συγκεκριμένα του μουσείου του απολιθωμένου δάσους της Λέσβου, όπου ενώ η γεωμετρία του χώρου είναι ορθή, η υφή είναι απόλυτα τεχνητή (και μη-ρεαλιστική). Η τεχνική αυτή χρησιμοποιήθηκε καθώς η εφαρμογή προοριζόταν για χρήση στο εσωτερικό του μουσείου και δεν υπήρχε λόγος να παρέχει μια πιστή ανα-



Εικόνα 1.2. Μη-φωτορεαλιστική απόδοση 3Δ σκηνής.



Εικόνα 1.3. Φωτορεαλισμός με το λογισμικό Blender 3D – Classroom Demo Scene.

παράσταση του χώρου μέσα στον οποίο βρισκόταν. Στην Εικόνα 1.3 παρουσιάζεται τυπικό παράδειγμα φωτορεαλιστικής απόδοσης μιας περίπλοκης 3Δ σκηνής.

Αν θα έπρεπε να αναφερθούν κάποιες περίοδοι-ορόσημα στην εξέλιξη των γραφικών υπολογιστών, αυτές είναι οι εξής:

- **Δεκαετία του 1960:** Περίοδος κατά την οποία πραγματοποιείται η πρώτη έρευνα και ανάπτυξη της θεωρίας 3Δ γραφικών, η οποία όμως βρίσκεται περιορισμένη αποκλειστικά σε στρατιωτικούς και ακαδημαϊκούς χώρους.

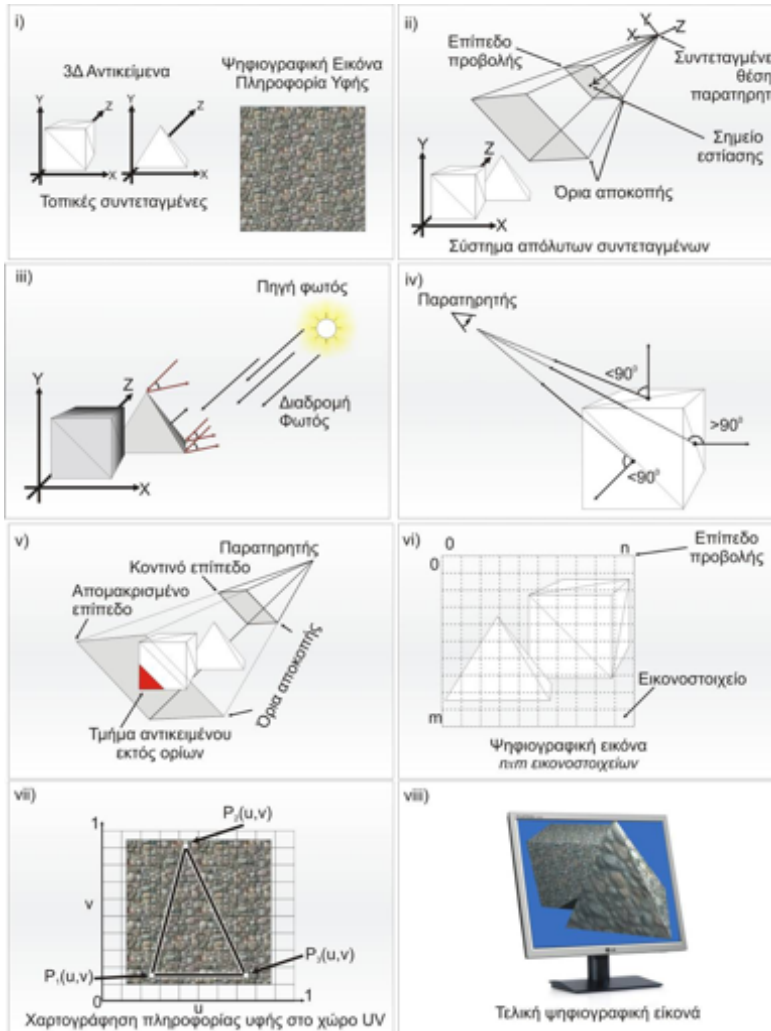
- **Δεκαετία του 1970:** Ανάπτυξη της «διασωλήνωσης» απεικόνισης 3Δ γραφικών (3D graphics pipeline — περιγράφεται παρακάτω), ενώ παράλληλα η εφαρμοσμένη έρευνα εστιάζεται σε στρατιωτικές προσομοιώσεις και τη σχεδίαση στο χώρο της αυτοκινητοβιομηχανίας. Η τεχνολογία 3Δ γραφικών αρχίζει να βρίσκει εφαρμογές στη βιομηχανία του κινηματογράφου.
- **Δεκαετία του 1980:** Ανάπτυξη μίας σειράς σημαντικών αλγορίθμων οπτικοποίησης, βελτίωση της ποιότητας απεικόνισης των γραφικών με στόχο την κάλυψη αναγκών της βιομηχανίας κινηματογράφου. Την ίδια δεκαετία, παρουσιάζονται οι πρώτες γενικευμένες εμπορικές εφαρμογές σχεδίασης και επεξεργασίας 3Δ γραφικών, ενώ κάποιες από αυτές παρέχουν και δυνατότητες δημιουργίας κίνησης.
- **Δεκαετία του 1990:** Ανάπτυξη εξελιγμένων τεχνικών και αλγορίθμων φωτορεαλιστικής οπτικοποίησης, με εστίαση της ερευνητικής προσπάθειας σε θέματα όπως η κίνηση (animation), η συλλογή δεδομένων (μοντελοποίηση και 3Δ ψηφιοποίηση), η κωδικοποίηση, αλλά και θέματα εφαρμογών των νόμων της φυσικής και τις μη-φωτορεαλιστικές αποδόσεις (non-photorealistic rendering). Παράλληλα, δίνεται έμφαση στα 3Δ γραφικά πραγματικού χρόνου και στην αλληλεπίδραση με το χρήστη.
- **Σήμερα** η φωτορεαλιστική απόδοση αγγίζει πλέον επίπεδα αληθοφάνειας τέτοια ώστε να αποτελεί πλέον πρόκληση ο διαχωρισμός μιας συνθετικής από μια πραγματική εικόνα (Εικόνα 1.3). Παρατηρούνται έντονα φαινόμενα ώσμωσης στις ερευνητικές περιοχές της όρασης υπολογιστών (computer vision) και των γραφικών. Πλέον, μια πληθώρα από κάρτες γραφικών διαρκώς αυξανόμενης υπολογιστικής ισχύος υλοποιούν την προβολή φωτορεαλιστικών 3Δ σκηνών σε πραγματικό χρόνο.

Αξίζει να αναφερθεί σε αυτό το σημείο πως οι περισσότερες εξελίξεις στο χώρο των 3Δ γραφικών προέκυψαν τελικά από τις ανάγκες της βιομηχανίας κινηματογράφου, των στρατιωτικών εφαρμογών και των εφαρμογών ευρείας κατανάλωσης, ανάμεσα στις οποίες εντοπίζεται η βιομηχανία ηλεκτρονικών παιχνιδιών.

## 1.2 Απεικόνιση 3Δ μοντέλων

Η διασωλήνωση<sup>3</sup> της απεικόνισης ενός 3Δ μοντέλου (3D graphics pipeline) ανεξάρτητα από τις τεχνικές αναπαράστασης που χρησιμοποιούνται βασίζεται στα εξής (Εικόνα 1.4):

<sup>3</sup>Ο όρος «διασωλήνωση» αποτελεί μεταφορά στην ελληνική γλώσσα του αντίστοιχου αγγλικού όρου “pipeline” που χρησιμοποιείται για να δηλώσει μια συγκεκριμένη ροή εργασιών προς ένα επιθυμητό αποτέλεσμα.



Εικόνα 1.4. Δημιουργία και προβολή 3Δ γραφικών σε 2Δ μονάδα εξόδου.

- **Ορισμός αντικειμένων και 3Δ σκηνής** (Εικόνα 1.4.i): Μια 3Δ σκηνή αποτελείται από ένα σύνολο 3Δ αντικειμένων καθώς και από δεδομένα που ορίζουν την πληροφορία υψής των επιφανειών των αντικειμένων (π.χ. ψηφιογραφικές εικόνες texture map). Επιπλέον, περιλαμβάνονται πληροφορίες που αφορούν στις συνθήκες φωτισμού, τη θέση και τη μέθοδο παρατήρησης της σκηνής και τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλονται τα αντικείμενα ως προς τη θέση και τη μορφή τους (animation). Οι δομές δεδομένων των αντικειμένων καθορίζονται χρησιμοποιώντας μία ή και περισσότερες τεχνικές αναπαράστασης και ορίζονται αρχικά σε ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων εφαρμόζοντας συσχετισμένους μετασχηματισμούς (affine transformations – διατήρηση παραλληλίας).

- **Γεωμετρικός Μετασχηματισμός Μοντέλων** (Εικόνα 1.4.ii): Κατά τη διαδικασία αυτή εφαρμόζονται μια ακολουθία συσχετισμένων μετασχηματισμών με στόχο την προσαρμογή των 3Δ αντικειμένων στο σύστημα συντεταγμένων του παρατηρητή. Ο παρατηρητής στον εικονικό κόσμο της 3Δ σκηνής αποτελεί πρακτικά μία εικονική «κάμερα», για την οποία ορίζεται ένα σύνολο παραμέτρων που καθορίζουν τις συνθήκες παρατήρησης της σκηνής. Οι παράμετροι αυτές αφορούν στη θέση του παρατηρητή μέσα στο χώρο, τον τρόπο προβολής της σκηνής (π.χ. ορθογραφική ή προοπτική προβολή) πάνω στο επίπεδο παρατήρησης, το σημείο εστίασης, αλλά και τα όρια του χώρου που αποτυπώνονται πάνω σε αυτό το επίπεδο (όρια αποκοπής - clipping).
- **Υπολογισμός Φωτισμού** (Εικόνα 1.4.iii): Υπολογίζεται ο φωτισμός των επιφανειών (π.χ. αναδρομική ανάκλαση φωτός ανάμεσα στις επιφάνειες των αντικειμένων, υπολογισμένη σημειακά με χρήση πεπερασμένου πλήθους προσπιπτουσών και ανακλώμενων ακτίνων φωτός) σύμφωνα με τις θέσεις και τα χαρακτηριστικά των προκαθορισμένων πηγών φωτός και τα χαρακτηριστικά των επιφανειών των αντικειμένων (δείκτες ανάκλασης, διάθλασης, τραχύτητας, κα). Οι σύγχρονοι επιταχυντές γραφικών διαθέτουν ενσωματωμένες υλοποιήσεις αλγορίθμων που εκτιμούν όλα τα παραπάνω σε μικρούς χρόνους, υπολογίζοντας τα χαρακτηριστικά φωτισμού είτε μόνο στις κορυφές των επιφανειών της 3Δ γεωμετρίας είτε σε διακριτά τμήματα των επιφανειών, έτσι, ώστε οι αναγκαίες ενδιάμεσες τιμές στις επιφάνειες των αντικειμένων να υπολογίζονται με διαδικασίες παρεμβολής (interpolation). Η συγκεκριμένη προσέγγιση συμβάλει στην αποτελεσματικότητα των επιταχυντών 3Δ γραφικών στην παρουσίαση ρεαλιστικά φωτοσκιασμένων σκηνών σε πραγματικό χρόνο.
- **Απαλοιφή κρυφών επιφανειών** (Εικόνα 1.4.iv): Μια επιφάνεια «αποκόπτεται» όταν το διάνυσμα που προσδιορίζει τον προσανατολισμό της σχηματίζει γωνία  $> 90^\circ$  με το διάνυσμα θέσης του παρατηρητή. Πρακτικά, οτιδήποτε δεν είναι ορατό στον παρατηρητή, αλλά, εξαιρείται από τους υπολογισμούς απόδοσης της σκηνής.
- **Αποκοπή τμημάτων αντικειμένων που βρίσκονται εκτός ορίων** (Εικόνα 1.4.v): Η θέση του παρατηρητή περιλαμβάνει παραμέτρους που καθορίζουν το τμήμα του 3Δ χώρου το οποίο θα καταλήξει πάνω στο επίπεδο προβολής. Όπως και στον πραγματικό κόσμο, ο παρατηρητής έχει ένα περιορισμένο εύρος αποστάσεων στις οποίες μπορεί να παρατηρήσει αντικείμενα. Τα τμήματα των αντικειμένων που βρίσκονται εκτός των ορίων αυτών δε λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς.
- **Προβολή της σκηνής στο επίπεδο παρατήρησης** (Εικόνα 1.4.vi): Περιλαμβάνει τη διαδικασία μετασχηματισμού της σκηνής σε 2D ψηφιογρα-

φική εικόνα, το περιεχόμενο της οποίας προκύπτει από το μετασχηματισμό προβολής της 3Δ σκηνής στο 2Δ επίπεδο προβολής που ορίζεται από τις παραμέτρους του παρατηρητή.

- **Απόδοση πληροφορίας υφής** (Εικόνα 1.4.vii): Για κάθε ένα από τα εικονοστοιχεία της 2Δ εικόνας υπολογίζεται το χρώμα που προκύπτει από τη χαρτογράφηση ψηφιογραφικών εικόνων πάνω στις επιφάνειες των 3Δ μοντέλων. Η πληροφορία υφής είναι η χωρική διαμόρφωση των ποιοτικών χαρακτηριστικών της επιφάνειας ενός αντικειμένου (χρώμα, διαφάνεια, ανάγλυφο, ομαλότητα, κοκ). Η διαδικασία απόδοσης της υφής σε κάθε σημείο της επιφάνειας ονομάζεται απεικόνιση ή αντιστοίχιση υφής (texture mapping). Είναι η επικάλυψη της γεωμετρίας ενός αντικειμένου με μία εικόνα (image mapping) που πραγματοποιείται σε ένα 2Δ κανονικοποιημένο χώρο με την ονομασία UV space, ενώ η διαδικασία ονομάζεται UV mapping. Στη διαδικασία αυτή, για κάθε κορυφή της γεωμετρίας ενός 3Δ αντικειμένου αποθηκεύεται ένα ζεύγος συντεταγμένων  $(u, v)$ . Ένας σύγχρονος επιταχυντής 3Δ γραφικών μπορεί να αναπαραστήσει πολύ περισσότερα από 30 δισεκατομμύρια εικονοστοιχεία με πληροφορία υφής (γνωστά και ως textels) ανά δευτερόλεπτο (texture fill rate). Η χρήση της πληροφορίας υφής (textures maps) αποσκοπεί στην απόδοση ρεαλισμού αλλά και στην προσέγγιση της οπτικοποίησης χαρακτηριστικών κάποιων επιφανειών που με κλασική μοντελοποίηση θα ήταν δύσκολο να αποδοθούν. Καθώς είναι η διαδικασία με την οποία αποδίδεται φωτορεαλισμός στη σκηνή, η χρήση υφής υψηλής πιστότητας μπορεί να βοηθήσει στη μείωση της απαιτούμενης γεωμετρικής πληροφορίας για το ίδιο αντικείμενο.

Σύμφωνα με μελέτη των Cho et al. (2003) οι περισσότεροι άνθρωποι θεωρούν την πληροφορία υφής πιο σημαντικό χαρακτηριστικό για την επίτευξη πιστού φωτορεαλισμού σε μια εικονική σκηνή γραφικών σε σχέση με τη λεπτομερή γεωμετρική πολυπλοκότητα<sup>4</sup>.

- **Προβολή – Απεικόνιση** (Εικόνα 1.4.viii): Η τελική εικόνα προβάλλεται στο χρήστη μέσω μίας μονάδας εξόδου, όπως είναι η οθόνη ή ο εκτυπωτής (Koutsoudis, 2010; Papaioannou, 2001).

<sup>4</sup>Επισημαίνεται ότι αυξημένη γεωμετρική πληροφορία σημαίνει μεγάλη ακρίβεια και ανάλυση (πυκνότητα) και συνεπώς πιο λεπτομερή γνώση της δομής ενός 3Δ αντικειμένου. Αντίστοιχα, αυξημένη πληροφορία υφής σημαίνει λεπτομερέστερη γνώση των φασματικών επιφανειακών χαρακτηριστικών του αντικειμένου. Ίδανικά, οι δύο αυτές ποσότητες πληροφορίας θα πρέπει να είναι οι μεγαλύτερες δυνατές, αλλά είτε λόγοι οικονομίας υπολογιστικών πόρων σε απεικονίσεις (και μάλιστα εφαρμογές πραγματικού χρόνου) είτε λόγοι οικονομίας αποθηκευτικού χώρου, οδηγούν σε μια συντηρητική στάση στάθμισης μεταξύ των δύο αυτών ποσοτήτων ανάλογα με την εφαρμογή.



### 1.3 Αναπαράστασεις και δομικά στοιχεία 3Δ μοντέλων

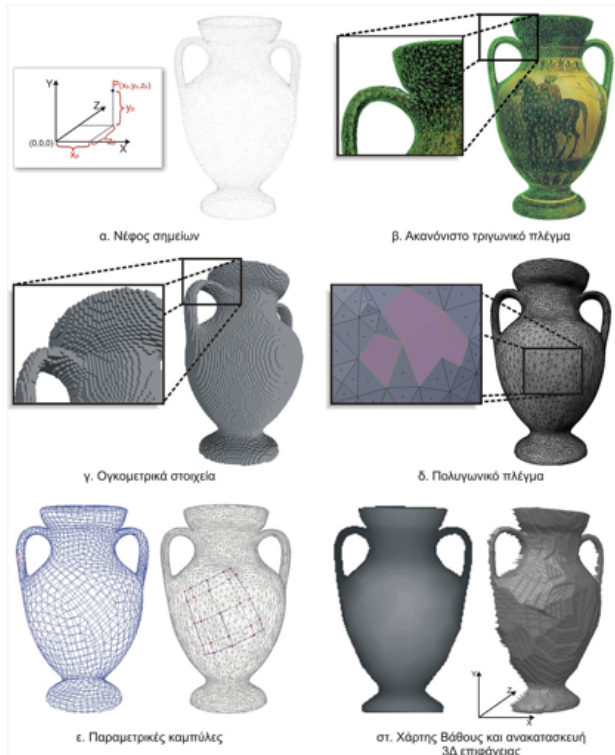
Το σχήμα, ορισμένο ως η *μορφολογία της επιφάνειας ενός αντικειμένου*, έχει μελετηθεί από φιλοσόφους, ψυχολόγους, μαθηματικούς αλλά και μηχανικούς. Καθώς οι διάφορες επιστήμες προσεγγίζουν τον όρο από διαφορετική οπτική γωνία, είναι αναμενόμενη η ύπαρξη πολλαπλών εννοιολογικών ερμηνειών. Στον ώριμο πλέον χώρο των 3Δ γραφικών, ένας ορισμός για το σχήμα θα μπορούσε να είναι ο ακόλουθος:

*Έστω ένας διακριτός χώρος  $n$  διαστάσεων. Το σχήμα ενός αντικειμένου που βρίσκεται στο χώρο αυτό καταλαμβάνει υποχρεωτικά ένα τμήμα του. Το τμήμα αυτό καθορίζεται από το εξωτερικά όρια της επιφάνειας του αντικειμένου, καθώς επίσης και από μια σειρά χωρικών ιδιοτήτων του, όπως είναι οι συντεταγμένες της θέσης του, ο προσανατολισμός του και η κλίμακα του.*

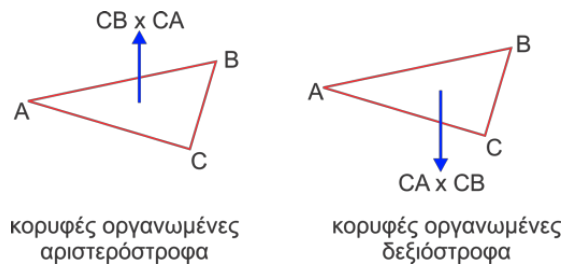
Η αναπαράσταση 3Δ διακριτών επιφανειών μπορεί να πραγματοποιηθεί από πληθώρα προσεγγίσεων, οι οποίες συγκεντρώνονται στην Εικόνα 1.5. Στόχος της κάθε προσέγγισης είναι η εκπλήρωση διαφορετικών αναγκών απεικόνισης.

Απαραίτητη, για την πληρότητα του παρόντος κεφαλαίου, είναι η παρουσία βασικών ορισμών που αφορούν σε οντότητες και τεχνικές αναπαράστασης 3Δ διακριτών επιφανειών που περιλαμβάνουν το ευθύγραμμο τμήμα, την έδρα, το διάνυσμα επιφάνειας, το νέφος σημείων, την τριγωνική και πολυγωνική πλεγματοσειρά, τα ογκομετρικά στοιχεία, τις παραμετρικές καμπύλες και επιφάνειες, καθώς και τη μέθοδο απεικόνισης χάρτη βάθους.

- **Κορυφή (vertex) και ευθύγραμμο τμήμα (line segment):** πρόκειται για τα βασικά δομικά γεωμετρικά στοιχεία, τα σημεία στο χώρο  $\mathbb{R}^3$  και τα ευθύγραμμα τμήματα που ενώνουν ή οριοθετούνται από δύο σημεία. Χαρακτηρίζονται από το απειροελάχιστο μέγεθος των σημείων και το απειροελάχιστο πλάτος των γραμμών, οι οποίες οριοθετούνται από τις συντεταγμένων των κορυφών που ορίζουν την αρχή και το τέλος τους στον  $\mathbb{R}^3$  και έχουν μια σταθερή πυκνότητα σημείων.
- **Έδρα (face):** ορίζεται ως η επιφάνεια τυχαίου σχήματος που προκύπτει από τη σύνδεση-οργάνωση τουλάχιστον τριών κορυφών με ευθύγραμμα τμήματα. Μια έδρα είναι πάντοτε μικρότερης διάστασης από το αντικείμενο στο οποίο ανήκει, όπως για παράδειγμα μια έδρα ενός κύβου (τρεις διαστάσεις) είναι μια επιφάνεια δύο διαστάσεων. Στην απλή γεωμετρία, μια έδρα ενός αντικειμένου είναι μια πολυγωνική δομή των ορίων της επιφάνειας του αντικειμένου. Παράδειγμα απλής τριγωνικής έδρας παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.6, όπου παρουσιάζονται τρεις κορυφές  $A, B, C$ , τρία αντίστοιχα ευθύγραμμα τμήματα  $AB, BC, CA$  και μια έδρα που



Εικόνα 1.5. Μέθοδοι απεικόνισης 3Δ διακριτών επιφανειών.



Εικόνα 1.6. Υπολογισμός διανυσμάτων επιφάνειας.

ορίζεται από την επιφάνεια που περιορίζουν τα τρία ευθύγραμμα τμήματα.

- **Διάνυσμα επιφάνειας (surface normal):** ορίζεται ως το διάνυσμα που προσδιορίζει τον προσανατολισμό μιας επιφάνειας στο χώρο  $\mathbb{R}^3$  και είναι κάθετο στην εν λόγω επιφάνεια (Εικόνα 1.6). Το διάνυσμα επιφάνειας χρησιμοποιείται για να λύσει την απροσδιοριστία του προσανατολισμού μιας επίπεδης (2Δ) επιφάνειας μέσα σε χώρο τριών διαστάσεων (απάντηση στο ερώτημα ποια είναι η «μέσα» και ποια η «έξω» πλευρά μιας επιφάνειας). Στο παράδειγμα στην Εικόνα 1.6, το διάνυσμα επιφάνειας

προκύπτει από τον υπολογισμό του εξωτερικού γινομένου μεταξύ δύο εκ των τριών ακμών του τριγώνου. Η σειρά με την οποία γίνεται το εξωτερικό γινόμενο είναι αυτή που καθορίζει τον προσανατολισμό της επιφάνειας. Λαμβάνοντας ωρολογιακή φορά στο εξωτερικό γινόμενο  $CB \times CA$  προκύπτει ότι η επιφάνεια έχω εξωτερική όψη προς τα πάνω (Εικόνα 1.6-αριστερά), ενώ λαμβάνοντας αντι-ωρολογιακή φορά στο εξωτερικό γινόμενο  $CA \times CB$  προκύπτει ότι η επιφάνεια έχει εξωτερική όψη προς τα κάτω (Εικόνα 1.6-δεξιά).

- **Νέφος σημείων (point cloud):** ορίζεται ως ένα σύνολο κορυφών (σημείων) που μοιράζονται το ίδιο 3Δ καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Κάθε κορυφή ορίζεται από τρεις συντεταγμένες, μία για κάθε άξονα  $P_{(x,y,z)}$ . Οι περισσότερες βιβλιοθήκες επιτάχυνσης 3Δ γραφικών ακολουθούν το σύστημα κανονικοποιημένων ομογενών συντεταγμένων με αποτέλεσμα το κάθε σημείο να αναπαρίσταται από τέσσερις συντεταγμένες  $P_{(x,y,z,w)}$  που συνήθως ανάγεται στην αναπαράσταση  $P_{(x/w,y/w,z/w,1)}$ . Για τις περισσότερες εφαρμογές απεικόνισης 3Δ αντικειμένων, η οπτική πληροφορία που προσφέρει το νέφος σημείων συνήθως δεν επαρκεί, όσο πυκνό και αν είναι. Πολλές φορές, εκτός από τις τρεις συνιστώσες της θέσης, μια κορυφή συνοδεύεται από χρωματικές συνιστώσες, οι οποίες είναι συνήθως τρεις,  $R$  για την ένταση του κόκκινου,  $G$  για την ένταση του πράσινου και  $B$  για την ένταση του μπλε. Στην περίπτωση αυτή το νέφος καλείται *έγχρωμο νέφος σημείων*. Επίσης, καθώς μια κορυφή, ως σημείο, είναι αδιάστατο μέγεθος (δεν έχει μέγεθος) για την προσομοίωση της αίσθησης βάθους και για τη διευκόλυνση του χρήστη στην κατανόηση της οπτικής πληροφορίας που παρέχει ένα νέφος σημείων χρησιμοποιείται η τεχνική της κλιμάκωσης της φωτεινότητας ή του μεγέθους των κορυφών, ανάλογα με την απόσταση του σημείου από το επίπεδο προβολής της θέσης παρατήρησης, ή από την αρχή των αξόνων του 3Δ καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων. Η αλλαγή μεγέθους επιτυγχάνεται αντικαθιστώντας το σημείο με μεταβλητού μεγέθους τετράγωνη επιφάνεια που είναι πάντα παράλληλη προς το επίπεδο προβολής (κάθετη στο θεατή). Ένα νέφος σημείων αναπαρίσταται προγραμματιστικά συνήθως από έναν πίνακα (array) ή μια συνδεδεμένη λίστα (linked list) με την κατάλληλη δομή δεδομένων για τη φιλοξενία των γεωμετρικών συντεταγμένων ή/και των χρωματικών συνιστωσών. Κάποιοι διαδεδομένοι μορφότυποι (formats) αρχείων για την περιγραφή νεφών σημείων είναι οι .ASC, .PSI (και οι δύο τύποι βασίζονται στο πρότυπο American Standard Code for Information Interchange (ASCII)).

.ASC	Monochrome PointCloud ASCII File Format (X,Y,Z)
	Colour PointCloud ASCII File Format (X,Y,Z,R,G,B)
.PSI	Colour PointCloud ASCII with additional intensity (X,Y,Z,R,G,B,I)

• **Τριγωνική πλεγματοσειρά (triangular mesh):** Συναντάται στη βιβλιογραφία και ως τριγωνικό πλέγμα και αποτελεί μία από τις πλέον δημοφιλείς τεχνικές απόδοσης 3Δ αντικειμένων εξαιτίας του χαρακτηριστικού των τριγώνων να ορίζουν πάντα ένα επίπεδο. Το χαρακτηριστικό αυτό παίζει σημαντικό ρόλο στους αλγορίθμους *φωτοσκίασης* (rendering), *ανίχνευσης συγκρούσεων* (collision detection) και *γεωμετρικής αποκοπής* (clipping). Είναι βέβαιο πως οποιαδήποτε ανάγλυφη επιφάνεια ενός αντικειμένου μπορεί να προσεγγισθεί από ένα πλήθος τριγώνων. Η τριγωνική πλεγματοσειρά αποτελεί ένα από τα βασικότερα παράγωγα του πρωτογενούς υλικού ενός συστήματος 3Δ ψηφιοποίησης ή σάρωσης (scanning). Η *δομή δεδομένων* (data structure) μίας τριγωνικής πλεγματοσειράς περιλαμβάνει την επιπρόσθετη πληροφορία της *οργάνωσης των κορυφών σε τριάδες*<sup>5</sup>. Η πληροφορία αυτή μπορεί να αποθηκευτεί είτε ως συμπληρωματική της πληροφορίας των συντεταγμένων των κορυφών ορίζοντας την τριάδα κορυφών που σχηματίζουν ένα τρίγωνο, είτε εκφράζοντας ανεξάρτητα τις συντεταγμένες των κορυφών του κάθε τριγώνου αγνοώντας την ύπαρξη κοινών κορυφών. Η δεύτερη προσέγγιση είναι γνωστή ως *ακατέργαστη* (raw) και είναι πλέον ξεπερασμένη αφού χαρακτηρίζεται ως *ασύμφορη* σε επίπεδο διαχείρισης υπολογιστικών πόρων. Τα 3Δ μοντέλα που περιγράφονται με τριγωνικές πλεγματοσειρές αποτελούνται συνήθως από τρία διαφορετικά τμήματα:

- την 3Δ γεωμετρία που βρίσκεται οργανωμένη σε κάποια λογική δομή δεδομένων (περιγράφεται παρακάτω),
- την πληροφορία υφής (texture) που αποτελείται από μία ή περισσότερες ψηφιογραφικές εικόνες και τον τρόπο με τον οποίο αυτές χαρτογραφούνται – προβάλλονται (UV mapping) πάνω στην 3Δ γεωμετρία,
- τους τρόπους με τους οποίους «συμπεριφέρονται» οι επιφάνειες όταν αυτές ακτινοβολούνται από συνθετικές πηγές φωτός (material properties).

Σε πρακτικό επίπεδο μια λογική οργάνωση τριγωνικής πλεγματοσειράς μπορεί να αποτελείται από:

1. Συνδεδεμένη λίστα με συντεταγμένες των κορυφών στο 3Δ χώρο.
2. Συνδεδεμένη λίστα που αφορά στον τρόπο διασύνδεσης των κορυφών, ώστε να σχηματίζονται τα τρίγωνα.
3. Συνδεδεμένη λίστα με τις τιμές των μοναδιαίων διανυσμάτων.
4. Συνδεδεμένη λίστα με τις συντεταγμένες χαρτογράφησης UV της κάθε κορυφής του τριγώνου.

<sup>5</sup>Η διαδικασία είναι γνωστή και ως τριγωνοποίηση (triangulation).

**Πίνακας 1.2.** Παράδειγμα λογικής δομής τριγωνικής πλεγματοσειράς.

Κορυφές	Έδρες	Διανύσματα Επιφάνειας	Συντεταγμένες υψής
10, 20, 30	1, 2, 3	$[a \ b \ c]$	0.0, 0.2
20, 20, 35	...	...	0.3, 0.1
40, 50, 10	...	...	0.4, 0.15
...	...	...	...
140, 140, 246	1, 2, 3	$[a' \ b' \ c']$	...

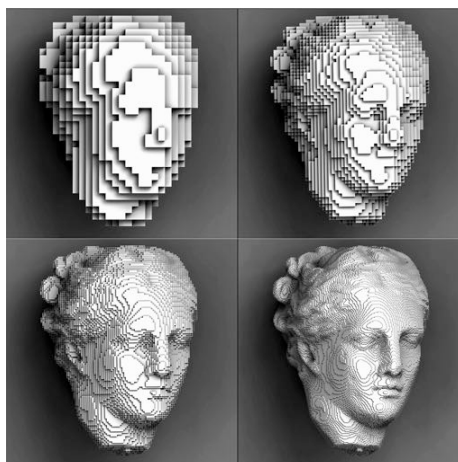
**Πίνακας 1.3.** Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσης τριγώνων ή τετράπλευρων στην αναπαράσταση πλεγματοσειρών.

Πλεγματοσειρά Πλεονεκτήματα		Μειονεκτήματα
<b>Τρίγωνα</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Πάντα ορίζουν ένα επίπεδο</li> <li>– Οποιοδήποτε σχήμα μπορεί να περιγραφεί από ένα σύνολο τριγώνων</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Αναπαράσταση της ίδιας περιοχής με ένα τετράπλευρο αντί για δύο τρίγωνα</li> <li>– Ιδανικό σχήμα για χαρτογράφηση της υψής</li> </ul>
<b>Τετράπλευρα</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Το πλήθος των τριγώνων που μπορεί να χρειαστούν για την περιγραφή ενός αντικειμένου μπορεί να είναι μεγάλος</li> <li>– Απαιτούν μεγαλύτερο αποθηκευτικό χώρο</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Δεν ορίζουν πάντα ένα επίπεδο στο χώρο</li> <li>– Σε κάποιες περιπτώσεις είναι αδύνατο να περιγραφούν βασικά 3Δ σχήματα (π.χ. πυραμίδα)</li> </ul>

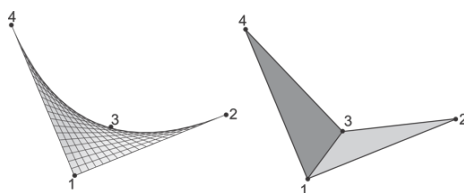
5. Συντεταγμένες υψής στο μοναδιαίο χώρο UV (πληροφορία υψής – ψηφιογραφική εικόνα – UV mapping).

Ένα παράδειγμα δομής τριγωνικής πλεγματοσειράς παρουσιάζει ο Πίνακας 1.2.

- **Πολυγωνική πλεγματοσειρά (polygonal mesh):** συναντάται στη βιβλιογραφία και ως πολυγωνικό πλέγμα. Αποτελεί τη φυσική επέκταση της αναπαράστασης με τριγωνικές πλεγματοσειρές με τη χρήση τετράπλευρων (quadrilaterals) ή άλλων πολυγώνων για τη δημιουργία ακανόνιστων πλεγματοσειρών ή πλεγμάτων (Εικόνα 1.5.δ). Πολλές από τις σύγχρονες εφαρμογές απεικόνισης 3Δ γραφικών υποστηρίζουν ταυτόχρονα τρίγωνα και τετράπλευρα με απώτερο σκοπό την εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων και των δύο τεχνικών αναπαράστασης. Ο Πίνακας 1.3 συνοψίζει τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των προσεγγίσεων.
- **Ογκομετρικό στοιχείο (volumetric element – voxel):** η ογκομετρική αναπαράσταση προκύπτει από τη χρήση στοιχειωδών μονάδων όγκου (ογκομετρικών στοιχείων). Ένα voxel μπορεί να θεωρηθεί ως αντίστοιχο



**Εικόνα 1.7.** Ογκομετρικές αναπαραστάσεις προτομής σε διαφορετικές αναλύσεις (μείωση του όγκου voxel οδηγεί σε αύξηση της ανάλυσης).



**Εικόνα 1.8.** Παράδειγμα μετατροπής δύο τριγώνων με μία κοινή ακμή (1-3) σε παραμετρική επιφάνεια οριζόμενη στον 3Δ χώρο.

του εικονοστοιχείου με τη διαφορά ότι καταλαμβάνει συγκεκριμένο όγκο στο διακριτό  $\mathbb{R}^3$  χώρο. Αναπαριστά ένα στοιχειώδη κύβο στον 3Δ διακριτό χώρο και πολύ συχνά βρίσκει εφαρμογή στην οπτικοποίηση ιατρικών δεδομένων (π.χ. από τομογράφους). Ένας διαδεδομένος μορφότυπος αρχείου της συγκεκριμένης δομής είναι ο PVL (processed volume). Όπως και στην περίπτωση των εικονοστοιχείων, όσο μικρότερο όγκο έχουν τα voxels, τόσο λιγότερο εμφανής είναι ο κβαντισμός των επιφανειών (Εικόνα 1.7), ή αντίστοιχα, τόσο μεγαλύτερη είναι είτε η ανάλυση του χώρου είτε η βεβαιότητα στη θέση του ογκομετρικού στοιχείου στο χώρο.

- **Παραμετρικές καμπύλες και επιφάνειες (parametric curves and surfaces):** σήμερα, υπάρχει ένα σύνολο από εξειδικευμένους αλγορίθμους που αναλαμβάνουν την περιγραφή μιας τριγωνικής πλεγματοσειράς ή ενός νέφους σημείων με παραμετρικές καμπύλες. Χαρακτηρίζεται ως μια πιο αποδοτική περιγραφή της γεωμετρίας ενός αντικείμενου, καθώς επιτρέπει την περιγραφή ομαλών καμπύλων επιφανειών μέσω ενός περιορισμένου πλήθους σημείων ελέγχου. Ουσιαστικά είναι η αντικατάσταση ενός νέφους σημείων ή μιας πλεγματοσειράς με ένα σύνολο πολυωνυμικών καμπυλών που προσεγγίζουν την αντίστοιχη επιφάνεια με μαθη-

ματικό τρόπο. Κάθε περίπλοκη περιοχή μπορεί να θεωρηθεί ως σύνολο από καμπύλες που υπολογίζονται κρατώντας μια παράμετρο σταθερή και μεταβάλλοντας τις άλλες. Ο προσδιορισμός του σχήματος της καμπύλης προκύπτει από τις συντεταγμένες των σημείων ελέγχου (control points). Οι πολυωνυμικές καμπύλες και επιφάνειες χρησιμοποιούνται με την προϋπόθεση ότι μπορεί να υπολογιστούν οι παράγωγοί τους σε κάθε σημείο αναλυτικά (συνεχείς παντού εκτός από τα σημεία ένωσης δύο διαδοχικών καμπυλών). Ο βαθμός του πολυωνύμου που χρησιμοποιείται καθορίζει τους βαθμούς ελευθερίας της καμπύλης, άρα και την ευελιξία της ως προς τον προσδιορισμό του ανάγλυφου μιας επιφάνειας. Ένα παράδειγμα τέτοιων καμπυλών είναι οι ερμιτιανές καμπύλες που έχουν πάρει το όνομα τους από το Γάλλο μαθηματικό του 19ου αιώνα, Charles Hermite, ο οποίος μελέτησε, μεταξύ άλλων, προβλήματα πολυωνυμικής παρεμβολής κατά τμήματα. Η Εικόνα 1.8 παρουσιάζει χαρακτηριστικό παράδειγμα των εναλλακτικών δυνατοτήτων απεικόνισης με παραμετρική επιφάνεια και τριγωνικό πλέγμα και αναδεικνύει την ποιοτική διαφορά τους.

- **Μέθοδος απεικόνισης χάρτη βάθους (depth map):** αποτελεί μέθοδο απεικόνισης 3Δ μοντέλου με μια ιδιαίτερη τεχνική φωτοσκίασης. Σύμφωνα με την τεχνική αυτή το κάθε σημείο της επιφάνειας ενός αντικειμένου εκφράζεται ως εικονοστοιχείο σε μια ψηφιογραφική εικόνα με χρώμα που επιλέγεται από μία κλίμακα διαβαθμίσεων του γκρι (grey scale). Η τιμή αυτή αναπαρθστά πρακτικά την απόσταση του κάθε επιφανειακού σημείου του αντικειμένου από τον παρατηρητή και καθορίζεται από την ευκλείδεια απόσταση ανάμεσα στο σημείο της επιφάνειας και το επίπεδο προβολής (projection plane) ή εστίασης (focal plane) που ορίζει η θέση παρατήρησης (Εικόνα 1.5.στ). Η τεχνική είναι επίσης γνωστή ως Z-buffer visualisation.

## 1.4 3Δ διακριτός χώρος

Γενικά, *διακριτός χώρος* είναι ένας τοπολογικός χώρος, στον οποίο τα σημεία σχηματίζουν μια *ασυνεχή ακολουθία*, που σημαίνει ότι είναι «απομονωμένα» μεταξύ τους, σε αντίθεση με το συνεχή χώρο, στον οποίο τα σημεία σχηματίζουν συνεχή ακολουθία. Στον 3Δ χώρο υπάρχουν έξι βαθμοί ελευθερίας, οι τρεις εκ των οποίων αφορούν στη θέση ως προς τους άξονες  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , ενώ οι άλλοι τρεις στον προσανατολισμό, *πρόνευση ή pitch*, *διατοιχισμό ή roll*, *εκτροπή ή yaw*. Μέσα στον 3Δ διακριτό χώρο μπορεί να οριστεί μια σειρά από μετασχηματισμούς που περιγράφουν τη μετατόπιση, περιστροφή, κλιμάκωση και στρέβλωση ενός 3Δ αντικειμένου. Η εφαρμογή ενός μετασχηματισμού σε ένα 3Δ αντικείμενο είναι αλληλένδετη με τη μεθοδολογία αναπαράστασης που ακολουθείται, έτσι, ένας συσχετισμένος μετασχηματισμός εφαρμόζεται ως εξής:

Πίνακας 1.4. Βασικοί γεωμετρικοί μετασχηματισμοί.

Μετατόπιση κατά ένα διάνυσμα $\vec{u} = (u_x, u_y, u_z, 1)$			
$\mathbf{P}_{\vec{u}} =$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & u_x \\ 0 & 1 & 0 & u_y \\ 0 & 0 & 1 & u_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\rightarrow$	$\begin{aligned} x' &= x + u_x \\ y' &= y + u_y \\ z' &= z + u_z \end{aligned}$
Περιστροφή (αντι-ωρολογιακά) γύρω από τους άξονες $x, y, z$ κατά γωνία $\theta$			
$\mathbf{R}_x(\theta_x) =$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x & 0 \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\rightarrow$	$\begin{aligned} x' &= x \\ y' &= y \cos \theta_x - z \sin \theta_x \\ z' &= y \sin \theta_x + z \cos \theta_x \end{aligned}$
$\mathbf{R}_y(\theta_y) =$	$\begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\rightarrow$	$\begin{aligned} x' &= x \cos \theta_y + z \sin \theta_y \\ y' &= y \\ z' &= -x \sin \theta_y + z \cos \theta_y \end{aligned}$
$\mathbf{R}_z(\theta_z) =$	$\begin{bmatrix} \cos \theta_z & -\sin \theta_z & 0 & 0 \\ \sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\rightarrow$	$\begin{aligned} x' &= x \cos \theta_z - y \sin \theta_z \\ y' &= x \sin \theta_z + y \cos \theta_z \\ z' &= z \end{aligned}$
Κλιμάκωση κατά τους παράγοντες $S_*$ ως προς τους άξονες $x, y, z$			
$\mathbf{S}_{(S_x, S_y, S_z)} =$	$\begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\rightarrow$	$\begin{aligned} x' &= x S_x \\ y' &= y S_y \\ z' &= z S_z \end{aligned}$

- Σε τριγωνικές πλεγματοσειρές και πολυγωνικές πλεγματοσειρές  $\rightarrow$  εφαρμογή στις κορυφές των τριγώνων ή πολυγώνων.
- Σε νέφη σημείων και ογκομετρικά νέφη  $\rightarrow$  εφαρμογή στο σύνολο των κορυφών (σημεία) από τα οποία αποτελείται το κάθε νέφος.

Ο Πίνακας 1.4 παρουσιάζει τους βασικούς γεωμετρικούς μετασχηματισμούς που εφαρμόζονται στον 3Δ διακριτό χώρο των γραφικών, σε μορφή πινάκων αλλά και εξισώσεων. Πρακτικά, η εφαρμογή ενός οποιουδήποτε από αυτούς τους μετασχηματισμούς σε σημείο  $\mathbf{x}$  του 3Δ χώρου ορίζεται ως ο πολλαπλασιασμός του πίνακα μετασχηματισμού με το διάνυσμα του σημείου με αποτέλεσμα την προβολή του σημείου σε νέο χώρο συντεταγμένων, στον οποίο προσδιορίζεται ως  $\mathbf{x}'$ . Έτσι, για παράδειγμα, η αντι-ωρολογιακή περιστροφή γύρω από τον άξονα  $X$  κατά  $\theta_x$  ορίζεται ως

$$\mathbf{x}' = \mathbf{R}_x(\theta_x)\mathbf{x} \quad (1.1)$$



Προφανώς, υπάρχει εύκολος τρόπος επανα-προβολής του νέου σημείου πίσω στο αρχικό (επιστροφή στις αρχικές συντεταγμένες) με τη χρήση του αντίστροφου πίνακα μετασχηματισμού ως

$$\mathbf{x} = \mathbf{R}_x^{-1}(\theta_x)\mathbf{x}' \quad (1.2)$$

Σύνθετοι μετασχηματισμοί μπορούν να προκύψουν από το συνδυασμό των βασικών γεωμετρικών μετασχηματισμών. Για παράδειγμα, μια κλιμάκωση κατά  $S_y$  που ακολουθείται από περιστροφή γύρω από τον άξονα  $z$  κατά  $\theta$  και, έχει τη μορφή<sup>6</sup>

$$\begin{aligned} \mathbf{T} &= \mathbf{P}_x \mathbf{R}_z(\theta) \mathbf{S}_{S_y} = \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & u_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos \theta & -S_y \sin \theta & 0 & u_x \\ \sin \theta & S_y \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.3) \end{aligned}$$

Με το διαδοχική πολλαπλασιασμό στοιχειωδών μετασχηματισμών (π.χ.  $\mathbf{T} = \mathbf{T}_1 \cdot \mathbf{T}_2 \dots \mathbf{T}_n$ ) μπορεί να προκύψει ένας πολύ σύνθετος μετασχηματισμός. Η εφαρμογή ενός οποιουδήποτε γραμμικού μετασχηματισμού αυτής της μορφής πάνω σε σημείο  $\mathbf{x} = [x \ y \ z \ 1]^T$  του 3Δ χώρου ορίζεται ως ο πολλαπλασιασμός του πίνακα μετασχηματισμού  $\mathbf{T}$  με το σημείο και έχει ως αποτέλεσμα την προβολή του αρχικού σημείου σε νέο χώρο συντεταγμένων, ως  $\mathbf{x}' = [x' \ y' \ z' \ 1]^T$ ,

$$\mathbf{x}' = \mathbf{T}\mathbf{x} \quad (1.4)$$

Η επιστροφή στις αρχικές συντεταγμένες γίνεται με την αντιστροφή των πινάκων και τον πολλαπλασιασμό με τις συντεταγμένες στο νέο σύστημα:

$$\mathbf{x} = \mathbf{T}^{-1}\mathbf{x}' \quad (1.5)$$

Στην περίπτωση του προηγούμενου παραδείγματος, όπου ο μετασχηματισμός αποτελεί σύνθεση κλιμάκωσης, περιστροφής και περιστροφής:

$$\mathbf{T}^{-1} = (\mathbf{P}_x \mathbf{R}_z(\theta) \mathbf{S}_{S_y})^{-1} = \mathbf{S}_{S_y}^{-1} \mathbf{R}_z^{-1}(\theta) \mathbf{P}_x^{-1} = \mathbf{S}_{\frac{1}{S_y}} \mathbf{R}^T(\theta) \mathbf{P}_{-x} \quad (1.6)$$

<sup>6</sup>Προσοχή στην αντιστροφή της σειράς με την οποία γίνεται ο πολλαπλασιασμός για τη σύνθεση των μετασχηματισμών. Ως γνωστόν από τη γραμμική άλγεβρα ο πολλαπλασιασμός πινάκων δεν είναι πράξη αντιμεταθετική, δηλαδή  $M_1 M_2 \neq M_2 M_1$ .

όπου η πρώτη ισότητα οφείλεται στην ιδιότητα αντιστροφής γινομένου πινάκων, ενώ η δεύτερη ισότητα οφείλεται στο ότι ο αντίστροφος του πίνακα κλιμάκωσης είναι ο πίνακας κλιμάκωσης με τους αντίστροφους συντελεστές, ο αντίστροφος του πίνακα περιστροφής είναι ίδιος με τον ανάστροφο λόγω του ότι ο πίνακας περιστροφής είναι ορθογώνιος και ο αντίστροφος του πίνακα μετατόπισης είναι ο πίνακας μετατόπισης κατά την αντίθετη κατεύθυνση (Kemiyatorn, 2019; Koutsoudis, 2010; Papaioannou, 2001; T-tus, 2005)

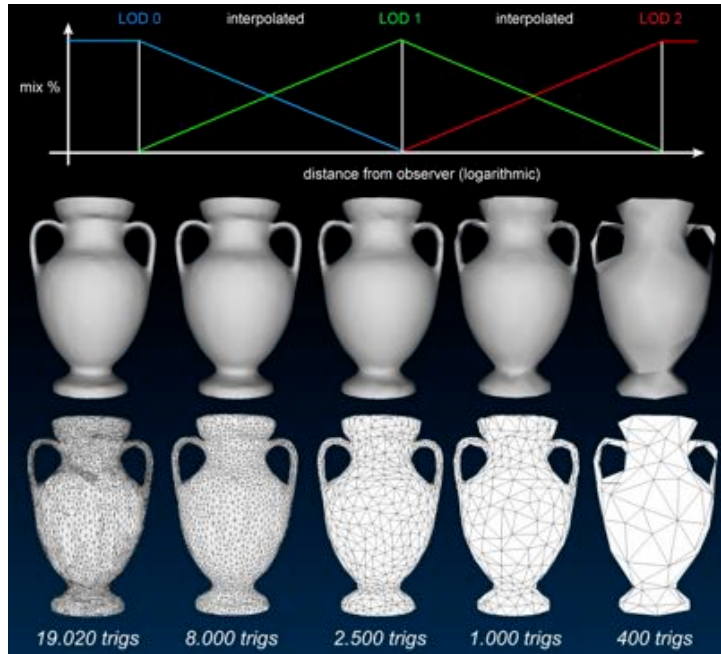
$$\mathbf{S}_{S_y}^{-1} = \mathbf{S}_{\frac{1}{S_y}}, \quad \mathbf{R}_z^{-1}(\theta) = \mathbf{R}_z(-\theta) = \mathbf{R}^\top(\theta), \quad \mathbf{P}_x^{-1} = \mathbf{P}_{-x} \quad (1.7)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι υπολογισμοί με πίνακες γίνονται χρησιμοποιώντας ομογενείς συντεταγμένες της μορφής  $\mathbf{x} = [x \ y \ z \ 1]$ , όπου ουσιαστικά έχει υιοθετηθεί η σύμβαση ότι η τέταρτη συνιστώσα είναι  $w = 1$  και  $x \leftarrow x/w$ ,  $y \leftarrow y/w$ ,  $z \leftarrow z/w$ , καθώς οι ομογενείς συντεταγμένες αποτελούν λύση στο πρόβλημα υλοποίησης του μετασχηματισμού μετατόπισης που είναι ο μοναδικός που προκύπτει από την πράξη της πρόσθεσης. Χρησιμοποιώντας ομογενείς συντεταγμένες όλοι οι μετασχηματισμοί υλοποιούνται με πολλαπλασιασμούς πινάκων, επιτρέποντας έτσι το συνδυασμό τους σε ένα μόνο πίνακα. Στο χώρο των ομογενών συντεταγμένων η απεικόνιση του σημείου είναι μη-μονοσήμαντη εξαιτίας του συντελεστή κλίμακας. Ως εκ τούτου αν εφαρμόζεται ο μοναδιαίος συντελεστής κλίμακας (1), τότε οι καρτεσιανές και οι ομογενείς συντεταγμένες ενός διανύσματος συμπίπτουν (Koutsoudis, 2010).

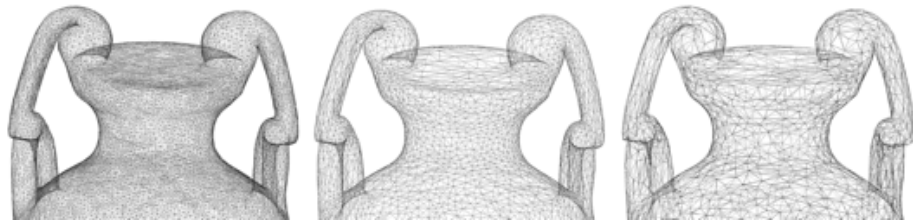
## 1.5 Δυναμική διαμόρφωση απεικόνισης 3Δ σκηνών

Για τη φωτορεαλιστική αναπαράσταση πολύπλοκων 3Δ σκηνών, όπως αστικών περιοχών, αρχιτεκτονικών συνόλων, μνημείων, κλπ., απαιτείται η χρήση μεγάλου όγκου πληροφορίας 3Δ γεωμετρικών μοντέλων. Συνήθως όμως, μικρά μόνο τμήματα αυτών των σκηνών είναι ορατά στον παρατηρητή, καθώς περιηγείται εικονικά στις σκηνές αυτές. Για την ακρίβεια, όπως ακριβώς συμβαίνει και στην πραγματικότητα, τα αντικείμενα μιας μεγάλης 3Δ σκηνής που είναι κοντά στον παρατηρητή πρέπει να απεικονίζονται με λεπτομέρεια, ενώ η λεπτομέρεια αυτή μπορεί να μειώνεται σταδιακά καθώς η απόσταση των αντικειμένων μεγαλώνει. Υπάρχει δε περίπτωση η σκηνή να είναι τόσο μεγάλη που τα πιο απομακρυσμένα αντικείμενα να μην είναι ορατά. Παράλληλα, στον παρατηρητή είναι ορατές μόνο συγκεκριμένες όψεις των αντικειμένων κάθε φορά, ενώ ουσιαστικά σε καμία χρονική στιγμή δεν μπορεί ένας παρατηρητής να έχει οπτική επαφή με όλες τις όψεις όλων των αντικειμένων στη σκηνή.

Προφανώς, η πλήρης φωτορεαλιστική απόδοση ολόκληρης μεγάλης 3Δ σκηνής είναι υπολογιστικά ιδιαίτερα δαπανηρή αλλά και εν τέλει, όταν είναι γνωστοί αυτοί οι περιορισμοί, είναι άτοπη. Για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται σήμερα διάφορες τεχνικές που αντιμετωπίζουν την εν λόγω δυσκολία, στις οποίες συμπεριλαμβάνονται (α) η χρήση μοντέλων πολλαπλών



Εικόνα 1.9. Μοντέλο πολλαπλών αναλύσεων και επίπεδα λεπτομέρειας.



Γεωμετρία	Λεπτομερής Ανάλυση	Μέση Ανάλυση	Χαμηλή Ανάλυση
Τρίγωνα	108.588	54.294	10.859
Μορφότυπος	Μέγεθος (MB)	Μέγεθος (MB)	Μέγεθος (MB)
3DS	2	1	0,2
OFF	3	1,5	0,3
OBJ	3,5	2	0,4
X	8	4	0,8
RAW	6,5	3,5	0,8
ASC	12	6	1,2
DXF	23	11,5	2,3

Εικόνα 1.10. Απομείωση τριγωνικής πλεγματοσειράς.

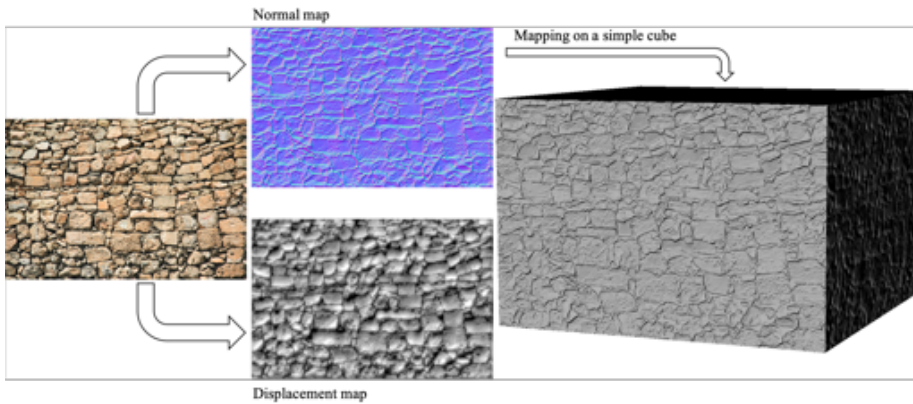
αναλύσεων, (β) η αντικατάσταση της γεωμετρικής πληροφορίας με ψηφιογραφική εικόνα και (γ) οι προσομοιώσεις επιφανειών με τις τεχνικές *normal mapping* και *displacement mapping* (βλπ. παρακάτω).

Η προσέγγιση της χρήσης *μοντέλων πολλαπλών αναλύσεων* χρησιμοποιείται εκτεταμένα σε εφαρμογές γραφικών πραγματικού χρόνου με την επιλεκτική απεικόνιση διαδοχικά υποδεέστερων γεωμετρικών/χρωματικών εκδόσεων των 3Δ μοντέλων καθώς απομακρύνονται από τη θέση του παρατηρητή. Η επιλογή της έκδοσης του μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί μπορεί υπολογίζεται από την περιοχή που αυτό καλύπτει στην συνολικό οπτικό πεδίο (Papaioannou, 2001). Η Εικόνα 1.9 παρουσιάζει γραφικά την ιδέα του μοντέλου πολλαπλών αναλύσεων και των επιπέδων λεπτομέρειας, όπου η μείωση της απόστασης θεάσης του εικονικού αντικειμένου από τον παρατηρητή οδηγεί στην αύξηση της ανάλυσης του προβαλλόμενου μοντέλου. Για να επιτευχθούν διαφορετικές αναλύσεις (πυκνότητα τριγωνικής πλεγματοσειράς) εφαρμόζεται μια σειρά από αλγορίθμους «απομείωσης», οι οποίοι αναλαμβάνουν να απλοποιήσουν τη γεωμετρική δομή σε τμήματα του μοντέλου, προσπαθώντας να διατηρήσουν σχετικά σταθερή τη γενικότερη μορφολογία και τη σιλουέτα (περίγραμμα) του. Πολλές φορές το εμβადόν και η θέση ενός τριγώνου αποτελούν κριτήριο για τη διατήρηση του ή όχι στη νέα έκδοχή. Η Εικόνα 1.10 παρουσιάζει παράδειγμα μοντέλου στην ονομαστική του πυκνότητα πλεγματοσειράς (λεπτομερής ανάλυση) και την πυκνότητά του μετά από δύο απομειώσεις (μέση και χαμηλή ανάλυση), ενώ παράλληλα δείχνει το αντίστοιχο μέγεθος αρχείου για διαφορετικούς μορφотypους αρχείων 3Δ μοντέλων.

Η τεχνική *normal mapping* είναι μια μέθοδος κατά την οποία γίνεται προσομοίωση φωτισμού και ανάγλυφου της επιφάνειας, ώστε να είναι δυνατή η απεικόνιση λεπτομερειών στο μοντέλο χωρίς να απαιτείται η ύπαρξη υψηλής πυκνότητας τριγωνικής πλεγματοσειράς και χωρίς να προστίθενται δυναμικά επιπλέον τρίγωνα ή τετράπλευρα. Στην Εικόνα 1.11 παρουσιάζεται μια απλή 2Δ εικόνα υφής από την οποία μπορεί να προκύψει ο «χάρτης» για την εφαρμογή της μεθόδου *normal mapping* (κέντρο και πάνω στην εικόνα), καθώς και η εφαρμογή του χάρτη αυτού πάνω στην απλούστατη γεωμετρία ενός παραλληλεπιδέπου δίνοντάς του σαφή μορφή ανάγλυφου, χωρίς όμως να υπάρχει ουσιαστικά γεωμετρική πληροφορία πέραν του απλού παραλληλεπιδέπου. Στη γενική περίπτωση, κατά τη διαδικασία του *normal mapping* εξάγεται από ένα υψηλής ανάλυσης μοντέλο μια ψηφιογραφική εικόνα, στην οποία αντικαθίστανται σε κάθε μονάδα επιφάνειας (τρίγωνο ή τετράπλευρό) οι χρωματικές συνιστώσες  $R, G, B$  με τις τρεις τιμές  $X, Y, Z$  που φέρει το αντίστοιχο διάνυσμα επιφάνειας (*normal vector*).

Από την άλλη, η τεχνική *displacement mapping* είναι εναλλακτική μέθοδος μετατόπισης κορυφών της γεωμετρίας ενός μοντέλου σε συγκεκριμένα σημεία που ορίζονται από ένα χάρτη βάθους. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται ικανοποιητική αίσθηση βάθους και λεπτομέρειας στην επιφάνεια ενός γεωμετρικά απλού μοντέλου (Εικόνα 1.12). Ένα παράδειγμα *displacement map* από μια 2Δ εικόνα υφής παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.11 στην κεντρική και κάτω εικόνα.

Φυσικά υπάρχει πλήθος τεχνικών σχετικών με τις προαναφερθείσες. Ως μια γενική παρατήρηση, ο χώρος των 3Δ γραφικών και οι τεχνολογίες που



**Εικόνα 1.11.** Παράδειγμα δημιουργίας χαρτών για *normal mapping* και *displacement mapping* και εφαρμογή του *normal mapping* σε απλό παραλληλεπίπεδο.



**Εικόνα 1.12.** Παράδειγμα *displacement mapping* (T-tus, 2005).

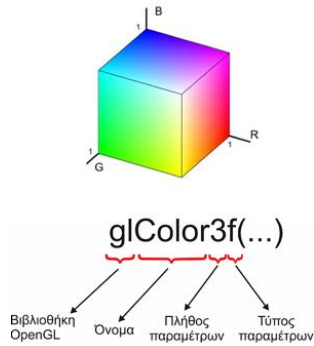
προκύπτουν μέσα από αυτόν είναι αποτέλεσμα των αναγκών που προκύπτουν συνέχεια σε δύο μεγάλες βιομηχανίες, αυτές του κινηματογράφου και των ηλεκτρονικών παιχνιδιών. Είναι σημαντικό για άλλους τομείς εφαρμογής η άμεση ενσωμάτωση, χρήση και προσαρμογή των συγκεκριμένων τεχνολογιών γραφικών στις ανάγκες και στις προκλήσεις που σχετίζονται με τους εν λόγω τομείς.

## 1.6 Προγραμματισμός 3Δ γραφικών

Η βιβλιοθήκη προγραμματισμού γραφικών OpenGL<sup>7</sup> είναι η πλέον δεδομένη, καθώς αποτελεί κοινή προσπάθεια που συνεχώς εμπλουτίζεται από τους ερευνητές της τεχνολογίας της εικόνας και γραφικών από το 1992. Χρησιμοποιείται ευρύτατα στην υλοποίηση εφαρμογών 3Δ γραφικών σε σταθερές και κινητές συσκευές, ενώ υποστηρίζεται από πληθώρα επιταχυντών 3Δ γραφικών, υλοποιημένων είτε ως ολοκληρωμένα κυκλώματα είτε ως κάρτες γραφικών.

Η OpenGL μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα σύνολο «εντολών» (API) που επιτρέπει την ανάπτυξη εφαρμογών 3Δ γραφικών. Δεν είναι η ίδια μια γλώσσα προγραμματισμού αλλά δύναται να χρησιμοποιηθεί σε πλήθος γλωσσών προ-

<sup>7</sup>OpenGL, The industry's foundation for high performance graphics, official website @ <https://www.opengl.org>.



Εικόνα 1.13. Ορισμός χρωμάτων σε OpenGL.

γραμματισμού, όπως οι C, C++, Java, σχεδόν σε όλα τα λειτουργικά συστήματα. Διαθέτει περισσότερες από τριακόσιες εντολές, με τις οποίες αναλαμβάνει να εκτελέσει εργασίες οπτικοποίησης γραφικών απαλλάσσοντας το χρήστη από τις λεπτομέρειες υλοποίησης σε υλικοτεχνικό επίπεδο αλλά και σε επίπεδο προγραμμάτων οδηγών του υλικού (κάρτα γραφικών, στη συγκεκριμένη περίπτωση). Μπορεί κανείς να τη χαρακτηρίσει ως ένα ευέλικτο τρόπο επικοινωνίας με την κάρτα γραφικών του υπολογιστή χωρίς να απασχολούν τον προγραμματιστή οι λεπτομέρειες υλοποίησης. Άλλη μια γνωστή βιβλιοθήκη είναι η DirectX και ειδικότερα η Direct3D<sup>8</sup>, η οποία αποτελεί δημιούργημα της εταιρίας Microsoft. Ο Κώδικας 1.1 δίνει ένα απλό παράδειγμα αναπαράστασης ενός τριγώνου στον 3Δ χώρο με OpenGL, όπου κάθε κορυφή του φέρει ένα από τα τρία βασικά χρώματα, τα οποία καθορίζονται με βάση το τριχρωματικό μοντέλο Red Green Blue (RGB) που φαίνεται στην Εικόνα 1.13.

Κώδικας 1.1: Ορισμός τριγώνου σε OpenGL.

---

```

1  glBegin(GL_TRIANGLES);           // Begin of triangle vertices declaration
2  glColor3f(5.0, 0.0, 0.0);       // Red colour
3  glVertex3f(-4.0, -2.0, 0.0);    // Vertex coordinates
4  glColor3f(0.0, 5.0, 0.0);       // Green colour
5  glVertex3f(4.0, -2.0, 0.0);     // Vertex coordinates
6  glColor3f(0.0, 0.0, 5.0);       // Blue colour
7  glVertex3f(0.0, 5.0, 0.0);     // Vertex coordinates
8  glEnd();                       // End of triangle vertices declaration

```

---

<sup>8</sup>Επίσημη σελίδα για το Direct3D στη διεύθυνση <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/hh309466>.

## Βιβλιογραφία

- Akenine-Möller, E. H. T. and Haines, E. (2002). *Real Time Rendering*. AK Peters, 2002, pages 492–494. A.K. Peters LTD.
- Cho, D., Park, J., Kim, G. J., Hong, S., Han, S., and Lee, S. (2003). The dichotomy of presence elements: The where and what. In *Virtual Reality, 2003. Proceedings. IEEE*, pages 273–274. IEEE.
- Foley, J. D., van Dam, A., Feiner, S. K., and Hughes, J. F. (2005). *Computer graphics: principles and practice*, pages 483–488. Addison-Wesley Systems Programming Series. Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- Kemiyatorn, B. (2019). Normal mapping. Online encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/Normal\\_mapping](https://en.wikipedia.org/wiki/Normal_mapping).
- Koutsoudis, A. (2010). *Ανάκτηση Τρισδιάστατων Δεδομένων Βάσει Περιεχομένου και MPEG-7 Μεταδεδομένων*. PhD thesis, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης.
- Papaioannou, G. (2001). *Αυτόματη ανακατασκευή τρισδιάστατων αντικειμένων με μεθόδους γραφικών*. PhD thesis, Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών, Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Spalter, A. M. (1998). *The computer in the visual arts*, pages 128–132. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.
- T-tus (2005). Displacement mapping in mesh. Online encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/Displacement\\_mapping#/media/File:Displacement.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Displacement_mapping#/media/File:Displacement.jpg).





—Μετὰ ἐπίπεδον, ἦν δ' ἐγώ, ἐν περιφορᾷ ὃν ἤδη στερεὸν  
λαβόντες, πρὶν αὐτὸ καθ' αὐτὸ λαβεῖν· ὁρθῶς δὲ ἔχει ἐξῆς  
μετὰ δευτέραν αὖξιν τρίτην λαμβάνειν· ἔστι δέ που τοῦτο  
περὶ τὴν τῶν κύβων αὖξιν καὶ τὸ βάθους μετέχον.

Πλάτων

# 2

## 3Δ ψηφιοποίηση

### 2.1 Εισαγωγή

Η επιθυμία αποτύπωσης αντικειμένων και σχημάτων με οπτικά μέσα εντοπίζεται στις αρχές του 19ου αιώνα. Την ίδια περίπου χρονική περίοδο απαντούμε και τις αρχές της φωτογραφικής τέχνης. Από τότε η τεχνολογία αποτύπωσης με οπτικά μέσα έχει προοδεύσει με ραγδαίους ρυθμούς.

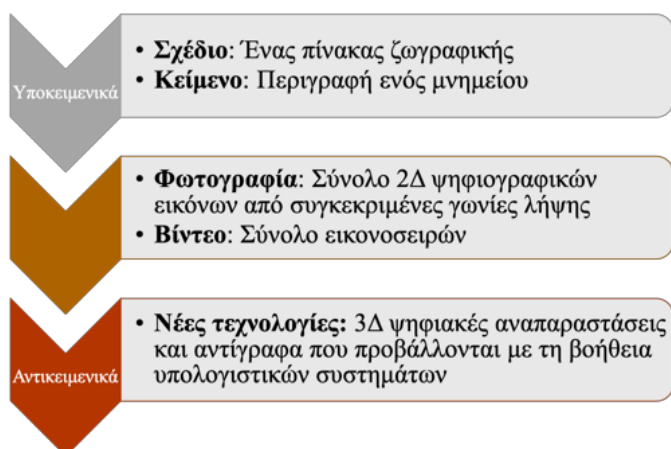
Σήμερα, ένας τυπικός σαρωτής εγγράφων αποτελεί ένα αναπόσπαστο κομμάτι ενός γραφείου, καθώς επιτρέπει την άμεση και ποιοτική δημιουργία ψηφιακών αντιγράφων οποιουδήποτε εγγράφου. Αντίθετα, όμως, η δημιουργία ψηφιακών αντιγράφων από πραγματικά αντικείμενα αποτελεί πρόκληση, ιδιαίτερα όταν η γεωμετρική τους πολυπλοκότητα ξεπερνά αυτή των στοιχειωδών στερεών σωμάτων, όπως είναι οι σφαίρες, οι πυραμίδες και οι κύβοι. Στο παρελθόν οι προσεγγίσεις για τη δημιουργία 3Δ αντιγράφων δεν ήταν αποδοτικές κυρίως λόγω της απουσίας ειδικευμένων συστημάτων μέτρησης, ισχυρών υπολογιστικών συστημάτων και επαρκούς αποθηκευτικού χώρου. Σήμερα, αυτά τα μέσα είναι πλέον διαθέσιμα και οδήγησαν στην καθιέρωση μια διαρκώς εξελισσόμενης αγοράς συστημάτων 3Δ ψηφιοποίησης. Τα συστήματα αυτά επιτρέπουν την αποδοτική καταγραφή μορφολογικής (γεωμετρικής) και χρωματικής πληροφορίας. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται εκτός των άλλων στην εφαρμογή ενός μεγάλου εύρους μαθηματικών μοντέλων, γεωμετρικών αξιωμάτων και έξυπνων ιδεών. Παρόλα αυτά, είναι ακόμη βέβαιο πως το κάθε σύστημα βασίζεται σε μια σειρά από παραδοχές και υπόκειται σε συγκεκριμένους περιορισμούς. Το ενδιαφέρον της παγκόσμιας ερευνητικής κοινότητας εστιάζεται στην ανάπτυξη αλγορίθμων που θα επιτρέψουν την επεξεργασία των δεδομένων που προκύπτουν με αποδοτικότερους τρόπους αλλά και στη

δημιουργία νέων μεθόδων αποτύπωσης. Μπορεί να πει κανείς με βεβαιότητα πως η ανάπτυξη των 3Δ σαρωτών (scanners) αποτελεί αποτέλεσμα συλλογικής δουλειάς επιστημόνων από διαφορετικά ερευνητικά πεδία, όπως είναι αυτά της όρασης υπολογιστών, των 3Δ γραφικών, της μηχανολογίας, της θεωρίας και τεχνολογίας των μετρήσεων, της φωτογραμμετρίας και, φυσικά, των μαθηματικών.

Σημαντικό ρόλο στην αύξηση της δημοτικότητας της 3Δ ψηφιοποίησης παίζει η δραματική βελτίωση στον τομέα των 3Δ γραφικών πραγματικού χρόνου. Η δυνατότητα διαχείρισης πολύπλοκης 3Δ γεωμετρίας με χαμηλό κόστος βρίσκει άμεση εφαρμογή στην απεικόνιση λεπτομερών και υψηλής ακρίβειας 3Δ μοντέλων, τα οποία συνήθως προκύπτουν από μεθόδους και συστήματα δημιουργίας 3Δ ψηφιακών αντιγράφων αντικειμένων από τον πραγματικό κόσμο (3Δ ψηφιοποίηση).

Απώτερος στόχος όλων των ερευνητικών προσπαθειών είναι η βελτιστοποίηση της πιστότητας του αποτελέσματος με παράλληλη ελαχιστοποίηση του χρόνου αποτύπωσης (συλλογή δεδομένων). Μέχρι σήμερα, μόνο μια από τις διαθέσιμες μεθόδους, η Σχήμα από σιλουέτα, προσεγγίζει την ιδέα της «σάρωσης με το πάτημα ενός πλήκτρου», ενώ αυξημένα επίπεδα αυτοματισμού μπορεί να αποκτήσει και μια ακόμη μέθοδος, η Δομή από κίνηση. Ωστόσο τα αποτελέσματά της πρώτης, λόγω μέτριας ακρίβειας και ανάλυσης και άλλων περιορισμών, έχουν εφαρμογή κυρίως στο ηλεκτρονικό εμπόριο, όπου μια απλά ρεαλιστική και όχι υψηλής ακρίβειας 3Δ απόδοση αντικείμενων είναι επαρκής. Η δεύτερη όταν εφαρμοστεί σωστά παρέχει υψηλής ακρίβειας δεδομένα και απαλλάσσει τις περισσότερες φορές το χρήστη από διαδικασίες ενοποίησης τμηματικών σάρωσεων. Φυσικά στις περιπτώσεις όπου απαιτείται υψηλή γεωμετρική ακρίβεια σε 1:1 αποτυπώσεις, εφαρμόζονται τεχνικές σάρωσης με ακτίνες λέιζερ (εκ του όρου Light amplification through stimulated emission of radiation (Laser) της Αγγλικής), τις οποίες όμως χαρακτηρίζουν, τις περισσότερες φορές, χρονοβόρες διαδικασίες επεξεργασίας δεδομένων. Είναι σίγουρο πως η διαδικασία συλλογής 3Δ δεδομένων (σάρωση) είναι μια σύνθετη διαδικασία και εμπλέκει μια σειρά ενεργειών, οι οποίες περιγράφονται στα επόμενα κεφάλαια του βιβλίου.

*Ο τομέας του πολιτισμού είναι ένας πολύ απαιτητικός τομέας εφαρμογής της 3Δ ψηφιοποίησης. Η 3Δ ψηφιοποίηση στο χώρο του πολιτισμού χρησιμοποιείται έντονα στο βιβλίο ως περιπτώσιολογική μελέτη, από την οποία προκύπτουν μείζονος σημασίας συμπεράσματα για τη εφαρμογή της 3Δ ψηφιοποίησης και σε άλλα πεδία, καθώς η εφαρμογή της στον πολιτισμό παρουσιάζει εξαιρετικές προκλήσεις που δύσκολα απαντώνται σε άλλο τομέα σε αυτή την κλίμακα. Στο πλαίσιο αυτό, δίνεται αρχικά η βασική ορολογία για την καλύτερη κατανόηση του χώρου και η εμπέδωση μιας κοινής αντίληψης. Μια μεγάλη οικογένεια αντικειμένων ανήκει στην κατηγορία που ορίζονται ως *κινητά πολιτιστικά αντικείμενα* που περιλαμβάνει τα πολιτιστικά αντικείμενα, των οποίων οι διαστάσεις κυμαίνονται από κάποια χιλιοστά (mm) έως και πολλά μέτρα (m). Ο όρος*



Εικόνα 2.1. Μέσα προβολής πολιτιστικού αποθέματος.

«κινητά» φανερώνει τη δυνατότητα μεταφοράς του αντικειμένου και όχι ότι το αντικείμενο φέρει κινητά μέρη ή ότι παρουσιάζει κίνηση. Σημειώνεται ότι η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει υποκατηγορίες με μεγάλη γκάμα αντικειμένων που μπορούν να είναι από νομίσματα έως μεγάλα αγάλματα. Ως 3Δ ψηφιοποίηση *ακίνητων μνημείων* ορίζεται η υψηλής ακρίβειας αποτύπωση και καταγραφή των μορφολογικών (γεωμετρικών) και φασματικών χαρακτηριστικών των μνημείων, τα οποία θεωρούνται κατασκευές που δεν μπορούν να μετακινηθούν. Κι εδώ η γκάμα των αντικειμένων μπορεί να είναι πολύ μεγάλη και οι διαστάσεις να ποικίλουν από μερικά μέτρα έως και κάποια χιλιόμετρα (km).

Η 3Δ ψηφιοποίηση αποτελεί σήμερα ένα ιδιαίτερα σημαντικό εργαλείο για την τεκμηρίωση του πολιτιστικού αποθέματος. Θέτοντας τα μέσα προβολής του πολιτιστικού αποθέματος σε μια κλίμακα «αντικειμενικότητας» προκύπτει μια απεικόνιση που δίνεται στην Εικόνα 2.1. Το σχέδιο, το κείμενο και η 2Δ φωτογράφιση (και το βίντεο) δεν μπορούν, τουλάχιστον από μόνες τους, να παρέχουν απαντήσεις στην πρόκληση της πλήρους ψηφιακής καταγραφής και τεκμηρίωσης στο χώρο της πολιτιστικής κληρονομιάς, της αρχαιολογίας και της συντήρησης τέχνηρων. Η 3Δ ψηφιοποίηση μπορεί να συμβάλει στην αντιμετώπιση δύο σημαντικών προκλήσεων της αποτύπωσης: (α) στην αντικειμενικότητα περιγραφής του τέχνηρου (πιστότητα) και (β) στην ταχύτητα και προσαρμοστικότητα της πραγματοποίησης της καταγραφής. Σίγουρα, όμως, η πλήρης ψηφιακή τεκμηρίωση πολιτιστικών αντικειμένων πρέπει να βασίζεται στο σύνολο των διαθέσιμων μέσων και να παρέχει μια οντολογικά<sup>1</sup> ολοκληρωμένη εικόνα των αντικειμένων για το μελλοντικό μελετητή. Μετά από δεκαετίες έρευνας και ανάπτυξης, η 3Δ ψηφιοποίηση στο χώρο της πολιτιστικής κληρονομιάς αποτελεί πλέον μια κοινή πρακτική. Κάποια από τα οφέλη που προσφέρει

<sup>1</sup> Ο όρος «οντολογία» στο σημείο αυτό σχετίζεται με τη χρήση του στον τομέα της πληροφορικής, όπου συνδέεται με την ολοκληρωμένη σημασιολογική περιγραφή μιας «ψηφιακής οντότητας».

είναι τα εξής:

- Καθώς πολλά από τα αντικείμενα του πολιτιστικού αποθέματος είναι ευαίσθητα λόγω παλαιότητας και πολλές φορές υπό κατάρρευση η δημιουργία ενός 3Δ ψηφιακού αντιγράφου οδηγεί:
  - Στη διευκόλυνση της μελέτης για την πιθανή αποκατάστασή τους.
  - Στη μελέτη και πειραματισμό στο ψηφιακό αντίγραφο, αντί του ίδιου του τέχνηργου, με σκοπό την αποφυγή διαδικασιών που ίσως να θέτουν σε κίνδυνο το πραγματικό αντικείμενο.
- Τα 3Δ ψηφιακά αντίγραφα που προκύπτουν μπορούν να αποτελέσουν ένα επιπλέον σημαντικό τεκμήριο που μπορεί να ενσωματωθεί σε μια ψηφιακή συλλογή (αποθετήριο - βάση δεδομένων) παρόμοιων αντικειμένων πχ. αγγαματιδίων που παρουσιάζουν μια συγκεκριμένη μορφή ή προέρχονται από ανασκαφικές εργασίες σε έναν αρχαιολογικό χώρο. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό για έναν αρχαιολόγο, ένα συντηρητή ή γενικότερα ένα μελετητή να έχει συγκεντρωμένα όλα τα δεδομένα που αφορούν το εκάστοτε τέχνηργο. Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία που θα πρέπει να έχει ο μελετητής στη διάθεσή του είναι τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του υπό μελέτη αντικειμένου, στα οποία έχει άμεση πρόσβαση μέσω της αξιοποίησης των 3Δ ψηφιακών αντιγράφων, κάτι που δεν μπορεί να γίνει μέσω των παραδοσιακών 2Δ φωτογραφικών απεικονίσεων και σχεδίων. Παράλληλα σημαντικά οφέλη προκύπτουν:
  - Στη δημιουργία σύγχρονων ψηφιακών αποθετηρίων με δυνατότητες αυτόματης κατηγοριοποίησης, ανάκτησης και προβολής συγκεκριμένων υποσυνόλων των 3Δ ψηφιακών αντιγράφων.
  - Στη σύνδεση με τις τεχνολογίες 3Δ εκτύπωσης με στόχο τη δημιουργία φυσικών αντιγράφων για εφαρμογές αποκατάστασης, συντήρησης, προβολής και πρόσβασης από μέχρι πρότινος αποκλεισμένες κοινωνικές ομάδες.
- Η δημιουργία ενός Διαδικτυακού εικονικού μουσείου ή έκθεσης που επιτρέπει την πρόσβαση σε 3Δ ψηφιακά αντίγραφα μεγάλης αρχαιολογικής και αρχιτεκτονικής αξίας μπορεί να αποτελέσει ένα από τα σημαντικότερα προϊόντα για την ανάδειξη του πολιτισμού. Προσφέρει τη δυνατότητα σε ένα ευρύ κοινό να έρθει σε επαφή και να γνωρίσει τον πλούτο του πολιτιστικού αποθέματος πριν ακόμη επισκεφτεί το χώρο που φιλοξενούνται τα ίδια τα αντικείμενα. Ένα εικονικό μουσείο μπορεί να είναι προσβάσιμο από το Διαδίκτυο αλλά και από πληροφοριακά περίπτερα (information kiosks) που μπορεί να βρίσκονται είτε εντός ενός μουσείου, είτε σε χαρακτηριστικά σημεία μιας αστικής περιοχής. Η προβολή των

εκθεμάτων μπορεί να εμπλουτίσει σημαντικά την εμπειρία του επισκέπτη παρέχοντας διαδραστικό 3Δ περιεχόμενο συνδυασμένο με τεχνολογίες πολυμέσων, όπως η αφήγηση, η αλληλεπίδραση, η επαυξημένη πραγματικότητα, η δημιουργία διαδραστικών εφαρμογών, η εικονική πραγματικότητα και η 3Δ εκτύπωση αναμνηστικών αντιγράφων.

- Πολλά αρχαιολογικά μνημεία και ευρήματα δεν είναι διαθέσιμα στο ευρύ κοινό, για την αποφυγή πιθανών καταστροφών. Με την 3Δ ψηφιοποίηση μπορεί κανείς να επιτρέψει την πρόσβαση του κοινού στα ψηφιακά αντίγραφα ευρημάτων και μνημείων, τα οποία είναι απαλλαγμένα, τουλάχιστον στο ψηφιακό επίπεδο, από πινακίδες της μορφής «Μην Αγγίζετε».
- Η χρήση των 3Δ ψηφιακών αντιγράφων στον παγκόσμιο ιστό μπορεί να προσφέρει ταυτόχρονη και απομακρυσμένη πρόσβαση σε επιστήμονες αρχαιολόγους, ερευνητές, μελετητές, τουρίστες, κλπ. Σήμερα δίνεται πλέον η τεχνική δυνατότητα για τη διάχυση του πολιτιστικού αποθέματος μέσω του Διαδικτύου ακόμα και σε φορητές συσκευές.
- Η χρήση των 3Δ ψηφιακών αντιγράφων για τη δημιουργία προσομοιώσεων με δυνατότητες ελεύθερης περιήγησης σε εικονικό χώρο είναι σημαντικό εργαλείο διάχυσης. Προσφέρει πληρέστερη αντίληψη και εμπειρία του χώρου, καθώς επιτρέπει την εξέταση ενός θέματος από διαφορετικές αλλά ακόμα και πρωτόγνωρες οπτικές γωνίες, ενώ καθιστά δυνατή την περιήγηση σε χώρους που είναι απρόσιτοι, δυσπρόσιτοι ή έχουν χαθεί. Καθιστά την επίσκεψη πιο ευχάριστη μέσω της διαδραστικότητας που παρέχει αφού ένας εικονικός επισκέπτης μπορεί να κατευθύνει την περιήγηση κατά βούληση, σε αντίθεση με μια κλασική βιντεοπαρουσίαση ενός χώρου. Τέλος, επιτρέπει το δυναμικό εμπλουτισμό του βασικού θέματος με πληροφορία που δεν είναι δυνατό να απεικονιστεί αποδοτικά με συμβατικές μεθόδους προβολής.
- Σε περιπτώσεις όπου η 3Δ ψηφιοποίηση αφορά σε αρχιτεκτονικά σύνολα, αρχαιολογικούς χώρους, αστικές περιοχές με ιδιαίτερη αρχιτεκτονική ή ιστορική αξία, η εφαρμογή και τα παράγωγά της συμβάλουν στην τοπική και περιφερειακή οικονομία, προβάλλοντας και αναδεικνύοντας την ιδιαιτερότητα του τόπου στοχεύοντας σε μελετητές και επισκέπτες ειδικών ενδιαφερόντων, δημιουργώντας, έτσι, κίνητρα και πολλαπλασιαστικά οφέλη για νέες υποδομές και τοπική ανάπτυξη.

## 2.2 Ορισμός της 3Δ ψηφιοποίησης

Στη βιβλιογραφία μπορεί κανείς να συναντήσει διαφορετικές προσεγγίσεις στον ορισμό και τα όρια που τίθενται στη 3Δ ψηφιοποίηση, ανάλογα με το πεδίο από το οποίο προέρχονται. Σε κάθε περίπτωση όμως,

*3Δ ψηφιοποίηση είναι η συλλογή μετρήσεων χωρικών και φασματικών χαρακτηριστικών από τις επιφάνειες των αντικειμένων του κόσμου και η μετατροπή τους σε ψηφιακά δεδομένα*

και υλοποιείται με τη χρήση συνόλου υλικοτεχνικού εξοπλισμού και λογισμικών. Μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά της 3Δ ψηφιοποίησης είναι:

- Υλοποιεί μια αυτοματοποιημένη ή ακόμη και ημι-αυτοματοποιημένη διαδικασία πραγματοποίησης μετρήσεων απόστασης (βάθους) που βασίζεται σε κάποια ή κάποιες μεθόδους και πρότυπα.
- Πραγματοποιεί δειγματοληψία στην επιφάνεια αντικειμένου με υψηλό ρυθμό (εκατοντάδες ή χιλιάδες κορυφές ορισμένες στο 3Δ χώρο ανά δευτερόλεπτο).
- Αποσκοπεί, στην καλύτερη περίπτωση, στο να πραγματοποιεί αποτύπωση σε πραγματικό χρόνο, ώστε να υπάρχει άμεση ενημέρωση στο χρήστη.
- Καταγράφει χρωματική πληροφορία της επιφάνειας σε συνδυασμό με την 3Δ γεωμετρία.

Ένα σύστημα 3Δ ψηφιοποίησης μπορεί να χαρακτηριστεί *φορητό, μεταφέρσιμο* ή, ακόμη, *σταθερό*. Στις πρώτες δύο περιπτώσεις το σύστημα μπορεί να μεταφερθεί στο χώρο φιλοξενίας του αντικειμένου, ενώ στην τελευταία, είναι υποχρεωτικό για το αντικείμενο προς αποτύπωση να μεταφερθεί στο εργαστήριο ψηφιοποίησης.

Η 3Δ ψηφιοποίηση είναι ένα σημαντικό εργαλείο που «ξεκλειδώνει» μια σειρά από δυνατότητες τόσο για την τεκμηρίωση αντικειμένων όσο και για πλήθος εφαρμογών, όπως είναι η ψηφιακή αρχειοθέτηση, η υποστήριξη εργασιών συντήρησης, οι εφαρμογές αντίστροφης μηχανικής και η διάχυση. Ωστόσο, οι διαδικασίες που ακολουθούνται για τη συλλογή δεδομένων από τις επιφάνειες των αντικειμένων ενδέχεται, πολλές φορές, να χαρακτηριστούν ως ανεπαρκείς. Από την άλλη, ειδικό βάρος για την αξιολόγηση ενός συστήματος ψηφιοποίησης έχουν οι απαιτούμενες (μετέπειτα) διαδικασίες επεξεργασίας των αρχικών δεδομένων που προκύπτουν από τη ψηφιοποίηση. Ο χρόνος που απαιτείται για τη δημιουργία ενός υψηλής πιστότητας 3Δ ψηφιακού αντιγράφου είναι πολλές φορές πολύ μεγαλύτερος από το χρόνο που απαιτείται για τη συλλογή των δεδομένων (Pavlidis et al., 2004). Η γεωμετρική ακρίβεια, η ευρωστία ενός συστήματος και η επάρκεια αποτύπωσης πολύπλοκων μορφολογικά επιφανειών αποτελούν ακόμα και σήμερα ενεργά πεδία έρευνας. Ως κύρια ερευνητική πρόκληση εντοπίζεται η εφαρμογή της 3Δ ψηφιοποίησης αντικειμένων μέσω αποδοτικών πρακτικών που οδηγούν σε μεγάλους βαθμούς ακρίβειας και ανάλυσης, ενώ ταυτόχρονα απαιτούν σύντομους χρόνους συλλογής δεδομένων που θα μπορούσαν να προσεγγίζουν ιδανικά ακόμα και αυτούς της ψηφιοποίησης εγγράφων.

## 2.3 Η 3Δ ψηφιοποίηση και τα χαρακτηριστικά των αντικειμένων

Σε κάθε έργο 3Δ ψηφιοποίησης, αρχικό μέλημα για την ορθή σχεδίαση της υλοποίησης του είναι η εκτίμηση του μεγέθους και της ελευθερίας μετακίνησης των, προς ψηφιοποίηση, αντικειμένων. Αυτός άλλωστε είναι και ο βασικός λόγος που ως πρώτη προσέγγιση εντοπισμού των απαιτήσεων υλοποίησης του έργου γίνεται διάκριση των αντικειμένων σε κινητά και ακίνητα. *Κινητά αντικείμενα* μπορεί να είναι οποιαδήποτε, σχετικά μικρού μεγέθους και διαστάσεων, εύκολα στη μεταφορά αντικείμενα, των οποίων η ψηφιοποίηση μπορεί να γίνει είτε σε ειδικά εργαστήρια είτε στο χώρο που βρίσκονται. Τα κινητά αντικείμενα μπορούν να αποτυπωθούν σε τρεις διαστάσεις με πλήθος συστημάτων, όπως είναι οι ειδικές μετρητικές διατάξεις τριγωνισμού λέιζερ, δομημένου φωτισμού και φωτογραμμετρίας. Τυπικά παραδείγματα κινητών αντικειμένων που προέρχονται από το πολιτιστικό απόθεμα είναι τα αγάλματα, αγγεία, σκεύη, κοσμήματα καθώς και τα είδη λαϊκής τέχνης. Ως *ακίνητα αντικείμενα* μπορούμε να ορίσουμε τα μεγάλα αγάλματα, τα κτήρια, τα αρχιτεκτονικά σύνολα, αστικές περιοχές πολιτιστικής και ιστορικής αξίας, καθώς και τους αρχαιολογικούς χώρους και τις ανασκαφές. Η 3Δ ψηφιοποίηση σε αυτά τα αντικείμενα οδηγεί στο 3Δ ψηφιακό αντίγραφο με πληθώρα παράγωγων που αποτελούν εξίσου σημαντικές πηγές για περαιτέρω μελέτη, όπως για παράδειγμα τα σχέδια υπό κλίμακα που παρουσιάζουν χαρακτηριστικές όψεις, κατόψεις ή τομές και μπορεί να προκύψουν από ειδική επεξεργασία του 3Δ αντίγραφου. Για έναν αρχαιολόγο, έναν αρχιτέκτονα, έναν πολιτικό μηχανικό ή ακόμα και για έναν συντηρητή ένα διάγραμμα υπό κλίμακα μιας όψης ενός κτιρίου ή ενός αρχαιολογικού σκάμματος αποτελεί υπόβαθρο γνώσης που θα υποστηρίξει μία μελέτη συντήρησης και ανάδειξης ή την εξαγωγή σημαντικών αρχαιολογικών συμπερασμάτων. Σε περιπτώσεις κατά τις οποίες ένα μνημείο δεν υφίσταται πλέον, μπορεί να γίνει η 3Δ ανακατασκευή του με χρήση τεχνικών φωτογραμμετρίας από φωτογραφίες ιστορικών αρχείων (πηγές τεκμηρίωσης) και μίας σειράς υποθέσεων. Στα τυπικά παραδείγματα ακίνητων μνημείων ανήκουν οι ναοί (πχ. παλαιοχριστιανικοί, βυζαντινοί), αρχαιολογικές ανασκαφές (επίγειες και ενάλιες) καθώς και κτήρια ιδιαίτερης αρχιτεκτονικής αξίας (πχ. νεοκλασικά) (Daniil, 2009; Patias, 1999; Tziavos and Spatalas, 2004; Vlachos, 1998).

Όπως έχει αναφερθεί, η εφαρμογή μιας μεθόδου ψηφιοποίησης οδηγεί στον υπολογισμό των θέσεων και χρώματος συγκεκριμένων σημείων πάνω στις επιφάνειες των αντικειμένων, πραγματοποιώντας μια *δειγματοληψία*. Οι θέσεις αυτές στο παραγόμενο αποτέλεσμα αναπαριστούν «κορυφές» που συνθέτουν την εξωτερική επιφάνεια του αντικειμένου και σε αρκετές περιπτώσεις ορίζονται σε ένα αυθαίρετο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Πολλά συστήματα ψηφιοποίησης (όπως οι σαρωτές λέιζερ) παράγουν 3Δ ψηφιακά αντίγραφα σε αναλογία 1:1 με το πραγματικό αντικείμενο (δεδομένα σε ορθή κλιμάκωση),

ενώ άλλα (όπως η Δομή από κίνηση) όχι. Η προαναφερθείσα δειγματοληψία πρακτικά γίνεται χωρίς τον έλεγχο του χειριστή του εκάστοτε συστήματος, καθώς η επιλογή των σημείων στην επιφάνεια του αντικειμένου που θα μετρηθούν, πολλές φορές, δεν είναι δυνατόν να προκαθοριστούν. Συνολικά, στο τέλος της διαδικασίας μέτρησης με δειγματοληψία προκύπτει ένα αυθαίρετα μεγάλο σύνολο κορυφών που καλείται *νέφος σημείων*, το οποίο αναπαριστά ψηφιακή την εξωτερική επιφάνεια του αντικειμένου και αποτελεί τα αρχικά δεδομένα της ψηφιοποίησης. Στόχος κατά τη φάση αυτή είναι η συλλογή ενός πλέον πυκνού (δλδ. με μεγάλη ανάλυση) νέφους σημείων με μετρήσεις υψηλής ακρίβειας. Όπως είναι αναμενόμενο, το νέφος αυτό από σημεία δεν είναι τέλειο, καθώς όπως συμβαίνει σε κάθε διαδικασία μέτρησης υπάρχουν αστοχίες που σχετίζονται με τα όρια λειτουργίας του συστήματος μέτρησης και εξωτερικούς παράγοντες που επηρεάζουν την κάθε μέτρηση. Οι αστοχίες αυτές ονομάζονται *θόρυβος μέτρησης*. Παράλληλα, ένα νέφος σημείων αποτελεί μια, κατά κάποιο τρόπο, «ατελή» αναπαράσταση μιας επιφάνειας, καθώς αναπαριστά μόνο κάποια από τα σημεία της, με ασυνέχειες και κενά μεταξύ των σημείων. Έτσι, το νέφος σημείων περνά από σειρά βημάτων επεξεργασίας για την τελική απόδοση του 3Δ αντιγράφου. Συνήθως απαιτείται να εφαρμοστούν μέθοδοι φιλτραρίσματος των μετρήσεων για την εξάλειψη πιθανώς πλεοναζόντων κορυφών και τη διόρθωση των θέσεων κορυφών που έχουν μετακινηθεί σε σχέση με την πραγματική τους θέση, καθώς και την ένωση των κορυφών σε τρίγωνα ή πολύγωνα, ώστε να δημιουργηθεί μια χωρίς ασυνέχειες επιφάνεια. Η δημιουργία της τελικής επιφάνειας πρέπει να οδηγήσει σε ένα 3Δ ψηφιακό αντικείμενο «κλειστής» γεωμετρίας όπου θα εφαρμοστεί η προβολή της χρωματικής πληροφορίας που θα του αποδώσει και την φωτορεαλιστική του μορφή. Η δημιουργία ενός φωτορεαλιστικού 3Δ ψηφιακού αντιγράφου αποτελεί ένα επιπλέον προϊόν επισκόπησης του αντικειμένου και η οπτικοποίηση του μέσω ενός υπολογιστή γίνεται σήμερα με τη χρήση μια σειράς ειδικών μορφοτύπων αρχείων όπως είναι οι μορφότυποι Virtual Reality Modelling Language (VRML), Extensible 3D File Format (X3D), Wavefront Geometry Definition File Format (OBJ), Polygon File Format (PLY), XYZ File Format (XYZ), κα.

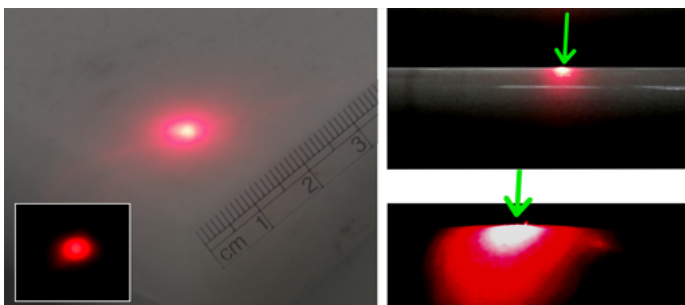
Η ποικιλία των πρώτων υλών που χρησιμοποιεί ο άνθρωπος για την κατασκευή των πολιτιστικών αντικειμένων, καθώς και η μορφολογική τους πολυπλοκότητα, αποτελούν τμήμα ενός ευρύτερου συνόλου χαρακτηριστικών που αποτελούν προκλήσεις για τις διάφορες μεθόδους 3Δ αποτύπωσης. Όπως ήδη αναφέρθηκε, η διαδικασία της 3Δ ψηφιοποίησης αντικειμένων, ως μεθόδου δημιουργίας ψηφιακών αντιγράφων, πρέπει, εν γένει, να πραγματοποιείται με το μέγιστο δυνατό βαθμό ακρίβειας και ανάλυσης. Στην πραγματικότητα, όμως, η ακρίβεια της αποτύπωσης ενός αντικειμένου επηρεάζεται από αυτό καθαυτό το αντικείμενο. Μερικά από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά που εισάγουν προκλήσεις στην επίτευξη υψηλής ακρίβειας και ανάλυσης κατά την ψηφιοποίηση είναι η μορφολογική πολυπλοκότητα των αντικειμένων, τα χαρακτηριστικά των επιφανειών τους, όπως οι ανακλάσεις και ο ιριδισμός, καθώς και η διάχυση



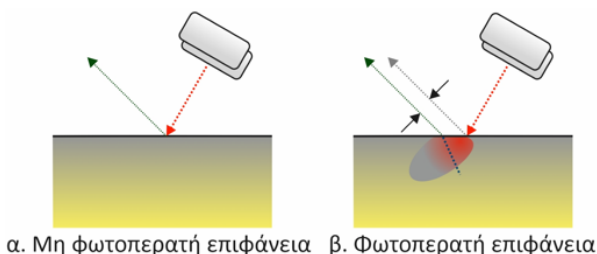
και διάθλαση του φωτός μέσα σε αυτές.

Προϋπόθεση για την 3Δ ψηφιοποίηση με συστήματα τριγωνισμού λέιζερ είναι το ότι η επιφάνεια του αντικειμένου είναι αδιαφανής και δε διαθλά το φως. Όταν το υλικό κατασκευής του αντικειμένου προς ψηφιοποίηση είναι το μάρμαρο, τότε αυτή η προϋπόθεση δεν μπορεί να ικανοποιηθεί πλήρως, καθώς το εν λόγω υλικό παρουσιάζει δύο σημαντικές ως προς την οπτική ιδιότητες: (α) ημιδιαφάνεια (β) ανομοιογενής επιφανειακή τραχύτητα. Οι ιδιότητες αυτές αποτελούν αναπόφευκτες πηγές θορύβου και επηρεάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων (Godin et al., 2001). Η επιφάνεια ενός μαρμάρου είναι δομημένη από πυκνά συσσωρευμένους κρυστάλλους. Η μεταβλητή πυκνότητα των κρυστάλλων προκαλεί μία ανομοιογένεια στα υποστρώματα και ως εκ τούτου αλλοιώνει τα οπτικά χαρακτηριστικά του αντικειμένου. Καθώς το φως διαπερνά μία μαρμαρίνη επιφάνεια η ανομοιομορφία των υποστρωμάτων οδηγεί στον αναπόφευκτο διασκορπισμό της δέσμης (light scattering). Ο διασκορπισμός αυτός είναι υπαρκτός και στο ορατό φάσμα. Οι Godin et al. (2001) προσπάθησαν να ποσοτικοποιήσουν το εύρος του σφάλματος που προκαλεί ο διασκορπισμός μίας δέσμης φωτός λέιζερ. Σε ένα από τα πειράματα τους στοχεύουν ακτίνα λέιζερ μήκους κύματος 633 nm (νανόμετρα) πάνω σε κομμάτι λευκού μαρμάρου τύπου Carrara Statuario. Στα υποστρώματα του μαρμάρου αλλά και στην επιφάνειά του εμφανίζονταν φωτεινοί ομόκεντροι δίσκοι γύρω από το σημείο ανάκλασης. Στην Εικόνα 2.2 παρουσιάζεται μια δέσμη φωτός λέιζερ που επικεντρώνεται σε απόσταση ενός εκατοστού από την άκρη του μαρμάρου. Η φωτογράφιση έγινε υπό συγκεκριμένη οπτική γωνία, ώστε να είναι εμφανές το φαινόμενο της διείσδυσης και διασκορπισμού του φωτός στα υποστρώματα του μαρμάρου. Κάποια είδη μαρμάρων επιτρέπουν τη διάχυση του φωτισμού του περιβάλλοντος στο εσωτερικό τους εμφανίζοντας έτσι μια σειρά από ιδιαίτερα χρωματικά χαρακτηριστικά. Με τη σύγχρονη τεχνολογία σαρωτών τριγωνισμού λέιζερ, αυτά τα χαρακτηριστικά είναι αδύνατο να αποτυπωθούν και αναπόφευκτα θα πρέπει να αναζητηθεί λύση μέσω άλλων μεθόδων 3Δ ψηφιοποίησης. Ένα αντίστοιχο παράδειγμα αποτελεί και ο ακτινολίθος, ένα από τα κοινότερα πυριτικά ορυκτά της ομάδας των αμφιβόλων. Ένα γλυπτό από ακτινολίθο παρουσιάζει έντονα φαινόμενα διασκορπισμού φωτός στα υποστρώματα της επιφάνειάς του. Το φως προσπίπτει στην επιφάνεια του αντικειμένου και τη διαπερνάει δημιουργώντας διάθλαση, την οποία όμως συλλαμβάνει το σύστημα σάρωσης. Στην Εικόνα 2.3 φαίνεται μια γραφική αναπαράσταση της διαφοροποίησης στον τρόπο ανάκλασης μιας δέσμης φωτός όταν η επιφάνεια του αντικειμένου είναι αδιαφανής (Εικόνα 2.3.α) και όταν η επιφάνεια είναι ημιδιαφανής (Εικόνα 2.3.β), κατά την οποία εισάγεται απροσδιοριστία στη μέτρηση της ανακλώμενης δέσμης λόγω της πολλαπλής διάθλασης και διασκορπισμού της δέσμης στα ανώτερα στρώματα της επιφάνειας του αντικειμένου.

Δυστυχώς το μάρμαρο δεν αποτελεί το μόνο υλικό που εισάγει προκλήσεις στις διαδικασίες 3Δ ψηφιοποίησης. Πρόκληση για τη 3Δ ψηφιοποίηση αποτελεί και ένα εντόνως λαξευμένο γλυπτό ελεφαντοστού, όπου η αποτύπωση της



**Εικόνα 2.2.** Διάθλαση και διασκορπισμός φωτός λέιζερ στην επιφάνεια ενός μαρμάρου τύπου Θάσου.

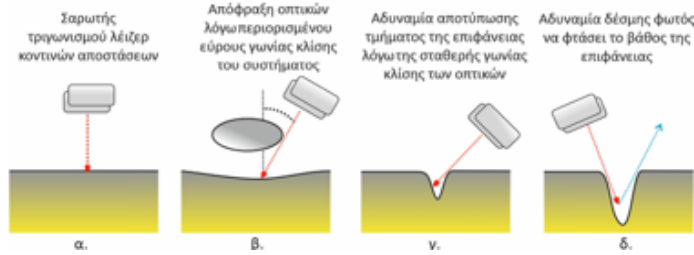


α. Μη φωτοπερατή επιφάνεια β. Φωτοπερατή επιφάνεια

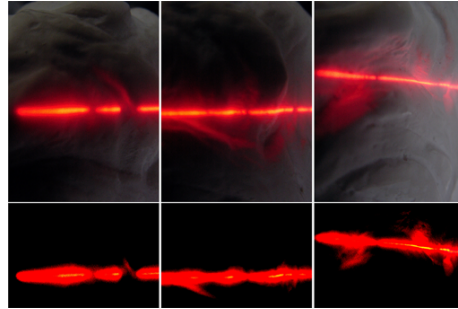
**Εικόνα 2.3.** Γραφική αναπαράσταση της απροσδιοριστίας στη μέτρηση ανακλώμενης δέσμης σε φωτοπερατή επιφάνεια.

πολύπλοκης μορφολογίας των εσωτερικών κοίλων περιοχών είναι σε πολλές περιπτώσεις αδύνατη. Στενές σχισμές είναι πολύ δύσκολο να αποτυπωθούν από το σύνολο των διαθέσιμων μεθόδων και αναπόφευκτα και από τις μεθόδους τριγωνισμού λέιζερ, οι οποίες βασίζονται στον εντοπισμό της εκπεμπόμενης δέσμης λέιζερ πάνω στα σημεία της επιφάνειας. Στην Εικόνα 2.4 αναπαρίστανται γραφικά τα βασικά προβλήματα που μπορεί να εμφανιστούν κατά τη χρήση ενός συστήματος τριγωνισμού λέιζερ. Η επιφάνεια στην Εικόνα 2.4.α είναι απόλυτα επίπεδη και έτσι επιτρέπει την ομαλή και απρόσκοπτη διεξαγωγή της συλλογής δεδομένων σε αντίθεση με την Εικόνα 2.4.β, όπου το σύστημα αναγκάζεται να βρεθεί υπό μεγάλη γωνία κλίσης για να μπορεί να οδηγήσει την ακτίνα λέιζερ στη υπό-ψηφιοποίηση επιφάνεια και ταυτόχρονα να μπορεί να την ανιχνεύσει. Όταν η γωνία κλίσης δεν το επιτρέπει (Εικόνα 2.4.γ) τότε καθίσταται αδύνατη η αποτύπωση συγκεκριμένων σημείων, δημιουργώντας ασυνέχειες στα δεδομένα που παράγονται (ημιτελές ψηφιακό αντίγραφο). Σε περιπτώσεις γλυπτών, για παράδειγμα, αποτελεί γεγονός το ότι η σμίλη του γλύπτη μπορεί να δημιουργήσει τόσο βαθιές και λεπτές πτυχές που η δέσμη φωτός λέιζερ αδυνατεί να ανιχνεύσει (Εικόνα 2.4.δ).

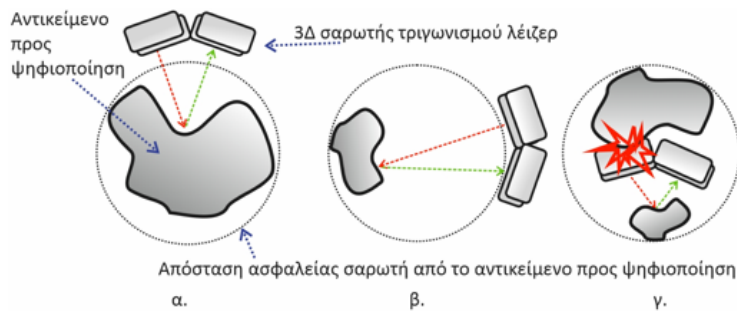
Η διασπορά και ανάκλαση της δέσμης φωτός λέιζερ στις κυρτές ή κοίλες επιφάνειες του αντικειμένου είναι μια ακόμα αναπόφευκτη πρόκληση, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 2.5. Οι ασυνέχειες που εμφανίζει η δέσμη φωτός λέιζερ επιβάλλουν την επανάληψη της διαδικασίας συλλογής δεδο-



**Εικόνα 2.4.** Επιφανειακές καμπυλώσεις που δημιουργούν περιορισμούς στην ψηφιοποίηση.



**Εικόνα 2.5.** Ανακλάσεις στην επιφάνεια και ασυνέχειες της δέσμης φωτός λέιζερ.



**Εικόνα 2.6.** Αδυναμία αποφυγής πρόσκρουσης.

μένων στην ίδια περιοχή με την τοποθέτηση του σαρωτή σε διαφορετική γωνία θέασης.

Στο χώρο της πολιτιστικής κληρονομιάς, η μοναδικότητα και η ανυπολόγιστη αξία των τέχνηργων δεν επιτρέπει σφάλματα. Η επαφή του συστήματος συλλογής δεδομένων με τις επιφάνειες των τέχνηργων απαγορεύεται ρητά. Από την άλλη, η ίδια γεωμετρική πολυπλοκότητα που επηρεάζει τη συλλογή δεδομένων ανεβάζει τον πήχη δυσκολίας στο χειρισμό του συστήματος αποτύπωσης. Θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην επιλογή της θέσης του συστήματος αποτύπωσης σε σχέση με το αντικείμενο. Στην Εικόνα 2.6 απεικονίζονται περιπτώσεις στις οποίες το σύστημα συλλογής δεδομένων δεν μπορεί να λειτουργήσει με ασφάλεια. Η ακεραιότητα του τέχνηργου εξασφαλίζεται πρακτικά

με τον ορισμό μιας περιοχής, την οποία δε θα πρέπει να παραβιάζει ποτέ το σύστημα αποτύπωσης κατά τη διαδικασία συλλογής δεδομένων. Τα περισσότερα συστήματα διαθέτουν μια μέγιστη και μια ελάχιστη απόσταση λειτουργίας που οδηγούν στον περιορισμό των θέσεων που μπορούν να λειτουργήσουν γύρω από ένα αντικείμενο. Αρκετές φορές λόγω των περιορισμών αυτών πολύπλοκα αντικείμενα δεν μπορούν να ψηφιοποιηθούν πλήρως (Εικόνα 2.6.γ).

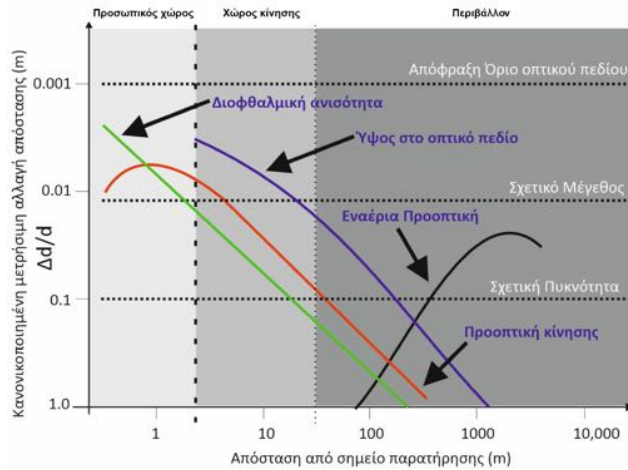
Τα κοσμήματα αποτελούν άλλο ένα παράδειγμα στο οποίο συστήματα τριγωνισμού λέιζερ αδυνατούν να παρέχουν ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα λόγω της υψηλής ανακλαστικότητας των μεταλλικών επιφανειών αλλά και τη διαφάνεια των πολύτιμων λίθων. Φυσικά, ακόμη και με τη χρήση άλλων μεθόδων, όπως οι φωτογραφικές μέθοδοι, αναμένεται ότι το αποτέλεσμα της ψηφιοποίησης θα χαρακτηριζόταν τουλάχιστον προβληματικό. Από την άλλη, αντίστοιχου τύπου αντικείμενα (πολύτιμοι λίθοι με έντονες ανακλάσεις και διαφάνεια) μπορούν να προσομοιωθούν ρεαλιστικά με τεχνολογίες 3Δ γραφικών μέσω ειδικών αλγορίθμων φωτορεαλισμού ενώ η αποτύπωση τμήματος των εν λόγω ιδιοτήτων γίνεται μερικώς μόνο με τη χρήση τεχνικών υψηλού κόστους, όπως οι ειδικοί θόλοι ψηφιοποίησης (light dome ή scanning dome).

Η 3Δ ψηφιοποίηση ενός υφασμάτινου, και ακόμη περισσότερο, ενός γούνινου αντικειμένου αποτελεί άλλη μια πρόκληση, αφού η πολυπλοκότητα της επιφάνειας του αντικειμένου προκαλεί έντονα φαινόμενα διασποράς στη δέσμη φωτός καθώς αυτή εισχωρεί μέσα στις πτυχώσεις. Η ψηφιοποίηση της επιφάνειας θα οδηγούσε στη συλλογή δεδομένων με υψηλά επίπεδα θορύβου. Ακόμα και αν μπορούσε να πραγματοποιηθεί η 3Δ αποτύπωση της γούνας και άρα το γεγονός ότι σήμερα οι σύγχρονοι επιταχυντές γραφικών διαθέτουν μεγάλα αποθεματικά μνήμης, η οπτικοποίηση δισεκατομμυρίων κορυφών σε πραγματικό χρόνο θα ήταν αδύνατη. Και πάλι, για τη φωτορεαλιστική απεικόνιση τέτοιου τύπου αντικειμένων εφαρμόζονται σήμερα ειδικού αλγόριθμοι καθολικού φωτισμού (global illumination) και προσομοίωσης (συνθετική απόδοση τριχών με particle engines) με υψηλό, βέβαια, υπολογιστικό κόστος.

Συνοψίζοντας, ένα μεγάλο πλήθος αντικειμένων εμφανίζει έντονα περίπλοκη μορφολογία και επιφανειακές ιδιότητες που είτε δημιουργούν προβλήματα είτε καθιστούν αδύνατη την 3Δ ψηφιοποίηση με τις διαθέσιμες, σήμερα, τεχνολογίες (Hawkins et al., 2001; Marbs, 2002).

## 2.4 Μέθοδοι 3Δ ψηφιοποίησης

Όλα τα εμπορικά, αλλά και πειραματικά/ερευνητικά, συστήματα που μπορούν να συλλέξουν μετρήσεις 3Δ γεωμετρίας και χρώματος από την επιφάνεια ενός αντικειμένου ακολουθώντας ένα συστηματικό ή αυτοματοποιημένο τρόπο νοούνται ως 3Δ σαρωτές. Σήμερα υπάρχει ένα πλήθος τέτοιων συστημάτων τα οποία πραγματοποιούν τη διαδικασία 3Δ ψηφιοποίησης βασισμένα σε ένα πλήθος διαφορετικών μεθόδων και προσεγγίσεων. Διαφορετικές τεχνολογικές



**Εικόνα 2.7.** Μέθοδοι και αποτελεσματικότητα αντίληψης του βάθους (προσαρμογή από Cutting and Vishton (1995)).

λύσεις έχουν προταθεί για τη ψηφιοποίηση αντικειμένων λαμβάνοντας υπόψη χαρακτηριστικά όπως: (α) υψηλής ανακλαστικότητας επιφάνειες, (β) χρωματική ποικιλομορφία, (γ) μορφολογική-γεωμετρική πολυπλοκότητα. Η ακρίβεια της ψηφιοποίησης, η ευκολία και η ταχύτητα χρήσης, καθώς και το εύρος των υλικών που μπορούν να αποτυπωθούν είναι τα βασικότερα κίνητρα που καθοδηγούν μια διαρκή ανάπτυξη στον τομέα των μεθόδων 3Δ ψηφιοποίησης. Μεγάλο τμήμα του συνόλου των εμπορικών σαρωτών βασίζονται στον τριγωνισμό λέιζερ και αυτό γιατί επιτυγχάνει γεωμετρικά αποτελέσματα υψηλής ακρίβειας, που φτάνουν και σε επίπεδα πολύ μικρότερα του 1 mm. Δημοφιλείς μέθοδοι είναι η Δομή από κίνηση, η Σχήμα από δομημένο φωτισμό, η Σχήμα από σιλουέτα, αλλά και άλλες μέθοδοι, όπως αυτές που χρησιμοποιούν ρομποτικούς βραχίονες με αισθητήρια αφής, οι οποίες συνεχίζουν ακόμα και σήμερα να εξυπηρετούν τις ανάγκες ειδικών εφαρμογών. Η μέθοδος που επιλέγεται κάθε φορά καθορίζει, πρακτικά, τόσο το πεδίο σάρωσης όσο και τα αναμενόμενα αποτελέσματα.

Φυσικά, η οποιαδήποτε μέθοδος έχει ως ενδιαμέσο στόχο τη μέτρηση της απόστασης έως την επιφάνεια του μετρούμενου αντικειμένου, ένα μέγεθος που τυπικά καλείται *βάθος*. Η μέτρηση του βάθους από σύγχρονα συστήματα ακολουθεί τις δυνατότητες αντίληψης του βάθους που έχουν αναγνωριστεί στον άνθρωπο. Συγκεκριμένα, οι Cutting and Vishton (1995) μελέτησαν τους τρόπους αντίληψης του βάθους από τον άνθρωπο που εξαρτώνται από την πληροφορία που είναι διαθέσιμη στο οπτικό πεδίο. Από τη μελέτη αυτή, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γράφημα που δημιουργήθηκε και αναπαρίσταται στην Εικόνα 2.7, το οποίο περιγράφει το είδος πληροφορίας που εκμεταλλεύεται ο άνθρωπος για να αντιληφθεί το βάθος, καθώς αυξάνεται η απόσταση, όπως επίσης και τους περιορισμούς που τίθενται. Το γράφημα αυτό αντικατοπτρίζει,

κατ' επέκταση, και κάποιες από τις αρχές, αλλά και τους περιορισμούς πάνω στους οποίους βασίζονται οι σύγχρονες μέθοδοι αντίληψης βάθους από τις μηχανές που οδηγεί τελικά στο αποτέλεσμα της 3Δ ψηφιοποίησης. Το πλήθος των διαφορετικών μεθόδων που απαντώνται στη βιβλιογραφία προδίδει το έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον για το συγκεκριμένο θέμα. Από την άλλη, η διαφορετική προσέγγιση που προσφέρει η κάθε μέθοδος δείχνει την πολυπλοκότητα του προβλήματος. Σημαντική είναι η συμβολή αλγορίθμων από το χώρο της 3Δ όρασης υπολογιστών. Οι βασικότερες μέθοδοι 3Δ ψηφιοποίησης που εντοπίζονται στη βιβλιογραφία και έχουν ήδη πρακτικές εφαρμογές είναι οι εξής:

- **Τεχνικές μέτρησης με χρήση ακτίνων λέιζερ**
  - Τριγωνισμού ακτίνας λέιζερ (laser triangulation)
  - Χρόνου πτήσης ακτίνας λέιζερ (time of flight scanning)
- **Τεχνικές Σχήμα/Δομή-Από-Χ**
  - Σχήμα από δομημένο φωτισμό (shape from structured light)
  - Σχήμα από σιλουέτα (shape from silhouette)
  - Σχήμα από στερεοφωτογράφιση (shape from stereo)
  - Σχήμα από υφή (shape from texture)
  - Σχήμα από σκιά (shape from shadow)
  - Σχήμα από φωτοσκίαση (shape from shading)
  - Σχήμα από φωτομετρία (shape from photometry)
  - Σχήμα/Δομή από κίνηση (structure from motion)
  - Σχήμα από μεταβαλλόμενη εστίαση (depth from focus)
- **Παραδοσιακές τεχνικές**
  - Παραδοσιακή φωτογραμμετρία (traditional photogrammetry)
  - Τοπογραφία (topography)
  - Εμπειρικές τεχνικές (empirical techniques)
- **Ειδικές τεχνικές**
  - Ολογραφία (digital holography)
  - Μικροσκοπία (atomic force microscopy, stereo scanning electron microscopy, confocal microscopy, white light scanning interferometry)
  - Τομογραφία (x-ray tomography)

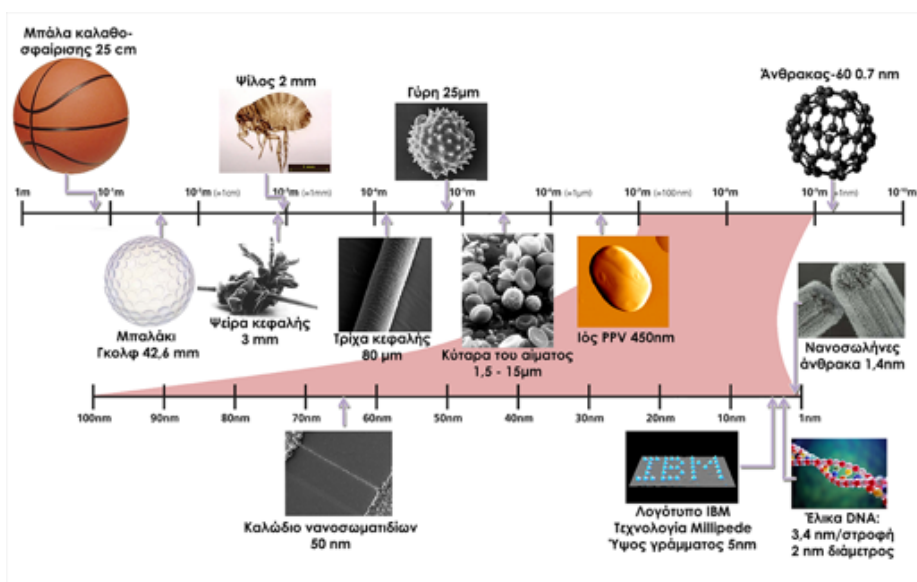
Σημειώνεται ότι στο πλαίσιο του παρόντος συγγράμματος αναλύονται οι τεχνικές τριγωνισμού ακτίνων λέιζερ και οι τεχνικές Σχήμα-Από-Χ, δηλαδή, αυτές που σχετίζονται με την 3Δ ψηφιοποίηση αντικειμένων μέχρι ένα μεσαίο μέγεθος (σύμφωνα με σχετική ανάλυση που ακολουθεί), περιοχή όπου παρουσιάζονται οι περισσότερες εφαρμογές. Στην ανάλυση δεν συμπεριλαμβάνονται οι μέθοδοι μέτρησης χρόνου πτήσης ακτίνων λέιζερ, οι παραδοσιακές τεχνικές, καθώς και οι ειδικές τεχνικές, οι οποίες εστιάζουν στην ψηφιοποίηση είτε πολύ μεγάλων αντικειμένων είτε μικροσκοπικών αντικειμένων. Για τις μεν τεχνικές που εστιάζουν στα πολύ μεγάλα αντικείμενα υπάρχει εκτενής και πλούσια βιβλιογραφία στην οποία ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει, για τις δε ειδικές τεχνικές για μικροσκοπικά αντικείμενα οι εφαρμογές είναι περιορισμένες λόγω του ιδιαίτερα μεγάλου κόστους από την ανάγκη για εξειδικευμένο εξοπλισμό και υποδομές.

Κοινό στοιχείο ανάμεσα στις περισσότερες μεθόδους είναι η ανάγκη εφαρμογής μιας διαδικασίας βαθμονομήσεις. Τυπικά, βαθμονομήσεις είναι η ρύθμιση ενός συστήματος ώστε να παράγει μια αναμενόμενη τιμή εξόδου για συγκεκριμένη τιμή εισόδου. Η ρύθμιση αυτή γίνεται με χρήση πρότυπων αντικειμένων (ειδικών αντικειμένων γνωστών χαρακτηριστικών) στα οποία το σύστημα έχει γνωστή συμπεριφορά. Η βαθμονομήσεις μπορεί να επαναλαμβάνεται πολλές φορές, ανάλογα με το σύστημα, ενώ μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να απαιτείται πριν από κάθε έργο χρήσης του συστήματος (πχ. πριν από κάθε ψηφιοποίηση). Στην 3Δ ψηφιοποίηση, η διαδικασία της βαθμονομήσεις αποτελεί το κλειδί στην ορθή εκτίμηση της 3Δ γεωμετρίας (σωστή εκτίμηση βάθους) και της πληροφορίας υψής (σωστή απόδοση των χρωμάτων).

Η 3Δ ψηφιοποίηση αποτελεί σήμερα ένα σημαντικό εργαλείο με πολλές εφαρμογές. Τις τελευταίες δεκαετίες έχει κάνει την εμφάνισή του πλήθος εμπορικών συστημάτων επιτυγχάνοντας τη διάχυση της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Η έρευνα όμως στο συγκεκριμένο πεδίο συνεχίζεται και νέα, βελτιωμένων επιδόσεων συστήματα κάνουν συχνά την εμφάνισή τους. Είναι πρακτικά αδύνατο να καταλογογραφηθούν όλα τα διαθέσιμα συστήματα και μέθοδοι. Στις παραγράφους που ακολουθούν αναφέρονται οι τεχνικές προσεγγίσεις που είναι διαθέσιμες ανάλογα με το μέγεθος του αντικειμένου ψηφιοποίησης (μια ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος) με αναφορά στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικότερες μέθοδοι και περιγράφονται οι δυνατότητες και οι περιορισμοί τους καθώς και παραδείγματα εφαρμογών.

#### **2.4.1 Μέγεθος αντικειμένων και 3Δ ψηφιοποίηση**

Καθώς η περαιτέρω μελέτη των μεθόδων ψηφιοποίησης βασίζεται στο μέγεθος των αντικειμένων, είναι σημαντικό να κατανοηθεί η κλίμακα των μεγεθών για την οποία γίνεται λόγος στις παραγράφους που ακολουθούν. Για το λόγο αυτό δίνεται στην Εικόνα 2.8 μια ενδεικτική συγκριτική απεικόνιση χαρακτη-



Εικόνα 2.8. Συγκριτικό γράφημα διαστάσεων πραγματικών αντικειμένων.

ριστικών αντικειμένων γνωστών μεγεθών σε κλίμακα από 1 μικρόμετρο ( $\mu\text{m}$ ) έως 1 μέτρο (m). Στα 30 περίπου εκατοστά (cm) υπάρχει η ποδοσφαιρική μπάλα ενώ στα 0,1 νανόμετρο (nm) υπάρχουν μεμονωμένα άτομα. Από διάφορες μελέτες, εργασίες και ερευνητικά έργα σε πανευρωπαϊκό επίπεδο είναι γνωστό ότι η ανάκτηση πληροφορίας στην κλίμακα του μικρόμετρου μπορεί να είναι πολύ χρήσιμη ακόμη και στην περίπτωση των πολιτιστικών αντικειμένων. Με τη χρήση ειδικών τεχνικών για μικροσκοπικά αντικείμενα, γίνεται δυνατή η μετάβαση στην κλίμακα των 100 nm και ακόμη πιο κάτω.

### Ψηφιοποίηση μικροσκοπικών αντικειμένων

Σήμερα, είναι δυνατή η σάρωση αντικειμένων πάρα πολύ μικρής κλίμακας με διάφορες μεθόδους. Τεχνικές όπως η *Μικροσκοπία Ατομικής Δύναμης* (*Atomic Force Microscopy*) και η *Μικροσκοπία Στερεοσκοπικής Σάρωσης Ηλεκτρονίων* (*Stereo Scanning Electron Microscopy*) επιτρέπουν να αναγνωριστούν και να καταγραφούν χαρακτηριστικά σε κλίμακα μερικών δεκάδων νανόμετρων (nm). Άλλες τεχνικές, όπως η *Συνεστιακή Μικροσκοπία* (*Confocal Microscopy*) και η *Συμβολομετρία Λευκού Φωτός* (*White Light Scanning Interferometry*) παρέχουν ανάλυση της κλίμακας μερικών εκατοντάδων νανόμετρων. Το μειονέκτημα που υπάρχει στη χρήση τέτοιων μεθόδων υψηλής ακρίβειας και ανάλυσης είναι ότι οι συσκευές που τις υλοποιούν είναι ιδιαίτερα μεγάλου κόστους και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ψηφιοποίηση πολύ μικρών επιφανειών (τυπικά μικρότερων του  $1 \text{ mm}^2$ ). Το εύλογο ερώτημα στο σημείο αυτό θα ήταν εάν υπάρχει, πραγματικά, κάποια πρακτική αξία στη χρήση τέτοιων



τεχνικών και εξοπλισμού για την ψηφιοποίηση ολοκληρωμένων αντικειμένων μιας πιο «συνήθους» κλίμακας στο φυσικό κόσμο. Η απάντηση μπορεί να είναι μόνο υποθετική, «ίσως». Όταν το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται είναι αυτό της ιδιαίτερα ακριβούς αποτύπωσης πολύ μικρών αντικειμένων τότε σαφέστατα υπάρχει μια εφαρμογή. Για τα συγκεκριμένα αντικείμενα τα μικροσκοπικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά επιφανείας είναι συνήθως πολύ σημαντικά. Η πληροφορία γι' αυτά μπορεί να βοηθήσει διαδικασίες, όπως έλεγχος κατάστασης και αυθεντικότητας, μέθοδος δημιουργίας, κοκ.

Από τις τεχνικές που αναφέρθηκαν, η μέθοδος της *Μικροσκοπίας Στερεοσκοπικής Σάρωσης Ηλεκτρονίων* είναι μάλλον περιορισμένης εφαρμογής. Στη μέθοδο αυτή, τα δείγματα πρέπει να εισαχθούν σε ειδικούς χώρους υπό συνθήκες κενού και απαιτείται ειδική προετοιμασία, συνήθως επικάλυψη με μέταλλο. Έτσι, η μέθοδος μπορεί να ταξινομηθεί στις *καταστροφικές τεχνικές* και είναι, συνεπώς, ακατάλληλη για εφαρμογή στην περίπτωση αντικειμένων της πολιτιστικής κληρονομιάς. Υπάρχουν, βέβαια, περιπτώσεις όπως τα θραυσμάτα κεραμικών, τα απολιθώματα ή τα γυάλινα αντικείμενα, όπου θα μπορούσε να εφαρμοστεί.

Η μέθοδος της *Συνεστιακής Μικροσκοπίας* βρίσκει εφαρμογή κυρίως στις επιστήμες της ζωής και δίνει το καλύτερο αποτέλεσμα όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τεχνικές όπως φθορισμός. Αποφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα για ημιδιαφανή αντικείμενα, επιτρέποντας την καταγραφή εσωτερικής πληροφορίας. Θα μπορούσε να είναι μέθοδος στοχευμένη στην παρατήρηση διάφανων αντικειμένων. Επίσης, είναι δυνατή η σκιαγράφιση επιφάνειας πχ. για την ψηφιοποίηση επιφανειακής υφής, έχοντας το πλεονέκτημα ότι είναι μια μέθοδος που δε στηρίζεται σε επαφή με τα αντικείμενα.

Τη σκιαγράφιση επιφάνειας μπορεί επίσης να παρέχει και η μέθοδος της *Συμβολομετρίας Λευκού Φωτός* και μάλιστα με σημαντικά μικρότερο κόστος. Εμπορικά συστήματα επιτρέπουν τη μέτρηση 3Δ επιφανειών σε κλίμακα κάτω του μικρομέτρου ( $\mu\text{m}$ ) και θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ιδιαίτερα χρήσιμα για την επισταμένη μελέτη επιφανειών. Η μέθοδος δεν απαιτεί επαφή ούτε κάποια ιδιαίτερη επιφανειακή προετοιμασία.

Η μέθοδος *Μικροσκοπίας Ατομικής Δύναμης* είναι η νεότερη στην κατηγορία των τεχνικών μικροσκοπικής κλίμακας. Η αρχή της μεθόδου έγκειται στη χρήση ενός πολύ μικρού μετρητικού συστήματος, με μέγεθος που δεν ξεπερνά τα δέκα άτομα, το οποίο τοποθετείται πολύ κοντά στη μετρούμενη επιφάνεια χωρίς όμως να υπάρχει επαφή. Ενδοατομικές δυνάμεις έλκουν το μετρητικό σύστημα προς την επιφάνεια. Το μικροσκόπιο μπορεί να ανιχνεύσει το σύστημα μέτρησης στην κίνησή του κατά μήκος και πλάτος πάνω στην επιφάνεια που είναι υπό μέτρηση και να ρυθμίσει την απόστασή του από αυτήν μέσω της μέτρησης της δύναμης έλξης που ασκείται. Η μέτρηση της επιφάνειας πραγματοποιείται μέσω του υπολογισμού της ελκτικής δύναμης. Η μέθοδος μπορεί να παρέχει πολύ μεγάλη ακρίβεια που μπορεί να φτάσει κάτω του ενός νανόμετρου σε ειδικές περιπτώσεις.

Το εύλογο, βέβαια, ερώτημα θα ήταν αν υπάρχει κάτι στην κλίμακα αυτή που να είναι ενδιαφέρον. Στις κλίμακες αυτές ανακτάται η μικρο-υφή μιας επιφάνειας ή η τραχύτητά της, η οποία είναι δυνατό να έχει σημαντική συμμετοχή στη συνολική μορφή του αντικειμένου. Μεταβολές στην τραχύτητα της επιφάνειας θα μπορούσαν να είναι χαρακτηριστικές για την κατάσταση της επιφάνειας (πχ. διάβρωση). Πράγματι λοιπόν, στη μικρο-κλίμακα υπάρχει σημαντική πληροφορία. Έτσι, από τις τέσσερις τεχνικές που αναφέρθηκαν, οι τεχνικές Μικροσκοπία Ατομικής Δύναμης και Συμβολομετρία Λευκού Φωτός έχουν πραγματικά κάτι να συνεισφέρουν στο χώρο της 3Δ ψηφιοποίησης και ειδικότερα στον πολιτισμό. Οι τεχνικές αυτές έχουν, όμως, συγκεκριμένα μειονεκτήματα:

- Μπορούν να μετρήσουν μόνο πολύ μικρές επιφάνειες ή μόνο μικρά δείγματα από τα πραγματικά αντικείμενα κάθε φορά.
- Είναι σημαντικά σύνθετες, ακριβές και απαιτούν γνώσεις, εξειδίκευση και επιδεξιότητα.
- Ενώ ο εξοπλισμός είναι μεταφερόμενος, απαιτούνται ιδιαίτερα ελεγχόμενες συνθήκες μέτρησης (πχ. θερμοκρασία, υγρασία).

Όλα αυτά καταδεικνύουν το γεγονός ότι τέτοια συστήματα μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο σε μια διαδικασία ψηφιοποίησης ιδιαίτερα σε συνθήκες όπου η μικροδομή της επιφάνειας αντικειμένων έχει σημαντική πληροφορία να συνεισφέρει τόσο στη σωστή απεικόνιση όσο και τον έλεγχο της κατάστασής του.

### **Ψηφιοποίηση μικρών αντικειμένων**

Με τον όρο «μικρά αντικείμενα» νοούνται αντικείμενα διάστασης έως  $100 \times 100 \text{ mm}$  (ή  $10 \times 10 \text{ cm}$ ). Στην κατηγορία αυτή αδιαμφισβήτητα δημοφιλείς τεχνικές είναι αυτές που βασίζονται σε συστήματα *Τριγωνισμού ακτίνων λέιζερ*. Υπάρχει σήμερα μια μεγάλη πληθώρα εμπορικά διαθέσιμων συστημάτων Τριγωνισμού ακτίνων λέιζερ που στοχεύει σε αυτή την κατηγορία αντικειμένων. Η βασική αρχή λειτουργίας είναι σχετικά απλή: μια σημειακή πηγή φωτός λέιζερ σημαδεύει τη μετρούμενη επιφάνεια εκπέμποντας ακτίνες διαφόρων μηκών κύματος των οποίων η ανάκλαση ανιχνεύεται από οπτικό αισθητήριο (ανιχνευτής θέσης). Καθώς η ακτίνα λέιζερ μετακινείται πάνω στην επιφάνεια, συναντά διαφορετικά ύψη, τα οποία μεταβάλλουν το σημείο εντοπισμού του φωτός στο επίπεδο του οπτικού αισθητηρίου. Αν και το σύστημα μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά, τα περισσότερα συστήματα βασίζονται σε εμπειρική βαθμονόμησης με χρήση προτυποποιημένων διαβαθμίσεων ύψους για την αναγνώριση της σχέσης μεταξύ της μεταβολής στο επιφανειακό ύψος και της θέσης της ακτίνας. Με δεδομένο ότι η προς μέτρηση περιοχή περιορίζεται σε  $100 \times 100 \text{ mm}$

τα συστήματα αυτά επιτυγχάνουν μια ακρίβεια μέτρησης της τάξης μερικών μικρομέτρων.

Στην ψηφιοποίηση των μικρών αντικειμένων μπορούν να εφαρμοστούν πολλές ακόμη μέθοδοι 3Δ ψηφιοποίησης. Από τις μεθόδους που έχουν αναφερθεί ήδη, η μέθοδος *Σχήμα από δομημένο φωτισμό* και μάλιστα σε ειδικές υλοποιήσεις της αποτελεί εξαιρετική επιλογή για υψηλής ανάλυσης και ακρίβειας ψηφιοποίηση μικρών αντικειμένων. Η μέθοδος αναλύεται περαιτέρω στην παράγραφο για τα μεσαίου μεγέθους αντικείμενα. Σε κάποιες περιπτώσεις άλλες μέθοδοι, όπως η *Δομή από κίνηση* θα μπορούσε επίσης, υπό περιορισμούς, να αποδώσει το προσδοκώμενο αποτέλεσμα στοχεύοντας κυρίως σε μια αποτύπωση με μεγάλες απαιτήσεις ακρίβειας και ανάλυσης μόνο όταν συνδυάζεται με ειδικούς φακούς (macro).

### Ψηφιοποίηση αντικειμένων μεσαίου μεγέθους

Στην κατηγορία αυτή υπάγονται «ενδιαφέροντα» αντικείμενα και εδώ διατίθενται οι περισσότερες τεχνικές ψηφιοποίησης. Τα αντικείμενα είναι διαστάσεων άνω των 10 cm και μπορεί να φτάνουν έως και 1 με 2 m. Από πλευράς πολιτιστικού αποθέματος, εδώ μπορεί να περιληφθούν ακόμη και αγάλματα φυσικού μεγέθους.

Πολύ διαδεδομένα συστήματα στην κατηγορία αυτή χρησιμοποιούν τεχνικές δομημένου φωτισμού. Η λειτουργία των τεχνικών αυτών βασίζεται σε μια επέκταση της αρχής του τριγωνισμού. Η διαφορά είναι ότι η σημειακή πηγή αντικαθίσταται από ένα 2Δ μοτίβο φωτός, το οποίο προβάλλεται πάνω στη μετρούμενη επιφάνεια. Διάφορες είναι οι μέθοδοι παραγωγής αυτού του μοτίβου φωτός, άλλοτε με τη συμβολή φωτός από πηγή λέιζερ και άλλοτε με απλή προβολή μοτίβου από προβολικό σύστημα. Συνήθως γίνεται χρήση μοτίβου, το οποίο μετακινείται πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου για να επιτευχθεί η συνολική 3Δ αποτύπωση του. Υπάρχουν τεχνικές που χρησιμοποιούν πολλαπλά μοτίβα, καθώς και τεχνικές Moiré. Το σημαντικό σημείο εδώ είναι ότι με οποιονδήποτε τρόπο και εάν παράγονται τα μοτίβα φωτός, η διαδικασία ανίχνευσης και ανάλυσής τους είναι κοινή. Ένα σύνθημα δεν αποτελείται από δύο απλές καταστάσεις τύπου on/off αλλά, τις περισσότερες φορές, από ημιτονοειδείς μεταβάσεις. Σημαντικό χαρακτηριστικό των εν λόγω μεθόδων είναι ότι καθίσταται δυνατός ο καθορισμός της θέσης στις οποίες παρατηρούνται τα μέγιστα των μοτίβων οδηγώντας σε βελτίωση της ακρίβειας της μέτρησης, παρέχοντας τη δυνατότητα εντοπισμού σε τμήμα μικρότερο ενός κροσσού συμβολής του μοτίβου. Εμπορικά συστήματα στην κατηγορία αυτή είναι ικανά να επιτύχουν ακρίβεια μέτρησης περί το 1/100 των διαστημάτων μεταξύ των κροσσών του μοτίβου. Έτσι εάν το διάκενο αυτό είναι για παράδειγμα 1 cm τότε η αναμενόμενη ακρίβεια μέτρησης είναι της τάξης του 0,1 mm. Επιπλέον, τα συστήματα αυτά βασίζονται συνήθως σε μία από δύο βασικές αρχές λειτουργίας, (α) με χρήση μετασχηματισμού Fourier ή (β) με

χρονική μετατόπιση φάσης. Κάθε προσέγγιση έχει τα πλεονεκτήματά της. Τα περισσότερα εμπορικά συστήματα βασίζονται στη χρονική μετατόπιση φάσης, καθώς η τεχνική αυτή έχει αναλυθεί ικανοποιητικά σε ερευνητικό επίπεδο και είναι σε μερικές περιπτώσεις ευκολότερη στην υλοποίηση της έναντι της άλλης μεθόδου.

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των τεχνικών στην κατηγορία αυτή είναι ότι, σε γενικές γραμμές, η ακρίβειά τους είναι κλιμακούμενη. Αυτό σημαίνει ότι τείνουν να μετρούν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα μικρά από ότι τα μεγάλα αντικείμενα. Για τα περισσότερα συστήματα το χαρακτηριστικό αυτό είναι συνυφασμένο με τον τρόπο που σχεδιάστηκαν. Οι περιορισμοί στην ακρίβειά τους πηγάζουν από το γεγονός ότι μια ψηφιακή εικόνα του μοτίβου φωτός έχει περιορισμένο εύρος ζώνης. Το εύρος αυτό ορίζεται από την ανάλυση που παρέχει το οπτικό αισθητήριο που χρησιμοποιεί το εκάστοτε σύστημα και το βάθος χρωμάτων με το οποίο ψηφιοποιείται η εικόνα. Βασικά, όσο μεγαλύτερο το πλήθος των εικονοστοιχείων στο οπτικό αισθητήριο τόσο μεγαλύτερη η ανάλυση και τόσο μικρότερο μπορεί να είναι το διάκενο μεταξύ των κροσσών του μοτίβου για δεδομένο μέγεθος αντικειμένων. Καθώς η ακρίβεια των συστημάτων είναι αλληλένδετη με το μέγεθος των κροσσών του μοτίβου, μικρότεροι κροσσοί οδηγούν σε μεγαλύτερης ακρίβειας αποτύπωση. Επίσης, καθώς το βάθος χρωμάτων ψηφιοποίησης μεγαλώνει γίνεται όλο και μεγαλύτερη η ικανότητα διαχωρισμού σημείων εντός του μοτίβου οδηγώντας σε περαιτέρω αύξηση της ακρίβειας. Πολλά από τα συστήματα της κατηγορίας εφαρμόζουν την τεχνική τμηματικής ψηφιοποίησης για μεγάλες επιφάνειες (για μεγαλύτερη ακρίβεια) και στη συνέχεια χρησιμοποιούν λογισμικά για τη ευθυγράμμιση και συνένωση των τμηματικών σαρώσεων. Φυσικά και εδώ υπάρχουν όρια και η διαδικασία συλλογής 3Δ δεδομένων απαιτεί περισσότερο χρόνο. Άλλοι σημαντικοί περιορισμοί των συστημάτων αυτών αλλά και κάθε οπτικού συστήματος που βασίζεται σε διασκορπισμό φωτός από μια επιφάνεια είναι οι εξής:

- *Συνήθως αποτυγχάνουν στη μέτρηση σκούρων ή μαύρων επιφανειών.* Η απολύτως συμβατή προς αυτά επιφάνεια μέτρησης είναι μια ομαλή λευκή επιφάνεια χωρίς ανακλάσεις. Έτσι καθίστανται καλή επιλογή για τα περισσότερα από τα έργα γλυπτικής.
- *Τις περισσότερες φορές, γυαλιστερά αντικείμενα με ανακλαστικές επιφάνειες αποτελούν σημαντικό πρόβλημα.* Σήμερα, βέβαια, υπάρχουν ειδικές τεχνικές που αντιμετωπίζουν και αυτό το πρόβλημα. Στη γενική όμως περίπτωση, δεν είναι δυνατή η μέτρηση αντικειμένων με υψηλή ανακλαστικότητα ή με διαφάνεια.
- *Η ύπαρξη μοτίβων ή σημαδιών στην επιφάνεια, όπως διάκοσμος (ζωγραφική) κεραμικών, μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στο σύστημα* οδηγώντας σε καταστάσεις ασάφειας εντοπισμού των προβαλλόμενων μοτίβων.

- *Μεγάλων εύρους κυρτές/κοίλες επιφάνειες (έντονη μορφολογική πολυπλοκότητα) μπορεί να αποτελέσουν πρόβλημα στην 3Δ αποτύπωση. Πολύ απότομες ακμές μπορεί επίσης να εισάγουν δυσκολίες.*

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των συστημάτων είναι ότι παράγουν αυτό που καλείται «*νέφος σημείων*» και όχι ολοκληρωμένες-συνεχείς επιφάνειες. Στα παραγόμενα δεδομένα δεν υπάρχει κάποιου είδους πληροφορία αποκλειστικής σύνδεσης μεταξύ των σημείων και έτσι αυτή πρέπει να οριστεί στη συνέχεια μέσα από διαδικασίες δημιουργίας *πολυγωνικών πλεγματοσειρών*.

Στην κατηγορία αυτή αντικειμένων μπορούν να εισάλθουν και άλλες τεχνικές, μία εκ των οποίων γνωρίζει σημαντική άνθηση τα τελευταία χρόνια και δεν είναι άλλη από την *Ολογραφία με χρήση υπολογιστών*. Η παραδοσιακή ολογραφία είναι ήδη ώριμη (η έρευνα στο συγκεκριμένο αντικείμενο έχει ξεκινήσει πριν από τα μέσα του 20ου αιώνα), αλλά δεν έχει ακόμη καταφέρει να αποδώσει τους καρπούς της τουλάχιστον σε εμπορικό επίπεδο. Έτσι η παραδοσιακή ολογραφία παραμένει ακόμη σε επίπεδο ερευνητικής ή πολύ ειδικής χρήσης. Παρουσιάζεται ως μια πολύ ακριβή και τεχνικά πολύπλοκη μέθοδος. Μερικά από τα προβλήματα που σχετίζονται με την παραδοσιακή ολογραφία είναι η απαίτηση για χρήση υγρών χημικών για την έκθεση των εικόνων και οι σημαντικοί περιορισμοί στη δυνατότητα απεικόνισης. Η τάση όμως φαίνεται να αλλάζει καθώς η ολογραφία με χρήση υπολογιστών δίνει λύσεις στα προβλήματα της παραδοσιακής ολογραφίας. Η αρχή λειτουργίας της ολογραφίας κρύβεται στη φύση του φωτός. Το φως έχει τρεις σημαντικές ιδιότητες: ένταση, συχνότητα και φάση. Μια ασπρόμαυρη εικόνα αναπαριστά μόνο την ένταση. Μια έγχρωμη εικόνα αναπαριστά τις δύο πρώτες ιδιότητες, ένταση και συχνότητα. Μόνο το ολόγραμμα μπορεί να συλλάβει και να αναπαραστήσει και τις τρεις ιδιότητες. Το φως που προέρχεται από διαφορετικά σημεία του αντικειμένου έχει διανύσει διαφορετικό μήκος αποστάσεων και εμφανίζεται, συνεπώς, με διαφορά φάσης. Υπό αυτή την προσέγγιση, η πληροφορία της 3Δ δομής του αντικειμένου βρίσκεται στη φάση. Με έλεγχο της φάσης του φωτός που προσπίπτει στο αντικείμενο μπορούμε να εξασφαλίσουμε ότι όλη η πληροφορία φάσης στο ολόγραμμα προέρχεται από το αντικείμενο, που σημαίνει ότι θα έχουμε καταγράψει τη συνολική πληροφορία 3Δ μορφής του αντικειμένου. Κατά την απεικόνιση, το ολόγραμμα εμφανίζει παράλλαξη, δηλαδή βλέπουμε ένα 3Δ αντικείμενο και εάν μετακινήσουμε τη γωνία ή θέση θέασής του φέρνουμε άλλα τμήματα της επιφάνειάς του στο οπτικό πεδίο. Ακριβώς όπως θα γίνονταν εάν το αντικείμενο είχε φυσική παρουσία.

Δύο είναι οι προσεγγίσεις στην ολογραφία με υπολογιστές: η *Ψηφιακή Ολογραφία (Digital Holography)* και η *Τεχνητά Δημιουργημένη Ολογραφία μέσω Υπολογιστή (Computer Generated Holography)*. Και οι δύο έχουν σημαντικές προοπτικές στη σύλληψη και απεικόνιση 3Δ αντικειμένων. Ψηφιακή ολογραφία είναι η διαδικασία της καταγραφής ολογράμματος με οπτικά αισθητήρια και η αποθήκευσή του σε υπολογιστή. Επειδή η εικόνα μπορεί να αποκατασταθεί

μέσω λογισμικού είναι δυνατή η εξαγωγή του 3Δ σχήματος με μαθηματικές μεθόδους. Τα ψηφιακά ολογράμματα είναι δυνατό να απεικονιστούν με δύο τρόπους:

- Ως *πραγματικά ολογράμματα* με όλες τις ιδιότητες παράλλαξης των τυπικών ολογραμμάτων, μέσω της «εγγραφής» των δεδομένων των ολογραμμάτων σε μια συσκευή που ονομάζεται χωρικός διαμορφωτής φωτός (spatial light modulator) και με το φωτισμό τους είτε με φως από λέιζερ είτε με φως από σημειακή πηγή λευκού φωτός.
- Μέσω του υπολογισμού της *κυματομορφής* από το ολόγραμμα εντός του υπολογιστή και στη συνέχεια υπολογισμού της εικονικής αναπαράστασης του ολογραφηθέντος αντικειμένου σε οθόνη υπολογιστή με τυπικές μεθόδους απεικόνισης 3Δ γραφικών.

Πέραν του σημαντικού πλεονεκτήματος της μαθηματικής αναπαράστασης των δεδομένων ενός ψηφιακού ολογράμματος, άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής του και η δυνατότητα αντιγραφής και αναπαραγωγής του. Ένα ακόμη πλεονέκτημα των ψηφιακών ολογραμμάτων είναι ότι βασίζονται στη χρήση φωτός λέιζερ, το οποίο αποτελεί πρότυπο. Αυτό σημαίνει ότι από τη στιγμή που αποθηκευτεί ένα ψηφιακό ολόγραμμα σήμερα και η διαδικασία επαναληφθεί αργότερα, είναι δυνατή η απόλυτη σύγκριση μεταξύ των ολογραμμάτων. Το μήκος κύματος του χρησιμοποιούμενου λέιζερ HeNe δεν πρόκειται να μεταβληθεί με το πέρασμα του χρόνου (παρέχοντας με τον τρόπο αυτό μέθοδο συγκριτικής μελέτης αντικειμένων στο πέρασμα του χρόνου).

Τα *τεχνητά δημιουργημένα ολογράμματα με χρήση υπολογιστών* είναι στην ουσία η άλλη όψη του ίδιου νομίσματος. Για τη δημιουργία τους γίνεται σύλληψη 3Δ δεδομένων και στη συνέχεια ακολουθεί προσομοίωση της διαδικασίας δημιουργίας ολογράμματος εντός ενός υπολογιστή. Έχοντας υπολογίσει πώς θα είναι το ολόγραμμα, η διαδικασία προχωρά στην τελική κατασκευή του ολογράμματος. Πρόσφατες πρόοδοι στην τελευταία αυτή διαδικασία, ειδικότερα στη λιθογραφία ηλεκτρονίων, δίνουν πλέον αυτή τη δυνατότητα και σε αρκετά μεγάλη κλίμακα - έως και αρκετά μέτρα. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να δημιουργηθεί το ολόγραμμα ενός αντικειμένου που δεν έχει, με την τυπική έννοια, ολογραφηθεί. Η ποιότητα αποκατάστασης είναι εξαιρετική, καθώς τα τεχνητά δημιουργημένα ολογράμματα μπορούν να έχουν πλήρη πληροφορία χρώματος. Εάν εξετάσουμε τη μέθοδο σε μεγάλο βάθος χρόνου μπορούμε να πούμε ότι η ολογραφία τεχνητά δημιουργημένων ολογραμμάτων μπορεί να αποτελέσει την απόλυτη λύση στην ψηφιοποίηση, αποθήκευση και απεικόνιση 3Δ αντικειμένων.

Μία ακόμη τεχνική που μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο μελέτης για τα αντικείμενα της κλίμακας στη συγκεκριμένη παράγραφο είναι η *Τομογραφία*, η διαδικασία συλλογής 3Δ ογκομετρικών δεδομένων από σειρά 2Δ εικόνων τομών. Η μέθοδος βρίσκει σήμερα μεγαλύτερη εφαρμογή στην ιατρική και την

αεροδιαστημική. Είναι ικανή για υψηλή ακρίβεια, ειδικά για μικρά αντικείμενα. Το βασικό πλεονέκτημά της έγκειται στην ικανότητα σύλληψης και αναδημιουργίας εσωτερικής δομής. Η πλέον διαδεδομένη μορφή της εκφράζεται με τη χρήση ακτίνων X, στην οποία γίνεται χρήση ενός πομπού ακτίνων X χαμηλής ενέργειας. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν επίσης και μέθοδοι οπτικής και ακουστικής τομογραφίας, αλλά είναι ακόμη σε πρώιμο στάδιο εξέλιξης σε σχέση με την τομογραφία ακτίνων X. Η τομογραφία όταν εφαρμόζεται σε ανθρώπους βασίζεται στο ότι το σώμα παρουσιάζει διαφοροποίηση ως προς το υλικό, πχ. κόκαλα, μύες, υγρά, αέρια, κλπ. Καθένα από τα υλικά αυτά απορροφά μέρος των ακτίνων X σε διαφορετικό ποσοστό, και, συνεπώς, καθώς οι ακτίνες διατρέχουν το σώμα προκύπτει εικόνα χαρακτηριστική της διαδρομής που διανύθηκε και των υλικών που αλληλεπιδράσαν. Για το λόγο αυτό η τομογραφία ακτίνων X ανθρώπινου σώματος θεωρείται πλούσια σε πληροφορία. Γενικά, όμως, δεν μπορεί να λεχθεί το ίδιο και για τα αντικείμενα όπως του πολιτισμού. Υπάρχουν εξαιρέσεις, αλλά παίρνοντας για παράδειγμα τα αγάλματα, υπάρχει πολύ μικρή διαφοροποίηση στα εσωτερικά υλικά και, έτσι, η τομογραφία μπορεί να συλλάβει μικρά ποσοστά πληροφορίας. Αντίθετα υπάρχουν περιπτώσεις όπου η μέθοδος ενδείκνυται, όπως για παράδειγμα σε σαρκοφάγους.

Τα τελευταία χρόνια και μετά από σημαντικές προόδους της έρευνας στον τομέα της όρασης υπολογιστών και της αποδοτικής υλοποίησης ισχυρών αλγορίθμων, μεγάλη εφαρμογή στα αντικείμενα μεσαίου μεγέθους βρίσκει και η μέθοδος *Δομή από κίνηση*. Στην πραγματικότητα η μέθοδος δεν είναι πλέον αυτή που ήταν όταν έκανε την εμφάνισή της και εφαρμόστηκε στη δημιουργία αραιού νέφους 3Δ σημείων από χαρακτηριστικά σημεία σε εικονοσειρές. Σήμερα έχει εμπλουτιστεί και συμπληρωθεί με μεθόδους δημιουργίας πυκνού νέφους σημείων και τελικής πολυγωνοποίησης μιας μετρούμενης επιφάνειας από πολλαπλές φωτογραφίες. Η μέθοδος βασίζεται στην πολλαπλή φωτογράφιση ενός αντικειμένου με πλήρη κάλυψη της επιφάνειάς του και με σημαντική επικάλυψη μεταξύ των φωτογραφιών. Η επικάλυψη αυτή εγγυάται ότι σε περισσότερες από δύο φωτογραφίες θα υπάρχει ταύτιση χαρακτηριστικών σημείων που θα μπορούσαν να οδηγήσουν, με αντίστροφη μηχανική, στον εντοπισμό των σημείων αυτών στον πραγματικό 3Δ χώρο, από τον οποίο προήλθαν οι 2Δ φωτογραφίες και κατά συνέπεια θα μπορούσαν να χαρακτηρίσουν τη γεωμετρία της επιφάνειας στην οποία εντοπίστηκαν. Το πρόβλημα είναι, όπως συνήθως λέγεται, «αντίστροφο», δηλαδή από 2Δ εικόνες πρέπει να εξαχθεί 3Δ πληροφορία. Προφανώς αυτό δεν μπορεί να επιτευχθεί από μία εικόνα, καθώς από δύο διαστάσεις είναι αδύνατο να βρεθούν οι τρεις διαστάσεις των οποίων προβολή είναι οι δύο δεδομένες διαστάσεις. Καθίσταται όμως δυνατή η κατανόηση της γεωμετρίας μιας 3Δ σκηνής αν υπάρχει σύνολο από εικόνες που παρουσιάζουν σημαντική τοπική επικάλυψη ή, ακόμη, δημιουργία στερεοζευγών (δηλαδή ζευγών εικόνων με μικρές διαφορές, κατ' αναλογία με τις εικόνες από δύο μάτια). Η μέθοδος υλοποιείται αποκλειστικά σε λογισμικό, το οποίο τροφοδοτείται από το σύνολο των εικόνων που καλύπτουν την επιφάνεια του αντικειμένου

και μπορεί να επιτύχει αποτελέσματα υψηλής ακρίβειας και ανάλυσης όταν εφαρμόζεται με γνώση των περιορισμών και απαιτήσεών της.

### Ψηφιοποίηση αντικειμένων μεγάλου μεγέθους

Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται αντικείμενα μεγαλύτερα από 2 m, τα οποία μπορεί να φτάνουν ακόμη και τα 100 m ή ακόμη μεγαλύτερα. Ενώ υπάρχουν πολλές τεχνικές για τη μέτρηση μεσαίων αντικειμένων, παρατηρείται μία έλλειψη ποικιλίας μεθόδων στην κατηγορία αυτή. Υπάρχουν, βασικά, δύο βασικές οικογένειες μεθόδων.

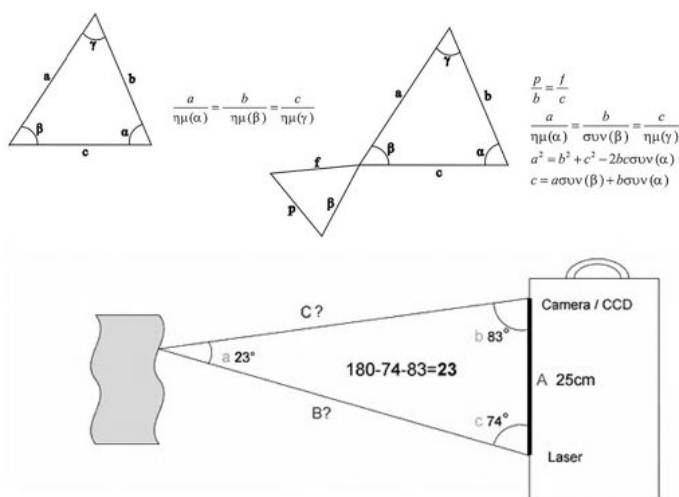
Στην πρώτη οικογένεια, οι μέθοδοι βασίζονται στην ιδέα του *οπτικού radar*. Στην απλούστερη μορφή μια πηγή εκπέμπει ακτίνες λέιζερ, οι οποίες είναι διαμορφωμένες είτε κατά πλάτος είτε κατά συχνότητα. Η ακτίνα ανακλάται από το στόχο και ανιχνεύεται από το σύστημα μέτρησης. Με εξέταση της κατάστασης διαμόρφωσης της ακτίνας που ανιχνεύεται είναι δυνατός ο υπολογισμός του χρόνου που χρειάστηκε για να διανυθεί η αντίστοιχη απόσταση της ακτίνας από τον πομπό στο αντικείμενο και πίσω στο δέκτη. Γνωρίζοντας την ταχύτητα του φωτός στον αέρα είναι δυνατός ο υπολογισμός της απόστασης που διανύθηκε. Τα συστήματα αυτά είναι γνωστά ως συστήματα *Μέτρησης χρόνου πτήσης (Time of Flight (TOF))*. Στην κατηγορία αυτή υπάρχουν εμπορικά διαθέσιμες συσκευές με δυνατότητα μέτρησης πολλαπλών σημείων και σύνθεσης μιας ολοκληρωμένης 3Δ σκηνής. Παρέχουν ακρίβεια περί τα 5 χιλιοστά για αποστάσεις λειτουργίας περί τα 3 μέτρα και άνω, με την ακρίβεια να μεταβάλλεται με την απόσταση. Το προφανές μειονέκτημα είναι ότι πρόκειται για σύστημα που βασίζεται σε σημεία, δηλαδή αποτελούν μια μεγέθυνση των συστημάτων τριγωνισμού και συνεπώς απαιτείται σημαντικός χρόνος για τη συλλογή του συνόλου των απαραίτητων δεδομένων, καθώς σαρώνουν πολύ μεγάλες επιφάνειες.

Στη δεύτερη οικογένεια μέτρησης μεγάλων αντικειμένων ανήκουν τεχνικές φωτογραμμετρίας. Η βασικότερη των τεχνικών αυτών είναι η γνωστή *Καθοδηγούμενη Στερεοφωτογραμμετρία*. Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται σημεία αναφοράς, τα οποία ορίζονται στην επιφάνεια των προς μέτρηση αντικειμένων και λαμβάνεται τουλάχιστον ένα ζεύγος φωτογραφιών από διαφορετικές γωνίες. Μέσω της ταύτισης των σημείων αναφοράς, αυτόματα ή όχι, καθίσταται δυνατή η ανάκτηση πληροφορίας 3Δ γεωμετρίας με τη μέτρηση απόστασης από το επίπεδο λήψης των φωτογραφιών. Η μέθοδος δίνει, προφανώς, καλύτερα αποτελέσματα όταν στα αντικείμενα ή, γενικά, στη σκηνή υπάρχουν επίπεδες επιφάνειες με λίγα σημεία αναφοράς (Streilein and van den Heuvel, 1999).

#### 2.4.2 Τριγωνισμός ακτίνων λέιζερ μικρών αποστάσεων

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των τριγώνων αποτελούν τη βάση για πολλές τεχνικές μετρήσεων. Από τις βασικές μετρήσεις γεωδαισίας που πραγματο-





**Εικόνα 2.9.** Νόμος ημίτονων, νόμος συνημιτόνων, όμοια τρίγωνα και τριγωνισμοί με αριθμητικό παράδειγμα.

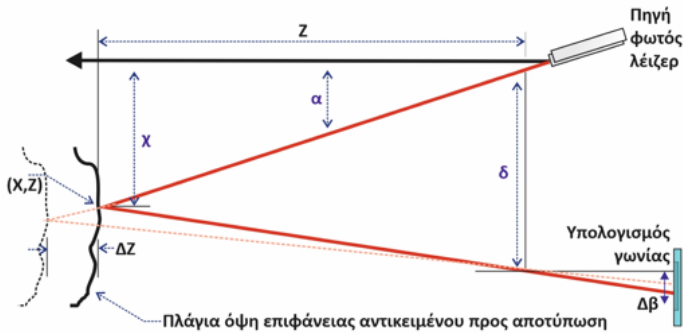
ποιούνταν στην αρχαία Ελλάδα μέχρι και σήμερα με τους 3Δ σαρωτές λέιζερ, η χρήση των τριγώνων είναι θεμελιώδης. Από τους πλέον βασικούς νόμους της γεωμετρίας που βρίσκουν εφαρμογή στη 3Δ ψηφιοποίηση είναι οι νόμοι ημιτόνων και συνημιτόνων που παρέχει άμεση λύση στο πρόβλημα του τριγωνισμού, όπως γραφικά παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.9. Ειδικότερα στο πρακτικό παράδειγμα υπολογισμού της απόστασης επιφανειακού σημείου από το σαρωτή (κάτω τμήμα της Εικόνα 2.9), είναι εμφανής ο εύκολος τρόπος εκτίμησης με βάση τα γνωστά μεγέθη των γωνιών  $b, c$  και της απόστασης της πηγής λέιζερ από το δέκτη (κάμερα)  $A$ , αφού απλή εφαρμογή του νόμου των ημιτόνων δίνει

$$\frac{A}{\sin a} = \frac{C}{\sin c} \left[ = \frac{B}{\sin b} \right] \Rightarrow \frac{A}{\sin(\pi - b - c)} = \frac{C}{\sin c} \Rightarrow$$

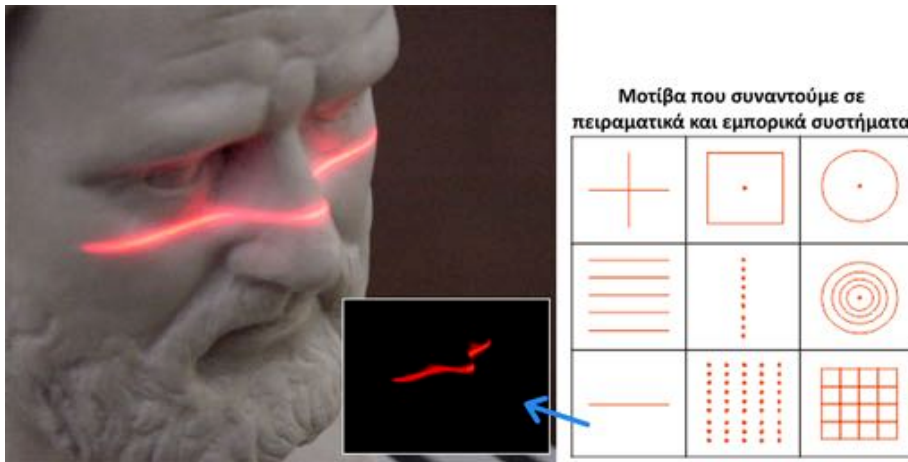
$$C = A \frac{\sin c}{\sin(\pi - b - c)} = 25 \frac{\sin 74^\circ}{\sin 23^\circ} = 61,5 \text{ cm} \quad (2.1)$$

Στην Εικόνα 2.10 παρουσιάζεται γραφικά η διαδικασία του τριγωνισμού σημειακής ακτίνας λέιζερ που εφαρμόζεται στην πράξη. Η θέση του κέντρου του παλμού της δέσμης φωτός λέιζερ που ανακλάται στην επιφάνεια αποτυπώνεται πάνω στο αισθητήριο εικόνας. Το τελευταίο με τη σειρά του υπολογίζει τη νοητή γραμμή που τέμνει τη δέσμη σε ένα ακριβώς σημείο και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό του βάθους. Η θέση στην οποία εντοπίζεται ο παλμός λέιζερ πάνω στην επιφάνεια του οπτικού αισθητηρίου μεταβάλλεται αν μεταβληθεί η σχετική θέση αντικειμένου σαρωτή όπως απεικονίζεται γραφικά με τις διακεκομμένες γραμμές στην Εικόνα 2.10. Φυσικά, η ακρίβεια του τριγωνισμού σχετίζεται με την ικανότητα ακριβούς εντοπισμού του κέντρου του παλμού της δέσμης στο οπτικό αισθητήριο σε κάθε χρονική στιγμή.

Οι πηγές ακτίνων λέιζερ χρησιμοποιούνται στην 3Δ σάρωση λόγω των ιδιαί-



Εικόνα 2.10. Η διαδικασία τριγωνισμού σημειακής ακτίνας λέιζερ.



Εικόνα 2.11. Μοτίβα δομημένου φωτός λέιζερ.

τερων χαρακτηριστικών τους. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά μιας δέσμης φωτός λέιζερ είναι η μικρή της διασπορά, η μεγάλη και συγκεντρωμένη ισχύς της που διατηρείται για μεγάλες αποστάσεις και η εκπομπή της σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος, δηλαδή είναι μονοχρωματική. Οι ιδιότητες αυτές τις καθιστούν την ιδανικότερη επιλογή για συστήματα ψηφιοποίησης χωρίς φυσική επαφή. Τα συστήματα που βασίζονται στην εκπομπή ακτίνων φωτός λέιζερ χρησιμοποιούν διαφορετικά μοτίβα. Στην Εικόνα 2.11 παρουσιάζονται κάποια από τα πλέον διαδεδομένα μοτίβα που απαντώνται τόσο σε εμπορικά όσο και σε ερευνητικά - πειραματικά συστήματα, ενώ δίνεται παράδειγμα λειτουργίας σαρωτή λέιζερ με γραμμική πηγή.

Ο τριγωνισμοί είναι μια τεχνική που εφαρμόζεται από τα τέλη του 20ου αιώνα για τη μέτρηση αποστάσεων, ενώ η χρήση του σε άλλες εφαρμογές ήταν ήδη γνωστή από πολύ παλιότερα. Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη της τεχνολογίας βελτίωσε τόσο την ακρίβεια υπολογισμών όσο και την ταχύτητα. Η ποικιλία στα συστήματα τριγωνισμού λέιζερ εντοπίζεται κυρίως στη:

- *δομή του φωτισμού* που μπορεί να είναι απλό σημείο ή ακτίνα φωτός λέιζερ ή πίνακας πολλαπλών σημείων ή πολλαπλές δέσμες ακτίνων,
- *μορφή του αισθητηρίου* που μπορεί να είναι είτε ένας γραμμικός είτε ένας πλήρης επίπεδος αισθητήρας Charge Coupled Device (CCD) ή Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS),
- *μεθοδολογία συλλογής δεδομένων-σάρωσης* που μπορεί να περιλαμβάνει είτε τη μετακίνηση του αντικειμένου μπροστά από την πηγή φωτός, είτε τη μετακίνηση του ίδιου του συστήματος σάρωσης γύρω από το αντικείμενο.

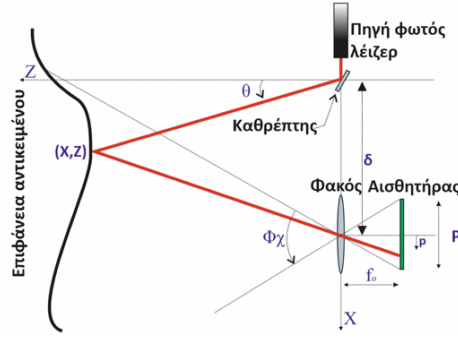
Τα συστήματα ψηφιοποίησης αντικειμένων που βασίζονται σε ακτίνες φωτός λέιζερ χρησιμοποιούνται κυρίως σε αποστάσεις μικρότερες των 10 m. Βασική δομή ενός τυπικού συστήματος είναι αυτή που περιλαμβάνει μια πηγή λέιζερ και ένα οπτικό αισθητήριο σε μια προκαθορισμένη τοπολογία (γνωστή μεταξύ τους απόσταση και γνωστές γωνίες των οπτικών τους αξόνων προς τον άξονα Z). Το οπτικό αισθητήριο (τύπου CCD ή CMOS) χρησιμοποιείται τον εντοπισμό του σημείου ή της περιοχής που «φωτίζει» η ακτίνα λέιζερ. Η προβολή της ακτίνας φωτός λέιζερ μπορεί να σχηματίζει απλά ένα φωτεινό σημείο, μια γραμμή, ένα μοτίβο από ρίγες ή ακόμα και ένα στατικό τυχαίο πλέγμα, όπως στα παραδείγματα στην Εικόνα 2.11. Η 3Δ θέση ενός σημείου στην επιφάνεια του αντικειμένου όπου ανακλάται η ακτίνα μπορεί να υπολογιστεί από το ιδεατό τρίγωνο που δημιουργείται, όπως παρουσιάστηκε στο παράδειγμα στην Εικόνα 2.9. Η ακρίβεια μέτρησης βάθους μειώνεται ανάλογα με την απόσταση ανάμεσα στο σύστημα ψηφιοποίησης και το αντικείμενο.

Σε μια προσέγγιση βελτίωσης της βασικής τοπολογίας του κλασικού συστήματος τριγωνισμού λέιζερ, μια σημειακή ακτίνα φωτός ανακλάται μέσα από έναν περιστρεφόμενο καθρέφτη και προβάλλεται στη συνέχεια μέσω αυτού πάνω στην επιφάνεια του μετρούμενου αντικείμενου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.12. Καθώς ο καθρέφτης στο εν λόγω σύστημα είναι περιστρεφόμενος, η σημειακή δέσμη λέιζερ μπορεί να μετακινείται ελεγχόμενα πάνω στην επιφάνεια του αντικείμενου χωρίς όμως να υπάρχει κίνηση ούτε του σαρωτή ούτε του αντικείμενου, αυξάνοντας σημαντικά την παραγωγικότητα της διαδικασίας.

Στην πράξη, σε μια εφαρμογή σαρωτή με σημειακή πηγή λέιζερ, οι συντεταγμένες  $(X, Z)$  του «φωτιζόμενου» σημείου (βλπ. Εικόνα 2.12) μπορούν να υπολογιστούν με απλές πράξεις τριγωνομετρίας:

$$\begin{aligned} Z &= \frac{f_o \delta}{p + f_o \tan \theta} \\ X &= Z \tan \theta \end{aligned} \quad (2.2)$$

όπου  $p$  είναι η θέση του σημείου του αντικείμενου, όπως παρουσιάζεται πάνω στο αισθητήριο,  $\theta$  είναι η γωνία απόκλισης της ακτίνας φωτός λέιζερ ως προς



Εικόνα 2.12. Σύνθετο σύστημα τριγωνισμού λέιζερ με χρήση καθρέπτης.

τον άξονα  $Z$ , ενώ  $\delta$  είναι η απόσταση ανάμεσα στο φακό και την πηγή της ακτίνας (βάση), ενώ  $f_0$  είναι η απόσταση ανάμεσα στο αισθητήριο και το φακό (εστιακή απόσταση του φακού). Οι περιορισμοί της μεθόδου τριγωνισμού μπορούν να αποδειχθούν με τον υπολογισμό του σφάλματος απόκλισης στον άξονα  $Z$ , ορίζοντας το  $\sigma_Z$  ως μια συνάρτηση του  $p$ . Ο νόμος διάδοσης των σφαλμάτων στην περίπτωση αυτή εκφράζεται ως

$$\sigma_Z \approx \frac{Z^2}{f_0 \delta} \sigma_p \quad (2.3)$$

όπου  $\sigma_p$  είναι η τυπική απόκλιση στη μέτρηση του σημείου  $p$ . Ως εκ τούτου, η τυπική απόκλιση εκφράζει την απροσδιοριστία του  $Z$  που είναι αντιστρόφως ανάλογη με την απόσταση βάσης και την εστιακή απόσταση του φακού. Το μέγεθος της παραμέτρου  $\delta$  περιορίζεται κυρίως από:

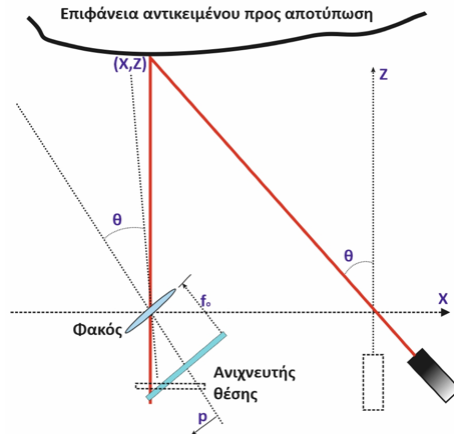
- τα κατασκευαστικά στοιχεία των οπτικών τμημάτων του συστήματος, καθώς η ευρωστία του όλου συστήματος μειώνεται όσο το  $\delta$  αυξάνεται,
- τις οπτικές αποφράξεις που δημιουργούνται, καθώς παρουσιάζεται το πρόβλημα της αυτο-απόφραξης με την αύξηση του  $\delta$ .

Το πεδίο όρασης  $\Phi_x$  δίνεται από

$$\Phi_x = 2 \tan^{-1} \frac{p}{2f_0} \quad (2.4)$$

Συνεπώς, σε μια τυπική κατασκευή συστήματος σάρωσης υπάρχει ένας συμβιβασμός ανάμεσα στην εστιακή απόσταση, στην απροσδιοριστία μέτρησης της τρίτης διάστασης (βάθους) και των οπτικών αποφράξεων που μπορεί να προκύψουν. Ένα τυπικό σύστημα 3Δ ψηφιοποίησης που βασίζεται στον τριγωνισμό λέιζερ μικρών αποστάσεων, εμφανίζει συνήθως μια τυπική απόκλιση ( $\sigma_Z$ ) της τάξης των 50  $\mu\text{m}$ .

Μια παραλλαγή της βασικής δομής των συστημάτων αυτών είναι τα συστήματα που κάνουν χρήση δύο οπτικών αισθητηρίων, τα οποία συνήθως τοποθετούνται στα δύο άκρα της βάσης του συστήματος (με την πηγή λέιζερ

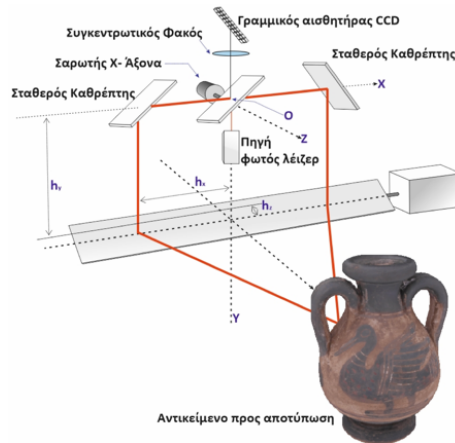


**Εικόνα 2.13.** Αρχή λειτουργίας συγχρονισμένου περιστροφικού συστήματος τριγωνισμού λέιζερ με φακό μεγάλης εστιακής απόστασης.

στη μέση). Στη γενική περίπτωση το σημείο ανάκλασης της ακτίνας λέιζερ γίνεται αντιληπτό και από τα δύο οπτικά αισθητήρια. Η γεωμετρική λύση είναι ίδια με αυτή στην περίπτωση του ενός αισθητηρίου άρα και τα αποτελέσματα έχουν αντίστοιχη ακρίβεια. Η χρήση, επομένως του δεύτερου αισθητηρίου, δε γίνεται για τη βελτίωση της ακρίβειας των μετρήσεων αλλά για τη βελτίωση της αποδοτικότητας του συστήματος, μέσω της μείωσης του χρόνου συλλογής δεδομένων, καθώς τμήματα της επιφάνειας του αντικείμενου που δεν είναι ορατά στον πρώτο αισθητήριο ενδέχεται να είναι ορατά από το δεύτερο και, ως εκ τούτου, επαρκή δεδομένα από όλη την επιφάνεια του αντικείμενου συλλέγονται με λιγότερες επαναλήψεις.

Ο Rioux (1994) παρουσίασε μια καινοτόμο προσέγγιση στη σάρωση με τριγωνισμό. Πρότείνει ένα *συγχρονισμένο περιστροφικό σύστημα* που μπορεί να σαρώσει με χρήση φακών πολύ μεγάλης εστιακής απόστασης με πολύ μικρές γωνίες τριγωνισμού, χωρίς να τίθεται θέμα συμβιβασμού στην ακρίβεια των μετρήσεων βάθους. Στο συγκεκριμένο σύστημα εφαρμόζονται μικρές γωνίες τριγωνισμού και έτσι επιτυγχάνεται μείωση στην εμφάνιση πιθανών οπτικών αποφράξεων. Ο απώτερος σκοπός της συγκεκριμένης προσέγγισης δεν είναι άλλος από το συγχρονισμό της προβολής της ακτίνας φωτός λέιζερ και του εντοπισμού της. Όπως γραφικά αναπαρίσταται στην Εικόνα 2.13, το οπτικό πεδίο του ανιχνευτή ακολουθεί το σημείο συνάντησης της δέσμης λέιζερ με την επιφάνεια του αντικείμενου καθώς η πηγή λέιζερ σαρώνει την επιφάνεια του αντικείμενου. Η εστιακή απόσταση του φακού σχετίζεται με το επιθυμητό βάθος πεδίου ή την περιοχή μέτρησης και όχι με το οπτικό πεδίο. Η ανάπτυξη συστημάτων 3Δ ψηφιοποίησης αυτόματου συγχρονισμού έχει οδηγήσει σε σημαντικές μειώσεις στις διαστάσεις του τμημάτων που φέρουν τα οπτικά αισθητήρια (οπτική κεφαλή).

Όπως προαναφέρθηκε, η παραγωγικότητα της μεθόδου αυξάνεται σημα-



**Εικόνα 2.14.** Αρχή λειτουργίας περίπλοκου σαρωτή λέιζερ με πολλαπλούς καθρέφτες.

ντικά με την επικουρική χρήση καθρεφτών. Η χρήση αυτή μπορεί να βασιστεί και σε πλέον περίπλοκες τοπολογίες σταθερών και περιστρεφόμενων καθρεφτών, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.14. Στην περίπτωση αυτή, οι καθρέφτες περιστρέφονται γύρω από το κέντρο ενός νοητού άξονα. Ο άξονας  $X$  (μεγάλη ταχύτητα σάρωσης) χρησιμοποιείται για τη γραμμική σάρωση, ενώ ο άξονας  $Y$  (μικρή ταχύτητα σάρωσης) ανακλά κάθετα την ακτίνα, ώστε να δημιουργήσει την εικόνα που καταγράφεται από γραμμικό οπτικό αισθητήριο.

Σε πολλές εφαρμογές αποτύπωσης αντικειμένων, ειδικότερα δε στην περίπτωση της πολιτισμικής κληρονομιάς, εκτός από τη γεωμετρία, η συλλογή πληροφορίας υφής (χρώματος) είναι απαραίτητη για τη δημιουργία ενός πλήρους 3Δ ψηφιακού αντιγράφου του αντικειμένου. Υπάρχουν συστήματα 3Δ ψηφιοποίησης που μπορούν και καταγράφουν την ένταση του επιστρεφόμενου σήματος στο οπτικό αισθητήριο, αλλά αυτή η πληροφορία δεν είναι αρκετή για τη ρεαλιστική αποτύπωση της υφής. Τα περισσότερα εμπορικά συστήματα τριγωνισμού έχουν βελτιστοποιηθεί για την αναγνώριση της ακτίνας φωτός λέιζερ και του σημείου που αυτή καταδεικνύει και όχι για την αποτύπωση της χρωματικής πληροφορίας στο συγκεκριμένο σημείο. Έτσι, σε πολλά συστήματα χρησιμοποιείται επικουρικά μια υψηλής ποιότητας ψηφιακή φωτογραφική μηχανή, συνήθως τοποθετημένη στο εξωτερικό του σαρωτή με χρήση ειδικού συστήματος στήριξης, προσαρμογής και βαθμονομήσεις. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι απαραίτητη η γνώση της σχετικής απόστασης του συστήματος ψηφιοποίησης και ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής που λαμβάνεται υπόψη στις διαδικασίες βαθμονομήσεις. Η βαθμονομήσεις και των δύο επιτρέπει τη χαρτογράφηση (UV texture mapping) των 2Δ εικόνων πάνω στην επιφάνεια της πλεγματοσειράς ή του χρωματισμού των κορυφών του νέφους σημείων που αποδίδει ο σαρωτής τριγωνισμού λέιζερ (Curless and Levoy, 1995). Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι στα συστήματα τριγωνισμού μικρών αποστάσεων όπου το

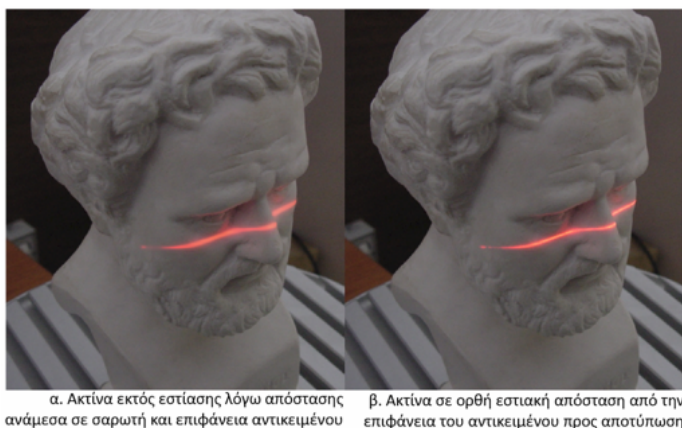
βάθος υπολογίζεται από έναν και μόνο παλμό φωτός, παρατηρούνται σφάλματα μέτρησης που εμφανίζονται εξαιτίας του βαθμού ανάκλασης της δέσμης λέιζερ στην επιφάνεια του αντικειμένου, ο οποίος σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά της ίδιας της επιφάνειας (Beraldin et al., 2004).

### **Βαθμονόμηση**

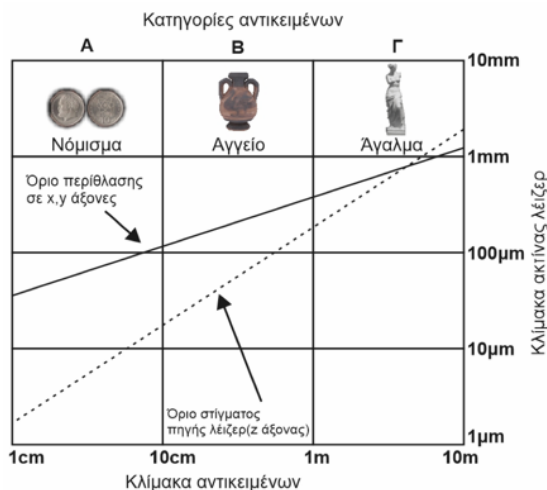
Η διαδικασία βαθμονομήσεις (calibration) του ψηφιακού οπτικού συστήματος που χρησιμοποιεί ένας σύστημα λέιζερ μικρών αποστάσεων είναι βασικός παράγοντας της ορθής λειτουργίας του. Η διαδικασία βαθμονομήσεις είναι συνήθως τυποποιημένη και περιλαμβάνει την αναγνώριση των εσωτερικών και εξωτερικών χαρακτηριστικών του οπτικού συστήματος με τη βοήθεια ενός πραγματικού αντικείμενου που τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά είναι γνωστά με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Τα χαρακτηριστικά αυτά βοηθούν στον ορισμό του μαθηματικού μοντέλου που περιγράφει την εστιακή απόσταση, τις παραμορφώσεις που εισάγει ο φακός στην εικόνα και άλλες παραμέτρους που έχουν εφαρμογή στη συλλογή δεδομένων και υπολογισμό του βάθους. Μετά τη σάρωση του γνωστού αντικείμενου η σχετική ακρίβεια και το εύρος των σφαλμάτων μέτρησης του συστήματος μπορούν να υπολογιστούν. Η διαδικασία αποτελεί ουσιαστικά και την επαλήθευση και επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων. Η ακρίβεια του συστήματος μπορεί να υπολογισθεί μέσω του γνωστού αντικείμενου βαθμονομήσεις, το οποίο αποτυπώνεται από διαφορετικές θέσεις και προσανατολισμούς. Ένας γενικός κανόνας που ακολουθείται στη συγκεκριμένη διαδικασία είναι πως τα χαρακτηριστικά του αντικείμενου βαθμονομήσεις πρέπει να είναι γνωστά με ακρίβεια δέκα φορές μεγαλύτερη από αυτή που αποτυπώνει το ψηφιακό οπτικό σύστημα του σαρωτή.

### **Ανάλυση**

Η ανάλυση (resolution) της 3Δ ψηφιοποίησης είναι θεωρητικά μια συνάρτηση του μεγέθους των γωνιακών μεταβολών που μπορεί να αντιληφθεί το σύστημα σε σχέση με την ακτίνα λέιζερ που προβάλλεται σε διαφορετικά σημεία πάνω σε μία επιφάνεια και το μέγεθος του στίγματος της ακτίνας λέιζερ που ανακλάται. Αν η υψηλή ανάλυση είναι βασική προϋπόθεση σε μια εφαρμογή ψηφιοποίησης, τότε θα πρέπει με μεγάλη προσοχή να ελεγχθεί η βέλτιστη ικανότητα εστίασης της ακτίνας πάνω στο αντικείμενο. Στην Εικόνα 2.15 παρουσιάζεται στιγμιότυπο από διαδικασία ψηφιοποίησης σε τμήμα προτομής. Η ρύθμιση της εστίασης γίνεται χειροκίνητα. Εμφανέστατη είναι η διαφορά έντασης αλλά και ευκρίνειας της δέσμης καθώς ο σαρωτής πλησιάζει προς το σημείο βέλτιστης εστίασης (Εικόνα 2.15.β). Η ανάλυση του τριγωνισμού περιορίζεται από την περίθλαση της ακτίνας. Ακόμα και σε βέλτιστες περιπτώσεις, η δέσμη φωτός δε διατηρεί την απόλυτη ευθυγράμμιση με το στόχο της. Στην πραγματικότητα, όσο λεπτότερη είναι η ακτίνα λέιζερ τόσο μεγαλύτερη είναι η



**Εικόνα 2.15.** Ακτίνα λέιζερ γραμμικού μοτίβου εντός και εκτός εστίασης.

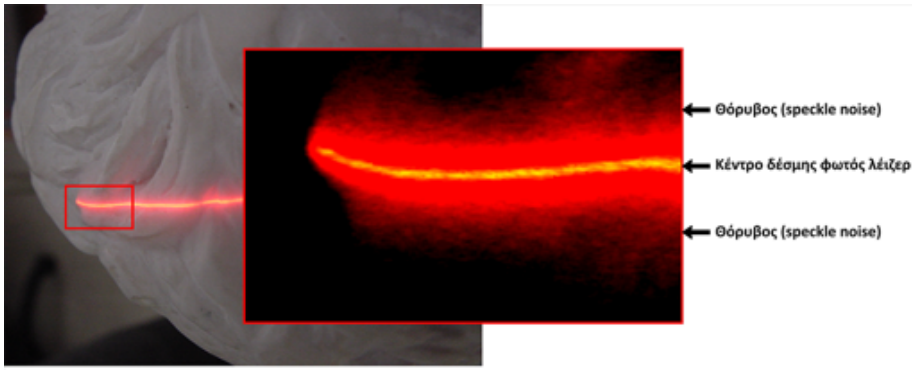


**Εικόνα 2.16.** Όρια περίθλασης και σχέση διαστάσεων μεταξύ ακτίνας λέιζερ και αντικειμένου.

απόκλιση που δημιουργείται εξαιτίας της περίθλασης. Η περίθλαση της δέσμης επιβάλλει έναν περιορισμό στην ισχύ της ακτίνας λέιζερ.

Το γράφημα στην Εικόνα 2.16 περιγράφει τα όρια περίθλασης σε σχέση με τη διάσταση ακτίνας και με το μέγεθος των προς 3Δ ψηφιοποίηση αντικειμένων. Ο διαχωρισμός των αντικειμένων έγινε με βάση τις διαστάσεις τους σε τρεις γενικές κατηγορίες. Ο περιορισμός αυτός έχει να κάνει με τα όρια εντοπισμού της ακτίνας φωτός λέιζερ από τα αισθητήρια, καθώς αυτή κινείται κατά μήκος των αξόνων  $X$  και  $Y$ . Στην περίπτωση του άξονα  $Z$  αυτό που θα περίμενε κανείς είναι μια συνεχή βελτίωση όσο η ισχύς της ακτίνας αυξάνεται και πλησιάζει την επιφάνεια του αντικειμένου. Δυστυχώς όμως κάτι τέτοιο δεν ισχύει. Μια εμπειριστωμένη ανάλυση στα χαρακτηριστικά της διάδοσης της δέσμης φωτός μπορεί να βρεθεί στην εργασία των Beraldin et al. (2004).





**Εικόνα 2.17.** Διάχυση ακτίνας λέιζερ πάνω σε επιφάνεια μετρούμενου αντικειμένου.

Κοινό χαρακτηριστικό των συστημάτων τριγωνισμού λέιζερ μικρών αποστάσεων αποτελεί το γεγονός ότι οι μετρήσεις των αποστάσεων βάθους πολλές φορές αποκτούνται με βάση ένα τυπικό διακριτό πλέγμα (την επιφάνεια ενός οπτικού ανιχνευτή), το οποίο δεν μπορεί να εξασφαλίσει ότι κάθε σημείο πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου συμπίπτει με ένα συγκεκριμένο σημείο πάνω στο διακριτό πλέγμα του αισθητηρίου. Οι μετρήσεις σημείο-προσ-σημείο βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στη γραμμική παρεμβολή (interpolation) στα δεδομένα. Αυτός ο περιορισμός είναι αποτέλεσμα της προκαθορισμένης και αυστηρά πεπερασμένης χωρικής ανάλυσης του αισθητηρίου εικόνας. Σε άλλες μεθόδους ψηφιοποίησης (πχ. Σχήμα από δομημένο φωτισμό), η ίδια η μέθοδος εισάγει μια κατά προσέγγιση εκτίμηση (averaging) για την ορθή θέση του μετρούμενου σημείου πάνω στο οπτικό αισθητήριο.

### Θόρυβος

Σε συστήματα τριγωνισμού λέιζερ μικρών αποστάσεων, η ακρίβεια των δεδομένων εξαρτάται σε μέγιστο βαθμό από την ορθή ερμηνεία της θέσης της ακτίνας φωτός λέιζερ. Η δέσμη δημιουργεί ένα προφίλ Gaussian διασποράς πάνω στην επιφάνεια των αντικειμένων (Cortelazzo and Marton, 1999). Έτσι, η χωρική διασπορά της δέσμης φωτός στην επιφάνεια έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό της δυνατότητας ανάκτησης της ακριβούς θέσης της δέσμης από τα οπτικά αισθητήρια. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό και ως speckle effect και εμφανίζεται με τη μορφή τυχαίας διάχυσης του φωτός πάνω στην επιφάνεια των αντικειμένων. Υπεύθυνη για το φαινόμενο είναι η ίδια η επιφάνεια των αντικειμένων και, κυρίως, η τραχύτητα της. Ο θόρυβος αυτός (speckle noise) μεταφέρεται αναπόφευκτα και στα τελικά δεδομένα (Εικόνα 2.17).

Πολλοί ερευνητές έχουν κατά καιρούς μελετήσει τις συνέπειες του θορύβου και έχουν καταλήξει σε ένα θεμελιώδες όριο που αποτελεί και το φράγμα στην ακρίβεια υπολογισμού του βάθους. Βέβαια, ο θόρυβος αυτός μπορεί να μειωθεί με την εφαρμογή συγκεκριμένων τεχνικών, όμως οι τεχνικές γραμμικού φιλτρα-

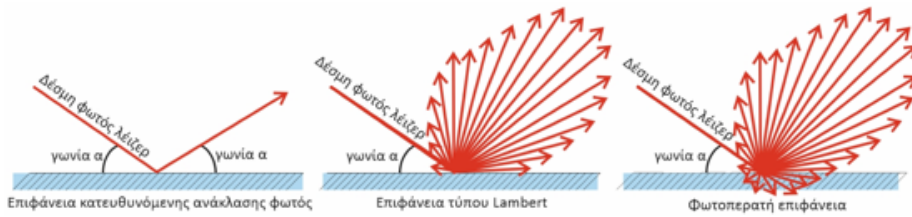
ρίσματος που βασίζονται σε χρονικούς τελεστές και βρίσκουν εφαρμογή στην ψηφιακή επεξεργασία εικόνας δεν αποδίδουν στη συγκεκριμένη περίπτωση. Αντίθετα, η εφαρμογή μεθόδων φιλτραρίσματος στο πεδίο της εικόνας αποδίδουν. Τα φίλτρα αυτά είναι γνωστά από τους χώρους της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας και ως χωρικά φίλτρα. Μια τυπική μέθοδος για την ελαχιστοποίηση του προβλήματος ορθής ερμηνείας της θέσης, αποτελεί ο εντοπισμός του κέντρου του μονοδιάστατου παλμού της δέσμης. Τα αποτελέσματα, όμως, της τεχνικής αυτής είναι ορθά μόνο όταν η επιφάνεια σάρωσης είναι επίπεδη (Beraldin et al., 2004). Είναι, λοιπόν, για μια ακόμη φορά εμφανές πως *τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας ενός αντικειμένου επιδρούν στις επιδόσεις ενός σαρωτή λέιζερ* (Boehler and Marbs, 2002; Forest et al., 2004).

Ο «βέλτιστος» τύπος επιφάνειας για ψηφιοποίηση με ακτίνες λέιζερ είναι αυτός που φέρει χαρακτηριστικά Lambert (είναι ματ) και ταυτόχρονα έχει υψηλό δείκτη ανάκλασης. Στην Εικόνα 2.18 περιγράφεται ο τρόπος που συμπεριφέρονται οι δέσμες φωτός, καθώς ανακλώνται σε μια επιφάνεια κατευθυνόμενης ανάκλασης (specular) (Εικόνα 2.18.α), σε μια επιφάνεια ματ - Lambertian (Εικόνα 2.18.β) και μια ημιδιαφανή επιφάνεια (πχ. μάρμαρο) (Εικόνα 2.18.γ). Σε μια ημιδιαφανή επιφάνεια το φως διεισδύει στα υποστρώματα του αντικειμένου, σε βάθος ανάλογο της ισχύος του. Επιπρόσθετα, το φως διαχέεται (σκεδάσεις φωτός) στα υποστρώματα του αντικειμένου και δημιουργεί εσωτερικό διασκορπισμό. Έτσι, το οπτικό σύστημα συλλέγει πλήθος ανακλάσεων φωτός, άλλοτε επιθυμητών και άλλοτε ανεπιθύμητων, οι οποίες εν συνεχεία ορίζουν κορυφές (σημεία) στο 3Δ χώρο. Αν η ένταση της δέσμης μειωθεί, ο θόρυβος γίνεται ακόμα πιο εμφανής και αυτό μειώνει περισσότερο την ποιότητα των δεδομένων που συλλέγονται άρα και το ίδιο το 3Δ ψηφιακό αντίγραφο (Cortelazzo and Marton, 1999).

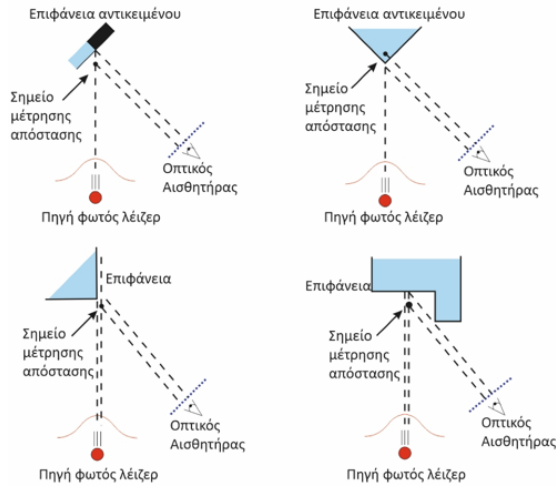
Γενικά θόρυβος στα δεδομένα εμφανίζεται όταν:

- Η ανακλαστικότητα της επιφάνειας ποικίλει και μεταβάλλεται.
- Η γεωμετρία της επιφάνειας παρεκκλίνει έντονα από επίπεδο σε επίπεδο.
- Η πορεία της δέσμης φωτός μέχρι το αισθητήριο παρεμποδίζεται.
- Η τραχύτητα της επιφάνειας προκαλεί παρεκκλίσεις στη δέση φωτός.

Στην Εικόνα 2.19 παρουσιάζονται κάποια τυπικά παραδείγματα στα οποία εμφανίζονται σφάλματα στον υπολογισμό της απόστασης ανάμεσα στην επιφάνεια του αντικειμένου και την πηγή φωτός λέιζερ. Στην Εικόνα 2.19.α απεικονίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο, εξαιτίας της ανάκλασης, υπολογίζεται ένα σημείο στο 3Δ χώρο που όμως δεν ταυτίζεται με τη θέση της επιφάνειας του αντικειμένου στον πραγματικό κόσμο. Στις Εικόνα 2.19.β και Εικόνα 2.19.γ παρουσιάζονται άλλα δύο παραδείγματα, στα οποία οι σημαντικές γεωμετρικές αποκλίσεις της επιφάνειας του αντικειμένου οδηγούν σε εσφαλμένες μετρήσεις του βάθους. Στην Εικόνα 2.19.δ παρουσιάζεται το φαινόμενο, κατά το οποίο



**Εικόνα 2.18.** Τύποι επιφανειών και συμπεριφορά τους στην ανάκλαση δέσμης λέιζερ.



**Εικόνα 2.19.** Περιπτώσεις εσφαλμένου υπολογισμού βάθους.

η μορφολογία του αντικειμένου εμποδίζει το αισθητήριο του συστήματος να εντοπίσει το σημείο στην επιφάνεια του αντικειμένου στο οποίο ανακλάται η δέσμη φωτός λέιζερ. Στις δύο τελευταίες περιπτώσεις παρουσιάζεται παρόμοιος εύρος γεωμετρικό σφάλμα (θόρυβος στα δεδομένα).

Συνοψίζοντας, η μορφολογία και τραχύτητα της επιφάνειας, καθώς και το υλικό του αντικειμένου εισάγουν ένα εύρος τυχαίων αποκλίσεων στη διαδρομή της δέσμης λέιζερ και εισάγουν απροσδιοριστία στον ακριβή εντοπισμό της θέσης ανάκλασής της. Συνεπώς, προκύπτουν παραμορφώσεις στην 3Δ γεωμετρία που τελικά υπολογίζεται. Πέραν, όμως, αυτού του θορύβου μέτρησης, συνολικά εντοπίζονται τρεις διαφορετικές πηγές θορύβου που επηρεάζουν έντονα τη συλλογή και ερμηνεία οπτικών δεδομένων στα συστήματα σάρωσης με ακτίνες λέιζερ:

- Ηλεκτρικός θόρυβος, ο οποίος είναι εγγενής θόρυβος σε όλα τα ηλεκτρονικά συστήματα.
- Θόρυβος κβαντισμού, ο οποίος οφείλεται στο ότι τα συστήματα που χρησιμοποιούνται είναι ψηφιακά και συνεπώς υπάρχει περιορισμένο εύρος τιμών και διακριτική ικανότητα.

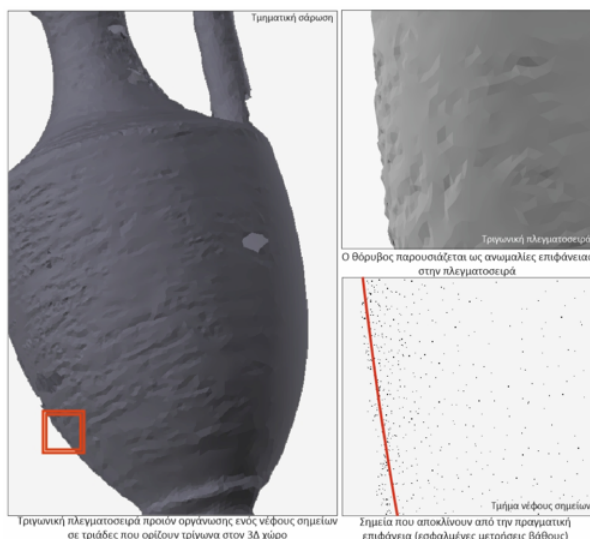
- Θόρυβος διάχυσης της δέσμης φωτός λέιζερ, ο οποίος συμπεριλαμβάνει όλα τα «οπτικά» προβλήματα που αναπτύχθηκαν παραπάνω.

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε περιπτώσεις όπου είναι χαμηλή η ισχύς της δέσμης λέιζερ, ο λόγος σήματος προς θόρυβο (signal to noise ratio (SNR)) είναι μικρός, και έτσι, οι δύο πρώτες πηγές θορύβου επηρεάζουν στο μέγιστο τον υπολογισμό του βάθους. Αντίθετα, ο θόρυβος από διάχυση της δέσμης λέιζερ σχετίζεται απόλυτα και με τη φύση και τα χαρακτηριστικά της ακτίνας λέιζερ και του αντικειμένου (Cortelazzo and Marton, 1999).

### Γεωμετρική ακρίβεια

Όπως έχει αναφερθεί, η γεωμετρική ακρίβεια στα συστήματα 3Δ ψηφιοποίησης σχετίζεται με την ακρίβεια στις μετρήσεις της απόστασης στον άξονα  $Z$  ή του βάθους. Θεωρητικά, θα έπρεπε κάθε έργο ψηφιοποίησης να στοχεύει στη μέγιστη γεωμετρική ακρίβεια για λόγους πιστής αντιγραφής ενός αντικειμένου. Παρόλα αυτά, η γεωμετρική ακρίβεια δεν είναι απαραίτητα και πάντοτε μια κυρίαρχη απαίτηση. Για παράδειγμα, μια απόκλιση μερικών χιλιοστών σε σημεία επιφάνειας που αποτελεί τμήμα ενός μορφολογικά απλού γεωμετρικού σχήματος (πχ. ένα επίπεδο) δεν είναι πάντοτε μεγάλο πρόβλημα. Σε κάθε περίπτωση, όμως, όταν η αποτύπωση πολύπλοκων επιφανειών είναι αναγκαία να γίνεται με μεγάλη γεωμετρική ακρίβεια, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι τα δεδομένα που προκύπτουν (νέφη σημείων) περιέχουν και θόρυβο, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Ο θόρυβος αυτός, πρακτικά, παρουσιάζεται ως μετατόπιση των σημείων από τις θεωρητικά ορθές θέσεις τους στον 3Δ χώρο, συνήθως με έναν τυχαίο τρόπο που ακολουθεί Gaussian κατανομή. Το φαινόμενο αυτό εισάγει προκλήσεις κατά την επεξεργασία των δεδομένων, αφού επιβάλλει τη χρήση φίλτρων ομαλοποίησης (smoothing) και απλοποίησης (simplification). Ο στόχος των φίλτρων αυτών είναι τόσο να μειώσουν τα επίπεδα του θορύβου όσο και να μειώσουν τον όγκο των δεδομένων, διατηρώντας όμως, κατά το δυνατόν, ανέπαφα τα όρια των επιφανειών και τον όγκο του αντικειμένου.

Στην Εικόνα 2.20 παρουσιάζεται η πλεγματοσειρά που δημιουργήθηκε από το μετασχηματισμό νέφους σημείων μετά από σάρωση με σύστημα τριγωνισμού ακτίνων λέιζερ. Οι θέσεις πολλών σημείων του αρχικού νέφους έχουν υπολογισθεί εσφαλμένα τόσο λόγω της ανακλαστικότητας της επιφάνειας του αντικειμένου, όσο και της υψίσυχνης χρωματικής μεταβολής λόγω του διακόσμου που φέρει αλλά και του θορύβου από τη διάχυση της δέσμης. Αυτό είναι εύκολα εμφανές στην κάτω-δεξιά εικόνα, όπου μια νοητή κόκκινη καμπύλη δείχνει το θεωρητικό όριο της επιφάνειας του αντικειμένου, το οποίο εσφαλμένα ξεπερνούν ορισμένα από τα σημεία του νέφους. Χωρίς τη χρήση αλγορίθμων ομαλοποίησης του νέφους σημείων ο θόρυβος αυτός μεταφέρεται αναπόφευκτα και στην προκύπτουσα πλεγματοσειρά. Ανάλογα με το μετασχηματισμό που



**Εικόνα 2.20.** Παράδειγμα νέφους σημείων με θόρυβο μέτρησης και επιπτώσεις στην προκύπτουσα πλεγματοσειρά.

εφαρμόζεται, το εύρος των επιπτώσεων του θορύβου μειώνεται ή αυξάνεται, ενώ πολλές φορές λόγω της έντασής του οδηγεί σε γεωμετρικές ασυνέχειες («τρύπες») στην πλεγματοσειρά.

### 2.4.3 Σχήμα από σιλουέτα

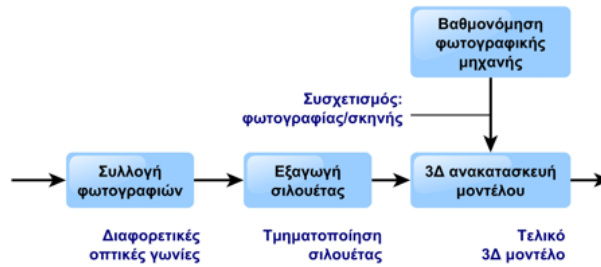
Η μέθοδος Σχήμα από σιλουέτα (Shape from silhouette) ανήκει στην κατηγορία παθητικών τεχνικών και βασίζεται στην πληροφορία που προσφέρει ένα σύνολο από 2Δ φωτογραφίες. Η μέθοδος πρωτοεμφανίζεται πριν την ψηφιακή εποχή, κατά το 1860, όταν ο François Willème παρουσίασε μια μέθοδο με την ονομασία *φωτογλυπτική* (photo sculpture) (Sobieszek, 1980). Στη μέθοδο της φωτογλυπτικής χρησιμοποιήθηκαν 24 θέσεις φωτογράφισης για να αποκτηθεί ένα αντίστοιχο σύνολο από σιλουέτες ενός αντικειμένου από διαφορετικές οπτικές γωνίες. Η αποτύπωση των σιλουετών γινόταν πάνω σε φωτογραφικές πλάκες που στη συνέχεια προβαλλόταν με τη βοήθεια μιας συσκευής προβολής στατικών εικόνων με την ονομασία *magic lantern* (μαγικός φανός). Στη συνέχεια, οι σιλουέτες μεταφέρονταν πάνω σε πηλό με τη χρήση ενός παντογράφου. Όπως ήταν αναμενόμενο, εμπορικές εφαρμογές που υλοποιούσαν τη συγκεκριμένη μέθοδο αναπτύχθηκαν άμεσα, ενώ σε μεγάλες πρωτεύουσες όπως το Παρίσι, το Λονδίνο και η Νέα Υόρκη δημιουργήθηκαν εξειδικευμένα φωτογραφικά στούντιο που την πρόσφεραν ως υπηρεσία. Αυτό που ήταν εμφανές ακόμα και με τις 24 σιλουέτες ήταν το γεγονός ότι η διαδικασία απαιτούσε σε υψηλό βαθμό την ανθρώπινη παρέμβαση. Ταυτόχρονα, μεγάλο ήταν και το κόστος του απαραίτητου εξοπλισμού (κάμερες, προβολείς στατικών εικόνων). Τελευταία,

αλλά εξίσου σημαντική, ήταν η ανάγκη πρακτικής εξάσκησης του «γλύπτη» στη χρήση αυτών των συστημάτων, η οποία καθυστερούσε ακόμα περισσότερο την όλη διαδικασία. Τελικά, η διάρκεια ζωής της μεθόδου αυτής δεν ήταν μεγάλη (από το 1863 έως και το 1867) καθώς η διαδικασία της φωτογλυπτικής ήταν ακριβότερη από άλλες παραδοσιακές μεθόδους.

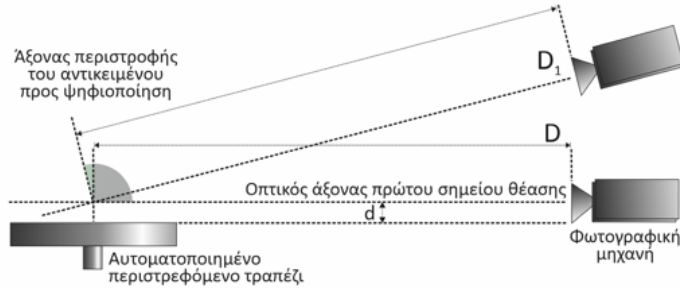
Με την έλευση της ψηφιακής εποχής, η διαδικασία σύλληψης σχημάτων με οπτικές μεθόδους απέκτησε και πάλι ερευνητικό και αναπτυξιακό ενδιαφέρον. Η Σχήμα από σιλουέτα είναι σήμερα μια αυτοματοποιημένη μέθοδος κατασκευής 3Δ αντιγράφων φυσικών αντικειμένων. Τα πρώτα χρόνια της εξέλιξης των εφαρμογών 3Δ ψηφιοποίησης ήταν μια πολύ δημοφιλής τεχνική 3Δ ψηφιοποίησης κινητών αντικειμένων. Η αρχική της υλοποίηση παρουσιάστηκε από τον Baumgart (1974) στο πλαίσιο της διδακτορικής του διατριβής. Αργότερα οι Martin and Aggarwal (1983) παρουσίασαν τη δημιουργία 3Δ μοντέλων από πολλαπλές οπτικές γωνίες με χρήση ογκομετρικών στοιχείων. Βασίστηκαν στη μέθοδο των «κρυφών περιγραμμάτων», κατά την οποία εξήγαγαν σιλουέτες αντικειμένων από σειρές φωτογραφιών ενώ δημιουργούσαν προοδευτικά το 3Δ ψηφιακό αντίγραφο μέσω ορθογραφικών προβολών των σιλουετών. Ο ελεγχόμενος χώρος που χρησιμοποιήσαν αποτελούνταν από μια φωτογραφική μηχανή σε σταθερή θέση (πάνω σε τρίποδα) απέναντι από το αντικείμενο που τοποθετούνταν πάνω σε ειδική περιστρεφόμενη βάση (περιστρεφόμενη τράπεζα) με ελεγχόμενο βήμα περιστροφής. Το φόντο πίσω από την περιστρεφόμενη βάση του αντικείμενου ήταν μονόχρωμο, ώστε να πραγματοποιείται εύκολα ο διαχωρισμός της σιλουέτας σε κάθε φωτογραφία (Zhang, 1998). Η βασική μέθοδος Σχήμα από σιλουέτα προϋποθέτει σιλουέτες χωρίς σφάλματα (εσωτερικά κενά ή περιοχές που δεν ανήκουν στο αντικείμενο) και ως διαδικασία περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα (Εικόνα 2.21):

- Καθορισμός των παραμέτρων του οπτικού συστήματος.
- Λήψη εικόνων.
- Εξαγωγή σιλουετών.
- Ανάκτηση και ανακατασκευή της 3Δ γεωμετρίας.

Στην Εικόνα 2.22 παρουσιάζεται γραφικά η πλάγια όψη του ελεγχόμενου περιβάλλοντος ενός τυπικού συστήματος Σχήμα από σιλουέτα. Σύμφωνα με τους Tosovic et al. (2002) η απόσταση  $D$  θα πρέπει κατά μέσο όρο να κυμαίνεται γύρω στα 120 cm, ενώ το ύψος  $d$  να εντοπίζεται στα περίπου 3 mm (σε ιδανική περίπτωση να είναι μηδενικό). Ο συνολικός αριθμός των σιλουετών (πλήθος φωτογραφιών όπου προβάλλεται το αντικείμενο από διαφορετική οπτική γωνία γύρω από έναν άξονα περιστροφής) παίζει σημαντικό ρόλο στην πιστότητα του ανακατασκευασμένου αντικείμενου, καθώς λεπτομέρειες του αντικείμενου είναι εμφανείς μόνο από συγκεκριμένες οπτικές γωνίες. Καθώς η μέθοδος βασίζεται σε σιλουέτες, πρέπει να αναφερθεί πως το 3Δ μοντέλο



Εικόνα 2.21. Διαδικασία μεθόδου Σχήμα από σιλουέτα.



Εικόνα 2.22. Παράδειγμα αυτοματοποιημένου συστήματος Σχήμα από σιλουέτα.

που προκύπτει δε περιλαμβάνει μορφολογικά χαρακτηριστικά που δεν είναι εμφανή σε αυτές. Ως εκ τούτου το 3Δ μοντέλο είναι μια προσέγγιση του αρχικού αντικειμένου και όχι ένα ακριβές ψηφιακό αντίγραφο.

Πριν τη λήψη των φωτογραφιών, πρέπει να βρεθεί η γεωμετρική σχέση ανάμεσα στη θέση της φωτογραφικής μηχανής και της περιστρεφόμενης βάσης όπου τοποθετούνται τα αντικείμενα, έτσι, ώστε το τελικό 3Δ ψηφιακό αντίγραφο να ανταποκρίνεται στις διαστάσεις του πραγματικού. Βασική προϋπόθεση για την ορθή αποτύπωση είναι η βαθμονομήσεις του συστήματος. Η βαθμονομήσεις της φωτογραφικής μηχανής παρέχει όλες τις εξωτερικές παραμέτρους, όπως τη θέση και τον προσανατολισμό της στο χώρο, αλλά και τις εσωτερικές παραμέτρους, όπως την εστιακή απόσταση και τη μετατόπιση του οπτικού κέντρου. Για τη βαθμονομήσεις χρησιμοποιείται δοκιμαστικό αντικείμενο που φέρει συγκεκριμένο μοτίβο, συνήθως μια «σκακίερα» με εκ των προτέρων γνωστά γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Το μέγεθος και η θέση του μοτίβου βαθμονομήσεις υπολογίζονται βάσει γεωμετρικών αρχών. Μια τυπική διαδικασία βαθμονομήσεις περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

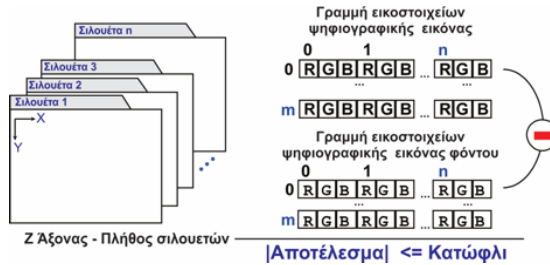
- Σχεδίαση και εκτύπωση του μοτίβου βαθμονομήσεις.
- Συλλογή φωτογραφιών που αποτυπώνουν το μοτίβο υπό διαφορετικές γωνίες θέασης.
- Εντοπισμός ομόλογων σημείων στο μοτίβο σε όλο το σύνολο των φωτογραφιών.

- Υπολογισμός εσωτερικών και εξωτερικών παραμέτρων μέσω του μετασχηματισμού Direct Linear Transformation (DTL) που βασίζεται στο μοντέλο κάμερας οπής (pinhole camera model) και στην αρχή συσχετισμού των συντεταγμένων ενός 3Δ χώρου  $(X, Y, Z)$  και των συντεταγμένων 2Δ εικόνας με χρήση απλών γραμμικών εξισώσεων.

Μετά τη βαθμονομήσεις του συστήματος, ακολουθεί η εξαγωγή των σιλουετών (περιγραμμάτων). Οι σιλουέτες περιλαμβάνουν μεγάλο όγκο πληροφορίας που σχετίζεται με τη μορφολογία του μετρούμενου αντικειμένου αλλά, δυστυχώς, όχι όλη. Οι μορφολογικές αυτές πληροφορίες μπορούν να εξαχθούν από τις 2Δ εικόνες με απλούς και εύρωστους αλγορίθμους από το χώρο της επεξεργασίας εικόνας και όρασης υπολογιστών. Σύμφωνα με τον Laurentini (1994), η λέξη σιλουέτα υποδεικνύει την περιοχή της 2Δ εικόνας στην οποία εμφανίζονται όλα τα ορατά σημεία που ανήκουν στο μετρούμενο αντικείμενο. Θεωρώντας ότι δεν υπάρχει καμία περαιτέρω γνώση για τη θέση του αντικείμενου στον πραγματικό χώρο, τότε όλη η πληροφορία που δίνει η σιλουέτα  $S_i$  είναι επίπεδη πάνω σε μια περιοχή του χώρου  $C_i$ . Την περιοχή αυτή την ανακτούμε μέσω της οπίσθιας προβολής της  $S_i$  από το αντίστοιχο οπτικό σημείο  $V_i$ . Υποθέτοντας ότι υπάρχουν  $n$  σιλουέτες, τότε αυτές περιορίζουν το αντικείμενο μέσα σε έναν όγκο  $R_n$ . Συνεπώς ισχύει ότι  $R_n = \bigcap_{i=1}^n C_i$ . Η εξαγωγή της σιλουέτας από τις εικόνες μπορεί να υλοποιηθεί σε επίπεδο εικονοστοιχείων με διαδικασία αφαίρεσης. Η αφαίρεση αυτή πραγματοποιείται ανάμεσα στις εικόνες που εμφανίζουν το αντικείμενο και την εικόνα του φόντου όπου εμφανίζεται ο ίδιος χώρος χωρίς όμως να είναι παρόν το αντικείμενο. Εάν η απόλυτη τιμή της διαφοράς αυτής σε κάποια περιοχή εικονοστοιχείων είναι μεγαλύτερη από ένα δεδομένο κατώφλι, τότε αυτή η περιοχή θεωρείται μέρος της σιλουέτας. Πρακτικά η τεχνική βασίζεται στη σύλληψη ενός σκοτεινού αντικειμένου πάνω σε ένα φωτεινό φόντο, και συνεπώς αναμένεται να είναι σχετικά εύκολο να αναγνωριστεί η σιλουέτα του αντικειμένου. Η εικόνα του φόντου που λαμβάνεται αρχικά χωρίς το αντικείμενο στη σκηνή αποτελεί την εικόνα αναφοράς του χώρου. Όπως περιγράφεται στην Εικόνα 2.23 η απομάκρυνση του φόντου υλοποιείται με απλή αφαίρεση στο πεδίο των εικονοστοιχείων. Έτσι, από κάθε εικόνα που εικονίζει το αντικείμενο αφαιρείται η εικόνα του φόντου και όπου η απόλυτη τιμή του αποτελέσματος της αφαίρεσης αυτής οδηγεί σε τιμές μεγαλύτερες από προκαθορισμένο κατώφλι, τότε τα αντίστοιχα εικονοστοιχεία θεωρούνται ότι ανήκουν στη σιλουέτα. Αντίθετα, όπου η απόλυτη τιμή του αποτελέσματος της αφαίρεσης είναι μικρότερη του κατωφλίου τότε τα αντίστοιχα εικονοστοιχεία θεωρείται ότι ανήκουν στο φόντο. Προφανώς, καθώς πρόκειται για έγχρωμες εικόνες, η διαδικασία της αφαίρεσης και σύγκρισης γίνεται τρεις φορές, μία για κάθε χρωματικό κανάλι των εικόνων.

Εκτός, όμως, από την προσέγγιση εξαγωγής σιλουέτας με αφαίρεση σε επίπεδο εικονοστοιχείων, υπάρχει και η προσέγγιση της *εξαγωγής σιλουέτας με αφαίρεση σε επίπεδο περιοχών*, με την οποία μπορεί να βελτιωθεί η ακρίβεια





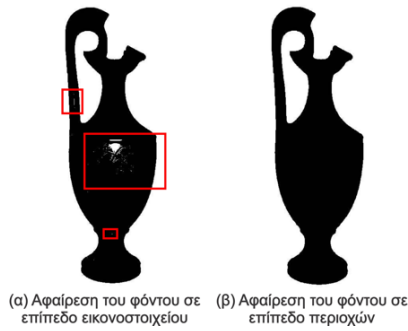
Εικόνα 2.23. Απλός τρόπος αφαίρεσης φόντου σε εφαρμογές Σχήματος από σιλουέτα.

των αποτελεσμάτων. Τα βήματα που ακολουθούνται στη μέθοδο αυτή είναι τα εξής:

- Κατάτμηση της εικόνας σε περιοχές-τμήματα.
- Επανάληψη για κάθε περιοχή:
  - Υπολογισμός του μέσου όρου της απόλυτης τιμής της διαφοράς κάθε εικονοστοιχείου της περιοχής με το φόντο.
  - Εάν ο μέσος όρος είναι μεγαλύτερος από προκαθορισμένο κατώφλι τότε όλα τα στοιχεία της συγκεκριμένης περιοχής αποτελούν τμήμα της σιλουέτας του αντικειμένου.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η προσέγγιση αυτή μπορεί να αντιμετωπίσει μία σημαντική πρόκληση κατά την οποία ένα εικονοστοιχείο, ενώ ανήκει στο αντικείμενο (στη σιλουέτα), φέρει χρωματική πληροφορία παρόμοια με αυτή του φόντου. Η προσέγγιση με την αφαίρεση σε επίπεδο εικονοστοιχείων αδυνατεί πλήρως να αντιμετωπίσει τη συγκεκριμένη περίπτωση. Τα συστήματα που εφαρμόζουν την εξαγωγή σιλουέτας σε επίπεδο περιοχών είναι σαφώς πιο εύρωστα, καθώς μπορούν να λειτουργήσουν σε περιβάλλοντα με διαφορετικό φόντο. Στην Εικόνα 2.24 παρουσιάζονται αποτελέσματα των δύο προσεγγίσεων εξαγωγής σιλουέτας (σε επίπεδο εικονοστοιχείων και περιοχών αντίστοιχα). Ακόμα και με υποκειμενικά κριτήρια η δεύτερη τεχνική (δεξιά στην εικόνα) παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα αφού στη πρώτη περίπτωση (αριστερά στην εικόνα) παρατηρούμε ότι λανθασμένα αναγνωρίζονται περιοχές όπου ανακλάται έντονα το φως (σε περιοχές του αντικειμένου που σηματοδοτούνται με κόκκινα παραλληλόγραμμα) ως περιοχές του φόντου.

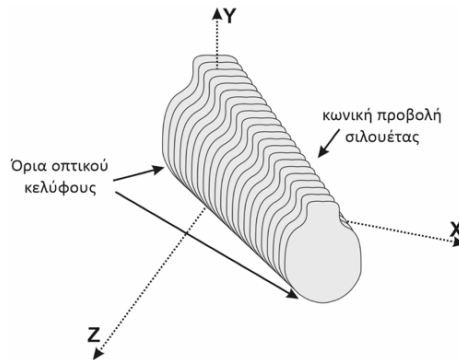
Τελικό βήμα στη διαδικασία είναι η ανάκτηση της 3Δ γεωμετρίας. Κατά τη διάρκεια της ανακατασκευής προκύπτουν διάφορες προκλήσεις. Η βασικότερη αφορά στο επίπεδο ακρίβειας με την οποία μπορεί να περιγραφεί το αντικείμενο, βάσει ενός συνόλου 2Δ σιλουετών. Δύο τυπικές προσεγγίσεις δημιουργίας 3Δ αντικειμένων από τις σιλουέτες είναι (α) αυτή της εικονικής «λάξευσης» του όγκου του 3Δ μοντέλου μέσω της εκτίμησης του όγκου που καταλαμβάνει καθώς σταδιακά εξετάζονται οι περιορισμοί που κάθε σιλουέτα εισάγει



Εικόνα 2.24. Σύγκριση αποτελεσμάτων μεθόδων αφαίρεσης φόντου.

και (β) αυτή της σταδιακής δημιουργίας της τελικής πλεγματοσειράς του 3Δ μοντέλου με εικονική «λάξευση» μιας αρχική πλεγματοσειράς από μία σιλουέτα, η οποία βελτιώνεται σταδιακά από τις επόμενες σιλουέτες που εξετάζονται.

- Στην πρώτη προσέγγιση, η οποία προτάθηκε αρχικά από τον Laurentini (1994), το αντικείμενο αναπαρίσταται από μια γεωμετρική οντότητα γνωστή και ως *οπτικό κέλυφος* (*visual hull*). Ως οπτικό κέλυφος ορίζεται ένα μέγεθος  $VH(O, V)$ , στο οποίο  $O$  είναι το αντικείμενο και  $V$  το οπτικό πεδίο. Ένα αντικείμενο  $O$  μπορεί να ανακατασκευαστεί πλήρως χρησιμοποιώντας σιλουέτες του από διαφορετικές οπτικές γωνίες  $V$  εάν και μόνο εάν ισχύει ότι  $O = VH(O, V)$ . Κάθε σιλουέτα προβάλλεται πάνω και μέσα στο οπτικό κέλυφος. Η προβολή αυτή είναι είτε προοπτική είτε παράλληλη. Το 3Δ ψηφιακό αντίγραφο δημιουργείται με τις τομές των όγκων που προκύπτουν ξεχωριστά από την προβολή της κάθε σιλουέτας. Αυτή η προσέγγιση ονομάζεται *λάξευση χώρου* (Sablatnig et al., 2003) και αποτελείται συνήθως από δύο φάσεις: (α) απόρριψη τμημάτων που δεν ανήκουν στο αντικείμενο, (β) ανακατασκευή και οργάνωση κορυφών σε πλεγματοσειρές (επιφάνειες). Στη διαδικασία απόρριψης το αντικείμενο δομείται από ένα σύνολο ογκομετρικών στοιχείων. Οι δύο διαδεδομένοι μέθοδοι δημιουργίας πολυγωνικών πλεγματοσειρών είναι η ογκομετρική δειγματοληψία και η άμεση τομή (Ahuja and Veenstra, 1989; Baumberg et al., 2005; Lensch et al., 2001; Matsumoto et al., 1997; Noborio et al., 1988; Potmesil, 1987; Sablatnig et al., 2003). Στην Εικόνα 2.25 παρουσιάζεται μια σιλουέτα ως ένα σύνολο κωνικών τομών με ογκομετρικά στοιχεία. Από προγραμματιστική οπτική, το σύνολο των ογκομετρικών στοιχείων αναπαρίσταται συνήθως με μια ειδική δενδρική δομή δεδομένων, γνωστή ως Octree, διευκολύνοντας έτσι τη γρήγορη επεξεργασία των προβολών (Ahuja and Veenstra, 1989; Noborio et al., 1988; Potmesil, 1987). Η διαδικασία απόρριψης των ογκομετρικών στοιχείων που δεν ανήκουν στο αντικείμενο βασίζεται σε μέθοδο κατωφλίωσης (thresholding) με την τιμή του κατωφλίου να ορίζεται ίση με το

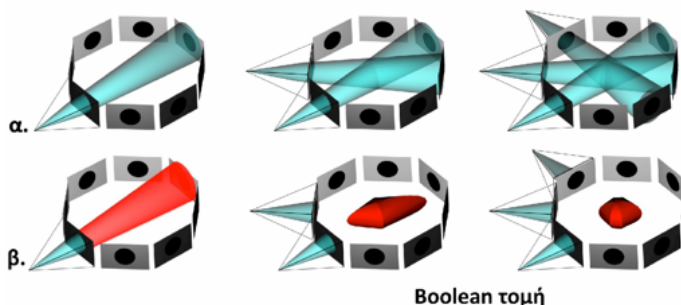


**Εικόνα 2.25.** Ο όγκος που δημιουργεί η προοπτική προβολή μιας σιλουέτας σε 3Δ χώρο.

πλήθος των σιλουετών που έχουν χρησιμοποιηθεί για την 3Δ ανακατασκευή του αντικείμενου.

- Στη δεύτερη προσέγγιση γίνεται χρήση της μεθόδου της προβολής σιλουετών σε πλεγματοσειρές με ταυτόχρονη εφαρμογή της τεχνική της άμεσης τομής. Στην Εικόνα 2.26 παρουσιάζεται, μέσα από ένα πολύ απλό παράδειγμα κυκλικής σιλουέτας (σε όλες τις όψεις), η σταδιακή δημιουργία του 3Δ μοντέλου (σφαίρα στην περίπτωση αυτή) από τρεις διαφορετικές σιλουέτες. Ο κοινός χώρος που ορίζεται από δύο προβολές υπολογίζεται με τη λογική πράξη AND που αντιστοιχεί στην τομή των δύο προβολών στο 3Δ χώρο (3D Boolean intersection). Στην πρώτη ακολουθία εικόνων στην Εικόνα 2.26.α παρουσιάζεται ο χώρος που ορίζεται από τη διαδοχική προβολή σιλουετών, ενώ στη δεύτερη ακολουθία εικόνων στην Εικόνα 2.26.β φαίνεται το αποτέλεσμα της λογικής πράξης AND στους αντίστοιχους χώρους και η προοδευτική δημιουργία του οπτικού κελύφους (visual hull) με διατήρηση μόνο των κοινών γεωμετρικών περιοχών στο χώρο. Η βασική διαφορά ανάμεσα στην εν λόγω προσέγγιση και σε αυτή των κωνικών τομών ογκομετρικών στοιχείων εντοπίζεται στο μορφότυπο δεδομένων που χρησιμοποιούνται για τη περιγραφή του 3Δ ψηφιακού αντιγράφου.

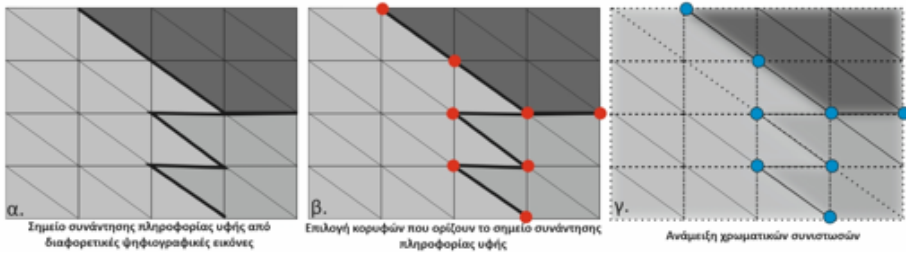
Μετά την ολοκλήρωση της δημιουργίας της 3Δ γεωμετρίας ακολουθεί η ανάκτηση της πληροφορίας υφής (χρωματική πληροφορία). Η πληροφορία υφής βασίζεται στο συνδυασμό τμημάτων από φωτογραφίες που προβάλλουν το αντικείμενο από οπτικές γωνίες παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία της 3Δ γεωμετρίας. Ο συνδυασμός των τμημάτων γίνεται με τη βέλτιστη τοποθέτηση των πλεγματοσειρών πάνω στις εικόνες. Κάθε τρίγωνο της πλεγματοσειράς χαρτογραφείται πάνω σε κάποιο τμήμα μιας φωτογραφίας. Η επιλογή της φωτογραφίας γίνεται με βάση τη βέλτιστη οπτική γωνία εμφάνισης του εκάστοτε τριγώνου που συνήθως ορίζεται ως η κάθετη προβολή πάνω στο επίπεδο του αισθητηρίου της φωτογραφικής μηχανής (Laurentini,



Εικόνα 2.26. Η τεχνική της άμεσης τομής σε πλεγματοσειρά από πολλαπλές σιλουέτες.

1994). Με το συνδυασμό τμημάτων από διαφορετικές φωτογραφίες παρουσιάζεται συχνά το φαινόμενο κατά το οποίο γειτονικά τρίγωνα της πλεγματοσειράς αντιστοιχίζονται σε διαφορετικές φωτογραφίες με αποτέλεσμα να εμφανίζονται χρωματικές ασυνέχειες στην πληροφορία υψής.

Τα περισσότερα διαθέσιμα συστήματα προτείνουν τη συλλογή φωτογραφιών κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες φωτισμού, οι οποίες είναι αντίστοιχες με αυτές που συναντώνται σε επαγγελματικά φωτογραφικά στούντιο, ώστε να φωτιστεί ομοιόμορφα το αντικείμενο χωρίς να υπάρχουν περιοχές με έντονη σκίαση. Αναπόφευκτο βέβαια είναι να συνεχίζουν να υπάρχουν κάποιες σκιές που δημιουργούνται από το ίδιο το αντικείμενο (πχ. η περιοχή κάτω από τη λαβή ενός αγγείου). Για την απαλλαγή του 3Δ αντιγράφου από αυτές τις χρωματικές ανομοιομορφίες εφαρμόζονται αλγόριθμοι χρωματικής ανάμειξης. Οι αλγόριθμοι αυτοί λειτουργούν ανάμεσα στα όρια διαφορετικών φωτογραφιών. Η ανάμειξη των χρωμάτων παίζει σημαντικό ρόλο στην επικάλυψη των φωτογραφικών συνόρων αφού η ύπαρξή τους μειώνει το ρεαλισμό του τελικού 3Δ αντιγράφου. Η τεχνική χρωματικής ανάμειξης των Sablatnig et al. (2003) διαμορφώνει τις χρωματικές τιμές των εικονοστοιχείων στα φωτογραφικά όρια, έτσι ώστε να υπάρχει μια ομαλή χρωματική μετάβαση από τη μια στην άλλη. Με αυτή τη μέθοδο καλύπτονται μερικώς τα εμφανή όρια δύο φωτογραφιών. Η επίτευξη της ανάμειξης βασίζεται στην αναγνώρισης των πιθανών πολυγώνων που βρίσκονται πάνω στα εν λόγω όρια, καθώς και στην κατεύθυνση προς την οποία θα γίνει η ομαλοποίηση. Έστω ότι ένα πολύγωνο συνορεύει με ένα άλλο και έστω ότι τα δύο πολύγωνα φέρουν πληροφορία υψής από διαφορετικές φωτογραφίες, τότε και τα δύο είναι πιθανά υπονήφια για χρωματική ανάμειξη όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.27. Ο αλγόριθμος ανάμειξης υπολογίζει την κάθε γειτονική υφή ξεχωριστά χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες τιμές διαφάνειας. Η τελική απόδοση των φωτογραφιών με χαρακτηριστικές τιμές διαφάνειας στα όριά τους έχει ως αποτέλεσμα μια ομαλή μετάβαση από τη μία εικόνα στην άλλη. Ο αλγόριθμος ανάμειξης λειτουργεί μόνο στα γειτονικά πολύγωνα. Αν ένα αντικείμενο έχει αποτυπωθεί με μεγάλη ακρίβεια τότε τα πολύγωνα του είναι μικρά σε μέγεθος και, φυσικά, το ίδιο ισχύει και για τις περιοχές υψής που



**Εικόνα 2.27.** Ομαλοποίηση υψύς με ανάμειξη τιμών εικονοστοιχείων στα όρια διαφορετικών φωτογραφιών.

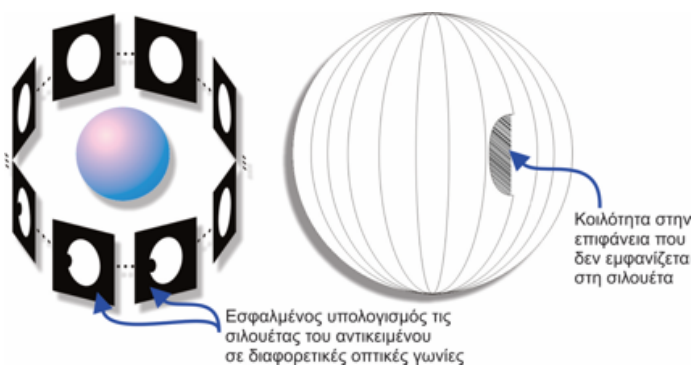
αναμειγνύονται. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην καλύπτονται τα σύνορα των διαφορετικών φωτογραφιών. Η λύση του προβλήματος βρίσκεται είτε στη βελτίωση του αλγορίθμου, έτσι, ώστε να προσαρμόζεται ανάλογα στο εμβαδό των πολυγώνων, είτε στη χειροκίνητη διαδικασία επιλογής των περιοχών ανάμιξης από τον ίδιο το χρήστη.

Όπως είναι αναμενόμενο, κατά την εφαρμογή της μεθόδου διαχωρισμού του αντικειμένου από το φόντο παρουσιάζονται τα πρώτα σφάλματα που αντικατοπτρίζονται στη γεωμετρία του τελικού 3Δ ψηφιακού αντιγράφου. Επίσης, είναι μερικές φορές αδύνατο να αποφευχθούν σκιές που προκαλούνται από τη μορφολογία του ίδιου του αντικείμενου. Ανεξάρτητα από την τεχνική που εφαρμόζεται για την εξαγωγή των σιλουετών, τα σημεία που βρίσκονται στις σκιασμένες περιοχές καταλήγουν αρκετές φορές να θεωρούνται τμήμα του φόντου ενώ στην πραγματικότητα ανήκουν στο αντικείμενο.

Με τη μέθοδο Σχήμα από σιλουέτα είναι πολύ πιθανό να επιτυγχάνεται ικανοποιητικό αποτέλεσμα αποτύπωσης ημιδιάφανων αντικείμενων (πχ. γυάλινα) ή αντικείμενων με επιφάνειες υψηλής ανακλαστικότητας (πχ. ασημένια και χρυσά κοσμήματα), για περιπτώσεις δηλαδή που αποτυγχάνουν συστήματα τριγωνισμού λείζερ μικρών αποστάσεων. Παρόλα αυτά, για την επίτευξη του βέλτιστου αποτελέσματος, βασική προϋπόθεση είναι οι σωστές συνθήκες φωτισμού που θα επιτρέψουν την ορθή εξαγωγή των σιλουετών. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να κριθεί αναγκαία και η ανθρώπινη παρέμβαση για τον έλεγχο και τη διόρθωση των τμημάτων πάνω στις εικόνες που ορίζουν οι σιλουέτες. Το τελευταίο μπορεί να υλοποιηθεί και σε τυπικά λογισμικά επεξεργασίας ψηφιογραφικών εικόνων.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα της μεθόδου Σχήμα από σιλουέτα είναι:

- Το τελικό 3Δ ψηφιακό αντίγραφο φέρει μόνο την πληροφορία που περιέχουν οι σιλουέτες. Κοιλότητες οι οποίες δεν είναι εμφανείς στις σιλουέτες δε συνεισφέρουν στη δημιουργία του τελικού 3Δ αντιγράφου (Εικόνα 2.28) και αναπόφευκτα το τελικό 3Δ μοντέλο δεν αποτελεί πιστό ψηφιακό αντίγραφο του πραγματικού αντικείμενου αλλά μια αρκετά καλή προσέγγιση (Laurentini, 1994)
- Το πλήθος των σιλουετών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του

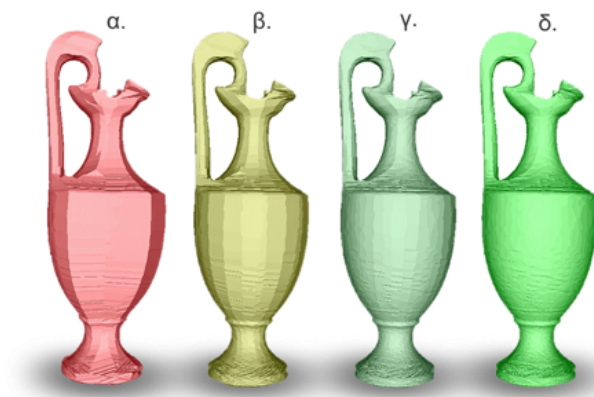


**Εικόνα 2.28.** Παράδειγμα κοίλης επιφάνειας που δεν εμφανίζεται στις σιλουέτες.

3Δ αντιγράφου παίζει σημαντικό ρόλο στην ποιότητα (πιστότητα) της προσέγγισης. Θεωρητικά, θα μπορούσε κανείς να ισχυριστεί πως όσο αυξάνεται το πλήθος των σιλουετών τόσο μικρότερο είναι το γεωμετρικό σφάλμα ανάμεσα στο πραγματικό και το ψηφιακό αντικείμενο.

Ο ρόλος του πλήθους των σιλουετών στην ανακατασκευή ενός αντικειμένου αναδεικνύεται στην Εικόνα 2.29. Το αντικείμενο ανακατασκευάστηκε σε τέσσερις διαφορετικές εκδοχές που καθορίζονται κυρίως από το πλήθος των σιλουετών που χρησιμοποιήθηκαν. Στην πρώτη περίπτωση (Εικόνα 2.29.α), ένα σύνολο από έξι σιλουέτες προσεγγίζει απλά το γενικότερο περίγραμμα χωρίς όμως να αποδίδει τις καμπύλες επιφάνειες του αντικειμένου. Επιπρόσθετα παρουσιάζονται έντονα τα όρια που προκύπτουν στην 3Δ γεωμετρία εξαιτίας του χαμηλού πλήθους σιλουετών. Στη επόμενη εκδοχή (Εικόνα 2.29.β - δώδεκα σιλουέτες) και στην τρίτη (Εικόνα 2.29.γ - 18 σιλουέτες) συνεχίζουν να είναι φανερά τα γεωμετρικά τμήματα που δημιουργούνται από την προβολή της κάθε σιλουέτας αλλά όχι με τόσο έντονο τρόπο. Το φαινόμενο αυτό σταματά να είναι αντιληπτό στο ανθρώπινο μάτι όταν το πλήθος των σιλουετών (για το συγκεκριμένο αντικείμενο) φτάσει τις 24 (Εικόνα 2.29.δ).

Σημαντικό ρόλο παίζει επίσης η οπτική γωνία από την οποία έχει ληφθεί η κάθε φωτογραφία, καθώς η ποιότητα της γεωμετρίας που προκύπτει συνδυάζεται με την ποιότητα της υφής για να προκύψει το τελικό αποτέλεσμα όπως φαίνεται στις Εικόνα 2.30, Εικόνα 2.31. Σε περιπτώσεις όπου το 3Δ αντίγραφο έχει προκύψει από ένα μικρό πλήθος σιλουετών όπως στην Εικόνα 2.30.β (δεξιά εικόνα) τότε η πληροφορία υφής βοηθά στην συγκάλυψη των γεωμετρικών ατελειών οδηγώντας σε ένα 3Δ μοντέλο που θα μπορούσε να βρει άνετα εφαρμογή σε δικτυακή προβολή. Γενικά, όταν το αντικείμενο προβάλλεται από οπτικές γωνίες παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ψηφιοποίηση, τότε η πληροφορία υφής κρύβει σε μεγάλο βαθμό τα σφάλματα στη 3Δ γεωμετρία. Η χαμηλής ποιότητας έκδοση στην Εικόνα 2.31.β (μεσαία εικόνα) αποτελείται από μόλις ~4.4 K (χιλιάδες) κορυφές (20% επί του συνόλου κορυφών που περιέχει το αντίγραφο υψηλής ποιότητας) και ~6.8 K τρίγωνα. Αν την παρατηρήσει



**Εικόνα 2.29.** Μείωση γεωμετρικού σφάλματος με την αύξηση του πλήθους σιλουετών.

κανείς από συγκεκριμένη οπτική γωνία παρουσιάζεται ως όμοια με αυτήν της υψηλής ποιότητας. Η πραγματικότητα «αποκαλύπτεται» στην Εικόνα 2.31.γ (σχέδια στα δεξιά) όπου τα γεωμετρικά σφάλματα και οι αποκλίσεις υφής είναι εμφανείς.

### Κοίλες Επιφάνειες

Η μορφολογική πολυπλοκότητα σε μεγάλο σύνολο των αντικειμένων που προέρχονται από το χώρο του πολιτιστικού αποθέματος οδηγούν σχεδόν άμεσα τη Σχήμα από σιλουέτα στα όρια των δυνατοτήτων της. Όπως αναφέρθηκε η μέθοδος παρουσιάζει συγκεκριμένους περιορισμούς που οδηγούν σε γεωμετρικά σφάλματα, όχι μόνο σε επίπεδο θορύβου αλλά, κυρίως, σε επίπεδο γεωμετρίας που δεν υφίσταται. Στην Εικόνα 2.32 παρουσιάζεται παράδειγμα σιλουέτας αντικειμένου και σιλουέτας του 3Δ αντιγράφου που δημιουργήθηκε με τη Σχήμα από σιλουέτα για να αναδειχτούν τα ζητήματα γεωμετρίας που ανακύπτουν. Η μεγάλη διαφοροποίηση εντοπίζεται στην κάτοψη, στην περιοχή γύρω από τις λαβές του αντικειμένου, όπου τόσο η καμπυλότητα όσο και το κενό που υπάρχει στο πραγματικό αντικείμενο απουσιάζουν από το 3Δ ψηφιακό αντίγραφο. Αντίθετα, στην πλάγια όψη δεν είναι εμφανείς σημαντικές διαφοροποιήσεις στη γεωμετρία. Αν υποθέσουμε ότι η μοναδική πηγή πληροφορίας για την ανακατασκευή του αντικειμένου είναι ένα σύνολο από φωτογραφίες από τη συγκεκριμένη οπτική γωνία (πλάγια όψη), τότε είναι απολύτως φυσικό να μην αναγνωρίζονται ούτε η εσωτερική κοιλότητα του αντικειμένου ούτε και οι οπές στις λαβές του. Με κόκκινη διαγράμμιση διακρίνονται επίσης τα όρια των μορφολογικών σφαλμάτων που έχουν προκύψει.

Τα εμπορικά συστήματα που βασίζονται στη μέθοδο Σχήμα από σιλουέτα αντιμετωπίζουν μερικώς τη συγκεκριμένη πρόκληση με την εισαγωγή μίας δεύτερης φωτογραφικής μηχανής (ή οπτικής γωνίας), η οποία φωτογραφίζει το





Αντικείμενο όπως εμφανίζεται σε μια από τις φωτογραφίες που χρησιμοποιούνται για την 3D ανακατασκευή

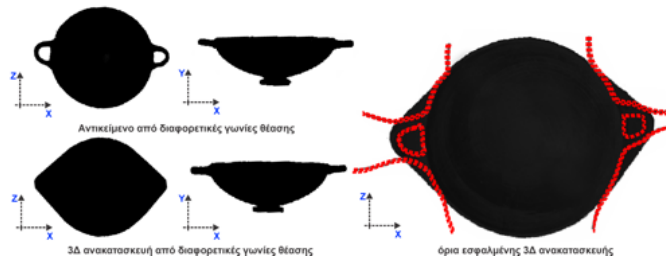


3D Ανακατασκευή  
Προέκυψε από 24 φωτογραφίες σιλουέτας γεωμετρία ~44K τριγώνων, χρωματική πληροφορία 5 φωτογραφίες (~10MB)



**Εικόνα 2.30.** Απόκρυψη γεωμετρικών ατελειών μέσω ικανοποιητικής πληροφορίας υφής.

**Εικόνα 2.31.** Ανατομία μιας χαμηλής ποιότητας εκδοχής ενός 3D ψηφιακού αντιγράφου.

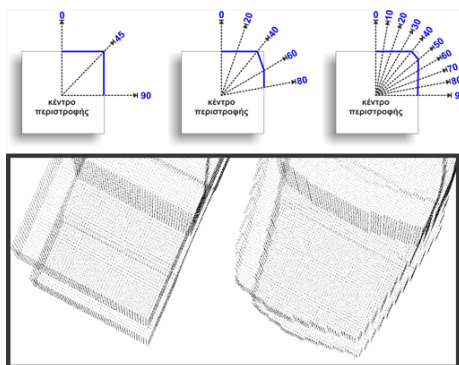


**Εικόνα 2.32.** Γεωμετρικά σφάλματα σε ανακατασκευασμένη κύλικα με Σχήμα από σιλουέτα.

αντικείμενο από διαφορετική οπτική γωνία με σκοπό να καλύψει εκείνες τις καμπυλότητες που δεν εμφανίζονται στην πρώτη θέση. Ως εκ τούτου, κατά τη διάρκεια της 3D ανακατασκευής λαμβάνονται υπόψη ταυτόχρονα οι προβολές των σιλουετών της αντίστοιχης γωνίας και από τις δύο φωτογραφικές μηχανές. Με τη συγκεκριμένη προσέγγιση, ο βαθμός πιστότητας της 3D ανακατασκευής αυξάνεται. Στο παράδειγμα της Εικόνα 2.32, μια δεύτερη φωτογραφική μηχανή θα έλυνε το πρόβλημα στις λαβές, όχι όμως και αυτό της εσωτερικής καμπυλότητας, καθώς αυτή κρύβεται πάντα από τα εξωτερικά τμήματα (χείλος) του αντικειμένου. Σε κάθε περίπτωση, το μοντέλο της γεωμετρικής παραμόρφωσης που εμφανίζεται κατά την εφαρμογή της μεθόδου ακολουθεί τη θεωρία του οπτικού κελύφους (Laurentini, 1994).

Ένας ακόμη περιορισμός της μεθόδου Σχήμα από σιλουέτα παρουσιάζεται γραφικά στην Εικόνα 2.33 και σχετίζεται με τις επιλεγμένες γωνίες φωτογράφισης σε σχέση με τις γωνίες στην επιφάνεια του μετρούμενου αντικειμένου. Ήδη στη βιβλιογραφία έχει αναφερθεί (Sablatnig et al., 2003) πως οι επιλεγμένες



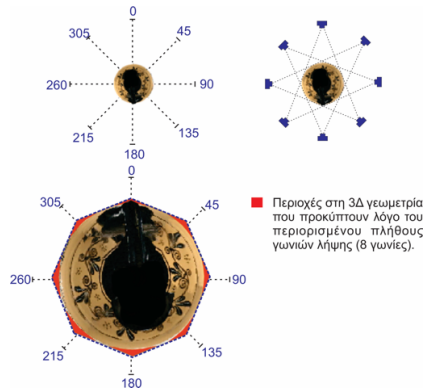


**Εικόνα 2.33.** Θέσεις φωτογράφισης και ο αντίκτυπος τους στην 3Δ ανακατασκευή στη Σχήμα από σιλουέτα.

γωνίες φωτογράφισης ενός αντικειμένου μπορεί να σχετίζονται απόλυτα με την ποιότητα της τελικής 3Δ ανακατασκευής του. Αυτό συνδέεται με την πιθανή οπτική απόφραξη (μη εμφάνιση) των ορίων του αντικειμένου που ψηφιοποιείται σε καμία από τις φωτογραφίες, κάτι που μπορεί να συμβεί από σύμπτωση εάν οι γωνίες φωτογράφισης δεν επιλεγούν με προσοχή. Στο παράδειγμα στην Εικόνα 2.33 προέκυψαν δύο 3Δ μοντέλα ως νέφη σημείων. Το πρώτο νέφος σημείων (αριστερά) έχει προκύψει από σιλουέτες στις κατάλληλες γωνίες ( $45^\circ$  με ταύτησε με το σχήμα), ενώ το επόμενο (δεξιά) έχει προκύψει από σιλουέτες που ακολουθούν ένα τυπικό βήμα περιστροφής ( $\sim 10^\circ$  χωρίς ταύτιση με το σχήμα του αντικειμένου). Είναι εμφανές ότι αν και στη δεύτερη περίπτωση έχουν ληφθεί σημαντικά περισσότερες φωτογραφίες, η ανακατασκευή προκύπτει αισθητά πιο παραμορφωμένη από την πρώτη περίπτωση, απλά και μόνο λόγω κακής ταύτισης της γωνίας λήψης των φωτογραφιών. Σύμφωνα με τα προηγούμενα είναι ξεκάθαρο ότι τόσο το σύνολο των σιλουετών όσο και οι γωνίες φωτογράφισης είναι συνδεδεμένες με το γενικότερο σχήμα και τη μορφολογία του προς ψηφιοποίηση αντικειμένου. Ο σημαντικός αυτός περιορισμός πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερα υπόψη σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η ανακατασκευή του αντικειμένου, για ειδικούς λόγους ή αβλεψία, βασίζεται σε περιορισμένο πλήθος σιλουετών ή σε περιπτώσεις ιδιαίτερης γεωμετρικής πολυπλοκότητας του αντικειμένου. Στην Εικόνα 2.34 παρουσιάζονται σε κόκκινες αποχρώσεις τα γεωμετρικά σφάλματα που προκύπτουν στην κυλινδρική μορφολογία ενός αντικειμένου όταν αυτό φωτογραφίζεται από μόλις οκτώ διαφορετικές οπτικές γωνίες (σταθερό βήμα και λήψη ανά  $45^\circ$ ).

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η πολύ ομαλή επιφανειακή γεωμετρία που προκύπτει, η οποία είναι πλέον εμφανής όταν από τα 3Δ μοντέλα αφαιρεθεί η υφή, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.35, στην οποία εικονίζονται 3Δ μοντέλα που δημιουργήθηκαν με τη Σχήμα από σιλουέτα με και χωρίς την υφή της επιφάνειάς τους.

Υπενθυμίζεται ότι βασικός σκοπός των συστημάτων της μεθόδου αυτής είναι η αυτοματοποιημένη 3Δ ανακατασκευή αντικειμένων. Συνεπώς, η μέθο-



Εικόνα 2.34. Μικρό πλήθος σιλουετών και σφάλματα 3Δ ανακατασκευής στη Σχήμα από σιλουέτα.



Εικόνα 2.35. Παραδείγματα 3Δ ανακατασκευών με τη μέθοδο Σχήμα από σιλουέτα.

δος βρίσκει εφαρμογές στο ηλεκτρονικό εμπόριο, καθώς ο σύντομος χρόνος συλλογής δεδομένων σε σύγκριση με τα φωτορεαλιστικά αποτελέσματα την καθιστούν μία από τις πλέον αποτελεσματικές λύσεις. Σήμερα, με την αύξηση των υπολογιστικών δυνατοτήτων και την πρόοδο σε μεθόδους πολυεικονικής φωτογραμμετρίας τα αποτελέσματα της μεθόδου χαρακτηρίζονται πλέον υποδεέστερα.

#### 2.4.4 Σχήμα από δομημένο φωτισμό

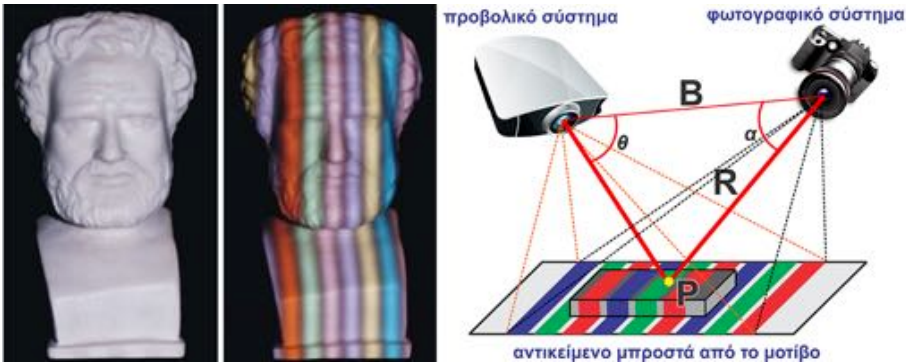
Η Σχήμα από δομημένο φωτισμό (Shape from structured light) αποτελεί μια μέθοδο κατά την οποία η ανάκτηση του βάθους βασίζεται στην προβολή ενός μοτίβου φωτός πάνω στις επιφάνειες ενός αντικειμένου από γνωστή οπτική γωνία. Παρατηρώντας τις παραμορφώσεις που δέχεται το μοτίβο καθώς προβάλλεται επάνω στην επιφάνεια είναι εφικτή η ανάκτηση του βάθους. Όπως και η μέθοδος του τριγωνισμού με ακτίνες λέιζερ, το βάθος προκύπτει μέσα από

διαδικασίες τριγωνισμού. Άλλωστε, οι δύο αυτές μέθοδοι έχουν κοινά χαρακτηριστικά, ενώ η βασική διαφοροποίηση τους εντοπίζεται στη χρήση προβολικού συστήματος αντί πηγής φωτός λέιζερ. Στην Εικόνα 2.36 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου Σχήμα από δομημένο φωτισμό με το μοτίβο φωτισμού να αποτελείται από ρίγες ή λουρίδες διαφορετικών χρωμάτων (αριστερά) και μια σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου και της αρχής του τριγωνισμού που εφαρμόζεται σε αυτή την περίπτωση (δεξιά).

Τα μοτίβα που εφαρμόζονται παρουσιάζουν υψίσυχνες μεταβολές χρωματικής έντασης και περιλαμβάνουν ρίγες, πλέγματα και κάποιες φορές ακόμα και ελλείψεις. Η χρωματική κωδικοποίηση βοηθά το σύστημα αποτύπωσης να διαχωρίσει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις μεταβολές στο μοτίβο, καθώς αυτό προβάλλεται πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου. Η κωδικοποίηση ενός μοτίβου μπορεί να πραγματοποιηθεί με ποικίλες μεθόδους. Δημοφιλέστερες πρακτικές είναι η μεταβαλλόμενη ένταση αποχρώσεων του γκρι, η εναλλαγή χρωμάτων και η μεταβλητή πυκνότητα σχημάτων. Η κωδικοποίηση του μοτίβου επιτρέπει την αντιστοίχιση και σύγκριση ανάμεσα στις θέσεις των εικονοστοιχείων που αποτυπώνει το σύστημα και στις θέσεις που καταλαμβάνουν αρχικά τα εικονοστοιχεία επάνω στο μοτίβο. Με τη σύγκριση αυτή υπολογίζονται όλες οι αποκλίσεις στα αντίστοιχα σημεία και έτσι μπορεί να ανακτηθεί η τρίτη διάσταση.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.36 ο οπτικός ανιχνευτής (βιντεοκάμερα, φωτογραφική μηχανή) χρησιμοποιείται για τη συλλογή εικόνων που παρουσιάζουν τη σκηνή υπό την προβολή, μέσω προβολικού συστήματος, του δομημένου φωτισμού (2Δ μοτίβο). Αν η σκηνή είναι επίπεδη, χωρίς κάποια μεταβολή στην καμπυλότητα της επιφάνειας, τότε το προβαλλόμενο μοτίβο δεν επιδέχεται παραμορφώσεις. Διαφορετικά, η γεωμετρία της επιφάνειας παραμορφώνει το μοτίβο. Η μέθοδος στοχεύει στην αναγνώριση και εξαγωγή της 3Δ γεωμετρίας της επιφάνειας, η οποία συμβαδίζει με τις μεταβολές που παρουσιάζονται στο μοτίβο. Η αρχή του τριγωνισμού στην περίπτωση αυτή μπορεί να εκφραστεί από το νόμο των ημιτόνων ως  $R = B \frac{\sin \theta}{\sin (\pi - \alpha - \theta)}$ .

Τα συστήματα της μεθόδου Σχήμα από δομημένο φωτισμό χρησιμοποιούν ειδικά σχεδιασμένα μοτίβα. Η κωδικοποίηση των μοτίβων γίνεται με την αντιστοίχιση κωδικολέξεων (codewords) σε σύνολα εικονοστοιχείων. Έτσι, τα εικονοστοιχεία από τα οποία αποτελείται ένα μοτίβο αντιστοιχούν τελικά σε έναν 2Δ πίνακα, του οποίου κάθε κελί περιέχει μία κωδικολέξη. Συνήθως, οι κωδικολέξεις αυτές δεν είναι άλλο παρά απλοί αριθμοί που χαρτογραφούνται στο μοτίβο με τη χρήση γκρίζων χρωματικών τόνων ή γεωμετρικών αναπαραστάσεων. Το πλήθος των σημείων που μπορούν να κωδικοποιηθούν είναι ανάλογο με το πλήθος των κωδικολέξεων που χρησιμοποιούνται. Βέβαια, όσο το πλήθος των σημείων αυξάνεται τόσο αυξάνεται και η δυσκολία χαρτογράφησης τους επάνω στο μοτίβο, το οποίο δεν είναι τίποτε άλλο από μια διακριτή οντότητα. Η κωδικοποίηση μπορεί να πραγματοποιείται άλλοτε σε έναν από τους δύο καρτεσιανούς άξονες του μοτίβου  $X$ ,  $Y$  και άλλοτε και στους δύο. Η χρήση



Εικόνα 2.36. Εφαρμογή της μεθόδου Σχήμα από δομημένο φωτισμό.

μεθόδων κωδικοποίησης επιτρέπει κάποιες φορές την 3Δ ψηφιοποίηση ακόμη και αντικειμένων που κινούνται, όμως, με πολύ μικρές ταχύτητες.

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές προβολής μοτίβου δομημένου φωτισμού, που ταξινομούνται ανάλογα με τους τρόπους κωδικοποίησης που ακολουθούνται. Οι τεχνικές αυτές είναι οι εξής: (α) πολύπλεξης χρόνου, (β) κωδικοποίησης γειτονικών στοιχείων και (γ) άμεσης κωδικοποίησης.

### Κωδικοποίηση πολύπλεξης χρόνου

Αποτελεί μια από τις πλέον δημοφιλείς τεχνικές και βασίζεται στην λεγόμενη *προσωρινή κωδικοποίηση*, η οποία συνίσταται στην εναλλασσόμενη χρήση ενός συνόλου διαφορετικών μοτίβων. Συνήθως, η εναλλαγή των μοτίβων γίνεται από πολύ απλό μοτίβο (ή αραιό) προς πιο σύνθετο (ή πυκνό). Η μέθοδος αυτή αποφέρει μετρήσεις υψηλής ακρίβειας λόγω δύο σημαντικών χαρακτηριστικών:

- Τα πολλαπλά μοτίβα που προβάλλονται επιτρέπουν τη χρήση χαμηλής πολυπλοκότητας κωδικολέξεων (πχ. άσπρο-μαύρο) και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εύκολη αποκωδικοποίησή τους.
- Επιτυγχάνεται κλιμάκωση της ποιότητας, καθώς η θέση του κάθε εικονοστοιχείου κωδικοποιείται με όλο και μεγαλύτερη ακρίβεια όσο προβάλλονται διαδοχικά τα πιο περίπλοκα μοτίβα.

Οι Salvi et al. (2004) πρότειναν μια οργάνωση των μεθόδων πολύπλεξης χρόνου σε τρεις κύριες κατηγορίες. Η κάθε κατηγορία προκύπτει από το είδος των κωδικολέξεων που χρησιμοποιούνται. Παρόλα αυτά καθώς υπάρχει και η δυνατότητα συνδυασμών των μεθόδων πολύπλεξης χρόνου μπορούμε να διακρίνουμε συνολικά τέσσερις κατηγορίες:

- Δυναδικοί κώδικες

- Κώδικες  $n$ -ψηφίων
- Διαβαθμίσεις του γκρι σε συνδυασμό με διαφορά φάσης
- Υβριδικές μέθοδοι

**Διαδικαστικοί κώδικες** Σε αυτή την προσέγγιση χρησιμοποιούνται δύο μόνο επίπεδα φωτισμού που αναπαριστούν μια δυαδική κατάσταση (0 και 1). Κάθε εικονοστοιχείο του μοτίβου έχει τη δική του κωδικολέξη. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η κωδικοποίηση του μοτίβου ως προς ένα άξονα (πχ. μόνο κάθετες γραμμές). Πολλές ερευνητικές προσπάθειες έχουν εστιάσει στη συγκεκριμένη κωδικοποίηση, ενώ από το 1982 οι Posdamer and Altschuler (1982) πρότειναν την προβολή μιας ακολουθίας μοτίβων σε κάθετες ρίγες, με χρήση δυαδικών κωδικολέξεων. Η κωδικολέξη που σχετίζεται με κάθε εικονοστοιχείο είναι μια δυαδική ακολουθία που δημιουργείται από το συνολικό πλήθος των μοτίβων. Το μέγιστο πλήθος των μοτίβων προβολής είναι σχετικός με τη διαθέσιμη ανάλυση του προβολικού συστήματος, δηλαδή το πόσο πυκνές μπορεί να είναι οι εναλλαγές στα μοτίβα εξαρτάται από τις δυνατότητες του προβολικού συστήματος. Γενικότερα, αξίζει να σημειωθεί ότι αποφεύγεται η χρήση μεγάλου πλήθους μοτίβων, λόγω περιορισμών και στους οπτικούς ανιχνευτές συστημάτων, οι οποίοι αδυνατούν να εντοπίσουν πολύ υψηλής συχνότητας μεταβολές (πχ ιδιαίτερα στενές ρίγες). Επιπρόσθετα, τα εικονοστοιχεία που ανήκουν στην ίδια ρίγα μοιράζονται την ίδια κωδικολέξη. Ως εκ τούτου ο τριγωνισμοί στα περισσότερα συστήματα υπολογίζεται στο κέντρο της κάθε ρίγας, είτε στα όριά της (σε μία ακμή της). Σημειώνεται δε ότι η δεύτερη προσέγγιση (ακμή της ρίγας) αναφέρθηκε ότι αποφέρει καλύτερα αποτελέσματα (Salvi et al., 2004). Στην Εικόνα 2.37 δίνεται ένα παράδειγμα ανακατασκευής τμήματος αντικειμένου με τη μέθοδο αυτή στο οποίο γίνεται χρήση τεσσάρων (4) μοτίβων άσπρων-μαύρων ριγών με σταδιακή αύξηση της χωρικής συχνότητας εναλλαγής των ριγών<sup>2</sup>.

Ο Inokuchi (1984) επέκτεινε την κωδικοποίηση Posdamer and Altschuler (1982) εισάγοντας στην κωδικοποίηση και αποχρώσεις του γκρι, διατηρώντας όμως τη μορφή των κωδικολέξεων ως ακολουθίες δυαδικών ψηφίων (0 και 1). Το πλεονέκτημα της μεθόδου εντοπίζεται στο γεγονός ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί έλεγχος των κωδικολέξεων με την απόσταση Hamming ενώ η κωδικοποίηση γίνεται πιο ανθεκτική στο θόρυβο που προκύπτει από τον οπτικό αισθητήρα της φωτογραφική μηχανής. Ο Trobina (1995) εντόπισε πως το κρίσιμο σημείο για την απόδοση των συστημάτων ψηφιοποίησης που υλοποιούν τη συγκεκριμένη κωδικοποίηση είναι η υψηλή ακρίβεια στον εντοπισμό της κάθε ρίγας του μοτίβου πάνω στην εικόνα. Πρότεινε τη μετατροπή των φωτογραφιών αποχρώσεων γκρι σε ασπρόμαυρες φωτογραφίες (bitmap binarisation) με στόχο την αναγνώριση της θέσης της κάθε ρίγας σε επίπεδο εικονοστοιχείου. Οι Rocchini et al. (2001) πρότειναν τη χρήση των χρωμάτων μπλε και κόκκινο

<sup>2</sup>Ψηφιοποίηση στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου PRESIOUS, <http://www.presious.eu/>



**Εικόνα 2.37.** Δυαδικά μοτίβα διαφορετικής χωρικής συχνότητας σε εφαρμογή Σχήμα από δομημένο φωτισμό.

για τις ρίγες ως μια αποδοτικότερη προσέγγιση εντοπισμού των ορίων. Επίσης πρότεινε την εισαγωγή μίας τρίτης, πράσινης ρίγας, μήκους ενός μόνο εικονοστοιχείου ανάμεσα σε κάθε μπλε και κόκκινη ρίγα, με στόχο την περαιτέρω βελτίωση της ακρίβειας, στην κλίμακα του ενός εικονοστοιχείου, του εντοπισμού της μετάβασης από τη μία ρίγα (μπλε) στην άλλη (κόκκινη).

**Κώδικες  $n$ -ψηφίων** Η κωδικοποίηση με κώδικες  $n$ -ψηφίων προσπαθεί να ξεπεράσει τους περιορισμούς της δυαδικής κωδικοποίησης και να απαλείψει την ανάγκη χρήσης πολλαπλών μοτίβων. Οι Caspi et al. (1998) παρουσίασαν έναν κώδικα πολλών χρωματικών επιπέδων, ο οποίος βασίζεται σε αλφάβητο που αποτελείται από  $n$  σύμβολα, όπου το κάθε σύμβολο αντιστοιχεί σε ένα χρώμα, επιτυγχάνοντας τη μείωση του πλήθους των απαιτούμενων μοτίβων. Η κωδικοποίηση  $n$ -ψηφίων καταφέρνει να εξάγει ακριβείς μετρήσεις βάθους ενώ διαθέτει αντοχή στο θόρυβο που προέρχεται από το αισθητήριο της φωτογραφικής μηχανής χρησιμοποιώντας ένα πολύ μικρότερο πλήθος μοτίβων από ότι η δυαδική κωδικοποίηση.

**Διαβαθμίσεις του γκρι με διαφορά φάσης** Μοτίβα στα οποία γίνεται συνδυασμός χρήσης διαβαθμίσεων του γκρι αλλά και ελέγχου (διαφοράς) φάσης μπορούν να οδηγήσουν σε κωδικοποίηση που επιτρέπει την υψηλής ανάλυσης 3Δ ψηφιοποίηση. Ο Gühring (2000) ανέπτυξε ένα σύστημα βασισμένο σε προβολικά συστήματα τεχνολογίας Liquid Crystal Display (LCD) και Digital Micro-mirror Device (DMD), τα αποτελέσματα του οποίου άγγιξαν ένα μέσω όρο σφάλματος κοντά στα 30  $\mu\text{m}$  με μέγιστη απόκλιση τα 0,281 mm. Αν συνυπολογιστεί ότι τα αποτελέσματα αυτά επιτεύχθηκαν με την τεχνολογία προβολικών και φωτογραφικών συστημάτων του 2000 θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ιδιαίτερα υψηλής πιστότητας.

**Υβριδικές τεχνικές** Στη βιβλιογραφία αναφέρονται μέθοδοι που χρησιμοποιούν την πολλαπλή προβολή μοτίβων, την πολύπλεξη χρόνου ενώ ταυτόχρονα και την πληροφορία που παρέχουν γειτονικά εικονοστοιχεία. Για παράδειγμα, οι Hall-Holt and Rusinkiewicz (2001) εφάρμοσαν το διαχωρισμό τεσσάρων μοτίβων σε συνολικά 111 κάθετες ασπρόμαυρες ρίγες, δημιουργώντας ένα σύστημα με ικανότητα 3Δ αποτύπωσης τόσο μικρών αντικείμενων όσο και ολόκληρων χώρων (πχ. ένα δωμάτιο). Το αποτέλεσμα αυτό επετεύχθη λόγω της κωδικοποίησης που εφαρμόστηκε, αλλά και της δυνατότητας αναγνώρισης των ριγών ανάμεσα στα διαφορετικά μοτίβα.

### Κωδικοποίηση γειτονικών στοιχείων

Όλες σχεδόν οι τεχνικές που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία χρησιμοποιούν ένα μοτίβο. Η κωδικολέξη ενός συγκεκριμένου σημείου στο μοτίβο προκύπτει από τα γειτονικά του σημεία. Η προσέγγιση, όμως, αυτή καθιστά δυσκολότερη την αποκωδικοποίηση και συχνά προκύπτουν γεωμετρικά σφάλματα. Και σε αυτή την κατηγορία μπορεί κανείς να αναγνωρίσει διαφορετικές προσεγγίσεις όπως (α) η μη-τυπική κωδικοποίηση, (β) οι ακολουθίες De Bruijn και (γ) οι μαθηματικοί πίνακες.

**Μη τυπική κωδικοποίηση** Πολλές ερευνητικές προσπάθειες εστιάζουν στη χρήση μοτίβων που είναι σχεδιασμένα έτσι, ώστε να διαιρούνται σε ένα προκαθορισμένο πλήθος περιοχών. Οι Maruyama and Abe (1993) ανέπτυξαν ένα μοτίβο με κενά τυχαίας κατανομής. Τα κενά σχηματίζουν ένα σύνολο από ευθύγραμμα τμήματα, όπου η θέση του κάθε τμήματος υπολογίζεται από το μήκος του και το μήκος των γειτονικών τμημάτων. Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμογή σε αντικείμενα, των οποίων η επιφάνεια παρουσιάζει ομαλές μορφολογικές μεταβολές (ομαλή εναλλαγή βάθους χωρίς έντονες οπτικές αποφράξεις). Μια παραλλαγή του μοτίβου παρουσιάστηκε από τους Durdle et al. (1998) που πρότειναν την κωδικοποίηση ριγών σε τρία επίπεδα του γκρι (Λευκό, Γκρίζο και Μαύρο), χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα μια συγκεκριμένη ακολουθία εναλλαγών:

ΜΛΓΑΒΓΛΓΜΓΑΜΓΜΑΜΓΛ

**Ακολουθίες De Bruijn** Η κωδικοποίηση μοτίβων μπορεί να προκύψει και από ακολουθίες De Bruijn. Θεωρητικά, μια ακολουθία de Bruijn αποτελείται από ακολουθίες διατεταγμένων ψηφίων που δεν μπορούν να αποτελέσουν την έναρξη καμίας άλλης ακολουθίας. Μια ακολουθία De Bruijn τάξης  $n$  για αλφάβητο  $k$  ψηφίων, συμβολίζεται ως  $B(k, n)$  και έχει συνολικό μήκος  $k^n$ . Για παράδειγμα, η  $B(2, 3)$  έχει μήκος  $2^3 = 8$  και οι ακολουθίες ψηφίων 00010111

και 11101000 είναι μοναδικές και αντίθετες μεταξύ τους. Η δημιουργία ακολουθιών De Bruijn ξεφεύγει από το αντικείμενο του παρόντος βιβλίου, ενώ η αρχική διατύπωση της εν λόγω θεωρίας μπορεί να βρεθεί στη βιβλιογραφία (de Bruijn, 1975). Εξαιτίας της ιδιαιτερότητας της κωδικοποίησης που προσφέρει η προσέγγιση αυτή, πλήθος ερευνητικών εργασιών εστιάζουν στη συγκεκριμένη κωδικοποίηση για την εφαρμογή στη μέθοδο Σχήμα από δομημένο φωτισμό Lavoie et al. (1999); Petriu et al. (2000); Salvi et al. (1998); Zhang et al. (2002).

**Μαθηματικοί πίνακες** Τυποποιημένοι μαθηματικοί πίνακες μπορούν, επίσης, να συμβάλουν στη διαδικασία κωδικοποίησης. Η χρήση πινάκων βέβαια προϋποθέτει την αμφίδρομη κωδικοποίηση και στους δύο άξονες ( $X, Y$ ), αφού κάθε σημείο του μοτίβου φέρει διαφορετική κωδικολέξη για τις κάθετες και οριζόντιες συντεταγμένες (Morano et al., 1998). Σημαντικές εργασίες που εστιάζουν στην εν λόγω προσέγγιση είναι αυτές των Griffin et al. (1992); Petriu et al. (1992); Spoelder et al. (1998).

### Άμεση κωδικοποίηση

Η προσέγγιση της άμεσης κωδικοποίησης προτείνει τη δημιουργία μοτίβου, στο οποίο κάθε εικονοστοιχείο μπορεί να περιγραφεί από τη χρωματική πληροφορία του. Η άμεση κωδικοποίηση βρίσκει εφαρμογή σε μονόχρωμα αντικείμενα με χαμηλής ανακλαστικότητας επιφάνειες. Για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται διαδικασία βαθμονομήσεις για την αναγνώριση του χρωματικού φάσματος που ανακλά το αντικείμενο από τις επιφάνειες του. Σε γενικές γραμμές, οι προσεγγίσεις άμεσης κωδικοποίησης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: (α) κωδικοποίηση βάσει διαβαθμίσεων του γκρι και (β) κωδικοποίηση βάσει χρώματος.

**Κωδικοποίηση βασισμένη σε διαβαθμίσεις του γκρι** Οι Carrihill and Hummel (1985) ανέπτυξαν σύστημα που βασίζεται στο λόγο έντασης (intensity ratio) αποχρώσεων του γκρι. Το μοτίβο που προτείνουν αποτελείται από ένα σύνολο ριγών σε αποχρώσεις του γκρι. Ο λόγος έντασης της κάθε απόχρωσης υπολογίζεται για όλα τα εικονοστοιχεία του μοτίβου. Τα αρχικά αποτελέσματα της συγκεκριμένης προσέγγισης ήταν πολύ χαμηλής ποιότητας (σφάλμα ανακατασκευής  $\sim 1$  cm), αλλά στη συνέχεια βελτιώθηκαν από τις προσπάθειες των Chazan and Kiryati (1995); Miyasaka et al. (2000).

**Κωδικοποίηση βασισμένη σε χρώμα** Στη μέθοδο αυτή η προσέγγιση δημιουργίας του μοτίβου είναι παρόμοια με την προηγούμενη, με μοναδική διαφορά να εντοπίζεται στο ότι οι διαβαθμίσεις του γκρι αντικαθίστανται από ένα πλήρες χρωματικό φάσμα. Οι Tajima and Iwakawa (1990) επέλεξαν το σύνολο



**Πίνακας 2.1.** Αντικειμενική σύγκριση επτά αντιπροσωπευτικών μεθόδων Σχήμα από δομημένο φωτισμό (προσαρμογή από Salvi et al. (2004)).

Μοτίβο	τυπική απόκλιση (μm)	Νέφος σημείων	ανάλυση (%)	Αριθμός μοτίβων
Posdamer	37,6	25.213	21,67	9
Horn	9,6	12.988	11,17	5
Gühring	4,9	27.214	23,38	14
De Bruijn	13,1	13.899	11,94	1
Salvi	72,3	372	0,32	1
Morano	23,6	926	0,8	1
Sato	11,9	10.204	8,77	3

του ορατού φάσματος στην προσέγγισή τους. Παρόλα αυτά, για τη συλλογή του συγκεκριμένου φάσματος αποδείχθηκε ότι απαιτείται ένα αρκετά σύνθετο οπτικό σύστημα σε επίπεδο φωτογραφικής μηχανής και οπτικών φίλτρων (Sato, 1999).

### Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων

Οι Salvi et al. (2004) σύγκριναν τις πλέον αντιπροσωπευτικές προσεγγίσεις κάτω από όμοιες ελεγχόμενες συνθήκες με στόχο την αντικειμενική αξιολόγηση και αποτίμησή τους. Στο πείραμα που περιγράφουν τοποθετήθηκε μια λευκή επίπεδη επιφάνεια σε απόσταση 120 cm από το σύστημα και αποτυπώθηκε με επτά διαφορετικού τύπου μοτίβα. Η συλλογή δεδομένων πραγματοποιήθηκε για δεύτερη φορά για μια απόσταση 40 cm πιο κοντά στο σαρωτή (στα 80 cm). Στη συνέχεια υπολογίσθηκε η τυπική απόκλιση της διαφοράς της απόστασης μεταξύ των δύο επιφανειών που μετρήθηκαν για κάθε μία από τις τεχνικές που δοκιμάστηκαν. Ο Πίνακας 2.1 συγκεντρώνει τα αποτελέσματα με τη μορφή τιμών (α) τυπικής απόκλισης σε μm, (β) μέσου όρου κορυφών που προέκυψαν από κάθε μοτίβο, (γ) ποσοστού των εικονοστοιχείων που αποκωδικοποιήθηκαν από εικόνες ανάλυσης  $512 \times 226$  και (δ) συνολικού πλήθους μοτίβων που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε μέθοδο που δοκιμάστηκε.

Σε ένα ακόμα πείραμά τους, οι Salvi et al. (2004) επέλεξαν δύο αντικείμενα, την προτομή ενός αλόγου λευκού χρώματος  $21 \times 15 \times 10$  cm και ένα ανθρώπινο χέρι φυσικού μεγέθους. Η μορφολογία του δεύτερου είναι ιδιαίτερη περίπλοκη με ασυνέχειες στις περιοχές των δακτύλων. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι συστήματα που βασίζονται στην πολύπλεξη χρόνου αποδίδουν καλύτερα, ενώ η υλοποίησή τους είναι πιο εύκολη τόσο σε επίπεδο λογισμικού και όσο και σε πολυπλοκότητα υλικοτεχνικής υποδομής. Τα συστήματα που βασίζονται σε μοτίβα διαβαθμίσεων του γκρι αποφέρουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, αλλά η μέγιστη ανάλυση που θεωρητικά μπορούν να αποδώσουν είναι πρακτικά αδύνατο να επιτευχθεί.

Η ποιότητα των αποτελεσμάτων των συστημάτων που υλοποιούν τη Σχήμα

από δομημένο φωτισμό είναι συνδεδεμένη με τη ανάλυση της φωτογραφικής μηχανής και του προβολικού συστήματος που χρησιμοποιούνται. Στο σύστημα που ανέπτυξαν οι Rocchini et al. (2001) χρησιμοποίησαν φωτογραφική μηχανή με οπτικό αισθητήριο τύπου CCD ανάλυσης  $1440 \times 960$ . Το μοτίβο που χρησιμοποίησαν βασίζονταν σε 512 ρίγες. Συνεπώς, η μέγιστη δυνατή ανάλυση (κορυφές ορισμένες στον 3Δ χώρο) είναι  $960 \times 512$ . Επιπρόσθετα, ο ρυθμός συλλογής δεδομένων σχετίζεται με την ταχύτητα της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής και με την ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων προς το υπολογιστικό σύστημα που πραγματοποιεί την επεξεργασία των δεδομένων. Ο μέγιστος όγκος που μπορεί να αποτυπώσει το σύστημα από μία γωνία θέασης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του προβολικού συστήματος (ικανότητα εστίασης σε συγκεκριμένο εύρος αποστάσεων). Στο μικρό βάθος πεδίου των προβολικών συστημάτων έγκειται ένας από τους βασικότερους περιορισμούς αυτών των συστημάτων, καθώς αυτό περιορίζει το εύρος των αποστάσεων αποτύπωσης.

Σε συστήματα που υλοποιούν τη μέθοδο Σχήμα από δομημένο φωτισμό η δημιουργία 3Δ ψηφιακών αντιγράφων προκύπτει μέσα από διαδικασίες επεξεργασίας δεδομένων όπως είναι η ευθυγράμμιση, η ενοποίηση τμηματικών σαρώσεων και η χρωματική ανάμειξη πληροφορία υφής (texture blending) (Chen et al., 1997; Horn and Kiryati, 1999; Rocchini et al., 2001; Wust and Capson, 1991). Όπως και σε άλλες μεθόδους, η συνολική πληροφορία υφής προκύπτει από ένα σύνολο από φωτογραφίες που συλλέγονται από τις ίδιες γωνίες θέασης από όπου πραγματοποιούνται οι προβολές των μοτίβων. Δηλαδή, πρακτικά, ένα αντικείμενο φωτογραφίζεται υπό την προβολή μοτίβων αλλά και υπό φυσικό φωτισμό τόσο για την αποκωδικοποίηση της γεωμετρικής όσο και για την αποτύπωση της φασματικής (χρωματικής) πληροφορίας του.

Συνοψίζοντας, η ακρίβεια 3Δ αποτύπωσης των συστημάτων που υλοποιούν τη μέθοδο Σχήμα από δομημένο φωτισμό επηρεάζεται από (Horn and Kiryati, 1999; Rocchini et al., 2001):

- την ποιότητα οπτικών του προβολικού συστήματος (ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του φακού),
- την ικανότητα και εύρος αποστάσεων εστίασης του προβολικού συστήματος,
- την ποιότητα οπτικών και αισθητήρων της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής, καθώς και ανάλυση του αισθητήρα και πιστότητα στην απόδοση των χρωμάτων,
- τις επιτρεπόμενες γωνίες θέασης του αντικειμένου από το σύστημα (αποφυγή δημιουργίας σκιών πάνω στο αντικείμενο από το ίδιο το σύστημα),
- τις επιφάνειες των αντικειμένων και τα χαρακτηριστικά τους.

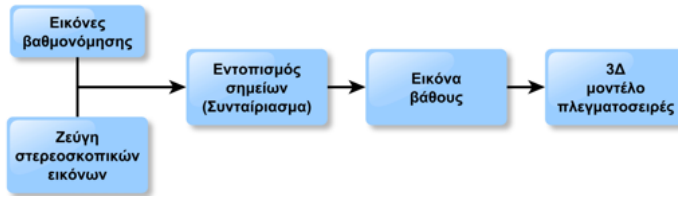
### 2.4.5 Σχήμα από στερεοφωτογράφιση

Η μέθοδος Σχήμα από στερεοφωτογράφιση είναι μέθοδος που προσπαθεί να εξάγει το μέγιστο δυνατό όγκο 3Δ πληροφορίας από ένα μοναδικό ζεύγος φωτογραφιών που έχουν ληφθεί από γνωστή θέση στον 3Δ χώρο. Η Σχήμα από στερεοφωτογράφιση βρίσκει εφαρμογή στον τομέα της όρασης υπολογιστών και στη ρομποτική. Αποτελεί μια επιτυχημένη προσπάθεια προσομοίωσης του τρόπου λειτουργίας του βιολογικού συστήματος 3Δ όρασης που διαθέτει και ο άνθρωπος. Η μέθοδος δέχεται ως είσοδο ένα ζεύγος φωτογραφιών (στερεοζεύγος) που παρουσιάζουν ένα αντικείμενο από οπτικές γωνίες αντίστοιχες με αυτές ενός ζεύγους ματιών. Σε ένα στερεοζεύγος το περιεχόμενο των δύο εικόνων παρουσιάζει υψηλά ποσοστά αλληλοεπικάλυψης, ενώ η μετατόπιση της μίας εικόνας σε σχέση με την άλλη είναι κατά έναν και μόνο άξονα, τυπικά τον «οριζόντιο» άξονα, ο οποίος αντιστοιχεί στον άξονα που ενώνει τα δύο μάτια. Λόγω της προοπτικής προβολής στο επίπεδο των δύο εικόνων, η μικρή μετατόπιση της θέσης οδηγεί στην εμφάνιση παράλλαξης, η οποία είναι καθοριστική για την ανάκτηση του βάθους.

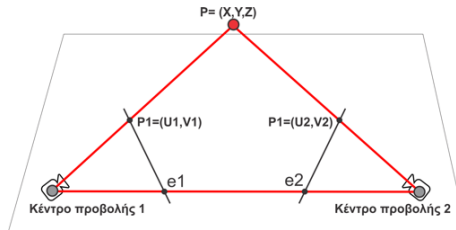
Τα φωτογραφικά συστήματα που χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή της μεθόδου πρέπει να περάσουν από διαδικασίες βαθμονομήσεις ώστε να καθοριστούν οι εσωτερικές και εξωτερικές παράμετροί τους. Μόνο έτσι καθίσταται δυνατή η ορθή ανάκτηση της τρίτης διάστασης (βάθος) για κάθε σημείο της ορατής σκηνής, το οποίο είναι κοινό (ομόλογο) και στις δύο εικόνες. Ο χωρικός εντοπισμός των κοινών σημείων στα επίπεδα των φωτογραφιών πραγματοποιείται είτε με αυτόματες είτε με χειροκίνητες μεθόδους. Η ανάκτηση του βάθους υλοποιείται σχετικά εύκολα, λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα βαθμονομήσεις και τη διαφορά θέσης των κοινών σημείων ανάμεσα στις δύο εικόνες (απόστασης baseline).

Μπορεί κανείς να δει μία απλοποιημένη μορφή της διαδικασίας ως διάγραμμα ροής για την ανακατασκευή γεωμετρίας από στερεοφωτογράφιση στην Εικόνα 2.38. Οι αρχές που διέπουν τη διαδικασία προέρχονται από το χώρο της προβολικής (και ιδιαίτερα της επιπολικής) γεωμετρίας. Η λύση του προβλήματος απεικονίζει απλοποιημένα στην Εικόνα 2.39, όπου τα τρία σημεία  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P$  σχηματίζουν ένα *επιπολικό επίπεδο*. Τα κέντρα προβολής των σημείων ( $P_1$ ,  $P_2$ ) συνδέονται με νοητή γραμμή που τέμνει τα επίπεδα πάνω στα οποία βρίσκονται οι δύο φωτογραφίες. Τα συζυγή σημεία τομής είναι τα  $e_1$  και  $e_2$ , τα οποία ονομάζονται επιπολικά. Η θέση του σημείου  $P$  υπολογίζεται από την εύρεση του σημείου τομής πάνω στις ευθείες που ξεκινούν από τα  $P_1$  και  $P_2$  και ορίζονται στον 3Δ χώρο.

Σημαντική πρόκληση στη συγκεκριμένη μέθοδο είναι ο ορθός εντοπισμός των ομόλογων (κοινών) σημείων ανάμεσα σε κάθε ζεύγος εικόνων ή, διαφορετικά, η μείωση της αβεβαιότητας της υπόθεσης πως δύο συγκεκριμένα ειكونοστοιχεία αντιστοιχούν στο ίδιο σημείο πάνω στην επιφάνεια του αντικείμενου. Το παραπάνω είναι γνωστό και ως *πρόβλημα αντιστοίχισης*. Επισημαί-



Εικόνα 2.38. Διαδικασία εξαγωγής 3Δ γεωμετρίας από στερεοζεύγος.



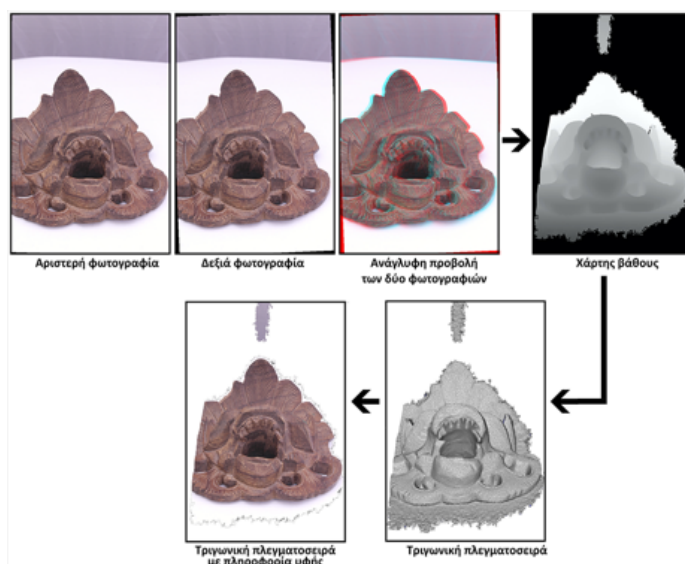
Εικόνα 2.39. Επιπολική γεωμετρία.



Εικόνα 2.40. Γενικευμένη διαδικασία αντιστοίχισης σημείων σε ένα στερεοζεύγος φωτογραφιών.

νεται ότι ο ορθός εντοπισμός ομόλογων σημείων δεν είναι προφανής, καθώς οι εικόνες είναι στη γενική περίπτωση «σήματα» που περιλαμβάνουν θόρυβο (παραμορφώσεις γεωμετρίας και χρώματος) και συνεπώς, ο εντοπισμός ουσιαστικά καθοδηγείται από προσεγγίσεις ελαχιστοποίησης σφάλματος (δεν υπάρχει ποτέ η τέλεια ταύτιση). Η διαδικασία αντιστοίχισης γίνεται από σειρά από αλγορίθμους, ώστε να δημιουργηθούν τελικά χάρτες ανομοιότητας (disparity maps), από όπου υπολογίζεται η γεωμετρία της επιφάνειας του αντικειμένου. Στην Εικόνα 2.40 παρουσιάζονται τα βήματα μιας γενικευμένης διαδικασίας αντιστοίχισης.

Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένας χάρτης βάθους (depth map). Κάθε εικονοστοιχείο του χάρτη βάθους περιγράφει την απόσταση μεταξύ του μετρούμενου αντικειμένου και του κέντρου του φακού της κάθε φωτογραφικής μηχανής. Στην Εικόνα 2.41 παρουσιάζονται τα βήματα ανακατασκευής ενός αντικειμένου από ένα στερεοζεύγος. Η «αριστερή» και η «δεξιά» φωτογραφία χρησιμοποιούνται ως πηγές πληροφορίας για τη δημιουργία του χάρτη βάθους, από όπου θα προκύψει η πλεγματοσειρά πάνω στην οποία θα προβληθεί η πληρο-



Εικόνα 2.41. Τα διακριτά βήματα της στερεοφωτογράφισης.

φορία υψής.

Το ερευνητικό ενδιαφέρον για τη μέθοδο είναι μεγάλο και αυτό αποτυπώνεται από το πλήθος των διαθέσιμων αλγορίθμων που οδηγούν στην αυτοματοποιημένη αναγνώρισης ομόλογων (κοινών) σημείων ανάμεσα σε ζεύγη φωτογραφιών. Οι πλέον διαδεδομένοι αλγόριθμοι χρησιμοποιούν χαρακτηριστικά σημεία που αναγνωρίζουν και ταυτίζουν στο ζεύγος εικόνων (feature-based stereo matching). Στην προσέγγιση αυτή, οι σχετικοί αλγόριθμοι αναλαμβάνουν να εντοπίσουν όλα εκείνα τα ευδιάκριτα χαρακτηριστικά (γωνίες, ευθείες, καμπύλες) στην επιφάνεια του αντικειμένου που είναι εμφανή και στις δύο φωτογραφίες. Η επιπολική γεωμετρία εφαρμόζεται για τον υπολογισμό των καλύτερων αντιστοιχιών θέσης στο χώρο ανάμεσα σε κάθε ζεύγος σημείων. Γενικά, η μέθοδος χαρακτηρίζεται εύρωστη στην εκτίμηση του βάθους, αλλά καθώς η ανάκτηση του βάθους πραγματοποιείται μόνο για τα σημεία της εικόνας που έχουν αναγνωριστεί ως κοινά αυτό αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου. Επίσης, υπάρχουν αλγόριθμοι που βασίζονται στην ιδέα της κατάτμησης της κάθε φωτογραφίας σε τμήματα. Η κατάτμηση επιτρέπει τον έλεγχο σε μικρές γειτονιές εικονοστοιχείων (region based) για να εντοπιστούν με βελτιωμένη διακριτική ικανότητα τα ομόλογα σημεία ανάμεσα στις δύο φωτογραφίες. Η βέλτιστη αντιστοιχία των περιοχών προκύπτει από την επιπολική γεωμετρία και συγκρίσεις των τιμών των εικονοστοιχείων (ελάχιστο μέσο τετραγωνικό σφάλμα ή σφάλμα απόλυτης διαφοράς). Οι αλγόριθμοι στην προσέγγιση αυτή επιτρέπουν την ανάκτηση υψηλής πυκνότητας χαρτών βάθους. Το εμβαδό των περιοχών στο οποίο διαιρείται μια φωτογραφία αποτελεί κριτήριο για την ποιότητα της ανάκτησης βάθους, ενώ ταυτόχρονα έχει αντί-

κτυπο και στους απαιτούμενους χρόνους πραγματοποίησης των υπολογισμών.

Το βασικό πλεονέκτημα της Σχήμα από στερεοφωτογράφιση είναι ότι η μέθοδος εντάσσεται στην κατηγορία των εύχρηστων και σχετικά αυτοματοποιημένων παθητικών τεχνικών 3Δ ψηφιοποίησης γεγονός που καταλήγει στο πλεονέκτημα ότι δεν απαιτούνται ειδικός εξοπλισμός ή ειδικές συνθήκες για τη συλλογή δεδομένων (φωτογραφιών). Μπορεί, για παράδειγμα, να υλοποιηθεί με δύο μόνο ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές ή ακόμη και σε μία, με την προϋπόθεση ότι η αλλαγή θέσης για τη λήψη της δεύτερης φωτογραφίας για την εκμετάλλευση της παράλλαξης πραγματοποιείται με ελεγχόμενο τρόπο. Από την άλλη, ως σημαντικά μειονεκτήματα της μεθόδου μπορούν να αναφερθούν τα εξής:

- Το βάθος υπολογίζεται μόνο σε αναγνωρισμένα ομόλογα σημεία.
- Οι χάρτες βάθους που προκύπτουν περιέχουν δεδομένα που περιλαμβάνουν έντονο θόρυβο εξαιτίας της δυσκολίας εντοπισμού ομόλογων σημείων με υψηλή ακρίβεια.
- Για τη δημιουργία ενός πλήρους 3Δ ψηφιακού αντιγράφου ενός αντικειμένου απαιτούνται πολλά ζεύγη φωτογραφιών και διαδικασίες επεξεργασίας (ευθυγράμμιση και ενοποίηση τμηματικών σαρώσεων).

Τα αποτελέσματα ανάκτησης βάθους της μεθόδου σε περιοχές γύρω από τα όρια των αντικειμένων (περιοχή σιλουέτας) εμφανίζουν, δυστυχώς, έντονα προβλήματα. Ομοίως, προβληματικές χαρακτηρίζονται και οι περιοχές στην επιφάνεια ενός αντικειμένου που παρουσιάζονται έντονα φαινόμενα διάχυσης φωτός. Στο σημείο αυτό σημειώνεται επίσης ότι η πληροφορία βάθους που εξάγεται από τα ζεύγη φωτογραφιών χαρακτηρίζεται ως πληροφορία  $2\frac{1}{2}$  διαστάσεων. Κάτι τέτοιο, φυσικά, ισχύει για κάθε μέθοδο 3Δ ψηφιοποίησης που μπορεί να αποτυπώσει την επιφάνεια του αντικειμένου στο χώρο και όχι το εσωτερικό του και μόνο μέθοδοι τομογραφίες μπορούν τυπικά να παράγουν πλήρη 3Δ πληροφορία (Bertozzi et al., 2002; Scharstein and Szeliski, 2002).

#### 2.4.6 Δομή από κίνηση

Η μέθοδος Δομή από κίνηση (Structure from Motion (SfM)) θα μπορούσε να πει κανείς ότι αποτελεί μια παραλλαγή και, γιατί όχι, μία γενίκευση της μεθόδου Σχήμα από στερεοφωτογράφιση. Στη συγκεκριμένη μέθοδο η προηγούμενη δομή των δύο φωτογραφικών μηχανών έχει αντικατασταθεί από μια μηχανή που καταγράφει ένα αντικείμενο ή μια στατική σκηνή από διαφορετικές γωνίες θέασης. Θεωρώντας ότι η μέθοδος Σχήμα από στερεοφωτογράφιση υλοποιεί την ανάκτηση βάθους από δύο γωνίες θέασης (two-view geometry) η Δομή από κίνηση αποτελεί τη γενίκευση σε ανάκτηση βάθους από πολλαπλές γωνίες θέασης (multiple-view geometry).

Βασική προϋπόθεση για την εφαρμογή της μεθόδου είναι ότι το αντικείμενο προς αποτύπωση θα πρέπει βρίσκεται σε απόλυτη ακινησία και να μην αποτελείται από κινητά μέρη τα οποία αλλάζουν θέση κατά την εφαρμογή της διαδικασίας συλλογής δεδομένων. Φυσικά, κάτι τέτοιο ισχύει για όλες τις μεθόδους 3Δ ψηφιοποίησης που παρουσιάζονται στο παρόν κείμενο. Οι αλγόριθμοι που εφαρμόζονται είναι παρόμοιοι με αυτούς της μεθόδου Σχήμα από στερεοφωτογράφιση και είναι ευαίσθητοι στο θόρυβο του περιεχόμενο μίας ακολουθίας φωτογραφιών κλειστού βρόχου (closed loop image sequence). Όπως είναι αναμενόμενο και η Δομή από κίνηση βασίζεται στην αντιστοίχιση κοινών (ομόλογων) σημείων ανάμεσα στις φωτογραφίες. Όταν οι φωτογραφίες που χρησιμοποιούνται είναι από διαφορετικές γωνίες θέασης ο υπολογισμός του προσανατολισμού συνεχίζει να είναι μια σχετικά απλή διαδικασία, δεδομένου ότι υπάρχει αρκετή πληροφορία αντιστοίχισης (πλήθος ομόλογων σημείων) ανάμεσα σε διαδοχικές (γειτονικές γωνίες θέασης) φωτογραφίες, αρκεί, φυσικά, να υπάρχει μεγάλη επικάλυψη μεταξύ των φωτογραφιών. Παλαιότερα, η αντιστοίχιση από διαφορετικές γωνίες θέασης κατέληγε να υλοποιείται χειροκίνητα, με την χειροκίνητη επιλογή του ομόλογου σημείου σε κάθε φωτογραφία (πχ. με το δείκτη του ποντικιού). Σήμερα, η διαδικασία έχει αυτοματοποιηθεί πλήρως με τη χρήση αλγορίθμων εντοπισμού χαρακτηριστικών σημείων σε εικόνες, όπως ο Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) (Lowe, 1999) και ο Speeded Up Robust Features (SURF) (Bay et al., 2006). Γενικά, τα αποτελέσματα της μεθόδου παρουσιάζουν αρκετές ασάφειες αφού η ανάκτηση του βάθους βασίζεται στον εντοπισμό της θέσης της φωτογραφικής μηχανής στον 3Δ χώρο χωρίς να υπάρχει κάποια προηγούμενη γνώση γι' αυτή. Οι μαθηματικοί υπολογισμοί που πραγματοποιούνται επηρεάζονται από παραμέτρους όπως: (α) ένα αυθαίρετο σύστημα συντεταγμένων ορισμένο στον πραγματικό κόσμο, (β) η θέση του αντικείμενου μέσα στο χώρο, (γ) η κλίμακα του αντικειμένου.

Εξ' ορισμού, η αρχική εκδοχή της μεθόδου μπορούσε να παράγει χαμηλής πυκνότητας νέφη σημείων ή αραιά νέφη σημείων (sparse point clouds) και συνεπώς ήταν περιορισμένης πρακτικής αξίας, καθώς οδηγούσε σε 3Δ αντίγραφα πολύ χαμηλής ανάλυσης. Αντίθετα, σήμερα, σε συνδυασμό με αλγορίθμους δημιουργίας πυκνών νεφών σημείων που προκύπτουν από εφαρμογή Στερεοφωτογράφισης ή πολυεικονικής στερεοφωτογράφισης (Multiple View Stereo (MVS)), η μέθοδος αποτελεί μια πολύ επιτυχημένη επιλογή στο χώρο της φωτογραμμετρίας και τείνει να γίνει η πλέον διαδεδομένη μέθοδος αποτύπωσης αντικειμένων. Ο συνδυασμός των μεθόδων SfM και MVS είναι αποτέλεσμα έρευνας που αφορά στην ανάπτυξη μεθόδων 3Δ αποτύπωσης με φωτογραφικές μεθόδους και σήμερα εμφανίζεται πλέον ως μια εννιαία μέθοδος με την συντομογραφία Structure from Motion-Multiple View Stereo (SfM-MVS). Αποτελεί μια λύση χαμηλού σχετικά κόστους με υψηλά όμως επίπεδα ποιότητας και ακρίβειας στα παραγόμενα δεδομένα όταν εφαρμόζεται σωστά. Η δημιουργία 3Δ ψηφιακών αντιγράφων στην περίπτωση του πολιτισμού με τη συγκεκριμένη μέθοδο τείνει, κατά τις πρώτες δεκαετίες του 21ου αιώνα, να γίνει η πλέον



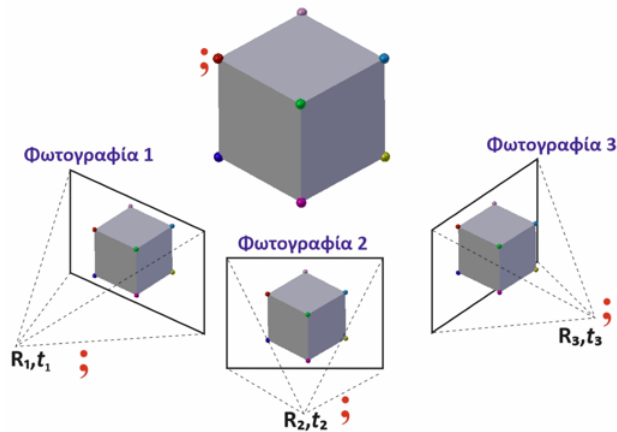
**Εικόνα 2.42.** 3Δ ανακατασκευή με τη μέθοδο Δομή από κίνηση.

δημοφιλής λύση, ξεπερνώντας αυτές του Τριγωνισμού λείζερ και Σχήματος από δομημένο φωτισμό. Στην Εικόνα 2.42 παρουσιάζεται παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου SFM-MVS. Το χαρακτηριστικό των φωτογραφιών είναι η μεγάλη επικάλυψη μεταξύ των εικόνων (Εικόνα 2.42.α). Στην εικόνα παρατίθεται επίσης και μία φωτορεαλιστική 3Δ αναπαράσταση του αποτυπωμένου αντικειμένου (Εικόνα 2.42.β).

Πίσω από το συνδυασμό SFM-MVS κρύβεται ένα σύνολο από πολύπλοκους και απαιτητικούς σε υπολογιστική ισχύ και μνήμη αλγορίθμους που συμβάλουν στη δημιουργία του 3Δ ψηφιακού αντιγράφου μέσα από μια σειρά μη ταξινομημένων φωτογραφιών που προβάλλουν το αντικείμενο από διαφορετικές οπτικές γωνίες. Μέσα από το σύνολο των φωτογραφιών, αρχικός στόχος είναι η ανάκτηση μιας σειράς από εσωτερικές (intrinsic) και εξωτερικές (extrinsic) παραμέτρους που περιγράφουν τη φωτογραφική μηχανή που χρησιμοποιήθηκε. Αυτό το βήμα υλοποιείται με τον εντοπισμό ομολόγων σημείων σε όλες τις φωτογραφίες, χωρίς να απαιτείται η χρήση φωτογραμμετρικών σταθερών (στόχων, targets). Εξαιτίας της απουσίας στόχων, η μέθοδος εντάσσεται στην ευρύτερη οικογένεια των φωτογραμμετρικών μεθόδων χωρίς στόχους (target-less). Η μέθοδος παρουσιάζει ευρωστία σε μικρές μεταβολές φωτισμού και έντασης των χρωμάτων που εμφανίζονται στις φωτογραφίες και αυτό την κάνει ακόμα πιο φιλική για αποτυπώσεις που πραγματοποιούνται σε εξωτερικούς χώρους ή σε χώρους όπου δεν υπάρχει η δυνατότητα ελεγχόμενου φωτισμού. Πιο συγκεκριμένα, τα βασικά βήματα που εκτελούνται κατά την επεξεργασία των φωτογραφιών για τη δημιουργία του 3Δ ψηφιακού αντιγράφου μέσα από αυτές είναι τα εξής:

- **Ανίχνευση σημείων και περιοχών ενδιαφέροντος** (χαρακτηριστικών σημείων) στις εικόνες με την εφαρμογή αλγορίθμων όπως οι SIFT και SURF.

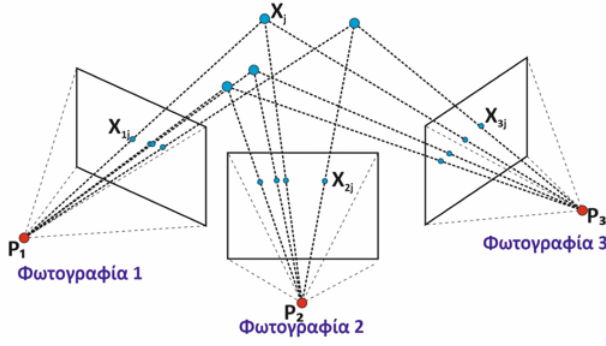




**Εικόνα 2.43.** Αναπαράσταση του προβλήματος εντοπισμού των θέσεων λήψης φωτογραφιών στη Δομή από κίνηση.

- **Σύγκριση και αναγνώριση των αντίστοιχων σημείων** που έχουν εξάγει οι αλγόριθμοι SIFT και SURF, μέσω της ανάλυσης όλων των δυνατών συνδυασμών φωτογραφιών χρησιμοποιώντας αυστηρές διαδικασίες, όπως η τετραγωνική ταύτιση (quadratic matching) ή η αναζήτηση σε δένδρικές δομές (k-d tree).
- **Εφαρμογή του αλγορίθμου αναδιάταξης δεσμών φωτός (bundle adjustment)**, ο οποίος βασιζόμενος σε δεδομένο σύνολο ομόλογων σημείων, υπολογίζει ταυτόχρονα τις 3Δ συντεταγμένες που καθορίζουν τη γεωμετρία στη σκηνή, τις παραμέτρους της σχετικής κίνησης και τα οπτικά χαρακτηριστικά των φωτογραφικών μηχανών που χρησιμοποιήθηκαν για τη λήψη των φωτογραφιών. Ο αλγόριθμος λειτουργεί ως μέθοδος 3Δ ανακατασκευής, στην οποία, λαμβάνοντας υπόψη τις προηγούμενες παραμέτρους, οδηγεί στη βέλτιστη 3Δ δομή (βάσει συνάρτησης κόστους). Μια γραφική αναπαράσταση του προβλήματος εντοπισμού των θέσεων λήψης φωτογραφιών στη μέθοδο Δομή από κίνηση φαίνεται στην Εικόνα 2.43.

Κατά την εφαρμογή του bundle adjustment υποτίθεται πως υπάρχει ένα πλήθος  $n$  σημείων στον 3Δ χώρο που είναι ορατά από ένα πλήθος  $m$  διαφορετικών οπτικών γωνιών (φωτογραφίες). Με δεδομένο ένα σύνολο ομόλογων σημείων σε δύο ή περισσότερες εικόνες, μπορεί να υπολογιστούν οι εσωτερικές και οι εξωτερικές παράμετροι της φωτογραφικής μηχανής, καθώς και οι συντεταγμένες (θέσεις) των ομόλογων σημείων στο 3Δ χώρο. Στο εν λόγω πρόβλημα ζητούμενο είναι να υπολογισθούν οι μετασχηματισμοί περιστροφής (rotation – R) και μετατόπισης (translation – t) των θέσεων, από τις οποίες πραγματοποιήθηκε η λήψη των φωτογραφιών στον 3Δ χώρο, καθώς και των θέσεων των ομόλογων σημείων



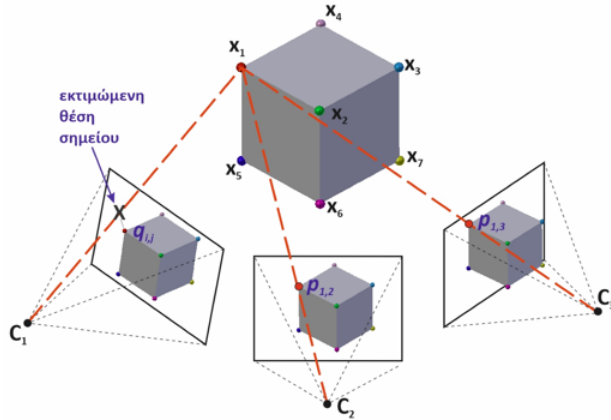
Εικόνα 2.44. Αναπαράσταση του προβλήματος εντοπισμού ομόλογου σημείου στον 3Δ χώρο σε τρεις όψεις.

μέσω της ελαχιστοποίησης μη-γραμμικής συνάρτησης κόστους ελαχίστων τετραγώνων. Για το σύνολο  $m$  εικόνων με ένα σύνολο  $n$  ομόλογων σημείων ισχύει  $x_{i,j} = P_i X_j$ ,  $i = 1, \dots, m$ ,  $j = 1, \dots, n$ , όπου  $P_i$  ο πίνακας του σύνθετου μετασχηματισμού και  $X_j$  το διάνυσμα των συντεταγμένων του σημείου  $j$  στον 3Δ χώρο. Το πρόβλημα απαιτεί τον υπολογισμό των πινάκων μετασχηματισμού  $P_i$  και των συντεταγμένων στον 3Δ χώρο ( $X_j$ ) όλων των ομόλογων σημείων  $x_{i,j}$  σε όλες τις φωτογραφίες. Στην Εικόνα 2.44 δίνεται γραφική αναπαράσταση του προβλήματος εντοπισμού ομόλογου σημείου σε τρεις όψεις για τον ορθό υπολογισμό του πίνακα του σύνθετου μετασχηματισμού προβολής  $P_i$ . Εάν  $x_{i,j}$  η προβολή του σημείου  $j$  στην εικόνα  $i$  τότε ορίζεται μεταβλητή  $w_{i,j}$  ίση με τη μονάδα αν το σημείο  $j$  υπάρχει στην εικόνα  $i$  και ίση με μηδέν σε διαφορετική περίπτωση (μη ορατό). Ο bundle adjustment εκφράζει την ελαχιστοποίηση συνάρτησης κόστους ως προς το σφάλμα επαναπροβολής (re-projection error) όλων των σημείων και όλων των παραμέτρων της κάμερας:

$$g(C, X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_{i,j} \|q_{i,j} - P(C_i, X_j)\|^2 \quad (2.5)$$

όπου  $C_i$  η κάθε εικόνα και  $j$  η θέση του σημείου στον 3Δ χώρο, ενώ  $P(C_i, X_j)$  είναι η εκτίμηση των θέσεων  $X_j$  δεδομένου του πίνακα προβολής  $P$  και της επιλεγμένης κάμερας  $C_i$ . Η έκφραση  $\|q_{i,j} - P(C_i, X_j)\|^2$  δίνει το τετραγωνικό σφάλμα στην εκτιμώμενη θέση ( $q_{i,j}$ ) του σημείου  $j$  στη φωτογραφία  $i$  σε σχέση με το αποτέλεσμα της σχέσης  $x_{i,j} = P_i X_j$ . Ένα παράδειγμα εκτίμησης θέσης  $q_{i,j}$  ομόλογου σημείου σε μια όψη, με γνωστό τον πίνακα μετασχηματισμών προβολής και την αντίστοιχη θέση σε άλλες δύο όψεις φαίνεται στην Εικόνα 2.45.

- **Εφαρμογή της πολυεικονικής στερεοφωτογράφισης (MVS)** χρησιμοποιώντας γειτονικές (χωρικά/τοπολογικά) εικόνες, ώστε να προκύψει το



**Εικόνα 2.45.** Εκτιμώμενη θέση ομόλογου σημείου με γνωστό τον πίνακα μετασχηματισμών προβολής.

πυκνό νέφος σημείων που θα αποτελέσει και την αρχική 3Δ δομή, από την οποία, στη συνέχεια, θα δημιουργηθεί η πολυγωνική πλεγματοσειρά. Στη φάση αυτή κάθε εικονοστοιχείο σε κάθε φωτογραφία προβάλλεται στον εικονικό 3Δ χώρο, ο οποίος δημιουργήθηκε κατά την προηγούμενη φάση, μέσω του γνωστού σύνθετου πίνακα προβολής για κάθε φωτογραφία. Τελικό αποτέλεσμα είναι ένα πυκνό νέφος σημείων, του οποίου η ανάλυση (πυκνότητα) περιορίζεται μόνο από την απόσταση από την οποία έχει ληφθεί η κάθε φωτογραφία από το αντικείμενο, καθώς και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και δυνατότητες του φωτογραφικού συστήματος.

Κάθε βήμα στη διαδικασία περιλαμβάνει μια πληθώρα μαθηματικών υπολογισμών, και καθώς το πλήθος και η ανάλυση των φωτογραφιών αυξάνει, απαιτούνται μεγάλα μεγέθη υπολογιστικής ισχύος και μνήμης. Όπως και με κάθε άλλη μέθοδο, έτσι και η SFM-MVS έχει τα όριά της. Καθώς βασίζεται στην αναγνώριση ομόλογων σημείων σε επιφάνειες αντικειμένων, η ποιότητα του 3Δ ψηφιακού αντιγράφου σχετίζεται με την ύπαρξη έντονων μορφολογικών επιφανειακών χαρακτηριστικών. Τέτοια μορφολογικά χαρακτηριστικά είναι οι συχνές μεταβολές έντασης ή χρωματικότητας. Για την εφαρμογή της μεθόδου σε ανακλαστικές επιφάνειες απαιτείται η χρήση φίλτρων (πχ. φίλτρα κυκλικής πολώσεως) στις φωτογραφικές μηχανές για την ελαχιστοποίηση των ανακλάσεων και της τυχαίας σκεδάσεως του φωτός (abstract light scattering). Η εφαρμογή της μεθόδου σε επιφάνειες χωρίς έντονα χαρακτηριστικά (featureless surfaces) μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένες αντιστοιχίες σημείων ανάμεσα στις φωτογραφίες λόγω της ασάφειας αναγνώρισης των ομόλογων σημείων και τελικά στην εμφάνιση έντονου θορύβου στα δεδομένα (άρα και σε χαμηλής ποιότητας 3Δ ανακατασκευή) ή δημιουργία αντικειμένων με έντονες παραμορφώσεις ή ακόμη και δημιουργία τελείων πλασματικών αντικειμένων. Για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος έχουν γίνει διάφορες μελέτες,

μεταξύ των οποίων προτείνεται η προβολή μοτίβων θορύβου (ψηφιογραφικές εικόνες όπου κάθε εικονοστοιχείο παίρνει μια τιμή που προκύπτει από κάποιο μαθηματικό μοντέλο πχ. perlin noise, wavelet noise, Gaussian noise, κοκ) πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου, με χρήση προβολικού συστήματος, έτσι ώστε να εμπλουτιστεί η επιφάνεια με τις απαιτούμενες συνθετικές μεταβολές έντασης και χρωματικότητας.

Τα 3Δ δεδομένα που προκύπτουν από τα συστήματα που υλοποιούν τη μέθοδο SFM-MVS είναι υψηλής ποιότητας και, συνεπώς, τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται σήμερα σε απαιτητικές εφαρμογές, όπως στο χώρο του πολιτισμού. Σε συνδυασμό με τη σχεδόν αυτοματοποιημένη διαδικασία της μεθόδου SFM-MVS τα συστήματα αυτά αποτελούν αποδοτικές λύσεις χαμηλού κόστους. Φυσικά δεν αποτελούν πανάκεια, καθώς, όπως και κάθε άλλη μέθοδος, υπάρχουν και μειονεκτήματα και περιορισμοί.

Η μέθοδος μπορεί να αποτελέσει μια ολοκληρωμένη εύχρηστη λύση 3Δ ψηφιοποίησης με εντυπωσιακά επίπεδα αυτοματοποίησης που μπορεί να εφαρμοστεί ακόμη και από περιστασιακούς ή μη ειδικευμένους χρήστες. Φυσικά, όπως και σε όλες τις άλλες μεθόδους, η κατανόηση του τρόπου λειτουργίας της και των περιορισμών της είναι σημαντικά κριτήρια για την ορθή εφαρμογή της, τόσο κατά τη διαδικασία συλλογής δεδομένων όσο και κατά την επεξεργασία τους για την παραγωγή του 3Δ ψηφιακού αντιγράφου. Από την άλλη, η υψηλή ποιότητα των δεδομένων που προκύπτουν από την ορθή εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου, τη χαρακτηρίζει ως μια λύση που μπορεί να εξυπηρετήσει ένα μεγάλο εύρος έργων ψηφιοποίησης. Καθώς η μέθοδος είναι μια από τις πλέον διαδεδομένες μεθόδους σήμερα, η πρακτική της εφαρμογή αναλύεται διεξοδικά σε ειδικό Παράρτημα.

### 2.4.7 Σχήμα από φωτοσκίαση

Η φωτοσκίαση παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην αντίληψη του βάθους. Πολλοί ερευνητές προσπάθησαν να προσομοιώσουν το τρόπο, με τον οποίο λειτουργεί το ανθρώπινο σύστημα όρασης για να ανακτήσουν το βάθος με τη βοήθεια των φωτοσκιάσεων. Η ανάκτηση βάθους με τη μέθοδο Σχήμα από φωτοσκίαση (Shape from shading) απαιτεί μια μοναδική οπτική γωνία θέασης και συλλογής δεδομένων. Φυσικά η μία γωνία θέασης παρέχει το βάθος κατά τη συγκεκριμένη και μόνο όψη και συνεπώς για η πλήρη αποτύπωση ενός αντικειμένου απαιτεί και πάλι τη χρήση πολλαπλών γωνιών θέασης. Η συγκεκριμένη μέθοδος υλοποιείται βάσει τεσσάρων προσεγγίσεων, με βάση τις εννοιολογικές διαφορές που παρουσιάζει η κάθε αλγοριθμική προσέγγιση της ιδέας ανάκτησης βάθους από φωτοσκίαση:

- Τεχνικές ελαχιστοποίησης: οι τεχνικές ελαχιστοποίησης καταλήγουν στην επίλυση του προβλήματος με τη χρήση μίας συνάρτησης ενέργειας (energy function).

- Τεχνικές μετάδοσης: οι τεχνικές μετάδοσης μελετούν τη μετάδοση της πληροφορίας των σχημάτων από ένα σύνολο χαρακτηριστικών σημείων που βρίσκονται πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου.
- Τεχνικές περιοχής: οι τεχνικές περιοχής ανακτούν το βάθος μέσα από υποθέσεις που αφορούν στον τύπο της επιφάνειας.
- Γραμμικές τεχνικές: οι γραμμικές μέθοδοι υπολογίζουν τη λύση του προβλήματος βάσει μαθηματικών χαρτών ανάκλασης.

Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις υπάρχει η υπόθεση πως μία πηγή φωτός ακολουθεί μια συγκεκριμένη πορεία ώστε να δημιουργεί συγκεκριμένου τύπου φωτοσκιάσεις πάνω στην επιφάνεια ενός αντικειμένου. Ένα βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι η αδυναμία εξαγωγής βάθους από σκιασμένες περιοχές, καθώς αυτές δεν προσφέρουν αξιοποιήσιμη έντασης χρωματική πληροφορία. Οι Zhang et al. (1999) κατέληξαν στα εξής συμπεράσματα που αφορούν σε όλες τις τεχνικές Σχήμα από φωτοσκίαση:

- Τα αποτελέσματα ανάκτησης βάθους είναι μη ικανοποιητικά σε τεχνητά δεδομένα.
- Τα αποτελέσματα σε τεχνητά δεδομένα γενικά δε λειτουργούν προβλεπτικά για τα αποτελέσματα σε πραγματικά δεδομένα.
- Τα αποτελέσματα είναι χειρότερα σε πραγματικές εικόνες από ότι σε τεχνητές.

Η μέθοδος αποτελεί και σήμερα αντικείμενο έρευνας. Τα μαθηματικά μοντέλα ανάκλασης φωτός που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως απλοϊκά, ενώ νέα, πιο σύνθετα, έχουν ήδη προταθεί. Σύνηθες φαινόμενο αποτελεί ο συνδυασμός διαφορετικών τεχνικών, ώστε η υβριδική προσέγγιση να φέρει τα πλεονεκτήματα των διαφορετικών τεχνικών. Οι Zhang et al. (1999) προτείνουν το συνδυασμό της μεθόδου Σχήμα από φωτοσκίαση με τη μέθοδο Σχήμα από στερεοφωτογράφιση. Ένας άλλος συνδυασμός που προτείνεται είναι αυτός με την μέθοδο Σχήμα από σκιά που προσφέρει καλύτερα αποτελέσματα στα σημεία του αντικειμένου που καλύπτονται από σκιές.

#### 2.4.8 Σχήμα από υφή

Η υφή αποτελεί μια σημαντική πηγή πληροφορίας για να αντιληφθεί κάποιος τη μορφολογία της επιφάνειας ενός αντικειμένου. Η μέθοδος Σχήμα από υφή (Shape from texture) βασίζεται στην υπόθεση ότι προϋπάρχει γνώση για τη δομή και τη μορφολογία της επιφανειακής υφής του μετρούμενου αντικειμένου (πχ. κάποιο εύκολα αναγνωρίσιμο επαναλαμβανόμενο μοτίβο).

Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου βασίζεται στην αναγνώριση και εκμετάλλευση των παραμορφώσεων που δέχονται μεμονωμένα τα «εικονοστοιχεία υφής» (texels), τα οποία ορίζονται ως περιοχές της επιφάνειας που παρουσιάζουν μια αυτόνομη δομική επιφανειακή οντότητα που επαναλαμβάνεται σε όλη την επιφάνεια, όπως για παράδειγμα στην επιφάνεια μιας φράουλας. Οι μεταβολές της υφής πάνω σε μια φωτογραφία, μέσω της εκτίμησης των παραμορφώσεων που δέχονται τα δομικά αυτά στοιχεία, επιτρέπουν την εκτίμηση της μορφολογίας της επιφάνειας. Ο υπολογισμός του τρόπου καμπύλωσης της επιφάνειας σε οποιοδήποτε σημείο είναι φυσικά μεγάλη πρόκληση. Για το λόγο αυτό ο υπολογισμός της επιφάνειας λαμβάνει υπόψη τον προσανατολισμό της, μέσω ενός χάρτη καθέτων διανυσμάτων. Αν τα κάθετα διανύσματα είναι αρκετά πυκνά και η μεταβολές της επιφάνειας ομαλές, τότε ο χάρτης αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την 3Δ ανακατασκευή του αντικειμένου.

Ειδικότερα, για την εφαρμογή της μεθόδου στον πολιτισμό, δεν υπάρχει κάποια άμεση πρακτική εφαρμογή, καθώς είναι ιδιαίτερα σπάνιο να υπάρχουν πολιτιστικά αντικείμενα των οποίων η επιφάνεια να είναι αποτέλεσμα επανάληψης του ίδιου, αυστηρά, μοτίβου. Πρακτικές εφαρμογές όμως που διαφαίνεται να σχετίζονται με τη μέθοδο αυτή μπορούν να βρεθούν στην ανακατασκευή επιφανειών από υφάσματα, ανθρώπινο δέρμα, κοκ (Forsyth, 2002).

#### 2.4.9 Σχήμα από φωτομετρία

Η μέθοδος Σχήμα από φωτομετρία (Shape from photometry) βασίζεται σε μια παραλλαγή της μεθόδου Σχήμα από φωτοσκίαση. Η διαφορά τους βρίσκεται στο πλήθος φωτογραφιών που χρησιμοποιούνται για την ανακατασκευή του βάθους. Τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιούνται από τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι ακολουθίες φωτογραφιών που παρουσιάζουν ένα αντικείμενο από συγκεκριμένη (σταθερή) γωνία θέασης αλλά υπό μεταβλητές συνθήκες φωτισμού (μια πηγή φωτός που κινείται σε προκαθορισμένη πορεία). Η φωτομετρική μέθοδος ανακτά το βάθος μέσα από ψηφιογραφικές εικόνες διαβαθμίσεων του γκρι. Για να το επιτύχει, χρησιμοποιεί βαθμονομημένες αλλά και μη πηγές φωτός. Η επιλογή αυτή βασίζεται στην πολυπλοκότητα του αλγορίθμου υλοποίησης της μεθόδου. Οι βαθμονομημένες συνθήκες φωτισμού είναι εφικτές μόνο σε περιβάλλον εργαστηρίου. Παρόλα αυτά έχουν ήδη προταθεί παραλλαγές, στις οποίες η μέθοδος μπορεί να λειτουργήσει σε περιβάλλον με γενικό διάχυτο φωτισμό (Basri et al., 2007; Besl, 1989; Chen and Klette, 2003; Hertzmann and Seitz, 2003, 2005).

Οι Hertzmann and Seitz (2005) πρότειναν τη χρήση γνωστών γεωμετρικών στερεών, τα οποία φωτογραφίζονται υπό συγκεκριμένες συνθήκες φωτισμού παράλληλα με το αντικείμενο προς 3Δ ψηφιοποίηση. Σε ένα από τα πειράματά τους φωτογράφησαν ένα αντικείμενο με έντονη πληροφορία υφής με υνίσυχνες χρωματικές μεταβολές δίπλα σε δύο σφαίρες (αντικείμενα οδηγοί). Η μία σφαίρα διαθέτει επιφάνεια ομαλής διάχυσης του φωτός και είναι χρώματος

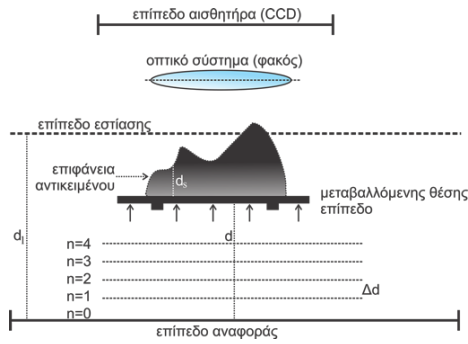
γκρι, ενώ η δεύτερη είναι μια μαύρη σφαίρα με υψηλής ανακλαστικότητας επιφάνεια. Για την ανακατασκευή του αντικειμένου χρησιμοποιήθηκαν δεκατέσσερις (14) φωτογραφίες κάτω από μεταβαλλόμενες συνθήκες φωτισμού. Καθώς το 3D ψηφιακό αντίγραφο είναι εντυπωσιακά ρεαλιστικό αποφάσισαν να το συγκρίνουν με ένα 3D ψηφιακό αντίγραφο του ίδιου αντικειμένου ψηφιοποιημένο από σύστημα τριγωνισμού λείζερ μικρών αποστάσεων της Cyberware. Οι ερευνητές αναφέρουν πως η μέθοδός τους καταφέρνει και εντοπίζει σημειακά το βάθος με μεγαλύτερη ακρίβεια από το σύστημα τριγωνισμού λείζερ. Αυτό μπορεί να οφείλεται, βέβαια, και στη μεγαλύτερης ανάλυσης φωτογραφική μηχανή που χρησιμοποίησαν, ενώ ταυτόχρονα για να ψηφιοποιηθεί το αντικείμενο (καλυμμένο από λεπτό στρώμα βερνικιού) με το σύστημα τριγωνισμού λείζερ χρειάστηκε να καλυφθεί με ένα στρώμα λευκής σκόνης.

Καθώς η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί είτε υπό συνθήκες διάχυτου φωτισμού, είτε υπό συνθήκες πλήρως ελεγχόμενου φωτισμού και ανάγκης ύπαρξης αντικειμένων αναφοράς, είναι στα όρια των παθητικών και ενεργητικών μεθόδων και μπορεί, ουσιαστικά, να καταταγεί και στις δύο κατηγορίες.

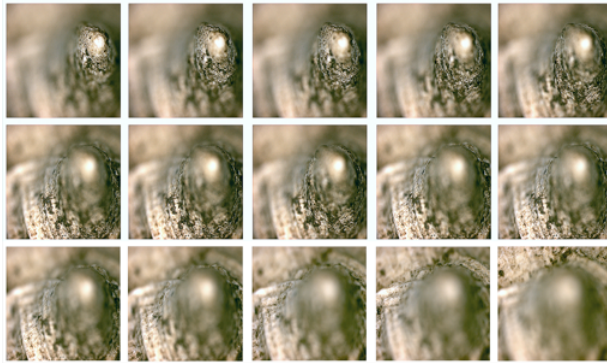
#### 2.4.10 Σχήμα από μεταβαλλόμενη εστίαση

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον τράβηξε μια μέθοδος που μπορεί να ανακτήσει την τρίτη διάσταση σύνολο εικόνων χρησιμοποιώντας το βάθος πεδίου του φωτογραφικού συστήματος (Schechner and Kiryati, 2000). Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου αυτής, η οποία ονομάζεται Σχήμα από μεταβαλλόμενη εστίαση (Shape from focus/defocus), παρουσιάζεται γραφικά στην Εικόνα 2.46. Ένα αντικείμενο με άγνωστα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τοποθετείται πάνω σε ένα επίπεδο με γνωστή απόσταση από τη φωτογραφική μηχανή. Η απόσταση αυτή δύναται να μεταβάλλεται με σταθερό βήμα. Το χαμηλότερο επίπεδο ορίζεται επίπεδο αναφοράς. Η διαμόρφωση του οπτικού συστήματος (αισθητήρας, φακός, κοκ) ορίζουν ένα νοητό επίπεδο που ονομάζεται επίπεδο εστίασης και παρουσιάζεται με τη μορφή διακεκομμένης γραμμής στην Εικόνα 2.46. Καθώς το οπτικό σύστημα έχει ένα συγκεκριμένο βάθος πεδίου (εύρος αποστάσεων από το φακό κατά το οποίο εμφανίζεται εστιασμένη εικόνα), στο επίπεδο εστίασης εστιάζονται μόνο κάποια από τα τμήματα της επιφάνειας του αντικειμένου, τα οποία περιορίζονται μέσα στο βάθος πεδίου που ξεκινά λίγο πιο πριν και τελειώνει λίγο μετά την απόσταση εστίασης.

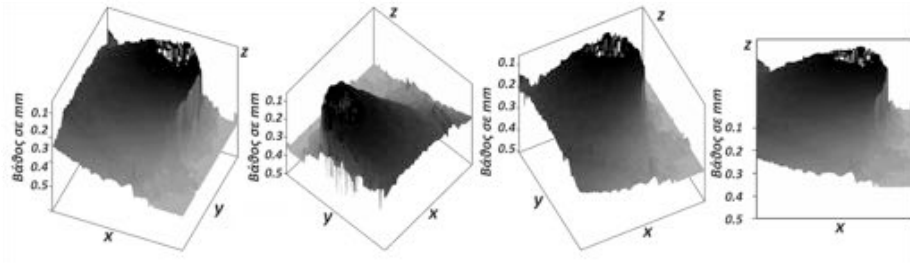
Καθώς η απόσταση  $d_1$  ανάμεσα στο επίπεδο εστίασης και το επίπεδο αναφοράς είναι πάντα γνωστή, όπως γνωστή είναι επίσης η απόσταση εστίασης (επίπεδο εστίασης) αλλά και το βάθος πεδίου για το συγκεκριμένο οπτικό σύστημα, κάθε εικονοστοιχείο που εμφανίζεται εστιασμένο είναι πρακτικά σε γνωστή απόσταση από το φωτογραφικό σύστημα ( $d_s = d_1 - d$ ). Μετακινώντας το επίπεδο εστίασης και λαμβάνοντας νέα φωτογραφία, τα εστιασμένα εικονοστοιχεία θα είναι πλέον σε άλλες θέσεις και συνεπώς βήμα - βήμα δημιουργείται χάρτης με τις αποστάσεις των εικονοστοιχείων, ο γνωστός χάρτης βάθους.



**Εικόνα 2.46.** Αρχή λειτουργίας της μεθόδου Σχήμα από μεταβαλλόμενη εστίαση.



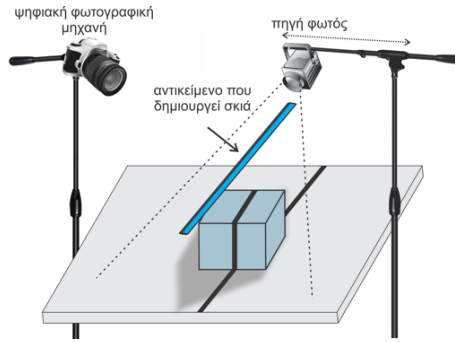
**Εικόνα 2.47.** Φωτογραφίες μικρού βάθους πεδίου με μεταβαλλόμενη εστίαση για εφαρμογή της μεθόδου Σχήμα από μεταβαλλόμενη εστίαση.



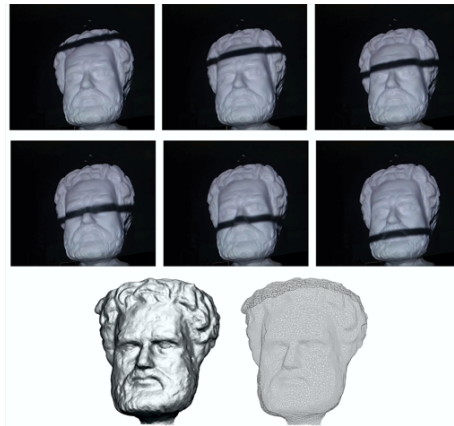
**Εικόνα 2.48.** Χάρτης βάθους που προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου Σχήμα από μεταβαλλόμενη εστίαση.

Η ανάλυση και η ακρίβεια των τεχνικών Σχήμα από μεταβαλλόμενη εστίαση είναι περιορισμένες σε σύγκριση με τις μεθόδους τριγωνισμού. Αντίθετα, όμως, δεν περιλαμβάνουν διαδικασίες αντιστοίχισης σημείων που τυπικά εμπεριέχουν υπολογιστά σφάλματα. Τα αποτελέσματά της χαρακτηρίζονται, γενικά, αξιόπιστα. Πρακτικά, η μέθοδος λειτουργεί αποτελεσματικά μόνο όταν το βάθος πεδίου είναι ιδιαίτερα περιορισμένο και σε πολύ μικρές αποστάσεις (πχ. στη μικροσκοπία) (Favaro, 2000; Schechner and Kiryati, 2000). Στην Εικόνα 2.47





Εικόνα 2.49. Απλοποιημένη αναπαράσταση συστήματος Σχήμα από σκιά.

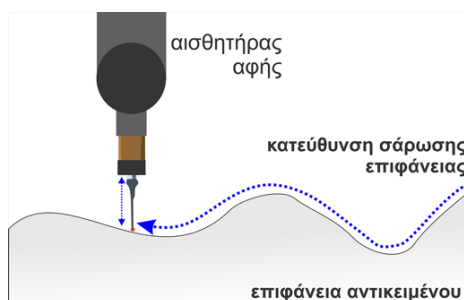


Εικόνα 2.50. Παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου Σχήμα από σκιά.

παρουσιάζεται παράδειγμα λήψης φωτογραφιών περιορισμένου βάθους πεδίου και μεταβαλλόμενης απόστασης εστίασης για την εφαρμογή της μεθόδου. Στην Εικόνα 2.48 παρουσιάζεται το τελικό αποτέλεσμα της μεθόδου, ως χάρτης βάθους, υπό διαφορετικές γωνίες θέασης.

#### 2.4.11 Σχήμα από σκιά

Κατά τη μέθοδο Σχήμα από σκιά (Shape from shadow) το 3Δ ψηφιακό αντίγραφο ενός αντικειμένου δημιουργείται από τον εντοπισμό της πληροφορίας που φέρει η διάχυση ελεγχόμενης σκιάς επάνω στις επιφάνειες του αντικειμένου. Η σκιά προκύπτει από αντικείμενο αναφοράς και από τη μετακίνηση πηγής φωτός. Μια απλοποιημένη μορφή συστήματος που υλοποιεί τη μέθοδο Σχήμα από σκιά παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.49. Στην εικόνα αυτή, καθώς η πηγή φωτός μετακινείται, η φωτογραφική μηχανή καταγράφει την επιφάνεια του αντικειμένου με τη σκιά της γνωστής ράβδου να εμφανίζεται σε άλλες θέσεις πάνω στην επιφάνεια. Οι παραμορφώσεις της σκιάς λόγω του ανάγλυφου του αντικειμένου μπορούν να οδηγήσουν στην υπολογισμό του βάθους.



**Εικόνα 2.51.** Αρχή λειτουργίας 3Δ ψηφιοποίησης με σύστημα μέτρησης συντεταγμένων με επαφή.

Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι το χαμηλό κόστος του εξοπλισμού και η χαμηλή υπολογιστική ισχύς, ενώ μπορεί κανείς να εντοπιστεί στο Διαδίκτυο λογισμικό ανοικτού κώδικα που υλοποιεί τη συγκεκριμένη μέθοδο. Η βασική δυσκολία που παρουσιάζει η μέθοδος εντοπίζεται στο σημείο αυτόματης αναγνώρισης των σκιών μέσα στην ακολουθία από τις φωτογραφίες.

Στην Εικόνα 2.50 παρουσιάζονται στιγμιότυπα κατά την εφαρμογή της διαδικασίας με τη σταδιακή μετακίνηση της σκιάς πάνω στο μετρούμενο αντικείμενο κατά τη διαδικασία συλλογής δεδομένων, καθώς και την τελική ανακατασκευή του 3Δ αντιγράφου (Bouguet and Perona, 1998).

#### 2.4.12 Συστήματα μέτρησης συντεταγμένων

Πολύ συχνά συναντούμε εμπορικά συστήματα τριγωνισμού λέιζερ μικρών αποστάσεων να συνδυάζονται με μηχανικούς βραχίονες με μεγάλη ελευθερία κινήσεων γνωστά και ως Συστήματα Μέτρησης Συντεταγμένων (Coordinate Measuring Machines-CMM). Ένας τέτοιος βραχίονας που δρα υποστηρικτικά σε σύστημα τριγωνισμού λέιζερ, μεταφέρει, μέσω ενός εσωτερικού καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων, την πληροφορία θέσης της κεφαλής του συστήματος τριγωνισμού, ώστε να μπορεί τελικά να ανακτηθεί η ακριβής γεωμετρία ενός μετρούμενου αντικειμένου. Τα CMM λειτουργούν όμως και αυτόνομα ως συστήματα 3Δ ψηφιοποίησης με την επιπρόσθετη χρήση αισθητηρίων επαφής. Τέτοια συστήματα βρίσκουν κυρίως εφαρμογές στην επιθεώρηση μηχανικών εξαρτημάτων, όπου η επαφή με το αντικείμενο δεν είναι απαγορευμένη. Η εφαρμογή τους εμφανίζεται πιο συχνά στο χώρο της βιομηχανίας και της αντίστροφης μηχανικής, ενώ αντίθετα η χρήση τέτοιων συστημάτων δεν προτείνεται σε εφαρμογές στον πολιτισμό, όπου η επαφή με το αντικείμενο δεν είναι αποδεκτή. Για τη λειτουργία των συστημάτων αυτών επιβάλλεται η επαφή του αισθητηρίου επαφής με την επιφάνεια του αντικειμένου που εξετάζεται. Μια μέση ακρίβεια μετρήσεων που μπορεί να επιτευχθεί από τα συγκεκριμένα συστήματα αγγίζει την τάξη των 25  $\mu\text{m}$ . Παρά όμως την υψηλή ακρίβεια, η διαδικασία συλλογής δεδομένων είναι χρονοβόρα. Σε απλά συστήματα, ο μέσος ρυθμός αποτύπωσης συντεταγμένων αγγίζει μόλις το ένα σημείο ανά δευτερό-

λεπτο (Nashman et al., 1995).

Στην Εικόνα 2.51 παρουσιάζεται η αρχής λειτουργίας του συστήματος που χρησιμοποιείται για την αποτύπωση 3Δ συντεταγμένων. Το αισθητήριο αγγίζει την επιφάνεια του αντικειμένου και μετακινείται προς μια κατεύθυνση. Οι μεταβολές της επιφάνειας του αντικειμένου αντικατοπτρίζονται και στη θέση του αισθητηρίου. Οι μεταβολές αυτές σε συνδυασμό με τη γνωστή θέση του αισθητηρίου επαφής μέσω του βραχίονα μεταφράζονται σε 3Δ γεωμετρικές συντεταγμένες και αφορούν εκείνα τα σημεία, τα οποία άγγιξε προηγουμένως το αισθητήριο. Η μεγάλη ακρίβεια που παρέχει ο βραχίονας για τη θέση του στο χώρο επιτρέπουν τη συλλογή μετρήσεων υψηλής ακρίβειας και ανάλυσης που ορίζεται από το βήμα της μετακίνησης (Papaioannou, 2001).



## Βιβλιογραφία

- Ahuja, N. and Veenstra, J. (1989). Generating octrees from object silhouettes in orthographic views. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11(2):137–149.
- Basri, R., Jacobs, D., and Kemelmacher, I. (2007). Photometric stereo with general, unknown lighting. *International Journal of Computer Vision*, 72(3):239–257.
- Baumberg, A., Lyons, A., and Taylor, R. (2005). 3d som—a commercial software solution to 3d scanning. *Graphical Models*, 67(6):476–495.
- Baumgart, B. G. (1974). Geometric modeling for computer vision. Technical report, STANFORD UNIV CA DEPT OF COMPUTER SCIENCE.
- Bay, H., Tuytelaars, T., and Van Gool, L. (2006). Surf: Speeded up robust features. In *European conference on computer vision*, pages 404–417. Springer.
- Beraldin, J.-A., Blais, F., Cournoyer, L., Godin, G., Rioux, M., and Taylor, J. (2004). Active 3d sensing for heritage applications. *BAR INTERNATIONAL SERIES*, 1227:340–343.
- Bertozzi, M., Broggi, A., Conte, G., and Fascioli, A. (2002). Stereo-vision system performance analysis. *Enabling Technologies for the PRASSI Autonomous Robot*, pages 68–73.
- Besl, P. J. (1989). Active optical range imaging sensors. In *Advances in machine vision*, pages 1–63. Springer.
- Boehler, W. and Marbs, A. (2002). 3d scanning instruments. *Proceedings of the CIPA WG*, 6:9–18.
- Bouguet, J.-Y. and Perona, P. (1998). 3d photography on your desk. In *Computer Vision, 1998. Sixth International Conference on*, pages 43–50. IEEE.
- Carrihill, B. and Hummel, R. (1985). Experiments with the intensity ratio depth sensor. *Computer vision, graphics, and image processing*, 32(3):337–358.

- Caspi, D., Kiryati, N., and Shamir, J. (1998). Range imaging with adaptive color structured light. *IEEE Transactions on Pattern analysis and machine intelligence*, 20(5):470–480.
- Chazan, G. and Kiryati, N. (1995). *Pyramidal intensity-ratio depth sensor*. Technion-IIT, Department of Electrical Engineering.
- Chen, C.-S., Hung, Y.-P., Chiang, C.-C., and Wu, J.-L. (1997). Range data acquisition using color structured lighting and stereo vision. *Image and Vision Computing*, 15(6):445–456.
- Chen, C.-Y. and Klette, R. (2003). 3d reconstruction using shape from photometric stereo and contours. Technical report, CITR, The University of Auckland, New Zealand.
- Cortelazzo, G. M. and Marton, F. (1999). About modeling cultural heritage objects with limited computers resources. In *Image Analysis and Processing, 1999. Proceedings. International Conference on*, pages 848–853. IEEE.
- Curless, B. and Levoy, M. (1995). Better optical triangulation through spacetime analysis. In *iccv*, page 987. IEEE.
- Cutting, J. E. and Vishton, P. M. (1995). Perceiving layout and knowing distances: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth. In *Perception of space and motion*, pages 69–117. Elsevier.
- Daniil, M. (2009). Τοπογραφία - Τοπογραφικές Αποτυπώσεις του χώρου. Lecture notes. Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης.
- de Bruijn, N. G. (1975). *Acknowledgement of priority to C. Flye Sainte-Marie on the counting of circular arrangements of  $2n$  zeros and ones that show each  $n$ -letter word exactly once*. Department of Mathematics, Technological University.
- Durdle, N. G., Thayyoor, J., and Raso, V. (1998). An improved structured light technique for surface reconstruction of the human trunk. In *Electrical and Computer Engineering, 1998. IEEE Canadian Conference on*, volume 2, pages 874–877. IEEE.
- Favaro, P. (2000). Shape from focus/defocus. *Washington University*.
- Forest, J., Salvi, J., Cabruja, E., and Pous, C. (2004). Laser stripe peak detector for 3d scanners. a fir filter approach. In *Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004. Proceedings of the 17th International Conference on*, volume 3, pages 646–649. IEEE.

- Forsyth, D. A. (2002). Shape from texture without boundaries. In *European Conference on Computer Vision*, pages 225–239. Springer.
- Godin, G., Rioux, M., Beraldin, J.-A., Levoy, M., Cournoyer, L., and Blais, F. (2001). An assessment of laser range measurement on marble surfaces. In *5th Conference on optical 3D measurement techniques*, volume 3.
- Griffin, P. M., Narasimhan, L. S., and Yee, S. R. (1992). Generation of uniquely encoded light patterns for range data acquisition. *Pattern recognition*, 25(6):609–616.
- Gühring, J. (2000). Dense 3d surface acquisition by structured light using off-the-shelf components. In *Videometrics and Optical Methods for 3D Shape Measurement*, volume 4309, pages 220–232. International Society for Optics and Photonics.
- Hall-Holt, O. and Rusinkiewicz, S. (2001). Stripe boundary codes for real-time structured-light range scanning of moving objects. In *Computer Vision, 2001. ICCV 2001. Proceedings. Eighth IEEE International Conference on*, volume 2, pages 359–366. IEEE.
- Hawkins, T., Cohen, J., and Debevec, P. (2001). A photometric approach to digitizing cultural artifacts. In *Proceedings of the 2001 conference on Virtual reality, archeology, and cultural heritage*, pages 333–342. ACM.
- Hertzmann, A. and Seitz, S. M. (2003). Shape and materials by example: A photometric stereo approach. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2003. Proceedings. 2003 IEEE Computer Society Conference on*, volume 1, pages I–I. IEEE.
- Hertzmann, A. and Seitz, S. M. (2005). Example-based photometric stereo: Shape reconstruction with general, varying brdfs. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 27(8):1254–1264.
- Horn, E. and Kiryati, N. (1999). Toward optimal structured light patterns. *Image and Vision Computing*, 17(2):87–97.
- Inokuchi, S. (1984). Range imaging system for 3-d object recognition. *ICPR, 1984*, pages 806–808.
- Laurentini, A. (1994). The visual hull concept for silhouette-based image understanding. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 16(2):150–162.
- Lavoie, P., Ionescu, D., and Petriu, E. (1999). A high precision 3d object reconstruction method using a color coded grid and nurbs. In *Image Analysis and Processing, 1999. Proceedings. International Conference on*, pages 370–375. IEEE.

- Lensch, H. P., Heidrich, W., and Seidel, H.-P. (2001). A silhouette-based algorithm for texture registration and stitching. *Graphical Models*, 63(4):245–262.
- Lowe, D. G. (1999). Object recognition from local scale-invariant features. In *Computer vision, 1999. The proceedings of the seventh IEEE international conference on*, volume 2, pages 1150–1157. Ieee.
- Marbs, A. (2002). Experiences with laser scanning at i3mainz. In *Proc. of the CIPA WG6 Int. Workshop on scanning for cultural heritage recording*. <http://www.isprs.org/commission5/workshop>.
- Martin, W. N. and Aggarwal, J. K. (1983). Volumetric descriptions of objects from multiple views. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2:150–158.
- Maruyama, M. and Abe, S. (1993). Range sensing by projecting multiple slits with random cuts. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 15(6):647–651.
- Matsumoto, Y., Terasaki, H., Sugimoto, K., and Arakawa, T. (1997). A portable three-dimensional digitizer. In *3-D Digital Imaging and Modeling, 1997. Proceedings., International Conference on Recent Advances in*, pages 197–204. IEEE.
- Miyasaka, T., Kuroda, K., Hirose, M., and Araki, K. (2000). High speed 3-d measurement system using incoherent light source for human performance analysis. *INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING*, 33(B5/2; PART 5):547–551.
- Morano, R. A., Ozturk, C., Conn, R., Dubin, S., Zietz, S., and Nissano, J. (1998). Structured light using pseudorandom codes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20(3):322–327.
- Nashman, M., Nashman, M., Hong, T.-H., and Herman, M. (1995). *An integrated vision touch-probe system for dimensional inspection tasks*. US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology.
- Noborio, H., Fukuda, S., and Arimoto, S. (1988). Construction of the octree approximating a three-dimensional object by using multiple views. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 10(6):769–782.
- Papaioannou, G. (2001). *Αυτόματη ανακατασκευή τρισδιάστατων αντικειμένων με μεθόδους γραφικών*. PhD thesis, Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών, Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.



- Patias, P. (1999). Φωτογραμμετρική Αποτύπωση Και Τεκμηρίωση Αρχιτεκτονικών Μνημείων Και Αρχαιολογικών Χωρών. Lecture notes. Σημειώσεις για το Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών με τίτλο ‘Συστήματα Πολιτισμικών Αγαθών & Διαχείρισης της Πολιτισμικής Κληρονομιάς’ του Πανεπιστημίου Κρήτης.
- Pavlidis, G., Koutsoudis, A., Tsioukas, V., and Arnaoutoglou, F. (2004). Digitech iii - Μελέτη Ψηφιοποίησης 3Δ Κινητών Αντικειμένων. Official website. <http://www.ipet.gr/digitech/>.
- Petriu, E. M., Bieseman, T., Trif, N., McMath, W. S., and Yeung, S. (1992). Visual object recognition using pseudo-random grid encoding. In *Intelligent Robots and Systems, 1992., Proceedings of the 1992 IEEE/RSJ International Conference on*, volume 3, pages 1617–1624. IEEE.
- Petriu, E. M., Sakr, Z., Spoelder, H. J. W., and Moica, A. (2000). Object recognition using pseudo-random color encoded structured light. In *Proceedings of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference [Cat. No. 00CH37066]*, volume 3, pages 1237–1241 vol.3.
- Posdamer, J. L. and Altschuler, M. (1982). Surface measurement by space-encoded projected beam systems. *Computer graphics and image processing*, 18(1):1–17.
- Potmesil, M. (1987). Generating octree models of 3d objects from their silhouettes in a sequence of images. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 40(1):1–29.
- Rioux, M. (1994). Digital 3d imaging: Theory and applications. In *Videometrics III*, volume 2350, pages 2–16. International Society for Optics and Photonics.
- Rocchini, C., Cignoni, P., Montani, C., Pingi, P., and Scopigno, R. (2001). A low cost 3d scanner based on structured light. In *Computer Graphics Forum*, volume 20, pages 299–308. Wiley Online Library.
- Sablatnig, R., Tosovic, S., and Kampel, M. (2003). Next view planning for shape from silhouette. *Computer Vision (CVWW'03), Czech Pattern Recognition Society*, pages 77–82.
- Salvi, J., Batlle, J., and Mouaddib, E. (1998). A robust-coded pattern projection for dynamic 3d scene measurement. *Pattern Recognition Letters*, 19(11):1055–1065.
- Salvi, J., Pages, J., and Batlle, J. (2004). Pattern codification strategies in structured light systems. *Pattern recognition*, 37(4):827–849.

- Sato, T. (1999). Multispectral pattern projection range finder. In *Three-Dimensional Image Capture and Applications II*, volume 3640, pages 28–38. International Society for Optics and Photonics.
- Scharstein, D. and Szeliski, R. (2002). A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. *International journal of computer vision*, 47(1-3):7–42.
- Schechner, Y. Y. and Kiryati, N. (2000). Depth from defocus vs. stereo: How different really are they? *International Journal of Computer Vision*, 39(2):141–162.
- Sobieszek, R. A. (1980). Sculpture as the sum of its profiles: Francois willeme and photosculpture in france, 1859–1868. *The Art Bulletin*, 62(4):617–630.
- Spoelder, H. J., Vos, F. M., Petriu, E. M., and Groen, F. C. (1998). Some aspects of pseudo random binary array based surface characterization. In *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1998. IMTC/98. Conference Proceedings. IEEE*, volume 1, pages 2–7. IEEE.
- Streilein, A. and van den Heuvel, F. A. (1999). Potential and limitation for the 3d documentation of cultural heritage from a single image. In *Proceedings XVII CIPA Symposium October*, volume 99.
- Tajima, J. and Iwakawa, M. (1990). 3-d data acquisition by rainbow range finder. In *Pattern Recognition, 1990. Proceedings., 10th International Conference on*, volume 1, pages 309–313. IEEE.
- Tosovic, S., Sablatnig, R., and Kampel, M. (2002). *On combining shape from silhouette and shape from structured light*. na.
- Trobina, M. (1995). Error model of a coded-light range sensor. *Technical report*.
- Tziavos, I. and Spatalas, S. (2004). Εφαρμογές ρυμοτομικών σχεδίων και τοπογραφικές μελέτες. Lecture notes. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Vlachos, D. (1998). Αρχές και Μέθοδοι Τοπογραφικής Αποτύπωσης. Lecture notes.
- Wust, C. and Capson, D. W. (1991). Surface profile measurement using color fringe projection. *Machine Vision and Applications*, 4(3):193–203.
- Zhang, L., Curless, B., and Seitz, S. M. (2002). Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming. In *3D Data Processing Visualization and Transmission, 2002. Proceedings. First International Symposium on*, pages 24–36. IEEE.

- Zhang, R., Tsai, P.-S., Cryer, J. E., and Shah, M. (1999). Shape-from-shading: a survey. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 21(8):690–706.
- Zhang, Z. (1998). Modeling geometric structure and illumination variation of a scene from real images. In *Computer Vision, 1998. Sixth International Conference on*, pages 1041–1046. IEEE.



—Η εκτεταμένη ποικιλομορφία και διαφοροποίηση των αντικειμένων καθιστά αδύνατη την εφαρμογή μιας και μόνο μεθόδου ψηφιοποίησης για κάθε περίπτωση. Ως εκ τούτου απαιτείται η επιλογή κατάλληλης μεθόδου για τη συγκεκριμένη κάθε φορά περίπτωση και η διαδικασία επιλογής πρέπει να λαμβάνει υπόψη μια σειρά από παραμέτρους και περιορισμούς.

# 3

## Επιλογή βέλτιστης μεθόδου ψηφιοποίησης

### 3.1 Σκεπτικό της επιλογής μεθόδου

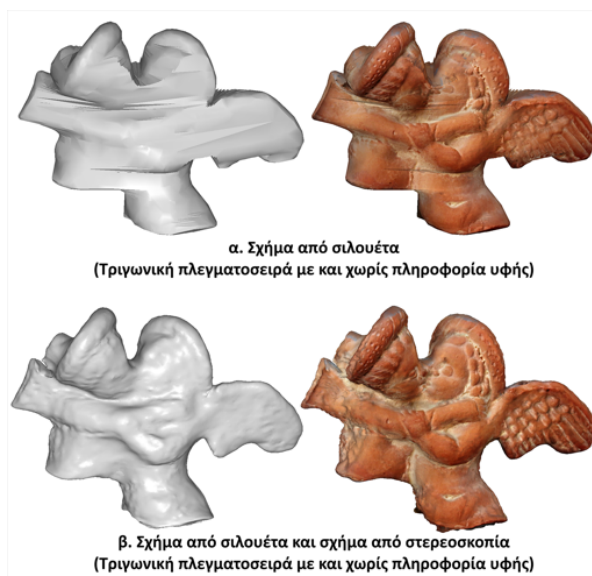
Η σύγκριση των διαφορετικών μεθόδων 3Δ ψηφιοποίησης μπορεί να επιτευχθεί ακόμα και από την υποκειμενική κατηγοριοποίηση της ποιότητας των 3Δ ψηφιακών αντιγράφων που παράγονται. Η μέθοδος ψηφιοποίησης με τριγωνισμό λέιζερ μικρών αποστάσεων αποφέρει, μέχρι σήμερα, τα ακριβέστερα γεωμετρικά αποτελέσματα. Από την άλλη, η μέθοδος Σχήμα από δομημένο φωτισμό αποδίδει καλύτερη 3Δ ανακατασκευή της γεωμετρίας μίας επιφάνειας από ό,τι η μέθοδος Σχήμα από σιλουέτα αλλά όχι καλύτερη από τα συστήματα τριγωνισμού λέιζερ. Τα αποτελέσματα της μεθόδου Σχήμα από δομημένο φωτισμό είναι ανώτερα από αυτά της μεθόδου Σχήμα από σιλουέτα, αφού η πρώτη καταφέρνει να ανακτήσει γεωμετρία και από κοίλες επιφάνειες. Γενικά, η μέθοδος Σχήμα από δομημένο φωτισμό αλλά και η Δομή από κίνηση είναι τεχνικές που συνδυάζουν κάποια από τα στοιχεία αυτοματισμού της μεθόδου Σχήμα από σιλουέτα με την επιπρόσθετη δυνατότητα υψηλής ακρίβειας και ανάλυσης γεωμετρικών αποτελεσμάτων. Επίσης, οι μέθοδοι αυτές είναι αποτελεσματικότερες από τα συστήματα τριγωνισμού λέιζερ όταν εφαρμόζονται σε ημιδιαφανή αντικείμενα και αντικείμενα με υψίσυχνες χρωματικές μεταβολές. Η Σχήμα από στερεοφωτογράφιση προσφέρει ένα γρήγορο τρόπο ανάκτησης βάθους από φωτογραφίες, κατά την οποία, όμως, η πυκνότητα των σημείων του τελικού 3Δ αντιγράφου δεν είναι συνήθως μεγάλη, με αποτέλεσμα να μην αποφέρει τα αποτελέσματα που μπορεί κανείς να παράγει με ένα σύστημα που βασίζεται στη μέθοδο Σχήμα από δομημένο φωτισμό ή στη Δομή από κίνηση.

Η μέθοδος Δομή από κίνηση καθώς και η μέθοδος Τριγωνισμού λείζερ αποτελούν κύρια εργαλεία για τις εφαρμογές τεκμηρίωσης των κινητών αντικειμένων του πολιτιστικού αποθέματος. Έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικές όταν υπάρχει περιορισμένος χρόνος πρόσβασης στο αντικείμενο (Vozikis et al., 2004). Η μεν μέθοδος Τριγωνισμού λείζερ είναι ενεργητική μέθοδος και βασίζεται σε ειδικό εξοπλισμό, η δε μέθοδος Δομή από κίνηση είναι παθητική και βασίζεται κυρίως σε ειδικευμένο λογισμικό και λιγότερο σε υλικοτεχνικό εξοπλισμό. Στην πρώτη περίπτωση, ο όγκος της πληροφορίας εξαρτάται από την ανάλυση που προσφέρει ο ειδικευμένος εξοπλισμός, ενώ στη δεύτερη, ο όγκος της γεωμετρικής πληροφορίας που εξάγεται από ακολουθίες φωτογραφιών σχετίζεται άμεσα με την επιλογή των βέλτιστων γωνιών και αποστάσεων θέασης, με βασικό πλεονέκτημα τη δυνατότητα απόκρυψης μιας χαμηλής ποιότητας γεωμετρικής πληροφορίας με υψηλής ποιότητας πληροφορία υψής. Βέβαια, το τελευταίο είναι ένα χαρακτηριστικό που παρουσιάζουν και άλλες μέθοδοι, όπως η Σχήμα από σιλουέτα.

Οι Park et al. (2002) σε μια μελέτη προσδιορισμού της φθοράς λίθινων αρχαίων μνημείων συγκρίνουν τη δυνατότητα εφαρμογής τριγωνισμού λείζερ και στερεοφωτογράφισης. Ενώ η στερεοφωτογράφιση είναι γρήγορη και εύκολη κατά τη διαδικασία συγκέντρωσης δεδομένων, η επεξεργασία για τον υπολογισμό του βάθους με υψηλή ακρίβεια είναι σύνθετη διαδικασία. Στην πραγματικότητα όμως, τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας των λίθων δεν αφήνουν και πολλά περιθώρια επιλογής. Η ψηφιοποίηση με Τριγωνισμό λείζερ απαιτεί πολύ περισσότερο χρόνο για τη συλλογή των δεδομένων, ενώ σε αντίθεση, η στερεοφωτογράφιση δε χρειάζεται μεγάλο χρόνο επεξεργασίας και αυτό την καθιστά πιο «φιλική» με την ακανόνιστη και τραχιά επιφάνεια των λίθων (Park et al., 2002).

Οι Böhler et al. (2004) αναφέρουν πως η στερεοφωτογράφιση δε λειτουργεί με αποδεκτά αποτελέσματα σε περιπτώσεις ανάγλυφων σε λευκό μάρμαρο, καθώς δεν επιτρέπουν την ανάκτηση μεγάλου όγκου πληροφορίας βάθους. Οι ορθογραφικές φωτογραφίες από στερεοφωτογράφιση μπορούν να φανούν χρήσιμες σε κάποιες εφαρμογές αλλά σίγουρα όχι για τη δημιουργία 3D ψηφιακών αντιγράφων. Επισημαίνουν επίσης το γεγονός ότι η ψηφιοποίηση με Τριγωνισμό λείζερ επιβάλλει μια χρονοβόρα διαδικασία συλλογής δεδομένων αλλά είναι ίσως και η μοναδική με τόσο ποιοτικά αποτελέσματα σε επίπεδο γεωμετρικής ακρίβειας.

Στη διεθνή βιβλιογραφία, απαντώνται διάφορες συνδυαστικές μέθοδοι με στόχο τη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων ανάλογα με την εφαρμογή. Ένας συνδυασμός, ο οποίος αποφέρει ιδιαίτερος ικανοποιητικά αποτελέσματα καλύπτοντας υψηλής ανάλυσης γεωμετρία και χρωματική πληροφορία (υψής) είναι η μέθοδος που προτείνουν οι Esteban and Schmitt (2002). Η μέθοδος συνδυάζει τον αυτοματισμό της μεθόδου Σχήμα από σιλουέτα και την ποιότητα 3D γεωμετρίας που προσφέρει η Σχήμα από στερεοφωτογράφιση. Η μέθοδος ξεχωρίζει από τις υπόλοιπες, καθώς προσφέρει αποτελέσματα με σχεδόν αυτοματοποιη-



**Εικόνα 3.1.** Συνδυασμός των μεθόδων Σχήμα από σιλουέτα και Σχήμα από στερεοφωτογράφιση.

μένο τρόπο, χωρίς την ανάγκη επεξεργασίας του 3Δ αντιγράφου. Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων πρακτικά αναιρεί τους περιορισμούς της μεθόδου Σχήμα από σιλουέτα στη μοντελοποίηση κοίλων επιφανειών. Ίσως είναι η μοναδική μέθοδος μετά τη μέθοδο Δομή από κίνηση (SFM-MVS) που ξεχωρίζει για την ποιότητα των αποτελεσμάτων της παρέχοντας ταυτόχρονα αυτοματοποιημένη διαδικασία αποτύπωσης. Στην Εικόνα 3.1 παρουσιάζεται παράδειγμα της συνδυαστικής χρήσης των μεθόδων για τη βελτίωση των αποτελεσμάτων αποτύπωσης. Το 3D-SOM είναι ένα εμπορικό λογισμικό που προσφέρει υλοποίηση της συγκεκριμένης συνδυαστικής μεθόδου.

Γενικότερα, όλες οι υπάρχουσες μέθοδοι 3Δ αποτύπωσης υπόκεινται σε διάφορους περιορισμούς. Ακόμα και με τη χρήση των πλέον σύγχρονων υπολογιστικών συστημάτων και λογισμικού, συγκεκριμένα βήματα επεξεργασίας είναι δυνατό να γίνουν μόνο όταν ο όγκος πληροφορίας δε ξεπερνά κάποια συγκεκριμένα όρια. Καθώς ακόμα και σήμερα οι αλγόριθμοι διαρκώς αναπτύσσονται και νέοι αλγόριθμοι εμφανίζονται, αν η ανάπτυξη του εξοπλισμού και του λογισμικού συνεχίσει στους ρυθμούς των προηγούμενων χρόνων, τότε αρκετά προβλήματα θα έχουν ξεπεραστεί μέσα στα επόμενα χρόνια. Σήμερα, ο συνδυασμός της ψηφιοποίησης λείζερ με φωτογραμμετρικά δεδομένα υφής ή η μέθοδος Δομή από κίνηση επιτρέπουν την αποτύπωση μεγάλων και πολύπλοκων αντικειμένων που οι διαστάσεις τους ξεπερνούν κατά πολύ τα πέντε μέτρα με αποτέλεσμα να μπορούν να εφαρμοσθούν σε πλήθος έργων ψηφιοποίησης που προέρχονται από το χώρο τεκμηρίωσης του πολιτιστικού αποθέματος (Böhler et al., 2004).

### 3.1.1 Η ταχύτητα ψηφιοποίησης

Η διαδικασία σάρωσης ή συλλογής δεδομένων μπορεί να είναι πολύ χρονοβόρα, ιδιαίτερα όταν απαιτείται η δημιουργία υψηλής πυκνότητας νεφών σημείων (υψηλή ανάλυση). Για παράδειγμα, ένας ρυθμός περί τα 20.000 - 30.000 σημεία ανά δευτερόλεπτο σε συστήματα τριγωνισμού λείζερ θεωρείται γενικά επαρκής. Βέβαια, αξίζει να σημειωθεί ότι ο ρυθμός συλλογής δεδομένων δε συμβάλει τόσο σημαντικά όσο θα αναμένονταν στη μείωση του συνολικού χρόνου που απαιτεί ένα έργο 3Δ ψηφιοποίησης. Κάτι τέτοιο είναι ιδιαίτερα εμφανές αφού στο συνολικό χρόνο αποπεράτωσης συνυπολογίζονται επίσης οι χρόνοι των υπόλοιπων εργασιών, όπως η αλλαγή γωνίας θέασης του συστήματος, η επανάληψη της διαδικασίας βαθμονόμησης, η ενοποίηση τμηματικών σαρώσεων, η επεξεργασία των δεδομένων, κοκ. Ως εκ τούτου, η αύξηση στους ρυθμούς συλλογής δεδομένων δεν προσφέρει σημαντική μείωση του συνολικού χρόνου της όλης διαδικασίας 3Δ ψηφιοποίησης.

### 3.1.2 Οι τεχνικές βαθμονόμησης

Ο αντικειμενικός προσδιορισμός των επιδόσεων ενός συστήματος 3Δ ψηφιοποίησης απαιτεί τη βαθμονόμησή του. Ιδανικά, η βαθμονόμηση πρέπει να βασίζεται σε τυποποιημένες διαδικασίες, οι οποίες, δυστυχώς, δεν υπάρχουν ακόμη για όλα τα συστήματα (Marshall and Gilby, 2001). Το πρότυπο ISO 10360-2:1994 περιγράφει τις μεθόδους για την εκτίμηση των επιδόσεων ενός συστήματος μέτρησης συντεταγμένων. Τα περισσότερα από αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν κάποια αισθητήρια επαφής σε συνδυασμό με τη γνώση της θέσης σε ένα αυθαίρετο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Η βαθμονόμηση τους βασίζεται στην απομόνωση και αποτύπωση συγκεκριμένων σημείων που βρίσκονται σε γνωστές θέσεις. Στα συστήματα 3Δ ψηφιοποίησης από απόσταση, όπως και στις φωτογραμμετρικές μεθόδους, δεν υπάρχει κάποια μέθοδος απομόνωσης τέτοιων χαρακτηριστικών σημείων και συνεπώς, η ανεξάρτητη βαθμονόμηση είναι μια διαδικασία που δε μπορεί να υλοποιηθεί. Ως εκ τούτου είναι αδύνατη η εφαρμογή του συγκεκριμένου προτύπου ISO για τέτοιου τύπου συστήματα.

Η γεωμετρική πολυπλοκότητα και η μη-γραμμική φύση των οπτικών αισθητηρίων που χρησιμοποιούνται στα συστήματα 3Δ ψηφιοποίησης αλλά και στις ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές επιβάλλει κάποιας μορφής βαθμονόμηση πριν από οποιαδήποτε μετρητική διαδικασία. Κάποιες από τις κλασικές μεθόδους βαθμονόμησης σχετίζονται με χαρτογραφήσεις ή μετασχηματισμούς προοπτικής πάνω σε συγκεκριμένα δεδομένα που έχουν αποτυπώσει τα ίδια τα οπτικά αισθητήρια. Τα δεδομένα βαθμονόμησης αποτελούνται συνήθως από πλήθος παραμέτρων (για παράδειγμα ένας 2Δ μαθηματικός πίνακας με τη μορφή εικόνας) που η συμμετοχή τους στον υπολογισμό συγκεκριμένων μετασχηματισμών παίζει καταλυτικό ρόλο στην αφαίρεση σφαλμάτων που εισάγει η γε-



ωμετρία του εκάστοτε φακού. Τα σφάλματα αυτά απεικονίζονται κυρίως ως παραμορφώσεις της γεωμετρίας αλλά και του χρώματος (colour aberrations). Τόσο η πολυπλοκότητα όσο και η ποικιλία των αλγορίθμων βαθμονόμησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μεγάλο εύρος διαφορετικών αισθητήριων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα σύστημα 3Δ ψηφιοποίησης. Δύο βασικοί τύποι βαθμονόμησης είναι οι εξής:

- Μέθοδος αντικειμένου αναφοράς (reference artefact)
- Μέθοδος γεωμετρίας συστήματος (system geometry)

Η βαθμονόμηση ενός συστήματος αποτελεί τη βάση για την αντικειμενική προσέγγιση υπολογισμού των επιδόσεων του. Οι επιδόσεις αυτές σχετίζονται τόσο με τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα αποτύπωσης όσο και με τα χαρακτηριστικά των αντικειμένων που ψηφιοποιούνται. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να προσδιορίζονται με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια οι παράγοντες που επηρεάζουν τις μετρήσεις (ανακλάσεις, απορρόφηση και διάθλαση του φωτός, γεωμετρική πολυπλοκότητα της επιφάνειας, κ.α.). Επιπρόσθετα, το λογισμικό που συνοδεύει το σύστημα 3Δ ψηφιοποίησης παίζει σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια των δεδομένων που συλλέγονται. Ο υπολογισμός της πραγματικής ακρίβειας μέτρησης ενός συστήματος 3Δ ψηφιοποίησης πρέπει να υποστηρίζεται από τα χαρακτηριστικά του λογισμικού που αναλαμβάνει να ανακτήσει την πληροφορία βάθους.

### 3.1.3 Η επαλήθευση της ακρίβειας των μετρήσεων

Είναι γεγονός ότι δεν υπάρχει κάποιο πρότυπο ή διεθνώς αναγνωρισμένη μέθοδος για την εκτίμηση της ακρίβειας των συστημάτων 3Δ ψηφιοποίησης (Beraldin et al., 2001). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο χρήστης να αναγκάζεται να αναπτύξει δικές του μεθόδους επαλήθευσης της ακρίβειας των μετρήσεων. Οι Beraldin et al. (2001) παρουσίασαν μια μέθοδο αντικειμενικής μέτρησης της ακρίβειας των συστημάτων με τη χρήση φωτογραμμετρίας και γεωδαιτικών σταθμών. Ως περιπτώσιολογική μελέτη της συγκεκριμένης εργασίας επιλέχθηκε το άγαλμα της Μαγδαληνής του Ντονατέλλο. Ο Πίνακας 3.1 περιλαμβάνει το βαθμό αβεβαιότητας στο 3Δ ψηφιακό αντίγραφο που προέκυψε με τη χρήση του συστήματος σάρωσης της εταιρείας Optonet. Τα αποτελέσματα της επαλήθευσης ήταν παρόμοια με αυτά που υπολογίσθηκαν κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης.

### 3.1.4 Η απόσταση και οι συνθήκες

Οι προδιαγραφές για το βεληνεκές των συστημάτων 3Δ ψηφιοποίησης πρέπει πάντα να τίθενται υπό εξέταση. Οι δυνατές αποστάσεις κάλυψης σχετίζονται πάντα με την ανακλαστικότητα της επιφάνειας του ίδιου του αντικειμένου αλλά

**Πίνακας 3.1.** Βαθμός αβεβαιότητας μετρήσεων στο 3Δ ψηφιακό αντίγραφο της Μαγδαληνής του Ντονατέλλο.

	Άξονας-X $\sigma_x$ ( $\mu\text{m}$ )	Άξονας-Y $\sigma_y$ ( $\mu\text{m}$ )	Άξονας-Z $\sigma_z$ ( $\mu\text{m}$ )	Επιφάνεια σάρωσης ( $\text{mm}^2$ )	Βάθος (mm)
Αρχική πρόχειρη σάρωση	35	20	125	$310 \times 230$	140
Συμπλήρωση ασυνεχειών	18	11	75	$225 \times 165$	100
Σάρωση υψηλής ανάλυσης	10	6	21	$80 \times 58$	50

και από άλλους φυσικούς ή τεχνητούς παράγοντες, όπως η διαύγεια της ατμόσφαιρας, ο περιβάλλον φωτισμός και οποιαδήποτε άλλη επιπρόσθετη φυσική (πχ. ηλιακό φως) ή τεχνητή ακτινοβολία (πχ. αναπόφευκτη ακτινοβολία από άλλες πηγές φωτός).

### 3.1.5 Το οπτικό πεδίο

Τα σταθερά συστήματα 3Δ ψηφιοποίησης που δε διαθέτουν μηχανοκίνητους άξονες περιστροφής προσφέρουν ένα περιορισμένο οπτικό πεδίο. Τυπικά, μπορούν να σαρώσουν μια περιοχή εύρους  $40^\circ \times 40^\circ$  που αντιστοιχεί σχεδόν σε  $0,5$  ακτίνια στερεάς γωνίας (μια πλήρης σφαίρα έχει περίπου  $12,6$  ακτίνια στερεάς γωνίας). Από την άλλη, συστήματα αναρτημένα σε κάποιον άξονα κίνησης μπορούν να σαρώσουν περίπου  $4,5$  ακτίνια στερεάς γωνίας, ενώ συστήματα με δύο άξονες (πανοραμικής άποψης) μπορούν να σαρώσουν τα πάντα εκτός από μια συγκεκριμένη κωνική περιοχή κοντά στις  $300^\circ$  γύρω από το ναδίρ. Με αυτό τον τρόπο επιτρέπουν τη σάρωση σε ένα οπτικό πεδίο που πλησιάζει τα  $11,7$  ακτίνια στερεάς γωνίας. Τα μεγάλα οπτικά πεδία παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο σε περιπτώσεις ψηφιοποίησης κλειστών χώρων (π.χ. ένα δωμάτιο).

Τα συστήματα ψηφιοποίησης τριγωνισμού εισάγουν ένα μεγαλύτερο πλήθος προκλήσεων, που σχετίζονται με την αδυναμία της πλήρους οπτικής επαφής με το σύνολο της απαιτούμενης πληροφορίας για την ορθή ανάκτηση του βάθους. Σε κάποιες περιπτώσεις τίθεται εύλογα το ερώτημα κατά πόσο είναι εύκολη ή ακόμα και εφικτή η απόκτηση πληροφορίας βάθους, όταν αυτή είναι διαθέσιμη από μία και μόνο συγκεκριμένη οπτική γωνία θέασης. Να σημειωθεί πως ερευνητές από το πανεπιστήμιο του Οχάιο σε συνεργασία με την εταιρεία Cyberware ανέπτυξαν λογισμικό, το οποίο χρησιμοποιείται για τη σχεδίαση του οπτικού μονοπατιού που πρέπει να ακολουθήσει ένα σύστημα 3Δ ψηφιοποίησης για να καλύψει πλήρως το αντικείμενο και να οδηγήσει σε ένα ολοκληρωμένο 3Δ ψηφιακό αντίγραφο.

### 3.1.6 Οι ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές

Ειδικότερα για συστήματα λείζερ, χρήστες αλλά και συγκεκριμένες εφαρμογές απαιτούν την ύπαρξη υψηλής ποιότητας φωτογραφικών ψηφιακών συστημάτων μέσα στο ίδιο το σύστημα ψηφιοποίησης. Η συγκεκριμένη προσέγγιση αυξάνει σημαντικά το συνολικό κόστος της υλικοτεχνικής υποδομής. Καθώς το αγοραστικό κοινό των 3Δ συστημάτων ψηφιοποίησης είναι σχετικά περιορισμένο, οι κατασκευαστές εμπορικών συστημάτων προτείνουν την τοποθέτηση εξωτερικής φωτογραφικής μηχανής πάνω στο σύστημα όταν αυτό αποτελεί προαπαιτούμενο για τον αγοραστή. Η τοποθέτηση γίνεται υποχρεωτικά με τη χρήση βαθμονομημένου μετατροπέα που αποτελεί και τη βάση στήριξης της φωτογραφικής μηχανής.

### 3.1.7 Η μεταφορά του συστήματος ψηφιοποίησης

Ένα εύκολο στη μεταφορά σύστημα ψηφιοποίησης θα πρέπει να είναι μικρό σε διαστάσεις και ταυτόχρονα με χαμηλό βάρος, αλλά και μικρές ή εύκολα καλυπτόμενες ενεργειακές ανάγκες. Πολλές από τις εμπορικές προτάσεις που εστιάζουν στην 3Δ αποτύπωση περίπλοκων και ευαίσθητων αντικείμενων είναι συνήθως σχετικά ογκώδεις και δεν μπορούν εύκολα να μεταφερθούν. Οι μακρινές αποστάσεις και η ανάγκη για μεταφορά του εξοπλισμού είναι κάτι συνηθισμένο σε έργα ψηφιοποίησης. Έτσι, ανάμεσα στα σημαντικά χαρακτηριστικά ενός συστήματος 3Δ ψηφιοποίησης που πρόκειται να μεταφέρεται συχνά μπορεί κανείς να συμπεριλάβει και την αντοχή του εξοπλισμού σε μεταφορές. Επίσης θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη ο τρόπος που προτείνει ο κατασκευαστής για τη μεταφορά του συστήματος, καθώς και η ενδεχόμενη ανάγκη για επανα-βαθμονόμηση του συστήματος σε κάθε μεταφορά του. Να σημειωθεί ότι ο χρόνος μεταφοράς των συστημάτων θα πρέπει να νοείται στο χρονοδιάγραμμα εργασιών ψηφιοποίησης ως χρόνος που το σύστημα δεν είναι διαθέσιμο (Böhler et al., 2004).

### 3.1.8 Η τροφοδοσία ισχύος του συστήματος

Τα συστήματα 3Δ ψηφιοποίησης που δύνανται να λειτουργούν με μπαταρίες είναι σαφώς πιο ευπροσάρμοστα σε σύγκριση με αυτά που απαιτούν πρόσβαση σε μια μόνιμη γραμμή παροχής ηλεκτρικού ρεύματος. Ένα σημαντικό πρόβλημα που μπορεί να προκύψει είναι οι πιθανώς απαιτούμενες καλωδιώσεις και η εγκατάστασή τους σε χώρους που αυτό ίσως αποτελεί πρόβλημα, όπως, για παράδειγμα, σε ένα μουσείο. Οι φορητές γεννήτριες μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο σε αυτές τις περιπτώσεις αλλά ο θόρυβος που προκύπτει κατά τη λειτουργία τους αποτελεί άλλη μια πρόκληση για τη χρήση τους στους συγκεκριμένους χώρους. Γενικά, οι φορητές γεννήτριες χαρακτηρίζονται ως επιπρόσθετος εξοπλισμός και συμβάλουν αναπόφευκτα στην αύξηση του κόστους λειτουργίας ενός συστήματος σε χώρους εκτός εργαστηρίου.

## 3.2 Κριτήρια επιλογής της βέλτιστης μεθόδου

Υπενθυμίζεται ότι ως κινητά αντικείμενα ορίζονται όλα τα αντικείμενα που οι διαστάσεις τους ποικίλουν μεταξύ μερικών εκατοστών έως και μερικών μέτρων και είναι αντικείμενα που μπορούν να μετακινηθούν για να ψηφιοποιηθούν σε ένα ειδικό εργαστήριο. Κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα αντικειμένων που εντάσσονται σε αυτή τη γενικευμένη κατηγορία είναι τα εξής:

- Νομίσματα
- Εργαλεία και άλλα ξύλινα αντικείμενα
- Κεραμικά σκεύη καθημερινής χρήσης
- Αγγεία
- Κοσμήματα
- Γλυπτά
- Ειδώλια
- Ενδυμασίες
- Έπιπλα
- Διακοσμήσεις σε τοιχία
- Επιγραφές
- Επιτύμβιες στήλες
- Προτομές
- Όπλα
- Μουσικά όργανα
- Αντικείμενα εκκλησιαστικής τέχνης
- Πίνακες ζωγραφικής

Είναι ευρέως αποδεκτό πως καμία από τις υπάρχουσες μεθόδους 3Δ ψηφιοποίησης δεν μπορεί να καλύψει όλες τις παραπάνω περιπτώσεις. Αυτό οφείλεται κυρίως στην ποικιλομορφία που παρουσιάζουν τα αντικείμενα αυτών των κατηγοριών. Το πλήθος των διαφορετικών μεθόδων αποτύπωσης σε εμπορικά και ερευνητικά ή πειραματικά συστήματα είναι αποτέλεσμα συνεχούς έρευνας για την ανακάλυψη εκείνης της γενικευμένης μεθόδου που θα επιτρέπει, με ελάχιστες τροποποιήσεις, την αντιμετώπιση όλων των ιδιαιτεροτήτων που παρουσιάζουν τα αντικείμενα. Σήμερα είναι αδύνατη η ανάδειξη μιας συγκεκριμένης μεθόδου ως βέλτιστη. Σε πολλές περιπτώσεις οι ρόλοι τους είναι συμπληρωματικοί, όπως για παράδειγμα στη συνεργατική εφαρμογή των μεθόδων SFM-MVS και TOF. Στη συνέχεια γίνεται μια σύγκριση επιλεγμένων μεθόδων 3Δ ψηφιοποίησης υπό το πρίσμα των απαιτήσεων ειδικών εφαρμογών. Οι μέθοδοι αυτές επιλέχθηκαν λόγω της ευρείας δημοφιλίας τους και είναι οι εξής:

- Τριγωνισμός λέιζερ μικρών αποστάσεων
- Σχήμα από δομημένο φωτισμό
- Σχήμα από σιλουέτα
- Δομή από κίνηση (SFM-MVS)

- Μέτρηση συντεταγμένων με επαφή

Πολλές φορές οι μέθοδοι αυτές εφαρμόζονται και σε μεγάλα (ακίνητα) αντικείμενα (πχ. αγάλματα, αγγεία, επιγραφές, κοκ.), των οποίων το μέγεθος μπορεί να ξεπερνά ακόμα και τα 5 μέτρα. Αυτό οφείλεται στην ανάγκη ψηφιοποίησης των εν λόγω αντικειμένων με υψηλή ακρίβεια και ανάλυση, την οποία μπορούν να αποδώσουν οι συγκεκριμένες μέθοδοι. Ο διαχωρισμός που γίνεται ανάμεσα σε κινητά και ακίνητα αντικείμενα δε θα πρέπει να οδηγεί τον αναγνώστη σε συμπεράσματα που καθιστούν τις δύο κατηγορίες απολύτως αποσυνδεδεμένες. Έχουν παρουσιαστεί μελέτες ψηφιοποίησης όπου ο συνδυασμός μεθόδων και από τις δύο κατηγορίες οδήγησε σε ανώτερη ποιότητας αποτελέσματα. Αντίστοιχα, δημοσιεύσεις στη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία προβάλλουν ιδιαίτερα ποιοτικά αποτελέσματα. Οι υβριδικές διαδικασίες ψηφιοποίησης για την αποπεράτωση σύνθετων έργων σχετίζονται άμεσα με το περιεχόμενο και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του φυσικού αντικείμενου. Η ανάγκη αποτύπωσης κάποιων τμημάτων με υψηλή ακρίβεια αλλά και το αντίστροφο είναι μια απόφαση που θα πρέπει να λαμβάνεται από τους υπευθύνους των αντίστοιχων έργων, αφού όμως πρώτα ληφθούν υπόψη και όλοι οι αλληλένδετοι παράγοντες όπως: (α) ο αρχικός σκοπός έργου, (β) τα χρονικά πλαίσια αποπεράτωσης και (γ) ο απαιτούμενος χρόνος επεξεργασίας δεδομένων. Πρακτικά είναι αδύνατο να προταθούν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί, ενώ κάτι τέτοιο είναι εκτός των ορίων του παρόντος συγγράμματος.

Τα έργα ψηφιοποίησης που αποσκοπούν σε υψηλή γεωμετρική ακρίβεια είναι γνωστά και ως έργα *αρχαιοθέτησης*, αφού απώτερο σκοπό έχουν τη δημιουργία 3D ψηφιακών αντιγράφων υψηλής γεωμετρικής και χρωματικής ακρίβειας, με στόχο την αρχαιοθέτηση και μελλοντική διαφύλαξή τους. Μετά από την υλοποίηση ενός έργου αρχαιοθέτησης, ακόμα και αν καταστραφεί το αυθεντικό αντικείμενο, θα υπάρχει, τουλάχιστον αποθηκευμένο ψηφιακά, ένα υψηλής ακρίβειας 3D ψηφιακό αντίγραφό του. Σε πολλές από τις περιπτώσεις αυτές η μέθοδος Τριγωνισμού με ακτίνες λέιζερ μικρών αποστάσεων, ή μια ειδικά σχεδιασμένη Σχήμα από δομημένο φωτισμό, ή ακόμη μια προσεκτικά εφαρμοσμένη Δομή από κίνηση θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως οι πλέον ενδεδειγμένες μέθοδοι.

Στο αντίποδα των έργων αρχαιοθέτησης έρχονται οι εφαρμογές 3D *αναπαράστασης*, στις οποίες επιτρέπεται να υπάρχουν μικρές (ίσως μη ορατές) ελλείψεις. Είναι βέβαιο πως ψηφιοποιημένα αντικείμενα που προκύπτουν από μεθόδους όπως η Σχήμα από δομημένο φωτισμό, Δομή από κίνηση και Σχήμα από σιλουέτα, μπορούν πέρα από τις εφαρμογές 3D αναπαράστασης να είναι χρήσιμα για μελέτη αφού οι ερευνητές μπορούν να αντλήσουν πληροφορίες από κάποια πολύ βασικά χαρακτηριστικά που φέρουν τα αντικείμενα. Σε αυτές τις περιπτώσεις όπου η υψηλή γεωμετρική ακρίβεια δεν είναι το πρωτεύον κριτήριο τότε το βάρος της επιλογής πέφτει σε άλλα κριτήρια, όπως για παράδειγμα, η φωτορεαλιστική απεικόνιση σε χαμηλής υπολογιστικής ισχύος συστήματα.

Αξίζει δε να σημειωθεί ότι με την πρόοδο της τεχνολογίας, οι νέες ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές αποδίδουν πολύ υψηλές αναλύσεις (φτάνουν και ξεπερνούν την τάξη των 100 MPixel) και επιτρέπουν τη συλλογή δεδομένων που μπορούν φτάσουν ή και να ξεπεράσουν σε ειδικές περιπτώσεις ακόμα και την ανάλυση που αποδίδει ένας σαρωτής τριγωνισμού λείζερ όταν χρησιμοποιηθούν σε μεθόδους όπως είναι η Δομή από κίνηση.

Όταν εφαρμόζονται μέθοδοι ψηφιοποίησης τριγωνισμού λείζερ ή δομημένου φωτισμού είναι σχεδόν βέβαιο ότι θα χρειαστούν πολλαπλές σαρώσεις για την πλήρη κάλυψη ενός αντικείμενου. Η μέθοδος Σχήμα από σιλουέτα και η Δομή από κίνηση δημιουργούν απευθείας 3Δ μοντέλα πολυγωνικών πλεγματοσειρών χωρίς γεωμετρικές ασυνέχειες. Σε αυτές τις περιπτώσεις, συνήθως το παραγόμενο 3Δ ψηφιακό αντίγραφο φέρει αυτόματα και την πληροφορία υψής. Ίσως είναι οι μοναδικές μέθοδοι, στις οποίες, κάποιες φορές, η μόνη απαιτούμενη επεξεργασία των 3Δ μοντέλων περιορίζεται σε διαδικασίες απλοποίησης (αποδεκατισμού) των πολυγωνικών πλεγματοσειρών. Οι ιδιότητες των μεθόδων αυτών δικαίως τις κατατάσσουν στην κατηγορία των πλέον αυτοματοποιημένων.

Όπως έχει αναφερθεί, τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας των αντικείμενων αποτελούν προκλήσεις για την εφαρμογή ορισμένων μεθόδων 3Δ ψηφιοποίησης. Προτείνονται, βέβαια, διάφορες λύσεις, ώστε να ξεπεραστούν μερικώς αυτές οι ασυμβατότητες. Δυστυχώς όμως, οι λύσεις αυτές δεν είναι πάντα εφαρμόσιμες. Το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα έντονο όταν πρόκειται για εφαρμογές στον πολιτισμό και την τέχνη, όπου η ορθή διαχείριση του πρωτότυπου είναι ύψιστης σημασίας. Κάποιοι κατασκευαστές συστημάτων 3Δ ψηφιοποίησης προτείνουν την κάλυψη των αντικειμένων με συγκεκριμένου τύπου σκόνη που θα αυξήσει τη συμβατότητα της επιφάνειας με τη μέθοδό τους, κάτι που όμως μπορεί να προκαλέσει μόνιμη φθορά στο πρωτότυπο λόγω της αδυναμίας αφαίρεσης της σκόνης από ρωγμές στην επιφάνεια.

Το θέμα της φθοράς των αντικειμένων του πολιτισμού και της τέχνης στενεύει ακόμα περισσότερο τα περιθώρια εφαρμογής των συστημάτων μέτρησης συντεταγμένων μέσω επαφής, καθώς η επαφή με το αντικείμενο είναι σχεδόν πάντα απαγορευτική. Φυσικά το θέμα της φθοράς των αντικειμένων κατά τη διάρκεια της 3Δ αποτύπωσης δεν αφήνει εντελώς ανέγγιχτες και τις τεχνικές που βασίζονται στην προβολή κάποιας μορφής φωτός, αλλά εκεί οι συνέπειες είναι αποδεδειγμένα λιγότερο επιβλαβείς και ενδεχομένως μπορούν με κατάλληλες συνθήκες να ελαττωθούν ή εν μέρει να εξαλειφθούν.

Είναι λοιπόν εμφανές ότι κλειδί στον προσδιορισμό της βέλτιστης λύσης αποτελεί το συνταίριασμα της μεθόδου από θεωρητική σκοπιά με τις επιδόσεις της υλικοτεχνικής της ολοκλήρωσης και τη συμβατότητά της με το αντικείμενο και τους κανόνες προσέγγισής του, στο πλαίσιο ενός συγκεκριμένου ζητούμενου αποτελέσματος. Με άλλα λόγια, για την επιλογή μιας μεθόδου ψηφιοποίησης, θα πρέπει να γίνει μια σύγκριση των χαρακτηριστικών των διαθέσιμων εμπορικών συστημάτων της κάθε μεθόδου και να αναγνωριστεί το σύστημα με

τη μεγαλύτερη συσχέτιση με το συγκεκριμένο, κάθε φορά, έργο ψηφιοποίησης. Θα μπορούσε να λεχθεί ότι

*βέλτιστη μέθοδος 3Δ ψηφιοποίησης είναι η μέθοδος εκείνη που μπορεί να αποδώσει το βέλτιστο ζητούμενο αποτέλεσμα για το δεδομένο μετρούμενο αντικείμενο χωρίς να αποτελεί απειλή για την ακεραιότητά του.*

### 3.3 Κριτήρια επιλογής συστήματος 3Δ ψηφιοποίησης

Η πληθώρα των σημερινών συστημάτων 3Δ ψηφιοποίησης δυσχεραίνει την επιλογή του βέλτιστου συστήματος για συγκεκριμένο έργο ψηφιοποίησης. Όπως η επιλογή οποιουδήποτε συστήματος βασίζεται σε έρευνα αγοράς και εντοπισμό των διαθέσιμων επιλογών έτσι συμβαίνει και στην περίπτωση των συστημάτων 3Δ ψηφιοποίησης. Στις παραγράφους που ακολουθούν γίνεται μια προσπάθεια προσδιορισμού των τεχνικών χαρακτηριστικών που σε συνδυασμό με τους παραπάνω βασικούς κανόνες επιλογής μεθόδου αποτελούν μια ολοκληρωμένη προσέγγιση επιλογής.

**Το θέμα του αυτοματισμού** Πολλά συστήματα υλοποιούν επικοινωνία με ένα περιστρεφόμενο τραπέζι και επιτρέπουν την αυτόματη ενοποίηση τμηματικών σαρώσεων, αφού γνωρίζουν τη γωνία θέασης από όπου προκύπτει η κάθε τμηματική σάρωση. Στην περίπτωση αυτή, η μετέπειτα επεξεργασία απελευθερώνεται από διαδικασίες ευθυγράμμισης και ενοποίησης τμηματικών σαρώσεων. Με αυτά τα συστήματα εύκολα μπορεί να χαρακτηρίσει κανείς τη διαδικασία συλλογής δεδομένων ως μια τυποποιημένη ρουτίνα με μοναδικό σημείο διαφοροποίησης κάθε φορά τη μέθοδο ασφαλούς τοποθέτησης του εκάστοτε αντικειμένου επάνω στο περιστρεφόμενο τραπέζι. Τέτοια συστήματα επιτρέπουν ρυθμούς ψηφιοποίησης που αγγίζουν πολλές φορές και τα πέντε αντικείμενα σε μια εργάσιμη μέρα. Τα συστήματα, όμως, αυτά έχουν συνήθως περιορισμούς ως προς τις διαστάσεις των αντικειμένων που μπορούν να ψηφιοποιηθούν. Πιο γενικευμένες τεχνικές λύσεις, που δεν υποστηρίζουν τη διαχείριση περιστρεφόμενων τραπεζιών δίνουν την ελευθερία στο χειριστή να αποφασίσει αυτός ποια μέθοδο θα ακολουθήσει για να συλλέξει το σύνολο των τμηματικών σαρώσεων που απαιτούνται για την ανακατασκευή του 3Δ ψηφιακού αντιγράφου. Έτσι, η διαδικασία σάρωσης χάνει το χαρακτηρισμό της αυτοματοποιημένης αλλά διευρύνεται σημαντικά το πεδίο εφαρμογής του εν λόγω συστήματος.

**Η ευκολία χειρισμού** Η ευκολία χειρισμού οποιασδήποτε συσκευής παίζει σημαντικό ρόλο στην εμπορική επιτυχία της. Πολλές φορές η επιλογή ενός συστήματος ψηφιοποίησης γίνεται βάσει της φιλικότητας τους συστήματος προς

το χρήστη. Κάποιος μπορεί να διακρίνει εύκολα τις διαφορές στον τρόπο λειτουργίας ανάμεσα σε παλαιότερα και νεότερα συστήματα. Το γεγονός ότι μπορούν να διακριθούν διαφορές σε μια τόσο νέα αγορά είναι μια σημαντική ένδειξη για τη διαρκή βελτίωση των συστημάτων αυτών στο άμεσο μέλλον. Το επίπεδο δυσκολίας της διαδικασίας ψηφιοποίησης μεταβάλλεται ανάλογα με το αντικείμενο που αποτυπώνεται. Το σύστημα ψηφιοποίησης είναι ο βασικός καταλύτης που καθορίζει τη διάρκεια της ψηφιοποίησης αλλά και την απαιτούμενη ανθρώπινη προσπάθεια. Είναι σημαντικό, ο χειριστής του συστήματος ψηφιοποίησης να μπορεί να το χρησιμοποιήσει εύκολα και απρόσκοπτα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η σύγκριση ανάμεσα σε συστήματα τριγωνισμού λέιζερ που βασίζονται σε χειροκίνητους βραχίονες και σε άλλα που ανιχνεύουν τη θέση τους στο χώρο κάνοντας χρήση ραδιοκυμάτων. Ενώ τα πρώτα απαιτούν ακόμα και μυϊκές ικανότητες για το χειρισμό τους, τα πιο σύγχρονα, με διαστάσεις λίγο μεγαλύτερες από το μέγεθος μιας ανθρώπινης παλάμης επιτρέπουν τη συλλογή δεδομένων με τρόπο παρόμοιο με αυτό της χρήσης ενός πινέλου.

**Το πλήθος των τμηματικών σαρώσεων** Το πλήθος των τμηματικών σαρώσεων ορίζεται από το οπτικό πεδίο ή τον ωφέλιμο όγκο ανίχνευσης ενός συστήματος ψηφιοποίησης. Όσο μεγαλύτερο είναι το οπτικό πεδίο του συστήματος τόσο λιγότερες τμηματικές σαρώσεις απαιτούνται. Το εύρος του βάθους πεδίου σε συνδυασμό με το εύρος του οπτικού πεδίου επιτρέπουν την αποδοτικότερη αποτύπωση ακόμη και δύσκολων σημείων, τα οποία απαιτούν τη μεταβολή εστίασης της ακτίνας φωτός λέιζερ λόγω της θέσης τους, όπως και όλων των σημεία των επιφανειών με υψηλές γεωμετρικές μεταβολές που προκαλούν διάχυση στη δέσμη φωτός και απαιτούν τη μεταβολή της ισχύος της δέσμης, ώστε να σαρωθούν χωρίς θόρυβο.

**Η βαθμονόμηση** Συστήματα που απαιτούν βαθμονόμηση κάθε φορά που μεταβάλλεται η θέση τους στο χώρο δεν προτείνονται, καθώς η διάρκεια της διαδικασίας συλλογής δεδομένων αυξάνεται δραματικά. Η αύξηση του χρόνου υπολογίζεται από το γινόμενο του χρόνου διαδικασίας βαθμονόμησης επί το πλήθος των διαφορετικών θέσεων που θα λάβει ο σαρωτής. Υπάρχουν συστήματα που ο χρόνος βαθμονόμησης μπορεί να ξεπερνάει ακόμα και τη μία ώρα. Η διαδικασία βαθμονόμησης των συστημάτων καθορίζει την πιστότητα των 3Δ ψηφιακών αντιγράφων. Συνήθως προτιμώνται συστήματα των οποίων η βαθμονόμηση υλοποιείται μία φορά και εφαρμόζεται σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος αντικείμενων με διαφορετικές διαστάσεις. Φυσικά, προτείνονται συστήματα με αυτοματοποιημένη τη διαδικασία βαθμονόμησης.

**Το λογισμικό** Σε κάποιες περιπτώσεις είναι απαραίτητη η προμήθεια λογισμικού για την επεξεργασία και διαχείριση των 3Δ ψηφιακών αντιγράφων. Αυτό το λογισμικό αποτελεί επιπρόσθετο κόστος για ένα έργο ψηφιοποίησης. Πολλά



συστήματα συνοδεύονται από λογισμικό αμφιβόλου ποιότητας και λειτουργικότητας. Είναι πολύ πιθανό το λογισμικό που συνοδεύει ένα σύστημα να μη καλύπτει τις ανάγκες ενός έργου στο σύνολο τους. Προσπάθειες έχουν γίνει από πλήθος κατασκευαστών, ώστε να παρέχουν έστω κάποιους από τους πρωταρχικούς αλγόριθμους επεξεργασίας δεδομένων. Το φιλικό γραφικό περιβάλλον ενός λογισμικού σε συνδυασμό με τη λειτουργικότητά του, τη σταθερότητα και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων του, συμβάλουν στη μείωση του χρόνου επεξεργασίας αλλά και στην αμεσότερη δημιουργία των τελικών αποτελεσμάτων. Με τον αντίστοιχο τρόπο που εξετάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός συστήματος για να εξακριβωθεί αν αυτά καλύπτουν πλήρως τις ανάγκες ενός έργου, θα πρέπει να εξασφαλισθεί και η λειτουργικότητα του συνοδευτικού λογισμικού.

Τα βασικότερα κριτήρια για την επιλογή ενός συστήματος 3Δ ψηφιοποίησης προκύπτουν από τις ανάγκες του ίδιου του έργου. Τα βασικότερα κριτήρια επιλογής ενός συστήματος 3Δ ψηφιοποίησης, χωρίς να μπορούν να χαρακτηριστούν ως τα μοναδικά, είναι τα εξής:

- Οπτικό πεδίο σάρωσης και ταχύτητα αποτύπωσης
- Ακρίβεια αποτύπωσης 3Δ γεωμετρίας
- Ανάλυση αποτύπωσης 3Δ γεωμετρίας
- Δυνατότητα αποτύπωσης πληροφορίας υψής και χαρακτηριστικών επιφάνειας
- Ακρίβεια αντιστοίχισης γεωμετρικής και χρωματικής πληροφορίας
- Βαθμός φιλικότητας προς το χειριστή του συστήματος
- Διαδικασία βαθμονόμησης και ανάγκη επανάληψής της
- Απαιτούμενες συνθήκες για την ορθή λειτουργία του συστήματος
- Μέσος συνολικός χρόνος αποτύπωσης ενός αντικειμένου
- Μέσος συνολικός χρόνος επεξεργασίας του 3Δ αντιγράφου
- Ανάγκη επιπρόσθετου λογισμικού επεξεργασίας δεδομένων
- Φορητότητα συστήματος
- Υπολογιστικές απαιτήσεις για τη συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων
- Υποστηριζόμενοι μορφότυποι αρχείων 3Δ δεδομένων
- Προσωπικό που απαιτείται κατά τη διαδικασία αποτύπωσης
- Απαιτήσεις για τη μεταφορά και αλλαγής θέσης των αντικειμένων
- Επιπρόσθετος εξοπλισμός που απαιτείται επί τόπου
- Απόδοση του συστήματος ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των αντικειμένων
- Μέσος συνολικός χρόνος εγκατάστασης και τοποθέτησης
- Αντιμετώπιση πιθανών προκλήσεων εφαρμογής της διαδικασίας συλλογής δεδομένων
- Κόστος συστήματος και περιφερειακών του
- Εγγύηση ορθής λειτουργίας του συστήματος ψηφιοποίησης

**Πίνακας 3.2.** Κριτήρια επιλογής μεθόδου και συστήματος 3Δ ψηφιοποίησης.

Κριτήριο	Πιθανές ρεαλιστικές επιλογές
Τάξη κόστους	10.000 € 20.000 € 50.000 € 100.000 € 200.000 € 500.000 €
Φιλικότητα προς υλικά	Μάρμαρο Μέταλλο Κεραμικό Ύφασμα
Εύρος (μέγεθος) λειτουργίας	Μικρό < 20 cm Μεσαίο 20 cm - 65 cm Μεγάλο > 65 cm
Φορητότητα	Ναι Όχι
Ακρίβεια μετρήσεων	Χαμηλή (Σχήμα από σιλουέτα) Μεσαία (Σχήμα από δομημένο φωτισμό, Δομή από κίνηση) Μεγάλη (Λέιζερ)
Αποτύπωση υφής (χρώματος)	Ναι Όχι
Αποδοτικότητα	Μικρή (Ένα έως δύο αντικείμενα ανά ημέρα) Μεσαία (Τρία έως πέντε αντικείμενα ανά ημέρα) Μεγάλη (Περισσότερα από έξι αντικείμενα ανά ημέρα)
Εξειδίκευση προσωπικού	Ελάχιστη Μικρή Μεγάλη
Συμβατότητα με πρότυπα	Ναι Όχι

- Προαιρετικός εξοπλισμός του συστήματος ψηφιοποίησης
- Δυνατότητες παραμετροποίησης του συστήματος

Ο Πίνακας 3.2 παρουσιάζει τα κριτήρια επιλογής συστήματος 3Δ ψηφιοποίησης, στον οποίο αναφέρονται και πιθανές ρεαλιστικές επιλογές για κάθε κριτήριο. Ο πίνακας αυτός μπορεί εύκολα να μετασχηματιστεί σε λίστα σημείων ελέγχου κατά τη φάση επιλογής μεθόδου και συστήματος ψηφιοποίησης, ή, ακόμη, σε έναν πίνακα προδιαγραφών για την προμήθεια ενός συστήματος 3Δ ψηφιοποίησης.

## Βιβλιογραφία

- Beraldin, J.-A., Atzeni, C., Guidi, G., Pieraccini, M., and Lazzari, S. (2001). Establishing a digital 3d imaging laboratory for heritage applications: first trials. In *Workshop of 3D Digital Imaging and Modelling Applications*.
- Böhler, W., Bordas Vicent, M., Heinz, G., Marbs, A., and Müller, H. (2004). High quality scanning and modeling of monuments and artifacts. In *Archaeological Surveys Workshop*.
- Esteban, C. H. and Schmitt, F. (2002). Multi-stereo 3d object reconstruction. In *3D Data Processing Visualization and Transmission, 2002. Proceedings. First International Symposium on*, pages 159–166. IEEE.
- Marshall, S. J. and Gilby, J. H. (2001). New opportunities in non-contact 3d measurement. In *National Measurement Conference, Harrogate, United Kingdom*.
- Park, H., Shin, G., and Chang, Y. (2002). Three dimensional modeling and visualization of weathered rock surface. In *Proceedings of the International Workshop on Visualization and Animation Of Landscape Kunming, China*, volume 26, page 28. Citeseer.
- Vozikis, G., Haring, A., Vozikis, E., and Kraus, K. (2004). *Laser scanning: a new method for recording and documentation in archaeology*. na.



—Τα έργα 3Δ ψηφιοποίησης αποτελούνται από ένα σύνολο συμπληρωματικών εργασιών που ξεκινά από μια αρχική παρατήρηση και καταλήγει στη δημιουργία ενός ψηφιακού αντίγραφου. Το σύνολο των εργασιών αυτών πρέπει να είναι εκ των προτέρων γνωστό σε κάθε έργο ψηφιοποίησης σε σχέση με μια επιλεγμένη μέθοδο ψηφιοποίησης και να υπάρχει η κατάλληλη οργάνωση για τη βέλτιστη απόδοση του εγχειρήματος.

# 4

## Οργάνωση ψηφιοποίησης

### 4.1 Εισαγωγή

Τα έργα ψηφιοποίησης απαιτούν εκτενή και προσεκτική σχεδίαση όλων των επιμέρους ενεργειών που περιλαμβάνουν για την επίτευξη του τελικού τους στόχου. Η υλοποίηση του κάθε έργου θα πρέπει να βασίζεται σε ένα πλάνο που καλύπτει με σαφήνεια θέματα όπως είναι τα εξής:

- Ο κύριος σκοπός και οι στόχοι του έργου
- Τα αναμενόμενα αποτελέσματα
- Το κοινό στο οποίο απευθύνονται τα παράγωγα του έργου
- Τα οφέλη από μια τέτοια δραστηριότητα
- Το προσωπικό που θα συμμετέχει στην υλοποίηση
- Η ασφάλεια και ακαιριαιότητα του πρωτοτύπου
- Η οργάνωση και ο χρονικός προγραμματισμός των επιμέρους εργασιών
- Ο χώρος υλοποίησης της συλλογής δεδομένων
- Διαδικασίες διαχείρισης των δεδομένων που προκύπτουν

Ο κύκλος ζωής ενός έργου 3Δ ψηφιοποίησης αποτελείται από διαφορετικά στάδια. Αυτά είναι τα εξής:

- Προετοιμασία για τη διαδικασία ψηφιοποίησης
- Μέθοδοι διαχείρισης τέχνηρων και ευπαθών αντικειμένων
- Αδειοδοτήσεις και δικαιώματα πνευματικής ιδιοκτησίας
- Συλλογή των δεδομένων (μέτρηση)
- Δημιουργία μεταδεδομένων (metadata) και παραδεδομένων (paradata)
- Αποθήκευση και διαφύλαξη του ψηφιακού πρωτότυπου υλικού
- Δημιουργία παραγώγων
- Δημοσίευση υλικού και διάδοση της πληροφορίας

Κατά την πρακτική εφαρμογή των σταδίων αυτών παρατηρούνται σχέσεις και εξαρτήσεις ανάμεσα τους, ενώ η σειρά που εμφανίζονται παραπάνω δε θα πρέπει να θεωρηθεί απόλυτη αλλά, τουλάχιστον, ενδεικτική. Πολλές φορές, παρόμοιες εργασίες αποτελούν πηγή γνώσης και εμπειρίας και αποτελούν έναν πρακτικό οδηγό, καθώς τα λάθη και οι αδυναμίες που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενες προσπάθειες έχουν αναγνωριστεί και έχουν αντιμετωπιστεί.

Ιδιαίτερα στο χώρο της 3Δ ψηφιοποίησης, η αναφορά σε άλλες εργασίες αποτελεί μια απόλυτα ενδεδειγμένη πρακτική και πολλά νέα θέματα και προκλήσεις αναδεικνύονται συνεχώς. Οι πιο πρόσφατες εργασίες αποτελούν πραγματικό θησαυρό ιδεών για πιθανές υλικοτεχνικές και διαδικαστικές προσεγγίσεις. Η αναζήτηση απαντήσεων σε προηγούμενες εργασίες απαιτεί αρκετό χρόνο αλλά συνήθως αποφέρει οφέλη και αποδεικνύεται πολύτιμη. Είναι πλέον κοινά αποδεκτό πως ο χρόνος που αφιερώνεται για τη σχεδίαση και οργάνωση ενός έργου ψηφιοποίησης σχετίζεται απόλυτα με την ευχέρεια διαχείρισης και εκτέλεσής του.

Ένα έργο 3Δ ψηφιοποίησης δε θα πρέπει να ξεκινά πριν τον καθορισμό των τελικών στόχων και τη μορφή των παραδοτέων. Για παράδειγμα, ένα έργο που έχει στόχο την προβολή αρχαιολογικών εκθεμάτων χωρίς να έχει από πριν εξασφαλίσει την κατάλληλη αδειοδότηση από την αρμόδια εφορεία αρχαιοτήτων τότε μπορεί πολύ εύκολα να βρεθεί εκτός προγραμματισμού. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση εφαρμογής μιας «ασύμβατης» προς τα αντικείμενα μεθόδου ψηφιοποίησης. Κάτι τέτοιο μπορεί να οδηγήσει στην αύξηση του χρόνου συλλογής και επεξεργασίας των δεδομένων και ίσως επίσης να οδηγήσει σε 3Δ ψηφιακά αντίγραφα που δεν πληρούν τις αρχικά προκαθορισμένες προδιαγραφές του έργου. Η τεκμηρίωση των τελικών στόχων είναι μια αναγκαία διαδικασία.

Για την περίπτωση της εφαρμογής στο χώρο του πολιτισμού, η αξία των τέχνηρων είναι ανυπολόγιστη λόγω της μοναδικότητας, της σπανιότητάς τους αλλά και της πληροφορίας που μεταφέρουν. Τα δομικά τους υλικά τις περισσότερες φορές είναι εύθραυστα και αυτό επιβάλλει τη φύλαξη τους σε ειδικούς

χώρους και συνθήκες, εφόσον, φυσικά, πρόκειται για αντικείμενα που μπορούν να μετακινηθούν. Είναι πολύ σημαντικό κατά την εκτέλεση ενός έργου ψηφιοποίησης να μην προκληθεί η παραμικρή φθορά στα τέχνηρα. Έτσι, ακόμη και η επιλογή του κατάλληλου χώρου ψηφιοποίησης είναι μια σημαντική απόφαση για την απόλυτη προστασία των αντικειμένων. Σε περιπτώσεις που το επιτρέπει ο προϋπολογισμός του έργου θα πρέπει να οριστεί ένας «χώρος ψηφιοποίησης», στον οποίο αποκλείστικά και μόνο θα πραγματοποιούνται οι αποτυπώσεις των αντικειμένων. Αυτός ο χώρος θα πρέπει να πληροί όλες τις προϋποθέσεις (πχ. φωτισμός, θερμοκρασία, υγρασία, κτλ.) που υποδεικνύουν οι έφοροι ή επιμελητές ή αρχαιολόγοι ως σημαντικές απαιτήσεις για τη διασφάλιση της ακεραιότητας των αντικειμένων. Σε κάποιες περιπτώσεις απαγορεύεται ακόμη και η έκθεση σε ηλιακό φως. Προφανώς, πρακτικές όπως το κάπνισμα, το φαγητό και το ποτό στο χώρο ψηφιοποίησης απαγορεύεται. Σε περιπτώσεις όπου ο προϋπολογισμός του έργου δεν επιτρέπει την οργάνωση ενός χώρου ψηφιοποίησης, τότε θα πρέπει να ακολουθηθούν άλλες διαδικασίες, οι οποίες θα περιορίζουν στο ελάχιστο τις μετακινήσεις των αντικειμένων. Η μεθοδολογία διασφάλισης της ακεραιότητας των αντικειμένων θα πρέπει να περιλαμβάνει και εναλλακτικά σενάρια, τα οποία θα περιγράφουν τρόπους αντιμετώπισης απρόσμενων καταστάσεων. Σε περιπτώσεις που η παρούσα κατάσταση ενός αντικειμένου αφήνει πολλές πιθανότητες για φθορά κατά τη μεταφορά του, τότε προτιμότερο θα ήταν να επιλεγεί μια μέθοδος που δεν απαιτεί τη μετακίνηση των αντικειμένων.

Η διαχείριση και η ασφάλεια των αντικειμένων ανατίθεται σε άτομα με ειδική εμπειρία που μπορούν να αναγνωρίζουν τις ιδιαιτερότητες που παρουσιάζουν τα αντικείμενα. Η αναγνώριση του επιπέδου ικανοτήτων και η εμπειρία του προσωπικού που θα εργαστεί για το συγκεκριμένο τεχνικό έργο αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την επιτυχία. Το ανθρώπινο δυναμικό θα πρέπει να είναι ενημερωμένο για τα σενάρια διαχειρίσεις των αντικειμένων και θα πρέπει να ακολουθείται ένα πρόγραμμα επιμόρφωσης του ανθρώπινου δυναμικού για τη διατήρηση υψηλού επιπέδου κατάρτισης.

Πριν την έναρξη της συλλογής δεδομένων, ειδικοί διερευνούν κάθε αντικείμενο και αποφασίζουν αν επιτρέπεται να ψηφιοποιηθεί με τη μέθοδο που προτείνεται. Επιπρόσθετα, αναφέρουν όλες τις ιδιαίτερες διαδικασίες διαχείρισης που θα πρέπει να ακολουθηθούν. Ένας κατάλογος με τα αντικείμενα και τις μεθόδους διαχείρισης συντάσσεται και ακολουθείται πιστά από την ομάδα υλοποίησης της συλλογής δεδομένων. Ο κατάλογος αυτός αποτελεί μέρος μιας σύνθετης βάσης γνώσεων που αφορούν το συγκεκριμένο έργο ψηφιοποίησης αλλά και τις μεθόδους ψηφιοποίησης που θα ακολουθηθούν στο πλαίσιο υλοποίησής του. Η επιτυχία ενός έργου 3Δ ψηφιοποίησης βασίζεται στην προετοιμασία αποτελεσματικής αντιμετώπισης όλων των πιθανών ενδεχόμενων. Όπως και οποιοδήποτε άλλο τεχνικό έργο, έτσι και αυτά της 3Δ ψηφιοποίησης βασίζονται σε μια ανάλυση κινδύνων. Ζητήματα, όπως για παράδειγμα περιορισμοί που απορρέουν από θέματα πνευματικής ιδιοκτησίας, πρέπει να καλύπτονται

από την ανάλυση κινδύνων που συνήθως περιέχει ερωτήματα σχετικά με τις συνέπειες χρήσης του υλικού χωρίς άδεια αλλά και ποιες ενέργειες θα μπορούσαν να ακολουθηθούν για να βρεθούν οι δικαιούχοι ή κάτοχοι. Άλλοι πιθανοί κίνδυνοι σχετίζονται με την εξασφάλιση της αυθεντικότητας του αντικειμένου.

Ο κατάλληλος υλικοτεχνικός εξοπλισμός και το λογισμικό θα πρέπει να είναι διαθέσιμα και έτοιμα προς χρήση πριν την έναρξη του έργου. Ταυτόχρονα, κάποιες δοκιμές του εξοπλισμού θα ήταν συνετό να πραγματοποιηθούν πριν τη συλλογή των πραγματικών δεδομένων. Κανένα αντικείμενο δε θα πρέπει να μεταφερθεί στο χώρο ψηφιοποίησης πριν από την εξακρίβωση της συμβατότητας της επιλεγμένης μεθόδου και της λειτουργικότητας του εξοπλισμού. Είναι ευρέως αποδεκτό πως τα καλύτερα αποτελέσματα αποφέρει ο ενδεδειγμένος έλεγχος της παραμικρής λεπτομέρειας που διέπει τη διαδικασία συλλογής δεδομένων καθώς και την μετέπειτα αλυσίδα διαδικασιών επεξεργασίας τους.

Η συνδυαστική χρήση μεθόδων που ανήκουν σε διαφορετικές ομάδες ψηφιοποίησης είναι κάθε άλλο παρά απαγορευτική. Έχει αποδειχθεί άλλωστε ως μια από τις πλέον αποτελεσματικές προσεγγίσεις για σύνθετα έργα ψηφιοποίησης. Μια συγκέντρωση των βασικών προκλήσεων που παρουσιάζονται στα έργα 3Δ ψηφιοποίησης οδηγεί στα εξής προβληματικές συνθήκες:

- μη συμβατές προς τη μέθοδο ψηφιοποίησης επιφάνειες
- αδυναμία συλλογής δεδομένων από μη ορατά σημεία
- εξασφάλιση των ευαίσθητων αντικειμένων
- Ψηφιοποίηση μεγάλων αντικειμένων με υψηλή ακρίβεια
- μεταβολή της ακρίβειας σάρωσης στο ίδιο οπτικό πεδίο
- απαλοιφή γεωμετρικών ασυνεχειών στα 3Δ δεδομένα
- διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων

## 4.2 Ροή εργασιών 3Δ ψηφιοποίησης

Η συλλογή 3Δ δεδομένων με κάποιο σύστημα ψηφιοποίησης είναι μόνο η αρχή μιας ιδιαίτερα σύνθετης διαδικασίας. Τα βήματα που ακολουθούνται, αποσκοπούν στην αποτελεσματική χρήση των δεδομένων που παρέχουν τα συστήματα ψηφιοποίησης. Στην Εικόνα 4.1.α περιγράφεται γραφικά η ροή εργασιών από τη στιγμή της συλλογής δεδομένων έως και της τελικής οπτικής αναπαράστασης του 3Δ ψηφιακού αντιγράφου. Η διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων περιλαμβάνει πέντε κύρια βήματα (Bertozzi et al., 2002; Pavlidis et al., 2004):

- προ-επεξεργασία
- ενοποίηση τμηματικών σαρώσεων
- μετατροπή σε πολυγωνικές πλεγματοσειρές



- μετά-επεξεργασία
- επεξεργασία υφής και δημιουργία εκδόσεων 3Δ ψηφιακών αντιγράφων διαφορετικών αναλύσεων

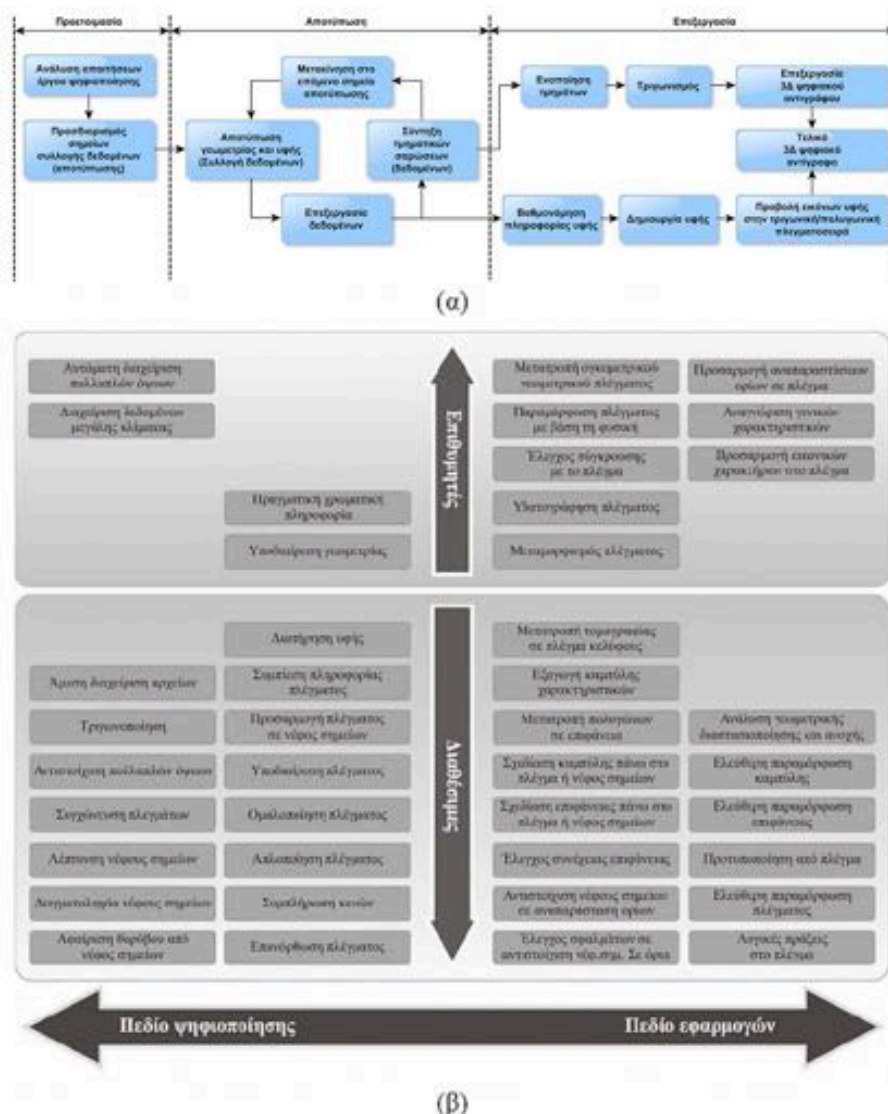
Στην Εικόνα 4.1.β παρουσιάζονται οι διαθέσιμες αλλά και οι επιθυμητές διαδικασίες που εμπλέκονται στην επεξεργασία δεδομένων που προκύπτουν από την 3Δ ψηφιοποίηση αντικειμένων. Ο διαχωρισμός που γίνεται στις διαδικασίες αλλά και η περιγραφή τους είναι φυσικό να μη συμβαδίζει με όλες τις διαθέσιμες μεθόδους ψηφιοποίησης. Ως εκ τούτου τα βήματα της διαδικασίας θα πρέπει να ληφθούν υπόψη ως ένα γενικευμένο διάγραμμα ροής εργασιών που μεταβάλλεται ανάλογα με την υιοθετημένη μέθοδο 3Δ αποτύπωσης. Συνολικά, τα βήματα μιας διαδικασίας ψηφιοποίησης είναι τα εξής:

1. Συλλογή δεδομένων (γεωμετρίας και υφής)
2. Προ-επεξεργασία δεδομένων
3. Φιλτράρισμα του θορύβου στο νέφους σημείων
4. Ομαδοποίηση και οργάνωση των δεδομένων
5. Ευθυγράμμιση και ενοποίηση των τμηματικών σαρώσεων
6. Δημιουργία πολυγωνικών πλεγματοσειρών
7. Απλοποίηση πλεγματοσειρών - διαφορετικές αναλύσεις
8. Απαλοιφή γεωμετρικών ασυνεχειών
9. Δημιουργία υφής

#### 4.2.1 Συλλογή γεωμετρικών δεδομένων

Το πρώτο βήμα στη διαδικασία αποτύπωσης είναι η συλλογή των δεδομένων με κάποια ή κάποιες από τις μεθόδους ψηφιοποίησης. Ο τρόπος εκτέλεσης της συγκεκριμένης διαδικασίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο της μεθόδου αλλά και τις τεχνικές προδιαγραφές (πχ. ταχύτητα αποτύπωσης, φορητότητα, κοκ). Οποιαδήποτε και αν είναι, όμως, η μέθοδος ψηφιοποίησης που θα εφαρμοσθεί, η διαδικασία καταλήγει σχεδόν πάντα σε μια σειρά από τμηματικές σαρώσεις<sup>1</sup>. Οι πολλαπλές σαρώσεις οφείλονται στο γεγονός ότι τα περισσότερα συστήματα σάρωσης απαιτούν την αποτύπωση δεδομένων από διαφορετικές γωνίες θέασης, έτσι, ώστε να καλύψουν όλες τις επιφάνειες του αντικειμένου.

<sup>1</sup> Μέθοδοι όπως οι Σχήμα από σιλουέτα και Δομή από κίνηση με συγκεκριμένα δεδομένα εισόδου οδηγούν σε ολοκληρωμένα 3Δ ψηφιακά αντίγραφα χωρίς την ανάγκη τμηματικών σαρώσεων.



**Εικόνα 4.1.** Ροή εργασιών 3D ψηφιοποίησης: (α) Γενικό διάγραμμα διαδικασιών, (β) συνοπτική παρουσίαση διαδικασιών επεξεργασίας δεδομένων 3D ψηφιοποίησης.

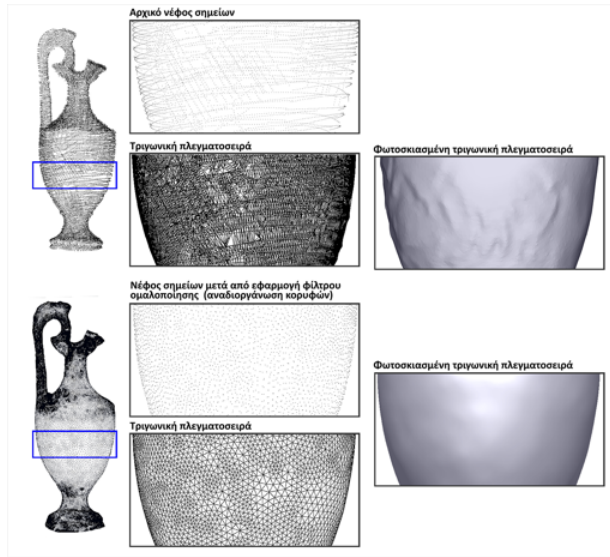
Συνηθισμένη πρακτική που έχει προαναφερθεί και βρίσκει εφαρμογή σε κινητά αντικείμενα είναι η χρήση ενός περιστρεφόμενου τραπεζιού, το οποίο συνεργάζεται με το λογισμικό και του επιτρέπει να γνωρίζει τις θέσεις των τμηματικών σαρώσεων. Σε κάποιες περιπτώσεις, το λογισμικό του συστήματος ελέγχει και ένα σύνολο από φωτιστικά σώματα που σκοπό έχουν να δημιουργήσουν τις κατάλληλες συνθήκες φωτισμού για τη βέλτιστη αποτύπωση των δεδομένων επιφανειακής υφής του αντικειμένου καθώς και να το απαλλάξουν από πιθανές σκιές.

Τις περισσότερες φορές ένα 3Δ ψηφιακό αντίγραφο περιέχει οπές στην επιφάνειά του λόγω αδυναμίας άμεσης οπτικής επαφής του οπτικού συστήματος με συγκεκριμένες περιοχές της επιφάνειας του αντικειμένου. Συχνά επίσης, παρουσιάζεται το φαινόμενο της διαφορετικής πυκνότητας σάρωσης σε διαφορετικές περιοχές της επιφάνειας που οφείλεται στην ανάγκη αλλαγής της θέσης ή των ρυθμίσεων του συστήματος, ώστε να αποδίδει καλύτερα προσαρμοζόμενη στην πολυπλοκότητα του μετρούμενου αντικειμένου. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο συνηθισμένο σε σαρωτές μεγάλου βεληνεκού που χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα στην αποτύπωση μνημείων και κτηρίων, αλλά και στα συστήματα φωτογραμμετρίας. Ο αυτόματος καθορισμός των βέλτιστων γωνιών θέασης για ψηφιοποίηση είναι επίσης μία πρόκληση. Η απλούστερη προσέγγιση στην αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης είναι ο χειροκίνητος εντοπισμών των γωνιών θέασης. Η ψηφιοποίηση θα πρέπει να πραγματοποιείται έχοντας πάντα υπόψη την ελαχιστοποίηση του πλήθους των σαρώσεων αλλά και την εξασφάλιση ύπαρξης ενός μεγάλου ποσοστού επικαλυπτόμενων σημείων ανάμεσα στις διαφορετικές σαρώσεις. Σημαντική είναι επίσης και η γωνία ανάμεσα στις μεγάλες επίπεδες επιφάνειες ενός αντικειμένου και του αισθητηρίου του συστήματος ψηφιοποίησης.

Στην περίπτωση εργασιών ψηφιοποίησης πολιτιστικού αποθέματος είναι πολλοί οι λόγοι που οδηγούν στην πραγματοποίηση συλλογής δεδομένων με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια. Οι λόγοι για τους οποίους, στη συγκεκριμένη περίπτωση, αναζητείται η μέγιστη ακρίβεια και ανάλυση στις μετρήσεις είναι πολλοί και σχετίζονται τόσο με την μοναδικότητα και αξία του αντικειμένου όσο και με την περιορισμένη συνήθως πρόσβαση που υπάρχει σε αυτό. Ακόμη και αν ο όγκος των δεδομένων που συλλέγονται είναι τέτοιος που καθιστά πρακτικά αδύνατο το να χρησιμοποιηθούν όλα τα δεδομένα μετρήσεων με την τρέχουσα υπολογιστική στάθμη της εποχής, αυτό μπορεί γρήγορα να αντιμετωπιστεί με τις διαρκείς εξελίξεις της τεχνολογίας.

#### 4.2.2 Προ-επεξεργασία γεωμετρικής πληροφορίας

Η διαδικασία της προ-επεξεργασίας πραγματοποιείται αμέσως μετά την αποτύπωση των δεδομένων γεωμετρίας και περιλαμβάνει ένα σύνολο από μερικών ασυσχέτιστες εργασίες (Bertozzi et al., 2002). Είναι μια διαδικασία που απαντάται συχνά σε εμπορικά συστήματα ως ενσωματωμένη μέσα στη διαδικασία δημιουργίας πολυγωνικών πλεγμάτων. Ο υπολογισμός των πινάκων καθέτων μοναδιαίων διανυσμάτων (normal vectors) είναι μια από αυτές, κατά την οποία χρησιμοποιείται η γεωμετρική πληροφορία της σάρωσης για να αναγνωριστεί η φορά των διανυσμάτων αυτών (αναγνώριση της μέσα και της έξω όψης κάθε επιφάνειας) για κάθε σημείο. Αυτή είναι πολύ σημαντική πληροφορία, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί αργότερα για την ορθή οπτική αναπαράσταση του αντικειμένου, την ενοποίηση τμημάτων αλλά και την κατάτμηση και ανά-λυση των δεδομένων.



Εικόνα 4.2. Ομαλοποίηση νέφους σημείων.

#### 4.2.3 Φιλτράρισμα του θορύβου στο νέφος σημείων

Τα δεδομένα που προκύπτουν από την 3Δ ψηφιοποίηση περιέχουν, συνήθως, σφάλματα εξαιτίας της ύπαρξης θορύβου στις μετρήσεις. Ο θόρυβος εμφανίζεται με τη μορφή τυχαίας μετατόπισης σημείων γύρω από την πραγματική επιφάνεια του αντικειμένου. Μια απλοϊκή μέθοδος που επιτρέπει την απαλοιφή του θορύβου είναι ο υπολογισμός του μέσου όρου θέσης των σημείων ανάμεσα σε επικαλυπτόμενες σαρώσεις (Bernardini and Rushmeier, 2002). Άλλη μια τεχνική βασίζεται στην υπόδειγματοληψία των σημείων του νέφους που πραγματοποιείται βάσει μιας εκτίμησης της επιφάνειας του αντικειμένου. Οι Alexa et al. (2003); Corrêa et al. (2002) εφαρμόζουν την τεχνική της προβολής ελαχίστων τετραγώνων (moving least square projection) για να φιλτράρουν το θόρυβο. Ένα πλήθος αλγορίθμων που προέρχονται από το χώρο της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ομαλοποίηση των δεδομένων του νέφους. Οι απλοί γραμμικοί αλγόριθμοι (πχ. Gaussian smoothing) έχουν το μειονέκτημα ότι δεν μπορούν να διαχωρίζουν το θόρυβο από δεδομένα υψηλής συχνότητας. Έτσι καταλήγουν να ομαλοποιούν τις άκρες και τις λεπτομέρειες των αντικειμένων. Γενικότερα, μη-γραμμικοί αλγόριθμοι είναι καταλληλότεροι για αφαίρεση του θορύβου (Bertozzi et al., 2002; Pavlidis et al., 2004). Στην Εικόνα 4.2 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα ομαλοποίησης νέφους σημείων σε ένα αντίγραφο αγγείου.

#### 4.2.4 Ομαδοποίηση και οργάνωση δεδομένων

Η διαχείριση του μεγάλου όγκου δεδομένων που παράγουν οι σαρωτές είναι μια από τις βασικότερες προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα υπολογιστικά συστήματα τα οποία χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας. Ο όγκος των δεδομένων οδηγεί τα υπολογιστικά συστήματα στα όρια λειτουργίας τους, ιδιαίτερα όταν απαιτείται αλληλεπίδραση με το χρήστη σε πραγματικό χρόνο. Η διαδικασία της ομαδοποίησης των δεδομένων αποτελεί μια λύση στο πρόβλημα. Ειδικές δομές δεδομένων (οκταδικά και δυαδικά δέντρα) οργανώνουν με τέτοιο τρόπο τα δεδομένα, ώστε η προσπέλαση τους να γίνεται έξυπνα και γρήγορα ανάλογα με την οπτική γωνία υπό την οποία εμφανίζεται το αντικείμενο. Οι δομές αυτές επιτρέπουν την τμηματική ανάγνωση και οπτικοποίηση των δεδομένων και προσφέρουν τη δυνατότητα επεξεργασίας σε πραγματικό χρόνο χωρίς την απαίτηση ταυτόχρονης προσπέλασης του συνολικού όγκου δεδομένων.

#### 4.2.5 Ευθυγράμμιση και ενοποίηση τμημάτων

Οι τμηματικές σαρώσεις πρέπει να ευθυγραμμισθούν μεταξύ τους, έτσι ώστε να μπορεί να σχηματιστεί το πλήρες αντικείμενο (ολοκληρωμένο 3Δ ψηφιακό αντίγραφο). Η διαδικασία αυτή μπορεί να είναι εξ' ολοκλήρου αυτοματοποιημένη, εάν είναι γνωστή η θέση του συστήματος ψηφιοποίησης σε κάθε τμηματική σάρωση. Όταν κάτι τέτοιο δεν ισχύει, η διαδικασία πρέπει να γίνει, αρχικά τουλάχιστον, χειροκίνητα. Ο χρήστης τοποθετεί με τη βοήθεια ειδικού λογισμικού τις τμηματικές σαρώσεις (νέφη σημείων) σε κάποιες αρχικές θέσεις, οι οποίες βελτιώνονται αυτόματα με επαναληπτική διαδικασία. Ο χρήστης συνήθως ορίζει κάποια κοινά (ομόλογα) σημεία πάνω στα νέφη σημείων των τμηματικών σαρώσεων σε περιοχές που παρουσιάζουν επικαλύψεις, τα οποία χρησιμοποιούνται στη συνέχεια ως οδηγοί για την ευθυγράμμιση. Ωστόσο, τα περισσότερα συστήματα βασίζονται αρχικά στην ανθρώπινη παρέμβαση. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί εύχρηστα διαδραστικά εργαλεία που υποβοηθούν με τη δυνατότητα άμεσης επιλογής χαρακτηριστικών ομόλογων σημείων στις τμηματικές σαρώσεις. Η χειροκίνητη ευθυγράμμιση απαιτεί αρκετό χρόνο, ίσως τον περισσότερο από όλα τα υπόλοιπα στάδια επεξεργασίας των δεδομένων. Όταν το πλήθος των τμηματικών σαρώσεων αγγίζει τις αρκετές δεκάδες τότε η ευθυγράμμιση θα πρέπει να γίνεται σε επίπεδο ομάδων. Οι ομάδες αυτές ορίζονται συνήθως από το χρήστη. Γενικά, η ευθυγράμμιση τμηματικών σαρώσεων πραγματοποιείται ευκολότερα σε κλειστά αντικείμενα (όπως ένα αγγείο ή ένα αγαλματίδιο) από ότι σε ανοικτά (μια μαρμάρινη ανάγλυφη διακόσμηση) (Cortelazzo and Marton, 1999).

Ο επαναληπτικός αλγόριθμος πλησιέστερου σημείου (Iterative closest point) έχει γίνει από όλους αποδεκτός ως η πλέον χρήσιμη μέθοδος για ενοποίηση τμηματικών σαρώσεων. Η πρώτη περιγραφή του αλγορίθμου έγινε από τους

Besl and McKay (1992). Ο αλγόριθμος λειτουργεί σε δύο διακριτά βήματα: (α) αναγνώριση αντιστοιχων (ή ομόλογων) σημείων, (β) εκτίμηση του χωρικού μετασχηματισμού που θα ελαχιστοποιήσει την απόσταση ανάμεσα τους. Η εκτέλεση των δύο αυτών βημάτων επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό συνταίριασμα (μικρότερο δυνατό σφάλμα). Ωστόσο, βασικό του μειονέκτημα είναι η αστάθεια που παρουσιάζει σε ομαλές επιφάνειες. Άλλες μέθοδοι ευθυγράμμισης βασίζονται σε κάποια ειδικά αντικείμενα ελέγχου (πχ. σφαίρες, κύλινδροι και επίπεδα). Τα αντικείμενα ελέγχου τοποθετούνται γύρω από το αντικείμενο προς ψηφιοποίηση πριν τη συλλογή δεδομένων και ψηφιοποιούνται μαζί με το αντικείμενο. Καθώς είναι γνωστής γεωμετρίας μπορούν να αναγνωριστούν αυτόματα και συνεπώς να βοηθήσουν την ευθυγράμμιση των τμηματικών σαρώσεων (Sgrenzaroli and Wolfart, 2002). Το μειονέκτημα στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι πως σε κάθε σάρωση θα πρέπει να εμφανίζονται κάποια (σε κάποιες περιπτώσεις τουλάχιστον τρία) από τα αντικείμενα ελέγχου.

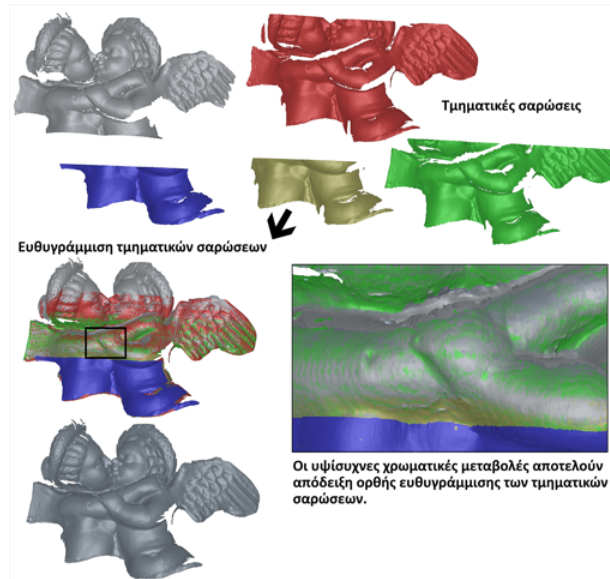
Μετά την ευθυγράμμιση των τμηματικών σαρώσεων, σειρά έχει η συγχώνευση και ενοποίησή τους. Είναι η πλέον απαιτητική διαδικασία σε επίπεδο υπολογιστικών πόρων. Πολλές φορές οι ίδιοι οι κατασκευαστές προτείνουν τον έλεγχο των διαθέσιμων υπολογιστικών πόρων, αφού ο όγκος των δεδομένων υπερβαίνει κατά πολύ τη διαθέσιμη μνήμη ενός μέσου υπολογιστικού συστήματος. Κατά τη διαδικασία ενοποίησης αφαιρούνται, επίσης, τα πλεονάζοντα σημεία στα επικαλυπτόμενα τμήματα των σαρώσεων. Η ενοποίηση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε διαφορετικά επίπεδα:

- *Σε επίπεδο σημείων, αμέσως μετά την ευθυγράμμιση των τμημάτων:* εξετάζεται εάν κάποιο σημείο μιας σάρωσης εμφανίζεται και σε κάποια άλλη σάρωση και δεν λαμβάνεται πλέον υπόψη.
- *Σε επίπεδο περιοχής ή αντικειμένου:* καθώς τα δεδομένα μοντελοποιούνται, τα τμήματα που αναγνωρίζονται ως κοινά συγχωνεύονται.
- *Άμεση αναγνώριση:* η αναγνώριση των σημείων γίνεται άμεσα πάνω σε ένα νέφος σημείων που αποτελείται από όλες τις τμηματικές σαρώσεις. Η μοντελοποίηση πάνω στο 3D νέφος σημείων είναι δύσκολη και απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ (Pavlidis et al., 2004).

Ένα παράδειγμα ευγράμμισης και ενοποίησης τμηματικών σαρώσεων παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.3.

#### 4.2.6 Δημιουργία πλεγματοσειράς

Η διαδικασία της δημιουργίας πλεγματοσειράς από το νέφος σημείων είναι η πλέον κοινή διαδικασία στον τομέα της 3D ψηφιοποίησης, καθώς η δημιουργία ενός 3D μοντέλου που περιγράφεται από πλεγματοσειρά είναι συνήθως το βασικό ζητούμενο παράγωγο ενός έργου ψηφιοποίησης. Υπάρχουν διάφοροι



Εικόνα 4.3. Ευθυγράμμιση και ενοποίηση τμηματικών σαρώσεων.

αλγόριθμοι πολυγωνοποίησης που έχουν ως κοινό στόχο τη μετατροπή ενός νέφους σημείων σε μια συνεχόμενη επιφάνεια από πολύγωνα. Η πολυγωνική πλεγματοσειρά αποτελεί μια από τις πλέον «διαισθητικές» οπτικοποιήσεις ενός 3Δ ψηφιακού αντιγράφου, ιδιαίτερα όταν εφαρμοστεί πάνω της η πληροφορία υφής. Σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης πλεγματοσειρών είναι η σημαντική μείωση του όγκου δεδομένων που απαιτείται για την περιγραφή της 3Δ γεωμετρίας. Η πλεγματοσειρά επιτρέπει τη διαδραστική μελέτη του 3Δ αντικείμενου για εξαγωγή διαστάσεων, ορθογραφικών φωτογραφιών, κοκ. Ορισμένοι αλγόριθμοι υπολογίζουν το πλέγμα προοδευτικά, βασιζόμενοι στην πληροφορία που παρέχουν τα γειτονικά σημεία του νέφους (Bernardini et al., 1999; Lorensen and Cline, 1987). Άλλοι, πιο πολύπλοκοι, αποφασίζουν και για την ανάλυση της πλεγματοσειράς σε κάθε περιοχή ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των επιφανειών που δημιουργούν (δείκτης πολυπλοκότητας περιοχής, καμπυλότητα επιφάνειας, κα.). Σημαντική πρόκληση και εδώ αποτελεί ο θόρυβος που έχει καταφέρει να διαφύγει από το αρχικό φιλτράρισμα του νέφους και επιδρά πολύ έντονα στις επιφάνειες μίας πλεγματοσειράς οδηγώντας σε γεωμετρικές παραμορφώσεις.

#### 4.2.7 Απλοποίηση πλεγματοσειράς

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η μείωση της γεωμετρικής πληροφορίας είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική διαχείριση των 3Δ ψηφιακών αντιγράφων από συστήματα διαφορετικών επιδόσεων. Η απλοποίηση της γεωμετρίας πραγματοποιείται σε περιοχές της επιφάνειας του ψηφιακού αντιγράφου που

δεν παρουσιάζουν έντονες μεταβολές. Ένας ρυθμός δειγματοληψίας της τάξης των 0,22 mm για μια επίπεδη επιφάνεια, αποδεικνύεται μάλλον ανεπιτυχής, αφού κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, η ίδια επιφάνεια θα μπορούσε να περιγραφεί από ελάχιστες μόλις κορυφές ορισμένες και οργανωμένες σε πολύγωνο στο 3D χώρο. Οι σύγχρονοι αλγόριθμοι απλοποίησης γεωμετρίας αναγνωρίζουν αυτόματα τα τμήματα ενός 3D ψηφιακού αντιγράφου που μπορούν να υποστούν απλοποίηση χωρίς να υποβαθμιστεί η ποιότητα τους (Cignoni et al., 1998; Garland and Heckbert, 1997). Ειδικές δομές δεδομένων διαχωρίζουν τη γεωμετρία του αντιγράφου σε τμήματα. Ο διαχωρισμός γίνεται με κριτήριο τη μαθηματική έκφραση της μορφολογικής πολυπλοκότητας ανά περιοχή. Η οργάνωση των δεδομένων κατά αυτό τον τρόπο συμβάλλει στην επιλεκτική αφαίρεση πληροφορίας σε συμφωνία με τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε περιοχής της πλεγματοσειράς.

Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της ομάδας που εργάστηκε στην ψηφιοποίηση του Δαβίδ του Μιχαήλ Άγγελου (Digital Michelangelo). Η ερευνητική ομάδα ανέπτυξε αλγόριθμο που βασίζεται στην τεχνική της εικονικής μνήμης και καταφέρνει να επεξεργαστεί και να απλοποιήσει μοντέλα με εντυπωσιακά αποτελέσματα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το αρχικό ψηφιακό αντίγραφο του Δαβίδ αποτελούνταν από 2 δισεκατομμύρια τρίγωνα, τα οποία μειώθηκαν σε μόλις 56 εκατομμύρια (~3% της αρχικής ποσότητας). Σε κάποιες περιπτώσεις η απλοποίηση μπορεί να θεωρηθεί ως μια προσπάθεια συμβιβασμού ανάμεσα στην ποιότητα του 3D αντιγράφου και του όγκου δεδομένων που το περιγράφει. Με την εφαρμογή ενός αλγορίθμου απλοποίησης, η απώλεια πληροφορίας είναι, προφανώς, αναπόφευκτη. Ο Πίνακας 4.1 συνοψίζει τις απλοποιήσεις που επιδέχεται ένα 3D αντίγραφο που προέρχεται από μια αρχική πολυγωνική πλεγματοσειρά 34.970 τριγώνων, υπό την επίδραση διαφόρων μεθόδων απλοποίησης γεωμετρίας. Οι αλγόριθμοι που συγκρίνονται είναι αυτοί (Α) του σφάλματος δευτέρου βαθμού quadric error (Garland and Heckbert, 1997), (Β) του σταθμισμένου σφάλματος δευτέρου βαθμού, quadric error weighted (Garland and Heckbert, 1997), (Γ) της απλοποίησης του Melax (Melax, 1998) καθώς και (Δ) της επαναληπτικής αφαίρεση τριγώνων βάσει μήκους πλευρών. Η πλεγματοσειρά απλοποιείται με σταθερό ποσοστιαίο βήμα, ενώ τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται ανταποκρίνονται στο τελικό πλήθος των τριγώνων της πλεγματοσειράς. Ας σημειωθεί ότι η απλοποίηση εφαρμόζεται σε κάθε περίπτωση στην ίδια αρχική πλεγματοσειρά. Χαρακτηριστικό φαινόμενο είναι η εμφάνιση ασυνεχειών στις απλοποιημένες εκδόσεις της γεωμετρίας. Αυτό γίνεται ιδιαίτερα εμφανές στον αλγόριθμο (Δ) όπου τα κενά εμφανίζονται πολύ νωρίς (πριν από ό,τι στις άλλες μεθόδους) (Pavlidis et al., 2004). Στην Εικόνα 4.4 παρουσιάζονται χαρακτηριστικά παραδείγματα απλοποίησης γεωμετρίας με χρήση των τεσσάρων αυτών προσεγγίσεων.

Κάποια βασικά χαρακτηριστικά που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως κριτήρια αξιολόγησης ενός αλγορίθμου απλοποίησης γεωμετρίας είναι (Garland and Heckbert, 1997):



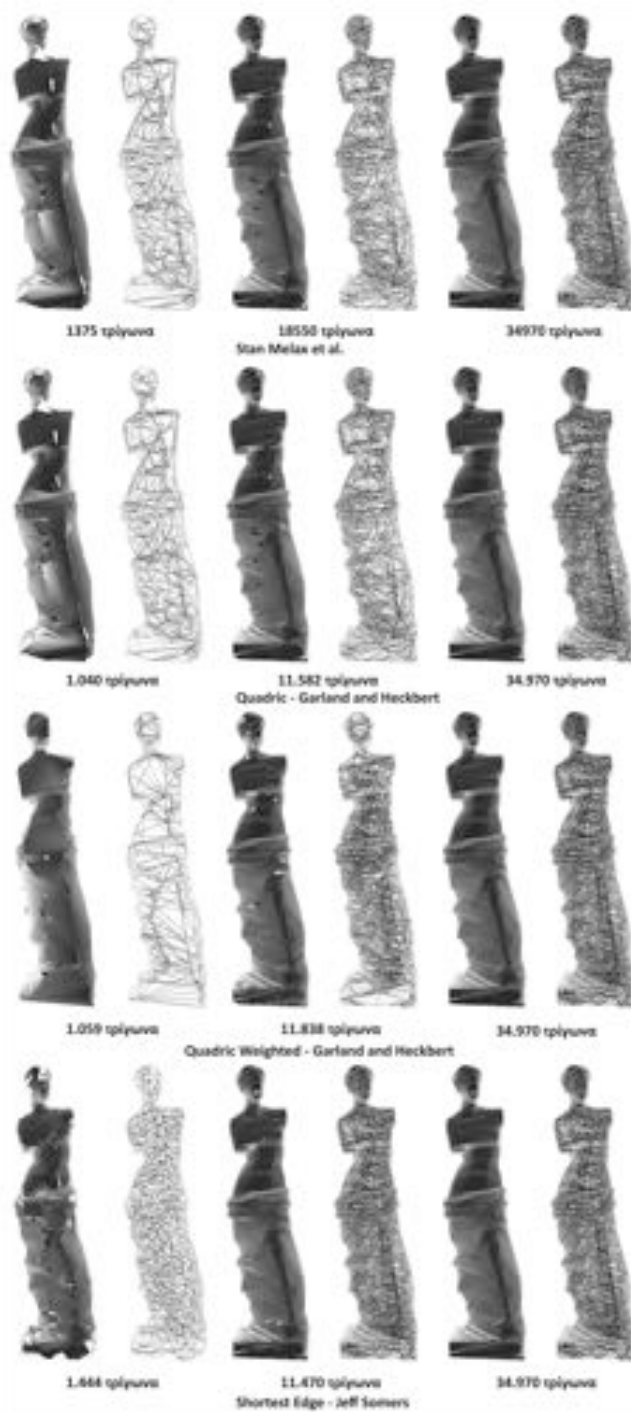
**Πίνακας 4.1.** Διαφοροποιήσεις πλήθους κορυφών σε τριγωνικές πλεγματοσειρές.

Ποσοστό απλοποίηση- σης (%)	(Α) Quadric Error Weighted	(Β) Quadric Error	(Γ) Melax's Simplifica- tion	(Δ) Shortest Edge First
95	1,059	1,040	1,375	1,444
90	2,132	2,116	2,936	3,053
85	3,203	3,267	4,559	4,708
80	4,228	4,632	6,195	6,381
75	5,975	6,205	7,883	8,039
70	7,949	7,959	9,614	9,762
65	9,897	9,782	11,400	11,470
60	11,838	11,582	13,128	13,219
55	13,774	13,429	14,900	14,957
50	15,705	15,310	16,698	16,682
45	17,621	17,198	18,550	18,437
40	19,558	19,116	20,309	20,172
35	21,500	21,111	22,081	21,955
30	23,432	23,120	23,963	23,711
25	25,136	25,100	25,933	25,467
20	27,172	27,209	27,901	27,168
15	29,294	29,292	29,766	28,849
10	31,271	31,217	31,656	30,602
5	33,167	33,132	33,440	34,920
0	34,970	34,970	34,970	34,970

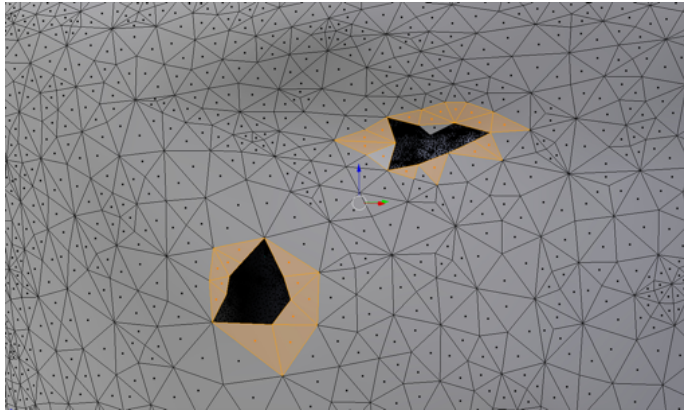
- Αποτελεσματικότητα: η ικανότητα του αλγόριθμου να απλοποιεί με γρήγορους ρυθμούς σύνθετες πλεγματοσειρές.
- Ποιότητα: οι προσεγγίσεις που προκύπτουν από τον αλγόριθμο διατηρούν την υψηλότερη δυνατή πιστότητα των λεπτομερειών και της επιφάνειας του λεπτομερούς 3Δ ψηφιακού αντιγράφου.
- Γενικότητα: η αναμενόμενη συμπεριφορά του αλγορίθμου είναι ίδια κάτω από οποιεσδήποτε πιθανές μορφές επιφάνειας.

#### 4.2.8 Απαλοιφή γεωμετρικών ασυνεχειών

Σε ομαλές ή επίπεδες επιφάνειες η συμπλήρωση των γεωμετρικών ασυνεχειών στη γεωμετρία μπορεί να πραγματοποιηθεί με απλή διαδικασία παρεμβολής. Στην Εικόνα 4.5 παρουσιάζεται τυπικό παράδειγμα πλεγματοσειράς με δύο σημεία με γεωμετρικές ασυνέχειες του τύπου της οπής, που εμφανίζονται ως περριοχές με μαύρο χρώμα. Οι Wang and Oliveira (2003) περιγράφουν μια διαδικασία για την αυτόματη αναγνώριση γεωμετρικών ασυνεχειών σε πλεγματοσειρές και την απαλοιφή τους. Οι οπές αναγνωρίζονται αναλύοντας την πλεγματοσειρά σε κυκλική φορά, ενώ, ταυτόχρονα, πραγματοποιείται αναζήτηση για μη



Εικόνα 4.4. Αποτελέσματα διαφορετικών αλγορίθμων απλοποίησης τριγωνικών πλεγματοσειρών.



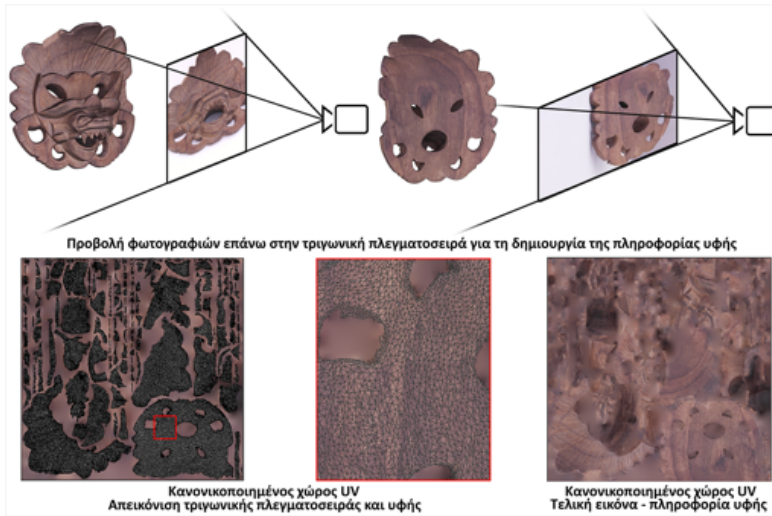
**Εικόνα 4.5.** Αναγνώριση ασυνεχειών σε πλεγματοσειρά.

κοινές πλευρές. Ο αλγόριθμος δεν αντιλαμβάνεται τις περιοχές που πάσχουν από υποδειγματοληψία (αραιά τοποθετημένες κορυφές). Σε αυτές τις περιπτώσεις απαιτείται η συμβολή του χρήστη, ο οποίος πρέπει να αναγνωρίσει χειροκίνητα τα κενά που προκύπτουν. Τα τρίγωνα που εμφανίζονται χρωματισμένα με πορτοκαλί ανοικτό χρώμα στην Εικόνα 4.5 αποτελούν τα «συμφραζόμενα» παρεμβολής, πάνω στα οποία βασίζεται ο αλγόριθμος για να συμπληρώσει τα κενά της πλεγματοσειράς. Αν και υπάρχουν αρκετές και διαφορετικές τεχνικές απαλοιφής ασυνεχειών, τα αποτελέσματά τους, τις περισσότερες φορές, δεν είναι τα αναμενόμενα. Δεν παύουν όμως, να αποτελούν σημαντικά εργαλεία αντιμετώπισης του συγκεκριμένου προβλήματος. Μια εναλλακτική τεχνική για τη συμπλήρωση κενών σε νέφη σημείων έχει προταθεί από τους (Carr et al., 2001). Η τεχνική χρησιμοποιεί αρμονικές συναρτήσεις, διαχειρίζεται μεγάλους όγκους δεδομένων και παράγει εντυπωσιακά αποτελέσματα, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως τεχνική τμηματοποίησης και αναδιοργάνωσης νεφών σημείων. Για πρακτικές εφαρμογές και πειραματισμούς, το ανοικτό λογισμικό Meshlab διαθέτει αρκετές μεθόδους απαλοιφής γεωμετρικών ασυνεχειών.

#### 4.2.9 Δημιουργία υφής

Σε εφαρμογές αντίστροφης μηχανικής, η χρωματική πληροφορία των αντικειμένων που ψηφιοποιούνται δεν είναι απαραίτητη και ίσως αποτελεί κάποιες φορές πλεονασμό. Κάτι τέτοιο βέβαια έρχεται σε αντίθεση με τις ανάγκες ψηφιοποίησης σε άλλες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα σε αυτές στο χώρο του πολιτισμού. Η πληροφορία υφής προσδίδει στο αντικείμενο ακρίβεια αποτύπωσης αλλά και φωτορεαλισμό. Μεγάλο τμήμα της πληροφορίας που φέρουν τα τέχνηρα βρίσκεται αποτυπωμένο στην υφή τους. Πολλές είναι οι περιπτώσεις, στις οποίες η διακόσμηση ενός αγγείου φέρει ζωτικής σημασίας πληροφορία τεκμηρίωσης για έναν αρχαιολόγο.

Η συνθετική απόδοση της όψης ενός αντικειμένου είναι ένα από τα τε-



Εικόνα 4.6. Προβολή τμημάτων εικόνων πάνω στην πλεγματοσειρά για τη δημιουργία υφής.

λευταία στάδια της διαδικασίας ψηφιοποίησης. Πολλές εφαρμοσμένες τεχνικές προβάλλουν φωτογραφίες πάνω στη γεωμετρία του αντικειμένου για να δημιουργήσουν τους λεγόμενους χάρτες υφής (texture maps), όπως γραφικά απεικονίζεται στην Εικόνα 4.6.

Διαφορετικές εικόνες συγχωνεύονται για τη δημιουργία του τελικού χάρτη υφής. Η συγχώνευση αυτή πραγματοποιείται με τη χρήση τεχνικών ανάμειξης των χρωμάτων στα όρια των εικόνων για την απαλοιφή χρωματικών ασυνεχειών. Εκτός από το μεγάλο πλεονέκτημα της ρεαλιστικής απόδοσης του αντικειμένου, η συγκεκριμένη μέθοδος παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα, καθώς η πληροφορία υφής του αντικειμένου εμφανίζεται κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες φωτισμού, οι οποίες δεν είναι άλλες από αυτές κατά τις οποίες το αντικείμενο ψηφιοποιήθηκε. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες για την παραγωγή χαρτών υφής ανεξαρτήτως συνθηκών φωτισμού (Dana and Nayar, 1999; Malzbender et al., 2001; Sgrenzaroli and Wolfart, 2002).

Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι το πρόβλημα των οπών ή γενικά των ασυνεχειών υπάρχει και στην περίπτωση της υφής και απαιτείται μέθοδος ανακατασκευής της πληροφορίας υφής στα προβληματικά αυτά σημεία. Η προσέγγιση των μετακινούμενων ελαχίστων τετραγώνων moving least squares μπορεί να εφαρμοστεί για την ανακατασκευή τεχνητών και ομαλά μεταβαλλόμενων χρωμάτων. Αυτό επιτυγχάνεται με την αντικατάσταση της χρωματικής τιμής ενός εικονοστοιχείου ανάλογα με τις τιμές που έχει η γεωμετρία στον άξονα  $Z$  στο συγκεκριμένο σημείο σε συνδυασμό με τη χρωματική πληροφορία από τα γειτονικά του σημεία (Pavlidis et al., 2004).

## Βιβλιογραφία

- Alexa, M., Behr, J., Cohen-Or, D., Fleishman, S., Levin, D., and Silva, C. T. (2003). Computing and rendering point set surfaces. *IEEE Transactions on visualization and computer graphics*, 9(1):3–15.
- Bernardini, F., Mittleman, J., Rushmeier, H., Silva, C., and Taubin, G. (1999). The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 5(4):349–359.
- Bernardini, F. and Rushmeier, H. (2002). The 3d model acquisition pipeline. In *Computer graphics forum*, volume 21, pages 149–172. Wiley Online Library.
- Bertozzi, M., Broggi, A., Conte, G., and Fascioli, A. (2002). Stereo-vision system performance analysis. *Enabling Technologies for the PRASSI Autonomous Robot*, pages 68–73.
- Besl, P. J. and McKay, N. D. (1992). Method for registration of 3-d shapes. In *Sensor Fusion IV: Control Paradigms and Data Structures*, volume 1611, pages 586–607. International Society for Optics and Photonics.
- Carr, J. C., Beatson, R. K., Cherrie, J. B., Mitchell, T. J., Fright, W. R., McCallum, B. C., and Evans, T. R. (2001). Reconstruction and representation of 3d objects with radial basis functions. In *ACM Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 67–76.
- Cignoni, P., Montani, C., and Scopigno, R. (1998). A comparison of mesh simplification algorithms. *Computers & Graphics*, 22(1):37–54.
- Corrêa, W. T., Fleishman, S., and Silva, C. T. (2002). Towards point-based acquisition and rendering of large real-world environments. In *Computer Graphics and Image Processing, 2002. Proceedings. XV Brazilian Symposium on*, pages 59–66. IEEE.
- Cortelazzo, G. M. and Marton, F. (1999). About modeling cultural heritage objects with limited computers resources. In *Image Analysis and Processing, 1999. Proceedings. International Conference on*, pages 848–853. IEEE.

- Dana, K. and Nayar, S. (1999). Computer vision. In *In the Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Computer Vision*, volume 2, pages 20–27.
- Garland, M. and Heckbert, P. S. (1997). Surface simplification using quadric error metrics. In *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 209–216. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- Lorensen, W. E. and Cline, H. E. (1987). Marching cubes: A high resolution 3d surface construction algorithm. In *ACM siggraph computer graphics*, volume 21, pages 163–169. ACM.
- Malzbender, T., Gelb, D., and Wolters, H. (2001). Polynomial texture maps. In *In ACM Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 519-528)*.
- Melax, S. (1998). A simple, fast, and effective polygon reduction algorithm. *Game Developer*, 11:44–49.
- Pavlidis, G., Koutsoudis, A., Tsioukas, V., and Arnaoutoglou, F. (2004). Digitech iii - Μελέτη Ψηφιοποίησης 3Δ Κινητών Αντικειμένων. Official website. <http://www.ipet.gr/digitech/>.
- Sgrenzaroli, M. and Wolfart, E. (2002). Accurate texture-mapped 3d models for documentation, surveying and presentation purposes. In *Proc. CIPA-ISPERS Int. Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording*, pages 1–2.
- Wang, J. and Oliveira, M. M. (2003). A hole-filling strategy for reconstruction of smooth surfaces in range images. In *In IEEE XVI Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing, SIBGRAPI 2003.*, pages 11–18.

*—With software there are only two possibilities: either the users control the programme or the programme controls the users. If the programme controls the users, and the developer controls the programme, then the programme is an instrument of unjust power.*

Richard M. Stallman

# 5

## Λογισμικό

### 5.1 Εισαγωγή

Κάθε σύστημα ψηφιοποίησης συνοδεύεται από λογισμικό, το οποίο, εκτός από τη διαχείριση του συστήματος επιτρέπει την αποτελεσματική επεξεργασία και εξαγωγή διαφορετικών 3Δ ψηφιακών αντιγράφων και παραγώγων. Το λογισμικό που ακολουθεί τα συστήματα ψηφιοποίησης βασίζεται συνήθως στη γνωστή αρχιτεκτονική ολοκλήρωσης ανεξάρτητων μονάδων (modules). Κάθε μονάδα αναλαμβάνει να βοηθήσει το χειριστή του συστήματος στην αποπεράτωση μια συγκεκριμένης διαδικασίας. Η λειτουργικότητα και οι δυνατότητες του λογισμικού επηρεάζουν την ποιότητα του τελικού 3Δ ψηφιακού αντιγράφου ή παραγώγου και του συνολικού χρόνου που απαιτείται για την επεξεργασία των δεδομένων του. Όπως προαναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφαλαίο, μια τυπική διαδικασία 3Δ αποτύπωσης αποτελείται από διαφορετικά βήματα που ακολουθούνται με μια συγκεκριμένη σειρά ανάλογα με τη μέθοδο και το αντικείμενο. Έχοντας σαν κριτήριο αυτά τα βήματα μπορούμε να προσδιορίσουμε κάποιες βασικές μονάδες λογισμικού για τις εξής εργασίες:

- Έλεγχος του συστήματος ψηφιοποίησης.
- Επεξεργασία και βελτιστοποίηση του νέφους σημείων.
- Έλεγχος και σύγκριση της ποιότητας των αποτελεσμάτων.
- Δημιουργία πολυγωνικών πλεγματοσειρών.
- Επεξεργασία και χαρτογράφηση της υφής στην επιφάνεια του μοντέλου

(texture mapping) με δυνατότητες προσομοίωσης σύνθετων επιφανειακών χαρακτηριστικών (γυαλάδα, τραχύτητα, κοκ.).

- Διαχείριση των τελικών δεδομένων και μεταδεδομένων και οργάνωση της πληροφορίας.

Σε κάποιες περιπτώσεις, ενώ οι επιδόσεις ενός συστήματος είναι εντυπωσιακές, το λογισμικό που το συνοδεύει είναι κατώτερο των απαιτήσεων ή πολύ δύσκολο (Boehler et al., 2002). Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι κάποιες από τις μονάδες λογισμικού απαιτούν γνώσεις προγραμματισμού και εμπειρία. Είναι σύνηθες φαινόμενοι το ότι οι εταιρείες κατασκευής συστημάτων ψηφιοποίησης δίνουν μεγάλη έμφαση στο φυσικό σύστημα και πολύ λιγότερη στο λογισμικό, συνήθως για λόγους κόστους. Από την άλλη, γνωστά εμπορικά πακέτα λογισμικού σχεδίασης με υπολογιστή (Computer Aided Design (CAD)) και 3D μοντελοποίησης δεν είναι φτιαγμένα για να μπορούν να χειριστούν το μεγάλο όγκο πληροφορίας που αποδίδουν οι σαρωτές. Έτσι, ανεξάρτητοι κατασκευαστές λογισμικού έχουν ήδη επενδύσει στην ανάπτυξη εξειδικευμένου λογισμικού επεξεργασίας δεδομένων που προέρχονται αποκλειστικά από συστήματα 3D σάρωσης. Καθώς, μάλιστα, το ενδιαφέρον για την 3D ψηφιοποίηση συνεχώς αυξάνεται δίνεται στους κατασκευαστές ένα χρονικό περιθώριο να συνεχίσουν να αναπτύσσουν τις εφαρμογές τους παράλληλα με την εξέλιξη των συστημάτων, πραγματοποιώντας έτσι, έμμεσα, μια μακροπρόθεσμη επένδυση. Σήμερα, οι ανάγκες ενός χρήστη που επιθυμεί γρήγορη και αξιόπιστη επεξεργασία 3D δεδομένων δεν καλύπτονται από ένα και μοναδικό πακέτο λογισμικού. Σε κάποιες μάλιστα πολύ ειδικές περιπτώσεις ο χρήστης αναγκάζεται να κατασκευάσει τα δικά του εργαλεία λογισμικού για να καλύψει κάποιες πολύ συγκεκριμένες ανάγκες. Βλέποντας την πρόοδο που σημειώνεται στην αγορά 3D συστημάτων ψηφιοποίησης τα τελευταία χρόνια μπορεί κάποιος να ελπίζει πως σύντομα η συγκεκριμένη τεχνολογία θα υποστηρίζεται από λογισμικό υψηλής ποιότητας.

## 5.2 Λειτουργικότητα των λογισμικών

Στην ενότητα αυτή γίνεται αναφορά στη λειτουργικότητα και σε κάποια χαρακτηριστικά του λογισμικού των συστημάτων 3D ψηφιοποίησης που παίζουν σημαντικό ρόλο στη χρήση του συστήματος κατά τη διάρκεια της συλλογής δεδομένων αλλά και στην επεξεργασία των πρωτογενών ψηφιακών δεδομένων. Η αναφορά αυτή σχετίζεται με τα βασικά είδη λογισμικών που αφορούν στην 3D ψηφιοποίηση, συμπεριλαμβάνοντας τα λογισμικά ελέγχου των συστημάτων και τα λογισμικά επεξεργασίας δεδομένων.

Πολλές είναι οι φορές κατά τις οποίες η πολυπλοκότητα ενός συστήματος 3D ψηφιοποίησης αντικατοπτρίζεται και στο λογισμικό που το συνοδεύει και εστιάζει στον έλεγχο του συστήματος σάρωσης. Η βασική λειτουργικότητα που

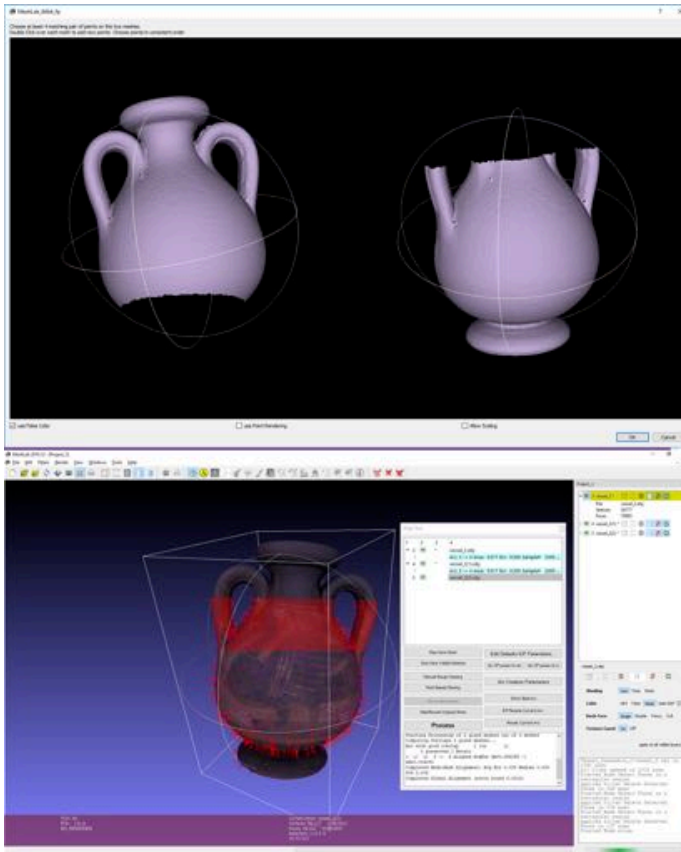


προσφέρουν τα λογισμικά αυτά σχετίζεται με τον πλήρη έλεγχο του συστήματος κατά τη διάρκεια της διαδικασίας συλλογής δεδομένων.

Μια βασική λειτουργικότητα ελέγχου σχετίζεται με τη δυνατότητα εποπτείας της συλλογής δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Έχοντας εποπτεία των δεδομένων που προκύπτουν, ο χειριστής μπορεί να προβεί σε ρυθμίσεις και διορθώσεις στις παραμέτρους του συστήματος που επηρεάζουν τη διαδικασία αποτύπωσης. Οι ρυθμίσεις αυτές μπορεί να είναι η ακρίβεια αποτύπωσης, η ένταση της ακτίνας λέιζερ (σε συστήματα λέιζερ), ή η ένταση φωτεινότητας του μοτίβου (σε συστήματα δομημένου φωτισμού). Οι βέλτιστες ρυθμίσεις σχετίζονται με την ποιότητα της πληροφορίας που παρέχει το λογισμικό του συστήματος προς το χειριστή του. Από την άλλη, κάποια συστήματα επιτρέπουν τη ρύθμιση των οπτικών τους αισθητηρίων με αποτέλεσμα την άμεση βελτίωση ποιότητας των δεδομένων. Σε χειροκίνητα συστήματα που βασίζονται σε κάποιο βραχίονα μπορεί να παρέχεται η δυνατότητα προβολής του νέφους σημείων καθώς αυτό δημιουργείται σε πραγματικό χρόνο. Ο χειριστής του συστήματος μπορεί να περιστρέψει το νέφος και γενικά να το φέρει σε εκείνη την οπτική γωνιά που εξυπηρετεί την καλύτερη εποπτεία. Το σημείο του αντικειμένου πάνω στο οποίο ανακλάται η δέσμη φωτός εμφανίζεται κάποιες φορές με διαφορετικό χρώμα μέσα στο νέφος σημείων. Αυτό επίσης αποτελεί απαραίτητη πληροφορία για το χειριστή που θα πρέπει να είναι ενήμερος σε κάθε χρονική στιγμή για το σημείο της επιφάνειας που αποτυπώνεται, ώστε να αποφασίζει αν θα επιμένει περισσότερο σε αυτό σημείο ή θα προχωρήσει στη συλλογή δεδομένων από κάποιο άλλο (Pavlidis et al., 2004).

Ο όγκος πληροφορίας αυξάνεται ανάλογα με τις διαστάσεις του αντικειμένου που αποτυπώνεται. Το λογισμικό, για να μπορέσει να ανταποκριθεί στις ανάγκες του χειριστή του συστήματος και να εξυπηρετεί άμεσα τις εντολές του, χρησιμοποιεί σύνθετους αλγόριθμους που μειώνουν τον όγκο πληροφορίας με έξυπνο τρόπο, ώστε να επιτρέπουν στον υπολογιστή να παρουσιάζει τα δεδομένα με υψηλούς ρυθμούς ανανέωσης. Η μείωση του όγκου δεδομένων βασίζεται πολλές φορές στην αναγνώριση των σημείων που ανήκουν στο οπτικό πεδίο του χειριστή (clipping plane). Το λογισμικό αναλαμβάνει μόνο του να υπολογίσει το βέλτιστο συμβιβασμό ανάμεσα στην πυκνότητα του νέφους σημείων και στην ταχύτητα απόκρισης στις εντολές. Ο χειριστής μπορεί να περιστρέψει το νέφος, να πλησιάσει ή να απομακρυνθεί από αυτό σε έναν εικονικό 3D χώρο, καθώς επίσης και να επιλέγει τμήματα από το νέφος ή ακόμα και μεμονωμένα σημεία.

Οι διαδικασίες που εφαρμόζονται κατά την επεξεργασία των δεδομένων έχουν υψηλές απαιτήσεις, τόσο σε επίπεδο αλγορίθμων, όσο και σε επίπεδο ενός λειτουργικού γραφικού περιβάλλοντος που θα επιτρέπει στο χειριστή του συστήματος να πραγματοποιεί τις εργασίες του εύκολα. Μερικές από τις βασικότερες ευκολίες που παρέχει το λογισμικό για την επεξεργασία των δεδομένων περιλαμβάνει τη δυνατότητα ευθυγράμμισης τμηματικών σαρώσεων, τη δυνατότητα φιλτραρίσματος του νέφους σημείων, τη δημιουργία πολυγωνικών



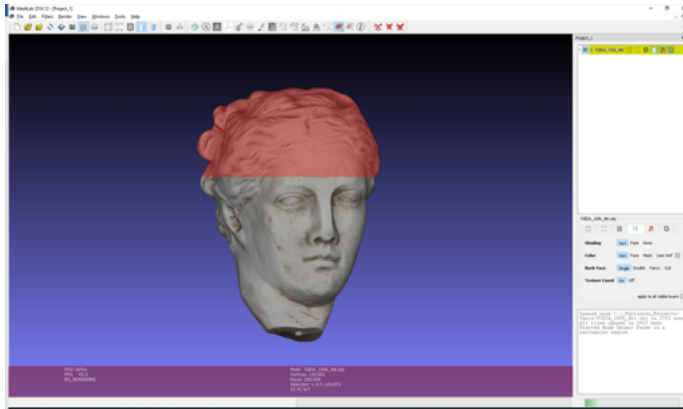
Εικόνα 5.1. Γραφικό περιβάλλον λογισμικού MeshLab για την ευθυγράμμιση τμηματικών σαρώσεων.

πλεγματοσειρών και τη χαρτογράφηση της πληροφορίας υψής στο 3D μοντέλο.

Η διαδικασία ευθυγράμμισης είναι μια χειροκίνητη ή ημι-αυτόματη διαδικασία που πραγματοποιείται από το χειριστή μέσα σε ένα 3D διαδραστικό περιβάλλον. Σημαντικό λοιπόν για το χειριστή είναι να μπορεί να χρησιμοποιεί και να διακρίνει τους ειδικούς στόχους που ορίζουν τα ομόλογα σημεία ανάμεσα στις τμηματικές σαρώσεις. Η καλύτερη λύση που μπορεί να προσφέρει ένα λογισμικό για τη διαδικασία ευθυγράμμισης είναι ο ταυτόχρονος έλεγχος των επικαλυπτόμενων τμημάτων αλλά και των σημείων αναφοράς που δίνει ο χειριστής. Στην Εικόνα 5.1 φαίνεται το γραφικό περιβάλλον του ανοικτού κώδικα Meshlab<sup>1</sup>.

Ένα ποιοτικό λογισμικό επεξεργασίας 3D ψηφιακών αντιγράφων θα πρέπει να μπορεί να πραγματοποιήσει τον ομαλό καταμερισμό κορυφών στην επιφάνεια που ορίζει ένα νέφος σημείων. Σε προηγμένα λογισμικά προσφέρεται η δυνατότητα ορισμού κατωφλίων και άλλων ρυθμίσεων που αφορούν στα

<sup>1</sup>Meshlab, <http://www.meshlab.net/>.



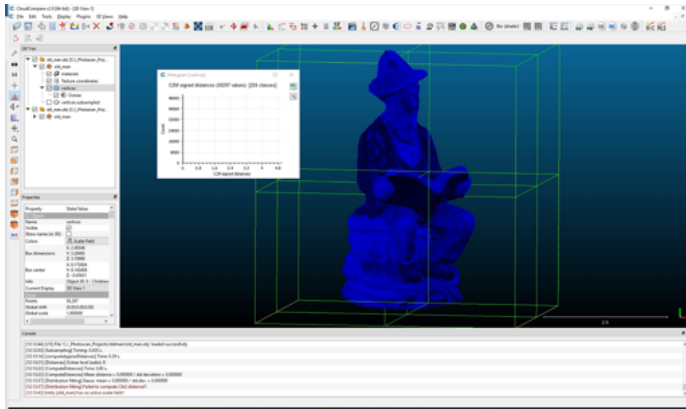
**Εικόνα 5.2.** Εμφάνιση 3Δ μοντέλου στο γραφικό περιβάλλον του λογισμικού MeshLab.

συγκεκριμένα φίλτρα, πχ. στην επιλογή διατήρησης του συνολικού όγκου που καταλαμβάνει το νέφος. Οι επιπρόσθετες αυτές ρυθμίσεις δίνουν στο χειριστή ένα μεγαλύτερο εύρος επιλογών, ενώ βελτιώνουν τα αποτελέσματα της διαδικασίας φιλτραρίσματος. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής των φίλτρων μπορεί να γίνουν, ορισμένες φορές, ιδιαίτερα έντονα. Το λογισμικό ενημερώνει το χειριστή πριν την εφαρμογή του φίλτρου για τα πιθανά του αποτελέσματα. Αυτό προκύπτει είτε με μηνύματα είτε με κάποια ενδεικτικά ποσοστά απώλειας ανάλυσης ανάμεσα στο παράγωγο και στο αρχικό 3Δ ψηφιακό αντίγραφο.

Οι προηγμένοι αλγόριθμοι δημιουργίας πολυγωνικών πλεγμάτων επιτρέπουν τη μοντελοποίηση δομών που μπορεί να έχουν κενά στο εσωτερικό τους αλλά και ανοιχτές δομές, όπως για παράδειγμα το εσωτερικό ενός αγγείου. Το γραφικό περιβάλλον στα περισσότερα λογισμικά αποτελείται από ένα κεντρικό παράθυρο όπου προβάλλεται το 3Δ ψηφιακό αντίγραφο ενώ όλα τα διαθέσιμα εργαλεία βρίσκονται γύρω από αυτό, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.2, η οποία παρουσιάζει ένα 3Δ μοντέλο στο γραφικό περιβάλλον του MeshLab, καθώς και η Εικόνα 5.3 που παρουσιάζει ένα 3Δ μοντέλο στο περιβάλλον του λογισμικού CloudCompare.

Στα πιο πρόσφατα λογισμικά υποστηρίζονται δυνατότητες μοντελοποίησης με Non-Uniform Rational B-Splines (NURBS). Αυτή η μέθοδος μειώνει τον όγκο δεδομένων που απαιτείται για την αποθήκευση του 3Δ ψηφιακού αντιγράφου. Η ανωτερότητά τους εμφανίζεται κυρίως σε αντικείμενα με ομαλές επιφάνειες καθώς συνεισφέρουν στην αφαίρεση του θορύβου πάνω από την πλεγματοσειρά.

Οι διαδικασίες διαχείρισης της πληροφορίας υφής είναι ποικίλες και πολλές φορές αδύνατο να συμπεριληφθούν όλες σε μία και μόνο εφαρμογή, αφού ο ερευνητικός χώρος της φωτογραμμετρίας και της εφαρμοσμένης επεξεργασίας εικόνας είναι ιδιαίτερης ευρύς. Μερικές από τις βασικές ιδέες που έχουν αναπτυχθεί αλγοριθμικά και αποτελούν μονάδες λογισμικού είναι ο συνδυα-



Εικόνα 5.3. Εμφάνιση 3D μοντέλου στο γραφικό περιβάλλον του λογισμικού CloudCompare.



Εικόνα 5.4. Ομαλοποίηση χρωματικών διαφορών στο Viewpoint 3D Photo Studio.

σμός πληροφορίας υφής από διαφορετικές φωτογραφικές πηγές, η προβολή εικόνων πάνω στη γεωμετρία και η ομαλή μείξη τους. Για την επίτευξη χρωματικής ομοιομορφίας το λογισμικό προσφέρει φίλτρα ψηφιογραφικών εικόνων που υλοποιούν διαδικασίες ομαλοποίησης των χρωματικών αποκλίσεων που παρουσιάζουν οι αρχικές φωτογραφίες. Ένα τέτοιο παράδειγμα εφαρμογής φίλτρου εξομάλυνσης χρωματικών αποκλίσεων στο λογισμικό Viewpoint 3D Photo Studio παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.4.

Επίσης, το λογισμικό εξομοιώνει τα χαρακτηριστικά ανακλαστικότητας της επιφάνειας του αντικειμένου και επιτρέπει την απόδοση των επιφανειών με εντονότερα χαρακτηριστικά. Έτσι, με ψηφιακό τρόπο, γίνονται οι αποδόσεις των φωτοσκιάσεων που δημιουργούν οι τραχιές επιφάνειες αλλά και οι ανακλάσεις που δημιουργούν οι λείες και γυαλιστερές επιφάνειες. Παραδείγματα διαφόρων τεχνικών αποδόσης φωτοσκίασης και μη φωτορεαλιστικής απεικόνισης φαίνεται στην Εικόνα 5.5.



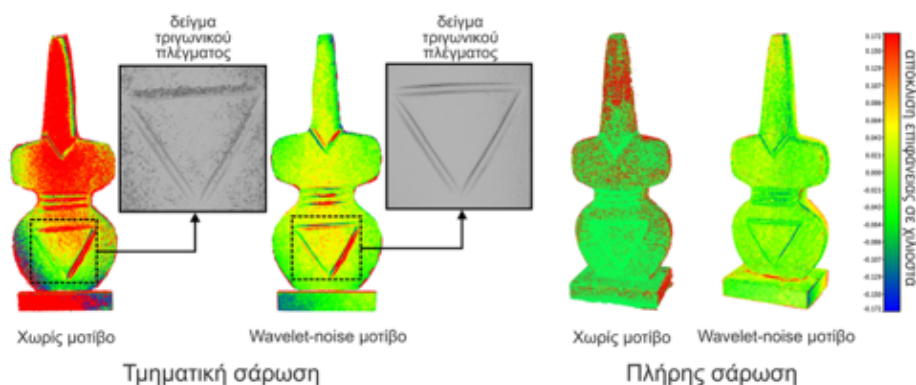
Εικόνα 5.5. Τεχνικές απόδοσης φωτοσκίασης και χαρακτηριστικών επιφάνειας από το λογισμικό MeshLab.

### 5.3 Διαχείριση δεδομένων και καταγραφή διεργασιών

Οι διαδικασίες που απαιτούνται για τη μετάβαση από ένα νέφος σημείων στο τελικό 3D ψηφιακό αντίγραφο είναι πολλές και πολύπλοκες. Είναι χρήσιμο για το λογισμικό να αρχειοθετεί τα βήματα που γίνονται ως ιστορικό ενεργειών, έτσι ώστε να επιτρέπει την επιστροφή σε προηγούμενες καταστάσεις των δεδομένων. Σε διαδικασίες που περιλαμβάνουν μετασχηματισμούς θα πρέπει να αποθηκεύονται και μεταδεδομένα, όπως οι γεωμετρικές αποκλίσεις μετά την εφαρμογή ενός φίλτρου. Το γραφικό περιβάλλον του λογισμικού θα πρέπει να προβάλει τις διαφορές ανάμεσα στο αρχικό νέφος σημείων και στο επεξεργασμένο ψηφιακό αντίγραφο. Το πλήθος των διαφορετικών τύπων αρχείων 3D γεωμετρίας που υποστηρίζει το λογισμικό επιτρέπει τη μεταφορά των δεδομένων σε τρίτες εφαρμογές. Υπάρχουν πολλοί μορφότυποι αρχείων που υποστηρίζονται από το λογισμικό που συνοδεύει τα συστήματα 3D ψηφιοποίησης. Η μετατροπή σε κάποιο από τα πρότυπα γίνεται ενημερώνοντας το χρήστη για τις πιθανές απώλειες ακρίβειας ή αλλαγές που θα υποστούν τα δεδομένα.

### 5.4 Σύγκριση 3Δ δεδομένων

Πολλές φορές υπάρχει η ανάγκη σύγκρισης 3Δ δεδομένων, τα οποία προέρχονται από διαφορετικές πηγές. Η ανάγκη για τέτοια σύγκριση έχει να κάνει με τη συγκριτική αξιολόγηση της ποιότητας των δεδομένων ενός συστήματος σε σχέση με ένα άλλο, την αξιολόγηση της ποιότητας του ψηφιακού αντιγράφου,



Εικόνα 5.6. Οπτικοποίηση της απόκλισης μεταξύ επιφανειών με το λογισμικό CloudCompare.

κοκ. Για την πραγματοποίηση τέτοιων συγκρίσεων έχουν δημιουργηθεί ειδικά λογισμικά, τα οποία υπολογίζουν την απόκλιση μεταξύ των επιφανειών δύο αντικειμένων, συγκρίνοντας είτε τη θέση των κορυφών τους είτε τη θέση των επιφανειών που ορίζει η τριγωνική ή πολυγωνική πλεγματοσειρά που τα περιγράφει. Ένα ελεύθερο λογισμικό που επιτρέπει την υλοποίηση τέτοιων συγκρίσεων είναι το CloudCompare<sup>2</sup>, το οποίο μπορεί να παράγει εύκολα κατανοητές και παραστατικές ψευδοχρωματισμένες απεικονίσεις αποκλίσεων μεταξύ δύο ψηφιακών αντιγράφων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.6.

<sup>2</sup>CloudCompare, <http://www.danielgm.net/cc/>.

## Βιβλιογραφία

- Boehler, W., Heinz, G., Marbs, A., and Siebold, M. (2002). 3d scanning software: an introduction. In *In CIPA Heritage Documentation, International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording*, pages 47–51.
- Pavlidis, G., Koutsoudis, A., Tsioukas, V., and Arnaoutoglou, F. (2004). Digitech iii - Μελέτη Ψηφιοποίησης 3Δ Κινητών Αντικειμένων. Official website. <http://www.ipet.gr/digitech/>.





—Μια μελέτη περίπτωσης είναι μια «άσκηση» που εστιάζει σε έργα του πραγματικού κόσμου τα οποία ολοκληρώθηκαν αφού αντιμετώπισαν προκλήσεις και διλήμματα. Κάθε έργο του πραγματικού κόσμου περιλαμβάνει ένα πρόβλημα, μια ομάδα εργασίας, μια διαδικασία λήψης αποφάσεων, μια μέθοδο υλοποίησης και απτά αποτελέσματα. Η ολοκλήρωση έργων στον πραγματικό κόσμο δίνει πολύτιμα συμπεράσματα που αποτελούν οδηγούς για τη μετέπειτα σχεδίαση και υλοποίηση παρόμοιων ή συναφών έργων.

# 6

## Μελέτη περιπτώσεων

### 6.1 Εισαγωγή

Καθώς η εφαρμογή της 3Δ ψηφιοποίησης στον πολιτισμό έχει βρεθεί μπροστά στο πλήρες φάσμα των πιθανών απαιτήσεων και προκλήσεων, κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική η μελέτη περιπτώσεων από τον τομέα αυτό, οι οποίες αναδεικνύουν την αποτελεσματικότητα αλλά και τους περιορισμούς. Σημειώνεται ότι τα τελευταία χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί σημαντικές ερευνητικές προσπάθειες 3Δ αποτύπωσης του πολιτιστικού αποθέματος με εξαιρετικά αποτελέσματα. Κάποιες από αυτές είχαν διάρκεια που έφτανε έως και μερικά χρόνια. Κύρια αιτία του μεγάλου χρόνου εφαρμογής, ήταν οι χρονοβόρες διαδικασίες αποτύπωσης και επεξεργασίας. Επιπρόσθετα, σημαντικό ρόλο έπαιξε και η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς για τη διαχείριση του μεγάλου όγκου πληροφορίας. Στις ενότητες που ακολουθούν γίνεται αναφορά σε κάποια αξιόλογα έργα 3Δ ψηφιοποίησης με στόχο να δοθεί μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα από το χώρο της γεωμετρικής και φασματικής τεκμηρίωσης του πολιτιστικού αποθέματος που υπογραμμίζει τις δυνατότητες της 3Δ ψηφιοποίησης. Τα έργα αυτά λειτουργούν ταυτόχρονα ως περιπτωσιολογικές μελέτες (case studies) αλλά και ως βάση για τους τρόπους υλοποίησης μελλοντικών έργων.

### 6.2 Ψηφιακός Μιχαήλ Άγγελος

Ένα από τα πρώτα έργα αποτύπωσης είναι το έργο Ψηφιακός Μιχαήλ Άγγελος – Digital Michelangelo - 3D Scanning of Large statues (1998-2000) (Levoy et al., 2000). Η οργάνωση του έργου έγινε με το διαχωρισμό των εργασιών

ψηφιοποίησης σε (α) σχεδίαση και ανάπτυξη του συστήματος ψηφιοποίησης, (β) σάρωση του τέχνηργου και (γ) επεξεργασία δεδομένων και δημιουργία 3Δ ψηφιακού αντιγράφου.

Ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο στο εν λόγω έργο, το οποίο θα πρέπει να τονιστεί, είναι η προσέγγιση της ερευνητικής ομάδας να σχεδιάσει το δικό της σύστημα ψηφιοποίησης με βασικό κριτήριο τις ανάγκες του συγκεκριμένου έργου. Φυσικά, κάτι τέτοιο σχετίζεται με τον προϋπολογισμό του έργου και το διαθέσιμο ανθρώπινο δυναμικό. Ο σαρωτής κατασκευάστηκε από την εταιρεία Cyberware βάσει των απαιτήσεων της ερευνητικής ομάδας. Σχεδιάστηκε έτσι ώστε να συλλέγει πληροφορία σε υψηλή ανάλυση για να μπορεί να αποτυπώσει τα σημάδια που άφησε η σμίλη του Μιχαήλ Άγγελου. Η κατασκευή του συστήματος ψηφιοποίησης επέτρεψε την αποτύπωση επιφανειών οποιασδήποτε κλίσης, καθώς το σύστημα μπορούσε να κινηθεί τόσο προς κάθετες όσο και προς οριζόντιες διευθύνσεις. Στα μειονεκτήματα του συστήματος συγκαταλέγονται η δυσκολία μετακίνησης λόγω βάρους και η χρονοβόρα διαδικασία εγκατάστασης. Για την αποτύπωση της πληροφορίας υψής χρησιμοποιήσαν ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές. Μετά από διαδικασίες επεξεργασίας και βαθμονόμησης χαρτογραφήθηκαν στο 3Δ ψηφιακό αντίγραφο τμήματα που προέρχονται από 7.000 εικόνες. Καθώς πολλά σημεία ήταν κοινά ανάμεσα στις φωτογραφίες χρησιμοποιήθηκε η κλασική τεχνική της ανάμειξης χρωμάτων. Ο όγκος γεωμετρικής πληροφορίας του Δαβίδ αγγίζει τα δύο δισεκατομμύρια κορυφές και η μέθοδος συμπίεσης που εφαρμόστηκε είναι ο απλός αλγόριθμος run length encoding. Για την οπτική αναπαράσταση του μεγάλου όγκου πληροφορίας χρησιμοποιήθηκε μια προοδευτική μέθοδος φωτοσκίασης κορυφών. Στην πραγματικότητα στο πλαίσιο του έργου εφαρμόστηκαν αποτελέσματα προηγούμενων ερευνητικών ιδεών που προέρχονται από το χώρο των 3Δ γραφικών υπολογιστών. Μετά την ολοκλήρωση του έργου τέθηκαν μια πληθώρα θεμάτων υπό συζήτησης και έρευνα. Ως πλέον σημαντικά ήταν τα εξής:

- Η κατασκευή συστημάτων 3Δ ψηφιοποίησης που μπορούν να μετακινηθούν και να εγκατασταθούν εύκολα.
- Θεωρήθηκε ότι όλες οι επιφάνειες των αγαλμάτων έχουν χαρακτηριστικά συμβατά κατά Lambert (ματ). Τέτοιες επιφάνειες είναι πολύ δύσκολο να βρεθούν και θα πρέπει να πραγματοποιηθούν μελέτες για τη διάχυση του φωτός στα υποστρώματα του μαρμάρου.
- Τα κενά στα δεδομένα εξαιτίας των γεωμετρικών συνθέσεων θα πρέπει να αντιμετωπισθούν με την ανάπτυξη νέων αλγορίθμων μετασχηματισμού των νεφών σημείων σε πολυγωνικές πλεγματοσειρές.
- Το μέγεθος του 3Δ ψηφιακού αντιγράφου αγγίζει ερευνητικά θέματα αποθήκευσης δεδομένων και τεχνικές για μακροχρόνια αρχειοθέτηση.

**Πίνακας 6.1.** Δεδομένα 3Δ ψηφιοποίησης του Δαβίδ του Μικελάντζελο.

Χαρακτηριστικά αγάλματος		Χαρακτηριστικά ψηφιοποίησης	
Βάρος	~6 τόνοι	Πλήθος τριγώνων	2 δισεκατομμύρια
Όγκος	2,2 m <sup>3</sup>	Πλήθος τμηματικών σαρώσεων	7.000
Επιφάνεια	19 m <sup>2</sup>	Μέγεθος δεδομένων	~32 GB
Ύψος	5,17 m	(συμπίεση χωρίς απώλειες)	
<b>Διαδικασία ψηφιοποίησης</b>			
Μέλη ομάδας ψηφιοποίησης	22		
Ταυτόχρονη παρουσία στο μουσείο	3 άτομα κατά μέσο όρο		
Διάρκεια συλλογής δεδομένων	360 ώρες σε περίοδο 30 ημερών		
Ανθρωπόωρες συλλογής δεδομένων	1.080		
Ανθρωπόωρες επεξεργασίας δεδομένων	1.500		

Εκτός από το ειδικά κατασκευασμένο για το έργο σύστημα, χρησιμοποιήθηκαν αλλά δύο διαφορετικά συστήματα για να καλύψουν τις απαιτήσεις της ψηφιοποίησης. Για τα «δύσκολα» σημεία εφαρμόστηκε ένα χειροκίνητο σύστημα με ρομποτικό βραχίονα της Faro και για τα αρχιτεκτονικά σύνολα γύρω από τα αγάλματα ένα σύστημα της σειράς Cygax από την Leica. Ο Πίνακας 6.1 συνοψίζει κάποια γενικά στατιστικά στοιχεία σχετικά με την αποτύπωση του Δαβίδ (Levoy et al., 2000).

Άλλο ένα έργο του Μιχαήλ Άγγελου, το οποίο αποτέλεσε αντικείμενο έρευνας και ψηφιοποίησης είναι η Florentine Pieta. Το άγαλμα ενδείκνυται για ψηφιοποίηση, καθώς περιέχει ημιτελή και κατεστραμμένα σημεία και μερικώς αποκατεστημένα τμήματα. Το έργο κλήθηκε να υλοποιήσει η εταιρεία IBM, η οποία δήλωνε πως το συγκεκριμένο έργο αποτελεί την πιο εκτεταμένη έρευνα που έχει γίνει σε συγκεκριμένο έργο τέχνης και έχει αποφέρει ταυτόχρονα θετικά αποτελέσματα σε πολλούς τομείς. Ο όγκος των δεδομένων έφερνε στα όριά τους τις τότε μεθόδους οπτικής αναπαράστασης, δίνοντας έτσι το έναυσμα για ανάπτυξη νέων αλγορίθμων και μεθόδων για αποδοτικότερη οπτική απόδοση (Abouaf, 1999). Η μέθοδος που εφαρμόστηκε ήταν η Σχήμα από δομημένο φωτισμό και ως εκ τούτου το τέχνηργο ψηφιοποιήθηκε τμηματικά. Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 800 τμηματικές σαρώσεις σε αποστάσεις από 750 mm έως 1 m. Κάθε τμηματική σάρωση περιέχει από 10 K έως 20 K σημεία και πληροφορία υφής με βάθος χρώματος 24 bpp. Το ύψος του αγάλματος είναι 2,5 m, ενώ το βάρος του αγγίζει τους 10 t. Ο τελικός όγκος των δεδομένων αγγίζει τα 10 GB. Οι δυσκολίες που αντιμετώπισε η ομάδα ψηφιοποίησης σε αυτό το έργο ήταν ποικίλες. Η πρόσβαση στο χώρο του μουσείου όπου φυλάσσεται το γλυπτό επιτρέπονταν μόνο κατά τις νυχτερινές ώρες και κατά τη διάρκεια του Σαββατοκύριακου. Η ομάδα δεν έπρεπε να αφήνει πίσω της το παραμικρό

ίχνος που θα πρόδιδε ότι υλοποιούνται εργασίες μέσα στο χώρο του μουσείου της Φλωρεντίας. Οι δύσκολες συνθήκες εργασίας τελικά επηρέασαν την ποιότητα του 3D ψηφιακού αντιγράφου που παρουσίαζε ασυνέχειες. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι οι γεωμετρικές ασυνέχειες δε μπορούσαν να εντοπιστούν πριν την τελική συγχώνευση των τμηματικών σαρώσεων. Αυτό ανάγκασε την ερευνητική ομάδα να πραγματοποιήσει μια δεύτερη επίσκεψη στο μουσείο. Το τελικό 3D ψηφιακό αντίγραφο φέρει γεωμετρική ακρίβεια που αγγίζει το 1 mm (Abouaf, 1999).

### 6.3 Ερμής του Πραξιτέλη

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ένα έργο ψηφιοποίησης που πραγματοποιήθηκε στην Ελλάδα, στο πλαίσιο ενός ερευνητικού προγράμματος του Υπουργείου Πολιτισμού, στο οποίο η ψηφιοποίηση βασίστηκε αποκλειστικά σε εμπορικά διαθέσιμες λύσεις. Το αντικείμενο της ψηφιοποίησης ήταν ο Ερμής του Πραξιτέλη (343 π.Χ.) και το σύστημα ψηφιοποίησης που χρησιμοποιήθηκε ήταν το δημοφιλές τότε σύστημα Vivid-900 της εταιρείας Minolta. Το έργο περιλάμβανε την κατασκευή ειδικού ικριώματος γύρω από το έργο, έτσι ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί ο σαρωτής σε γωνίες θέασης που θα του επιτρέπουν να αποτυπώσει πλήρως το άγαλμα. Το ικριώμα είχε ξύλινες βάσεις με πλάτος περί το ένα μέτρο και βρισκόνταν σε κάποια απόσταση από το γλυπτό, έτσι ώστε να αποκλεισθεί το ενδεχόμενο πιθανών φθορών από την επαφή του με το σαρωτή ή τις καλωδιώσεις. Αναπτύχθηκε σχέδιο συλλογής δεδομένων που όριζε τα σημεία ψηφιοποίησης, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το σύνολο των τμηματικών σαρώσεων και, ταυτόχρονα, να εξασφαλισθεί ακόμα περισσότερο η ακεραιότητα του αγάλματος. Οι ελαφρές ταλαντώσεις και μετατοπίσεις του ικριώματος προκάλεσαν σε αρκετά σημεία θόρυβο στα δεδομένα. Όλες οι τμηματικές σαρώσεις πραγματοποιήθηκαν από απόσταση 1 m από το άγαλμα, με ανάλυση 0,5 mm και ακρίβεια μέτρησης 0,25 mm.

Σκοπός της μελέτης ήταν η αποτύπωση των λεπτομερειών που άφηνε η σμίλη του Πραξιτέλη. Η Ελληνική ομάδα αντιμετώπισε το ίδιο πρόβλημα με την ομάδα της IBM στο Digital Michelangelo, καθώς το μουσείο ήταν αυτό που αποφάσιζε για το χρονοδιάγραμμα πραγματοποίησης των εργασιών συλλογής δεδομένων που τελικά διήρκεσαν δύο ημέρες. Οι τμηματικές σαρώσεις που προέκυψαν είχαν ένα ποσοστό επικάλυψης ~30%, για την ορθή ενοποίηση και την αναγνώριση πιθανών πηγών θορύβου στην 3D γεωμετρία. Το πλήθος των τμηματικών σαρώσεων ήταν 649 και η τριγωνική πλεγματοσειρά αποτελούνταν από ~270 εκατομμύρια τρίγωνα. Το σύνολο των δεδομένων ήταν περί τα 10 GB, ενώ ο συμπιεσμένος όγκος τους έφτανε τα 4 GB. Ένα από τα βασικά συμπεράσματα της ομάδας ψηφιοποίησης αποτελεί η αναφορά στην επάρκεια δυνατοτήτων του συστήματος να αποτυπώσει γεωμετρικές λεπτομέρειες μικρότερες και από 1 mm (Ioannidis and Tsakiri, 2003).

## 6.4 Η Μαγδαληνή του Ντονατέλλο

Η Μαγδαληνή του Ντονατέλλο (1455) είναι ξύλινο γλυπτό ύψους 1,8 m. Υπέστη φθορές εξαιτίας μιας πλημμύρας, και έχασε το χρυσό στρώμα που το κάλυπτε. Συνεπώς, η προσπάθεια 3D αποτύπωσης έγινε με το γλυπτό να παρουσιάζει μια σκοτεινή χρωματικά επιφάνεια ασύμβατη με τις μεθόδους ψηφιοποίησης. Έτσι, επιχειρήθηκε ένας συνδυασμός της μεθόδου Σχήμα από δομημένο φωτισμό και φωτογραμμετρίας. Οι φωτογραμμετρικές μετρήσεις βοήθησαν στην ακριβέστερη ενοποίηση των τμηματικών σαρώσεων με αποτέλεσμα το 3D ψηφιακό αντίγραφο της Μαγδαληνής να είναι γεωμετρικής ακρίβειας της τάξης 0,5 mm. Το σύστημα ψηφιοποίησης που χρησιμοποιήθηκε ήταν της εταιρίας Optonet, το οποίο λειτουργεί σε ένα ρυθμό συλλογής ~210 K σημείων ανά δευτερόλεπτο. Η μέθοδος των τμηματικών σαρώσεων με κοινά σημεία ακολουθήθηκε και σε αυτή την περίπτωση. Ο αλγόριθμος ICP χρησιμοποιήθηκε για την ευθυγράμμιση των τμηματικών σαρώσεων. Σκοπός του έργου ήταν να μετρηθεί το άγαλμα με υψηλή ακρίβεια και όχι να παρουσιασθεί σε κάποιο εικονικό περιβάλλον. Η ομάδα του έργου πιστεύει πως κατάφερε με το συνδυασμό μεθοδολογιών που υιοθέτησε να προσφέρει σημαντική πρόοδο στο χώρο της ψηφιακής αποτύπωσης αντικειμένων πολιτισμικής κληρονομιάς (Guidi et al., 2004).

## 6.5 Αγάλματα Φαραώ Πέπι

Το 1897 ανακαλύφθηκαν δύο μεταλλικά αγάλματα του Φαραώ Πέπι του πρώτου (Heinz, 2002). Το Γερμανικό Αρχαιολογικό Ινστιτούτο σε συνεργασία με άλλους οργανισμούς ανέλαβε την αναπαλαίωση και τη ψηφιακή τεκμηρίωση των αγαλμάτων. Το μεγαλύτερο άγαλμα έχει ύψος 1,78 m ενώ το μικρότερο μόλις 65 cm και είναι κατασκευασμένα από φύλλα χαλκού ενωμένα με ένα είδος μεταλλικών ελασμάτων. Για την ολοκλήρωση της διαδικασίας τεκμηρίωσης τα αγάλματα αποτυπώθηκαν με ένα σύστημα της εταιρείας Mensi, το οποίο υλοποιεί τη μέθοδο τριγωνισμού λείζερ. Η διαδικασία ψηφιοποίησης διήρκεσε περίπου οκτώ ημέρες, ενώ για μια ακόμη φορά, η ομάδα ψηφιοποίησης αντιμετώπισε προβλήματα πρόσβασης στα αντικείμενα, αφού το μουσείο επέτρεπε την αποπεράτωση των εργασιών μόνο σε συγκεκριμένες ώρες. Το μεγαλύτερο άγαλμα αποτυπώθηκε από 29 διαφορετικές οπτικές γωνίες καταγράφοντας 1,8 εκατομμύρια κορυφές. Για το μικρό άγαλμα αποτυπώθηκαν 10 οπτικές γωνίες και ανακτήθηκαν 500 K κορυφές. Η ακρίβεια αποτύπωσης άγγιζε το 1 mm, μια αποδεκτή ακρίβεια. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας επεξεργασίας των δεδομένων, η αναπαράσταση του μεγάλου αγάλματος αποτελούνταν από 2 εκατομμύρια τρίγωνα και του μικρότερου από 900 K τρίγωνα. Η ομάδα ψηφιοποίησης περιγράφει, σαν πρώτη πρόκληση που αντιμετώπισε, τη λειτουργία του συστήματος ψηφιοποίησης σε περιβάλλον με θερμοκρασίες που άγγιζαν

τα όρια λειτουργίας του. Αναφέρεται, επίσης ως περιορισμός, ο αργός ρυθμός συλλογής δεδομένων που αποδίδει το συγκεκριμένο σύστημα. Το συνολικό βάρος του εξοπλισμού που μεταφέρθηκε από τη Γερμανία στην Αίγυπτο ήταν 150 κιλά (Heinz, 2002).

## 6.6 Παλαιολιθικά ευρήματα

Σε ένα έργο αναζήτησης μεθόδων δημοσίευσης ευρημάτων της παλαιολιθικής εποχής, Γερμανοί αρχαιολόγοι και μηχανικοί συνεργάστηκαν στην ανάπτυξη μια ειδικευμένης μεθοδολογίας 3D ψηφιοποίησης. Τα ευρήματα προέρχονταν από την κοιλάδα του ποταμού Ρήνου. Το μεγάλο πλήθος ευρημάτων απαιτούσε μια μέθοδο γρήγορης αποτύπωσης. Η μέθοδος Σχήμα από δομημένο φωτισμό επιλέχθηκε ως η καλύτερη λύση συνυπολογίζοντας τόσο τον διαθέσιμο χρόνο όσο και την απαιτούμενη ποιότητα. Η επιλογή του εμπορικού συστήματος έγινε με κριτήριο το μέγιστο βαθμό διαθέσιμων οπτικών πεδίων. Το ATOS II της εταιρείας GOM GmbH επιλέχθηκε μέσα από ένα πλήθος άλλων υποψήφιων εμπορικών συστημάτων. Οι ρυθμίσεις του σαρωτή επέτρεψαν την αποτύπωση όγκου πληροφορίας που αγγίζει τα  $250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ . Το λογισμικό που συνοδεύει το σύστημα προβολής δομημένου φωτός δύναται να επεξεργαστεί 1,3 εκατομμύρια κορυφές με ακρίβεια μέτρησης 0,02 mm. Έτσι, ο χρόνος αποτύπωσης του κάθε αντικειμένου άγγιξε τα 45 λεπτά. Στο χρόνο αυτό περιλαμβάνεται η ενοποίηση των τμηματικών σαρώσεων και η απλοποίηση της γεωμετρικής ασυνέχειας. Με τη χρήση εμπορικού λογισμικού επιτεύχθηκε η απλοποίηση των μοντέλων. Ο τύπος αρχείων αποθήκευσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν Stereolithography File Format (STL) (Böhler et al., 2004).

## 6.7 Το έργο 3D Murale

Ένα ακόμα σύνθετο έργο αποτύπωσης, συντήρησης και οπτικής αναπαράστασης είναι το 3D Murale. Στο έργο συμμετείχαν ερευνητές από διαφορετικές χώρες, ενώ η καθοδήγηση γίνονταν από το πανεπιστήμιο του Brunel (Μ. Βρετανία) με την υποστήριξη της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Στόχος του έργου ήταν η ανάπτυξη πολυμεσικών συστημάτων και εργαλείων που θα επέτρεπαν τη μέτρηση αντικειμένων και μνημείων, την 3D αποτύπωσή τους και την οπτική αναπαράστασή τους μέσα σε περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας. Ο χώρος που επιλέχθηκε για την εφαρμογή των εργαλείων της μελέτης ήταν η αρχαία πόλη της Πισιδίας (Van Gool et al., 2002).

**Πίνακας 6.2.** Διαφορετικές εκδόσεις του 3Δ ψηφιακού αντίγραφου της Αθηνάς του Αρέτσο.

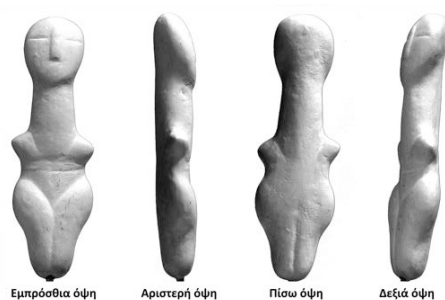
Σύστημα Σάρωσης	Σχήμα από δομημένο φωτισμό (CNR)	Τριγωνισμός λείζερ (INOA)	Minolta Vivid 900	
Έκδοση 3Δ ψηφιακού αντιγράφου	Α (Οκτ. 2000)	Β (Απρ. 2001)	Γ (Μαρ. 2002)	Δ (Οκτ. 2002)
Διάρκεια συλλογής δεδομένων	5 ημέρες	4	1	1
Πλήθος τμηματικών σαρώσεων	146	172	297	306
Διάρκεια επεξεργασίας	6 εβδομάδες	3	1.5	4 ημέρες
Ακρίβεια μετρήσεων	0.57 mm	0.5 mm	0.3 mm	0.3 mm
Τριγωνικές πλεγματοσειρές	26	30	65.6	68.5

## 6.8 Η Αθηνά του Αρέτσο

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης το έργο αποτύπωσης του μπρούντζινου αγάλματος Αθηνά του Αρέτσο<sup>1</sup> που ανακαλύφθηκε το 1541 και φυλάσσεται στο αρχαιολογικό μουσείο της Φλωρεντίας. Η καταγωγή του αγάλματος είναι αμφίβολη. Μπορεί να αποτελεί ένα Ελληνικό έργο, το οποίο χρονολογείται περί τον 3ο π.Χ. αιώνα. Μπορεί, όμως, να αποτελεί αντίγραφο που δημιουργήθηκε κατά τη Ρωμαϊκή περίοδο τον 1ο μ.Χ. αιώνα.

Σκοπός του έργου ήταν η ψηφιοποίηση του αγάλματος πριν, κατά τη διάρκεια και μετά το τέλος της διαδικασίας αποκατάστασής του. Η ερευνητική ομάδα προσπάθησε να αποδείξει στους συντηρητές έργων τέχνης πως η 3Δ ψηφιοποίηση είναι μια διαγνωστική μέθοδος που προσφέρει σημαντική βοήθεια και αποτελεί βασικό εργαλείο στη δουλειά τους. Το προσωπικό που ανέλαβε το έργο αποτελούνταν από επιστήμονες της πληροφορικής και αρχαιολόγους. Για την αποτύπωση του αγάλματος χρησιμοποιήθηκαν τρία συστήματα αποτύπωσης με διαφορετικές μεθόδους. Η διαδικασία αποκατάστασης και συντήρησης περιλαμβάνει την παραγωγή σχεδίων που βασίζονται σε ορθογραφικές προβολές του αντικειμένου. Για το λόγο αυτό, αναπτύχθηκε ένα λογισμικό με ιδιαίτερα φιλικό περιβάλλον χρήσης, το οποίο επιτρέπει την απόκτηση ορθογραφικών προβολών απευθείας από το 3Δ ψηφιακό αντίγραφο (Rocchini et al., 2001). Ο Πίνακας 6.2 παρουσιάζει κάποια ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά που αφορούν στις διαφορετικές εκδόσεις των 3Δ ψηφιακών αντιγράφων του αγάλματος που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια του έργου.

<sup>1</sup>Minerva Project, 2000–2003, <http://vcg.isti.cnr.it>.



Εικόνα 6.1. Αντίγραφο κυκλαδικού γυναικείου ειδωλίου.

## 6.9 Κυκλαδικό ειδώλιο

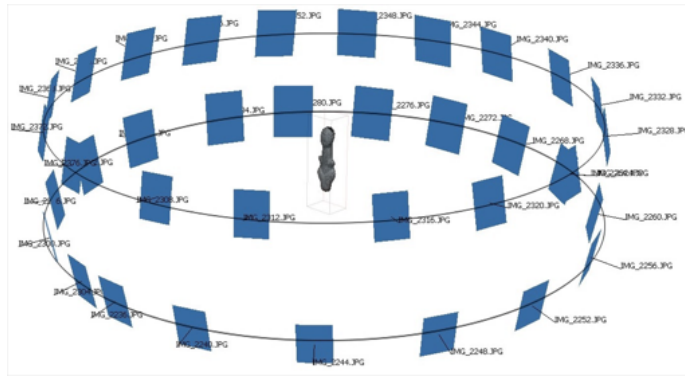
Για την αξιολόγηση της μεθόδου Δομή από κίνηση, όπως αυτή υλοποιείται μέσω ενός από τα πλέον διαδεδομένα πακέτα εμπορικού λογισμικού, το Agisoft Metashape (μέχρι το 2018 γνωστό ως Photoscan), και την αξιολόγηση της απόδοσης του εν λόγω λογισμικού στην 3D ανακατασκευή μικρών κινητών αντικείμενων, των οποίων η επιφάνεια δε φέρει έντονα χαρακτηριστικά, η ερευνητική ομάδα πολυμέσων του Ερευνητικού Κέντρου Αθηνά επέλεξε να ψηφιοποιήσει ένα ακριβές αντίγραφο κυκλαδικού γυναικείου ειδωλίου. Τα Κυκλαδικά ειδώλια είναι συγκεκριμένα αντικείμενα όσον αφορά το μορφότυπο και το σχήμα τους (Εικόνα 6.1). Το ειδώλιο που αποτυπώθηκε σε τρεις διαστάσεις είχε ύψος 16 cm και ήταν αντίγραφο πραγματικού που κατασκευάστηκε στο νησί της Σίφνου το διάστημα μεταξύ του 2800 και 2300 π.Χ.

Η συλλογή δεδομένων ολοκληρώθηκε σε δύο φάσεις:

- Η πρώτη φάση αφορούσε στην 3D ψηφιοποίηση του ειδωλίου με τη χρήση συστήματος Τριγωνισμού ακτίνων λέιζερ, και συγκεκριμένα το σύστημα Arius 3D Foundation 100 3D scanner.
- Η δεύτερη φάση αφορούσε στη φωτογράφιση του αντικειμένου από πολλαπλές οπτικές γωνίες, με ψηφιακή φωτογραφική μηχανή Canon PowerShot A630 με ανάλυση 8 MP για την εφαρμογή της μεθόδου Δομή από κίνηση.

Για τη δεύτερη φάση, συλλέχθηκαν συνολικά 142 εικόνες από διαφορετικές γωνίες θέασης πάνω σε δύο ιδεατές κυκλικές τροχιές γύρω από το αντικείμενο με τη φωτογραφική μηχανή σε κατακόρυφο προσανατολισμό. Η Εικόνα 6.2 απεικονίζει τη χωρική κατανομή των θέσεων λήψης των φωτογραφιών. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το συνολικό πλήθος των θέσεων που απεικονίζεται είναι μικρότερο για λόγους καλύτερης παρουσίας. Η φωτογράφιση διεξήχθη χωρίς τη χρήση περιστρεφόμενου τραπεζιού, προσομοιώνοντας έτσι μια χαμηλού κόστους προσέγγιση ευρείας εφαρμογής. Η μέση απόσταση μεταξύ του αντικειμένου και της φωτογραφικής μηχανής ήταν 70 cm. Για τη διατήρηση

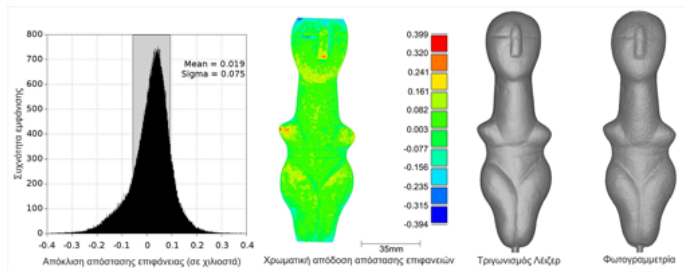




Εικόνα 6.2. Θέσεις φωτογράφισης για το κυκλαδικό ειδώλιο.

Πίνακας 6.3. Μέση και τυπική απόκλιση μεταξύ των δύο ψηφιακών αντιγράφων του κυκλαδικού ειδωλίου.

Ανάλυση	Πολυγωνοποίηση	36 από 142 εικόνες	71 από 142 εικόνες	142 από 142 εικόνες	Απόκλιση
Υψηλή	Λεπτομερής	0,023	0,033	0,042	Μέση
		0,092	0,076	0,076	Τυπική
	Ομαλή	0,008	0,019	0,025	Μέση
		0,098	0,075	0,076	Τυπική
Υπερ-υψηλή	Λεπτομερής	0,027	0,033	0,032	Μέση
		0,093	0,070	0,083	Τυπική
	Ομαλή	0,005	0,017	0,020	Μέση
		0,104	0,077	0,079	Τυπική



Εικόνα 6.3. Σύγκριση 3Δ δεδομένων σάρωσης λέιζερ και Δομής από κίνηση για κυκλαδικό ειδώλιο.

εστίασης σε όλη την επιφάνεια του 3Δ αντίγραφου, ορίστηκαν υψηλές τιμές διαιρέτη διαφράγματος (κλειστό διάφραγμα). Δε χρησιμοποιήθηκε πρόσθετος φωτισμός, εκτός από το φωτισμό φθορισμού που προϋπήρχε στο εργαστήριο, ενώ η βαθμονόμηση της κάμερας έγινε αποκλειστικά από το ίδιο το λογισμικό.

Η αξιολόγηση των δεδομένων που δημιουργήσε το λογισμικό της μεθόδου Δομή από κίνηση πραγματοποιήθηκε συγκρίνοντας τις αποκλίσεις της επιφάνειάς του σε σχέση με τα δεδομένα που παρήχθησαν από το 3Δ σαρωτή λέιζερ,

τα οποία αποτέλεσαν και το μέτρο αληθείας (ground truth). Ο Πίνακας 6.3 παρουσιάζει τη μέση απόκλιση και την τυπική απόκλιση μεταξύ των δύο ψηφιακών αντιγράφων. Η Εικόνα 6.3 παρουσιάζει τη σύγκριση αυτή με απεικονιστικό τρόπο μέσω της χρήσης ιστογράμματος διαφορών και ψευδοχρωματική απεικόνιση.

## 6.10 Μπεκτασικός τεκές Κιουτουκλού Μπαμπά

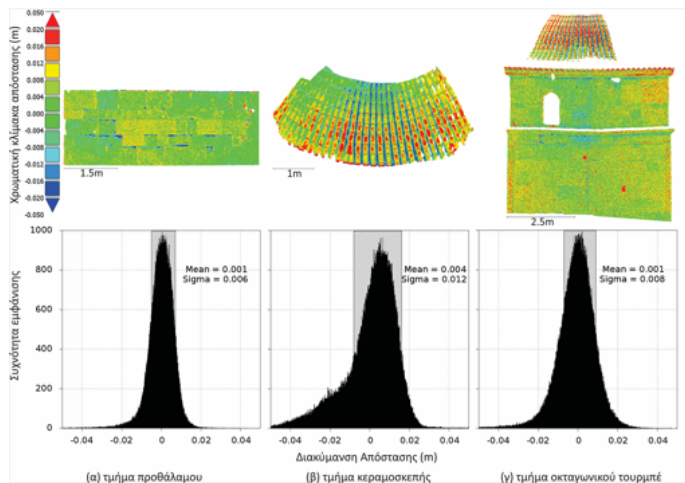
Για την περαιτέρω αξιολόγηση της μεθόδου Δομή από κίνηση (SFM-MVS) όπως αυτή υλοποιείται μέσω του Agisoft Metashape (μέχρι το 2018 γνωστό ως Photoscan), και την εκτίμηση της απόδοσης του εν λόγω λογισμικού στην 3D ανακατασκευή μεγάλων (ακίνητων) αντικείμενων, η ερευνητική ομάδα πολυμέσων του Ερευνητικού Κέντρου Αθηνά επέλεξε να ψηφιοποιήσει τον Μπεκτασικό τεκέ Κιουτουκλού Μπαμπά. Το εν λόγω μνημείο βρίσκεται στη μέση μιας καλλιεργήσιμης έκτασης στη δυτική όχθη της λίμνης Βιστωνίδας στην περιοχή της Ξάνθης. Θεωρείται ως ένα από τα πιο σημαντικά οθωμανικά μνημεία στην περιοχή και υπολογίζεται πως έχει κατασκευαστεί στα τέλη του 15ου αιώνα. Πιθανότατα χτίστηκε πάνω στα ερείπια ενός ορθόδοξου χριστιανικού ναού που ήταν αφιερωμένος στον Άγιο Γεώργιο Καλαμιτζιώτη.

Η συλλογή δεδομένων πραγματοποιήθηκε σε πέντε φάσεις. Οι δύο πρώτες αφορούσαν την επίγεια και εναέρια φωτογράφιση του μνημείου. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η αποτύπωση του μνημείου με γεωδαιτικό σταθμό, επίγεια 3D σάρωση με λείζερ (Time of Flight) και με εμπειρικές μετρήσεις (μετροταινίες, κοκ). Για την επίγεια φωτογράφιση χρησιμοποιήθηκε φωτογραφική μηχανή τύπου DSLR Nikon D40 στα 6,1 MP με φακό 18-55 mm και ένα τρίποδο. Από την άλλη, για την αεροφωτογράφιση, χρησιμοποιήθηκε ένα τηλεκατευθυνόμενο ελικόπτερο, το οποίο ήταν εξοπλισμένο με μια τριών αξόνων pan-tilt-roll τηλεκατευθυνόμενη κεφαλή κάμερας (360° στον οριζόντιο άξονα, 220° στον κατακόρυφο άξονα) καθώς και μια DSLR Canon EOS350d σε 8,1 MP με φακό 18-55 mm. Ο συνολικός αριθμός των φωτογραφιών που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή του 3D ψηφιακού αντιγράφου του μνημείου ήταν 652 (469 επίγειες φωτογραφίες και 183 αεροφωτογραφίες). Η μέση απόσταση της κάμερας από την επιφάνεια του μνημείου ήταν στα 4 m.

Στο πλαίσιο αξιολόγησης των αποτελεσμάτων του λογισμικού Agisoft Metashape (μέχρι το 2018 γνωστό ως Photoscan) επιλέχθηκε το ψηφιακό αντίγραφο που προέκυψε από την ανακατασκευή μεσαίας ανάλυσης (medium resolution). Τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου αντιγράφου θεωρούνται συμβατά με την υπολογιστική ισχύ ενός συστήματος μέσης δυναμικότητας. Το 3D αντίγραφο συγκρίθηκε με το 3D αντίγραφο που προέκυψε από 11 σαρώσεις που δημιουργήθηκαν με το σύστημα επίγειας σάρωσης λείζερ TOF Optec Iris 3D. Οι σαρώσεις πραγματοποιήθηκαν με σχεδόν παράλληλη τοποθέτηση του σαρωτή απέναντι σε μεγάλες επίπεδες επιφάνειες του μνημείου. Η σύγκριση των δεδο-

**Πίνακας 6.4.** Μέσες και τυπικές αποκλίσεις των επιφανειών των δύο τύπων δεδομένων (TOF λέιζερ – Δομής από κίνηση) του Κιουτουκλού.

A/A σάρωσης	Μέση απόσταση	Τυπική απόκλιση ( $\sigma$ )
1	0,001	0,008
2	0,000	0,005
3	0,003	0,017
4	0,001	0,010
5	0,001	0,010
6	0,003	0,020
7	0,004	0,012
8	0,001	0,006
9	0,003	0,018
10	0,002	0,013
11	0,002	0,014
<b>Σταθμισμένη μέση τιμή</b>	<b>0,002</b>	<b>0,014</b>



**Εικόνα 6.4.** Σύγκριση 3Δ δεδομένων σάρωσης λέιζερ και Δομής από κίνηση για το Κιουτουκλού.

μένων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση λογισμικών ανοιχτού κώδικα (MeshLab και CloudCompare). Ο Πίνακας 6.4 περιλαμβάνει τις μέσες και τις τυπικές αποκλίσεις των επιφανειών των δύο 3Δ αντιγράφων που προέκυψαν μετά από την ευθυγράμμιση κάθε σάρωσης λέιζερ πάνω στην τριγωνική πλεγματοσειρά που προέκυψε από τη μέθοδο Δομή από κίνηση. Κάθε σάρωση κάλυπτε ένα διαφορετικό τμήμα του μνημείου, ενώ το πλήθος των κορυφών σε κάθε νέφος χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των μέσων τιμών, ως συντελεστής βάρους. Η μέση απόσταση ανάμεσα στους στα δύο 3Δ αντίγραφα εντοπίζεται στα 2 mm ενώ η συνολική τυπική απόκλιση στα 14 mm. Η Εικόνα 6.4 αναπαριστά γραφικά τη σύγκριση των δύο μεθόδων σε επιλεγμένες επιφάνειες του μνημείου μέσω ιστογραμμάτων διαφοράς αλλά και ψευδοχρωματικών απεικονίσεων.



## Βιβλιογραφία

- Abouaf, J. (1999). The florentine pieta: Can visualization solve the 450-year-old mystery? *IEEE Computer Graphics and Applications*, 19(1):6–10.
- Böhler, W., Bordas Vicent, M., Heinz, G., Marbs, A., and Müller, H. (2004). High quality scanning and modeling of monuments and artifacts. In *Archaeological Surveys Workshop*.
- Guidi, G., Beraldin, J. A., and Atzeni, C. (2004). High-accuracy 3d modeling of cultural heritage: the digitizing of donatello’s maddalena. *IEEE Transactions on image processing*, 13(3):370–380.
- Heinz, G. (2002). Pharaoh pepi i.: documentation of the oldest known life-size metal sculpture using laser scanning and photogrammetry. In *In Proc. of the CIPA WG6 Int. Workshop on Scanning on Cultural Heritage Recording*.
- Ioannidis, C. and Tsakiri, M. (2003). Laser scanning and photogrammetry for the documentation of a large statue-experiences in the combined use. In *In Proceedings of CIPA XIX International Symposium*, pages 517–523.
- Levoy, M., Pulli, K., Curless, B., Rusinkiewicz, S., Koller, D., Pereira, L., Gintzon, M., Anderson, S., Davis, J., and Shade, J. (2000). The digital michelangelo project: 3d scanning of large statues. In *In Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 131–144. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- Rocchini, C., Cignoni, P., Montani, C., Pingi, P., Scopigno, R., Fontana, R., Greco, M., Pampaloni, E., Pezzati, L., Cygielman, M., Giachetti, R., Gori, G., Miccio, M., and Pecchioli, R. (2001). 3d scanning the minerva of arezzo. In *In Proceedings of ICHIM Conference*, volume 2, pages 266–272.
- Van Gool, L., Pollefeys, M., Proesmans, M., and Zalesny, A. (2002). The murale project: image-based 3d modeling for archaeology. In *Bar International Series*, volume 1075, pages 53–64.



# **Παραρτήματα**





—Η Δομή από κίνηση είναι μια φωτογραμμετρική τεχνική που χρησιμοποιεί επικαλυπτόμενες εικόνες για να κατασκευάσει ένα 3Δ μοντέλο μιας σκηνής ή ενός αντικειμένου. Η μέθοδος έχει μεγάλο εύρος εφαρμογών σε διάφορους τομείς δίνοντας υψηλής πιστότητας αποτελέσματα ανακατασκευής της 3Δ γεωμετρίας και υφής.



# Δομή από κίνηση

## I.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος Δομή από κίνηση αποτελεί σήμερα μια πολύ επιτυχημένη μέθοδο στον ευρύτερο χώρο της φωτογραμμετρίας και αποτελεί τη μέθοδο που επιλέγουν πολλοί ειδικοί για την αποτύπωση αντικειμένων με σχετικά χαμηλό κόστος και με υψηλής πιστότητας παραγόμενα αποτελέσματα. Κατά τις πρώτες δεκαετίες του 21ου αιώνα έχει σταδιακά αναχθεί στην πλέον δημοφιλή λύση σε εφαρμογές 3Δ ψηφιοποίησης στον πολιτισμό.

Σήμερα, υπάρχουν διαθέσιμα τόσο εμπορικά όσο και ανοικτού κώδικα λογισμικά που υλοποιούν τη μέθοδο Δομή από κίνηση. Το ερευνητικό έργο 3D-COFORM παρουσίασε ένα Διαδικτυακό σύστημα που προσφέρει τη συγκεκριμένη μέθοδο ως υπηρεσία. Ο χρήστης ανεβάζει την ακολουθία των φωτογραφιών του και η υπηρεσία αναλαμβάνει να τον ενημερώσει για την ολοκλήρωση της 3Δ ανακατασκευής και να του προωθήσει ένα σύνδεσμο για τη μεταφόρτωση του 3Δ ψηφιακού αντιγράφου που προέκυψε από τις φωτογραφίες του. Παρόμοια συστήματα έχουν αναπτυχθεί και από εταιρείες όπως είναι η Autodesk, η Viztu Technologies και η Insight3D. Η EOS Systems Inc. προσφέρει το λογισμικό Photomodeler Scanner, το οποίο απαιτεί τη χρήση φωτοσταθερών (στόχοι). Η Agisoft προσφέρει το Metashape (μέχρι το 2018 γνωστό ως Photoscan), το οποίο αποτελεί μια ολοκληρωμένη λύση. Παρόμοια λύση που υπόσχεται υψηλής ποιότητας αποτελέσματα αποτελεί και το CapturingReality της ομώνυμης εταιρείας. Επιπλέον, η Pix4D ανέπτυξε το λογισμικό Pix4UAV που είναι σε θέση να δημιουργήσει 3D ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα από συλλογές εναέριων φωτογραφιών.

Ο Πίνακας I.1 παρουσιάζει λίστα από υλοποιήσεις της μεθόδου Δομή από

**Πίνακας Ι.1.** Λογισμικά που υλοποιούν τη μέθοδο Δομή από κίνηση.

## Λογισμικό Ανοικτού Κώδικα

---

**C++**

- Bundler - Structure from Motion for Unordered Photo Collections by Noah Snavely (<http://phototour.cs.washington.edu/bundler/>)
- openMVG - An Open Multiple View Geometry library + Structure from Motion demonstrators (<https://github.com/openMVG/openMVG>)
- Libmv - A Structure from Motion library (<https://github.com/libmv/libmv>)
- Theia: A Fast and scalable structure-from-motion library released under the BSD license ([http://cs.ucsb.edu/~sim\\$cmsweeny/theia](http://cs.ucsb.edu/~sim$cmsweeny/theia))
- MicMac, a SFM open-source code released by the Institut national de l'information géographique et forestière (<http://logiciels.ign.fr/?Telechargement,20>)
- LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM in real-time, by Jakob Engel (<https://vision.in.tum.de/lsdslam>)
- MVE - The Multi-View Environment by Simon Fuhrmann, TU Darmstadt (<http://www.gris.informatik.tu-darmstadt.de/projects/multiview-environment/>)
- SBA for generic bundle adjustment by Manolis Lourakis ([https://www.ics.forth.gr/~sim\\$lourakis/sba](https://www.ics.forth.gr/~sim$lourakis/sba))

**Matlab**

- Structure from Motion toolbox for Matlab by Vincent Rabaud ([http://vision.ucsd.edu/~sim\\$vrabaud/toolbox/doc/overview.html](http://vision.ucsd.edu/~sim$vrabaud/toolbox/doc/overview.html))
- Matlab Functions for Multiple View Geometry by Andrew Zissermann ([http://www.robots.ox.ac.uk/~sim\\$vgg/hzbook/code/](http://www.robots.ox.ac.uk/~sim$vgg/hzbook/code/))
- Structure and Motion Toolkit by Phil Torr ([http://cms.brookes.ac.uk/staff/PhilipTorr/Code/code\\_page\\_4.htm](http://cms.brookes.ac.uk/staff/PhilipTorr/Code/code_page_4.htm))
- Matlab Code for Non-Rigid Structure from Motion by Lorenzo Torresani ([http://www.cs.dartmouth.edu/~sim\\$lorenzo/projects/learning-nr-shape/em-sfm.zip](http://www.cs.dartmouth.edu/~sim$lorenzo/projects/learning-nr-shape/em-sfm.zip))

**Python**

- Python Photogrammetry Toolbox GUI - an open-source SFM GUI (Easy SFM and dense point cloud estimation launcher) by Pierre Moulon and Arc-Team (<http://www.arc-team.homelinux.com/arcteam/ppt.php>)

### Ολοκληρωμένα Συστήματα SFM-MVS

- Smart3DCapture, by Acute3D (<http://www.acute3d.com/>)
- 3DF Samantha - Command line SFM pipeline, by 3Dflow (<http://www.3dflow.net/technology/samantha-structure-from-motion/>)
- Automatic Camera Tracking System (ACTS), by Zhejiang University (<http://www.zjucv.net/acts/acts.html>)
- VisualSFM, by Changchang Wu (<http://ccwu.me/vsfm>)
- SFMToolkit (<http://www.visual-experiments.com/demos/sfmtoolkit/>)
- MountainsMap SEM software for Scanning Electron Microscopes. (<http://www.digitalsurf.fr/en/mntsem.html>)
- Voodoo Camera Tracker, (<http://www.viscoda.com/index.php/en/products/non-commercial/voodoo-camera-tracker>)
- MetaIO Toolbox SFM for augmented reality on mobile devices (<https://dev.metaio.com/sdk/toolbox>)
- TacitView by 2d3 Sensing (<http://www.2d3sensing.com/content/tacitview>)
- Catena Python Abstract Workflow Framework with SFM components (<http://catena.googlecode.com/>)
- 123D Catch by Autodesk (<http://www.123dapp.com/catch>)
- 3Df Zephyr by 3DFLOW (<http://www.3dflow.net/3df-zephyr-pro-3d-models-from-photos/>)
- 3dsom by Big Object Base (<http://www.3dsom.com/>)
- 4E Software by 4e Software (<http://www.4-e.es/>)
- ARC3D by KU Leuven (<http://www.arc3d.be/>)
- Australis by Photometrix ([http://www.photometrix.com.au/?page\\_id=19](http://www.photometrix.com.au/?page_id=19))
- Correlator3D by SimActive Inc. (<http://www.simactive.com/>)
- DroneMapper by DroneMapper (<http://dronemapper.com/>)
- ELCOVISION 10 by PMS AG, Leica Geosystems (<http://www.elcovision.com/>)
- EnsoMOSAIC by MosaicMill (<http://www.mosaicmill.com/>)
- Enwaii by Banzai Pipeline Ltd (<http://enwaii.com/>)
- ImageModeler by Autodesk (<http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/pc/index?id=11390028&siteID=123112>)
- iWitness by Photometrix (<http://www.photometrix.com.au/>)
- Linearis3D Photogrammetry by Linearis3D (<http://www.linearis3d.de/>)
- Memento by Autodesk (<http://memento.autodesk.com/>)
- PHOTOMOD by Racurs (<http://racurs.ru/>)
- PhotoModeler by Eos Systems (<http://www.photomodeler.com/>)
- Metashape (formerly known as Photoscan) by Agisoft (<https://www.agisoft.com/downloads/installer/>)
- PhotoSculpt by Hippolyte Mounier (<http://www.photosculpt.net/>)
- PhotoSketch by Brainstorm Technology LLC (<http://www.brainstormllc.com/>)
- Pix4Dmapper Discovery/Pro by Pix4D SA (<http://www.pix4d.com/>)
- RealityCapture by Capturing Reality (<http://www.capturingreality.com/>)
- ReCap by Autodesk (<https://recap.autodesk.com/>)
- RhinoPhoto by Qualup SAS (<http://www.rhinophoto3d.com/>)
- SMART3DCAPTURE by ACUTE3D (<http://www.acute3d.com/>)
- Metrology Engine by VisualSize (<http://dragonox.cs.ucsb.edu/MetrologyEngine/>)
- VI3DIM by Vi3Dim (<http://www.vi3dim.com/>)
- VideoTrace by AVCT, PunchCard (<http://punchcard.com.au/wordpress/>)
- WebDLT by B. Molnar. BME FMT (<http://dlt.fmt.bme.hu/>)

κίνηση οργανωμένες ανάλογα με τον τρόπο που αυτές διατίθενται (ανοικτού κώδικα, εμπορικά, γλώσσα προγραμματισμού, κλπ.).

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται λεπτομέρειες σχετικά με την πρακτική εφαρμογή της μεθόδου Δομή από κίνηση που θα έπρεπε να γνωρίζει όποιος καλείται να εφαρμόσει την εν λόγω μέθοδο για μια πληθώρα έργων 3Δ ψηφιοποίησης. Σε πολλά σημεία η μέθοδος αναφέρεται με τα αρχικά στην αγγλική γλώσσα SFM-MVS από τις λέξεις Structure from Motion - Multiple View Stereo.

## 1.2 Πρακτική εφαρμογή της μεθόδου Δομή από κίνηση

Στις παραγράφους που ακολουθούν γίνεται μια προσπάθεια συγκέντρωσης όλων των βασικών κανόνων εφαρμογής της συγκεκριμένης μεθόδου, με τη μορφή σημείων για εύκολη πρόσβαση. Προτείνεται η αρχική εφαρμογή της μεθόδου σε μικρής κλίμακας έργα, ώστε να ορίζονται με κατά το δυνατό βέλτιστο τρόπο οι σχετικές παράμετροι αλλά και να εφαρμόζονται οι κανόνες που σχετίζονται με τη διαδικασία συλλογής δεδομένων. Όπως και με τις προηγούμενες μεθόδους προβλέπεται η χρήση υλικοτεχνικού εξοπλισμού και λογισμικού, ο οποίος στη συγκεκριμένη μέθοδο μπορεί να περιοριστεί σε μια φωτογραφική μηχανή και ένα από τα προαναφερθέντα λογισμικά. Η λίστα των σημαντικών σημείων που ακολουθεί δίνεται υπό τη μορφή προτροπής προς τους χρήστες της μεθόδου:

- **Προτείνεται η χρήση ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής τύπου DSLR με σχετικά υψηλή ανάλυση (>12 MPixels) και κυρίως με μεγάλο μέγεθος οπτικού αισθητηρίου (πχ. full frame, APS-C).** Οι DSLR φωτογραφικές μηχανές προσφέρουν επιλογές με τις οποίες οι παραμορφώσεις λόγω της συμπίεσης παραμένουν σε χαμηλό επίπεδο, ώστε να μην επηρεάζεται η 3Δ ανακατασκευή. Γενικά οι DSLR φωτογραφικές μηχανές προσφέρουν πιο ποιοτικά δεδομένα σε σύγκριση με τις compact ψηφιακές μηχανές, λόγω των μεγαλύτερων οπτικών αισθητηρίων, της χρήσης καλύτερων οπτικών χαρακτηριστικών (φακών), της μεγαλύτερης γκάμας ρυθμίσεων φωτογράφισης και της δυνατότητας αποθήκευσης εικόνων RAW<sup>1</sup>. Επίσης οι DSLR αποδίδουν καλύτερα από τις compact (συμπαγείς) μηχανές σε υψηλές τιμές ISO, το οποίο επιτρέπει τη χρήση τους σε εσωτερικούς χώρους χωρίς την ανάγκη για επιπρόσθετο εξοπλισμό (τρίποδες, φλας), ενώ υποστηρίζει ρυθμίσεις κλειστού διαφράγματος για την απαραίτητη αύξηση του βάθους πεδίου.

<sup>1</sup>RAW είναι τα αρχεία φωτογραφιών, τα οποία δεν περιέχουν τιμές εικονοστοιχείων αλλά τις τιμές των μετρήσεων που λαμβάνει το οπτικό αισθητήριο της μηχανής χωρίς καμία περαιτέρω επεξεργασία. Αντίθετα, οι φωτογραφίες που αποθηκεύονται σε μορφή JPG στις μηχανές έχουν ήδη υποστεί επεξεργασία και συμπίεση με απώλειες.

- **Οι ευρυγώνιοι φακοί αποδίδουν καλύτερα** σε εργασίες ανακατασκευής χωρικών συσχετισμών ανάμεσα σε σημεία σε σύγκριση με τους τηλεφακούς.
- **Οι fisheye φακοί καθώς και οι υπερευρυγώνιοι (ultra wide angle) δεν μπορούν να περιγραφούν εύκολα μαθηματικά** με αποτέλεσμα να οδηγούν σε κακής ποιότητας 3Δ ανακατασκευές. Ένα από τα χαρακτηριστικά τους που συμβάλουν αρνητικά στην 3Δ ανακατασκευή είναι η υπερβολική ακτινική παραμόρφωση (radial distortion) στα όρια του φακού που μειώνει δραματικά την ακρίβεια υπολογισμού θέσης και οδηγεί σε εκτίμηση εσφαλμένων παραμέτρων κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης.
- **Οι στρεβλώσεις προβολής που σχετίζονται με μία σταθερή εστιακή απόσταση (fixed focal length) μοντελοποιούνται και διατηρούνται πιο εύκολα** σε σχέση με αυτές που προκύπτουν από φακούς με μεταβλητή εστιακή απόσταση (zoom lenses). Από την άλλη, οι φακοί με μεταβλητή εστιακή απόσταση (πχ. 18-70 mm) είναι πιο ευέλικτοι στη χρήση και χρησιμοποιούνται ακόμα και για πολύ κοντινές αποστάσεις (close range digital photogrammetry). Στη βιβλιογραφία έχει προταθεί η χρήση μονωτικής ταινίας για τη διατήρηση σταθερής εστιακής απόστασης σε τέτοιου τύπου φακούς. Επίσης προτείνεται να χρησιμοποιούνται τα άκρα της εστιακής απόστασης που παρέχουν.
- **Επίπεδα αντικείμενα χωρίς πλούσια υφή (featureless) καλό είναι να αποφεύγονται.** Η μέθοδος είναι φιλική σε αντικείμενα που παρουσιάζουν μεταβολές έντασης και χρωματικότητας.
- Το ίδιο ισχύει και για **διαφανή ή γυαλιστερά αντικείμενα που χαρακτηρίζονται ως μη-φιλικά προς τη μέθοδο.** Τα αντικείμενα προς ψηφιοποίηση θα πρέπει να μη δημιουργούν έντονες φυσικές ή τεχνητές (λόγο φωτισμού) ανακλάσεις.
- **Προτείνεται η αποφυγή αποτύπωσης αντικειμένων με κινητά μέρη,** τα οποία δε μπορούν να σταθεροποιηθούν αλλά και τμημάτων τους, τα οποία δε σχετίζονται με το αντικείμενο προς αποτύπωση.
- Αν πρέπει να αποτυπωθούν γυαλιστερά αντικείμενα σε εξωτερικούς χώρους όπου δε μπορεί να υπάρξει ελεγχόμενος φωτισμός τότε η **συλλογή δεδομένων πρέπει να γίνει σε ημέρα με έντονη νέφωση** για την ύπαρξη διάχυτου μόνο φωτισμού. Προτείνεται η χρήση φωτογραφικού lightbox όπου αυτό επιτρέπεται.
- **Οι φωτογραφίες θα πρέπει να παρουσιάζουν μεγάλο ποσοστό επικάλυψης** (τουλάχιστον 60% σε δύο γειτονικές φωτογραφίες, ενώ υπάρχουν

ερευνητές που προτείνουν μέχρι και 80%). Για την εξασφάλιση ενός βαθμού επικάλυψης 66% σε δύο «γειτονικές» φωτογραφίες, η φωτογραφική μηχανή θα πρέπει να κινηθεί σε μια απόσταση ανάλογη του 34% του οπτικού της πεδίου.

- **Στο κάδρο της κάθε φωτογραφίας το αντικείμενο θα πρέπει να βρίσκεται στο κέντρο και να καλύπτει τα 3/5 της φωτογραφίας** (image plane). Για την επίτευξη ποιοτικής 3Δ ανακατασκευής, το αντικείμενο θα πρέπει να βρίσκεται στο κέντρο της φωτογραφίας. Παράλληλα, για την επίτευξη καλής γεωμετρικής ανάλυσης θα πρέπει να αποφεύγεται η λήψη φωτογραφιών από υπερβολικές γωνίες θέασης (υπερβολική προοπτική).
- Απαραίτητη είναι η **κάλυψη ενός τμήματος του αντικειμένου από τουλάχιστον τρεις διαφορετικές γωνίες θέασης**. Βεβαία οι τρεις γωνίες θέασης είναι και ο ελάχιστος αριθμός που απαιτείται από τη μέθοδο για την 3Δ ανακατασκευή.
- Η **χρήση του ενσωματωμένου φλας πρέπει να αποφεύγεται όπως και η λήψη υπερφωτισμένων φωτογραφιών**. Είναι προτιμότερη η εξάντληση των ρυθμίσεων που παρέχει η μηχανή για την επίτευξη του σωστού φωτισμού πριν από την εφαρμογή φλας. Παράλληλα όμως, θα πρέπει να αποφεύγονται οι υποφωτισμένες φωτογραφίες, πάλι μέσω ορθών ρυθμίσεων των παραμέτρων της μηχανής.
- Είναι γνωστό πως η φωτογραμμετρία είναι ταυτόχρονα επιστήμη και τέχνη. Στο σκέλος που αποτελεί τέχνη σχετίζεται μεταξύ άλλων με την κατανόηση των παραμέτρων μίας φωτογραφικής μηχανής. **Καθώς η επιτυχία της μεθόδου SFM-MVS βασίζεται στην ποιότητα των φωτογραφιών είναι σημαντικό να αναπτύξει κανείς τις φωτογραφικές του δεξιότητες**, ξεκινώντας από το να καταφέρνει να συλλέγει καθαρές και σωστά φωτισμένες εικόνες κάτω από διαφορετικές συνθήκες φωτισμού.
- Ιδιαίτερα σημαντικό είναι **να γίνεται χρήση της χαμηλότερης δυνατής ρύθμισης ISO**. Η ρύθμιση του ISO ορίζει πόση ενίσχυση του σήματος στον οπτικό αισθητήριο πραγματοποιεί με ηλεκτρονικό τρόπο η φωτογραφική μηχανή. Όπως είναι φυσικό, όσο περισσότερη ενίσχυση τόσο περισσότερος ο θόρυβος που προστίθεται στην εικόνα. Αυτός ο θόρυβος μπορεί να επηρεάσει δραματικά τη διαδικασία αντιστοίχισης σημείων ανάμεσα στις διαφορετικές φωτογραφίες.
- **Συνιστάται η απενεργοποίηση λειτουργιών της κάμερας όπως είναι η σταθεροποίηση εικόνας (image stabilisation) και η αυτόματη περιστροφή**. Η θέση του κάθε εικονοστοιχείου είναι σημαντικό να είναι σταθερή κατά την εφαρμογή της SFM-MVS και οι παραπάνω μέθοδοι

αλλάζουν τη θέση τους για να δημιουργήσουν μια οπτικά καλύτερη φωτογραφία παραμορφώνοντας όμως το χώρο.

- **Η μείωση της ανάκλασης των επιφανειών επιταχύνεται με τη χρήση πόλωσηπολωτικών φίλτρων φίλτρο και φίλτρων κυκλικής πόλωσης (PL-CIR).** Τα φίλτρα αυτά αφαιρούν ένα τμήμα από το φως που προσπίπτει στο φακό στο οποίο υπάρχουν οι ανακλάσεις. Το αποτέλεσμα είναι να απορρίπτονται οι ανακλάσεις, να καταγράφονται ζωντανότερα (πιο κορεσμένα) χρώματα αλλά και καλύτερη αντίθεση - διαύγεια.
- **Συνιστάται η αποφυγή λήψης φωτογραφιών απέναντι από πηγή φωτός** (είτε πρόκειται για τον ήλιο είτε για κάποια άλλη τεχνητή πηγή) καθώς θα δημιουργήσει έντονες σκιές αλλά και περιοχές με υψηλή αντίθεση και ενδεχόμενα σημεία με υπερφωτισμό.
- Για την αποφυγή λήψης θολών εικόνων, ειδικά όταν οι συνθήκες δεν είναι ιδανικές, **προτείνεται η χρήση τρίποδα και τηλεχειρισμού.** Έστω και χαμηλός βαθμός θόλωσης (blurring) οδηγεί στη μείωση της ευκρίνειας της εικόνας, ενώ μεγάλοι βαθμοί θόλωσης αποτρέπουν την ορθή λειτουργία των αλγορίθμων αναγνώρισης ομόλογων σημείων στο σύνολο των φωτογραφιών.
- Ένα γενικός κανόνας είναι πως **η ρύθμιση του διαφράγματος του φακού θα πρέπει να παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διαδικασία συλλογής δεδομένων.** Σε έναν τυπικό 50 mm φακό θεωρείται καλή πρακτική η ρύθμιση του διαφράγματος να μην πέφτει κάτω του  $f/11$  (πχ.  $f/16$ ) καθώς εμφανίζονται φαινόμενα περίθλασης που θολώνουν το περιεχόμενο της φωτογραφίας και μειώνουν την ευκρίνειά της. Παρόλα αυτά, το διάφραγμα δε μπορεί να πάρει πολύ μεγάλες τιμές (πχ.  $f/2$ ) καθώς σε αυτή την περίπτωση περιορίζεται σημαντικά το βάθος πεδίου και αποτυπώνονται με ευκρίνεια επιφάνειες σε μια στενή μόνο ζώνη αποστάσεων από το φακό.
- Η ρύθμιση της ταχύτητας του κλείστρου ακολουθεί τις εκάστοτε συνθήκες φωτισμού και τις άλλες ρυθμίσεις που προηγούνται, με γνώμονα πάντοτε την ακινητοποίηση της σκηνής (δηλαδή οι **μεγαλύτερες ταχύτητες κλείστρου είναι προτιμητέες**). Αν δεν είναι εφικτό να γίνει ρύθμιση ταχύτητας άνω του 1/100 τότε προτείνεται η χρήση τρίποδα και τηλεχειρισμού.
- Πριν την εφαρμογή των αλγορίθμων 3Δ ανακατασκευής προτείνεται ο **εντοπισμός και απόρριψη των θολών και με κακή εστίαση φωτογραφιών.**
- **Σημαντικά σημεία και λεπτομέρειες πρέπει να φωτογραφίζονται από πολλές διαφορετικές οπτικές γωνίες.**

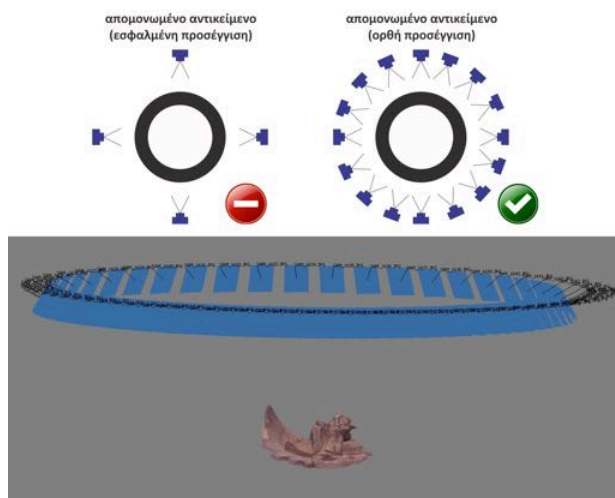
- **Η περικοπή (cropping) ή οποιοσδήποτε γεωμετρικός μετασχηματισμός των φωτογραφιών πρέπει να αποφεύγεται.** Η ανάλυση της φωτογραφίας σε συνδυασμό με κάποια χαρακτηριστικά του φακού της φωτογραφικής μηχανής αποθηκεύονται εντός του αρχείου της εικόνας σε ειδικό τμήμα του με την κωδική ονομασία EXIF header. Την πληροφορία αυτή μπορεί να εκμεταλλευτεί το λογισμικό SFM-MVS κατά τη διαδικασία του bundle adjustment. Συνεπώς, οποιαδήποτε μεταβολή της γεωμετρίας της εικόνας αναιρεί την εν λόγω πληροφορία με αποτέλεσμα να προκύπτουν λανθασμένες 3Δ ανακατασκευές.
- Για τον υπολογισμό του οπτικού πεδίου της κάθε φωτογραφίας το **λογισμικό χρησιμοποιεί την πληροφορία που είναι αποθηκευμένη στο EXIF header του κάθε αρχείου.** Όταν υπάρχει αυτή η πληροφορία συνήθως επιτυγχάνεται η βέλτιστη ποιότητα στην 3Δ ανακατασκευή. Σε περιπτώσεις όπου η συγκεκριμένη πληροφορία απουσιάζει τότε κάποια λογισμικά κάνουν υποθέσεις ώστε να καταφέρουν να πετύχουν μια 3Δ ανακατασκευή. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του Agisoft Metashape (μέχρι το 2018 γνωστό ως Photoscan), το λογισμικό υποθέτει τη χρήση φακού με εστιακή απόσταση (focal length) 35 mm σε APS-C οπτικό αισθητήριο (αντίστοιχο 50 mm σε full frame μηχανές) και προσπαθεί να λύσει το πρόβλημα με αυτά τα δεδομένα. Η μεγάλη απόκλιση από τη συγκεκριμένη τιμή οδηγεί σε σφάλματα ή ακόμα και σε αδυναμία 3Δ ανακατασκευής.
- Σε περιπτώσεις κατά τις οποίες δεν υπάρχει η κατάλληλη πληροφορία στο EXIF header του κάθε αρχείου τότε αυτή **μπορεί να υπολογιστεί μέσα από διαδικασίες βαθμονόμησης** της μηχανής όπου προκύπτουν όλες παράμετροι παραμόρφωσης που εισάγει ένας φακός.
- Οι φωτομετρικές αλλαγές (πχ. brightness, contrast, κλπ.) στις φωτογραφίες δεν επηρεάζουν την 3Δ ανακατασκευή όταν αυτές βέβαια εφαρμόζονται σε όλο το σύνολο φωτογραφιών και δεν εισάγουν έντονες αντιθέσεις και απώλεια λεπτομέρειας σε περιοχές της εικόνας.
- Καθώς η συλλογή δεδομένων είναι μια διαδικασία που πραγματοποιείται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, κάτω από διαφορετικές συνθήκες και με έντονη χρήση του εξοπλισμού, **θα πρέπει κανείς να δώσει έμφαση στην ποιότητα αλλά και στην ευρωστία του εξοπλισμού.**
- **Ως γενικός κανόνας είναι προτιμότερο να γίνει συλλογή πολλών δεδομένων παρά να απαιτηθεί επιστροφή στο πεδίο για επανάληψη της διαδικασίας.** Οι επιπλέον φωτογραφίες μάλιστα οδηγούν στη βελτίωση των αποτελεσμάτων μέσω του πλεονασμού δεδομένων (data redundancy).

- **Εξοπλισμός όπως περιστρεφόμενα τραπέζια και μπάρες ολίσθησης συμβάλλουν στην αυτοματοποίηση** της διαδικασίας συλλογής δεδομένων.
- Όταν υπάρχει ανάγκη για λήψη εναέριων φωτογραφιών τότε απαιτείται επιπλέον προσπάθεια προσδιορισμού του βέλτιστου τρόπου λήψης, ανάλογα με τις ανάγκες του έργου ψηφιοποίησης. Τέτοιοι τρόποι είναι τα μεταβλητού μήκους μονόποδα, ανυψωτικές πλατφόρμες και επανδρωμένα ή μη-επανδρωμένα πτητικά μέσα (ΣμηΕα - UAV, ελικόπτερα, κλπ.).
- Η σχεδίαση του τρόπου συλλογής δεδομένων είναι μια πολύ σημαντική διαδικασία και αφορά τον επίγειο και εναέριο τρόπο συλλογής. Όπου είναι εφικτό, προτείνεται επισταμένη μελέτη του αντικειμένου ψηφιοποίησης, καθώς και δοκιμαστικές λήψεις, οι οποίες θα βοηθήσουν στην καλύτερη **ανάπτυξη του σχεδίου συλλογής δεδομένων**. Προφανώς σε εργασίες σε εξωτερικούς χώρους πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι συνθήκες εργασίας και άλλες πιθανές προκλήσεις, όπως τα καιρικά φαινόμενα, η πρόσβαση, η μεταφορά του εξοπλισμού, το πλήθος των ατόμων της ομάδας ψηφιοποίησης, οι κανονισμοί ασφαλείας, διάφορα νομικά ζητήματα και έγγραφες άδειες όπου απαιτούνται.
- Κατά τη συλλογή δεδομένων υπάρχει ανάγκη για τον **καθορισμό ενός συστήματος συντεταγμένων αναφοράς** για την κλιμάκωση του 3Δ αντιγράφου σε πραγματικές διαστάσεις (1:1). Για να επιτευχθεί αυτό χρειάζεται η τοποθέτηση φωτοσταθερών (φωτογραμμετρικών στόχων), οι οποίοι θα αποτελούν σημεία αναφοράς του συστήματος συντεταγμένων και της κλίμακας. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην ποιότητα των μετρήσεων που αφορούν στο συγκεκριμένο σύστημα συντεταγμένων και κλίμακας αφού το όποιο σφάλμα θα μεταφερθεί στο 3Δ ψηφιακό αντίγραφο.

Είναι σημαντικό να γνωρίζει κανείς τον τρόπο λειτουργίας της μεθόδου SFM-MVS πριν ξεκινήσει τη διαδικασία συλλογής δεδομένων. Επίσης θα πρέπει να κατανοεί τα 3Δ μορφολογικά χαρακτηριστικά και τη δομή ενός αντικείμενου ώστε να μπορεί να εντοπίσει το βέλτιστο τρόπο συλλογής δεδομένων, είτε αυτός είναι γύρω από το αντικείμενο κατά 360° είτε κατά 180°. Λόγω της ευελιξίας της μεθόδου είναι δυνατό κανείς να ανακατασκευάσει σε τρεις διαστάσεις αντικείμενα συλλέγοντας δεδομένα ακολουθώντας διαφορετικές προσεγγίσεις (οριζόντια, κάθετα, εναέρια, κλπ.). Παρακάτω περιγράφεται μια σειρά από προσεγγίσεις επίγειας συλλογής δεδομένων με στόχο την 3Δ ανακατασκευή με τη μέθοδο SFM-MVS.

- **Φωτογράφιση κινητού αντικειμένου:** Δημιουργία πολλαπλών κλειστών βρόχων από φωτογραφίες που προβάλλουν το αντικείμενο από διαφορετικές οπτικές γωνίες θέασης τοποθετημένες πάνω σε ένα ιδεατό κύκλο.

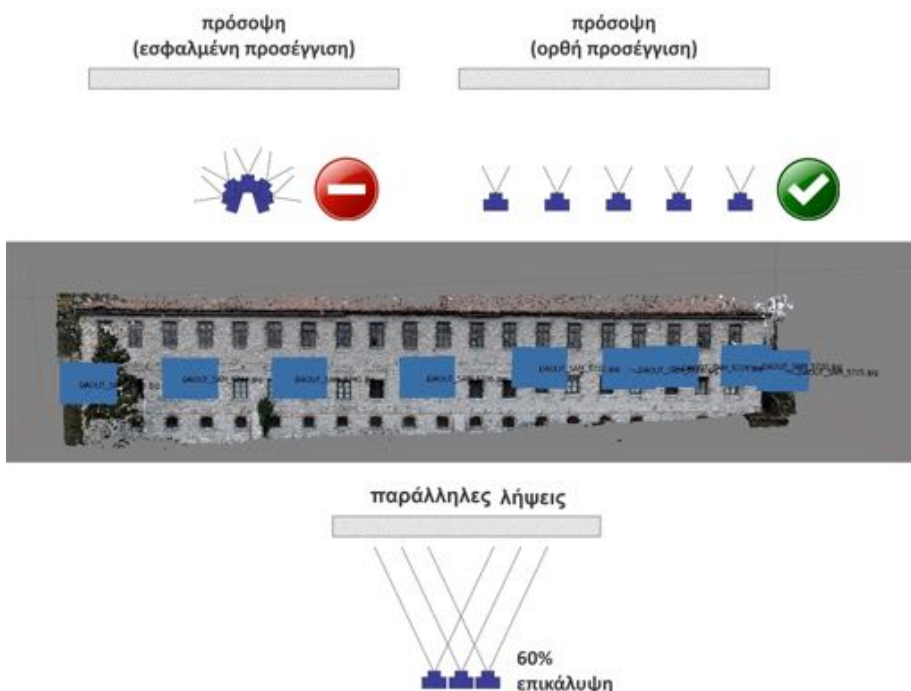




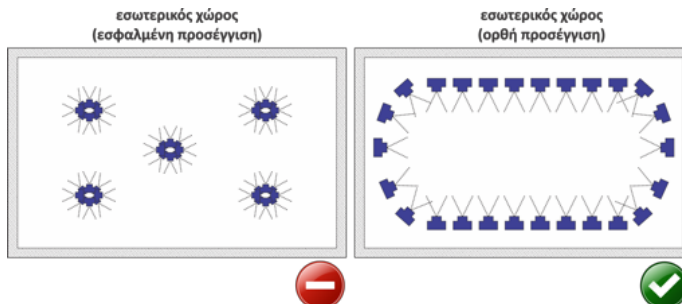
Εικόνα Ι.1. Καλή πρακτική λήψης φωτογραφιών για κινητό αντικείμενο.

Για κυλινδρικά αντικείμενα θα πρέπει να υπάρχει μια απόσταση  $10^\circ - 15^\circ$  ανάμεσα σε δύο γειτονικές φωτογραφίες, ώστε να εξασφαλισθεί η απαιτούμενη επικάλυψη του περιεχομένου (Εικόνα Ι.1). Φυσικά η απόσταση αυτή μπορεί να μειωθεί ανάλογα με τις ανάγκες που προκύπτουν και σχετίζονται με την πολυπλοκότητα της επιφάνειας (μορφολογία) του αντικείμενου και τις κοιλότητες που αυτό φέρει.

- **Φωτογράφιση πρόσοψης κτιρίου:** Παράλληλες συγκλίνουσες λήψεις με χρήση τρίποδα ή μεταβλητού ύψους μονόποδο. Η φωτογραφική μηχανή μετακινείται πάνω σε μία νοητή γραμμή και σε τακτά διαστήματα (ανάγκη για τουλάχιστον 60% επικάλυψη) γίνεται λήψη φωτογραφίας. Η κίνηση πρέπει να γίνεται συστηματικά, αριστερά προς δεξιά και δεξιά προς αριστερά, καθώς το λογισμικό μπορεί να εκμεταλλευτεί το συγκεκριμένο τρόπο λήψης και να μειώσει το συνολικό χρόνο υπολογισμού της 3Δ ανακατασκευής (Εικόνα Ι.2).
- **Φωτογράφιση εσωτερικού χώρου:** Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιείται για την ανακατασκευή ενός εσωτερικού χώρου όπως ενός δωματίου ή του εσωτερικού χώρου ενός μνημείου. Ένα σύνολο από φωτογραφίες θα πρέπει να συλλεγούν με τον τρόπο που προβάλλει το σχήμα που ακολουθεί σε διαφορετικά ύψη (Εικόνα Ι.3).
- **Φωτογράφιση με συγκλίνουσες λήψεις:** Η μέθοδος εφαρμόζεται για την ανακατασκευή αντικειμένων ή μνημείων με έντονο ανάγλυφο στις εξωτερικές επιφάνειές του, ώστε να επιτευχθεί πλήρης κάλυψη των πτυχών χωρίς να υπάρχουν έντονες γωνίες προοπτικής κατά τη λήψη (Εικόνα Ι.4).



Εικόνα Ι.2. Καλή πρακτική λήψης φωτογραφιών για πρόσοψη κτηρίου.

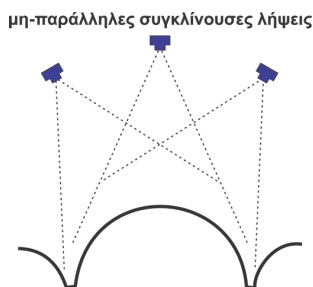


Εικόνα Ι.3. Καλή πρακτική λήψης φωτογραφιών σε εσωτερικό χώρο.

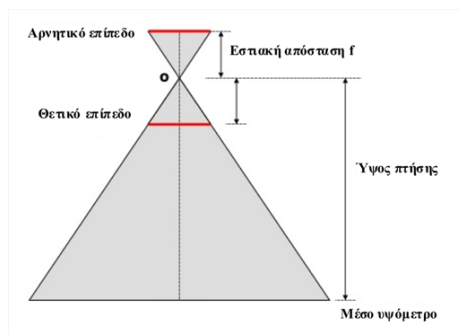
### Ι.3 Απόσταση φωτογράφισης και διαστάσεις

Στην παρούσα παράγραφο συγκεντρώνονται κάποιες γενικές κατευθυντήριες γραμμές σχετικές με το ποιες πρέπει να είναι οι αποστάσεις φωτογράφισης από το αντικείμενο και παρουσιάζονται πρακτικά παραδείγματα που σχετίζονται με το μέγεθος του αντικειμένου.

Η απόσταση της φωτογράφισης σχετίζεται με την ανάλυση της ψηφιοποίησης και είναι σημαντικό, πριν από οτιδήποτε άλλο, να γίνει μια αναφορά στη μετρική της απόστασης δειγματοληψίας εδάφους ή ground sampling distance - *GSD*, όπως συνήθως καλείται. Η μετρική αυτή προέρχεται από την επιστήμη



**Εικόνα Ι.4.** Καλή πρακτική λήψης φωτογραφιών με σύγκλιση.



**Εικόνα Ι.5.** Γεωμετρικά στοιχεία προσδιορισμού της δειγματοληψίας εδάφους.

της τοπογραφίας, αεροφωτογραφίας και τηλεπισκόπησης και ορίστηκε για να προσδιορίσει την ανάλυση (μικρότερο μέγεθος εδάφους που είναι ορατό) που επιτυγχάνεται σε φωτογραφία από γνωστό ύψος πτήσης με φωτογραφική μηχανή με γνωστά χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, μια τιμή  $GSD = 10 \text{ m}$  σημαίνει ότι ένα εικονοστοιχείο σε φωτογραφία εδάφους αναπαριστά επιφάνεια μήκους  $10 \text{ m}$  στο έδαφος και εάν θεωρήσουμε το εικονοστοιχείο τετράγωνο, ουσιαστικά γνωρίζουμε ότι ένα εικονοστοιχείο αναπαριστά  $10 \times 10 = 100 \text{ m}^2$ .

Κατ' αναλογία, η μετρική μπορεί να εφαρμοστεί και σε οριζόντια διεύθυνση και αντί να αντιστοιχεί σε ένα ύψος να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της ιδανικής απόστασης από το αντικείμενο ψηφιοποίησης, για την επίτευξη επιθυμητής ανάλυσης (αποτύπωση λεπτομερειών). Από τη γεωμετρία του προβλήματος, η οποία είναι όμοια με αυτή της περίπτωσης της αεροφωτογραφίας, εύκολα εξάγεται ότι η απόσταση από την επιφάνεια μετρούμενου αντικειμένου σε σχέση με δεδομένο μέγεθος λεπτομερειών στην επιφάνεια των αντικειμένων που πρέπει να αποτυπωθεί δίνεται:

$$d = \frac{1}{2} f_c \frac{s_f}{s_p} \quad (\text{I.1})$$

όπου  $d$  η ζητούμενη απόσταση,  $f_c$  η εσπαστική απόσταση (focal length) του φωτογραφικού συστήματος,  $s_f$  το μικρότερο μέγεθος λεπτομερειών του αντικειμένου που ζητείται να αποτυπωθεί και  $s_p$  το μέγεθος ενός εικονοστοιχείου πάνω

στο οπτικό αισθητήριο του φωτογραφικού συστήματος. Ο παράγοντας  $(1/2)$  εισέρχεται ως εφαρμογή του νόμου δειγματοληψίας του Shannon (κριτήριο Nyquist) για να εξασφαλίσει ότι το μικρότερο χαρακτηριστικό  $sf$  θα μετρηθεί ορθά και συνεπώς δίνει το όριο στην επιλογή της απόστασης. Αξίζει να σημειωθεί κι εδώ ότι θεωρείται ότι τα εικονοστοιχεία είναι τετράγωνα (οπότε αρκεί να είναι γνωστό το πλάτος ενός εικονοστοιχείου) και ότι ως μικρότερο μέγεθος λεπτομερειών λαμβάνουμε το μικρότερο μέγεθος ως προς οποιαδήποτε κατεύθυνση του στο επίπεδο παράλληλα με το επίπεδο αποτύπωσης.

Το μέγεθος του εικονοστοιχείου  $s_p$  της μηχανής μπορεί να υπολογισθεί χρησιμοποιώντας τη μία διάσταση (πλάτος) του οπτικού αισθητηρίου (για τετράγωνα εικονοστοιχεία – διαφορετικά, πρέπει να υπολογίζεται σε σχέση με τη μεγαλύτερη διάσταση) και την αντίστοιχη διάσταση της εικόνας που προκύπτει:

$$s_p = \frac{s_w}{w} \quad (\text{I.2})$$

όπου  $s_w$  το πλάτος του οπτικού αισθητηρίου και  $w$  το πλάτος της φωτογραφίας σε pixels.

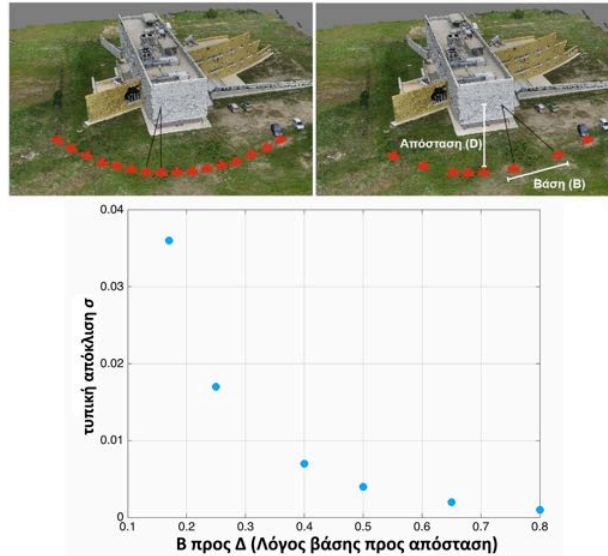
Για παράδειγμα, σε μια μηχανή με αισθητήριο μεγέθους  $23,5 \times 15,7$  mm και μέγεθος φωτογραφίας  $5472 \times 3647$  pixels, το μέγεθος του εικονοστοιχείου είναι  $s_p = 23,5/5472 = 4,2945$   $\mu\text{m}$ . Ανάλογα με τον κατασκευαστή, το μέγεθος ενός εικονοστοιχείου μπορεί να παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις (πχ. άλλη μηχανή έχει αισθητήρα με μέγεθος εικονοστοιχείου 4  $\mu\text{m}$  και άλλη με μέγεθος εικονοστοιχείου 12  $\mu\text{m}$ ). Για κάθε ψηφιακή φωτογραφική μηχανή, η εστιακή απόσταση  $f_c$  του φακού και το μέγεθος του εικονοστοιχείου χαρακτηρίζουν το προφίλ λειτουργίας της. Συνολικά, αν, για παράδειγμα, ζητούμενη είναι η ψηφιοποίηση αντικειμένου με λεπτομέρειες της τάξης του  $s_f = 1$  mm, και διατίθεται φωτογραφική μηχανή με φακό  $f_c = 50$  mm και αισθητήριο με μέγεθος εικονοστοιχείου  $s_p = 4$   $\mu\text{m}$ , η μέγιστη απόσταση αποτύπωσης δίνεται:

$$d = \frac{1}{2} 50[\text{mm}] \frac{1[\text{mm}]}{4[\mu\text{m}]} = \frac{1}{2} 50[\text{mm}] \frac{1000[\mu\text{m}]}{4[\mu\text{m}]} = 6250[\text{mm}] = 6,25\text{m} \quad (\text{I.3})$$

Όταν είναι γνωστή και σταθερή η απόσταση από την οποία μπορεί να γίνει φωτογράφιση, τότε μπορεί να εκτιμηθεί το μέγεθος της μικρότερης λεπτομέρειας που είναι δυνατό να αποτυπωθεί, ως  $s_f = 2s_p d / f_c$ . Για παράδειγμα, εάν διατίθεται μηχανή με  $s_p = 8$   $\mu\text{m}$ , φακό  $f_c = 35$  mm και η απόσταση στην καλύτερη περίπτωση είναι  $d = 5$  m, τότε η αναμενόμενη ανάλυση που μπορεί να επιτευχθεί είναι:

$$s_f = 2 \frac{8[m] 5[m]}{35[mm]} = 2,29\text{ mm} \quad (\text{I.4})$$

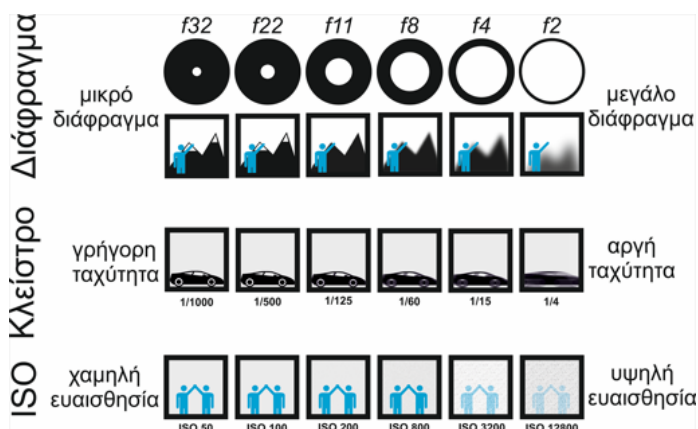
Φυσικά, καθώς η απόσταση μεγαλώνει, μικραίνει η ανάλυση που μπορεί να επιτευχθεί, για τη συγκεκριμένη περίπτωση (όλες οι άλλες παράμετροι σταθερές). Άρα, η τιμή  $s_f$  που υπολογίστηκε είναι η καλύτερη δυνατή. Θα πρέπει



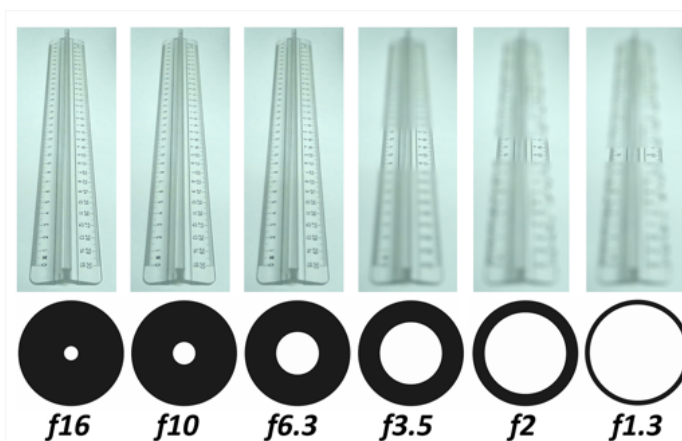
Εικόνα Ι.6. Ο λόγος  $B/D$  και η επίπτωσή του στο σφάλμα μέτρησης.

να σημειωθεί πως σε ένα σύνολο από φωτογραφίες η απόσταση φωτογράφισης από το αντικείμενο είναι αδύνατο να παραμένει σταθερή, τόσο λόγω της μετακίνησης όσο και λόγω του αναγλύφου του αντικειμένου και, ως εκ τούτου, η ανάλυση που μπορεί να επιτευχθεί είναι μεταβλητή από περιοχή σε περιοχή του παραγόμενου 3Δ μοντέλου. Συνεπώς αυτό που με μεγαλύτερη ασφάλεια μπορεί να αναφερθεί είναι ένα εύρος από αναλύσεις και όχι μία και μοναδική ανάλυση.

Επιπρόσθετα, ακόμη μια μετρική που επηρεάζει τη συλλογή δεδομένων είναι ο λόγος  $B/D$ , δηλαδή η σχέση της απόστασης ανάμεσα στα κέντρα λήψης δύο φωτογραφιών (image baseline-B) και της απόστασής τους από το αντικείμενο (distance-D). Σε ένα έργο φωτογραμμετρίας μια μεγάλη τιμή στο λόγο  $B/D$  είναι σημαντική για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, από την άλλη, όμως, οδηγεί σε μεγάλες αποκλίσεις του περιεχομένου μεταξύ των διαδοχικών φωτογραφιών, καθώς και σε έντονες αποφράξεις περιοχών, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ποιότητα της 3Δ ανακατασκευής κατά την εφαρμογή στη μέθοδο SFM-MVS. Ένα επιθυμητό εύρος τιμών  $B/D$ , το οποίο έχει αναφερθεί σε αρκετές επιστημονικές εργασίες βρίσκεται ανάμεσα στις 0,16 και 0,5, ή ίσως και ακόμα μεγαλύτερες. Αυτό που θα πρέπει κανείς να έχει ως γενικό κανόνα είναι ότι η ακρίβεια υπολογισμού του βάθους μειώνεται αισθητά όταν οι τιμές του λόγου  $B/D$  είναι μικρότερη από 0,3. Η Εικόνα Ι.6 παρουσιάζει το λόγο  $B/D$  και την επίπτωσή του στο σφάλμα μέτρησης.



Εικόνα Ι.7. Οι τρεις βασικές παράμετροι μίας φωτογραφικής μηχανής.



Εικόνα Ι.8. Οπτικοποίηση σχέσης διαφράγματος και βάθος πεδίου.

## Ι.4 Βασικές παράμετροι φωτογράφισης

Καθώς η Δομή από κίνηση βασίζεται στη φωτογράφιση είναι σκόπιμο να αναφερθούν οι βασικότερες από τις παραμέτρους που καθορίζουν τη σύλληψη μιας φωτογραφίας. Αυτές οι παράμετροι είναι το διάφραγμα, η ταχύτητα του κλείστρου και οι τιμές ISO. Στην Εικόνα Ι.7 παρουσιάζονται οι παράμετροι αυτές και η επιρροή τους πάνω στο περιεχόμενο της φωτογραφίας. Αξίζει να σημειωθεί η επίδραση του ανοικτού ή κλειστού διαφράγματος (aperture) σε σχέση με το βάθος πεδίου και την ταχύτητα του κλείστρου ή το χρόνο έκθεσης (shutter speed) (Εικόνα Ι.8). Εν συντομία, το διάφραγμα καθορίζει το μέγεθος του ανοίγματος στο φακό, μέσω του οποίου το φως ταξιδεύει προς το οπτικό αισθητήριο της μηχανής, ενώ η ταχύτητα του κλείστρου (που ρυθμίζει το χρόνο έκθεσης) καθορίζει το χρονικό διάστημα που το κλείστρο της μηχανής παραμένει ανοικτό και το φως φτάνει στο οπτικό αισθητήριο.

## I.5 Μοντέλο κάμερας οπής και εστιακή απόσταση

Το μοντέλο κάμερας οπής (pinhole camera model) αποτελεί το πιο κοινό μοντέλο που προσεγγίζει τη διαδικασία της φωτογράφισης. Το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιείται σε όλες στις φωτογραμμετρικές μεθόδους και δεν αφορά μόνο τη μέθοδο SFM. Στην πραγματικότητα το συγκεκριμένο μοντέλο προσεγγίζει τη λειτουργία των περισσότερων φωτογραφικών μηχανών και αποτελεί ένα καλό παράδειγμα για την κατανόηση της εσωτερικής τους γεωμετρίας. Σύμφωνα με το μοντέλο προβολής της κάμερας οπής, η σχέση ανάμεσα σε ένα σημείο στον πραγματικό κόσμο (3Δ) και μιας αναπαράστασης (προβολής) του πάνω σε μία εικόνα (2Δ εικονοστοιχείο) εξαρτάται από τρεις μετασχηματισμούς (Εικόνα I.9). Αυτοί είναι οι εξής:

- Μετασχηματισμός στερεού σώματος που αφορά στη μετατόπιση και περιστροφή της φωτογραφικής μηχανής σε τρεις διαστάσεις:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (I.5)$$

που  $R$  είναι ο πίνακας περιστροφής ( $3 \times 3$ ) της φωτογραφικής μηχανής και  $t$  το διάνυσμα ( $3 \times 1$ ) για τη μετατόπιση στο χώρο.

- Ο μετασχηματισμός προβολής από τρεις σε δύο διαστάσεις που βασίζεται και πάλι στην αρχή των όμοιων τριγώνων:

$$x = \frac{f X_c}{Z_c}, \quad y = \frac{f Y_c}{Z_c} \quad (I.6)$$

όπου  $f$  είναι η εστιακή απόσταση (focal length).

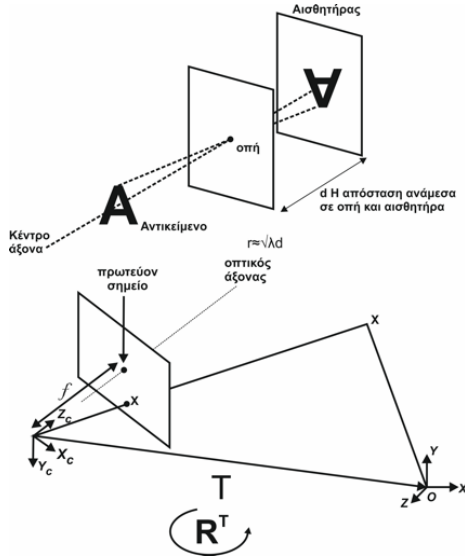
- Ο μετασχηματισμός

$$\tilde{\mathbf{u}} \sim \mathbf{K} \tilde{\mathbf{x}} \quad (I.7)$$

που συσχετίζει τις ακέραιες θέσεις των εικονοστοιχείων στην εικόνα  $\tilde{\mathbf{u}} \sim [u \ v \ 1]^T$  με τις διορθωμένες συντεταγμένες τους, λαμβάνοντας υπόψη την απόκλιση του πρωτεύοντος σημείου στο οπτικό αισθητήριο της μηχανής, με

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \alpha_u & s & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (I.8)$$

όπου  $\alpha_u, \alpha_v$  οι συντελεστές κλιμάκωσης σε δύο διαστάσεις,  $s$  ο βαθμός στρέβλωσης (skewness) και  $u_0, v_0$  η θέση του πρωτεύοντος σημείου. Αυτές είναι οι εσωτερικές παράμετροι (intrinsic parameters) μίας φωτογραφικής μηχανής που ακολουθεί το μοντέλο οπής. Σημειώνεται ότι το



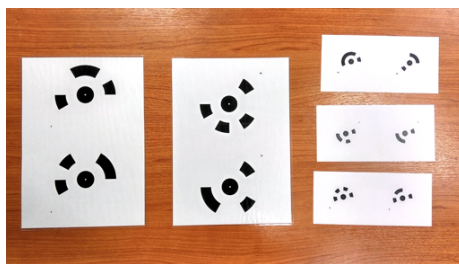
Εικόνα Ι.9. Προβολή σημείου  $X$  από τον 3Δ χώρο στο επίπεδο της εικόνας.

σχήμα των εικονοστοιχείων θεωρείται για ευκολία ότι είναι τετράγωνο και ως εκ τούτου ισχύει ότι  $\alpha_u = \alpha_v = f$  και ότι δεν παρουσιάζεται στρέβλωση  $s = 0$ . Άρα ως τιμή του  $\alpha = f$  ορίζεται η εστιακή απόσταση του φακού εκφρασμένη σε εικονοστοιχεία. Ως πρωτεύον σημείο (principal point) ορίζεται το κέντρο του οπτικού αισθητηρίου της φωτογραφικής μηχανής.

## Ι.6 Φωτοσταθερά, στόχοι και κλίμακες

Η μέθοδος SFM-MVS παράγει 3Δ μοντέλα, τα οποία έχουν σωστές αναλογίες αλλά βρίσκονται σε ένα τυχαίο σύστημα συντεταγμένων αναφοράς. Με τη χρήση φωτοσταθερών, στόχων και κλιμάκων, είναι δυνατή η κλιμάκωση του 3Δ ψηφιακού αντιγράφου, ώστε οι αποστάσεις ανάμεσα στις κορυφές του να ταυτίζονται με αυτές του πραγματικού κόσμου. Υπάρχει μια πληθώρα από σχετικά αντικείμενα, τα οποία μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει είτε σε εσωτερικού είτε εξωτερικού χώρου έργα 3Δ ψηφιοποίησης. Κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων αντικειμένων είναι η ακρίβειά τους και η βαθμονόμηση κατά την κατασκευή τους, η ποιότητα κατασκευής και η αντοχή τους στο χρόνο και στο νερό, καθώς και οι διαφορετικές εκδόσεις τους (κλίμακες) που θα μπορούσαν να καλύψουν τις ανάγκες διαφορετικών έργων ψηφιοποίησης. Πολλές φορές συναντούμε κλίμακες που φέρουν πληροφορία υφής, η οποία είναι φιλική προς τη μέθοδο SFM-MVS, ώστε να επιτυγχάνεται η 3Δ ανακατασκευή ολόκληρης της κλίμακας. Επίσης κάποια λογισμικά SFM-MVS (πχ. Agisoft Metashape –μέχρι το 2018 γνωστό ως Photoscan) διαθέτουν





**Εικόνα I.10.** Παραδείγματα από φωτοσταθερά φιλικά προς τη μέθοδο SFM-MVS συμβατά με το λογισμικό Agisoft Metashape (μέχρι το 2018 γνωστό ως Photoscan).

δικά τους φωτοσταθερά, τα οποία μπορεί κανείς να εκτυπώσει. Το πλεονέκτημα με αυτά είναι ότι αναγνωρίζονται αυτόματα από το λογισμικό μέσα στις φωτογραφίες, με αποτέλεσμα να παράγεται αυτόματα ορθά κλιμακωμένο 3D αντίγραφο, αρκεί ο χρήστης να εισάγει τις ακριβείς αποστάσεις ανάμεσα στα κέντρα των φωτοσταθερών. Ειδικότερα κατά τη ψηφιοποίηση αρχαιολογικών χώρων ή μνημείων, συνήθως ορίζονται σημεία ελέγχου εδάφους (ground control points - GCPs) όπου οι θέσεις τους υπολογίζονται με συστήματα GNSS – global navigation satellite system. Η ύπαρξη των GCPs επιτρέπει τη γεωαναφορά του 3D ψηφιακού αντίγραφου, ώστε εκτός από τη δυνατότητα υπολογισμού αποστάσεων ανάμεσα σε σημεία πάνω στο αντίγραφο να είναι δυνατός ο εντοπισμός της θέσης αυτών των σημείων στον πραγματικό κόσμο.

Η Εικόνα I.10 παρουσιάζει παραδείγματα από φωτοσταθερά, τα οποία είναι φιλικά προς τη μέθοδο SFM-MVS και συμβατά με το λογισμικό Agisoft Metashape (μέχρι το 2018 γνωστό ως Photoscan).

## I.7 Υλικά συμβατά με τη μέθοδο Δομή από κίνηση

Η κατηγοριοποίηση υλικών σε φιλικά ή μη φιλικά προς την 3D ψηφιοποίηση με τη μέθοδο SFM-MVS δεν μπορεί να είναι απόλυτη και οι παρακάτω λίστες θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη μόνο ενδεικτικά. Σε κάθε έργο ψηφιοποίησης θα πρέπει να γίνεται επιτόπια μελέτη.

**Φιλικά υλικά:** φυσική πέτρα, επεξεργασμένη πέτρα, έδαφος, μάρμαρο (όχι λευκό), κόκκαλο, ξύλο, δέρμα, ψαμμίτης, σίδηρο, μπρούντζος, χαλκός, χρυσός, γύψος, κεραμικά, τούβλα.

**Μη-φιλικά υλικά:** νερό, γυαλί, βλάστηση, φυτά (σε ελεγχόμενο περιβάλλον μπορούν να αποτυπωθούν), βερνίκι, ασφάλι, μονοχρωματικές πλαστικές-γυαλιστερές επιφάνειες, γυαλιστερός χρυσός-χαλκός-μπρούντζος-σίδηρο.

## I.8 Δείγματα προβλημάτων

Ο Πίνακας I.2 παρουσιάζει μια σειρά από δείγματα προβληματικών δεδομένων, με επεξήγηση του προβλήματος, σε σχέση με τη μέθοδο SFM-MVS.

**Πίνακας I.2.** Δείγματα προβληματικών δεδομένων για τη μέθοδο SFM-MVS.

	<ul style="list-style-type: none"> <li>Χρήση flash – Έντονα λευκά χρώματα και σκιές</li> <li>Κακό φόντο με ανακλαστικές επιφάνειες</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Πολύ σκούρα χρώματα</li> <li>Έντονες σκιές</li> <li>Ανακλάσεις</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Υπερβολική γωνία λήψης (προοπτική)</li> <li>Φωτογράφιση απέναντι σε ηλιακό φως</li> <li>Αντηλιά και ανακλάσεις σε γυάλινες επιφάνειες</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Φωτογράφιση απέναντι σε ηλιακό φως</li> <li>Αντηλιά και ανακλάσεις του φακού</li> <li>Μη-κεντραρισμένο αντικείμενο</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Το αντικείμενο εμφανίζεται πολύ μακριά</li> <li>Το μνημείο είναι πολύ μεγάλο για να ανακατασκευαστεί σωστά με μικρό πλήθος φωτογραφιών (βλέπε απόσταση λήψης)</li> <li>Θα μπορούσε να προκύψει ένα χαμηλής ποιότητας 3D ψηφιακό αντίγραφο</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ανακλαστική επιφάνεια</li> <li>Επιφάνεια χωρίς χρωματικές μεταβολές (λευκό)</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Χαμηλός φωτισμός</li> <li>Χρήση φλας – Δημιουργία υπερφωτισμένων / υποφωτισμένων περιοχών</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Χαμηλός φωτισμός</li> <li>Υψηλές τιμές ISO</li> <li>Πρόβλημα στο βάθος πεδίου – εστίαση</li> <li>Κακή εξισορρόπηση του λευκού χρώματος</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Χαμηλός φωτισμός</li> <li>Το αντικείμενο εμφανίζεται πολύ μακριά</li> </ul>

## I.9 Αυτοματοποίηση διαδικασιών επίγειας συλλογής δεδομένων

Η επίγεια και εναέρια συλλογή δεδομένων για τη 3Δ ψηφιοποίηση με τη μέθοδο SFM-MVS απαιτεί μια σειρά από διαδικασίες. Για παράδειγμα, υπάρχει η ανάγκη για φωτογράφιση της κάθε περιοχής της επιφάνειας ενός αντικειμένου τουλάχιστον από τρεις διαφορετικές οπτικές γωνίες για την επιτυχή 3Δ ανακατασκευή (στερεοσκοπική παράλλαξη). Ταυτόχρονα, η φωτογράφιση του στατικού αντικειμένου θα πρέπει να πραγματοποιηθεί από ένα μεγάλο πλήθος διαφορετικών οπτικών γωνιών θέασης με αποτέλεσμα να επιβάλλεται η μεταφορά της φωτογραφικής μηχανής από το ένα σημείο στο άλλο ως μία χαμηλού κόστους λύση. Η αλλαγή της θέσης του φωτογράφου (όταν πρόκειται για ακίνητο αντικείμενο) προϋποθέτει και την ύπαρξη του διαθέσιμου χώρου για να μετακινηθεί. Ζωτικής σημασίας είναι η ασφάλεια του αντικειμένου κατά τη διάρκεια λήψης φωτογραφιών. Σε άλλες περιπτώσεις όπου το αντικείμενο είναι μεταφέρσιμο μπορεί να απαιτηθεί η προσεκτική τοποθέτηση του με διαφορετικούς τρόπους, ώστε να αποτυπωθούν όλα τα μέρη του. Επιπρόσθετα, επιβάλλεται η ορθή λήψη φωτογραφιών που θα συνάδει με βασικές φωτογραμμετρικές αρχές (π.χ. ορθά εστιασμένες επιφάνειες του αντικειμένου, σωστό βάθος πεδίου, καλή αντίθεση και ένταση χρωμάτων, θερμοκρασία φακών πριν την έναρξη συλλογής φωτογραφιών, κ.α.). Από την άλλη, η ανάγκη για λήψη φωτογραφιών από σχετικά σταθερές αποστάσεις με στόχο την ελαχιστοποίηση της απόκλισης των τιμών  $GSD$ , καθώς και η δυσκολία λόγω των μορφολογικών χαρακτηριστικών ενός αντικειμένου στο να εντοπίσει κάποιος τις κατάλληλες θέσεις λήψης, αποτελούν παραμέτρους που οδηγούν στην παρουσία επιπρόσθετου φωτογραφικού εξοπλισμού. Τέτοιος φωτογραφικός εξοπλισμός μπορεί να είναι:

- Μονόποδο-α, τρίποδο-α.
- Ελεγχόμενος φωτισμός.
- Φίλτρα πόλωσης/φίλτροπόλωση.
- Βαθμονομητές χρωμάτων και γεωμετρίας.
- Διαφορετικοί φακοί ανάλογα με το μέγεθος του αντικειμένου.

Η επίγεια συλλογή δεδομένων για την 3Δ ψηφιοποίηση αντικειμένων με τη μέθοδο SFM-MVS είναι μια αρκετά σύνθετη διαδικασία, η οποία όμως μπορεί να αυτοματοποιηθεί, έως κάποιο βαθμό, ανάλογα με τον τύπο του αντικειμένου που πρόκειται να αποτυπώσουμε (ένα κινητό ή ένα ακίνητο αντικείμενο).

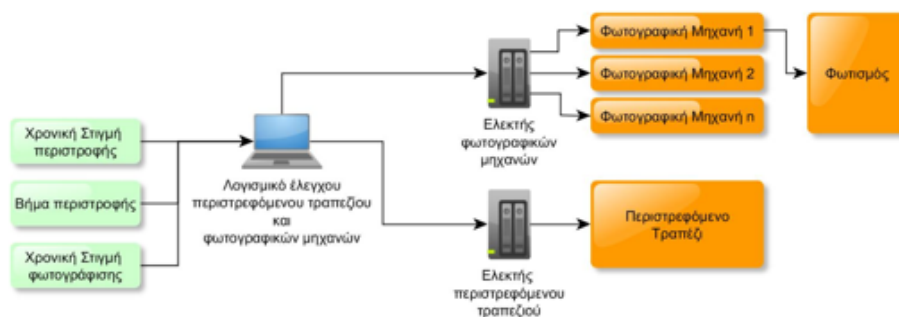
Τα οφέλη από την αυτοματοποίηση της διαδικασίας συλλογής δεδομένων για τη μέθοδο SFM-MVS σχετίζονται με θέματα όπως τα παρακάτω:

- Απλοποίηση της διαδικασίας συλλογής δεδομένων.
- Αύξηση παραγωγικότητας της ομάδας ψηφιοποίησης.
- Δυνατότητα συλλογής δεδομένων από αντικείμενα πολύ μικρού μεγέθους (macro φωτογράφιση) και σε δύσκολες συνθήκες, στις οποίες είναι απαραίτητος ο επιπρόσθετος εξοπλισμός.
- Επίτευξη της συλλογής δεδομένων σε περιπτώσεις που υπάρχει πολύ μικρός χρόνος πρόσβασης στο αντικείμενο.
- Εξασφάλιση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών στα δεδομένα.
- Επαναληψιμότητα της διαδικασίας συλλογής δεδομένων με στόχο την υλοποίηση αντικειμενικών πειραμάτων αξιολόγησης του εξοπλισμού και των 3Δ δεδομένων που προκύπτουν.

Η αυτοματοποίηση της διαδικασίας συλλογής δεδομένων μεταβάλλεται ανάλογα με το αντικείμενο προς ψηφιοποίηση. Πιο συγκεκριμένα, σε περιπτώσεις αποτύπωσης ενός κινητού αντικειμένου, η χρήση μιας περιστρεφόμενης βάσης αποτελεί ιδανική λύση, αφού εξασφαλίζει την ευκολότερη αλλαγή οπτικής γωνίας του αντικειμένου σε σχέση με τη σταθερή θέση μίας ή και περισσότερων φωτογραφικών μηχανών. Επίσης, επιτρέπει τη δραματική μείωση του πλήθους μετακινήσεων και αγγιγμάτων του αντικειμένου κάτι που αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό πλεονέκτημα όταν η ψηφιοποίηση αφορά τέχνηρα και η ασφάλεια τους παίζει πρωταρχικό ρόλο. Η αυτοματοποίηση του βήματος περιστροφής της βάσης με χρήση κάποιου ειδικού λογισμικού επιτρέπει τον ευκολότερο εντοπισμό αποφραγμένων περιοχών (π.χ. το τμήμα του σώματος ενός αγγείου πίσω από τις λαβές του). Επιπλέον, η χρήση μιας περιστρεφόμενης βάσης επιτρέπει την εφαρμογή ενός σταθερού παρασκηνίου (φόντου) πίσω από το αντικείμενο, με αποτέλεσμα τη μείωση της ανάγκης ορισμού περιοχών του φόντου στις εικόνες (μάσκες). Επιπρόσθετα, η ρύθμιση σταθερού φωτισμού εξασφαλίζει όμοιες συνθήκες φωτογράφισης για όλα τα τμήματα του αντικειμένου που αποτυπώνονται από την ίδια οπτική γωνία θέασης (σταθερή θέση φωτογραφικής μηχανής και φωτιστικών σωμάτων).

Τρεις προσεγγίσεις αυτοματισμού των διαδικασιών μπορούν να διακριθούν:

- **Χειροκίνητη περιστρεφόμενη βάση:** Ο φωτογράφος θα πρέπει μόνος του να περιστρέφει τη βάση, ώστε να επιτυγχάνει κάθε φορά την επιθυμητή γωνία θέασης. Οι προσημειωμένες μοίρες περιστροφής πάνω στη βάση βοηθούν στην επαναληψιμότητα και σταθερότητα των δεδομένων.
- **Ημιαντόματη περιστρεφόμενη βάση:** Διαθέτει διακόπτη ON/OFF όπου ξεκινά η περιστροφή (ατέρμονα) προς μια συγκεκριμένη φορά (ωρολογιακή ή αντι-ωρολογιακή). Η επιλογή της επιθυμητής γωνίας περιστροφής επιτυγχάνεται με το κλείσιμο/άνοιγμα του διακόπτη.



**Εικόνα Ι.11.** Χρήση αυτόματης περιστρεφόμενης βάσης βηματικού κινητήρα με δυνατότητα χειρισμού από υπολογιστή.

- Αυτόματη περιστρεφόμενη βάση με βηματικό κινητήρα και δυνατότητα χειρισμού από υπολογιστή:** Κατάλληλο λογισμικό αναλαμβάνει να εκτελέσει την εκκίνηση και παύση της περιστροφής. Προσφέρει τη δυναμική μεταβολή του βήματος περιστροφής αφού ο χειριστής μπορεί να ορίσει μικρότερο ή μεγαλύτερο βήμα ανάλογα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αντικειμένου. Το λογισμικό μπορεί επίσης, σε κάποιες περιπτώσεις, να ενεργοποιεί τη λήψη φωτογραφιών και ως εκ τούτου ο χειριστής μπορεί απλά να παρατηρεί και να επιβλέπει την αυτοματοποιημένη διαδικασία συλλογής δεδομένων. Η επαναληψιμότητα του τρόπου συλλογής των δεδομένων με τη συγκεκριμένη προσέγγιση έχει μεγάλη ακρίβεια και υπάρχει πλήρης έλεγχος της διαδικασίας.

Η υλοποίηση μιας περιστρεφόμενης βάσης χαμηλού κόστους μπορεί να πραγματοποιηθεί σήμερα με τη χρήση ενός μικροελεγκτή, όπως το Arduino. Μπορεί κανείς να εντοπίσει πληθώρα παραδειγμάτων υλοποίησης στο Διαδίκτυο με έτοιμο πηγαίο κώδικα, τα οποία συνδυάζουν και τεχνολογίες 3D εκτύπωσης για την εύκολη δημιουργία των μηχανικών τμημάτων.

Από την άλλη, η αυτοματοποίηση συλλογής δεδομένων ακίνητων αντικειμένων, όπως είναι μια προτομή ή ένα άγαλμα, απαιτούν τη χρήση ειδικών κατασκευών που κινούνται επάνω σε κυκλικές ράγες. Και σε αυτή την περίπτωση μπορεί κανείς να διακρίνει τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις, αντίστοιχες με αυτές των περιστρεφόμενων βάσεων, αφού το μόνο που αλλάζει είναι η περιστροφή του εξοπλισμού γύρω από το αντικείμενο. Σε περιπτώσεις όπου η συλλογή δεδομένων αφορά πίνακες, κτήρια, προσόψεις και μνημεία, τότε η αυτοματοποίηση της διαδικασίας συλλογής δεδομένων μπορεί να πραγματοποιηθεί με ευθύγραμμες ράγες. Αξίζει να σημειωθεί πως, όταν πρόκειται για χειροκίνητα συστήματα, ο φωτογράφος θα πρέπει μόνος του να μετακινεί το βαγονέτο που βρίσκεται πάνω στις ράγες, ώστε να επιτυγχάνει κάθε φορά το επιθυμητό βήμα (παράλλαξη ανάμεσα σε δύο διαδοχικές φωτογραφίες). Γενικά, οι κατασκευές με ράγες εξασφαλίζουν την ευκολότερη αλλαγή



**Εικόνα 1.12.** Επίγεια συλλογή δεδομένων με τη χρήση μονόποδου μεταβλητού ύψους και ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής με δυνατότητα μετάδοσης εικόνας σε έξυπνη φορητή συσκευή.

οπτικής γωνίας σε σχέση με τη μεταφορά του φωτογραφικού εξοπλισμού πάνω σε τρίποδα. Επιτρέπει τη σταθερή απόσταση από το αντικείμενο μειώνοντας έτσι το εύρος μεταβολής του *GSD*. Επίσης, προσφέρει δυνατότητα μεγάλης επικάλυψης ανάμεσα σε γειτονικές φωτογραφίες. Αξίζει να σημειωθεί πως η εφαρμογή πολύ μικρού βήματος μετατόπισης σε περιπτώσεις φωτογράφισης πάνω σε ευθύγραμμες ράγες επιτρέπει τη συλλογή δεδομένων που είναι χρήσιμα και σε άλλες εφαρμογές όπως είναι η *Gigapixel* φωτογράφιση.

Σε περιπτώσεις, στις οποίες απαιτείται η επίγεια ψηφιοποίηση ενός αντικειμένου με μεγάλο ύψος, τότε η χρήση μεταβλητού ύψους μονόποδων μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στη διαδικασία συλλογής δεδομένων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.12. Συνήθως επιτρέπουν την τοποθέτηση της φωτογραφικής μηχανής σε ύψος από δύο έως και δέκα μέτρα από το έδαφος. Η χρήση τους επηρεάζεται από την ανοχή σε ταλάντωση η οποία προσδιορίζεται από τα υλικά κατασκευής, το βάρος της φωτογραφικής μηχανής, αλλά φυσικά και τις ικανότητες του ίδιου του χειριστή (δομή με υψηλό κέντρο βάρους). Τα μονόποδα συνδυάζονται συνήθως με φωτογραφικές μηχανές που διαθέτουν τηλεχειρισμό ή χρονοδιακόπτη λήψης αλλά και με πιο σύγχρονα χαρακτηριστικά όπως τη δυνατότητα ασύρματης μετάδοσης της εικόνας (WiFi). Η χρήση τους στο πεδίο προϋποθέτει κάποια εμπειρία από το χειριστή ενώ επιτρέπει την πρόσβαση σε σημεία που μόνο με συστήματα μη επανδρωμένων αεροσκαφών (ΣμηΕΑ) μπορεί κανείς να αποτυπώσει. Ως εκ τούτου, η προσέγγιση αυτή μπορεί να θεωρηθεί έως ένα χαμηλού κόστους υποκατάστατο των ΣμηΕΑ για πολύ χαμηλά υψόμετρα. Ταυτόχρονα, αποτελεί μια πρακτική λύση σε περιπτώσεις που δεν επιτρέπεται η χρήση ΣμηΕΑ. Από την άλλη, λόγω του τρόπου χρήσης του μονόποδου παρουσιάζονται δυσκολίες στην επίτευξη μικρού εύρους μεταβολής της *GSD* ενώ ταυτόχρονα ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι χαμηλός λόγω των ταλαντώσεων μετά από κάθε αλλαγή θέσης (νέα οπτική γωνία).

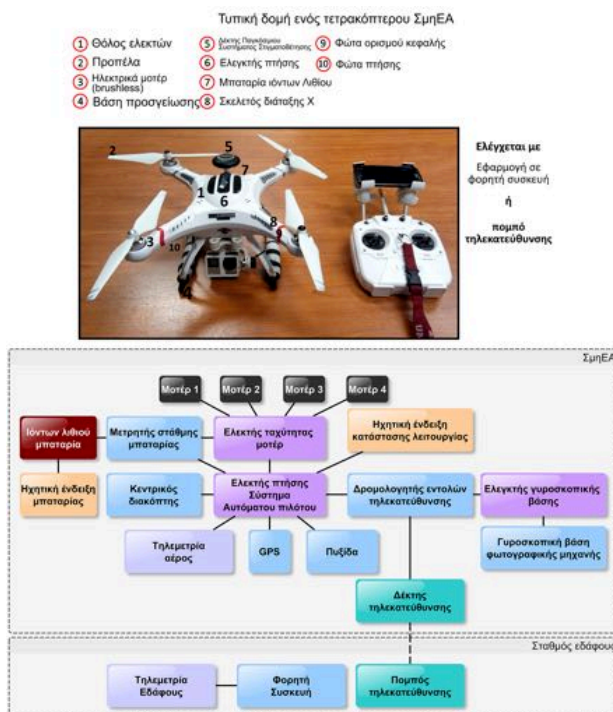
Εκτός από τα ακίνητα αντικείμενα η SFM-MVS μπορεί να εφαρμοσθεί και για την 3D ψηφιοποίηση ανθρώπινων σωμάτων (π.χ. άνθρωποι που φορούν παραδοσιακές φορεσιές). Βασικό πρόβλημα είναι η αδυναμία απόλυτης ακινησίας ενός ανθρώπου, καθώς ακόμη και ελάχιστες μεταβολές στη θέση επηρεάζουν την ποιότητα της 3D ανακατασκευής. Για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας

συλλογής δεδομένων σε τέτοιες εργασίες επιβάλλεται η δραματική αύξηση του συνολικού κόστους του εξοπλισμού. Πιο συγκεκριμένα, η αποτύπωση ανθρώπινων σωμάτων υλοποιείται με τη χρήση συστοιχίας φωτογραφικών μηχανών που τοποθετούνται σε σφαιρική, ημισφαιρική ή κυλινδρική διάταξη. Το πλήθος των φωτογραφικών μηχανών αντιστοιχεί στο πλήθος των οπτικών γωνιών από όπου θα φωτογραφίζεται ταυτόχρονα (σύγχρονα) το αντικείμενο (π.χ. 100 μηχανές). Όσο μεγαλύτερο το πλήθος φωτογραφικών μηχανών τόσες περισσότερες οι οπτικές γωνίες θέασης άρα και αύξηση των ικανοτήτων του συστήματος να εντοπίζει πτυχές και κρυφά σημεία πάνω στο αντικείμενο που οδηγούν στην καλύτερη 3Δ αποτύπωσή του. Μια τέτοια συστοιχία φωτογραφικών μηχανών απαιτεί ειδικές σταθερές κατασκευές στήριξης τόσο του φωτογραφικού εξοπλισμού όσο και των καλωδιώσεών τους και του φωτισμού. Καθώς δεν υπάρχουν, σήμερα, πολλές εμπορικές λύσεις, η εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος περιλαμβάνει και την υλοποίηση μια σειράς πειραμάτων για τον εντοπισμό των βέλτιστων ρυθμίσεων. Τα πειράματα αυτά θα πρέπει να περιλαμβάνουν: αλλαγές στις θέσεις των φωτογραφικών μηχανών, των πηγών φωτισμού, του μηχανισμού-τρόπου ταυτόχρονης λήψης των φωτογραφιών, της δημιουργίας διαφορετικών τοπολογικών εκδόσεων του εξοπλισμού ανάλογα με το αντικείμενο (π.χ. παιδιά, ενήλικες, ειδικές περιπτώσεις ρουχισμού-λαογραφία, παραδοσιακές στολές, κλπ.). Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να επιτρέπει τη λήψη συνεχόμενων φωτογραφικών καρτέ και να οδηγήσει στη δημιουργία πραγματικών (όχι απλά στερεοσκοπικών) 3Δ εικονοσειρών. Σήμερα, μια χαμηλού κόστους συστοιχία σάρωσης μπορεί να υλοποιηθεί με τη χρήση μικρο-υπολογιστικών συστημάτων τύπου Raspberry Pi και αντίστοιχων ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών Raspberry Pi Camera.

## **I.10 Αυτοματοποίηση διαδικασιών εναέριας συλλογής δεδομένων**

Η εναέρια συλλογή δεδομένων με συστήματα μη επανδρωμένων αεροσκαφών (ΣμηΕΑ) επιτρέπει τη φωτογράφιση από οπτικές γωνίες θέασης που είναι δύσκολο ή και αδύνατο να επιτευχθούν με άλλο τρόπο. Τα ΣμηΕΑ συνοδεύονται από λογισμικό που επιτρέπει την υλοποίηση σχεδίου πτήσης πάνω σε ψηφιακό χάρτη. Το σχέδιο πτήσης μπορεί στη συνέχεια να ακολουθήσει αυτόματα το ΣμηΕΑ. Ένα σχέδιο πτήσης περιγράφει εκτός από γεωγραφικά σημεία (θέσεις) στα οποία πρέπει να βρεθεί το ΣμηΕΑ, μεταβολές στο ύψος πτήσης, σημεία στα οποία θα γίνουν οι λήψεις των φωτογραφιών, μεταβολές του οπτικού πεδίου (κατεύθυνση πτητικού μέσου και φωτογραφικής μηχανής ανεξάρτητα), καθώς και σημεία ενδιαφέροντος που θα «σημαδεύει» η φωτογραφική μηχανή αυτόματα όσο το ΣμηΕΑ θα πετάει γύρω από αυτά. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εκτέλεση του σχεδίου πτήσης πραγματοποιείται αυτόματα από το ΣμηΕΑ συμπεριλαμβανομένων και των διαδικασιών προσγειώσεων-





Εικόνα Ι.13. Τυπική δομή ενός ΣμηΕΑ με σκελετό διάταξης X (τετρακόπτερο).

απογειώσεων. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, δεν απαιτείται καμία επέμβαση από το χειριστή παρά μόνο σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Φυσικά η επίβλεψη της πτήσης από διαπιστευμένο χειριστή, σε όλη τη διάρκειά της, είναι επιβεβλημένη. Σήμερα, η νομοθεσία επιβάλλει τη χρήση των ΣμηΕΑ μόνο από πιστοποιημένους χειριστές. Η χρήση τους σε συγκεκριμένες περιοχές (αρχαιολογικούς χώρους) προϋποθέτει την αδειοδότηση από τις αρμόδιες αρχές. Η χρήση ΣμηΕΑ επιτρέπει την επανάληψη της διαδικασίας συλλογής δεδομένων. Στην Εικόνα Ι.13 παρουσιάζεται μια τυπική δομή ενός ΣμηΕΑ με σκελετό διάταξης X (τετρακόπτερο). Η εικόνα παρουσιάζει επίσης τα βασικά δομικά στοιχεία ενός τέτοιου μέσου.

Ένα ιδιαίτερο τμήμα της δομής ενός ΣμηΕΑ είναι η τηλεμετρία. Σκοπός ύπαρξής της είναι η υλοποίηση της ασύρματης επικοινωνίας ανάμεσα σε ένα σταθμό εδάφους και σε ένα ΣμηΕΑ. Σε αντίθεση με την τηλεκατεύθυνση αναλαμβάνει σε πραγματικό χρόνο τη συνεχή ενημέρωση πλήθους παραμέτρων που αφορούν τόσο το ίδιο το ΣμηΕΑ όσο και τον υπόλοιπο εξοπλισμό που αυτό μεταφέρει. Κάποιες από τις παραμέτρους που μεταδίδει η τηλεμετρία είναι οι εξής:

- γεωγραφικό μήκος και πλάτος του σημείου όπου βρίσκεται το ΣμηΕΑ,
- απόσταση ΣμηΕΑ από το έδαφος (υψόμετρο σε σχέση με το σημείο απο-

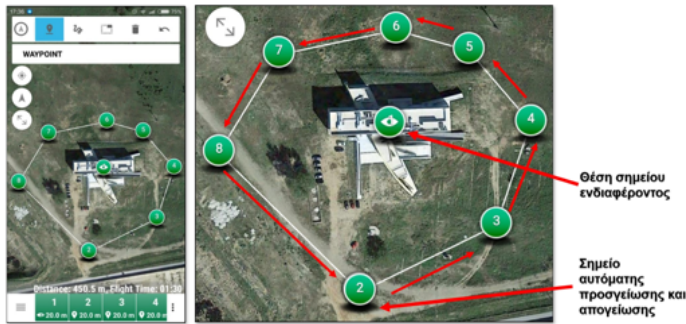


- γείωσης - σχετικό, και από το έδαφος - απόλυτο),
- ταχύτητα εδάφους (m/sec) και κάθετη ταχύτητα (m/sec),
- σχέση του οχήματος ως προς τον ορίζοντα - άξονα διατοιχισμού (roll), πρόνευσης (pitch) και εκτροπής (yaw) σε μοίρες,
- κατάσταση της μπαταρίας (πόσα mAh καταναλώθηκαν μέχρι τη δεδομένη στιγμή),
- συνολικός χρόνος που το ΣμηΕΑ βρίσκεται στον αέρα (χρόνος πτήσης),
- γενική κατεύθυνση θέσης σταθμού εδάφους,
- το πλήθος δορυφόρων που το σύστημα έχει εντοπίσει το GPS,
- ποιότητα και ακρίβεια θέσης στο χώρο (3D fix),
- απόσταση από το επόμενο σημείο ενδιαφέροντος (όταν το ΣμηΕΑ βρίσκεται σε κατάσταση αυτόματης πτήσης),
- ενημέρωση της χρονικής στιγμής που το μέσο καταφθάνει σε κάποιο σημείο ενδιαφέροντος (ομοίως με πάνω),
- βίντεο πραγματικού χρόνου από τη φωτογραφική μηχανή που φέρει το ΣμηΕΑ.

Η αυτοματοποίηση μίας εναέριας συλλογής δεδομένων μπορεί να υλοποιηθεί μέσα από μια σειρά εξειδικευμένων λογισμικών, τα οποία διατίθενται τόσο για σταθερά υπολογιστικά συστήματα (Mission Planner<sup>2</sup> της Ardupilot) όσο και για έξυπνες φορητές συσκευές (DroidPlanner – Tower<sup>3</sup>). Παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα σχεδιασμού μιας αυτόματης πτήσης με ΣμηΕΑ με προκαθορισμένη διαδρομή γύρω από ένα κτήριο με στόχο να κατανοήσει ο αναγνώστης το βαθμό αυτοματισμού που προσφέρει η συγκεκριμένη τεχνολογία στις διαδικασίες συλλογής δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν από φωτογραμμετρικές μεθόδους όπως είναι η SFM-MVS (Εικόνα Ι.14). Το παράδειγμα βασίζεται στη χρήση του δωρεάν λογισμικού Droidplanner, διαθέσιμου για συσκευές Android. Ο σχεδιασμός της πτήσης του ΣμηΕΑ ξεκινά με το χειριστή ΣμηΕΑ να ορίζει σε ένα ψηφιακό χάρτη τη θέση του σημείου ενδιαφέροντος καθώς και μια σειρά από σημεία από τα οποία επιθυμεί να περάσει το ΣμηΕΑ. Για κάθε ένα από τα σημεία του σχεδίου πτήσης ο χειριστής του ΣμηΕΑ μπορεί να ορίσει την ταχύτητα πτήσης, το χρόνο που επιθυμεί να κρατήσει τη συγκεκριμένη θέση το ΣμηΕΑ (GPS hold position), καθώς και άλλες παραμέτρους, όπως το αρχικό ύψος απογείωσης αλλά και τη μεταβολή του ύψους από σημείο σε σημείο.

<sup>2</sup>Mission planner <http://ardupilot.org/planner/>.

<sup>3</sup>DroidPlanner (Tower), <https://github.com/DroidPlanner>.



**Εικόνα I.14.** Ορισμός σημείου ενδιαφέροντος, σημείων που θα ακολουθήσει το ΣμηΕΑ καθώς και σημείου προσέγγισης/απογείωσης πάνω σε ψηφιακό χάρτη.



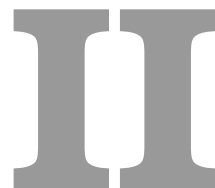
**Εικόνα I.15.** Αυτοματοποιημένη σάρωση κτηριακής δομής σε διαφορετικά ύψη με καθορισμένο σημείο ενδιαφέροντος.

Ο ορισμός του σημείου ενδιαφέροντος σημαίνει πως κατά την εκτέλεση της πτήσης το εμπρόσθιο τμήμα του ΣμηΕΑ θα ευθυγραμμίζεται προς την κατεύθυνση του εν λόγω σημείου. Στο συγκεκριμένο σχέδιο πτήσης του παραδείγματος, καθώς το ΣμηΕΑ θα κινείται γύρω από το κτήριο, σε κάθε σημείο θα πραγματοποιεί διορθωτική περιστροφή γύρω από τον εαυτό του, έτσι ώστε το εμπρόσθιο τμήμα του να είναι προσανατολισμένο προς το σημείο ενδιαφέροντος (κέντρο του κτιρίου). Το λογισμικό προσφέρει επίσης μια σειρά αυτοματισμών που σχετίζονται απόλυτα με τα δεδομένα που χρησιμοποιεί η μέθοδος SFM-MVS για την 3Δ ανακατασκευή. Μία τέτοια επιλογή είναι η αυτοματοποιημένη σάρωση μιας δομής σε διαφορετικά ύψη. Ο χειριστής ορίζει και πάλι το σημείο ενδιαφέροντος επάνω στον ψηφιακό χάρτη και στη συνέχεια καθορίζει την ακτίνα ενός ασφαλούς ιδεατού κύκλου πτήσης (κυκλική τροχιά) γύρω από τη δομή που θέλει να φωτογραφίσει. Το λογισμικό αναφέρει τη συνολική απόσταση που θα διανύσει το ΣμηΕΑ σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα, καθώς και τη διάρκεια της πτήσης σύμφωνα με την ταχύτητα που έχει ορίσει ο χειριστής. Πέρα από τον ορισμό της αρχικής κυκλικής τροχιάς, ο χειριστής παραμετροποιεί την απόσταση ανάμεσα στις υπόλοιπες κυκλικές τροχιές, ορίζοντας το μέγιστο ύψος πτήσης του ΣμηΕΑ και της υψομετρικής

διαφοράς ανάμεσα σε δύο γειτονικές κυκλικές τροχιές. Η Εικόνα I.15 παρουσιάζει στιγμιότυπο από το λογισμικό DroidPlanner, όπου ο χειριστής ορίζει τις διάφορες παραμέτρους αυτοματοποιημένης διαδικασίας σάρωσης ενός κτιρίου.



—Υπάρχουν περίπλοκες γεωμετρικές σχέσεις μεταξύ των πολλαπλών προβολών μιας 3Δ σκηνής που σχετίζονται με την κίνηση και τις παραμέτρους της κάμερας αλλά και με τη δομή της σκηνής. Η προβολική γεωμετρία είναι ένα θεμελιώδες εργαλείο για την αποκωδικοποίηση της Δομής από κίνηση, ειδικά στη γεωμετρία πολλαπλών προβολών, καθώς η διαδικασία σχηματισμού εικόνας μπορεί να θεωρηθεί ως ένας προβολικός μετασχηματισμός από ένα 3Δ προς ένα 2Δ προβολικό χώρο.



# Πολυεικονική γεωμετρία

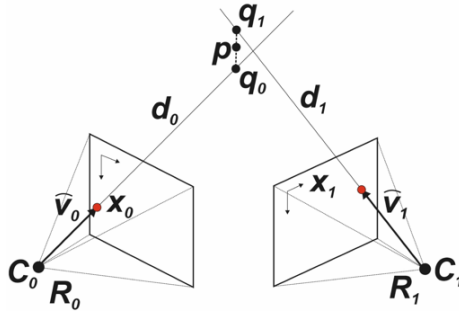
## II.1 Εισαγωγή

Τα αντικείμενα της προβολικής γεωμετρίας και της Δομής από κίνηση είναι εξαιρετικά πλούσια τόσο σε περιεχόμενο όσο και σε σημαντική βιβλιογραφία (Faugeras et al., 2004; Hartley and Zisserman, 2003; Moons et al., 2010). Στο παρόν Παράρτημα επιχειρείται μια εισαγωγή στις βασικές έννοιες που σχετίζονται με τα εν λόγω αντικείμενα, ενώ πιο πλούσια θέματα, όπως των αλγεβρικών τεχνικών πλήρους αυτοβαθμονόμησης και των τριπλοεστιακών τανυστών μπορούν να βρεθούν στη σχετική βιβλιογραφία (Szeliski, 2011).

Αντικείμενα που εισάγονται συμπεριλαμβάνουν θέματα όπως ο τριγωνισμός (εκτίμηση 3Δ θέσης σημείου από πολλαπλές κάμερες), τη Δομή από κίνηση από δύο καρέ (προσδιορισμός επιπολικής γεωμετρίας ανάμεσα σε δύο κάμερες και πληροφορίες σχετικά με τις εσωτερικές παραμέτρους – intrinsic – της κάμερας), τις τεχνικές παραγοντοποίησης για την ταυτόχρονη εκτίμηση δομής και κίνησης. Το μεγαλύτερο τμήμα των κειμένων που ακολουθούν προέρχεται από το Szeliski (2011).

## II.2 Τριγωνισμός

Το πρόβλημα του προσδιορισμού θέσης ενός 3Δ σημείου από σύνολο αντίστοιχων σημείων εικόνας και γνωστές θέσεις της κάμερας, είναι γνωστό ως τριγωνισμός (triangulation). Αποτελεί το αντίστροφο του προβλήματος εκτίμησης πόζας (pose estimation).



**Εικόνα ΙΙ.1.** Προσέγγιση θέσης σημείου  $p$  στο χώρο μέσω ελαχιστοποίησης της απόστασης όλων των ακτίνων που συγκλίνουν στο ίδιο χαρακτηριστικό σημείο.

### ΙΙ.2.1 Προσέγγιση 1η

Ένας απλός τρόπος επίλυσης του προβλήματος (Εικόνα ΙΙ.1) είναι μέσω της εύρεσης του 3Δ σημείου  $\mathbf{p}^1$  το οποίο βρίσκεται πιο κοντά σε όλες τις 3Δ ακτίνες που αντιστοιχούν στις 2Δ θέσεις χαρακτηριστικών σημείων  $x_j$  τα οποία αναγνωρίζονται από σύνολο καμερών  $\{\mathbf{P}_j = \mathbf{K}_j[\mathbf{R}_j|\mathbf{t}_j]\}$ , όπου  $\mathbf{t}_j = -\mathbf{R}_j\mathbf{c}_j$ , όπου  $\mathbf{c}_j$  είναι το κέντρο της  $j$  κάμερας, υπό τις γενικές σχέσεις:

$$\tilde{\mathbf{x}}_j = \mathbf{K}[\mathbf{R}|\mathbf{t}] \mathbf{p}_w = \mathbf{P} \mathbf{p}_w, \quad \mathbf{P} = \mathbf{K}[\mathbf{R}|\mathbf{t}] \quad (\text{ΙΙ.1})$$

με  $\tilde{\mathbf{x}}_s$  το σημείο στο επίπεδο της εικόνας που αποτελεί την προβολή ενός  $p_w$  3Δ σημείου του χώρου και  $\mathbf{K}$  οι εσωτερικές και  $(\mathbf{R}, \mathbf{t})$  οι εξωτερικές παράμετροι της κάμερας. Οι εν λόγω ακτίνες προέρχονται προφανώς από το σημείο  $\mathbf{c}_j$  σε διεύθυνση  $\hat{\mathbf{v}}_j = \mathcal{N}(\mathbf{R}_j^{-1}\mathbf{K}_j^{-1}\mathbf{x}_j)$ . Το σημείο που είναι πιο κοντά στο  $\mathbf{p}$  στην ακτίνα (το οποίο συμβολίζουμε  $\mathbf{q}_j$ ) ελαχιστοποιεί την απόσταση  $\|\mathbf{c}_j + d_j\hat{\mathbf{v}}_j - \mathbf{p}\|^2$ , η οποία έχει ελάχιστο  $d_j = \hat{\mathbf{v}}_j(\mathbf{p} - \mathbf{c}_j)$ . Έτσι  $\mathbf{q}_j = \mathbf{c}_j + (\hat{\mathbf{v}}_j\hat{\mathbf{v}}_j^T)(\mathbf{p} - \mathbf{c}_j)$  και η τετραγωνική απόσταση μεταξύ  $\mathbf{p}$  και  $\mathbf{q}_j$  είναι:

$$r_j^2 = \left\| \left( \mathbf{I} - \hat{\mathbf{v}}_j\hat{\mathbf{v}}_j^T \right) (\mathbf{p} - \mathbf{c}_j) \right\|^2 \quad (\text{ΙΙ.2})$$

Η βέλτιστη τιμή για το σημείο  $\mathbf{p}$  που βρίσκεται κοντά σε όλες τις συγκλίνουσες ακτίνες μπορεί να εκτιμηθεί μέσω τυπικών ελαχίστων τετραγώνων με την άθροιση πάνω σε όλες τις τετραγωνικές αποστάσεις  $r_j^2$  και εύρεση της βέλτιστης τιμής ως:

$$\mathbf{p} = \left[ \sum_j \left( \mathbf{I} - \hat{\mathbf{v}}_j\hat{\mathbf{v}}_j^T \right) \right]^{-1} \left[ \sum_j \left( \mathbf{I} - \hat{\mathbf{v}}_j\hat{\mathbf{v}}_j^T \right) \mathbf{c}_j \right] \quad (\text{ΙΙ.3})$$

<sup>1</sup>Στις μαθηματικές αναπαραστάσεις που ακολουθούν, έντονα σύμβολα σηματοδοτούν διανύσματα ή πίνακες ενώ κανονικής έντασης αντιστοιχούν σε βαθμωτά μεγέθη.

## II.2.2 Προσέγγιση 2η

Στοχεύοντας σε μια περισσότερο βέλτιστη από στατιστική άποψη διαμόρφωση του προβλήματος που θα μπορούσε να αποδώσει πολύ πιο ακριβή αποτελέσματα όταν κάποιες από τις κάμερες είναι πιο κοντά από άλλες προς το 3Δ σημείο, θα μπορούσε να επιλεγεί η ελαχιστοποίηση των υπολοίπων στις εξισώσεις μετρήσεων:

$$\begin{aligned} x_j &= \frac{p_{00}^j X + p_{01}^j Y + p_{02}^j Z + p_{03}^j W}{p_{20}^j X + p_{21}^j Y + p_{22}^j Z + p_{23}^j W} \\ y_j &= \frac{p_{10}^j X + p_{11}^j Y + p_{12}^j Z + p_{13}^j W}{p_{20}^j X + p_{21}^j Y + p_{22}^j Z + p_{23}^j W} \end{aligned} \quad (\text{II.4})$$

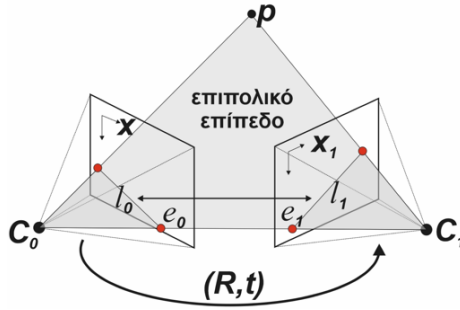
όπου  $(x_j, y_j)$  οι θέσεις χαρακτηριστικού 2Δ σημείου και  $p_{00}^j \dots p_{23}^j$  είναι οι γνωστές τιμές στον πίνακα  $P_j$  της κάμερας (Sutherland, 1974).

Το σύνολο αυτών των μη γραμμικών εξισώσεων μπορεί να μετατραπεί σε ένα πρόβλημα ελαχίστων τετραγώνων αν πολλαπλασιαστούν και οι δύο πλευρές με τον παρονομαστή. Σημειώνεται ότι αν χρησιμοποιηθούν ομογενείς συντεταγμένες  $p = (X, Y, Z, W)$  το σύνολο εξισώσεων που προκύπτει είναι επίσης ομογενές και επιλύεται καλύτερα ως πρόβλημα Singular Value Decomposition (SVD) ή ως πρόβλημα ιδιοτιμών (είτε με την εύρεση των μικρότερων ιδιζόντων διανυσμάτων ή ιδιοδιανυσμάτων). Εάν θεωρηθεί  $W = 1$  είναι δυνατή η εφαρμογή τυπικής μεθόδου γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων, αλλά το σύστημα είναι δυνατό να καταλήξει ιδιάζον, πχ. όταν όλες οι ακτίνες είναι παράλληλες όπως συμβαίνει για σημεία μακριά από την κάμερα.

Για το λόγο αυτό είναι συχνά προτιμότερο να γίνεται παραμετροποίηση των 3Δ σημείων με χρήση ομογενών συντεταγμένων, ειδικά αν είναι γνωστό ότι μπορεί να υπάρχουν σημεία που είναι πολύ μακριά από τις κάμερες.

Φυσικά, πρέπει να τονιστεί ότι η χρήση μη-γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων είναι γενικότερα προτιμότερη από τη χρήση γραμμικών στην περίπτωση ελαχιστοποίησης συνόλου μετρήσεων όπως στις εξισώσεις παραπάνω για τα  $(x_j, y_j)$ . Ειδικά δε, για την περίπτωση δύο μετρήσεων, προκύπτει ότι η θέση του σημείου  $\mathbf{p}$  που ελαχιστοποιεί το σφάλμα επαναπροβολής μπορεί να εκτιμηθεί μέσω της λύσης συστήματος έκτου βαθμού (Hartley and Sturm, 1997).

Ένα άλλο πρόβλημα που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στον τριγωνισμό είναι αυτό της στροφικότητας (chirality), διατηρώντας πάντοτε την αρχή ότι όλα τα ανακτώμενα σημεία πρέπει να βρίσκονται μπροστά από όλες τις κάμερες (Hartley, 1998). Μια χρήσιμη ευρεστική προσέγγιση είναι η «μετακίνηση» αυτών των σημείων στο άπειρο μέσω μεταβολής  $W = 0$ .



Εικόνα II.2. Επιπολική γεωμετρία δύο όψεων.

### II.3 Δομή από κίνηση δύο όψεων

Στις παραγράφους που ακολουθούν επιχειρείται μια εισαγωγή στη Δομή από κίνηση, που είναι ουσιαστικά η ταυτόχρονη ανάκτηση 3Δ δομής και θέσης (πόζας) από αντιστοιχία χαρακτηριστικών σημείων.

Έστω ένα 3Δ σημείο  $\mathbf{p}$  που προβάλλεται από δύο (όψεις) κάμερες, των οποίων η σχετική θέση κωδικοποιείται από μία περιστροφή  $\mathbf{R}$  και μια μετατόπιση  $\mathbf{t}$  (Εικόνα II.2). Επειδή δε γνωρίζουμε τίποτα για τις θέσεις της κάμερας, χωρίς απώλεια της γενικότητας, μπορούμε να ορίσουμε την πρώτη κάμερα στο κέντρο του συστήματος συντεταγμένων  $c_0 = 0$  και σε κανονικό προσανατολισμό  $\mathbf{R}_0 = \mathbf{I}$ . Η παρατηρούμενη θέση του σημείου  $p$  στην πρώτη εικόνα,  $\mathbf{p}_0 = d_0 \hat{\mathbf{x}}_0$  αντιστοιχίζεται στη δεύτερη εικόνα από το μετασχηματισμό

$$d_1 \hat{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{p}_1 = \mathbf{R} \mathbf{p}_0 + \mathbf{t} = \mathbf{R}(d_0 \hat{\mathbf{x}}_0) + \mathbf{t} \quad (\text{II.5})$$

όπου  $\hat{\mathbf{x}}_j = \mathbf{K}_j^{-1} \mathbf{x}_j$  είναι τα τοπικά διανύσματα κατεύθυνσης των ακτίνων. Λαμβάνοντας το γινόμενο των δύο πλευρών με  $\mathbf{t}$ , προκειμένου να απαλειφθεί από τα δεξιά προκύπτει

$$d_1 [\hat{\mathbf{t}}]_{\times} \hat{\mathbf{x}}_1 = d_0 [\hat{\mathbf{t}}]_{\times} \mathbf{R} \hat{\mathbf{x}}_0 \quad (\text{II.6})$$

όπου ορίστηκε ο τελεστής εξωτερικού γινομένου  $[\hat{\mathbf{t}}]_{\times}$  ως ο τελεστής που προβάλλει ένα διάνυσμα σε ένα σύνολο διανυσμάτων ορθογώνιας βάσης που περιλαμβάνει το  $\mathbf{t}$ , μηδενίζει τη συνιστώσα  $\mathbf{t}$  και περιστρέφει τα άλλα δύο διανύσματα βάσης κατά  $90^\circ$ . Παίρνοντας το εσωτερικό γινόμενο και των δύο μερών με  $\hat{\mathbf{x}}_1$  προκύπτει

$$d_0 \hat{\mathbf{x}}_1^T ([\hat{\mathbf{t}}]_{\times} \mathbf{R}) \hat{\mathbf{x}}_0 = d_1 \hat{\mathbf{x}}_1^T [\hat{\mathbf{t}}]_{\times} \hat{\mathbf{x}}_1 = 0 \quad (\text{II.7})$$

καθώς το δεξί μέρος αποτελεί τριπλό γινόμενο με δύο ίδιες παραμέτρους. Έτσι, τελικά, προκύπτει ο βασικός επιπολικός περιορισμός

$$\hat{\mathbf{x}}_1^T \mathbf{E} \hat{\mathbf{x}}_0 = 0 \quad (\text{II.8})$$



όπου  $\mathbf{E} = [\hat{\mathbf{t}}]_{\times} \mathbf{R}$  ο ουσιώδης πίνακας (essential matrix) (Longuet-Higgins, 1981). Είναι φανερό ότι ο πίνακας  $\mathbf{E}$  χαρτογραφεί ένα  $\hat{\mathbf{x}}_0$  σημείο στην εικόνα 0 σε μια ευθεία γραμμή  $\mathbf{l}_1 = \mathbf{E}\hat{\mathbf{x}}_0$  στην εικόνα 1, καθώς ισχύει ότι  $\hat{\mathbf{x}}_1^T \mathbf{l}_1 = 0$  (Εικόνα II.2). Όλες αυτές οι ευθείες θα πρέπει να περνούν από το δεύτερο επιπολικό σημείο  $\mathbf{e}_1$ , το οποίο ορίζεται ως το αριστερό ιδιάζον διάνυσμα με ιδιάζουσα τιμή 0 ή, αντίστοιχα, η προβολή του διανύσματος  $\mathbf{t}$  στην εικόνα 1. Η αναστροφή αυτών των εκφράσεων δίνει την επιπολική γραμμή στην πρώτη εικόνα ως  $\mathbf{l}_0 = \mathbf{E}^T \hat{\mathbf{x}}_1$  και το  $\mathbf{e}_0$ , ως το μηδενικής τιμής δεξιό ιδιάζον διάνυσμα του  $\mathbf{E}$ .

Με δεδομένη τη σχέση που εκφράζει τον επιπολικό περιορισμό, η ανάκτηση της κίνησης της κάμερας μπορεί να ανακτηθεί μέσω του θελεμιάδους πίνακα ως εξής: δοθέντων  $N$  αντίστοιχων μετρήσεων  $\{(\hat{\mathbf{x}}_{i0}, \hat{\mathbf{x}}_{i1})\}$  είναι δυνατό να διαμορφωθούν  $N$  ομογενείς εξισώσεις στα 9 στοιχεία του  $\mathbf{E} = \{e_{00} \dots e_{22}\}$ :

$$\begin{aligned} & x_{i0}x_{i1}e_{00} + y_{i0}x_{i1}e_{01} + x_{i1}e_{02} + \\ & x_{i0}y_{i1}e_{00} + y_{i0}y_{i1}e_{11} + y_{i1}e_{12} + \\ & x_{i0}e_{20} + y_{i0}e_{21} + e_{22} = 0 \end{aligned} \quad (\text{II.9})$$

όπου  $\mathbf{x}_{ij} = (x_{ij}, y_{ij}, 1)$ . Η παραπάνω σχέση μπορεί να συνοψιστεί:

$$[\mathbf{x}_{i1}, \mathbf{x}_{i0}^T] \otimes \mathbf{E} = \mathbf{Z}_i \otimes \mathbf{E} = \mathbf{z}_i \mathbf{f} = 0 \quad (\text{II.10})$$

όπου  $\otimes$  συμβολίζει τον κατά στοιχείο πολλαπλασιασμό και άθροιση των πινάκων. Έχοντας  $N \geq 8$  τέτοιες εξισώσεις μπορεί να γίνει μια εκτίμηση (ως μια κλίμακα) των στοιχείων του  $\mathbf{E}$  μέσω SVD.  $\mathbf{z}_i$  και  $\mathbf{f}^2$  είναι οι διανυσματικές αναπαραστάσεις των πινάκων  $\mathbf{Z}_i = \hat{\mathbf{x}}_{i1} \hat{\mathbf{x}}_{i0}^T$  και  $\mathbf{E}$ .

Ένα σημαντικό σημείο αποτελεί η εκτίμηση της ποιότητας των εν λόγω υπολογισμών υπό την επίδραση θορύβου στις μετρήσεις, κάτι προφανώς αναμενόμενο πολλές φορές σε σημαντικό βαθμό. Αν εξετάσουμε προσεκτικά τις αναλυτικές σχέσεις παραπάνω αναγνωρίζουμε εύκολα ότι κάποιες τιμές είναι παράγωγα μετρήσεων στην εικόνα, όπως  $x_{i0}y_{i1}$  και άλλες είναι οι ίδιες οι τιμές των μετρήσεων. Εάν στις μετρήσεις υπάρχει συγκρίσιμος θόρυβος τότε οι παράγωγες τιμές (τα γινόμενα) παρουσιάζουν ενισχυμένη επίδραση θορύβου, οδηγώντας σε πολύ κακής ποιότητας εκτιμήσεις. Για να μειωθεί αυτή η επίδραση του θορύβου, ο Hartley (Hartley, 1995) πρότεινε οι συντεταγμένες των σημείων να μετατοπίζονται και κλιμακώνονται με τέτοιο τρόπο ώστε το κέντρο βάρους τους να βρίσκεται στην αρχή των αξόνων και η διασπορά να τους να είναι  $\sqrt{2}$ , ενώ ευρεστικά και για γρηγορότερους υπολογισμούς προτείνεται η διασπορά να ισούται με τη μονάδα (Szeliski, 2011):

<sup>2</sup>Ο συμβολισμός  $\mathbf{f}$  χρησιμοποιείται αντί του  $\mathbf{e}$  για να μην υπάρξει παρανόηση, καθώς το σύμβολο  $\mathbf{e}$  χρησιμοποιείται για τα επιπολικά σημεία.

$$\begin{aligned}\tilde{x}_i &= s(x_i - x) \\ \tilde{y}_i &= s(y_i - y)\end{aligned}\tag{II.11}$$

έτσι ώστε  $\sum_i \tilde{x}_i = \sum_i \tilde{y}_i = 0$  και  $\sum_i \tilde{x}_i^2 + \sum_i \tilde{y}_i^2 = 2n$ , όπου  $n$  είναι το πλήθος των σημείων. Μόλις εκτιμηθεί ο ουσιώδης πίνακας  $\tilde{\mathbf{E}}$  από τις μετασχηματισμένες συντεταγμένες  $\{(\tilde{\mathbf{x}}_{i0}, \tilde{\mathbf{x}}_{i1})\}$ , όπου  $\tilde{\mathbf{x}}_{ij} = \mathbf{T}_j \tilde{\mathbf{x}}_{ij}$ , ο ουσιώδης πίνακας  $\mathbf{E}$  μπορεί να εκτιμηθεί ως:

$$\mathbf{E} = \mathbf{T}_1^T \tilde{\mathbf{E}} \mathbf{T}_0\tag{II.12}$$

Μόλις ολοκληρωθεί η εκτίμηση του  $\mathbf{E}$  η διεύθυνση του διανύσματος μετατόπισης  $\mathbf{t}$  μπορεί να εκτιμηθεί. Βέβαια, πρέπει να σημειωθεί ότι η απόλυτη απόσταση μεταξύ δύο καμερών δεν μπορεί να εκτιμηθεί απλά και μόνο από μετρήσεις στις εικόνες, ασχέτως του πλήθους των καμερών και των χαρακτηριστικών σημείων. Η γνώση για τις απόλυτες θέσεις και αποστάσεις συγκεκριμένων σημείων και καμερών, συνήθως καλούμενων σημείων ελέγχου (ground control points) στη φωτογραμμετρία, απαιτείται πάντοτε για την πραγματική απόλυτη εκτίμηση θέσεων, κλίμακας και κατεύθυνσης.

Για την εκτίμηση αυτής της κατεύθυνσης  $\hat{\mathbf{t}}$  σε ιδανικές συνθήκες (απουσία θορύβου) ο ουσιώδης πίνακας  $\mathbf{E}$  είναι ιδιάζων,  $\hat{\mathbf{t}}^T \mathbf{E} = 0$ . Η ιδιάζουσα αυτή κατάσταση εμφανίζεται ως ιδιάζουσα μηδενική τιμή όταν εφαρμόζεται SVD στον πίνακα  $\mathbf{E}$ .

$$\mathbf{E} = [\hat{\mathbf{t}}]_{\times} \mathbf{R} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_0 & \mathbf{u}_1 & \hat{\mathbf{t}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_0^T \\ \mathbf{v}_1^T \\ \mathbf{v}_2^T \end{bmatrix}\tag{II.13}$$

Όταν όμως ο πίνακας  $\mathbf{E}$  υπολογίζεται σε περιβάλλον με θόρυβο το διάνυσμα κατεύθυνσης μετατόπισης  $\hat{\mathbf{t}}$  δίνεται από τη μικρότερη ιδιάζουσα τιμή του SVD. Καθώς η διάσταση του πίνακα είναι μεγαλύτερη από την τάξη του, προκύπτει ότι τελικά απαιτούνται 7 αντί των 8 αντιστοιχιών για την επίλυση των εξισώσεων (Hartley and Zisserman, 2003). Από αυτό το σύνολο των 7 ομογενών εξισώσεων, οι οποίες δημιουργούν έναν πίνακα  $7 \times 9$  για SVD είναι δυνατό να εντοπιστούν δύο ανεξάρτητα διανύσματα  $\mathbf{f}_0, \mathbf{f}_1$  που να ικανοποιούν την εξίσωση με μηδέν ( $\mathbf{z}_i \mathbf{f} = 0$ ). Προφανώς αυτά τα διανύσματα μπορούν να μετατραπούν και πάλι στη μορφή πινάκων  $3 \times 3$ ,  $\mathbf{E}_0$  και  $\mathbf{E}_1$  που καλύπτουν το χώρο λύσεων για την εξίσωση

$$\mathbf{E} = \alpha \mathbf{E}_0 + (1 - \alpha) \mathbf{E}_1\tag{II.14}$$

Για την εύρεση της ορθής τιμής για την παράμετρο  $\alpha$  παρατηρούμε ότι ο πίνακας  $\mathbf{E}$  έχει μηδενική ορίζουσα (αφού είναι μικρότερης τάξης) και συνεπώς μπορεί να γραφεί ως:

$$\det |\alpha \mathbf{E}_0 + (1 - \alpha) \mathbf{E}_1| = 0 \quad (\text{II.15})$$

Η εν λόγω εξίσωση είναι τρίτου βαθμού ως προς  $\alpha$ , που οδηγεί είτε σε μία είτε σε τρεις λύσεις. Χρησιμοποιώντας αυτές τις λύσεις στην παραπάνω εξίσωση για τον ορισμό του πίνακα  $\mathbf{E}$ , μπορεί να γίνει έλεγχος και επιλογή του ορθού πίνακα με σύγκριση με άλλες αντιστοιχίες σημείων.

Μόλις εκτιμηθεί το διάνυσμα μετατόπισης  $\hat{\mathbf{t}}$ , είναι η σειρά για την εκτίμηση του πίνακα προσανατολισμού  $\mathbf{R}$ . Ορίζοντας τον τελεστή εξωτερικού γινομένου  $[\hat{\mathbf{t}}]_{\times}$  ως τον τελεστή που προβάλλει ένα διάνυσμα σε ένα σύνολο διανυσμάτων ορθογώνιας βάσης που περιλαμβάνει το  $\hat{\mathbf{t}}$ , μηδενίζει τη συνιστώσα  $\hat{\mathbf{t}}$  και περιστρέφει τα άλλα δύο διανύσματα βάσης κατά  $90^\circ$ :

$$[\hat{\mathbf{t}}]_{\times} = \mathbf{SZR}_{90}\mathbf{S}^T = \begin{bmatrix} s_0 & s_1 & \hat{\mathbf{t}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -1 & \\ 1 & 0 & \\ & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0^T \\ s_1^T \\ \hat{\mathbf{t}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

όπου  $\hat{\mathbf{t}} = \mathbf{s}_0 \times \mathbf{s}_1$ . Προκύπτει συνεπώς ότι:

$$\mathbf{E} = [\hat{\mathbf{t}}]_{\times} \mathbf{R} = \mathbf{SZR}_{90}\mathbf{S}^T \mathbf{R} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T \quad (\text{II.17})$$

από όπου μπορεί να εξαχθεί ότι  $\mathbf{S} = \mathbf{U}$ . Καθώς σε έναν ουσιώδη πίνακα χωρίς θόρυβο  $\mathbf{S} = \mathbf{Z}$ , προκύπτει ότι:

$$\mathbf{R}_{90} \mathbf{U}^T \mathbf{R} = \mathbf{V}^T \text{ και } \mathbf{R} = \mathbf{U} \mathbf{R}_{90}^T \mathbf{V}^T \quad (\text{II.18})$$

Καθώς τα  $\mathbf{E}$  και  $\mathbf{t}$  είναι γνωστά μέχρι ενός σημείου και οι πίνακες  $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{V}$  δεν είναι εγγυημένο ότι είναι περιστροφές, πρέπει να δημιουργηθούν όλοι οι τέσσερις πιθανοί πίνακες περιστροφής

$$\mathbf{R} = \pm \mathbf{U} \mathbf{R}_{\pm 90}^T \mathbf{V}^T \quad (\text{II.19})$$

και να επιλεγούν οι δύο που έχουν ορίζουσα μονάδα ( $|\mathbf{R}| = 1$ ). Για τον περαιτέρω διαχωρισμό των δύο εναπομεινάντων πινάκων και την επιλογή του ενός ορθού πίνακα, οι δύο πίνακες πρέπει να συνδυαστούν με τις διευθύνσεις της μετατόπισης  $\pm \hat{\mathbf{t}}$  και να επιλεγεί ο συνδυασμός με τον οποίο αναγνωρίζονται τα περισσότερα σημεία μπροστά από όλες τις κάμερες.

Ο κανονικοποιημένος αλγόριθμος οκτώ σημείων (Hartley, 1995) που παρουσιάστηκε δεν είναι ο μόνος τρόπος για την εκτίμηση της κίνησης κάμερας από αντιστοιχίες σημείων. Παραλλαγές περιλαμβάνουν τη χρήση επτά σημείων ή τη χρήση πέντε σημείων (πχ. (Nistér, 2004)). Καθώς οι παραλλαγές αυτές απαιτούν τη χρήση λιγότερων σημείων είναι πιο ανθεκτικές στο θόρυβο.

### ΙΙ.3.1 Αβαθμονόμητη προβολική αποκατάσταση

Όταν η δημιουργία ενός 3Δ ψηφιακού αντιγράφου επιχειρείται να γίνει μέσω χρήσης φωτογραφιών χωρίς μεταδεδομένα EXIF, δεν υπάρχουν πληροφορίες σχετικά με τις εσωτερικές παραμέτρους της κάμερας κατά τη φάση της φωτογράφισης. Ακόμη και σε αυτή την περίπτωση είναι δυνατή η ανάκτηση της γεωμετρίας, αν και η ακριβής μετρική δομή μπορεί να μην υπάρχει, πχ. ορθογώνιες γραμμές ή επίπεδα μπορεί να μην ανακατα-σκευαστούν ως τέτοια. Σε αυτή την αβαθμονόμητη περίπτωση δεν είναι γνωστοί οι πίνακες  $\mathbf{K}_j$  και συνεπώς δεν είναι δυνατή η χρήση των κανονικοποιημένων διευθύνσεων των ακτίνων  $\hat{\mathbf{x}}_j = \mathbf{K}_j^{-1}\mathbf{x}_j$ . Αντίθετα, υπάρχουν διαθέσιμες οι συντεταγμένες εικόνας  $\mathbf{x}_j$  και ο ουσιώδης πίνακας εκφράζεται:

$$\hat{\mathbf{x}}_1^T \mathbf{E} \hat{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{x}_1^T \mathbf{K}_1^{-1} \mathbf{E} \mathbf{K}_0^{-1} \mathbf{x}_0 = \mathbf{x}_1^T \mathbf{F} \mathbf{x}_0 = 0 \quad (\text{II.20})$$

όπου

$$\mathbf{F} = \mathbf{K}_1^{-T} \mathbf{E} \mathbf{K}_0^{-1} = [\mathbf{e}]_{\times} \tilde{\mathbf{H}} \quad (\text{II.21})$$

ο θεμελιώδης πίνακας (fundamental matrix) (Hartley and Zisserman, 2003). Όπως και ο ουσιώδης πίνακας, ο θεμελιώδης πίνακας είναι (επί της αρχής) τάξης δύο,

$$\mathbf{F} = [\mathbf{e}]_{\times} \tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_0 & \mathbf{u}_1 & \mathbf{e}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_0 & & \\ & \sigma_1 & \\ & & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_0^T \\ \mathbf{v}_1^T \\ \mathbf{e}_0^T \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

Το μικρότερο αριστερό ιδιάζον διάνυσμά του υποδεικνύει το επιτολικό σημείο  $\mathbf{e}_1$  στην εικόνα 1 και το μικρότερο δεξί ιδιάζον διάνυσμά του υποδεικνύει το  $\mathbf{e}_0$  (Εικόνα ΙΙ.2). Η ομογραφία  $\tilde{\mathbf{H}}$  που εν γένει πρέπει να ισούται με  $\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{K}_1^{-1} \mathbf{R} \mathbf{K}_0^{-1}$  δεν μπορεί να ανακτηθεί ισοδύναμα από τον  $\mathbf{F}$ , καθώς κάθε ομογραφία της μορφής  $\tilde{\mathbf{H}}' = \tilde{\mathbf{H}} + \mathbf{e} \mathbf{v}^T$  προκύπτει από τον ίδιο πίνακα  $\mathbf{F}$ . Κάθε τέτοια ομογραφία απεικονίζει κάποιο επίπεδο στη σκηνή από μια εικόνα σε άλλη. Δεν μπορεί να είναι γνωστό εξ αρχής ποιο είναι, χωρίς πρώτα να έχουν επιλεγεί τέσσερα ή περισσότερα συνεπίπεδα αντιστοιχα σημεία. Για να δημιουργηθεί μια προβολική ανακατασκευή της σκηνής μπορεί να επιλεγεί μια οποιαδήποτε ομογραφία  $\tilde{\mathbf{H}}$  που να ικανοποιεί την εξίσωση του θεμελιώδους πίνακα  $\mathbf{F}$ . Ακολουθώντας μια πορεία ανάλογη με αυτή για τον υπολογισμό του πίνακα  $\mathbf{E}$ , προκύπτει:

$$\mathbf{F} = [\mathbf{e}]_{\times} \tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{S} \mathbf{Z} \mathbf{R}_{90} \mathbf{S}^T \tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T \quad (\text{II.23})$$

και συνεπώς:

$$\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{U} \mathbf{R}_{90}^T \hat{\mathbf{\Sigma}} \mathbf{V}^T \quad (\text{II.24})$$

όπου  $\hat{\Sigma}$  είναι ο πίνακας ιδιαιζόντων τιμών όπου η μικρότερη τιμή αντικαταστάθηκε από μια «λογική» εναλλακτική (πχ. τη μεσαία τιμή), ενώ οι Hartley and Zisserman (2003) προτείνουν χρήση της σχέσης  $\tilde{\mathbf{H}} = [\mathbf{e}]_{\times} \mathbf{F}$  που τοποθετεί την κάμερα στο άπειρο. Στην περίπτωση αυτή μπορεί να διαμορφωθεί ένα ζεύγος πινάκων

$$\mathbf{P}_0 = [\mathbf{I}|\mathbf{0}] \text{ και } \mathbf{P}_1 = [\tilde{\mathbf{H}}|\mathbf{e}] \quad (\text{II.25})$$

από όπου μπορεί να προκύψει η προβολική αποκατάσταση της σκηνής με χρήση τριγωνισμού.

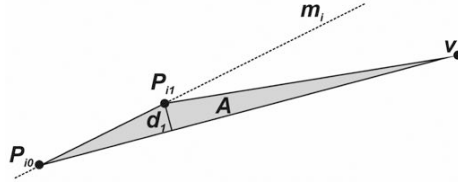
### II.3.2 Αυτοβαθμονόμηση

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών Δομής από κίνηση είναι πολύ πιο χρήσιμα εάν λαμβάνεται μετρική αποκατάσταση, δηλαδή αποκατάσταση στην οποία διατηρείται η παραλληλία, ορθογώνιοι τοίχοι είναι σε ορθές γωνίες και το 3Δ ψηφιακό αντίγραφο αποτελεί μια κλιμακωμένη εκδοχή της πραγματικότητας. Για τη μετατροπή μιας προβολικής αποκατάστασης σε μετρική έχουν αναπτυχθεί ένα πλήθος από μεθόδους αυτοβαθμονόμησης που στοχεύουν στην ανάκτηση των αγνώστων πινάκων βαθμονόμησης  $\mathbf{K}_j$  που σχετίζονται με κάθε εικόνα (Hartley and Zisserman, 2003).

Ειδικές τεχνικές μπορούν να εφαρμοστούν όταν υπάρχουν επιπρόσθετα βοηθητικά στοιχεία διαθέσιμα, όπως για παράδειγμα, εάν υπάρχουν παράλληλες γραμμές στη σκηνή, τρία ή περισσότερα σημεία φυγής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη ομογραφίας (homography) για ένα επίπεδο στο άπειρο, από το οποίο η εστιακή απόσταση και οι προσανατολισμοί μπορούν να ανακτηθούν. Εάν δύο ή περισσότερα σημεία φυγής έχουν αναγνωριστεί η βαθμονόμηση μίας-εικόνας βάσει σημείων φυγής μπορεί να εφαρμοστεί όπως περιγράφεται στις παραγράφους που ακολουθούν.

Ας θεωρήσουμε την περίπτωση όπου η κάμερα αποτυπώνει μια σκηνή στην οποία υπάρχουν έντονα τετράεδρα σχήματα (τοίχοι κτηρίων). Στην περίπτωση αυτή μπορεί να γίνει εντοπισμών σημείων φυγής από την τομή 2Δ γραμμών που αντιστοιχούν σε 3Δ παράλληλες γραμμές στη σκηνή και να χρησιμοποιηθούν τα σημεία φυγής για τον υπολογισμό των εσωτερικών και εξωτερικών παραμέτρων της κάμερας.

Ένα μεγάλο πλήθος τεχνικών έχουν αναπτυχθεί για τον εντοπισμό των σημείων φυγής (Antone and Teller, 2002; Becker and Bove, 1995; Brillault-O'Mahony, 1991; Collins and Weiss, 1990; Košecká and Zhang, 2005; McLean and Kotturi, 1995; Pflugfelder, 2008; Quan and Mohr, 1989; Rother, 2002; Schaffalitzky and Zisserman, 2000; Shufelt, 1999; Tardif, 2009; Tuytelaars et al., 1997). Ο Szeliski (2011) περιγράφεται μια απλή τεχνική βασισμένη σε μετασχηματισμό Hough, όπου ζεύγη ευθειών συνεισφέρουν στον εντοπισμό πιθανών σημείων φυγής, κάνοντας χρήση τεχνικής εύρωστων ελαχίστων τετραγώνων. Σε πρώτη φάση η μέθοδος χρησιμοποιεί μετασχηματισμό Hough για να συλλέξει



Εικόνα ΙΙ.3. Ευθύγραμμα τμήματα και σημείο φυγής.

«ψηφους» για πιθανά σημεία φυγής. Στη γενική περίπτωση θα μπορούσε κάθε γραμμή να «ψηφίζει» για όλες τις πιθανές διευθύνσεις σημείων φυγής. Η προτεινόμενη μέθοδος είναι να γίνει χρήση ζεύγους αναγνωρισμένων ευθύγραμμων τμημάτων για τον ορισμό «υποψήφιων» σημείων φυγής. Εάν θεωρήσουμε  $\hat{\mathbf{m}}_i$  και  $\hat{\mathbf{m}}_j$  τις εξισώσεις των γραμμών του ζεύγους των ευθυγράμμων τμημάτων και  $l_i$  και  $l_j$  τα αντίστοιχα μήκη των τμημάτων, η θέση του αντίστοιχου σημείου φυγής εκτιμάται από τη γνωστή σχέση:

$$\mathbf{v}_{ij} = \hat{\mathbf{m}}_i \times \hat{\mathbf{m}}_j \quad (\text{II.26})$$

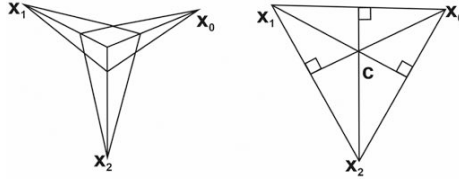
ενώ προτεινόμενο «βάρος» στάθμισης για το εν λόγω σημείο ορίζεται:

$$w_{ij} = \|\mathbf{v}_{ij}\| l_i l_j \quad (\text{II.27})$$

Αυτό το βάρος ορίζεται για να περιορίσει την επίδραση σχεδόν συγγραμμικών τμημάτων και τμημάτων μικρού μήκους. Μόλις ο χώρος συσσώρευσης Hough συμπληρωθεί, κορυφές μπορούν να εντοπιστούν με τρόπο ανάλογο με αυτό που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό γραμμών. Με δεδομένο ένα πλήθος υποψήφιων ευθύγραμμων τμημάτων που «ψηφισαν» για ένα σημείο φυγής, μπορεί να γίνει χρήση προσαρμογής ελαχίστων τετραγώνων για τον ακριβέστερο εντοπισμό κάθε σημείου φυγής.

Ας θεωρήσουμε τη σχέση μεταξύ των δύο ακραίων σημείων των δύο ευθύγραμμων τμημάτων  $\{\mathbf{p}_{i0}, \mathbf{p}_{i1}\}$  και του σημείου φυγής  $\mathbf{v}$  όπως εικονίζεται στην Εικόνα ΙΙ.3. Το εμβαδόν του τριγώνου που ορίζεται από τα τρία αυτά σημεία που είναι και το μέτρο του τριπλού τους γινομένου  $A_i = |(\mathbf{p}_{i0} \times \mathbf{p}_{i1}) \cdot \mathbf{v}|$  είναι ανάλογο στην κάθετη απόσταση  $d_1$  μεταξύ κάθε ακραίου σημείου από την ευθεία που ενώνει το  $\mathbf{v}$  με το άλλο ακραίο σημείο, καθώς και την απόσταση μεταξύ  $\mathbf{p}_{i0}$  και  $\mathbf{v}$ . Θεωρώντας ότι η ακρίβεια ενός προσαρμοσμένου ευθύγραμμου τμήματος είναι αντίστοιχη με την ακρίβεια του ακραίου σημείου του, αυτό αποτελεί βέλτιστη μετρική για το πόσο καλά προσαρμόζεται το σημείο φυγής στο σύνολο γραμμών. Μια εκτίμηση κατά την έννοια των εύρωστων ελαχίστων τετραγώνων για το σημείο φυγής είναι τότε:

$$\mathcal{E} = \sum_i \rho(A_i) = \mathbf{v}^T \left( \sum_i w_i(A_i) \mathbf{m}_i \mathbf{m}_i^T \right) \mathbf{v} = \mathbf{v}^T \mathbf{M} \mathbf{v} \quad (\text{II.28})$$



Εικόνα II.4. Βαθμονόμηση από σημεία φυγής.

όπου  $\mathbf{m}_i = \mathbf{p}_{i0} \times \mathbf{p}_{i1}$  είναι η εξίσωση του ευθύγραμμου τμήματος αναγομένου στο μήκος του  $l_i$  και  $w_i = \rho'(A_i)/A_i$  είναι η επίδραση κάθε επανεκτιμημένης μέτρησης στο τελικό σφάλμα. Η τελική ζητούμενη τιμή για το  $\mathbf{v}$  υπολογίζεται ως το μικρότερο ιδιοδιάνυσμα του  $\mathbf{M}$ .

Ας υποθεθεί λοιπόν ότι έχουν εντοπιστεί δύο ή περισσότερα ορθογώνια σημεία φυγής, όλα εκ των οποίων είναι πεπερασμένα (δεν εντοπίζονται από γραμμές που εμφανίζονται παράλληλες στο επίπεδο της εικόνας), όπως φαίνεται στην Εικόνα II.4.

Επίσης ας υποθεθεί ότι (στην απλούστερη περίπτωση) στον πίνακα βαθμονόμησης μόνο η εστιακή απόσταση είναι άγνωστη (υιοθετώντας την απλοποίηση ότι το οπτικό κέντρο ταυτίζεται με το κέντρο της εικόνας, η αναλογία διαστάσεων είναι 1 και δεν υπάρχει στρέβλωση). Στην περίπτωση αυτή η εξίσωση προβολής για το σημείο φυγής μπορεί να γραφεί ως:

$$\hat{\mathbf{x}}_i = \begin{bmatrix} x_i - c_x \\ y_i - c_y \\ f \end{bmatrix} \sim \mathbf{R}\mathbf{p}_i = \mathbf{r}_i \quad (\text{II.29})$$

όπου το  $\mathbf{p}_i$  αντιστοιχεί σε μία από τις βασικές διευθύνσεις  $(1,0,0)$ ,  $(0,1,0)$  και  $(0,0,1)$  και  $\mathbf{r}_i$  είναι η  $i$  στήλη του πίνακα περιστροφής  $\mathbf{R}$ .

Από την ορθογωνιότητα μεταξύ των στηλών του πίνακα περιστροφής:

$$\mathbf{r}_i \cdot \mathbf{r}_j \sim (x_i - c_x)(x_j - c_x) + (y_i - c_y)(y_j - c_y) + f^2 = 0 \quad (\text{II.30})$$

από όπου μπορεί να προκύψει εκτίμηση για την εστιακή απόσταση  $f^2$ . Σημειώνεται ότι η ακρίβεια αυτής της εκτίμησης μεγαλώνει καθώς τα σημεία φυγής πλησιάζουν προς το κέντρο της εικόνας. Αφού εκτιμηθεί η εστιακή απόσταση  $f$  οι στήλες του πίνακα  $\mathbf{R}$  μπορούν να εκτιμηθούν κανονικοποιώντας τις παραπάνω σχέσεις και λαμβάνοντας εξωτερικά γινόμενα. Εναλλακτικά μπορεί να εφαρμοστεί SVD της αρχικής εκτίμησης του πίνακα  $\mathbf{R}$ .

Όταν και τα τρία σημεία φυγής είναι ορατά και πεπερασμένα στην ίδια εικόνα, τότε είναι δυνατό να εκτιμηθεί το οπτικό κέντρο ως το ορθόκεντρο του τριγώνου που δημιουργείται από τα τρία σημεία (Εικόνα II.4) (Hartley and Zisserman, 2003).

*Παρόλα αυτά, η χρήση μη-γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων είναι πρακτικά πιο ακριβής μέθοδος επανεκτίμησης οποιονδήποτε αγνώστων εσωτερικών παραμέτρων βαθμονόμησης.*

Απουσία εξωτερικών πληροφοριών, προφανώς δεν είναι δυνατή η ανάκτηση ενός πλήρως παραμετρικού πίνακα βαθμονόμησης  $\mathbf{K}_j$  για κάθε εικόνα μόνο από αντιστοιχίες σημείων. Για την κατάδειξη αυτού ας θεωρήσουμε το σύνολο όλων των πινάκων καμερών  $\mathbf{P}_j = \mathbf{K}_j[\mathbf{R}_j|\mathbf{t}_j]$  που προβάλλουν σημεία του 3D κόσμου  $\mathbf{p}_i = (X_i, Y_i, Z_i, W_i)$  σε σημεία το επίπεδο της εικόνας  $\mathbf{x}_{ij} \sim \mathbf{P}_j\mathbf{p}_i$ . Ας θεωρήσουμε το μετασχηματισμό της 3D σκηνής  $\{\mathbf{p}_i\}$  μέσω ενός τυχαίου  $4 \times 4$  προβολικού μετασχηματισμού  $\tilde{\mathbf{H}}$  που οδηγεί σε ένα νέο μοντέλο σημείων  $\mathbf{p}'_i = \tilde{\mathbf{H}}\mathbf{p}_i$ . Ο από-δεξιά πολλαπλασιασμός κάθε πίνακα  $\mathbf{P}_j$  με  $\tilde{\mathbf{H}}^{-1}$  εξακολουθεί να παράγει τις ίδιες 2D θέσεις και ένα νέο σύνολο πινάκων βαθμονόμησης μπορεί να υπολογιστεί μέσω RQ παραγοντοποίησης στο νέο πίνακα κάμερας  $\mathbf{P}'_j = \mathbf{P}_j\tilde{\mathbf{H}}^{-1}$ .

Για το λόγο αυτό όλες οι μέθοδοι αυτοβαθμονόμησης προϋποθέτουν περιορισμούς στον πίνακα βαθμονόμησης, είτε θέτοντας ή εξισώνοντας κάποια από τα στοιχεία τους, είτε υποθέτοντας ότι δεν αλλάζουν στο χρόνο. Ενώ στις περισσότερες τεχνικές στη βιβλιογραφία παρουσιάζονται τεχνικές τριών ή περισσότερων εικόνων (Hartley and Zisserman, 2003), ο Szeliski (2011) περιγράφει μια απλή τεχνική που μπορεί να ανακτήσει τις εστιακές αποστάσεις δύο εικόνων ( $f_0, f_1$ ) από το θεμελιώδη πίνακα  $\mathbf{F}$  σε ανακατασκευή δύο όψεων (Hartley and Zisserman, 2003). Στην τεχνική αυτή γίνεται η σύμβαση ότι η κάμερα δεν παρουσιάζει στρέβλωση (skew), έχει γνωστή αναλογία διαστάσεων (συνήθως τίθεται 1) και έχει γνωστό οπτικό κέντρο:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f & 0 & c_x \\ 0 & f & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

Οι εν λόγω περιορισμοί είναι ικανοποιητικοί για απλές ανακατασκευές και προβολή στο διαδίκτυο ή όταν χρησιμοποιούνται σημεία αναφοράς επί εδάφους (ground control points). Οι περισσότερες κάμερες σήμερα ικανοποιούν τις εν λόγω προδιαγραφές, καθώς έχουν τετράγωνα εικονοστοιχεία και οπτικό κέντρο κοντά στο κέντρο της εικόνας. Έτσι, είναι πιο πιθανό να υφίστανται ακτινικές παραμορφώσεις παρά παραμορφώσεις σχετιζόμενες με τις παραπάνω παραδοχές. Αυτό προϋποθέτει ότι οι εικόνες δεν έχουν υποστεί περικοπή με τέτοιο τρόπο ώστε να μετακινείται το οπτικό κέντρο σε σχέση με το κέντρο της εικόνας. Υπό αυτές τις προϋποθέσεις και περιορισμούς, η εκτίμηση της εστιακής απόστασης από δύο όψεις βασίζεται στις εξισώσεις Kruppa (Hartley and Zisserman, 2003; Kruppa, 1913) και υλοποιείται ως εξής:

Μέσω των αριστερών και δεξιών ιδιαζόντων διανυσμάτων  $\{\mathbf{u}_0, \mathbf{u}_1, \mathbf{v}_0, \mathbf{v}_1\}$  του θεμελιώδους πίνακα  $\mathbf{F}$  και των αντίστοιχων ιδιζουσών τιμών  $\{\sigma_0, \sigma_1\}$  διαμορφώνεται το εξής σύνολο εξισώσεων:



$$\frac{\mathbf{u}_1^T \mathbf{D}_0 \mathbf{u}_1}{\sigma_0^2 \mathbf{v}_0^T \mathbf{D}_1 \mathbf{v}_0} = -\frac{\mathbf{u}_0^T \mathbf{D}_0 \mathbf{u}_1}{\sigma_0 \sigma_1 \mathbf{v}_0^T \mathbf{D}_1 \mathbf{v}_1} = \frac{\mathbf{u}_0^T \mathbf{D}_0 \mathbf{u}_0}{\sigma_1^2 \mathbf{v}_1^T \mathbf{D}_1 \mathbf{v}_1} \quad (\text{II.32})$$

όπου οι δύο πίνακες

$$\mathbf{D}_j = \mathbf{K}_j \mathbf{K}_j^T = \text{diag}(f_j^2, f_j^2, 1) = \begin{bmatrix} f_j^2 & & \\ & f_j^2 & \\ & & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

κωδικοποιούν τις άγνωστες εστιακές αποστάσεις. Για απλότητα οι αριθμητές και παρονομαστές στα παραπάνω κλάσματα μπορούν να γραφούν:

$$\begin{aligned} e_{ij0}(f_0^2) &= \mathbf{u}_i^T \mathbf{D}_0 \mathbf{u}_j = a_{ij} + b_{ij} f_0^2 \\ e_{ij1}(f_1^2) &= \sigma_i \sigma_j \mathbf{v}_0^T \mathbf{D}_1 \mathbf{v}_j = c_{ij} + d_{ij} f_1^2 \end{aligned} \quad (\text{II.34})$$

Καθένα από αυτά είναι αφινικό (affine<sup>3</sup>) ως προς τις εστιακές αποστάσεις και συνεπώς οι εξισώσεις μπορούν να πολλαπλασιαστούν εξωτερικά ώστε να ληφθεί η τετραγωνική μορφή κατά το μέγεθος των εστιακών αποστάσεων και κατά συνέπεια να επιλυθούν.

## II.4 Παραγοντοποίηση

Από σημαντικές εργασίες στο χώρο της Δομής από κίνηση και ειδικότερα από την εργασία των Tomasi and Kanade (1992) προκύπτει ότι η δομή και η κίνηση μπορούν να ανακτηθούν ταυτόχρονα μέσω SVD, κάτω από μοντέλα ορθογραφικής προβολής ή σχετικών υποθέσεων (απόρριψη του  $z$  κάθε 3Δ σημείου  $\mathbf{p} : \mathbf{x} = [\mathbf{I}_{2 \times 2} | \mathbf{0}] \mathbf{p}$ ). Καθώς η τελευταία γραμμή του πίνακα είναι πάντοτε  $[0 \ 0 \ 0 \ 1]$  δεν υπάρχει προβολική διαίρεση και συνεπώς  $\mathbf{x}_j i = \tilde{\mathbf{P}}_j \bar{\mathbf{p}}_i$ , όπου  $\mathbf{x}_j i$  είναι η θέση του  $i$  σημείου στο  $j$  καρέ,  $\tilde{\mathbf{P}}_j$  είναι το άνω  $2 \times 4$  τμήμα του πίνακα προβολής  $\mathbf{P}_j$  και  $\bar{\mathbf{p}}_i = (X_i, Y_i, Z_i, 1)$  είναι το επαυξημένο 3Δ σημείο. Υποθέτουμε ότι κάθε σημείο  $i$  είναι ορατό σε κάθε καρέ  $j$ . Μπορεί να ληφθεί η μέση τιμή όλων των προβαλλόμενων θέσεων των σημείων  $x_j i$  στην εικόνα  $j$  ως:

$$\bar{\mathbf{x}}_j = \frac{1}{N} \sum_i \mathbf{x}_j i = \tilde{\mathbf{P}}_j \frac{1}{N} \sum_i \bar{\mathbf{p}}_i = \tilde{\mathbf{P}}_j \bar{\mathbf{c}} \quad (\text{II.35})$$

όπου  $\bar{\mathbf{c}} = (\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}, 1)$  είναι το 3Δ κέντρο βάρους του νέφους σημείων σε επαυξημένες συντεταγμένες.

Καθώς τα συστήματα συντεταγμένων σε αποκατάσταση Δομής από κίνηση είναι γενικά τυχαία χωρίς τη χρήση σημείων ελέγχου εδάφους, το κέντρο του

<sup>3</sup>Υπενθυμίζεται ότι αφινικός ή ομοπαράλληλος είναι ο μετασχηματισμός που διατηρεί την παραλληλία.

κόσμου μπορεί να τοποθετηθεί στο κέντρο βάρους των σημείων, έτσι ώστε  $\bar{c} = (0, 0, 0, 1)$ , δίνοντας ουσιαστικά την τελευταία γραμμή του πίνακα προβολής  $\tilde{\mathbf{P}}_j$ . Ορίζοντας  $\tilde{\mathbf{x}}_{ji} = \mathbf{x}_{ji} - \bar{\mathbf{x}}_j$  τις θέσεις των σημείων σε σχέση με το νέο κέντρο του συστήματος συντεταγμένων, μπορεί να γραφεί:

$$\tilde{\mathbf{x}}_{ji} = \mathbf{M}_j \mathbf{p}_i \quad (\text{II.36})$$

όπου  $\mathbf{M}$  είναι το άνω  $2 \times 3$  τμήμα του πίνακα προβολής  $\mathbf{P}_j$  και  $\mathbf{p}_i = (X_i, Y_i, Z_i)$ . Αν αναπαρασταθούν όλες οι μετρήσεις με τη μορφή πίνακα τότε θα λαμβάνονταν η ακόλουθη αναπαράσταση:

$$\hat{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}}_{11} & \dots & \tilde{\mathbf{x}}_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{\mathbf{x}}_{M1} & \dots & \tilde{\mathbf{x}}_{MN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{M}_j \\ \vdots \\ \mathbf{M}_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_1 & \dots & \mathbf{p}_i & \dots & \mathbf{p}_N \end{bmatrix} = \hat{\mathbf{M}} \hat{\mathbf{S}} \quad (\text{II.37})$$

όπου  $\hat{\mathbf{X}}$  είναι ο πίνακας μετρήσεων,  $\hat{\mathbf{M}}$  ο πίνακας κίνησης και  $\hat{\mathbf{S}}$  ο πίνακας δομής (Tomasi and Kanade, 1992).

Καθώς ο πίνακας κίνησης  $\hat{\mathbf{M}}$  είναι  $2 \times 3$  και ο πίνακας δομής  $\hat{\mathbf{S}}$  είναι  $3 \times N$ , ο SVD του  $\hat{\mathbf{X}}$  δίνει μόνο τρεις μη-μηδενικές ιδιάζουσες τιμές. Στην περίπτωση που οι μετρήσεις στο  $\hat{\mathbf{X}}$  εμπεριέχουν θόρυβο, ο SVD αποδίδει εκείνη την παραγοντοποίηση τρίτης τάξης του  $\hat{\mathbf{X}}$  που είναι πιο κοντά στο  $\hat{\mathbf{X}}$  υπό την έννοια των ελαχίστων τετραγώνων (Hartley and Zisserman, 2003; Tomasi and Kanade, 1992).

Φυσικά θα ήταν ιδανικό ο SVD του  $\hat{\mathbf{X}}$ :  $\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T$  να αποδίδει αυτόματα τους ζητούμενους πίνακες δομής  $\hat{\mathbf{S}}$  και κίνησης  $\hat{\mathbf{M}}$  αλλά αυτό δεν είναι εφικτό. Αντί αυτού, γράφεται η σχέση:

$$\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T = [\mathbf{U} \mathbf{Q}] [\mathbf{Q}^{-1} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T] \quad (\text{II.38})$$

και ορίζεται  $\hat{\mathbf{M}} = \mathbf{U} \mathbf{Q}$  και  $\hat{\mathbf{S}} = \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T$ .

Η ανάκτηση του πίνακα  $\mathbf{Q}$  εξαρτάται από το μοντέλο κίνησης που υιοθετείται. Στην περίπτωση της ορθογραφικής προβολής, τα στοιχεία  $\mathbf{M}_j$  είναι οι πρώτες δύο γραμμές του πίνακα περιστροφής  $\mathbf{R}_j$  και έτσι:

$$\begin{aligned} \mathbf{m}_{j0} \mathbf{m}_{j0} &= \mathbf{u}_{2j} \mathbf{Q} \mathbf{Q}^T \mathbf{u}_{2j}^T = 1 \\ \mathbf{m}_{j0} \mathbf{m}_{j1} &= \mathbf{u}_{2j} \mathbf{Q} \mathbf{Q}^T \mathbf{u}_{2j+1}^T = 0 \\ \mathbf{m}_{j1} \mathbf{m}_{j1} &= \mathbf{u}_{2j+1} \mathbf{Q} \mathbf{Q}^T \mathbf{u}_{2j+1}^T = 1 \end{aligned} \quad (\text{II.39})$$

όπου  $\mathbf{u}_k$  είναι οι  $3 \times 1$  γραμμές του πίνακα  $\mathbf{U}$ . Προκύπτει δηλαδή για ένα μεγάλο πλήθος εξισώσεων για τα στοιχεία στον πίνακα  $\mathbf{Q} \mathbf{Q}^T$ , από τον οποίο ο πίνακας  $\mathbf{Q}$  μπορεί να ανακτηθεί μέσω τετραγωνικής ρίζας πίνακα. Σημειώνεται εδώ ότι

ακόμη και μετά τον καθορισμό του πίνακα  $\mathbf{Q}$  είναι αδύνατο να καθοριστεί η κατεύθυνση περιστροφής ή εάν η κίνηση προς τον άξονα του βάθους αντιστρέφεται.

Η παραγοντοποίηση για την εξαγωγή της δομής και κίνησης από ένα σύνολο μετρήσεων έχει ορισμένα μειονεκτήματα. Από αυτά ξεχωρίζει το γεγονός ότι το σύνολο χαρακτηριστικών σημείων που χρησιμοποιείται για τον πίνακα μετρήσεων πρέπει να είναι διαθέσιμο σε όλες τις εικόνες (καρέ). Οι εμπνευστές της ιδέα πρότειναν για το λόγο αυτό (Tomasi and Kanade, 1992) την εφαρμογή της παραγοντοποίησης σε μικρότερα πιο πυκνά σύνολα σημείων, δίνοντας τη δυνατότητα προσθήκης περισσότερων σημείων και κάμερών στην εξέλιξη της μεθόδου. Άλλο ένα σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου παραγοντοποίησης είναι ότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε κάμερες που ακολουθούν το μοντέλο της προοπτικής προβολής. Ένας τρόπος να αντιμετωπιστεί αυτή η αδυναμία είναι να εφαρμοστεί αρχική αφινική (πχ. ορθογραφική) αποκατάσταση και εν συνεχεία να διορθωθεί ώστε να αποδώσει την προοπτική με επαναληπτικές μεθόδους (Christy and Horaud, 1996). Εναλλακτικά θα μπορούσε να εφαρμοστεί πλήρης προβολική παραγοντοποίηση (Sturm and Triggs, 1996), όπου η συμπερίληψη της τρίτης γραμμής του πίνακα της κάμερας ισοδυναμεί με τον πολλαπλασιασμό κάθε αποκατεστημένης μέτρησης  $\mathbf{x}_{ji} = \mathbf{M}_j \mathbf{p}_i$  με το αντίστροφο προβολικό βάθος  $n_{ji} = d_{ji}^{-1} = 1/(\mathbf{P}_{j2} \mathbf{p}_i)$  ή ισοδύναμα, με τον πολλαπλασιασμό κάθε θέσης με το προβαλλόμενο βάθος  $d_{ji}$ :

$$\hat{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} d_{11}\hat{\mathbf{x}}_{11} & \dots & d_{1i}\hat{\mathbf{x}}_{1i} & \dots & d_{1N}\hat{\mathbf{x}}_{1N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_{j1}\hat{\mathbf{x}}_{j1} & \dots & d_{ji}\hat{\mathbf{x}}_{ji} & \dots & d_{jN}\hat{\mathbf{x}}_{jN} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_{M1}\hat{\mathbf{x}}_{M1} & \dots & d_{Mi}\hat{\mathbf{x}}_{Mi} & \dots & d_{MN}\hat{\mathbf{x}}_{MN} \end{bmatrix} = \hat{\mathbf{M}}\hat{\mathbf{S}} \quad (\text{II.40})$$

Τα προβολικά βάθη  $d_{ji}$  λαμβάνονται από ανακατασκευή δύο όψεων (Sturm and Triggs, 1996), ενώ σε πιο πρόσφατες εργασίες αρχικοποιούνται ως  $d_{ji} = 1$  και αναθεωρούνται σε κάθε επανάληψη (Oliensis and Hartley, 2007).

#### II.4.1 3Δ ψηφιακό αντίγραφο αραιού ή πυκνού νέφους

Αφού εκτιμηθεί μια 3Δ ανακατασκευή πολλών όψεων μια σκηνης, γίνεται εφικτή η δημιουργία ενός 3Δ ψηφιακού αντιγράφου με υφή. Το πρώτο σημαντικό βήμα είναι να δημιουργηθεί ένα πυκνό 3Δ αντίγραφο από το αραιό νέφος 3Δ σημείων που παράγει η μέθοδος Δομή από κίνηση. Μια από τις εναλλακτικές που υπάρχουν είναι να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος στερεοσκοπίας από πολλές όψεις (multi-view stereo). Άλλη εναλλακτική είναι να εφαρμοστεί 3Δ τριγωνισμός απευθείας στο αραιό νέφος. Σημειώνεται όμως, ότι η απευθείας εφαρμογή τριγωνισμού οδηγεί σε πολύ απλή γεωμετρία του αντικειμένου η οποία

είναι έντονα αντιληπτή και έχει περιορισμένες χρήσεις. Για την επίτευξη ενός πιο ρεαλιστικού αντιγράφου, ένας χάρτης υφής (texture map) μπορεί να εξαχθεί για καθένα από τα τρίγωνα του ψηφιακού αντιγράφου, με διάφορους τρόπους. Άλλη μέθοδος είναι η δημιουργία ξεχωριστού χάρτη υφής από κάθε κάμερα αναφοράς και ανάμειξή τους κατά τη διαδικασία της απεικόνισης (view-dependent texture mapping).

Στην περίπτωση που απαιτείται η δημιουργία 3Δ αντιγράφου υψηλής ποιότητας (ακρίβειας και ανάλυσης) τότε μια μέθοδος πυκνού νέφους πρέπει να εφαρμοστεί. Το πρόβλημα της πυκνής αντιστοίχισης είναι πολύ πιο περίπλοκο από αυτό της αραιής αντιστοίχισης της μεθόδου Δομή από κίνηση, καθώς σε πολλές περιπτώσεις η ανάκτηση του βάθους μπορεί να απαιτεί και ευρεστικές προσεγγίσεις (πχ. επιφάνειες χωρίς ευδιάκριτα χαρακτηριστικά). Οι Scharstein and Szeliski (2002) πρότειναν μια γενική ταξινόμηση των μεθόδων πυκνής αντιστοίχισης, η οποία βασίζεται στους δομικούς αλγόριθμους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αναπτυχθούν περαιτέρω άλλοι αλγόριθμοι. Η ταξινόμηση βασίζεται έτσι στην παρατήρηση ότι οι αλγόριθμοι γενικά εκτελούν ένα υποσύνολο των εξής τεσσάρων βημάτων:

- Υπολογισμός κόστους ταύτισης
- Συγκέντρωση κόστους
- Υπολογισμός ανομοιογένειας (disparity)
- Βελτίωση ανομοιογένειας

Οι τοπικοί αλγόριθμοι, αλγόριθμοι βασισμένοι σε τοπικά χαρακτηριστικά (βάσει παραθύρου), όπου η ανομοιογένεια εξαρτάται μόνο από τις τοπικές διαφορές έντασης μέσα σε πεπερασμένο παράθυρο, προϋποθέτουν μια έμμεση ομαλότητα. Αυτοί οι αλγόριθμοι μπορούν εύκολα να σπάσουν σε τρία βήματα:

- Το κόστος ταύτισης είναι η τετραγωνική διαφορά στις τιμές έντασης της εικόνας με δεδομένη ανομοιογένεια
- Η συγκέντρωση γίνεται μέσω άθροισης του κόστους ταύτισης σε τετράγωνα παράθυρα με σταθερή ανομοιογένεια
- Οι ανομοιογένειες υπολογίζονται μέσω επιλογής της μικρότερης συγκειρωμένης τιμής σε κάθε εικονοστοιχείο

Κάποιοι τοπικοί αλγόριθμοι συνδυάζουν τα βήματα 1 και 2 και χρησιμοποιούν ένα κόστος ταύτισης βασισμένο στο πεδίο ορισμού, όπως η κανονικοποιημένη αυτοσυσχέτιση (Bolles et al., 1993; Hannah, 1974) ο μετασχηματισμός τάξης (Zabih and Woodfill, 1994) και άλλα βαθμωτά μέτρα (Bhat and Nayar, 1998).

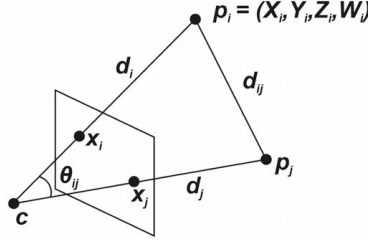
Οι καθολικοί αλγόριθμοι, από την άλλη, προϋποθέτουν άμεση ομαλότητα και λύνουν ένα πρόβλημα καθολικής βελτιστοποίησης. Τυπικά, αυτοί οι αλγόριθμοι δεν εκτελούν ένα βήμα συγκέντρωσης αλλά αναζητούν την ανομοιογένεια που ελαχιστοποιεί μια συνάρτηση καθολικού κόστους. Βασική διάκριση μεταξύ τους είναι ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται η ελαχιστοποίηση, πχ. με προσομοιωμένη ανόπτηση (simulated annealing) (Barnard, 1989; Marroquin et al., 1987), πιθανολογική διάχυση (probabilistic mean-field diffusion) (Scharstein and Szeliski, 2002), μεγιστοποίησης αναμενόμενης τιμής (expectation maximization) (Birchfield et al., 2007), γράφους (graph cuts) (Boykov et al., 2001) ή, ακόμη, αλγόριθμοι επαναληπτικής διάχυσης εμπιστοσύνης (loopy belief propagation) (Sun et al., 2003).

Μεταξύ των δύο μεγάλων αυτών κατηγοριών αλγορίθμων υπάρχουν επαναληπτικοί αλγόριθμοι, οι οποίοι δεν προϋποθέτουν άμεσα τη συνάρτηση κόστους, και των οποίων η συμπεριφορά μοιάζει με αυτή των αλγορίθμων επαναληπτικής βελτιστοποίησης (Marr and Poggio, 1976; Zitnick and Kanade, 2000).

## II.5 Αναδιάταξη δέσμης (bundle adjustment)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η πλέον ακριβής μέθοδος ανάκτησης της δομής και της κίνησης είναι η εφαρμογή μη-γραμμικής ελαχιστοποίησης των μετρήσεων των σφαλμάτων επαναπροβολής (reprojection), η οποία είναι γνωστή στη φωτογραμμετρία και στην όραση υπολογιστών ως προσαρμογή δέσμης ή, όπως έχει επικρατήσει, bundle adjustment. Ο όρος bundle αναφέρεται στις δέσμες ακτίνων που συνδέουν τα κέντρα των καμερών με 3D σημεία, ενώ ο όρος adjustment αναφέρεται στον επαναληπτικό τρόπο ελαχιστοποίησης του σφάλματος επαναπροβολής. Στο πεδίο της όρασης υπολογιστών έχει χρησιμοποιηθεί και η ονομασία βέλτιστη εκτίμηση κίνησης (optimal motion estimation). Οι Triggs, McLauchlan, Hartley et al. (Triggs et al., 1999) παρέχουν μια αναλυτική περιγραφή του θέματος και μια περιλαμβάνουν ιστορική αναδρομή της έρευνας με αναφορές στη βιβλιογραφία της φωτογραμμετρίας, καθώς και λεπτές έννοιες σχετικές με προβλήματα στη μέτρηση. Το αντικείμενο εξετάζεται ενδελεχώς σε γνωστά εγχειρίδια της πολυεικονικής γεωμετρίας (Hartley and Zisserman, 2003; Moons et al., 2010).

Τα βασικά στοιχεία της προσαρμογής δέσμης σχετίζονται στενά με το γνωστό πρόβλημα της εκτίμησης πόζας (pose estimation), η οποία στοχεύει στην εκτίμηση της στάσης (πόζας) ενός αντικειμένου στον 3D χώρο από ένα σύνολο 2D προβολών (εικόνες). Το πρόβλημα σχετίζεται με την εξωτερική βαθμονόμηση (extrinsic calibration) της κάμερας. Το πρόβλημα της ανάκτησης της πόζας από τρία σημεία, τα οποία αποτελούν το ελάχιστο μέγεθος πληροφορίας που απαιτείται, είναι γνωστό ως το πρόβλημα προοπτικής τριών σημείων (perspective-3-point-problem – P3P), το οποίο γενικεύεται σε πρόβλημα  $n$ -σημείων ως PnP (Haralick et al., 1994).



Εικόνα ΙΙ.5. Εκτίμηση πόζας από άμεσο γραμμικό μετασχηματισμό.

Ο απλούστερος τρόπος για την ανάκτηση της πόζας μιας κάμερας είναι μέσω διαμόρφωσης συστήματος γραμμικών εξισώσεων από τη μορφή του πίνακα της κάμερας για την προοπτική προβολή. Υπενθυμίζεται ότι κάθε 2Δ σημείο στην κάμερα  $\hat{x}_s = \mathbf{K}[\mathbf{R}|\mathbf{t}]\mathbf{p}_w = \mathbf{P}\mathbf{p}_w$  για κάθε σημείο  $\mathbf{p}_w$  στον 3Δ κόσμο και  $\mathbf{P} = \mathbf{K}[\mathbf{R}|\mathbf{t}]$  είναι ο πίνακας της κάμερας.

$$\begin{aligned} x_i &= \frac{p_{00}X_i + p_{01}Y_i + p_{02}Z_i + p_{03}}{p_{20}X_i + p_{21}Y_i + p_{22}Z_i + p_{23}} \\ y_i &= \frac{p_{10}X_i + p_{11}Y_i + p_{12}Z_i + p_{13}}{p_{20}X_i + p_{21}Y_i + p_{22}Z_i + p_{23}} \end{aligned} \quad (\text{II.41})$$

όπου  $x_*$  είναι οι μετρήσεις των θέσεων των 2Δ χαρακτηριστικών και  $X_*$  είναι οι γνωστές θέσεις τους στο 3Δ χώρο (Εικόνα ΙΙ.5). Το σύστημα εξισώσεων μπορεί να λυθεί με γραμμικό τρόπο για τους αγνώστους στον πίνακα της κάμερας  $\mathbf{P}$  μέσω πολλαπλασιασμού με τον παρονομαστή. Ο αλγόριθμος που προκύπτει καλείται άμεσος γραμμικός μετασχηματισμός (direct linear transform – DLT) (Sutherland, 1974). Για τον υπολογισμό των 12 (ή 11 αν τεθεί  $p_{23} = 1$ ) αγνώντων απαιτούνται να είναι γνωστές τουλάχιστον 6 αντιστοιχίες μεταξύ 3Δ και 2Δ θέσεων.

Πιο ακριβή αποτελέσματα μπορούν να ληφθούν μέσω άμεσης ελαχιστοποίησης των παραπάνω εξισώσεων μέσω μη-γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων και ένα μικρό πλήθος επαναλήψεων. Μόλις εκτιμηθούν τα στοιχεία του πίνακα της κάμερας  $\mathbf{P}$  είναι δυνατή η ανάκτηση τόσο των εσωτερικών όσο και των εξωτερικών παραμέτρων (καθώς ως γνωστόν  $\mathbf{P} = \mathbf{K}[\mathbf{R}|\mathbf{t}]$ ), αφού, καθώς ο  $\mathbf{K}$  είναι άνω τριγωνικός, τόσο ο  $\mathbf{K}$  όσο και ο  $\mathbf{R}$  πίνακες μπορούν να ανακτηθούν από τον  $\mathbf{P}$  με RQ παραγοντοποίηση. Στις εφαρμογές στις οποίες υπάρχει πρότερη γνώση για τον πίνακα  $\mathbf{K}$  (δηλαδή ο πίνακας εσωτερικών παραμέτρων της κάμερας είναι γνωστός) τότε η εκτίμηση της πόζας μπορεί να γίνει με τρεις μόνο αντιστοιχίες (Fischler and Bolles, 1981). Η βασική παρατήρηση που χρησιμοποιούν αυτοί οι γραμμικοί αλγόριθμοι είναι ότι η οπτική γωνία μεταξύ κάθε ζεύγος 2Δ σημείων  $\hat{x}_i$  και  $\hat{x}_j$  πρέπει να είναι η ίδια με τη γωνία μεταξύ των αντιστοιχών 3Δ σημείων  $\mathbf{p}_i$  και  $\mathbf{p}_j$  (Εικόνα ΙΙ.5).

Δοθέντος ενός συνόλου αντιστοιχιών  $\{(\hat{x}_i, \mathbf{p}_i)\}$ , όπου  $\hat{x}_i$  είναι οι μοναδιαίες διευθύνσεις που λαμβάνονται από το μετασχηματισμό των 2Δ σημείων

$\mathbf{x}_i$  στις μοναδιαίες 3Δ διευθύνσεις  $\hat{\mathbf{x}}_i$ , μέσω του αντίστροφου πίνακα βαθμονόμησης  $\mathbf{K}$ ,

$$\hat{\mathbf{x}}_i = \mathcal{N}(\mathbf{K}^{-1}\mathbf{x}_i) = \frac{\mathbf{K}^{-1}\mathbf{x}_i}{\|\mathbf{K}^{-1}\mathbf{x}_i\|} \quad (\text{II.42})$$

όπου άγνωστοι είναι οι αποστάσεις  $d_i$  από το κέντρο της κάμερας  $\mathbf{c}$  στο 3Δ σημείο  $\mathbf{p}_i$ , όπου  $\mathbf{p}_i = d_i\hat{\mathbf{x}}_i + \mathbf{c}$ . Ο νόμος των συνημιτόνων για το τρίγωνο  $\Delta(\mathbf{c}, \mathbf{p}_i, \mathbf{p}_j)$  δίνει

$$f_{ij}(d_i, d_j) = d_i^2 + d_j^2 - 2d_id_jc_{ij} - d_{ij}^2 = 0 \quad (\text{II.43})$$

όπου  $c_{ij} = \cos \theta_{ij} = \hat{\mathbf{x}}_i \cdot \hat{\mathbf{x}}_j$  και  $d_{ij}^2 = \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\|^2$ .

Μπορεί να ληφθεί κάθε τριπλέτα περιορισμών  $(f_{ij}, f_{ik}, f_{jk})$  και να απαληφθούν τα  $d_j$  και  $d_k$  και να προκύψει η τεταρτοβάθμια εξίσωση του  $d_i^2$ ,

$$g_{ijk}(d_i^2) = a_4d_i^8 + a_3d_i^6 + a_2d_i^4 + a_1d_i^2 + a_0 = 0 \quad (\text{II.44})$$

Δοθέντων πέντε ή περισσότερων αντιστοιχιών είναι δυνατή η δημιουργία  $(n-1)(n-2)/2$  τριπλετών για τη λήψη μιας γραμμικής εκτίμησης (με SVD) των τιμών για τα  $(d_i^8, d_i^6, d_i^4, d_i^2)$  (Quan and Lan, 1999). Μετά την εκτίμηση των αποστάσεων  $d_i$  μπορεί να δημιουργηθεί μια 3Δ δομή που θα αποτελείται από τις κλιμακωμένες διευθύνσεις σημείων  $d_i\hat{\mathbf{x}}_i$ , οι οποίες μπορούν εν συνεχεία να ευθυγραμμιστούν με ένα νέφος 3Δ σημείων  $\{\mathbf{p}_i\}$  με χρήση απόλυτου προσανατολισμού για την τελική εκτίμηση της πόζας.

Παρόλα αυτά, ο πιο ακριβής και ενέλικτος τρόπος εκτίμησης της πόζας είναι μέσω άμεσης ελαχιστοποίησης του τετραγωνικού σφάλματος επαναπροβολής για τα 2Δ σημεία, ως συνάρτηση των αγνώστων παραμέτρων πόζας στο ζεύγος  $(\mathbf{R}, \mathbf{t})$  και δυνητικά στον πίνακα  $\mathbf{K}$ , με χρήση μη-γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων (Bogart, 1991; Gleicher and Witkin, 1992; Tsai, 1987). Οι εξισώσεις προβολής μπορούν να γραφούν ως:

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{f}(\mathbf{p}_i; \mathbf{R}, \mathbf{t}, \mathbf{K}) \quad (\text{II.45})$$

και να εφαρμοστεί ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων επαναπροβολής

$$E_{NLP} = \sum_i \rho \left( \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{R}} \Delta \mathbf{R} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{t}} \Delta \mathbf{t} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{K}} \Delta \mathbf{K} - \mathbf{r}_i \right) \quad (\text{II.46})$$

όπου  $\mathbf{r}_i = \tilde{\mathbf{x}}_i - \hat{\mathbf{x}}_i$  το τρέχον διάνυσμα υπολοίπων (2Δ σφάλμα στην πρόβλεψη της θέσης) και οι μερικές παράγωγοι εκφράζονται σε σχέση με τις άγνωστες παραμέτρους). Σημειώνεται εδώ ότι εάν είναι διαθέσιμες εκτιμήσεις 2Δ συνδιασποράς για τις θέσεις των 2Δ σημείων, η παραπάνω τετραγωνική νόρμα μπορεί να σταθμιστεί με τον αντίστροφο πίνακα συνδιασποράς.

Στην (Szeliski, 2011) παρουσιάζεται μια τμηματοποιημένη εκδοχή των εξισώσεων προβολής, με στόχο την καλύτερη κατανόηση του προβλήματος της

μη-γραμμικής παλινδρόμησης, αποτελούμενη από απλοποιημένα βήματα, ως εξής (Εικόνα II.6):

$$\begin{aligned}
 \mathbf{y}^{(1)} &= \mathbf{f}_T(\mathbf{p}_i; \mathbf{c}_j) = \mathbf{p}_i - \mathbf{c}_j \\
 \mathbf{y}^{(2)} &= \mathbf{f}_R(\mathbf{y}^{(1)}; \mathbf{q}_j) = \mathbf{R}(\mathbf{q}_j)\mathbf{y}^{(1)} \\
 \mathbf{y}^{(3)} &= \mathbf{f}_P(\mathbf{y}^{(2)}) = \frac{\mathbf{y}^{(2)}}{z^{(2)}} \\
 \mathbf{x}_i &= \mathbf{f}_C(\mathbf{y}^{(3)}; \mathbf{k}) = \mathbf{K}(\mathbf{k})\mathbf{y}^{(3)}
 \end{aligned} \tag{II.47}$$

όπου στις εν λόγω εξισώσεις  $\mathbf{c}_j$  είναι τα κέντρα των καμερών,  $\mathbf{q}_j$  τα quaternions των περιστροφών των καμερών και  $j$  ο δείκτης τους. Το πλεονέκτημα αυτής της διαδοχικής απεικόνισης είναι ότι ο κάθε μετασχηματισμός σε κάθε βήμα έχει μια απλή μερική παράγωγο σε σχέση τόσο με τις παραμέτρους του όσο και με την είσοδό του. Έτσι, μόλις υπολογιστεί η προβλεπόμενη τιμή του  $\tilde{\mathbf{x}}_i$  βάσει το 3Δ σημείου  $\mathbf{p}_i$  και των τρεχουσών τιμών των παραμέτρων της πόζας  $(\mathbf{c}_j, \mathbf{q}_j, \mathbf{k})$ , μπορεί να ληφθούν όλες οι απαιτούμενες μερικές παράγωγοι με χρήση του κανόνα της αλυσίδας

$$\frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial \mathbf{p}^{(k)}} = \frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial \mathbf{y}^{(k)}} \cdot \frac{\partial \mathbf{y}^{(k)}}{\partial \mathbf{p}^{(k)}} \tag{II.48}$$

όπου  $\mathbf{p}^{(k)}$  κάθε φορά ένα από τα διανύσματα των παραμέτρων που υφίσταται βελτιστοποίηση.

Επιστρέφοντας στο bundle adjustment, επισημαίνεται ότι οι παραπάνω σχέσεις για την εκτίμηση πόζας διαφέρουν από τις σχέσεις της πλήρους προσαρμογής δέσμης στο ότι οι θέσεις των χαρακτηριστικών  $\mathbf{x}_{ij}$  τώρα εξαρτώνται όχι μόνο από το δείκτη  $i$  του σημείου αλλά επίσης και από το δείκτη της πόζας της κάμερας  $j$

$$\mathbf{x}_{ij} = \mathbf{f}(\mathbf{p}_i, \mathbf{R}_j, \mathbf{c}_j, \mathbf{K}_j) \tag{II.49}$$

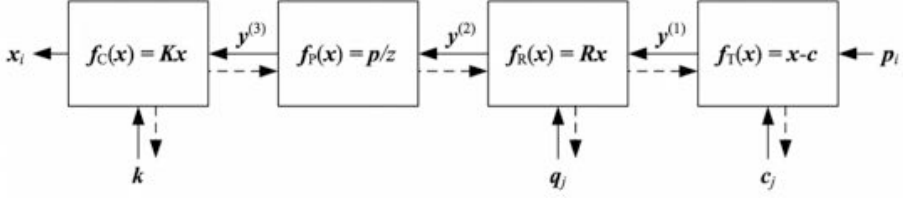
ενώ διαφέρουν επίσης και στο ότι οι 3Δ θέσεις  $\mathbf{p}_i$  ταυτόχρονα ενημερώνονται. Συμπληρωματικά, συνήθίζεται να προστίθεται ένα βήμα για την εκτίμηση της ακτινικής παραμόρφωσης

$$\mathbf{f}_{RD}(\mathbf{x}) = (1 + \kappa_1 r^2 + \kappa_2 r^4) \mathbf{x} \tag{II.50}$$

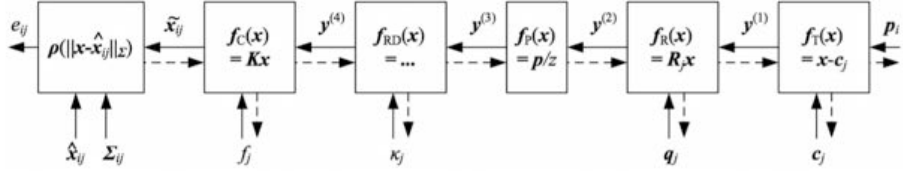
αν οι κάμερες που χρησιμοποιούνται δεν έχουν βαθμονομηθεί εκ των προτέρων, σύμφωνα με τη διαδοχική διαδικασία που φαίνεται στην Εικόνα II.7, κατ' αναλογία και επέκταση της διαδικασίας στην Εικόνα II.6.

Στη νέα αυτή απεικόνιση (Εικόνα II.7) έχει προστεθεί στο τέλος (αριστερά) μια ακόμη βαθμίδα επεξεργασίας όπου εκτελείται εύρωστη σύγκριση της προβλεπόμενης και της μετρούμενης 2Δ θέσης  $\hat{\mathbf{x}}_{ij}$  και  $\tilde{\mathbf{x}}_{ij}$  μετά από κλιμάκωση μέσω της μέτρησης της συνδιασποράς του θορύβου  $\Sigma_{ij}$ . Συγκεκριμένα:





Εικόνα ΙΙ.6. Η προβολή ενός 3Δ σημείου σε μια 2Δ μέτρηση με ανάλυση βημάτων.



Εικόνα ΙΙ.7. Προβολή ενός 3Δ σημείου σε μια 2Δ μέτρηση ως μια πλήρης ακολουθία μετασχηματισμών. Διακεκομμένες γραμμές δείχνουν την αντίστροφη κατεύθυνση.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{r}_{ij} &= \tilde{\mathbf{x}}_{ij} - \hat{\mathbf{x}}_{ij} \\
 s_{ij}^2 &= \mathbf{r}_{ij}^T \Sigma_{ij}^{-1} \mathbf{r}_{ij} \\
 e_{ij} &= \hat{\rho}(s_{ij}^2)
 \end{aligned} \tag{II.51}$$

όπου  $\hat{\rho}(r^2) = \rho(r)$ . Οι Ιακωβιανές (μερικές παράγωγοι) μπορούν τότε να γραφούν:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial e_{ij}}{\partial s_{ij}^2} &= \hat{\rho}'(s_{ij}^2) \\
 \frac{\partial s_{ij}^2}{\partial \tilde{\mathbf{x}}_{ij}} &= \Sigma_{ij}^{-1} \mathbf{r}_{ij}
 \end{aligned} \tag{II.52}$$

Το πλεονέκτημα αυτής της αλυσιδωτής αναπαράστασης δεν είναι μόνο στην απλοποίηση των υπολογισμών των μερικών παραγώγων, αλλά και στο ότι μπορεί να προσαρμοστεί σε οποιαδήποτε διαμόρφωση καμερών.



## Βιβλιογραφία

- Antone, M. and Teller, S. (2002). Scalable extrinsic calibration of omnidirectional image networks. *International Journal of Computer Vision*, 49(2-3):143–174.
- Barnard, S. T. (1989). Stochastic stereo matching over scale. *International Journal of Computer Vision*, 3(1):17–32.
- Becker, S. C. and Bove, V. M. (1995). Semiautomatic 3d-model extraction from uncalibrated 2d-camera views. In *Visual Data Exploration and Analysis II*, 2410(447–462).
- Bhat, D. N. and Nayar, S. K. (1998). Ordinal measures for image correspondence. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20(4):415–423.
- Birchfield, S. T., Natarajan, B., and Tomasi, C. (2007). Correspondence as energy-based segmentation. *Image and Vision Computing*, 25(8):1329–1340.
- Bogart, R. G. (1991). View correlation. *Graphics Gems*, II:181–190.
- Bolles, R. C., Baker, H. H., and Hannah, M. J. (1993). The jisst stereo evaluation. In *Image Understanding Workshop*, pages 263–274.
- Boykov, Y., Veksler, O., and Zabih, R. (2001). Fast approximate energy minimization via graph cuts. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 23(11):1222–1239.
- Brillault-O’Mahony, B. (1991). New method for vanishing point detection. *CVGIP: Image Understanding*, 54(2):289–300.
- Christy, S. and Horaud, R. (1996). Euclidean shape and motion from multiple perspective views by affine iterations. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 18(11):1098–1104.
- Collins, R. T. and Weiss, R. S. (1990). Vanishing point calculation as a statistical inference on the unit sphere. In *Proceedings of the Third IEEE International Conference on Computer Vision*, pages 400–403.

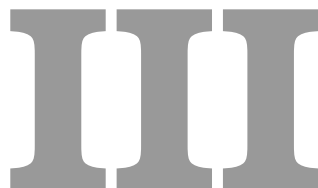
- Faugeras, O., Luong, Q. T., and Papadopoulos, T. (2004). *The geometry of multiple images: the laws that govern the formation of multiple images of a scene and some of their applications*. MIT press.
- Fischler, M. A. and Bolles, R. C. (1981). Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24(6):381–395.
- Gleicher, M. and Witkin, A. (1992). Through-the-lens camera control. In *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 26(2):331–340.
- Hannah, M. J. (1974). *Computer matching of areas in stereo images*. PhD thesis, Stanford University.
- Haralick, B. M., Lee, C. N., Ottenberg, K., and Nölle, M. (1994). Review and analysis of solutions of the three point perspective pose estimation problem. *International journal of computer vision*, 13(3):331–356.
- Hartley, R. and Zisserman, A. (2003). *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge university press.
- Hartley, R. I. (1995). In defence of the 8-point algorithm. In *Proceedings of the IEEE Fifth International Conference on Computer Vision, 1995*, pages 1064–1070.
- Hartley, R. I. (1998). Chirality. *International Journal of Computer Vision*, 26(1):41–61.
- Hartley, R. I. and Sturm, P. (1997). Triangulation. *Computer vision and image understanding*, 68(2):146–157.
- Košecák, J. and Zhang, W. (2005). Extraction, matching, and pose recovery based on dominant rectangular structures. *Computer Vision and Image Understanding*, 100(3):274–293.
- Kruppa, E. (1913). Zur ermittlung eines objektes aus zwei perspektiven mit innerer orientierung. *Sitz.-Ber.Akad.Wiss., Wien, math. Naturw. Kl., Abt.IIa*, 122:1939–1948.
- Longuet-Higgins, H. C. (1981). A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections. *Nature*, 293(5828):133–135.
- Marr, D. and Poggio, T. (1976). Cooperative computation of stereo disparity. *Science*, 194(4262):283–287.
- Marroquin, J., Mitter, S., and Poggio, T. (1987). Probabilistic solution of ill-posed problems in computational vision. *Journal of the american statistical association*, 82(397):76–89.

- McLean, G. F. and Kotturi, D. (1995). Vanishing point detection by line clustering. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 17(11):1090–1095.
- Moons, T., Van Gool, L., and Vergauwen, M. (2010). 3d reconstruction from multiple images part 1: Principles. *Foundations and trends in Computer Graphics and Vision*, 4(4):287–404.
- Nistér, D. (2004). An efficient solution to the five-point relative pose problem. In 26, editor, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, volume 6, pages 756–770.
- Oliensis, J. and Hartley, R. (2007). Iterative extensions of the sturm/triggs algorithm: Convergence and nonconvergence. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 29(12):2217–2233.
- Pflugfelder, R. (2008). *Self-calibrating Cameras in Video Surveillance*. PhD thesis, Graz University of Technology.
- Quan, L. and Lan, Z. (1999). Linear n-point camera pose determination. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 21(8):774–780.
- Quan, L. and Mohr, R. (1989). Determining perspective structures using hierarchical hough transform. *Pattern Recognition Letters*, 9(4):279–286.
- Rother, C. (2002). A new approach to vanishing point detection in architectural environments. *Image and Vision Computing*, 20(9-10):647–655.
- Schaffalitzky, F. and Zisserman, A. (2000). Planar grouping for automatic detection of vanishing lines and points. *Image and Vision Computing*, 18(9):647–658.
- Scharstein, D. and Szeliski, R. (2002). A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. *International journal of computer vision*, 47(1-3):7–42.
- Shufelt, J. A. (1999). Performance evaluation and analysis of vanishing point detection techniques. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 21(3):282–288.
- Sturm, P. and Triggs, B. (1996). A factorization based algorithm for multi-image projective structure and motion. In *European conference on computer vision*, pages 709–720, Berlin, Heidelberg. Springer.
- Sun, J., Zheng, N. N., and Shum, H. Y. (2003). Stereo matching using belief propagation. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 25(7):787–800.

- Sutherland, I. E. (1974). Three-dimensional data input by tablet. In *Proceedings of the IEEE*, volume 62(4), pages 453–461.
- Szeliski, R. (2011). Computer vision – algorithms and applications. *Springer-Verlag London*. ISBN 978-1-84882-934-3.
- Tardif, J. P. (2009). Non-iterative approach for fast and accurate vanishing point detection. In *IEEE 12th International Conference on Computer Vision*, pages 1250–1257.
- Tomasi, C. and Kanade, T. (1992). Shape and motion from image streams under orthography: a factorization method. *International Journal of Computer Vision*, 9(2):137–154.
- Triggs, B., McLauchlan, P. F., Hartley, R. I., and Fitzgibbon, A. W. (1999). Bundle adjustment-a modern synthesis. In *International workshop on vision algorithms*, pages 298–372, Berlin, Heidelberg. Springer.
- Tsai, R. (1987). A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 3(4):323–344.
- Tuytelaars, T., Proesmans, M., and Van Gool, L. (1997). The cascaded hough transform. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing*, volume 2, pages 736–739.
- Zabih, R. and Woodfill, J. (1994). Non-parametric local transforms for computing visual correspondence. In *European conference on computer vision*, pages 151–158, Berlin, Heidelberg. Springer.
- Zitnick, C. L. and Kanade, T. (2000). A cooperative algorithm for stereo matching and occlusion detection. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 22(7):675–684.

—Without mathematics, there's nothing you can do.  
Everything around you is mathematics. Everything  
around you is numbers.

Shakuntala Devi



## Αριθμητικές μέθοδοι

### III.1 Εισαγωγή

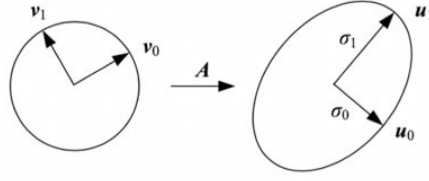
Στο παρόν Παράρτημα περιλαμβάνονται βασικά στοιχεία γραμμικής άλγεβρας και αριθμητικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται πολύ συχνά στις μεθόδους 3Δ ψηφιοποίησης και στην όραση υπολογιστών εν γένει. Στα στοιχεία που περιλαμβάνονται συγκαταλέγονται οι αναλύσεις ιδιοτιμών (eigenvalues) και ιδιαζουσών τιμών (SVD) και βασικές παραγοντοποιήσεις πινάκων. Αναπτύσσονται θέματα σχετικά με τη βελτιστοποίηση και τις μεθόδους γραμμικών αλλά και τα μη-γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων. Μεγάλο τμήμα των κειμένων που ακολουθούν βασίζεται στο Szeliski (2011).

### III.2 Αποσύνθεση πινάκων

Για την κατανόηση της δομής των πινάκων και του τρόπου χρήσης τους (όπως στην αντιστροφή και τη λύση συστημάτων), χρησιμοποιούνται ένα πλήθος από αναλύσεις ή αποσυνθέσεις πινάκων (decompositions).

#### III.2.1 Ανάλυση ιδιαζουσών τιμών

Μια από τις πλέον συχνά χρησιμοποιούμενες αναλύσεις πινάκων είναι αυτή των ιδιαζουσών τιμών (singular value decomposition – SVD), η οποία περιγράφει ότι κάθε πίνακας  $\mathbf{A}$   $m \times n$  πραγματικών τιμών μπορεί να γραφεί ως το γινόμενο τριών πινάκων:



Εικόνα ΙΙΙ.1. Απεικόνιση του συστήματος  $\mathbf{v}$  στο σύστημα  $\mathbf{u}$  μέσω του πίνακα  $\mathbf{A}$ .

$$\mathbf{A}_{m \times n} = \mathbf{U}_{m \times p} \mathbf{\Sigma}_{p \times p} \mathbf{V}_{p \times n}^T =$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_0 & \dots & \mathbf{u}_{p-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_0 & & \\ & \ddots & \\ & & \sigma_{p-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_0^T \\ \vdots \\ \mathbf{v}_{p-1}^T \end{bmatrix} \quad (\text{III.1})$$

όπου  $p = \min(m, n)$ . Οι πίνακες  $\mathbf{U}$  και  $\mathbf{V}$  είναι ορθοκανονικοί, δηλαδή, ισχύει για τον καθένα ότι  $\mathbf{U}^T \mathbf{U} = \mathbf{I}$  και  $\mathbf{V}^T \mathbf{V} = \mathbf{I}$  το οποίο ισχύει και για τα διανύσματα στήλες τους  $\mathbf{u}_i \mathbf{u}_j = \mathbf{v}_i \mathbf{v}_j = \delta_{ij}$ . Οι ιδιάζουσες τιμές είναι όλες μη-αρνητικές και συνήθως ταξινομούνται σε φθίνουσα σειρά  $\sigma_0 \geq \sigma_1 \geq \dots \geq \sigma_{p-1} \geq 0$ .

Μια γεωμετρική ερμηνεία της ανάλυσης SVD για έναν πίνακα  $\mathbf{A}$  μπορεί να ληφθεί από την εγγραφή της παραπάνω εξίσωσης του SVD ως εξής:

$$\mathbf{A}\mathbf{V} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma} \text{ ή } \mathbf{A}\mathbf{v}_j = \sigma_j \mathbf{u}_j \quad (\text{III.2})$$

Αυτή η εξίσωση εκφράζει ότι ο πίνακας  $\mathbf{A}$  απεικονίζει κάθε διάνυσμα βάσης  $\mathbf{v}_j$  στη διεύθυνση του  $\mathbf{u}_j$  με μήκος  $\sigma_j$  όπως φαίνεται στην Εικόνα ΙΙΙ.1. Εάν μόνο οι πρώτες  $r$  ιδιάζουσες τιμές είναι θετικές τότε ο πίνακας  $\mathbf{A}$  είναι τάξης  $r$  και ο δείκτης  $p$  στις παραπάνω εξισώσεις μπορεί να αντικατασταθεί με το δείκτη  $r$ . Μια σημαντική ιδιότητα του SVD είναι ότι αν περικοπεί η ανάπτυξη του πίνακα  $\mathbf{A} = \sum_{j=0}^r \sigma_j \mathbf{u}_j \mathbf{v}_j^T$  σε οποιοδήποτε σημείο, τότε προκύπτει μια βέλτιστη κατά την έννοια των ελαχίστων τετραγώνων προσέγγιση του πίνακα  $\mathbf{A}$ .

### ΙΙΙ.3 Ανάλυση ιδιοτιμών

Εάν ο πίνακας  $\mathbf{C}$  είναι συμμετρικός ( $m = n$ ) μπορεί να αναλυθεί κατά την έννοια της αποσύνθεσης ιδιοτιμών (eigenvalue decomposition):



$$\mathbf{C} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{U}^\top =$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_0 & \dots & \mathbf{u}_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_0 & & \\ & \ddots & \\ & & \lambda_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_0^\top \\ \vdots \\ \mathbf{u}_{n-1}^\top \end{bmatrix} = \sum_{i=0}^{n-1} \lambda_i \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i^\top \quad (\text{III.3})$$

Ο πίνακας  $\mathbf{U}$  είναι ο πίνακας των ιδιοδιανυσμάτων και στην περίπτωση της εν λόγω αποσύνθεσης ισχύει για τις ιδιοτιμές ότι  $\lambda_0 \geq \lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_{n-1}$  και ότι οι ιδιοτιμές μπορεί να είναι είτε θετικές είτε αρνητικές.

Μια ειδική περίπτωση συμμετρικού πίνακα  $\mathbf{C}$  προκύπτει όταν αυτός δημιουργείται από αθροίσματα εξωτερικών γινομένων

$$\mathbf{C} = \sum_i \mathbf{a}_i \mathbf{a}_i^\top = \mathbf{A} \mathbf{A}^\top \quad (\text{III.4})$$

κάτι που συχνά παρατηρείται σε επίλυση προβλημάτων ελαχίστων τετραγώνων, όπου ο πίνακας  $\mathbf{A}$  αποτελείται από όλα τα  $\mathbf{a}_i$  διανύσματα στήλης το ένα δίπλα στο άλλο. Στην περίπτωση αυτή η ανάλυση εγγυάται ότι οι προκύπτουσες ιδιοτιμές  $\lambda_i$  δεν είναι αρνητικές. Ο πίνακας αυτός  $\mathbf{C}$  είναι θετικά ημι-ορισμένος (positive semi-definite)

$$\mathbf{x}^\top \mathbf{C} \mathbf{x} \geq 0, \quad \forall \mathbf{x} \quad (\text{III.5})$$

Εάν ο πίνακας  $\mathbf{C}$  είναι πλήρους τάξης τότε οι ιδιοτιμές είναι όλες θετικές και ο πίνακας καλείται συμμετρικός θετικά ορισμένος (symmetric positive definite – SPD). Οι συμμετρικοί θετικά ορισμένοι πίνακες ανακύπτουν στη στατιστική ανάλυση δεδομένων, αφού αναπαριστούν τη συνδιασπορά ενός συνόλου  $\{\mathbf{x}_i\}$  σημείων γύρω από τη μέση τιμή τους  $\bar{\mathbf{x}}$

$$\mathbf{C} = \frac{1}{n} \sum_i (\mathbf{x}_i - \bar{\mathbf{x}})(\mathbf{x}_i - \bar{\mathbf{x}})^\top \quad (\text{III.6})$$

Στην περίπτωση αυτή η ανάλυση ιδιοτιμών είναι γνωστή ως ανάλυση κύριων συνιστωσών (principal component analysis – PCA), καθώς ουσιαστικά μοντελοποιεί τις κύριες διευθύνσεις (και μέτρα) της διασποράς της σημειακής κατανομής γύρω από τη μέση τιμή τους. Στην Εικόνα ΙΙΙ.1 φαίνεται πώς οι κύριες συνιστώσες του πίνακα συνδιασποράς  $\mathbf{C}$  δηλώνουν τους κύριους άξονες  $\mathbf{u}_j$  του ελλειψοειδούς της αβεβαιότητας που αντιστοιχεί στην εν λόγω κατανομή και πώς οι ιδιοτιμές  $\sigma_j = \sqrt{\lambda_j}$  δηλώνουν τις τυπικές αποκλίσεις κατά μήκος αυτών των αξόνων.

Οι ιδιοτιμές και τα ιδιοδιανύσματα του  $\mathbf{C}$  και οι ιδιάζουσες τιμές και τα ιδιάζοντα διανύσματα του  $\mathbf{A}$  σχετίζονται στενά. Δοθέντος  $\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T$  ισχύει:

$$\mathbf{C} = \mathbf{A}\mathbf{A}^T = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T\mathbf{V}\mathbf{\Sigma}\mathbf{U}^T = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{U}^T \quad (\text{III.7})$$

Από όπου είναι φανερό ότι  $\lambda_i = \sigma_i^2$  και ότι τα αριστερά-ιδιάζοντα διανύσματα του  $\mathbf{A}$  είναι τα ιδιοδιανύσματα του  $\mathbf{C}$ . Η σχέση αυτή παρέχει έναν αποδοτικό τρόπο υπολογισμού της ανάλυσης ιδιοτιμών για πολύ μεγάλους πίνακες που δεν είναι πλήρους τάξης.

Υπάρχει η δυνατότητα αντί της διαμόρφωσης του πίνακα  $\mathbf{C}$ , ο οποίος είναι  $P \times P$  να δημιουργηθεί ο πίνακας  $\hat{\mathbf{C}} = \mathbf{A}^T\mathbf{A}$ , ο οποίος είναι  $N \times N$ , και για τον οποίο ισχύει ότι οι ιδιοτιμές του είναι οι τετραγωνισμένες ιδιάζουσες τιμές του  $\mathbf{A}$ , δηλαδή  $\Sigma^2$ , και είναι συνεπώς και ιδιοτιμές του πίνακα  $\mathbf{C}$ . Τα ιδιοδιανύσματα του  $\hat{\mathbf{C}}$  είναι τα δεξιά ιδιάζοντα διανύσματα  $\mathbf{V}$  του  $\mathbf{A}$ , από όπου τα αριστερά ιδιοδιανύσματα μπορούν να υπολογιστούν ως  $\mathbf{U} = \mathbf{A}\mathbf{V}\mathbf{\Sigma}^{-1}$ . Το βήμα αυτό είναι ουσιώδες σε εφαρμογές όπως σε μεθόδους αναγνώρισης προσώπων (eigenfaces).

Πρακτικά, οι ιδιοτιμές και οι ιδιάζουσες τιμές μπορούν να εκτιμηθούν ως ακολούθως: ένα ιδιοδιάνυσμα ορίζεται από την εξίσωση

$$\lambda_i \mathbf{u}_i = \mathbf{C}\mathbf{u}_i, \text{ ή } (\lambda_i \mathbf{I} - \mathbf{C})\mathbf{u}_i = 0 \quad (\text{III.8})$$

Καθώς η τελευταία σχέση είναι μια ομογενής εξίσωση μπορεί να έχει μια μη-μηδενική λύση για  $\mathbf{u}_i$  εάν το σύστημα που περιγράφει είναι ανεπαρκούς τάξης, δηλαδή:  $|(\lambda \mathbf{I} - \mathbf{C})| = 0$ . Ο υπολογισμός αυτής της ορίζουσας οδηγεί στο χαρακτηριστικό πολυώνυμο του συστήματος που μπορεί να επιλυθεί για μικρού μόνο μεγέθους προβλήματα. Για μεγάλους πίνακες, επαναληπτικοί αλγόριθμοι εφαρμόζονται για να ελαττώσουν τον πίνακα  $\mathbf{C}$  σε συμμετρικό τριδιαγώνιο<sup>1</sup> πίνακα πραγματικών τιμών μέσω ορθογώνιων μετασχηματισμών και στη συνέχεια πραγματοποιείται παραγοντοποίηση QR.

### III.3.1 Παραγοντοποίηση QR

Μια πολύ διαδεδομένη μέθοδος επίλυσης ασθενώς ορισμένων προβλημάτων ελαχίστων τετραγώνων αλλά και μια βάση για πιο σύνθετους αλγορίθμους (όπως η ανάλυση ιδιοτιμών και ιδιαζόντων τιμών) είναι η παραγοντοποίηση QR

$$\mathbf{A} = \mathbf{Q}\mathbf{R} \quad (\text{III.9})$$

όπου  $\mathbf{Q}$  είναι ένας ορθοκανονικός (μοναδιαίος) πίνακας ( $\mathbf{Q}\mathbf{Q}^T = \mathbf{I}$ ) και  $\mathbf{R}$  ένας άνω τριγωνικός πίνακας. Όταν ο  $\mathbf{A}$  είναι τετραγωνικός, εάν ο  $\mathbf{A}$  είναι αντιστρέψιμος τότε η παραγοντοποίηση είναι μοναδική όταν είναι επιθυμητό

<sup>1</sup>Υπενθυμίζεται ότι τριδιαγώνιος είναι ο πίνακας που έχει μη μηδενικά στοιχεία πάνω στην κύρια διαγώνιο, στη διαγώνιο πάνω και στη διαγώνιο κάτω από την κύρια.

τα διαγώνια στοιχεία του  $\mathbf{R}$  να είναι θετικοί αριθμοί. Εάν ο πίνακας  $\mathbf{A}$  έχει  $n$  γραμμικώς ανεξάρτητες στήλες, τότε οι πρώτες  $n$  στήλες του πίνακα  $\mathbf{Q}$  διαμορφώνουν μια ορθοκανονική βάση για τον  $\mathbf{A}$ .

Μια από τις διαδεδομένες μεθόδους υπολογισμού της παραγοντοποίησης QR αποτελεί η μέθοδος Gram-Schmidt. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, τα στοιχεία του πίνακα  $\mathbf{A}$  λαμβάνονται ως σύνολο από διανύσματα στήλης και η περαιτέρω επεξεργασία γίνεται στο επίπεδο διανυσμάτων και εσωτερικών τους γινομένων, ως εξής:

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1 | \mathbf{a}_2 | \dots | \mathbf{a}_n] = [\mathbf{e}_1 | \mathbf{e}_2 | \dots | \mathbf{e}_n] \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1 \mathbf{e}_1 & \mathbf{a}_2 \mathbf{e}_1 & \dots & \mathbf{a}_n \mathbf{e}_1 \\ 0 & \mathbf{a}_2 \mathbf{e}_2 & \dots & \mathbf{a}_n \mathbf{e}_2 \\ \dots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{a}_n \mathbf{e}_n \end{bmatrix} = \mathbf{QR} \quad (\text{III.10})$$

όπου (θέτοντας  $\text{proj}_{\mathbf{u}} \mathbf{a} = \frac{\langle \mathbf{u}, \mathbf{a} \rangle}{\langle \mathbf{u}, \mathbf{u} \rangle} \mathbf{u}$ ):

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_1 &= \mathbf{a}_1 & \mathbf{e}_1 &= \frac{\mathbf{u}_1}{\|\mathbf{u}_1\|} \\ \mathbf{u}_2 &= \mathbf{a}_2 - \text{proj}_{\mathbf{u}_1} \mathbf{a}_2 & \mathbf{e}_2 &= \frac{\mathbf{u}_2}{\|\mathbf{u}_2\|} \\ \mathbf{u}_3 &= \mathbf{a}_3 - \text{proj}_{\mathbf{u}_1} \mathbf{a}_3 - \text{proj}_{\mathbf{u}_2} \mathbf{a}_3 & \mathbf{e}_3 &= \frac{\mathbf{u}_3}{\|\mathbf{u}_3\|} \\ \vdots & & \vdots & \\ \mathbf{u}_n &= \mathbf{a}_n - \sum_i \text{proj}_{\mathbf{u}_i} \mathbf{a}_n & \mathbf{e}_n &= \frac{\mathbf{u}_n}{\|\mathbf{u}_n\|} \end{aligned} \quad (\text{III.11})$$

μετά τον υπολογισμό των  $\mathbf{e}_i$  διανυσμάτων στηλών μπορεί να ανακτηθεί ο πίνακας  $\mathbf{Q} = [\mathbf{e}_1 | \mathbf{e}_2 | \dots | \mathbf{e}_n]$  και, καθώς ο πίνακας είναι ορθοκανονικός μπορεί να οδηγήσει εύκολα στην εκτίμηση του πίνακα  $\mathbf{R}$ :

$$\mathbf{A} = \mathbf{QR} \Leftrightarrow \mathbf{Q}^T \mathbf{A} = \mathbf{Q}^T \mathbf{QR} \Leftrightarrow \mathbf{Q}^T \mathbf{A} = \mathbf{IR} \Leftrightarrow \mathbf{R} = \mathbf{Q}^T \mathbf{A} \quad (\text{III.12})$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι στις εφαρμογές της όρασης υπολογιστών, η εν λόγω παραγοντοποίηση χρησιμοποιείται για την αποσύνθεση του πίνακα μιας κάμερας σε πίνακα περιστροφής και πίνακα βαθμονόμησης.

### III.3.2 Παραγοντοποίηση Cholesky

Η παραγοντοποίηση Cholesky μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε συμμετρικό θετικά ορισμένο πίνακα  $\mathbf{C}$  για να το μετατρέψει σε γινόμενο συμμετρικών άνω και κάτω τριγωνικών πινάκων

$$\mathbf{C} = \mathbf{LL}^T = \mathbf{R}^T \mathbf{R} \quad (\text{III.13})$$

όπου  $\mathbf{L}$  είναι ο κάτω τριγωνικός και  $\mathbf{R}$  ο άνω τριγωνικός πίνακας. Διαφορετικά από τη μέθοδο απαλοιφής Gauss, η οποία μπορεί να προϋποθέτει την εναλλαγή γραμμών και στηλών ή μπορεί να καταστεί ασταθής, η παραγοντοποίηση

Cholesky παραμένει ευσταθής για θετικά ορισμένους πίνακες, όπως αυτοί που ανακύπτουν σε προβλήματα ελαχίστων τετραγώνων. Εξαιτίας της μορφής της παραπάνω σχέσης για την παραγοντοποίηση Cholesky οι πίνακες  $\mathbf{L}$  και  $\mathbf{R}$  καλούνται τετραγωνικές ρίζες του πίνακα  $\mathbf{C}$ .

Ο αλγόριθμος για τον υπολογισμό της άνω τριγωνικής παραγοντοποίησης Cholesky είναι μια γενίκευση της μεθόδου απαλοιφής Gauss και βασίζεται στην αποσύνθεση

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \gamma & \mathbf{c}^\top \\ \mathbf{c} & \mathbf{C}_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma^{1/2} & \mathbf{0}^\top \\ \mathbf{c}\gamma^{-1/2} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{0}^\top \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_{11} - \mathbf{c}\gamma^{-1}\mathbf{c}^\top \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma^{1/2} & \gamma^{-1/2}\mathbf{c}^\top \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_0^\top \mathbf{C}_1 \mathbf{R}_0 \quad (\text{III.14})$$

η οποία μέσω επαναλήψεων μπορεί να μετατραπεί ως

$$\mathbf{C} = \mathbf{R}_0^\top \dots \mathbf{R}_{n-1}^\top \mathbf{R}_{n-1} \dots \mathbf{R}_0 = \mathbf{R}^\top \mathbf{R} \quad (\text{III.15})$$

### III.4 Γραμμικά ελάχιστα τετράγωνα

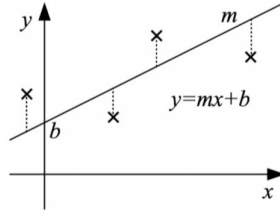
Προβλήματα προσαρμογής ελαχίστων τετραγώνων κάνουν ιδιαίτερα συχνά την εμφάνισή τους σε εφαρμογές σχετικές με την όραση υπολογιστών και το αντικείμενο της ψηφιοποίησης. Για παράδειγμα, η ευθυγράμμιση εικόνων βάσει χαρακτηριστικών σημείων απαιτεί την ελαχιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης τετραγωνικής απόστασης

$$E_{LS} = \sum_i \|\mathbf{r}_i\|^2 = \sum_i \|\mathbf{f}(\mathbf{x}_i; \mathbf{p}) - \mathbf{x}'_i\|^2 \quad (\text{III.16})$$

όπου  $\mathbf{r}_i = \mathbf{x}'_i - \mathbf{f}(\mathbf{x}_i; \mathbf{p}) = \hat{\mathbf{x}}'_i - \tilde{\mathbf{x}}'_i$ , ακολουθώντας το συμβολισμό του προηγούμενου Παραρτήματος, είναι το υπόλοιπο μεταξύ της μετρούμενης θέσης  $\hat{\mathbf{x}}'_i$  και της αντίστοιχης προβλεπόμενης θέσης  $\tilde{\mathbf{x}}'_i = \mathbf{f}(\mathbf{x}_i; \mathbf{p})$ .

Πολύπλοκα προβλήματα όπως στην περίπτωση της μεγάλης κλίμακας Δομής από κίνηση μπορεί να περιλαμβάνουν την ελαχιστοποίηση συναρτήσεων χιλιάδων μεταβλητών. Στην Εικόνα III.2 παρουσιάζεται ένα απλό παράδειγμα προβλήματος προσαρμογής ελαχίστων τετραγώνων, όπου ζητούμενες είναι οι παράμετροι μιας ευθείας γραμμής  $(m, b)$ . Όταν τα κατακόρυφα δείγματα  $y_i$  θεωρούνται ότι περιέχουν θόρυβο στην προσέγγιση της ευθείας  $y = mx + b$ , τότε η βέλτιστη εκτίμηση για τις παραμέτρους  $(m, b)$  μπορεί να βρεθεί από την ελαχιστοποίηση των τετραγωνικών υπολοίπων

$$E_{LLS} = \sum_i |y_i - (mx_i + b)|^2 \quad (\text{III.17})$$



Εικόνα ΙΙΙ.2. Απλό παράδειγμα προσαρμογής ελαχίστων τετραγώνων.

Σημειώνεται εδώ ότι δεν είναι ανάγκη να γίνεται προσαρμογή σε ευθεία γραμμή για να θεωρείται η προσέγγιση γραμμική. Αυτό που απαιτείται είναι η συνάρτηση να είναι γραμμική ως προς τις ζητούμενες παραμέτρους. Έτσι, για παράδειγμα, προσαρμογή σε ημιτονοειδές με άγνωστο πλάτος  $A$  και φάση  $\phi$  (γνωστή συχνότητα  $f$ ) μπορεί να γραφεί

$$E_{LLS} = \sum_i |y_i - A \sin(2\pi f x_i + \phi)|^2 = \sum_i |y_i - (B \sin 2\pi f x_i + C \cos 2\pi f x_i)|^2 \quad (\text{III.18})$$

που είναι έκφραση γραμμική ως προς  $(B, C)$ .

Η συχνά χρησιμοποιούμενη έκφραση του προβλήματος ελαχίστων τετραγώνων λαμβάνει την εξής μορφή (χρησιμοποιώντας  $\mathbf{x}$  για τις άγνωστες παραμέτρους):

$$E_{LLS} = \sum_i |\mathbf{a}_i \mathbf{x} - \mathbf{b}_i|^2 = \|\mathbf{A} \mathbf{x} - \mathbf{b}\|^2 \quad (\text{III.19})$$

η οποία μπορεί να αναπτυχθεί ως

$$E_{LLS} = \mathbf{x}^T (\mathbf{A}^T \mathbf{A}) \mathbf{x} - 2 \mathbf{x}^T (\mathbf{A}^T \mathbf{b}) + \|\mathbf{b}\|^2 \quad (\text{III.20})$$

για την οποία η ελάχιστη τιμή μπορεί να βρεθεί επιλύοντας τις αντίστοιχες κανονικές εξισώσεις

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{A}) \mathbf{x} = \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (\text{III.21})$$

Ένας από τους προτιμότερους τρόπου επίλυσης είναι με εφαρμογή παραγοντοποίησης Cholesky, ορίζοντας  $\mathbf{C} = \mathbf{A}^T \mathbf{A} = \mathbf{R}^T \mathbf{R}$ , όπου  $\mathbf{R}$  ο άνω-τριγωνικός πίνακας και  $\mathbf{d} = \mathbf{A}^T \mathbf{b}$ . Μετά την παραγοντοποίηση η λύση ως προς  $\mathbf{x}$  μπορεί να ληφθεί από

$$\mathbf{R}^T \mathbf{z} = \mathbf{d}, \quad \mathbf{R} \mathbf{x} = \mathbf{z} \quad (\text{III.22})$$

που περιλαμβάνει τη λύση δύο τριγωνικών συστημάτων.

### ΙΙΙ.5 Ολικά ελάχιστα τετράγωνα

Σε προβλήματα στα οποία το σφάλμα μέτρησης παρουσιάζεται σε όλες τις διαστάσεις (άξονες), είναι πιο αποτελεσματική η εφαρμογή της ελαχιστοποίησης σε σύνολο ομογενών τετραγωνικών σφαλμάτων, υπό τη μορφή που είναι γνωστή ως ολικά ελάχιστα τετράγωνα (total least squares–TLS):

$$E_{TLS} = \sum_i (\mathbf{a}_i \mathbf{x})^2 = \|\mathbf{A} \mathbf{x}\|^2 \quad (\text{III.23})$$

Η μετρική αυτή έχει την προφανή λύση στο σημείο  $\mathbf{x} = 0$  και είναι ομογενής ως προς τη μεταβλητή  $\mathbf{x}$ . Για το λόγο αυτό το συγκεκριμένο πρόβλημα ελαχιστοποίησης επανξάνεται με μια ακόμη απαίτηση,  $\|\mathbf{x}\|^2 = 1$  η οποία οδηγεί στο πρόβλημα ιδιοτιμών

$$\mathbf{x} = \underset{x}{\operatorname{argmin}} \mathbf{x}^T (\mathbf{A}^T \mathbf{A}) \mathbf{x} \quad (\text{III.24})$$

έτσι ώστε  $\|\mathbf{x}\|^2 = 1$ .

Η τιμή του  $\mathbf{x}$  που ελαχιστοποιεί αυτό το πρόβλημα με περιορισμούς είναι το ιδιοδιάνυσμα που σχετίζεται με τη μικρότερη ιδιοτιμή του  $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ . Φυσικά είναι το ίδιο με το τελευταίο δεξί ιδιάζον διάνυσμα του  $\mathbf{A}$ , καθώς

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T \\ \mathbf{A}^T \mathbf{A} &= \mathbf{V} \mathbf{\Sigma} \mathbf{U}^T \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T = \mathbf{V} \mathbf{\Sigma}^2 \mathbf{V}^T \\ \mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{v}_k &= \sigma_k^2 \mathbf{v}_k \end{aligned} \quad (\text{III.25})$$

που ελαχιστοποιείται με την επιλογή της μικρότερης τιμής  $\sigma_k$ .

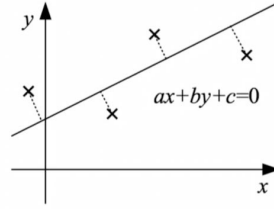
Στην Εικόνα ΙΙΙ.3 παρουσιάζεται παράδειγμα προβλήματος προσαρμογής σε δεδομένα που εμφανίζουν σφάλματα τα οποία είναι ισοτροπικά στις δύο διαστάσεις. Η λύση για την καλύτερη προσαρμογή στην ευθεία  $ax + by + x = 0$  μπορεί να βρεθεί μέσω της ελαχιστοποίησης

$$E_{TLS-2D} = \sum_i (ax_i + by_i + c)^2 \quad (\text{III.26})$$

βρίσκοντας το ιδιοδιάνυσμα που σχετίζεται με τη μικρότερη ιδιοτιμή του

$$\mathbf{C} = \mathbf{A}^T \mathbf{A} = \sum_i \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i & y_i & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.27})$$

Καθώς από τον αρχικό ορισμό του  $E_{TLS}$  φαίνεται ότι η ελαχιστοποίηση είναι μόνο στατιστικά βέλτιστη όταν όλες οι συντεταγμένες έχουν τον ίδιο θόρυβο, προβλήματα όπως αυτό της προσαρμογής της ευθείας απαιτεί ένα αρχικό βήμα αφαίρεσης της μέσης τιμής ανά διάσταση



Εικόνα ΙΙΙ.3. Παράδειγμα προσαρμογής με δεδομένα με ιστροπικά σφάλματα.

$$\begin{aligned}\hat{x}_i &= x_i - \bar{x} \\ \hat{y}_i &= y_i - \bar{y}\end{aligned}\quad (\text{III.28})$$

και εν συνεχεία προσαρμογή της ευθείας  $a(x - \bar{x}) + b(y - \bar{y}) = 0$  με ελαχιστοποίηση της έκφρασης

$$E_{TLS-2D} = \sum_i (a\hat{x}_i + b\hat{y}_i)^2 \quad (\text{III.29})$$

### ΙΙΙ.6 Μη-γραμμικά ελάχιστα τετράγωνα

Σε πολλά προβλήματα όπως αυτό της Δομής από κίνηση η διαμόρφωση του προβλήματος των ελαχίστων τετραγώνων περιλαμβάνει συναρτήσεις που δεν είναι γραμμικές για την άγνωστη παράμετρο. Τότε το πρόβλημα ανάγεται σε μη-γραμμική παλινδρόμηση ή σε μη-γραμμικά ελάχιστα τετράγωνα. Η συνήθης προσέγγιση στην επίλυση των μη-γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων είναι η επαναληπτική γραμμικοποίηση γύρω από την τρέχουσα εκτίμηση της παραμέτρου με χρήση παραγώγων βαθμίδας (Ιακωβιανός πίνακας)  $\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{p}}$  και η εκτίμηση της σταδιακής βελτίωσης  $\Delta \mathbf{p}$ . Αυτό οδηγεί στην έκφραση:

$$E_{NLS}(\Delta \mathbf{p}) = \sum_i \|\mathbf{f}(\mathbf{x}_i; \mathbf{p} + \Delta \mathbf{p}) - \mathbf{x}'_i\|^2 \approx \sum_i \|\mathbf{J}(\mathbf{x}_i; \mathbf{p}) \Delta \mathbf{p} - \mathbf{r}_i\|^2 \quad (\text{III.30})$$

όπου οι Ιακωβιανοί πίνακες  $\mathbf{J}(\mathbf{x}_i; \mathbf{p})$  και τα υπόλοιπα  $\mathbf{r}_i$  παίζουν το ρόλο της μορφοποίησης των κανονικών εξισώσεων όπως και στην περίπτωση των γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων τα  $\mathbf{a}_i$  και  $\mathbf{b}_i$ . Καθώς η προσέγγιση αυτή ισχύει μόνο γύρω από ένα τοπικό ελάχιστο ή για πολύ μικρές τιμές του  $\Delta \mathbf{p}$ , η ενημέρωση  $\mathbf{p} \leftarrow \mathbf{p} + \Delta \mathbf{p}$  μπορεί να μην οδηγεί πάντοτε σε μείωση του σφάλματος. Ένας τρόπος για να αντιμετωπιστεί το εν λόγω πρόβλημα είναι να χρησιμοποιηθεί ακόμη μικρότερο βήμα

$$\mathbf{p} \leftarrow \mathbf{p} + \alpha \Delta \mathbf{p}, \quad 0 < \alpha \leq 1 \quad (\text{III.31})$$

Ένας απλός τρόπος για να καθοριστεί μια εύλογη τιμή για το  $\alpha$  είναι να ξεκινά με την τιμή 1 και να υποδιαιρείται σε κάθε βήμα.

Μια άλλη προσέγγιση για να εγγυηθεί η μείωση του σφάλματος είναι να προστεθεί ένας διαγώνιος όρος απόσβεσης στον κατάλληλο Hessian πίνακα

$$\mathbf{C} = \sum_i \mathbf{J}^T(\mathbf{x}_i) \mathbf{J}(\mathbf{x}_i) \quad (\text{III.32})$$

δηλαδή να λυθεί η σχέση  $[\mathbf{C} + \lambda \cdot \text{diag}(\mathbf{C})] \Delta \mathbf{p} = \mathbf{d}$ , με  $\mathbf{d} = \sum_i \mathbf{J}^T(\mathbf{x}_i) \mathbf{r}_i$ .

Εδώ η παράμετρος απόσβεσης  $\lambda$  αυξάνεται εάν το τετραγωνικό σφάλμα δε μειώνεται τόσο γρήγορα όσο αναμένεται από τη βασική σχέση  $E_{NLS}$  και μειώνεται εάν η αναμενόμενη μείωση του σφάλματος επιτυγχάνεται.



## Βιβλιογραφία

Szeliski, R. (2011). Computer vision – algorithms and applications. *Springer-Verlag London*. ISBN 978-1-84882-934-3.



*—Ο τομέας της απεικόνισης 3Δ εικόνων καθώς και οι εφαρμογές τους αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους τομείς στον κύκλο εργασιών που σχετίζονται με 3Δ εικόνες.*

# IV

## Απεικόνιση 3Δ εικόνων

### IV.1 Εισαγωγή

Ένας από τους σημαντικότερους τομείς τεχνολογιών 3Δ εικόνων είναι αυτός που αφορά στην απεικόνιση και αναπαραγωγή τους είτε σε ψηφιακή είτε σε φυσική 3Δ μορφή. Ο τομέας αυτός είναι που δίνει και πάλι ζωή στα ψηφιακά αντικείμενα και τα φέρνει σε επαφή με τον παρατηρητή, είτε για λόγους εκπαίδευσης, είτε για λόγους ψυχαγωγίας και διασκέδασης, είτε για λόγους δημιουργία προσωπικών εμπειριών. Αν όλες οι άλλες τεχνολογίες σχετίζονται με την είσοδο των δεδομένων και την επεξεργασία τους στον ψηφιακό κόσμο των υπολογιστών, οι τεχνολογίες που παρουσιάζονται στις ενότητες που ακολουθούν σχετίζονται με την έξοδό τους από τον ψηφιακό κόσμο και την παρουσία τους στον κόσμο των ανθρώπινων αισθήσεων και εμπειριών.

Ο τομέας της απεικόνισης 3Δ εικόνων καθώς και οι εφαρμογές τους αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους τομείς στον κύκλο εργασιών που σχετίζονται με 3Δ εικόνες. Περιλαμβάνει αλγορίθμους, μεθόδους και τεχνολογίες με σκοπό την επιτυχή παρουσίαση 3Δ εικόνων. Στις ενότητες που ακολουθούν γίνεται μια προσπάθεια συνοπτικής παρουσίασης των τεχνολογιών αυτών και γίνεται μια εισαγωγή στην εικονική πραγματικότητα που αποτελεί το κομβικό σημείο συνάντησης και συνδυασμού όλων των τεχνολογιών 3Δ εικόνων με στόχο την καλύτερη δυνατή προσομοίωση της πραγματικότητας.

Οι απεριόριστες δυνατότητες επεξεργασίας και ανάλυσης της ψηφιοποιημένης πληροφορίας, αλλά και η χαμηλού κόστους μαζική διάθεση και αναπαραγωγή της, αποτελούν, ίσως, τα πιο τρανταχτά επιχειρήματα για την υπεροχή της ψηφιακής καταγραφής έναντι κάθε μορφής αναλογικής καταγραφής. Σήμερα, η κυριαρχία της ψηφιακής καταγραφής είναι προφανής σε ένα ευρύ φάσμα

εφαρμογών, με την πιο πρόσφατη αυτή της ψηφιακής καταγραφής εικόνας, κινούμενης και μη, μέσω των ψηφιακών φωτογραφικών και κινηματογραφικών μηχανών. Η κυριαρχία της ψηφιακής καταγραφής έχει ήδη εξαπλωθεί κατά μια επιπλέον διάσταση, την τρίτη, προσφέροντας έτσι στον τελικό αποδέκτη μια πληρέστερη περιγραφή της καταγεγραμμένης πληροφορίας. Απαραίτητη προϋπόθεση σε αυτή την εξάπλωση της τεχνολογίας 3Δ εικόνων είναι η χρήση των κατάλληλων εργαλείων τόσο για την καταγραφή όσο και για την προβολή της πληροφορίας αυτής.

## IV.2 Τεχνικές λύσεις απεικόνισης 3Δ εικόνων

Το προϊόν που παράγεται είτε με μοντελοποίηση είτε με 3Δ ψηφιοποίηση είναι μια μαθηματική περιγραφή της γεωμετρίας του, η οποία μπορεί να συνοδεύεται από επιπλέον πληροφορίες, όπως είναι για παράδειγμα το χρώμα. Ο τεράστιος όγκος των δεδομένων της 3Δ ψηφιακής περιγραφής κάποιου αντικειμένου, για να καταστεί κατανοητή από τους περισσότερους, θα πρέπει να παρουσιαστεί με τρόπο, ο οποίος θα είναι ικανός να αποδώσει την πληροφορία όπως την αντιλαμβάνεται καλύτερα ο άνθρωπος. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος παρουσίασης της πληροφορίας αυτής, είναι μέσω της οπτικής αναπαράστασής της με χρήση διάφορων τεχνικών λύσεων απεικόνισης ψηφιακής πληροφορίας. Η συσκευή απεικόνισης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην οπτική απόδοση της πληροφορίας, αφού από αυτή θα εξαρτηθεί πώς θα αποδοθούν τα δεδομένα. Όσο πιο φωτορεαλιστική είναι η παρουσίαση των δεδομένων της 3Δ περιγραφής κάποιου θέματος, τόσο πιο εύκολα ο χρήστης θα αντιληφθεί την πληροφορία που εκφράζουν τα δεδομένα αυτά. Ωστόσο, εκτός από τον τεχνολογικό εξοπλισμό απεικόνισης, η φωτορεαλιστική οπτική απόδοση κάποιου 3Δ θέματος εξαρτάται και από το λογισμικό που θα χρησιμοποιηθεί. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η μετατροπή της πληροφορίας αυτής σε μια μορφή αναγνωρίσιμη από τον παρατηρητή. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω διαφόρων συσκευών εξόδου (πχ. υπολογιστή) που είναι προσανατολισμένες στην επικοινωνία ανθρώπου-υπολογιστή. Επίκεντρο των τεχνολογιών αυτών είναι η οθόνη του υπολογιστή, στην οποία μπορεί να γίνει προσωρινά η οπτική παρουσίαση της ψηφιακής πληροφορίας.

Η οπτική αναπαράσταση της αποθηκευμένης πληροφορίας έχει περάσει από πολλά στάδια εξέλιξης μέχρι να καταλήξει στην έγχρωμη οθόνη που είναι σήμερα γνωστή. Κατά τη δεκαετία του 1950 η απεικόνιση ήταν εφικτή μόνο μέσω ηλεκτρονικών λυχνιών ή εκτυπώσεων, ενώ η οπτική αναπαράσταση ψηφιακής πληροφορίας σε οθόνη διαδόθηκε κατά τη δεκαετία του 1970. Ωστόσο, το μόνο που ήταν σε θέση να απεικονίσουν οι οθόνες αλλά και οι υπολογιστές της δεκαετίας του 1970 ήταν μονόχρωμο κείμενο και γραφικά χαμηλής ανάλυσης. Σήμερα βέβαια, τόσο οι υπολογιστές όσο και οι οθόνες τους, είναι σε θέση να απεικονίσουν από απλό μονόχρωμο κείμενο μέχρι και έγχρωμα γραφικά

πολύ υψηλής ευκρίνειας και για το λόγο αυτό η χρήση τους έχει επεκταθεί σε εφαρμογές πολύ πιο πέρα από τη συγγραφή κειμένων και την εμπορική διαχείριση.

Η πιο κοινή συσκευή απεικόνισης ψηφιακών δεδομένων με μακρά ιστορία στην τεχνολογία υπολογιστών αλλά και τηλεοράσεων ήταν η οθόνη καθοδικού σωλήνα, ωστόσο η σύγχρονη τεχνολογία έχει να επιδείξει μια ευρεία γκάμα προϊόντων ηλεκτρονικής παρουσίασης ψηφιακής πληροφορίας, η οποία έχει ως στόχο την κάλυψη των ιδιαίτερων απαιτήσεων της κάθε εφαρμογής. Τεχνολογίες όπως αυτή των υγρών κρυστάλλων (LCD) αλλά και των προβολικών συστημάτων τεχνολογίας ψηφιακής επεξεργασίας φωτός (Digital Light Processor (DLP)) παίζουν πρωταγωνιστικό ρόλο στις σύγχρονες συσκευές απεικόνισης, ενώ η τεχνολογία του καθοδικού σωλήνα, που χρησιμοποιήθηκε έντονα για περίπου 70 χρόνια, αποσύρεται οριστικά. Πριν εξετάσουμε την κάθε τεχνολογία απεικόνισης ξεχωριστά, θα ήταν σκόπιμο να παρουσιάσουμε κάποια γενικά στοιχεία που είναι κοινά σε όλες της συσκευές απεικόνισης μέσω υπολογιστή:

- Το **μέγεθος** της οθόνης, εκφράζεται συνήθως σε ίντσες και αντιπροσωπεύει το μήκος της διαγωνίου του πλαισίου απεικόνισης. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η τιμή τόσο μεγαλύτερη είναι και η εικόνα που παρουσιάζεται στην οθόνη. Φυσικά, όσο αυξάνεται το μέγεθος της απεικόνισης τόσο αυξάνεται και η απόσταση από την οποία μπορεί να γίνει αντιληπτή η προβολόμενη πληροφορία αλλά και το πλήθος των ατόμων στο οποίο είναι δυνατό να παρουσιαστεί.
- Ο **λόγος των πλευρών** μιας οθόνης, εκφράζεται με το λόγο δύο αριθμών  $X : Y$  και αφορά στην αναλογία μήκους μεταξύ της οριζόντιας και κατακόρυφης διάστασης της οθόνης. Οι πιο κοινές αναλογίες είναι αυτές των 4:3, 16:10 και 16:9. Σύμφωνα με έρευνες, το οπτικό πεδίο του ανθρώπου, το οποίο είναι διευρυμένο κατά την οριζόντια διάσταση, προσεγγίζεται καλύτερα από οθόνες με αναλογία 16:9 και για το λόγο αυτό οι περισσότερες σύγχρονες οθόνες είναι κατασκευασμένες στην αναλογία αυτή.
- Η **ανάλυση** της οθόνης, εκφράζει την πυκνότητα των εικονοστοιχείων της οθόνης που πρακτικά εκφράζεται ως το πλήθος των εικονοστοιχείων οθόνης σε μια ίντσα οριζόντιας ή κάθετης κατεύθυνσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η ανάλυση μιας οθόνης τόσο ευκρινέστερη και «ξεκούραστη» είναι η εικόνα που προβάλλει στο ανθρώπινο μάτι. Τυπικές τιμές αναλύσεων που απαντώνται σε εμπορικά συστήματα είναι τα 72 dpi (αναφέρονται και ως ppi) ή τα 96 dpi, ενώ σε σύγχρονες οθόνες επιτυγχάνονται αναλύσεις άνω των 300 dpi. Με απλούς υπολογισμούς, η εύρεση της ανάλυσης μιας οθόνης εκφράζεται τελικά ως εξής:

$$R = \frac{W}{d} \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda_h}{\lambda_w} \right)^2} \quad (\text{IV.1})$$

όπου  $R$  η ανάλυση,  $W$  η μέγιστη οριζόντια ανάλυση οθόνης σε pixel,  $d$  η διαγώνιος της οθόνης σε ίντσες,  $\lambda_h$  η κάθετη συνιστώσα της αναλογίας διαστάσεων της οθόνης,  $\lambda_w$  η οριζόντια συνιστώσα της αναλογίας διαστάσεων της οθόνης. Έτσι, για παράδειγμα, σε μια οθόνη 24 ιντσών με μέγιστη ανάλυση  $1600 \times 1200$  pixel και αναλογία 16:10, η ανάλυση σε dpi (ή ppi) υπολογίζεται ως:

$$R = \frac{1600}{24} \sqrt{1 + \left(\frac{10}{16}\right)^2} = 78.617 \quad (\text{IV.2})$$

- Το **βάθος χρώματος**, το οποίο εκφράζεται σε brr και αφορά στο μέγιστο πλήθος χρωμάτων που μπορεί να απεικονίσει η συσκευή. Τα χρώματα που είναι εφικτό να αποδοθούν από μια συσκευή απεικόνισης, είναι ο αριθμός 2 υψωμένος στη δύναμη των brr που χαρακτηρίζουν τη συσκευή αυτή. Έτσι όταν στα τεχνικά χαρακτηριστικά μιας συσκευής απεικόνισης αναφέρεται πως αυτή είναι ικανή να αποδώσει βάθος χρώματος 24 brr, εννοείται πως είναι εφικτό να αποδοθούν  $2^{24}=16.777.216$  διαφορετικά χρώματα. Παρόλο που ο άνθρωπος δεν είναι σε θέση να ξεχωρίσει ούτε το ένα δέκατο από αυτά όταν παρουσιάζονται ταυτόχρονα στην ίδια εικόνα, τα 24 brr αποτελούν τη βάση στις σύγχρονες έγχρωμες συσκευές απεικόνισης.
- Η **φωτεινότητα** μιας οθόνης που μετράται σε lumens ή σε  $\text{cd/m}^2$  και εκφράζει τη μέγιστη ένταση φωτός που εκλύεται από τη συσκευή απεικόνισης ή τη μέγιστη φωτεινή ροή ανά μονάδα επιφάνειας.
- Η **αντίθεση** της οθόνης, εκφράζεται ως λόγος  $X : 1$  και αφορά στη διαφορά στη φωτεινότητα μεταξύ του πιο φωτεινού και του πιο σκοτεινού pixel που η οθόνη απεικονίζει. Όσο πιο μεγάλο είναι το  $X$  τόσο πιο μεγάλη είναι η αντίθεση της οθόνης και κατά συνέπεια τόσο πιο «ζωηρά» εμφανίζονται τα χρώματα και οι διαβαθμίσεις της φωτεινότητας.
- Η **συχνότητα ανανέωσης** της οθόνης, εκφράζεται σε Hz και αντιστοιχεί στο πλήθος των ανανεώσεων της απεικόνισης στην οθόνη σε ένα δευτερόλεπτο. Τιμές από 75 Hz και πάνω είναι οι πλέον αποδεκτές, κυρίως για λόγους εργονομίας, αφού η συχνότητα αυτή αποτελεί ένα κατώφλι κάτω από το οποίο είναι πιθανό πολλοί άνθρωποι να αντιλαμβάνονται την ανανέωση της οθόνης ως ένα ενοχλητικό «τρεμούλιασμα» (flickering) στην εικόνα.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι κοινά για όλες τις οθόνες απεικόνισης και για το λόγο αυτό δε γίνεται αναφορά σε αυτά ξεχωριστά. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικότερες τεχνολογίες απεικόνισης που είναι εμπορικά διαθέσιμες σήμερα και δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη δυνατότητά τους

Πίνακας IV.1. Σύγκριση μεταξύ εμπορικά διαθέσιμων τεχνολογιών προβολής.

Σημείο σύγκρισης	CRT	LCD/Plasma	DMD (DLP)
<b>Κόστος</b>	μεγάλο	μέτριο	μέτριο - μεγάλο
<b>Φωτεινότητα απεικόνισης (ANSI)</b>	100 - 1500	800 - 4000	1000 - 6000
<b>Αντίθεση X:1</b>	100 – 30.000	250 - 2000	700 – 2000
<b>Απόδοση χρωμάτων</b>	πολύ καλή	μέτρια	καλή
<b>Ανάλυση εικόνας</b>	μεγάλη (3200x2560)	μέτρια έως πολύ μεγάλη (1024x768 – 5K)	μέτρια έως μεγάλη (1024x768 – 1920x1080)
<b>Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας</b>	πολύ μεγάλη (από 600 watt τυπική ελάχιστη τιμή)	μεγάλη (200 watt τυπική ελάχιστη τιμή)	μεγάλη (από 200 watt τυπική ελάχιστη τιμή)
<b>Χρόνος καλής λειτουργίας της πηγής φωτός</b>	πολύ μεγάλος (8000 -10000 ώρες)	μέτριος (1500 -3000 ώρες)	μέτριος (1500 -3000 ώρες)
<b>Κόστος αντικατάστασης φωτεινής πηγής</b>	μεγάλο (700 – 3500 €)	μέτριο (300 – 1500 €)	μέτριο (300 – 1500 €)
<b>Δυσκολία εγκατάστασης</b>	μεγάλη	μικρή	μικρή
<b>Ευκολία μεταφοράς</b>	μικρή	μεγάλη	μεγάλη
<b>Ρυθμός ανανέωσης της εικόνας</b>	πολύ μεγάλος-ιδανικός για στερεοσκοπική απεικόνιση με χρήση γυαλιών ηλεκτρονικού διαφράγματος	μέτριος-δεν ικανοποιεί για στερεοσκοπική απεικόνιση με χρήση γυαλιών ηλεκτρονικού διαφράγματος	μέτριος-μεγάλος-ικανοποιεί για στερεοσκοπική απεικόνιση με χρήση γυαλιών ηλεκτρονικού διαφράγματος σε ειδικά μοντέλα

για την παρουσίαση 3Δ θεμάτων. Στην παρουσίαση περιλαμβάνονται οι παλιότερες οθόνες καθοδικών ακτίνων, οι νεότερες οθόνες υγρών κρυστάλλων και οι βασικές εξελίξεις τους, οι οθόνες διόδων εκπομπής φωτός και τα προβολικά συστήματα. Ο Πίνακας IV.1 εμφανίζει τα συγκριτικά χαρακτηριστικά των διαθέσιμων τεχνολογιών προβολής που παρουσιάζονται στη συνέχεια.

## IV.2.1 Οθόνες σωλήνα καθοδικών ακτίνων

Η τεχνολογία οθονών καθοδικού σωλήνα ή CRT ανακαλύφθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1920 από τον Karl Ferdinand Braun και ήταν μια παραλλαγή του σωλήνα ακτίνων X του Crooke (Tannas, 1985). Οι σημερινές οθόνες CRT βασίζονται στην ίδια αρχή λειτουργίας με αυτές της δεκαετίας του 1920, ενώ η πολύχρονη εξέλιξή τους τις είχε καταστήσει για πολλές δεκαετίες ως μια από τις πιο διαδεδομένες και συμφέρουσες λύσης ηλεκτρονικής απεικόνισης, καθώς το εύρος των εφαρμογών που έκαναν χρήση της τεχνολογίας αυτής κάλυπτε τόσο τις οικιακές όσο και τις επαγγελματικές ανάγκες.

Η εικόνα στις οθόνες CRT σχηματίζεται όταν μια δέσμη ηλεκτρονίων, η λεγόμενη ακτίνα καθόδου, εστιάζεται και κατευθύνεται από ηλεκτρομαγνήτες

σε μια μεγάλη γυάλινη επιφάνεια επιστρωμένη με φώσφορο, την οθόνη, όπου βρίσκεται η άνοδος. Τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται και πέφτουν πάνω στα μόρια του φωσφόρου με πολύ μεγάλη ταχύτητα, αναγκάζοντάς τα έτσι να εκπέμψουν φως. Αυτό συμβαίνει πάρα πολλές φορές το δευτερόλεπτο με την ακτίνα να σαρώνει όλη την επιφάνεια της οθόνης από αριστερά προς τα δεξιά και από πάνω προς τα κάτω. Αναλόγως με αυτό που πρέπει να απεικονιστεί, η δέσμη ηλεκτρονίων, καθώς σαρώνει την επιφάνεια της οθόνης, αλλάζει ένταση με αποτέλεσμα, κάπου να εκλύεται λιγότερο και κάπου αλλού περισσότερο φως, σχηματίζοντας έτσι την εικόνα.

Στα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας αναφέρονται:

- Παρουσιάζουν καλή χρωματική απόδοση και για το λόγο αυτό αποτέλεσαν για πολλά χρόνια απαραίτητο εργαλείο σε εφαρμογές γραφικών.
- Επιδεικνύουν γρήγορους ρυθμούς ανανέωσης της εικόνας, υποστηρίζοντας έτσι ικανοποιητικά εφαρμογές κινούμενης εικόνας, πχ. για τα ηλεκτρονικά παιχνίδια και την επεξεργασία βίντεο. Λόγω αυτής της ιδιότητάς τους, είναι εφικτή η έγχρωμη στερεοσκοπική, πραγματικά 3Δ, απεικόνιση με χρήση γυαλιών ηλεκτρονικού διαφράγματος (shutter glasses), στα οποία θα γίνει αναφορά σε επόμενη παράγραφο.
- Έχουν μεγάλη γωνία θέασης που αγγίζει τις 89 μοίρες από την κάθετο στο κέντρο του επίπεδου της οθόνης, χωρίς να εμφανίζονται αλλοιώσεις στα χρώματα ή στη φωτεινότητα της απεικόνισης.

Αντίστοιχα, στα μειονεκτήματα της τεχνολογίας αυτής περιλαμβάνονται:

- Όσο αυξάνεται το μέγεθος της οθόνης τόσο αυξάνεται ο όγκος και το βάρος τους.
- Καταναλώνουν αρκετή ηλεκτρική ενέργεια κατά τη λειτουργία τους. Για παράδειγμα μια οθόνη 19 ιντσών καταναλώνει περί τα 160 Watt ηλεκτρικής ενέργειας. Η κατανάλωση είναι και αυτή ανάλογη με το μέγεθός τους. Η μεγαλύτερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας συνεπάγεται και σε μεγαλύτερη έκκληση θερμότητας.
- Η κατασκευή αλλά και η απόσυρσή τους επιβαρύνουν το περιβάλλον πολύ περισσότερο από άλλες τεχνολογίες απεικόνισης, λόγω της μεγάλης ποσότητας μόλυβδου που περιέχουν στον κρύσταλλο της οθόνης.
- Παρουσιάζουν αυξημένη εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.
- Παρουσιάζουν γεωμετρικές παραμορφώσεις στην απεικόνιση, ιδιαίτερα στα άκρα της οθόνης, η διόρθωση των οποίων απαιτεί περαιτέρω ηλεκτρονικό εξοπλισμό που αυξάνει το κόστος.



- Παρουσιάζουν χαμηλή ευκρίνεια απεικόνισης, κυρίως οι κακής ποιότητας οθόνες, λόγω της αδυναμίας σωστής εστίασης της ακτίνας ηλεκτρονίων.
- Το ωφέλιμο μέγεθος της απεικόνισης είναι αρκετά μικρότερο από το μέγεθος της οθόνης που ανακοινώνει ο κατασκευαστής. Για παράδειγμα μια οθόνη CRT των 17 ιντσών έχει ωφέλιμη περιοχή απεικόνισης λίγο μεγαλύτερη από 15 ίντσες.
- Είναι ευπαθείς και παρουσιάζουν σχετικά μικρή διάρκεια ζωής, ενώ συνήθως οι κατασκευαστές εγγυώνται περί τις 20.000 ώρες καλής λειτουργίας.

## IV.2.2 Οθόνες υγρών κρυστάλλων LCD

Οι οθόνες υγρών κρυστάλλων βασίζονται στην ανακάλυψη του υγρού κρυστάλλου που έκανε το 1888 ο αυστριακός βοτανολόγος Friedrich Reinitzer. Ωστόσο η πρώτη πειραματική συσκευή ηλεκτρονικής απεικόνισης με τη βοήθεια υγρών κρυστάλλων έγινε από την εταιρεία RCA το 1968 και από τότε μέχρι σήμερα η ραγδαία τεχνολογική εξέλιξη έχει καταστήσει τις οθόνες υγρών κρυστάλλων την κεντρική τεχνολογία απεικόνισης (Chen, 2011).

Το βασικό δομικό στοιχείο μιας οθόνης υγρών κρυστάλλων είναι ο υγρός κρύσταλλος. Όσο και αν ακούγεται οξύμωρο, αφού ένας κρύσταλλος ποτέ δε θα μπορούσε να χαρακτηριστεί υγρός, υπάρχουν κάποια υλικά στη φύση τα οποία βρίσκονται σε μια ενδιάμεση κατάσταση, δηλαδή δεν μπορούν να θεωρηθούν ούτε υγρά αλλά ούτε στερεά. Από τη μια τα μόριά τους μπορούν να κινηθούν ελεύθερα όπως τα υγρά, ενώ από την άλλη ο προσανατολισμός τους παραμένει ο ίδιος, όπως τα στερεά. Λόγω της μοριακής τους δομής, οι υγροί κρύσταλλοι έχουν την ιδιότητα να αλλάζουν την πόλωση του φωτός που περνά από μέσα τους, ανάλογα με το ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται σε αυτούς. Συνεπώς, εσωκλείοντας ένα στρώμα υγρών κρυστάλλων μεταξύ δύο φίλτρων οριζόντιας/κάθετης πόλωσης του φωτός, είναι εφικτό να ελεγχθεί η ποσότητα του φωτός που θα περάσει τη διάταξη αυτή, ανάλογα με το ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται στο στρώμα των υγρών κρυστάλλων. Μια οθόνη υγρών κρυστάλλων δεν είναι τίποτα περισσότερο από ένα τέτοιο «σάντουιτς» πολωτικών φίλτρων και υγρών κρυστάλλων.

Επειδή όμως οι υγροί κρύσταλλοι δεν εκπέμπουν φως, οι οθόνες υγρών κρυστάλλων χρησιμοποιούν εξωτερική πηγή φωτός, η οποία στην περίπτωση των οθονών υγρών κρυστάλλων που χρησιμοποιούνται στους υπολογιστές, είναι μια μικρή λάμπα φθορίου πίσω από τα στρώματα φίλτρων και κρυστάλλων (γι' αυτό και ονομάζεται οπίσθιος φωτισμός), η οποία συνοδεύεται από μια επιφάνεια διάχυσης του φωτός για την ισοκατανομή της φωτεινότητας σε όλη την επιφάνεια της οθόνης. Η εικόνα σχηματίζεται ανάλογα με το ηλεκτρικό φορτίο που αναπτύσσεται στους υγρούς κρυστάλλους από ένα πλέγμα μικροσκοπικών



**Εικόνα IV.1.** Τμήμα εικόνας σε οθόνη IPS LCD, macro φωτογραφία του τμήματος και μεγέθυνση σε ένα σημείο της φωτογραφίας.

ηλεκτροδίων που έχουν στόχο την πόλωση των κρυστάλλων για τον περιορισμό ή αποκλεισμό του οπίσθιου φωτισμού. Στις οθόνες LCD, ουσιαστικά, οι κρύσταλλοι λειτουργούν ως περσίδες που περιστρέφονται, με ηλεκτρικό έλεγχο, για να περιορίσουν το φως να περάσει από την επιφάνειά τους και να φτάσει στον παρατηρητή.

Σήμερα, υπάρχουν δύο κύριοι τύποι LCD, η τεχνολογία Thin Film Transistor (TFT) και η τεχνολογία In-Plane Switching (IPS). Η τεχνολογία TFT, είναι ουσιαστικά μια προηγμένη τεχνολογία LCD που χρησιμοποιεί ένα ενεργό πλέγμα στο οποίο κάθε εικονοστοιχείο αντιστοιχίζεται αυτόνομα με ένα τρανζίστορ και έναν πυκνωτή. Το πλεονέκτημα της τεχνολογίας TFT είναι ότι παρέχει μεγάλο λόγο αντίθεσης και χαμηλό κόστος παραγωγής. Ωστόσο, δε βελτιώνει σημαντικά τις γωνίες θέασης ούτε την αποδοτική απεικόνιση χρωμάτων. Η τεχνολογία IPS αποτελεί μια περαιτέρω βελτίωση της τεχνολογίας LCD. Στην προσέγγιση αυτή αλλάζει ο τρόπος με τον οποίο οι κρύσταλλοι διεγείρονται και είναι διαφορετικός ο προσανατολισμός της κρυσταλλικής συστοιχίας. Αυτή η αλλαγή προσανατολισμού βελτιώνει τις γωνίες θέασης, την αναλογία αντίθεσης και την αναπαραγωγή χρωμάτων. Η κατανάλωση ενέργειας μειώνεται επίσης σε σύγκριση με τις οθόνες TFT. Στην Εικόνα IV.1 παρουσιάζεται παράδειγμα απεικόνισης σε οθόνη τύπου IPS, όπως ελήφθη από οθόνη τύπου Retina<sup>1</sup>. Στο παράδειγμα αυτό, η εικόνα αριστερά είναι τμήμα από την ιστοσελίδα της Wikipedia για το λήμμα “LED display”, στη μέση παρουσιάζεται φωτογραφία της οθόνης που απεικόνιζε την εν λόγω σελίδα από πολύ κοντά (φωτογραφία macro), ενώ στα δεξιά φαίνεται μεγεθυμένο ένα τμήμα της φωτογραφίας της οθόνης.

Στα πλεονεκτήματα της εν λόγω τεχνολογίας περιλαμβάνονται:

- Έχουν μικρή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και κατά συνέπεια λιγότερη έκλυση θερμότητας στο περιβάλλον. Μια οθόνη TFT των 15 ιντσών καταναλώνει περί τα 35 Watt ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ η κατανάλωση

<sup>1</sup>Η τεχνολογία Retina (αμφιβληστροειδής) είναι απλά μια ονομασία που χρησιμοποιεί η εταιρεία Apple για τις οθόνες IPS που χρησιμοποιεί σε συσκευές της και οι οποίες έχουν δυνατότητα ανάλυσης μεγαλύτερης από 300 ppi. Η ανάλυση αυτή είναι χαρακτηριστική για το ανθρώπινο μάτι, καθώς έως τα 300 ppi το μάτι μπορεί να διαχωρίζει εικονοστοιχεία.

μιας αντίστοιχης CRT κυμαίνεται γύρω στα 90 Watt.

- Εκπέμπουν λίγη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.
- Έχουν μικρό βάρος και πολύ μικρό όγκο. Χαρακτηρίζονται κυρίως από το πολύ μικρό τους πάχος, που σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να συγκριθεί με αυτό ενός κάδρου.
- Δεν παρατηρείται «τρέμουλο» στην εικόνα τους, αφού αυτή δε σχηματίζεται από μια ακτίνα που σαρώνει την επιφάνεια της οθόνης πολλές φορές το δευτερόλεπτο. Αντιθέτως η εικόνα που σχηματίζεται παραμένει ως έχει μέχρι αυτή να ανανεωθεί με κάποια καινούργια.
- Δεν εισάγουν γεωμετρικές παραμορφώσεις στην εικόνα. Η ευθεία γραμμή απεικονίζεται ως ευθεία γραμμή. Η ιδιότητα αυτή επέτρεψε την κατασκευή οθονών 3Δ στερεοσκοπικής απεικόνισης, οι οποίες επιτρέπουν σε έναν ή και περισσότερους θεατές να αντιληφθούν πραγματικό βάθος, χωρίς τη χρήση ειδικών γυαλιών ή άλλων συσκευών.
- Η ωφέλιμη περιοχή απεικόνισης είναι ίση με το μέγεθος της οθόνης. Για παράδειγμα σε μια TFT οθόνη 17 ιντσών το μέγεθος απεικόνισης είναι ίσο με 17 ίντσες.
- Κατασκευάζονται από οργανικά υλικά περισσότερο φιλικά προς το περιβάλλον.
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Οι κατασκευαστές εγγυώνται χιλιάδες ώρες καλής λειτουργίας. Η διάρκεια ζωής των οθονών υγρών κρυστάλλων καθορίζεται από τη διάρκεια ζωής του λαμπτήρα φθορισμού που παρέχει το απαιτούμενο φως για την ανάγνωση τους.

Στα μειονεκτήματα της τεχνολογίας μπορούν να αναφερθούν:

- Είναι εύθραυστες και ευαίσθητες σε κοινά καθαριστικά επιφανειών, με τα οποία πολλοί συνήθιζαν να καθαρίζουν τις οθόνες τύπου CRT.
- Υποστηρίζουν ουσιαστικά μόνο μια ανάλυση απεικόνισης. Για να αποδοθεί σωστά η απεικόνιση μεγαλύτερης ή μικρότερης ανάλυσης, εφαρμόζεται ανάλογα μεγέθυνση ή σμίκρυνση εικόνας, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται αρνητικά η ευκρίνεια της απεικόνισης.
- Έχουν περιορισμένο εύρος γωνιών θέασης. Αν και οι περισσότερες σύγχρονες οθόνες τύπου TFT έχουν βελτιωθεί αρκετά σε αυτό τον τομέα, παρόλα αυτά, δεν είναι λίγες αυτές που η παρακολούθησή τους υπό μεγάλη γωνία σε σχέση με την κάθετο στην οθόνη παρουσιάζει προβλήματα, όπως αλλοιώσεις τόσο στα χρώματα, όσο και στη φωτεινότητα της απεικόνισης.

- Εμφανίζουν κακή χρωματική απόδοση και μικρή αντίθεση, ειδικά οθόνες χαμηλού κόστους. Η μεγαλύτερη ανάπτυξη της τεχνολογίας των οθονών αυτού του τύπου επικεντρώνεται σε αυτό ακριβώς το πρόβλημα.
- Έχουν μεγάλο χρόνο απόκρισης ή μικρό ρυθμό ανανέωσης της εικόνας, δηλαδή, ο χρόνος που απαιτείται μέχρι να αλλάξει χρώμα ή φωτεινότητα ένα εικονοστοιχείο της οθόνης είναι μεγάλος, με αποτέλεσμα σε εφαρμογές που υπάρχει έντονη κίνηση να παρουσιάζονται είδωλα και άλλες παρενέργειες. Στις σύγχρονες οθόνες υγρών κρυστάλλων, ωστόσο, τέτοια φαινόμενα δεν είναι πλέον τόσο συχνά, αφού είναι αρκετά γρήγορης απόκρισης (κάτω από τα 10 χιλιοστά του δευτερολέπτου) και έτσι η χρήση τους για εφαρμογές με έντονη κίνηση δεν παρουσιάζει κανένα πρόβλημα. Παρόλα αυτά όμως, η στερεοσκοπική έγχρωμη απεικόνιση σε μια απλή (2Δ) οθόνη υγρών κρυστάλλων, χρησιμοποιώντας ειδικά γυαλιά ηλεκτρονικού διαφράγματος, είναι δύσκολη.

### Οθόνες LCD οπίσθιου φωτισμού LED

Μια οθόνη οπίσθιου φωτισμού LED<sup>2</sup> είναι μια επίπεδη οθόνη τύπου LCD που χρησιμοποιεί μια διάταξη από διόδους εκπομπής φωτός για την παραγωγή του οπίσθιου φωτισμού. Υπάρχει μεγάλη παρανόηση στη χρήση της ονοματολογίας, καθώς, πολλές φορές οθόνες αυτού του τύπου εμφανίζονται ως «οθόνες LED» ενώ στην πραγματικότητα πρόκειται για οθόνες LCD οπίσθιου φωτισμού LED. Πρόκειται όμως μια τεχνολογία οθονών LCD, στην οποία έχει αντικατασταθεί η λάμπα φθορισμού του οπίσθιου φωτισμού με συστοιχία από διόδους εκπομπής φωτός.

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης LED για τον οπίσθιο φωτισμό έναντι παραδοσιακών προσεγγίσεων περιλαμβάνουν:

- Μεγαλύτερη χρωματική γκάμα.
- Ιδιαίτερα λεπτή κατασκευή.
- Σημαντικά ελαφρύτερη κατασκευή και πολύ χαμηλότερης θερμοκρασίας λειτουργίας.
- Τυπικά 20-30% χαμηλότερη κατανάλωση και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.
- Μεγαλύτερη αξιοπιστία.

<sup>2</sup> Αν και έχει επικρατήσει η χρήση του όρου LED και στην ελληνική γλώσσα, πρέπει να τονιστεί ότι πρόκειται για αρκτικόλεξο που προέρχεται από τις λέξεις της αγγλικής γλώσσας Light Emitting Diode. Ένα (ή μία) LED είναι, δηλαδή, μια δίοδος εκπομπής φωτός.

### Οθόνες LCD οπίσθιου φωτισμού κβαντικών κουκίδων

Οι κβαντικές κουκίδες (quantum dots) είναι φθορίζοντα μικροσκοπικά σωματίδια ημιαγωγών στην κλίμακα των νανόμετρων (νανοσωμάτια), τα οποία έχουν οπτικές και ηλεκτρονικές ιδιότητες που διαφέρουν από άλλα σχετικά ημιαγωγικά στοιχεία, όπως οι δίοδοι εκπομπής φωτός (LED). Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των κβαντικών κουκίδων που τις καθιστά ένα πολύ ενδιαφέρον θέμα στη σύγχρονη νανοτεχνολογία είναι το ότι μεταβάλλοντας το σχήμα, το υλικό και το μέγεθος των κουκίδων μπορεί να ρυθμιστεί με μεγάλη ακρίβεια η συχνότητα του φωτός (χρώμα) που εκπέμπεται όταν οι κουκίδες διεγείρονται. Μεγάλες κβαντικές κουκίδες της τάξης των 5 nm (σε συνάρτηση φυσικά και με τη δομή τους) παράγουν φως με μεγάλο μήκος κύματος που αντιστοιχεί σε χρώματα όπως το κόκκινο, ενώ μικρότερες κβαντικές κουκίδες εκπέμπουν μικρότερου μήκους κύματος φως που αντιστοιχεί σε χρώματα όπως το μπλε. Ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον στοιχείο στην εν λόγω νανοτεχνολογία είναι ότι για την παρασκευή κβαντικών κουκίδων μπορούν να χρησιμοποιηθούν γενετικά τροποποιημένοι βακτηριοφάγοι ιοί M13, οι οποίοι επιτρέπουν την παρασκευή βιοσυσσωματικών κβαντικών δομών (Lee et al., 2002). Σημειώνεται ότι η εν λόγω προσέγγιση δεν είναι μοναδική στην τεχνολογία αυτή καθώς έχει δοκιμαστεί κοντά δύο δεκαετίες τώρα στη διαμόρφωση κρυσταλλικών δομών από ιούς (βλπ. για παράδειγμα Whaley et al. (2000)). Το μικρό μέγεθος των κβαντικών κουκίδων και η μονοχρωματική τους απόκριση επιτρέπει την εκμετάλλευσή τους σε εφαρμογές λείζερ και στις έγχρωμες οθόνες, αλλά ακόμη και σε φωτοβολταϊκά συστήματα και τη βιοαπεικόνιση.

Υπάρχουν δύο τύπων κβαντικές κουκίδες, οι κουκίδες φωταύγειας και οι κουκίδες ηλεκτροφωταύγειας. Η πρώτη περίπτωση αφορά τις κουκίδες που διεγείρονται από φως, το οποίο τελικά το μετράτρεπουν σε φως άλλου μήκους κύματος σύμφωνα με τη μορφολογία και δομή τους. Η δεύτερη περίπτωση αφορά τις κουκίδες που διεγείρονται από ηλεκτρικό ρεύμα και λειτουργούν παρόμοια με τις διόδους εκπομπής φωτός.

*Μια οθόνη κβαντικών κουκίδων φωταύγειας είναι μια συσκευή που χρησιμοποιεί στρώμα κβαντικών κουκίδων για την παραγωγή οπίσθιου φωτισμού σε οθόνες LCD. Οι κβαντικές κουκίδες χρησιμοποιούνται σε ένα στρώμα που μετατρέπει τον οπίσθιο φωτισμό με τέτοιο τρόπο ώστε να παράγονται καθαρά βασικά χρώματα, βελτιώνοντας τη φωτεινότητα της οθόνης και τη χρωματική γκάμα, μειώνοντας, παράλληλα, τις απώλειες φωτός και την παρεμβολή χρωμάτων σε έγχρωμα φίλτρα τύπου RGB. Τονίζεται για μία ακόμη φορά για την αποφυγή παρανοήσεων ότι πρόκειται για τεχνολογία οπίσθιου φωτισμού και, ενώ στο εμπόριο εμφανίζονται τίτλοι όπως «οθόνη QD-LED» ή «οθόνη QLED», εξακολουθεί να υφίσταται ένα στρώμα υγρού κρυστάλλου για την τελική δημιουργία της εικόνας που προβάλλεται. Σωστότερος όρος για την περιγραφή της τεχνολογίας αυτής θα ήταν «οθόνες υγρών κρυστάλλων οπίσθιου φωτισμού κβαντικών κουκίδων» (quantum dot-backlit LCD display). Σημειώνεται ότι υπάρ-*

χουν προσπάθειες για την εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής σε οθόνες χωρίς υγρούς κρυστάλλους αλλά οι προσπάθειες αυτές είναι ακόμη στο επίπεδο του εργαστηρίου.

Πλεονεκτήματα της τεχνολογίας αυτής είναι τα εξής:

- Ενισχυμένο το ορατό φάσμα με λιγότερη ενέργεια.
- Ενισχυμένη φωτεινότητα.
- Δυνατότητα δημιουργίας με τεχνικές 3Δ εκτύπωσης και δημιουργίας λεπτών και εύκαμπτων οθονών.
- Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής με την μετάβαση της τεχνολογίας σε στοιχεία ανόργανης σύστασης.
- Καλύτερος κορεσμός χρώματος ιδιαίτερα στην περιοχή του πράσινου χρώματος.

Βασικό μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι οι μπλε κβαντικές κουκίδες απαιτούν ιδιαίτερα ακριβή συγχρονισμό καθώς είναι πολύ μικρό το μέγεθός τους, ενώ παράλληλα, εξαιτίας αυτού οι οθόνες με κβαντικές κουκίδες είναι λιγότερο ακριβείς και αποτελεσματικές στην απόδοση του μπλε χρώματος. Άλλο ένα σημαντικό μειονέκτημά τους είναι η πολύ ακριβή παραγωγή τους (κατά τις αρχές του 2019, τουλάχιστον 2.000 δολάρια το γραμμάριο), αλλά αυτό είναι κάτι που προβλέπεται να λυθεί το επόμενο διάστημα.

### IV.2.3 Οθόνες πλάσματος

Η ηλεκτρονική απεικόνιση τεχνολογίας πλάσματος ήταν μια εφεύρεση του πανεπιστημίου του Illinois της Αμερικής το 1964. Η βασική ιδέα ήταν η κατασκευή μιας συσκευής απεικόνισης, η οποία θα αποτελούνταν από έναν πίνακα πολύ μικρών λαμπτήρων Νέον, έναν για κάθε εικονοστοιχείο. Το 1967 κατασκευάστηκε στο εργαστήριο η πρώτη χρηστική συσκευή απεικόνισης με ανάλυση  $16 \times 16$  εικονοστοιχεία και χρώματος πορτοκαλί (Hainich and Bimber, 2011; Lee et al., 2008). Από τότε μέχρι σήμερα, η εξέλιξη έχει καταστήσει την τεχνολογία πλάσματος ικανή τόσο για την απεικόνιση εικόνων υψηλής ευκρίνειας, όσο και για τη ρεαλιστική απόδοση των χρωμάτων, ενώ την ίδια στιγμή θεωρείται μια καλή λύση για την κατασκευή επίπεδων και λεπτών οθονών μεγάλου μεγέθους. Η εικόνα στις οθόνες πλάσματος σχηματίζεται από χιλιάδες μικροσκοπικούς λαμπτήρες φθορισμού, οι οποίοι σε διατεταγμένες τριάδες διαφορετικού χρώματος ορίζουν ένα εικονοστοιχείο. Κάθε ένας από τους λαμπτήρες αυτούς είναι ένας γυάλινος θάλαμος, του οποίου οι πέντε από τις έξι πλευρές είναι επιστρωμένες με φώσφορο χρώματος κόκκινου, πράσινου ή μπλε, ενώ η έκτη πλευρά είναι διάφανη με προσανατολισμό προς την ορατή επιφάνεια της οθόνης. Οι θάλαμοι αυτοί περιέχουν ένα μείγμα ευγενών αερίων

(Νέον και Ξένο) υπό χαμηλή πίεση. Όταν διοχετευτεί σε αυτούς τους θαλάμους ηλεκτρική ενέργεια υπό υψηλή τάση, τότε τα ευγενή αέρια διεγείρονται και εκπέμπουν υπεριώδη ακτινοβολία. Η εκλυόμενη υπεριώδης ακτινοβολία με τη σειρά της διεγείρει τα μόρια του φωσφόρου που βρίσκεται στα τοιχώματα των θαλάμων, προκαλώντας έτσι την εκπομπή φωτός του αντίστοιχου χρώματος με αυτό του φωσφόρου.

Στα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας αυτής μπορούν να αναφερθούν:

- Μικρός όγκος και σχετικά μικρό βάρος. Πολύ μικρό πάχος, αντίστοιχο με αυτό των οθονών TFT.
- Καλή αντίθεση, η οποία ξεπερνά το λόγο 3000:1.
- Πολύ καλή απόδοση των χρωμάτων.
- Δεν παρουσιάζουν γεωμετρικές παραμορφώσεις στην εικόνα.
- Η ωφέλιμη περιοχή απεικόνισης είναι ίση με το μέγεθος της οθόνης.
- Σχετικά μεγάλη διάρκεια ζωής, αντίστοιχη των οθονών TFT.
- Μεγάλο μέγεθος. Οθόνες με μέγεθος 65 ιντσών και άνω.
- Προσφέρουν πεδίο θέασης 170 μοιρών και δεν παρουσιάζουν αλλοιώσεις στην εικόνα όταν αυτή παρατηρείται υπό μεγάλη γωνία θέασης.
- Γρήγορη απόκριση σε κινούμενη εικόνα.

Στα μειονεκτήματα μπορούν να αναφερθούν:

- Υποστηρίζουν μόνο μια ανάλυση απεικόνισης. Για να αποδοθεί σωστά η απεικόνιση μεγαλύτερης ή μικρότερης ανάλυσης, εφαρμόζεται τεχνικές μεγέθυνσης ή σμίκρυνσης με αποτέλεσμα να επηρεάζεται αρνητικά η καθαρότητα και η ευκρίνεια της απεικόνισης.
- Η ανάλυση τους σε σχέση με το μέγεθός τους είναι μικρή.
- Σε στατικές εικόνες, όπου ένα εικονοστοιχείο διατηρεί το ίδιο χρώμα για μεγάλο χρονικό διάστημα, παρουσιάζεται το φαινόμενο της τοπικής καταστροφής του εικονοστοιχείου. Έτσι όταν απεικονίζεται στην ίδια θέση της οθόνης η ίδια εικόνα ή αντικείμενο για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα, υπάρχει μεγάλος κίνδυνος να παρουσιαστεί μόνιμη βλάβη σε εκείνη την περιοχή. Για το λόγο αυτό η χρήση των οθονών πλάσματος σε υπολογιστές δε συνιστάται.
- Η διάρκεια ζωής τους μειώνεται δραματικά όταν λειτουργούν στο μέγιστο της φωτεινότητάς τους. Μετά το πέρας της διάρκειας ζωής της μια οθόνη αυτού του τύπου δεν είναι επισκευάσιμη και συνεπώς καθίσταται άχρηστη.

- Είναι ακριβότερες από τις αντίστοιχες οθόνες υγρών κρυστάλλων. Ωστόσο σε μεγέθη μεγαλύτερα των 32 ιντσών η διαφορά στην τιμή εξισορροπείται, αφού οι παραγωγή μεγάλου μεγέθους οθονών υγρών κρυστάλλων είναι πιο ακριβή.

#### IV.2.4 Οθόνες LED

Η κατηγορία οθονών LED είναι τελείως διαφορετική από την κατηγορία οθονών LCD με οπίσθιο φωτισμό LED που παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα. Η τεχνολογία οθόνης LED στοχεύει στη δημιουργία εικόνας στην οθόνη από συστοιχία διόδων εκπομπής φωτός χωρίς την ανάγκη ύπαρξης στρώματος υγρών κρυστάλλων.

Η πρώτη «πραγματική» οθόνη LED με τη μορφή τηλεόρασης αναπτύχθηκε και επιδείχθηκε κατά το 1977. Ακολούθησε σειρά εξελίξεων με πολλά βραβεία από σημαντικούς οργανισμούς και σιγά σιγά εδραιώθηκε η αρχική άποψη ότι πρόκειται για τη βασική τεχνολογία που θα αντικαταστήσει τις κλασικές τεχνολογίες CRT. Παράλληλα έγινε άμεσα κατανοητό ότι η τεχνολογία αυτή μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί σε φορητές συσκευές μπαταρίας λόγω χαμηλής κατανάλωσης. Σημειώνεται, βέβαια, ότι με την τεχνολογία της εποχής ήταν ακόμη αδύνατη η κατασκευή έγχρωμων οθονών LED καθώς η τεχνολογία του μπλε LED ήρθε περίπου μια δεκαετία αργότερα.

Περί τα 30 χρόνια από την εμφάνιση της πρώτης παρουσίασης της τεχνολογίας αυτής, ανακοινώθηκε η εξέλιξή της σε OLED (από τις λέξεις organic LED – οργανική δίοδος εκπομπής φωτός), στην οποία προστέθηκε ένα στρώμα οργανικής ένωσης που εκπέμπει φως ως απόκριση σε ένα ηλεκτρικό ρεύμα. Μια οθόνη OLED μπορεί να οδηγηθεί με παθητικό πλέγμα (passive-matrix OLED – PMOLED), όπου ο έλεγχος των LED γίνεται σειριακά ανά γραμμή, ή ενεργό πλέγμα (active-matrix OLED – AMOLED), όπου ο έλεγχος γίνεται ανά εικονοστοιχείο. Η προσέγγιση του παθητικού πλέγματος απαιτεί κάθε εικονοστοιχείο να μπορεί να διατηρεί την κατάστασή του μέχρι να έρθει κάποιο νέο σήμα ανανέωσής του μέσα από τη διαδικασία σάρωσης που επαναλαμβάνεται αρκετές φορές σε ένα δευτερόλεπτο (όπως γίνονταν στις αρχικές οθόνες CRT). Η προσέγγιση του ενεργού πλέγματος είναι αυτή που πλέον χρησιμοποιείται σχεδόν σε κάθε μοντέρνα οθόνη απεικόνισης, καθώς δίνει τη δυνατότητα ελέγχου του κάθε εικονοστοιχείου ξεχωριστά.

Στα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας AMOLED μπορούν να αναφερθούν τα εξής:

- Οι οθόνες AMOLED παρέχουν υψηλούς ρυθμούς ανανέωσης εικόνας.
- Η κατανάλωση ενέργειας είναι σημαντικά χαμηλότερη και καθιστά την τεχνολογία αυτή μια ελκυστική επιλογή για φορητές συσκευές. Σημειώνονται όμως τα εξής: (α) όταν η δεν απεικονίζεται τίποτα τότε η οθόνη AMOLED είναι τελείως εκτός λειτουργίας, (β) η κατανάλωση ισχύος



εξαρτάται από την εικόνα που εικονίζεται και τη φωτεινότητα που έχει επιλεγεί και συνεπώς μια υψηλή φωτεινότητα και μια «φωτεινή» εικόνα μπορεί να οδηγήσουν σε κατανάλωση υψηλότερη από ότι σε μια συσκευή LCD, στην οποία η κατανάλωση είναι πάντα σταθερή.

- Καθώς οι οθόνες AMOLED σβήνουν τελείως όταν δεν εικονίζουν κάτι, ο λόγος αντίθεσης που παρέχει είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τις LCD.

Κάποια μειονεκτήματα που μπορούν να αναφερθούν για τη σύγχρονη τεχνολογία AMOLED περιλαμβάνει τα εξής:

- Η διάρκεια ζωής των κόκκινων και πράσινων φίλμ είναι μεγαλύτερη από αυτή των μπλε και συνεπώς αναμένεται να παρατηρηθεί μετατόπιση των χρωμάτων με την πάροδο του χρόνου.
- Οι οθόνες AMOLED είναι επιρρεπείς στο φαινόμενο του κάψιμου οθόνης (screen burn-in) που εμφανίζεται ως μια μόνιμη απεικόνιση των υπερβολικά χρησιμοποιημένων εικόνων, κυρίως όταν η οθόνη χρησιμοποιείται στη μέγιστη φωτεινότητα για εκτεταμένα διαστήματα. Αυτό γίνεται γιατί το οργανικό υλικό είναι επιρρεπές σε εκφυλισμό με τη χρήση.
- Υπό το ηλιακό φως οι οθόνες AMOLED είναι λιγότερο αποδοτικές από τις LCD λόγω της μειωμένης φωτεινότητας που μπορούν να αποδώσουν, αν και γίνονται προσπάθειες αντιμετώπισης του εν λόγω προβλήματος.

#### IV.2.5 Προβολικά συστήματα

Η ιστορία των προβολικών συστημάτων ξεκινά σχεδόν ταυτόχρονα με αυτή του σινεμά. Το 1896 η κατασκευαστική εταιρεία του Edison ξεκίνησε την παραγωγή και εμπορική εκμετάλλευση της πρώτης συσκευής προβολής εικόνας σε μεγάλη οθόνη, το Vitascope, η οποία άνοιξε την αυλαία για το σινεμά με τη μορφή που είναι σήμερα γνωστός (Bellis, 2006). Παρά την πολύχρονη παρουσία των προβολικών συσκευών στο σινεμά, η προβολή ηλεκτρονικά παραγόμενης εικόνας άργησε πάρα πολύ να εμφανιστεί. Η κυριότερη αιτία της καθυστέρησης αυτής, ήταν η έλλειψη της τεχνολογίας σχηματισμού της εικόνας. Οι πρώτες προσπάθειες προβολής ηλεκτρονικά παραγόμενης εικόνας έγιναν στα τέλη της δεκαετίας του 1940, με την τοποθέτηση ενός φακού τύπου Fresnel μπροστά από μια κοινή οθόνη τηλεόρασης. Με τη βοήθεια του φακού αυτού, επιτεύχθηκε η μεγεθυμένη προβολή της εικόνας σε μια επίπεδη λευκή επιφάνεια με αρκετά ικανοποιητική ποιότητα. Η διάταξη αυτή αποτέλεσε τον προπάτορα της ηλεκτρονικής προβολής και έδειξε πως είναι εφικτό να προβληθεί μια ηλεκτρονικά παραγόμενη εικόνα. Έτσι, τη δεκαετία του 1980 έκαναν την εμφάνισή τους στην αγορά τα πρώτα αμιγή προβολικά συστήματα, τα οποία δεν ήταν τίποτα περισσότερο από ένα κλειστό κουτί με μια οθόνη CRT πολύ υψηλής φωτεινότητας, της οποίας η εικόνα προβάλλονταν εκτός της



**Εικόνα IV.2.** Σύστημα προβολής του χθες (αριστερά) και του σήμερα (δεξιά).

συσκευής μέσω ενός παραθύρου με τους απαραίτητους φακούς. Ακολουθώντας τις εξελίξεις της τεχνολογίας, η εφαρμογή νέων τεχνολογιών απεικόνισης, όπως αυτή των οθονών υγρών κρυστάλλων, κατέστησε την ηλεκτρονική προβολή αρκετά οικονομική ώστε να χρησιμοποιηθεί ακόμα και για οικιακή χρήση.

Η αρχή λειτουργίας των προβολικών συστημάτων είναι πολύ απλή, αφού ο βασικός τους σκοπός έγκειται στο να μεγεθύνουν και να εστιάσουν την παραγόμενη εικόνα σε μια επίπεδη λευκή επιφάνεια λίγα μέτρα μακριά από τη συσκευή. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση των κατάλληλων φακών για τη μεγέθυνση και την εστίαση μιας πολύ φωτεινής εικόνας, η οποία σχηματίζεται εντός της προβολικής συσκευής.

Κατά τα τέλη του 20ου αιώνα στα προβολικά συστήματα η εικόνα σχηματιζόταν από τρεις πολύ φωτεινές οθόνες καθοδικού σωλήνα των 9 ιντσών, μια για κάθε βασικό χρώμα (κόκκινο, πράσινο, μπλε), ωστόσο η κάθε οθόνη απαιτούσε τα δικά της οπτικά προβολής. Λόγω της ιδιαιτερότητας αυτής, το κόστος κατασκευής και απόκτησης αυτών των συσκευών ήταν αρκετά υψηλό, ενώ ταυτόχρονα η τοποθέτηση και ρύθμισή τους αποτελούσε μια δύσκολη και χρονοβόρο διαδικασία. Στην Εικόνα IV.2 παρουσιάζονται δύο ενδεικτικά συστήματα προβολής, ένα του παρελθόντος και ένα του παρόντος.

Η πιο διαδεδομένη τεχνολογία σήμερα στις συσκευές προβολής χαμηλού κόστους, είναι αυτή της μικροσκοπικής διαφανούς οθόνης υγρών κρυστάλλων, η οποία παρεμβάλλεται μεταξύ μιας πολύ ισχυρής πηγής φωτός (προβολέας Ξένου) και των οπτικών προβολής της εικόνας. Το χαμηλό κόστος των οθονών υγρών κρυστάλλων, σε συνδυασμό με το μικρό τους μέγεθος και βάρος, επέτρεψε τη δημιουργία φορητών προβολικών συστημάτων χαμηλού κόστους, ικανά να ανταπεξέλθουν τόσο στην προβολή δεδομένων από ηλεκτρονικό υπολογιστή, όσο και σε εφαρμογές οικιακής διασκέδασης.

Το 1987 η εταιρεία Texas Instruments, μετά από δεκάχρονη σχετική έρευνα, παρουσίασε την τεχνολογία DMD (Συσκευή Ψηφιακών Μικροκαθρεφτών), η

οποία αποτελεί σήμερα την πιο εμπορικά επιτυχημένη λύση ηλεκτρονικής προβολής (Hornbeck, 1998; Kim et al., 1999). Η τεχνολογία DMD πήρε το όνομά της από τον τρόπο που λειτουργεί, κατά τον οποίο η τετράγωνη επιφάνεια ενός μικροεπεξεργαστή (DLP – Ψηφιακός Επεξεργαστής Φωτός) είναι καλυμμένη με χιλιάδες ελεγχόμενους μικροσκοπικούς καθρέφτες. Οι καθρέφτες αυτοί είναι έτσι κατασκευασμένοι, ώστε όταν δεν περνά ηλεκτρικό ρεύμα από τους αγωγούς ελέγχου τους, είναι προσανατολισμένοι προς μια κατεύθυνση, ενώ όταν διέρχεται ρεύμα από τους αγωγούς, οι καθρέφτες προσανατολίζονται κατά 20 μοίρες προς την αντίθετη κατεύθυνση. Με τον τρόπο αυτό, σε ένα προβολικό σύστημα τεχνολογίας DLP, είναι εφικτή η δρομολόγηση του φωτός ενός προβολέα Ξένου προς τους φακούς προβολής, για την απεικόνιση οποιουδήποτε σχήματος. Όταν ο προσανατολισμός αυτών των καθρεφτών εναλλάσσεται πολύ γρήγορα (μέχρι και 1024 φορές) στο διάστημα ενός δευτερολέπτου, είναι εφικτό να ελεγχθεί η ένταση του φωτός που θα προβληθεί και να αποδοθούν διάφορες αποχρώσεις. Φιλτράροντας το φως του προβολέα με τη βοήθεια πρισμάτων ή περιστρεφόμενων χρωματικών φίλτρων, η τεχνολογία DMD κατάφερε να αποδώσει πιστά εικόνες με εκατομμύρια χρώματα και να κερδίσει τον χαρακτηρισμό της πιο εμπορικά επιτυχημένης τεχνολογίας ηλεκτρονικής προβολής.

Στα πλεονεκτήματα της τεχνικής συγκαταλέγονται:

- Μεταβλητό μέγεθος απεικόνισης, το οποίο ρυθμίζεται από την απόσταση προβολής και τους φακούς εστίασης.
- Ο οικονομικότερος τρόπος για ηλεκτρονική απεικόνιση με μέγεθος μεγαλύτερο των 40 ιντσών.
- Η οθόνη μπορεί να πάρει οποιοδήποτε γεωμετρικό σχήμα, ανάλογα με την επιφάνεια προβολής, δυνατότητα που επιτρέπει την κατασκευή ημισφαιρικών οθονών πανοραμικής απεικόνισης.
- Ικανοποιητική απόδοση χρωμάτων και κινούμενων εικόνων.
- Οι περισσότερες συσκευές ηλεκτρονικής προβολής, κυρίως αυτές που προσανατολίζονται για εφαρμογές γραφείου και οικιακής ψυχαγωγίας, είναι ελαφριές και συμπαγείς. Καταλαμβάνουν πολύ λιγότερο χώρο ακόμα και από οθόνες, ωστόσο το πεδίο προβολής τους πρέπει να είναι ελεύθερο εν ώρα χρήσης.

Κάποια από τα βασικά μειονεκτήματα της τεχνολογίας αυτής είναι:

- Καταναλώνουν αρκετή ενέργεια, με ελάχιστη τιμή κοντά στα 200 Watt. Παράγουν μεγάλα ποσά θερμότητας, για την απαγωγή της οποίας χρησιμοποιούνται ανεμιστήρες, οι οποίοι με τη σειρά τους παράγουν θόρυβο.
- Η φωτεινότητα της απεικόνισης είναι μικρή και συνήθως για να επιτευχθεί μια οπτικά ικανοποιητική απόδοση απαιτούνται ειδικές συνθήκες χαμηλού φωτισμού.

- Τόσο η γεωμετρία, όσο και η φωτεινότητα και χρωματική απόδοση της απεικόνισης, εξαρτώνται από την επιφάνεια προβολής. Για το λόγο αυτό, η χρήση ειδικών οθονών προβολής είναι σε ορισμένες περιπτώσεις απαραίτητη.
- Κατά τη λειτουργία τους ο κώνος προβολής πρέπει να είναι ελεύθερος από οτιδήποτε μπορεί να εμποδίζει την απεικόνιση. Κατά συνέπεια απαιτούν αρκετά μεγάλο χώρο κατά τη χρήση τους.
- Δύσκολη εγκατάσταση, ειδικά συσκευών που δεν προσφέρουν ρυθμίσεις για τη διόρθωση της προοπτικής παραμόρφωσης και απαιτείται η προβολή υπό γωνία με μεγάλη απόκλιση από την κάθετο στο επίπεδο προβολής.
- Μεγάλο κόστος λειτουργίας, όχι τόσο λόγω της μεγαλύτερης κατανάλωσης ενέργειας, όσο λόγω της μικρής διάρκειας ζωής του προβολέα Ξένου που χρησιμοποιούν οι συσκευές τύπου LCD και DMD. Το μέσο χρονικό διάστημα στο οποίο ο λαμπτήρας θα φτάσει στο μισό της απόδοσής του, κυμαίνεται γύρω στις 2.500 ώρες λειτουργίας, ενώ το κόστος αντικατάστασής του είναι υψηλό.

#### IV.2.6 Στερεοσκοπική ηλεκτρονική απεικόνιση

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, η αντίληψη του βάθους ή της απόστασης στον άνθρωπο γίνεται με διάφορους τρόπους, με βασικότερο «εργαλείο» τη στερεοσκοπική όραση. Εξαιτίας αυτής της ικανότητας, ο άνθρωπος είναι σε θέση να αντιληφθεί τόσο την απόστασή του από αντικείμενα που παρατηρεί, όσο και τη θέση και τη μορφή τους στο χώρο. Αυτό επιτυγχάνεται από μια ιδιαίτερα πολύπλοκη και υπολογιστικά απαιτητική διαδικασία στον εγκέφαλο, κατά την οποία οι δύο σχετικά διαφορετικές 2Δ εικόνες από το κάθε μάτι, συνδυάζονται σε μια πλήρη 3Δ εικόνα του περιβάλλοντος χώρου. Όσο πιο κοντά βρίσκεται ένα αντικείμενο, τόσο περισσότερο μεγαλώνει η διαφορά στην οπτική γωνία παρατήρησής του από το κάθε μάτι και συνεπώς, τόσο πιο μεγάλες είναι οι διαφορές μεταξύ των δύο εικόνων του αντικειμένου. Αντιθέτως, όταν το αντικείμενο απομακρύνεται, οι διαφορές αυτές γίνονται ολοένα και πιο μικρές. Στην Εικόνα IV.3 φαίνεται πώς καταγράφεται ένα αντικείμενο από το δεξί και το αριστερό μάτι (αντίστοιχα, δεξί και αριστερό τμήμα της εικόνας). Ακόμη και σε αυτή την εικόνα είναι δυνατή η αντίληψη του βάθους και του όγκου του αντικειμένου υπό προσεκτικά ελεγχόμενες συνθήκες θέασης (τοποθέτηση των χεριών στη μύτη για διαχωρισμό του πεδίου των δύο ματιών και επικέντρωση στο κέντρο της εικόνας). Με την ικανότητα αυτή, είναι εφικτό να γίνει αντίληψός ο χώρος τόσο στον υπαρκτό όσο και στον ιδεατό - ψηφιακό κόσμο των υπολογιστών. Η αντίληψη του χώρου στον ψηφιακό κόσμο μπορεί να επιτευχθεί μέσω της χρήσης ειδικών συσκευών απεικόνισης, οι οποίες είτε έχουν τη

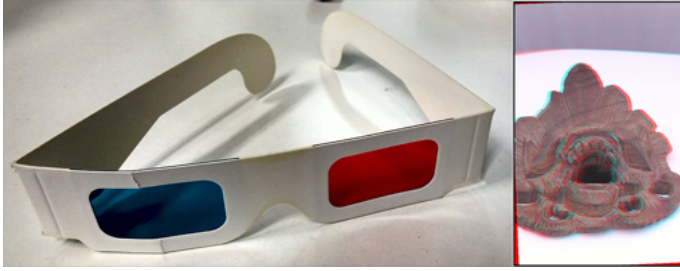


Εικόνα IV.3. Στερεοζεύγος εικόνων.

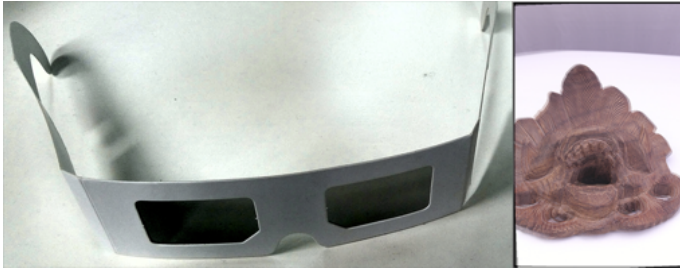
δυνατότητα να παρέχουν στο κάθε μάτι μια ανεξάρτητη εικόνα, είτε έχουν τη δυνατότητα να προβάλλουν στον πραγματικό χώρο δομές τριών διαστάσεων. Σημειώνεται ότι η πιο διαδεδομένη και οικονομική λύση 3Δ απεικόνισης είναι, προς το παρόν, αυτή της παροχής μιας ανεξάρτητης 2Δ εικόνας για κάθε μάτι. Αυτό επιτυγχάνεται με πολλούς τρόπους και διάφορες τεχνολογίες.

**Γυαλιά μπλε-κόκκινων φακών** Η τεχνική των διχρωματικών γυαλιών είναι μια προσέγγιση φιλτραρίσματος της εικόνας που βλέπει κάθε μάτι. Η πιο διαδεδομένη τεχνική κάνει χρήση ενός ζεύγους γυαλιών με ένα μπλε και ένα κόκκινο φακό για το δεξί και αριστερό μάτι αντίστοιχα και την προβολή σε τυπική οθόνη μιας ειδικής 2Δ σύνθετης εικόνας που αποτελεί τη σύνθεση δύο 2Δ εικόνων (Εικόνα IV.4). Η μια εκ των εικόνων της σύνθεσης αποδίδεται σε αποχρώσεις του μπλε και αντιστοιχεί στο ορατό πεδίο του δεξιού ματιού, ενώ η άλλη σε αποχρώσεις του κόκκινου και αντιστοιχεί στο πεδίο του αριστερού ματιού. Καθώς η σύνθετη αυτή εικόνα περνά από τους φακούς των γυαλιών αυτών, η πληροφορία που αντιστοιχεί στο αριστερό μάτι αποκόπτεται από το πεδίο του δεξιού ματιού και αντίστοιχα για το αριστερό μάτι. Έτσι, πρακτικά κάθε μάτι βλέπει μια διαφορετική εικόνα και δημιουργείται η παράλλαξη που θα υπήρχε σε συνθήκες πραγματικής παρατήρησης της σκηνής από δύο μάτια. Ωστόσο, καθώς η σύνθετη εικόνα αποτελείται από χρώματα μπλε και κόκκινα, τα χρώματα της απεικόνισης θα είναι πολύ αλλοιωμένα σε σχέση με τα πραγματικά, ενώ όταν ο χρήστης βγάλει τα γυαλιά από τα μάτια του θα χρειαστεί μερικά δευτερόλεπτα μέχρι να αποκατασταθεί πλήρως το χρώμα στην όρασή του.

**Γυαλιά με φακούς πόλωσης** Το φως που εκπέμπεται από μια πηγή φωτός, όπως από τον ήλιο ή ένα λαμπτήρα, και ανακλάται από πλήθος επιφανειών, περιλαμβάνει ταλαντώσεις προς όλες τις κατευθύνσεις κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσής του, όπως κάθε ηλεκτρομαγνητικό κύμα κατά τη διάδοσή του. Όταν το φως περάσει από ένα φακό ή φίλτρο πόλωσης, επιτρέπεται η διέλευση μόνο



**Εικόνα IV.4.** Γυαλιά μπλε-κόκκινων φακών και αντίστοιχη σύνθετη εικόνα.



**Εικόνα IV.5.** Γυαλιά με κάθετα πολωμένους φακούς και αντίστοιχη σύνθετη εικόνα.

εκείνου του τμήματος του φωτός που είναι κατάλληλα προσανατολισμένης ταλάντωσης ώστε να «συμφωνεί» με την διεύθυνση που «επιβάλλει» το φίλτρο. Παράλληλα προκαλείται πλήρης απόσβεση όλων των άλλων ταλαντώσεων του φωτός. Όταν το φως εξέλθει από το φίλτρο πόλωσης είναι πλέον *πολωμένο*, δηλαδή το επίπεδο ταλάντωσης του ηλεκτρικού πεδίου είναι το ίδιο για όλα τα φωτόνια. Ο φακός αυτός λειτουργεί, πρακτικά, ως φίλτρο ρύθμισης της πόλωσης του φωτός. Βάσει της αρχής της πόλωσης του φωτός, όταν συσκευή προβολής μπορεί να ελέγχει την πόλωση του φωτός σε εικόνα που προβάλλει και η θέαση συνδυαστεί με αντίστοιχα γυαλιά με πολωτικούς φακούς (ή φίλτρα) μπορεί να ελεγχθεί πλήρως το τι βλέπει και το τι όχι ένας θεατής. Συγκεκριμένα, αν σε οθόνη προβληθεί μια σύνθετη 2Δ εικόνα που αποτελείται από μια σκηνή που αντιστοιχεί στο αριστερό μάτι με οριζόντια πόλωση και από την αντίστοιχη σκηνή για το δεξί μάτι με κάθετη πόλωση, τότε με χρήση γυαλιών με φίλτρα οριζόντιας και κάθετης πόλωσης μπορεί να οδηγηθεί κάτι εικόνα στο σωστό μάτι (Εικόνα IV.5). Έτσι και πάλι επιτυγχάνεται η δημιουργία παράλλαξης και η αίσθηση του βάθους. Ωστόσο, το μειονέκτημα αυτής της πρακτικής είναι πως προϋποθέτει απόλυτη ταύτιση του οριζόντιου επιπέδου θέασης με αυτό της οθόνης προβολής, δηλαδή ο θεατής δεν πρέπει να γέρνει το κεφάλι του δεξιά ή αριστερά, αφού η ευθυγράμμιση των πολωτικών φίλτρων είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη του διαχωρισμού των εικόνων.

**Γυαλιά ηλεκτρονικού διαφράγματος υγρών κρυστάλλων** Τα γυαλιά ηλεκτρονικού διαφράγματος υγρών κρυστάλλων (LCD shutter glasses) είναι ει-



Εικόνα IV.6. Προσαρμοζόμενη οθόνη κεφαλής.

δικά γυαλιά που χρησιμοποιούν αντί για φακούς ένα ζεύγος ηλεκτρονικά ελεγχόμενων φίλτρων φωτός που υλοποιούνται με μικρές οθόνες τύπου LCD. Τα διαφράγματα αυτά είναι μεταξύ τους συγχρονισμένα ώστε, όταν το ένα είναι ανοιχτό και επιτρέπει τη διέλευση του φωτός, το άλλο να είναι κλειστό και να την εμποδίζει. Όταν αυτά τα γυαλιά λειτουργούν σε συγχρονισμό με μια οθόνη, στην οποία απεικονίζονται εναλλάξ και με ρυθμό τουλάχιστον 50 φορές το δευτερόλεπτο οι εικόνες που αντιστοιχούν στο δεξί και αριστερό μάτι, τότε είναι εφικτό να επιτευχθεί έγχρωμη στερεοσκοπική απεικόνιση. Όταν η εναλλαγή των εικόνων γίνεται με αργούς ρυθμούς παρατηρείται έντονο «τρέμολο» της εικόνας που καθιστά τη θέαση από δύσκολη έως αδύνατη. Για το λόγο αυτό, συσκευές ικανές να ανανεώνουν αυτό που απεικονίζουν με ρυθμούς ίσους ή και μεγαλύτερους των 100 Hz είναι η πιο κατάλληλη επιλογή.

**Οθόνες κεφαλής** Οι οθόνες κεφαλής (HMD – Head Mounted Display) είναι συσκευές που προσαρμόζονται στο κεφάλι (Εικόνα IV.6), όπως διόπτρες και κράνη, οι οποίες φέρουν μια μικρή οθόνη για κάθε μάτι και συνήθως ένα εύρος από επιπρόσθετα αισθητήρια προσανατολισμού και κίνησης για την κατανόηση της σχετικής θέσης και κίνησης του χρήστη. Η κάθε μια από τις οθόνες αυτές είναι εφικτό να τροφοδοτείται με ανεξάρτητη εικόνα και έτσι να δημιουργηθεί η ζητούμενη παράλλαξη και εξ' αυτής η αίσθηση του βάθους. Συνήθως οι εν λόγω οθόνες είναι περίπλοκες συσκευές με πολλαπλές δυνατότητες αλληλεπίδρασης και όχι μόνο απλά συστήματα παθητικής θέασης.

**Αυτοστερεοσκοπικές οθόνες** Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των επίπεδων οθονών υγρών κρυστάλλων και πλάσματος, όπως αυτά της αμετάβλητης και εργοστασιακά προκαθορισμένης θέσης των εικονοστοιχείων, σε συνάρτηση με την άριστη γεωμετρία απεικόνισης, κατέστησαν εφικτό να συνδυαστούν οι οθόνες αυτές με μια τεχνολογική λύση 3Δ απεικόνισης που παλιότερα ήταν εφαρμόσιμη μόνο με ειδικές εκτυπώσεις. Η τεχνική αυτή επέτρεψε την κατασκευή





**Εικόνα IV.7.** Αναπαράσταση της αίσθησης βάθους σε αυτοστερεοσκοπική οθόνη.

οθονών 3Δ απεικόνισης, στις οποίες ο θεατής είναι σε θέση να αντιληφθεί το βάθος χωρίς τη χρήση συμπληρωματικών εξαρτημάτων όπως τα ειδικά γυαλιά, δίνοντας την αίσθηση ότι το απεικονιζόμενο θέμα παρουσιάζεται μέσα από ένα ανοικτό παράθυρο που καθορίζουν τα όρια της συσκευής (Εικόνα IV.7). Η τεχνολογία αυτή είναι παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται σε διάφορα σχολικά προϊόντα, όπως χάρακες, στην επιφάνεια των οποίων υπάρχει τυπωμένη μια εικόνα που φαίνεται να μεταβάλλεται ανάλογα με τη γωνία θέασης. Η αλλαγή αυτή προκύπτει από τη χρήση διάφανων ραβδωτών πλαστικών φίλτρων, τα οποία διαθλούν κατάλληλα την τυπωμένη σύνθετη εικόνα. Η εικόνα σχηματίζεται από δύο ή περισσότερες εικόνες, οι οποίες είναι πεπλεγμένες μεταξύ τους σε πολύ λεπτές λωρίδες με μέγεθος ίσο με αυτό των φακοειδών ραβδώσεων του διάφανου πλαστικού φίλτρου. Έτσι, ανάλογα με τη γωνία θέασης καθίσταται ορατή μόνο η μία από τις πεπλεγμένες εικόνες κάθε φορά. Παρατηρώντας μια τέτοια πεπλεγμένη εικόνα και με τα δύο μάτια από κάποια απόσταση, είναι πολύ πιθανό το κάθε μάτι να βλέπει και διαφορετική φάση της εικόνας αυτής. Κατά τον τρόπο αυτό είναι εφικτό να κατασκευαστούν έντυπες 3Δ απεικονίσεις. Η εφαρμογή παρόμοιας τεχνικής σε οθόνες με τα απαραίτητα χαρακτηριστικά, δηλαδή αυτά που επιδεικνύουν οι οθόνες υγρών κρυστάλλων και πλάσματος, απέδωσε την αίσθηση του βάθους αρκετά ικανοποιητικά, με αποτέλεσμα να αποτελεί σήμερα μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία 3Δ απεικόνισης που εξελίσσεται (Van Berkel et al., 1996a,b).

**Οθόνες ογκομετρικής απεικόνισης** Οι τεχνικές 3Δ απεικόνισης που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, βασίζονται στην «εξαπάτηση» του συστήματος οπτικής αντίληψης, παρουσιάζοντας στο κάθε μάτι μια ανεξάρτητη 2Δ εικόνα. Ωστόσο υπάρχουν τεχνικές απεικόνισης, οι οποίες είναι σε θέση να αποδώσουν πραγματικά 3Δ εικόνες. Μια από αυτές είναι και η , η οποία, αν και είναι η παλαιότερη (σε αναλογική μορφή), θεωρείται το μέλλον της 3Δ ψηφια-



κής απεικόνισης. Διάφορα ερευνητικά εργαστήρια ανά τον κόσμο έχουν ήδη κατασκευάσει πρωτότυπα ψηφιακών συσκευών 3Δ ολογραφικής απεικόνισης, ωστόσο η εποχή που αυτά θα είναι σε θέση να ανταπεξέλθουν στις απαιτήσεις της αγοράς είναι ακόμα μακριά. Προς το παρόν, οι περισσότερες εμπορικά διαθέσιμες λύσεις 3Δ απεικόνισης βασίζονται σε τεχνικές πολλαπλής και ταχύτατης προβολής 2Δ εικόνων, πάνω σε ημιδιαφανείς ταχύτατα περιστρεφόμενες επιφάνειες. Η τεχνική αυτή δημιουργεί την ψευδαίσθηση μιας ημιδιαφανούς, ωστόσο στιβαρής, 3Δ εικόνας, την οποία ο χρήστης μπορεί να περιεργαστεί από διάφορες θέσεις, όπως ακριβώς θα έκανε και με ένα πραγματικό 3Δ αντικείμενο (Favalora et al., 2002). Άλλη μια λύση είναι αυτή της ταχύτατης εναλλασσόμενης προβολής 2Δ εικόνων πάνω σε μια στοίβα από παραλληλόγραμμα ηλεκτρονικά διαφράγματα φωτός υγρών κρυστάλλων στο μέγεθος οθόνης. Ένας βιντεοπροβολέας, ο οποίος βρίσκεται σε συγχρονισμό με τα ηλεκτρονικά διαφράγματα, προβάλλει με μεγάλη ταχύτητα πάνω στο καθένα από αυτά μια αλληλουχία εικόνων, η κάθε μια εκ των οποίων αντιστοιχεί και σε μια τομή του 3Δ θέματος. Με την τεχνική αυτή είναι εφικτό να αποδοθεί αρκετά ικανοποιητικά η τρίτη διάσταση, παρά τον περιορισμένο αριθμό επιπέδων βάθους που καθορίζουν τα ηλεκτρονικά διαφράγματα φωτός.

### IV.3 Επιλογή συστήματος 3Δ απεικόνισης

Οι παράμετροι που καθορίζουν την επιλογή του πιο κατάλληλου συστήματος απεικόνισης 3Δ ψηφιακών δεδομένων είναι:

- Το *πλήθος των ταυτόχρονων θεατών*: το πλήθος των ανθρώπων που θα παρακολουθούν ταυτόχρονα την παρουσίαση, παίζει καθοριστικό ρόλο στο μέγεθος της οθόνης και, κάποιες φορές στις αναλογίες ύψους πλάτους αλλά και στη γεωμετρία της (πχ. επίπεδη ή ημι-κυλινδρική).
- Την *πιθανότητα ή απαίτηση για στερεοσκοπική απεικόνιση*, ώστε ο θεατής να έχει πραγματική αντίληψη του βάθους.
- Το *απαιτούμενο επίπεδο διαδραστικότητας*: για παράδειγμα αν θα επιτρέπεται στο χρήστη να μετακινείται κατά βούληση μέσα στο χώρο ή αν θα είναι απλός θεατής μιας συγκεκριμένης διαδρομής μέσω ιδεατής κάμερας. Η παράμετρος αυτή καθορίζει τη συσκευή που θα παρέχει τις εικόνες στη μονάδα προβολής, η οποία στην περίπτωση της προκαθορισμένης πορείας μπορεί να ένα απλό βίντεο χαμηλού κόστους, ενώ στην περίπτωση της ελεύθερης μετακίνησης στον 3Δ χώρο μπορεί να είναι ένας υπερυπολογιστής ή ακόμη και συστοιχία συνδεδεμένων υπολογιστών με πολύ υψηλό κόστος.
- Το *κόστος*.

Πολλοί κατασκευαστές, κάνοντας χρήση προβολικών συστημάτων, κατασκευάζουν εξειδικευμένες διατάξεις απεικόνισης όπως: «τοίχους», «γραφεία», «δωμάτια» ή «σπηλιές» (caves), «θόλους», κλπ. Τέτοιες συσκευές απεικόνισης ονομάζονται οθόνες εμβύθισης, επειδή περικλείουν έναν ή περισσότερους θεατές σε ένα εικονικό περιβάλλον. Το κόστος αυτού του είδους συστημάτων μπορεί ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής να είναι αρκετά μεγάλο. Στην περίπτωση εφαρμογών που είναι επιθυμητή η πραγματικά 3Δ απεικόνιση του θέματος, χωρίς όμως να απαιτείται η χρήση πρόσθετων βοηθημάτων αντίληψης του βάθους, συνιστάται η χρήση των ενεργών 3Δ οθονών. Οι συσκευές που ανήκουν στην κατηγορία αυτή είναι οι επίπεδες οθόνες τύπου TFT ή πλάσματος, οι οθόνες απεικόνισης όγκου και οι οθόνες κεφαλής.

## IV.4 Αναπαραγωγή 3Δ δεδομένων

Μια από τις διαδικασίες διάχυσης των 3Δ εικόνων είναι η αναπαραγωγή τους με ποικίλους τρόπους. Η αναπαραγωγή μπορεί είτε να αναφέρεται σε δημιουργία πολλαπλών ψηφιακών αντιγράφων είτε σε παραγωγή υλικών 3Δ αντιγράφων από το ψηφιακό. Η παραγωγή ψηφιακών αντιγράφων είναι σήμερα μια πολύ απλή διαδικασία και μπορεί να γίνει σε κάθε υπολογιστή με τη χρήση συσκευών όπως Flash Disks και DVD Disks. Από την άλλη, η παραγωγή 3Δ υλικών αντιγράφων είναι μια σύγχρονη τεχνολογία, η οποία άλλοτε βασιζόμενη σε τεχνικές απόθεσης υλικού και άλλοτε σε 3Δ σμίλευση επιτυγχάνει τη δημιουργία 3Δ «γλυπτών» που βασίζονται στα 3Δ ψηφιακά μοντέλα.

### IV.4.1 Συσκευές 3Δ εκτύπωσης με απόθεση υλικών

Οι 3Δ εκτυπωτές λειτουργούν βασίζόμενοι σε διαδικασία διαδοχικής «εκτύπωσης» στρώματων. Η 3Δ εκτύπωση έχει σήμερα διάφορες παραλλαγές ως προς την μεθοδολογία υλοποίησής της (Sherman, 2004).

Μια παραλλαγή της 3Δ εκτύπωσης περιλαμβάνει σύστημα εκτύπωσης τύπου inkjet. Στρώματα λεπτής σκόνης (γύψος, άμμος ή ρητίνες) επιλεκτικά συνδέονται μέσω κολλώδους υλικού από την κεφαλή inkjet διαμορφώνοντας διαδοχικά τομές ακολουθώντας το 3Δ ψηφιακό αντίγραφο στον υπολογιστή. Η μέθοδος επιτρέπει τη δημιουργία έγχρωμων 3Δ πρωτοτύπων και είναι γρήγορη. Εναλλακτικά, οι συσκευές αυτές τροφοδοτούνται με υγρά (όπως φωτοπολυμερή) από την κεφαλή τύπου inkjet για τη δημιουργία κάθε στρώματος του ψηφιακού αντιγράφου. Οι συσκευές αυτές (καλούνται photopolymer phase machines) χρησιμοποιούν υπεριώδεις λαμπτήρες φωτισμού πάνω στην κεφαλή για την άμεση κατεργασία του κάθε στρώματος καθώς αυτό δημιουργείται.

Από την άλλη, η μοντελοποίηση απόθεσης υλικού σε τήξη (fused deposition modelling) είναι μια τεχνολογία που επίσης χρησιμοποιείται στην προτυποποίηση χρησιμοποιώντας ειδικό ακροφύσιο για την απόθεση λιωμένου πολυμερούς υλικού πάνω σε δομή στήριξης, ένα στρώμα τη φορά.



**Εικόνα IV.8.** Τυπικό δείγμα έγχρωμης 3Δ εκτύπωσης.

Άλλη δε τεχνική χρησιμοποιεί επιλεκτική τήξη υλικού εντός κοκκώδους περιβάλλοντος για τη στήριξη, εξαλείφοντας την ανάγκη για κατάλληλα υποστηρίγματα.

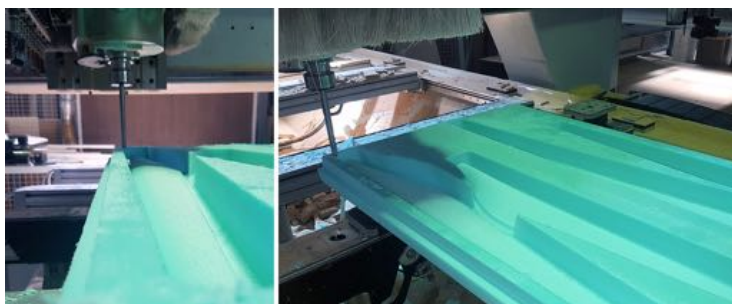
Κάθε τεχνική έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της. Γενικά, σημαντικές παράμετροι είναι η ταχύτητα, η επιλογή του υλικού και οι δυνατότητες χρωματικής εκτύπωσης (Wohlers, 2005). Η 3Δ εκτύπωση αυτής της κατηγορίας είναι σχετικά γρήγορη, έχει χαμηλότερο κόστος, είναι εύχρηστη και ικανοποιητική για την παραγωγή πρωτοτύπων κατάλληλων κατά τη φάση της προτυποποίησης, όταν η ακρίβεια σε διαστάσεις και η μηχανική αντοχή του υλικού δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικές. Η ανάλυση της εκτύπωσης υπολογίζεται με βάση το πάχος της κάθε στρώσης και τη γνωστή X-Y ανάλυση σε dpi. Τυπικές τιμές πάχους στρώματος κυμαίνονται περί τα 100  $\mu\text{m}$  (0.1 mm), ενώ στη X-Y ανάλυση οι τιμές είναι ανάλογες αυτών που επιτυγχάνουν οι 2Δ εκτυπωτές laser. Τα 3Δ “pixels” εκτύπωσης κυμαίνονται περί τα 50 με 100  $\mu\text{m}$  (0.05-0.1 mm). Στην Εικόνα IV.8 παρουσιάζεται ένα δείγμα έγχρωμης 3Δ εκτύπωσης.

#### IV.4.2 Συσκευές 3Δ σμίλευσης

Οι συσκευές 3Δ σμίλευσης λειτουργούν ως γλύπτες. Χρησιμοποιούν κυρίως εργαλεία διάτρησης και σμιλεύουν πάνω σε άμορφο αρχικά υλικό το αντικείμενο που αντιγράφουν από το 3Δ ψηφιακό αντίγραφο του υπολογιστή που οδηγεί τη διαδικασία. Στην Εικόνα IV.9 φαίνεται μια συσκευή 3Δ σμίλευσης κατά τη διαδικασία σμίλευσης αντικειμένου σε πλαστικό υλικό. Οι φάσεις της διαδικασίας είναι: αρχικά υπάρχει ή δημιουργείται το 3Δ μοντέλο, στη συνέχεια «εκτυπώνεται» μέσω της ειδικής συσκευής πάνω σε υλικό της επιλογής (συνήθως ρητίνες) και τέλος το υλικό καθαρίζεται και κόβεται κατάλληλα.

#### IV.4.3 Συσκευές στερεολιθογραφίας

Η στερεολιθογραφία είναι μια τεχνική προτυποποίησης με δυνατότητα εφαρμογής σε περιπτώσεις που απαιτείται υψηλή ακρίβεια διαστάσεων και καλή επιφανειακή υφή. Μια συσκευή που υλοποιεί την στερεολιθογραφία καλείται SLA (εκ του stereo-lithography apparatus). Είναι μια μέθοδος απόθεσης υλικού, στην οποία γίνεται χρήση ρευστού πολυμερούς υλικού (ρητίνη) που αντιδρά σε υπεριώδες φως και στερεοποιείται. Το 3Δ αντικείμενο σχηματο-

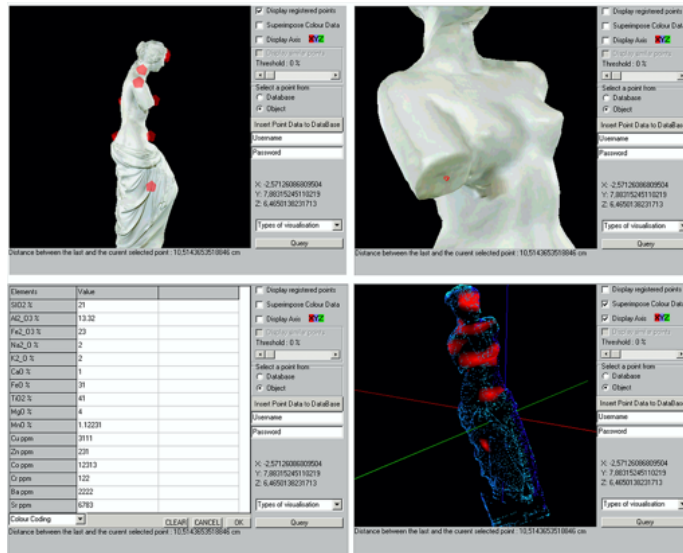


**Εικόνα IV.9.** Συσκευή 3Δ σμίλευσης και τυπικό δείγμα.

ποιείται ανά στρώμα μέσω της στερεοποίησης που προκαλεί στο πολυμερές η πηγή υπεριώδους φωτός. Καθώς η πηγή υπεριώδους φωτός (που είναι συχνά λέιζερ) εστιάζει σε συγκεκριμένη απόσταση, κινείται ανάλογα με το στρώμα που πρέπει να στερεοποιηθεί. Το πολυμερές εγχέεται στρώμα-στρώμα πάνω στο ήδη στερεοποιημένο στρώμα και η πηγή λέιζερ απομακρύνεται (τυπικά με βήμα μεταξύ 0.05 mm έως 0.15 mm, όσο το πάχος της νέας απόθεσης υλικού) για να δημιουργηθεί το επόμενο στρώμα, κοκ. Το κάθε στρώμα υλικού, καθώς στερεοποιείται, κολλά στο προηγούμενο στρώμα αυτομάτως. Στο τέλος της διαδικασίας το 3Δ αντικείμενο εμβαπτίζεται σε ειδικά χημικά για καθαρισμό και εισάγεται σε ειδικό φούρνο υπεριώδους ακτινοβολίας. Εναλλακτικά η μέθοδος μπορεί να λειτουργεί με τη χρήση λεκάνης ρευστού πολυμερούς υλικού εντός της οποίας σχηματοποιείται σταδιακά το αντικείμενο.

## IV.5 Διαδραστικές εφαρμογές 3Δ εικόνων

Ένα από τα σημαντικότερα επακόλουθα και συνάμα πλεονεκτήματα της χρήσης 3Δ εικόνων και γραφικών είναι η δυνατότητα δημιουργίας διαδραστικών εφαρμογών με αυτά. Για την ακρίβεια, η τόσο πολυσυζητημένη εικονική πραγματικότητα δεν είναι παρά μια διαδραστική εφαρμογή απεικόνισης 3Δ σκηνών. Οι εφαρμογές που δημιουργούνται με τον τρόπο αυτό έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών 2Δ εφαρμογών. Πρώτα από όλα, ο ρεαλισμός της απεικόνισης που παρέχουν είναι σημαντικά εντονότερη αφού η δυνατότητα πλοήγησης στον εικονικό χώρο προσομοιώνει τον αληθινό κόσμο. Παράλληλα, η δυνατότητα παρατήρησης αντικειμένων από οποιαδήποτε γωνία θέασης και απόσταση υπό διάφορες συνθήκες φωτισμού και περιβάλλοντος είναι γνώρισμα αυτού και μόνο τρόπου λειτουργίας. Η επίπτωση του υψηλού επιπέδου ρεαλισμού που παρέχεται από 3Δ εφαρμογές στη δημιουργία εμπειριών, στην απόκτηση γνώσεων, ακόμη και στην υποβοήθηση ιατρικών μεθόδων, όπως πχ. ίασης ψυχολογικών παθήσεων, είναι ιδιαίτερα σημαντική. Στις παραγράφους που ακολουθούν δίνονται μερικά παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών που αποτελούν ένα δείγμα των πολλών δυνατοτήτων που δίνονται πλέον



Εικόνα IV.10. Περιβάλλον εμπλουτισμένης παρουσίασης 3Δ μοντέλων.

με τη χρήση τεχνολογιών απεικόνισης 3Δ εικόνων.

## IV.6 Παρουσίαση 3Δ αντικειμένων στο διαδίκτυο

Η συνεχής ανάπτυξη διαδικτυακών πολυμεσικών βάσεων δεδομένων μπορεί πλέον να συμπληρωθεί και ολοκληρωθεί με τη χρήση τεχνολογιών 3Δ ψηφιοποίησης και μοντελοποίησης, καθώς και εφαρμογής σύγχρονων μετρητικών διατάξεων. Έτσι, οι βάσεις δεδομένων εμπλουτίζονται πλέον τόσο με πλούσιο οπτικό περιεχόμενο όσο και με τυπολογικά και φυσικοχημικά δεδομένα που μπορεί να οδηγήσουν στην εξαγωγή πολύ σημαντικών συμπερασμάτων μέσω συγκριτικής έρευνας και να συνεισφέρουν σημαντικά στην προβολή και περαιτέρω έρευνα. Έτσι, άλλοτε για λόγους ουσιαστικότερης επίδειξης, άλλοτε για ερευνητικούς σκοπούς, υπάρχουν σήμερα δυνατότητες ολοκλήρωσης της εικονικής παρουσίας αντικειμένων στο διαδίκτυο, σε ένα πλαίσιο 3Δ απεικόνισης με επιπρόσθετη πληροφορία ανάλογα με ειδικές απαιτήσεις (Tsirliganis et al., 2002a,b). Στην Εικόνα IV.10 παρουσιάζεται στιγμιότυπο από διαδικτυακή εφαρμογή επαυξημένης 3Δ προβολής πολιτιστικών αντικειμένων με επιλογή για διάφορες απεικονίσεις και τη δυνατότητα υπέρθεσης μετρήσεων αρχαιομετρίας. Στην Εικόνα IV.11<sup>3</sup> παρουσιάζεται στιγμιότυπο από διαδικτυακή εφαρμογή εικονικής έκθεσης 3Δ ψηφιοποιημένων αντικειμένων.

<sup>3</sup>Επισκεφθείτε τη σελίδα στη διεύθυνση <http://virtualworld.georgepavlidis.info>.



Εικόνα IV.11. Σελίδα παρουσίασης 3Δ ψηφιοποιημένων αντικειμένων στο Διαδίκτυο.

### IV.6.1 Εικονικά μουσεία

Μια από τις σημαντικότερες διαδραστικές εφαρμογές στον τομέα του πολιτισμού είναι η δημιουργία εικονικών εκθέσεων και μουσείων. Τα εικονικά μουσεία είναι 3Δ χώροι, άλλοτε ιδεατοί και άλλοτε αντίγραφα πραγματικών χώρων, μέσα στους οποίους παρουσιάζονται 3Δ μοντέλα εκθεμάτων. Η δημιουργία των μουσείων αυτών γίνεται με βασικό γνώμονα το υψηλό επίπεδο ρεαλισμού μέσω της διατήρησης σωστών αναλογιών αντικειμένων και χώρου, καθώς και σωστής τοποθέτησης του επίπεδου των ματιών του επισκέπτη στο χώρο (εφόσον λειτουργούν ως εφαρμογές πρώτου προσώπου). Τα εκθέματα μπορεί να αποτελούν προϊόν 3Δ ψηφιοποίησης ή μοντελοποίησης ανάλογα με τις απαιτήσεις. Το ίδιο και ο χώρος. Με την τεχνολογία αυτή, είναι δυνατή η δημιουργία ψηφιακών 3Δ αντιγράφων πραγματικών μουσείων με την ψηφιοποίηση τόσο των κτηρίων όσο και των εκθεμάτων. Από την άλλη, είναι δυνατή η δημιουργία ψηφιακών μουσείων μέσω αρχιτεκτονικής μοντελοποίησης σε υπολογιστή και η τοποθέτηση των εκθεμάτων ανάλογα με τις ανάγκες προβολής. Σε κάθε περίπτωση, η κίνηση στον εικονικό χώρο ακολουθεί τους κανόνες του πραγματικού κόσμου με την εφαρμογή των νόμων της φυσικής (βαρύτητα, συγκρούσεις, κλπ). Φυσικά, σε ειδικές περιπτώσεις και όταν υπάρχει ανάγκη, είναι δυνατή η υπέρβαση των νόμων της φύσης, καθώς οι περιορισμοί τίθενται αποκλειστικά από τον προγραμματιστή του λογισμικού (πχ. μπορεί ο επισκέπτης να πετάει ή να μεταβαίνει αυτόματα από χώρο σε χώρο ή από μουσείο σε μουσείο). Στην Εικόνα IV.12 παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο από την πλοήγηση σε εικονικό μουσείο παραδοσιακών μουσικών οργάνων<sup>4</sup>, ενώ στην Εικόνα IV.13 φαίνεται στιγμιότυπο από χώρο εκθεμάτων και μελέτη επιλεγμένου εκθέματος (Pavlidis et al., 2006a).

Ο επισκέπτης μπορεί να αλληλεπιδρά με τα εκθέματα, να τα περιστρέφει, να βλέπει λεπτομέρειες από όσο κοντά θέλει, να λαμβάνει επιπρόσθετες πολυμεσικές πληροφορίες (εικόνα, ήχος, βίντεο), να δημιουργεί λίστες προτίμησης,

<sup>4</sup>Εικονικό μουσείο παραδοσιακών μουσικών οργάνων στη διεύθυνση <http://www.ceti.gr/momi>.



**Εικόνα IV.12.** Περιήγηση στο 3Δ εικονικό μουσείο παραδοσιακών μουσικών οργάνων.



**Εικόνα IV.13.** Είσοδος σε χώρο εκθεμάτων και πληροφόρηση για συγκεκριμένο έκθεμα.

να δημιουργεί τα δικά του εικονικά μουσεία ή συλλογές από επιλεγμένα εκθέματα. Από την πλευρά του εκθέτη, το μουσείο ή η συλλογή μπορεί να επιλέξει ποια θα είναι τα εκθέματα που θα εισαχθούν στο εικονικό μουσείο, έτσι ώστε να παράγει κατά βούληση αφιερώματα ή στοχευμένες συλλογές εκθεμάτων ή περιοδικές εκθέσεις. Τα εικονικά μουσεία μπορούν να λειτουργούν είτε τοπικά και να διανέμονται με τη μορφή εκτελέσιμων αρχείων, είτε να λειτουργούν διαδικτυακά μέσω κάποιου λογισμικού πλοήγησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα διαδικτυακά εικονικά μουσεία είναι ανοικτά για το κοινό 24 ώρες τη μέρα επί 7 ημέρες την εβδομάδα.

## IV.6.2 Εικονικά μνημεία και πόλεις

Μια εφαρμογή 3Δ τεχνολογιών με ιδιαίτερο ενδιαφέρον αποτελεί η δημιουργία εικονικών πόλεων, όπου ο επισκέπτης μπορεί να κινείται σε 3Δ μοντέλα πόλεων που αποτελούν το προϊόν 3Δ ψηφιοποίησης. Η εφαρμογή μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για την τουριστική και πολιτιστική προώθηση, είτε για γνωριμία με τον τόπο. Οι προσεγγίσεις 3Δ ψηφιοποίησης που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις εφαρμογές είναι συνήθως χαμηλής ανάλυσης και ακρίβειας αλλά πολύ μεγάλης παραγωγικότητας, αφού τα εμπλεκόμενα μεγέθη των θεμάτων είναι τόσο μεγάλα, ώστε καθιστούν ιδιαίτερα επίπονη τη διαδικασία ψηφιοποίησης υψηλής ακρίβειας. Με δεδομένο δε το γεγονός ότι απαιτείται να γίνει ψηφιοποίηση μεγάλης έκτασης σε μικρό χρονικό διάστημα, μέθοδοι όπως



φωτογραμμετρία με τοπογραφική υποστήριξη είναι οι περισσότεροι ενδεδειγμένες. Στο τελικό προϊόν, στη 3Δ σκηνή που προκύπτει, όπως και στα εικονικά μουσεία, η πλοήγηση ακολουθεί το φυσικό τρόπο περιήγησης στον πραγματικό κόσμο με εφαρμογή των νόμων της φυσικής. Φυσικά κι εδώ μπορούν να δίνονται δυνατότητες όπως η πτήση, όταν αυτό εξυπηρετεί τους σκοπούς της προβολής. Την τεχνολογία αυτή μπορούν να εκμεταλλευτούν τοπικές αυτοδιοικήσεις, υπουργεία, σύλλογοι, εφορείες αρχαιοτήτων, τουριστικά γραφεία για να προωθήσουν τον τουρισμό μιας περιοχής και να πληροφορήσουν για την αρχιτεκτονική ιδιαιτερότητα ενός τόπου (Koutsoudis et al., 2007, 2008). Στη σελίδα <http://67100.gr> παρουσιάζεται ένα 3Δ μοντέλο που επιτρέπει την εικονική πλοήγηση σε τμήμα της παλιάς πόλης της Ξάνθης. Αντίστοιχα παραδείγματα πλοήγησης στον εικονικό χώρο μνημείων όπου παρουσιάζονται δύο βυζαντινοί ναοί που βρίσκονται στην περιοχή της Μάνης μπορεί κανείς να δει και να περιηγηθεί στο χώρο τους στην ιστοσελίδα [http://www.ipet.gr/3d\\_demo/mani/](http://www.ipet.gr/3d_demo/mani/) (Pavlidis et al., 2006b; Tsioukas et al., 2005).

### IV.6.3 Εικονική πραγματικότητα

Τον όρο Virtual Reality (VR) εισήγαγε ο Jaron Lanier, ιδρυτής της εταιρείας VPL Research, κατά το 1989. Η VPL Research ήταν η πρώτη εταιρεία πώλησης προϊόντων εικονικής πραγματικότητας. Άλλοι όροι που είχαν προταθεί περιλαμβάνουν την Τεχνητή Πραγματικότητα (Artificial Reality) από τον Myron Krueger στη δεκαετία του 1970, τον όρο Κυβερνοχώρος (Cyberspace) του William Gibson το 1984 στο βιβλίο του Νευρομάντης, ενώ τη δεκαετία του 1990 παρουσιάστηκαν οι όροι Εικονικοί Κόσμοι (Virtual Worlds) και εικονικά περιβάλλοντα (Virtual Environments).

Η πρωταρχική έννοια και χρήση του όρου σήμαινε την εμβυθιστική εικονική πραγματικότητα (Immersive VR), όπου ο χρήστης βυθίζεται πλήρως σε ένα 3Δ κόσμο που έχει αποκλειστικά δημιουργηθεί από έναν υπολογιστή χωρίς επαφή με τον πραγματικό, μέσω συσκευών που παρέχουν τις αισθήσεις (Εικόνα IV.14). Η εικονική πραγματικότητα έχει πλέον μια ευρύτερη έννοια. Έτσι κατά το λεξικό Merriam-Webster Online, εικονική πραγματικότητα είναι «ένα τεχνητό περιβάλλον το οποίο γίνεται αντιληπτό μέσω αισθητηριακών ερεθισμάτων (όπως εικόνες και ήχοι) που παρέχονται από υπολογιστή και στο οποίο η δράση ενός χρήστη καθορίζει τι συμβαίνει εντός του περιβάλλοντος». Η Veronica Pantelidis, καθηγήτρια στο Πανεπιστήμιο East Carolina, αναφέρει πώς εικονική πραγματικότητα είναι «μια προσομοίωση σε υπολογιστή ενός πραγματικού ή φανταστικού περιβάλλοντος με το οποίο ένας χρήστης μπορεί να αλληλεπιδράσει ή να χειριστεί».

Οι απαρχές της εικονικής πραγματικότητας εντοπίζονται βαθιά πίσω στην ανθρώπινη ιστορία:

- Αρχικά, με τη μορφή εικονογράφησης που ξεκινά πριν από 15.000 χρόνια ως σπηλαιογραφία,





**Εικόνα IV.14.** Σύστημα εμβυθιστικής εικονικής πραγματικότητας.

- στη συνέχεια με το συνδυασμό γεωμετρίας και τέχνης για τη δραματοποίηση θεατρικών έργων (5ος αιώνας, Αγάθαρχος ο Σάμιος),
- στο υψηλό επίπεδο 3Δ ρεαλισμού στα έργα τέχνης της Αρχαίας Ελλάδας και της Ρώμης με σημαντική χρήση της προοπτικής,
- στην πρακτική χρήση των κανόνων της οπτικής από την Αναγέννηση και μετά,
- στην πρώτη πανοραμική απεικόνιση (1778, Robert Barker, άποψη της πόλης του Εδιμβούργου 360 μοιρών σε κυκλικό δωμάτιο με διάμετρο περίπου 18 μέτρα) και την εισαγωγή του όρου Πανόραμα κατά το 1791,
- στην επινόηση της φωτογραφίας κατά τα μέσα του 18ου αιώνα, την επινόηση της στερεοσκοπικής οθόνης κατά το 1833 από τον Wheatstone και τη δημιουργία του πρωτότυπου Viewmaster το 1844 από τον David Brewster
- στην επινόηση του πρώτου μηχανικού εξομοιωτή πτήσης για εκπαίδευση πιλότων το 1929 από τον Edward Link
- στην κατασκευή στη δεκαετία του 1950 του «σινεμά του μέλλοντος» από τον Morton Heilig και τη δημιουργία του Sensorama του 1956
- στην κατασκευή των πρώτων οθονών κεφαλής (HMD) το 1961 από τους Comeau και Bryan (εταιρεία Philco)
- στις πρώτες εφαρμογές αλληλεπιδραστικών 3Δ γραφικών και των πρώτων συσκευών αλληλεπίδρασης κατά το 1963 από τον Ivan Sutherland
- στις προσπάθειες του Fred Brooks το 1967 να δημιουργήσει περιβάλλοντα απτικής αλληλεπίδρασης για βιοχημικούς, ώστε να έρχονται σε επαφή με μόρια.

Έκτοτε πολλές τεχνολογικές λύσεις έχουν προταθεί και δοκιμαστεί. Ο στόχος ήταν πάντοτε ένας: να δημιουργηθεί ένα αλληλεπιδραστικό περιβάλλον 3Δ εικόνων πραγματικού χρόνου για την εκπαίδευση, την κατανόηση και την ψυχαγωγία. Τεχνικά, η εικονική πραγματικότητα δεν είναι τίποτε άλλο παρά ένας συνθετικός κόσμος που διέπεται από ένα σύνολο κανόνων, οι οποίοι είναι άλλοτε συμβατοί και άλλοτε όχι με τους κανόνες της πραγματικότητας, με δυνατότητες πλοήγησης και αλληλεπίδρασης, αλλά και απαιτήσεις σε εξειδικευμένο hardware, με στόχο άλλοτε την εκπαίδευση, άλλοτε την προσομοίωση, την ψυχαγωγία, ή συνδυασμό τους.

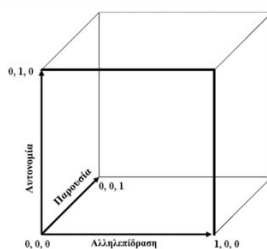
Σήμερα, οι τύποι συστημάτων εικονικής πραγματικότητας είναι πρακτικά τέσσερις:

- **Περιβάλλοντα εμπύθισης (immersive environments)**, όπου ο χρήστης δεν έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει δεδομένα από το φυσικό κόσμο και έχει οθόνη προσαρμοσμένη στο κεφάλι, ακουστικά στα αυτιά, ειδικά γάντια στα χέρια, κοκ.
- **Περιβάλλοντα οθόνης (desktop environments)**, όπου πραγματοποιείται 3Δ αναπαράσταση σε οθόνη υπολογιστή.
- **Περιβάλλοντα προβολής (projected environments)**, όπου το εικονικό περιβάλλον προβάλλεται σε ένα φυσικό χώρο.
- **Ενισχυμένα περιβάλλοντα (augmented environments)**, όπου εικονικά αντικείμενα προβάλλονται πάνω στην εικόνα από τον πραγματικό κόσμο.

Μια κατηγοριοποίηση συστημάτων εικονικής πραγματικότητας πρότεινε το 1992 ο Zeltzer (Zeltzer, 1992), και ονομάστηκε ταξινόμηση Zeltzer με τρία κριτήρια:

- *Αυτονομία*: σχετίζεται με την ικανότητα των αντικειμένων του εικονικού χώρου σε δράση.
- *Αλληλεπίδραση*: σχετίζεται με το ποσοστό ελέγχου που ασκεί ο χρήστης στο περιβάλλον.
- *Παρουσία*: σχετίζεται με το εύρος και την πιστότητα των αισθητήριων του χρήστη που ελέγχονται από το σύστημα.

Με βάση αυτά τα κριτήρια, η ταξινόμηση Zeltzer προτείνει τη σχεδίαση ενός κύβου (Εικόνα IV.15) με πλευρές που αντιστοιχούν στα τρία αυτά κριτήρια και την τοποθέτηση ενός δεδομένου συστήματος μέσα στον κύβο χαρακτηρισμού ανάλογα με το ποσοστό που ικανοποιεί τα εν λόγω κριτήρια. Στο σημείο (1,1,1) αντιστοιχεί το απόλυτο εικονικό περιβάλλον όπου ο χρήστης δεν είναι πλέον σε θέση να ξεχωρίζει το εικονικό από το πραγματικό (Kalawsky, 1994). Ο ίδιος όμως ο Zeltzer διατύπωσε ότι δεν είναι δυνατή η προσομοίωση με πλήρη



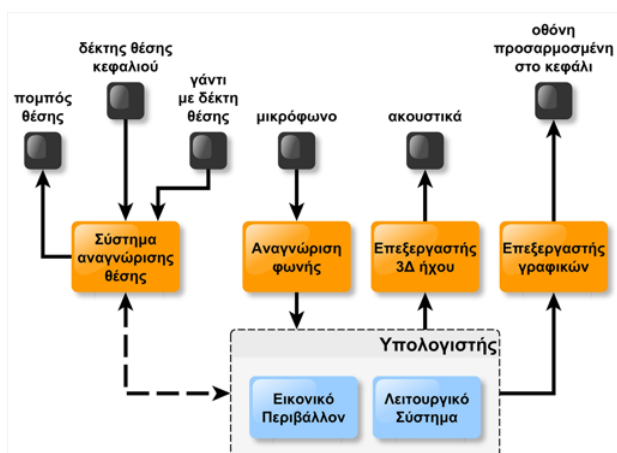
Εικόνα IV.15. Το σύστημα ταξινόμησης Zelizer.

λεπτομέρεια και πολυπλοκότητα, καθιστώντας το σημείο αυτό ένα θεωρητικό όριο. Σε κάθε περίπτωση, και σε γενικές γραμμές, τα τμήματα ενός εικονικού περιβάλλοντος είναι τα εξής:

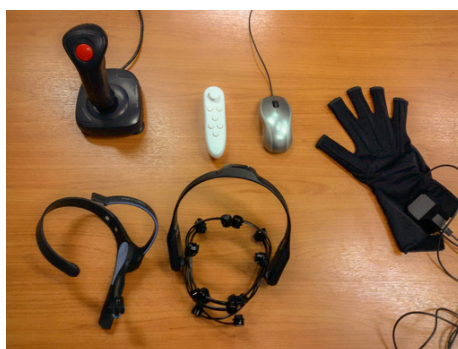
- Χώρος σκηνικού ή γεωμετρία: το σκηνικό που παραμένει αμετάβλητο.
- Χρήστες: εκτελούν ενέργειες, ελέγχουν το οπτικό τους πεδίο.
- Πράκτορες ή εικονικοί ηθοποιοί: οντότητες που ενεργούν ανεξάρτητα από τους χρήστες.
- Αντικείμενα.

Οι τεχνολογίες που υποστηρίζουν σήμερα συστήματα εικονικής πραγματικότητας αποτελούν λύσεις τόσο σε υλικό όσο και λογισμικό. Στην Εικόνα IV.16 δίνεται γενική αναπαράσταση των εμπλεκόμενων τεχνολογιών στην εμβυθιστική εικονική πραγματικότητα. Από πλευράς υλικού απαιτούνται τεχνικές λύσεις για είσοδο δεδομένων (πχ. γάντια αλληλεπίδρασης, αισθητήρια θέσης και γωνίας κεφαλής, κοκ – Εικόνα IV.17), για 3Δ απεικόνιση (πχ. οθόνες κεφαλής – Εικόνα IV.18), για παραγωγή 3Δ ήχου (πχ. ηχεία, ακουστικά) και για ανάδραση (πχ. ανάδραση δύναμης, ανάδραση αφής). Από πλευράς λογισμικού απαιτούνται λύσεις σε δύο επίπεδα: στο επίπεδο ανάπτυξης των εφαρμογών και στο επίπεδο εκτέλεσης.

Μια ειδική κατηγορία τεχνολογιών που αξίζει να αναφερθεί λόγω της εφαρμογής και χρήσης της και λόγω του ικανοποιητικού αποτελέσματος στο ευρύ κοινό είναι αυτή των CAVEs (Cave Automatic Virtual Environment). Η τεχνολογία αυτή αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο του Illinois (Σικάγο) από την ερευνητική ομάδα Thomas DeFanti και Dan Sandin κατά το 1991, στο Electronic Visualization Laboratory και δημοσιεύθηκε το 1993 στο Διεθνές Συνέδριο SIGGRAPH (Cruz-Neira et al., 1993). Η τεχνολογία αυτή παρέχει εμβύθιση με προβολή εικόνων στους τοίχους και στο πάτωμα ενός κύβου που έχει τις διατάξεις δωματίου. Με χρήση κατάλληλων ελαφρών γυαλιών και συσκευών πλοήγησης (πχ. joystick) είναι δυνατή η ελεύθερη κίνηση και περιήγηση μέσα στον εικονικό χώρο που προβάλλεται μέσα στο Cave (Εικόνα IV.19).



**Εικόνα IV.16.** Σχηματική αναπαράσταση τεχνολογιών στην εμβυθιστική εικονική πραγματικότητα.

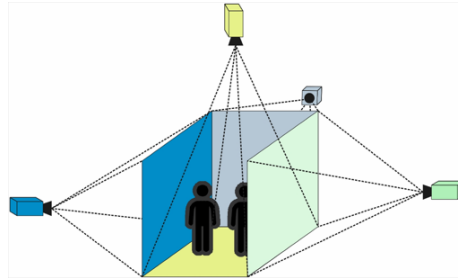


**Εικόνα IV.17.** Συσκευές εισόδου δεδομένων εικονικής πραγματικότητας.



**Εικόνα IV.18.** Συσκευές 3Δ απεικόνισης εικονικής πραγματικότητας.

Η εικονική πραγματικότητα έχει ήδη αρκετές εφαρμογές σε διάφορους τομείς αλλά δεν έχει ακόμη γνωρίσει τη διάδοση που θα μπορούσε. Ο λόγος για τον περιορισμό αυτό δεν έγκειται στην εικονική πραγματικότητα αυτή καθ' αυτήν αλλά στην τεχνολογία που την υποστηρίζει. Λόγω των πολύ υψηλών απαιτήσεων σε δυνατό υλικό και γρήγορο λογισμικό, η εικονική πραγματικότητα δεν είναι ακόμη δυνατό να εφαρμοστεί παντού. Στις παραγράφους που



Εικόνα IV.19. Αρχή λειτουργίας Cave.

ακολουθούν αναφέρονται επιγραμματικά τομείς στους οποίους είτε εφαρμόζεται είτε μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα η εικονική πραγματικότητα με πολλά οφέλη και πλεονεκτήματα.

- *Κατασκευές κτηρίων*, τόσο στη σχεδίαση όσο και την κατασκευή και επίβλεψη της κατασκευής. Κατά τη σχεδίαση μπορεί να γίνει δημιουργία εικονικών κτηρίων με χρήση λογισμικού CAD, εποπτεία σχεδιασμού, έλεγχος λαθών και παραβλέψεων καθώς και μετατροπές στην κατασκευή και στο σχεδιασμό σε πραγματικό χρόνο. Παράλληλα μπορεί να γίνει εικονική απεικόνιση της προτεινόμενης πορείας εργασιών, ώστε να καθίσταται ευκολότερη η κατανόηση της όλης κατασκευής.
- *Σχεδίαση – Design*, όπου μπορεί να γίνει προσομοίωση οποιασδήποτε καινούργιας κατασκευής με δυνατότητα αλλαγής σχεδιασμού στα αρχικά και κρίσιμα στάδια της σχεδίασης.
- *Μηχανική/Βιομηχανία*, όπου οδηγεί σε απλοποίηση προβλημάτων μηχανικής (engineering) σε απλά περιβάλλοντα εικονικής πραγματικότητας με τέτοιο τρόπο ώστε ο καταναλωτής, ο μηχανικός, ο προμηθευτής, οι managers, οι τεχνικοί και οι χρήστες αλληλεπιδρούν με το προϊόν σε μεγάλη κλίμακα. Το αποτέλεσμα είναι σημαντική μείωση κόστους σε όλα τα επίπεδα εργασιών που σχετίζονται και καλύτερη επικοινωνία με τους πελάτες. Μια ειδική εφαρμογή αποτελεί η εικονική αυτοκινητοβιομηχανία, όπου τριδιάστατα γραφικά και εφαρμογές βοηθούν σχεδιαστές και μηχανικούς αυτοκινήτων να κάνουν σωστή αξιολόγηση των μαθηματικών μοντέλων των προϊόντων χωρίς να χρειάζεται να κατασκευάζουν αληθινά πρωτότυπα.
- *Εμπόριο*, όπου δίνεται η δυνατότητα οργάνωσης ιστοτόπων σε μορφή εμπορικών καταστημάτων. Στη σχεδίαση περιλαμβάνεται ακόμη και η σχεδίαση της μορφής του καταστήματος, των ραφιών, των ταμείων, κοκ. Τα πλεονεκτήματα για τον πελάτη και για τους προμηθευτές, τους ιδιοκτήτες και το προσωπικό ενός τέτοιου εμπορικού καταστήματος είναι

πολλαπλά. Επιγραμματικά οι σημαντικότερες δυνατότητες συνοψίζονται στα εξής:

- Δυνατότητα συνολικής παρουσίασης προϊόντων.
  - Δυνατότητα αναλυτικής παρουσίασης κάθε προϊόντος.
  - Συγκριτική παρουσίαση προϊόντων.
  - Εύκολη και κατανοητή πλοήγηση.
  - Δραματική μείωση του κόστους του καταστήματος.
- *Ασφάλεια*, όπου εφαρμόζονται εικονικά περιβάλλοντα εμπύθισης για το στρατιωτικό τομέα, τον τομέα ασφάλειας αλλά και για τη βιομηχανία της ψυχαγωγίας. Δίνεται η δυνατότητα για άμεση επαφή με μοντέλα και συστήματα εικονικής διαπαιδαγώγησης (προσομοιωτές και εξομοιωτές) και παρέχεται εικονική διαπαιδαγώγηση μέσω δικτύου με το πλεονέκτημα πολλαπλοί χρήστες να επικοινωνούν μεταξύ τους.
  - *Ιατρική*, όπου η εικονική πραγματικότητα χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο στην ιατρική εκπαίδευση. Εδώ δημιουργούνται ειδικά «δωμάτια» μέσα στα οποία οι χρήστες μπορούν και αναλύουν τα διάφορα αίτια και τις επιπτώσεις των ασθενειών. Παρέχεται εκπαίδευση των χειρουργών σε τυπικές εγχειρίσεις αλλά και στη μικροχειρουργική με δυνατότητα για εκατοντάδες εικονικές επεμβάσεις πριν την πραγματική επαφή με ασθενείς, την ελαχιστοποίηση των κινδύνων (επιπλοκές κατά την εγχείρηση) και την ελαχιστοποίηση του ιατρικού σφάλματος που οφείλεται σε απειρία. Παράλληλα επιτυγχάνεται δραματική μείωση του κόστους εκπαίδευσης, καταργούνται τα πολυέξοδα εργαστήρια, καταργούνται τα πειράματα σε ζώα και ελαττώνεται ο χρόνος εκπαίδευσης αφού η εκπαίδευση είναι πιο αποτελεσματική.
  - *Συμβολή στην αντιμετώπιση φοβιών*. Οι φοβίες είναι ένα από τα πιο συχνά προβλήματα που προκαλούν το άγχος και συγκαταλέγονται στον τομέα των ψυχιατρικών ανωμαλιών. Σε έρευνα του 1998 στην Ολλανδία, 3.4% του πληθυσμού πάσχει από αγοραφοβία, 7.8% του πληθυσμού πάσχει από κοινωνική φοβία και 10.4% του πληθυσμού πάσχει από ειδικές μορφές φοβίας. Ο παραδοσιακός τρόπος αντιμετώπισης της φοβίας είναι με σωστή σταθερή και σταδιακή θεραπεία κατά την οποία οι ασθενείς υποβάλλονται σε διάφορες καταστάσεις άγχους σε σταδιακή μορφή, από τις πιο απλές μέχρι και τις πιο δύσκολες καταστάσεις. Η χρήση της εικονικής πραγματικότητας προσφέρει μια διαφορετική μέθοδο κατά την οποία ο ασθενής εκτίθεται σε καταστάσεις άγχους σε ένα εικονικό περιβάλλον, το οποίο είναι ασφαλές, χαμηλού κόστους και με δυνατότητα δημιουργίας καταστάσεων που είναι δύσκολο να συναντήσουμε κατά βούληση στην

καθημερινή ζωή. Πειράματα έχουν αποδείξει ότι η χρήση της εικονικής πραγματικότητας έχει φέρει αποτελέσματα κυρίως στις υψοφοβίες, αραχνοφοβίες, αγοραφοβίες, κλειστοφοβίες και φοβίες που αφορούν τη μετακίνηση με αεροπλάνο.





## Βιβλιογραφία

- Bellis, M. (2006). Projectors and the vitascope (1895-1896). Website. <http://theinventors.org/library/inventors/bledisonvitascope.htm>.
- Chen, R. (2011). *Liquid crystal displays fundamental physics and technology*. Hoboken, N.J: Wiley. ISBN 047093087X.
- Cruz-Neira, C., Sandin, D. J., and DeFanti, T. A. (1993). Surround-screen projection-based virtual reality: the design and implementation of the cave. In *In Proceedings of the 20th ACM annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 135–142.
- Favalora, G. E., Napoli, J., Hall, D. M., Dorval, R. K., Giovinco, M., Richmond, M. J., and Chun, W. S. (2002). 100-million-voxel volumetric display. *Cockpit Displays IX: Displays for Defense Applications*, 4712:300–313.
- Hainich, R. and Bimber, O. (2011). *Displays: fundamentals & applications*. Boca Raton: CRC Press. ISBN 1568814399.
- Hornbeck, L. J. (1998). From cathode rays to digital micromirrors-a history of electronic projection display technology. *Texas Instruments Technical Journal*, 15(3,1998):7–46.
- Kalawsky, R. (1994). *The Science of Virtual Reality and Virtual Environments*. Cambridge: University Press.
- Kim, S. G., Hwang, K. H., and Koo, M. K. (1999). Thin-film micromirror array (tma) for cost-competitive information display systems. In *In SID Symposium Digest of Technical Papers*, volume 30, page 1, Oxford, UK. Blackwell Publishing Ltd.
- Koutsoudis, A., Arnaoutoglou, F., Pavlidis, G., Tsioukas, V., and Chamzas, C. (2007). Process evaluation of 3d reconstruction methodologies targeted to web based virtual reality. In *XXI International CIPA Symposium*, pages 1–6.
- Koutsoudis, A., Arnaoutoglou, F., Pavlidis, G., Tsioukas, V., and Chamzas, C. (2008). Creating internet friendly 3d tours using 3d range scanner data.

- In *In procs of the 3D Colour Laser Scanning Conference*, pages 27–28, London, UK. UCL.
- Lee, J.-H., Liu, D. N., and Wu, S.-T. (2008). *Introduction to flat panel displays*. Chichester, U.K: Wiley. ISBN 0470516933.
- Lee, S.-W., Mao, C., Flynn, C. E., and Belcher, A. M. (2002). Ordering of quantum dots using genetically engineered viruses. *Science*, 296(5569):892–895.
- Pavlidis, G., Tsiafakis, D., Provopoulos, G., Chatzopoulos, S., Arnaoutoglou, F., and Chamzas, C. (2006a). Momi: A dynamic and internet-based 3d virtual museum of musical instruments. In *3rd International Conference of Museology*, Mytilene, Greece.
- Pavlidis, G., Tsirliganis, N., Tsiafakis, D., Arnaoutoglou, F., and Chamzas, C. (2006b). 3d digitization of monuments: the case of mani. In *3rd International Conference of Museology*, Mytilene, Greece.
- Sherman, L. M. (2004). 3d printers lead growth of rapid prototyping. *Plastics technology*, 50(8):43–46.
- Tannas, L. (1985). *Flat-panel displays and CRTs*. New York: Van Nostrand Reinhold. ISBN 0442282508.
- Tsioukas, V., Tsirliganis, N., Pavlidis, G., Arnaoutoglou, F., Chamzas, C., Mpakourou, E., and Mexia, A. (2005). Photogrammetric modelling of byzantine churches. In *CIPA 2005 - XX International Symposium*, Torino, Italy.
- Tsirliganis, N., Pavlidis, G., Koutsoudis, A., Papadopoulou, D., Tsompanopoulos, A., Stavroglou, K., Loukou, Z., and Chamzas, C. (2002a). Archiving 3d cultural objects with surface point-wise database information. In *In Proceedings of the First IEE International Symposium on Data Processing Visualization and Transmission*, pages 766–769.
- Tsirliganis, N., Pavlidis, G., Koutsoudis, A., Politou, E., Tsompanopoulos, A. and Stavroglou, K., and Chamzas, C. (2002b). New ways in digitization and visualization of cultural objects. In *In IEEE 14th International Conference on Digital Signal Processing*, volume 1, pages 475–478.
- Van Berkel, C., Franklin, A. R., and Mansell, J. R. (1996a). Design and applications of multiview 3d-lcd. In *In Proc. SID Euro-Display*, volume 96.
- Van Berkel, C., Parker, D. W., and Franklin, A. R. (1996b). Multiview 3d lcd. *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems III*, 2653:32–40.

- Whaley, S. R., English, D., Hu, E. L., Barbara, P. F., and Belcher, A. M. (2000). Selection of peptides with semiconductor binding specificity for directed nanocrystal assembly. *Nature*, 405(6787):665.
- Wohlers, T. (2005). Factors to consider when choosing a 3d printer. Online article. <http://wohlersassociates.com/NovDec05TCT3dp.htm>.
- Zeltzer, D. (1992). Autonomy, interaction, and presence. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 1(1):127–132.



*—When something is such a creative medium as the Web, the limits to it are our imagination.*

Tim Berners-Lee



## Δημοσίευση στον παγκόσμιο ιστό

### V.1 Εισαγωγή

Στο παρόν Παράρτημα παρουσιάζεται μια πρακτική προσέγγιση στην 3Δ ψηφιοποίηση και δημοσίευση 3Δ περιεχομένου στο διαδίκτυο. Η διαδικασία που περιγράφεται υλοποιεί τη μέθοδο Δομής από κίνηση (SFM-MVS) μέσω της χρήσης του λογισμικού Agisoft Metashape (μέχρι το 2018 γνωστό ως Photoscan), ενώ περιλαμβάνει βήμα επεξεργασίας του παραγόμενου 3Δ ψηφιακού αντιγράφου με το ελεύθερο λογισμικό MeshLab και ολοκληρώνει με τη δημοσίευση του 3Δ αντιγράφου στον Παγκόσμιο Ιστό με απλό προγραμματισμό βασισμένο WebGL. Υπενθυμίζεται ότι η προβολή 3Δ περιεχομένου στον Ιστό δεν έχει τις υψηλές απαιτήσεις σε γεωμετρική ανάλυση και ακρίβεια που έχει ένα τυπικό έργο 3Δ ψηφιοποίησης, αλλά στοχεύει σε φωτορεαλιστική 3Δ απεικόνιση του αντικειμένου ενδιαφέροντος στο ευρύ κοινό. Συνεπώς πολλοί από τους περιορισμούς και πολλές από τις προδιαγραφές φεύγουν από το προσκήνιο και η αποτύπωση μπορεί να γίνει με απλό εξοπλισμό, χωρίς υπολογισμούς απόστασης, χωρίς επιλογή συνθηκών, χωρίς μεγάλη ακρίβεια ανακατασκευής αλλά ικανοποιητική αποτύπωση της επιφανειακής υφής που τελικά θα αποδώσει το επιθυμητό αποτέλεσμα της αληθοφάνειας.

### V.2 Παραγωγή του πρωτογενούς υλικού

Όπως έχει αναφερθεί στην περιγραφή της μεθόδου Δομής από κίνηση, πρώτο βήμα στην εφαρμογή της μεθόδου είναι η συλλογή των πρωτογενών δεδομένων, το οποίο δεν είναι άλλο από ένα μεγάλο σύνολο από ψηφιακές φωτογρα-

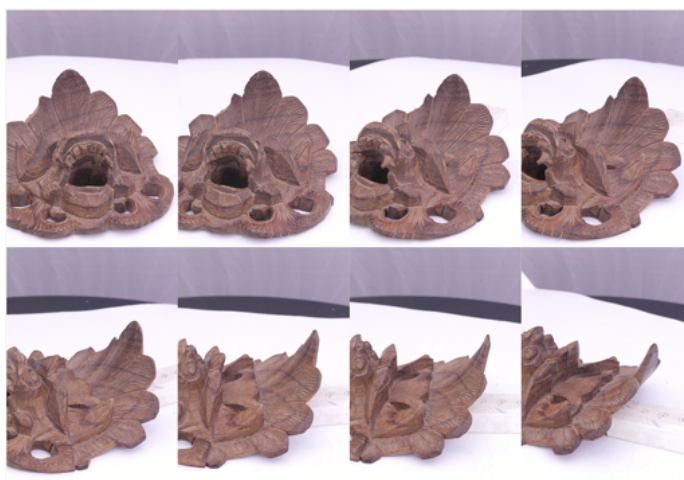
φίες που καλύπτουν όλη την επιφάνεια του αντικειμένου που ψηφιοποιείται και το προβάλλουν από διαφορετικές οπτικές γωνίες.

Στο αντίστοιχο κεφάλαιο έχουν αναφερθεί αναλυτικά οι διαδικασίες που πρέπει να ακολουθούνται και οι συμβάσεις που πρέπει να γίνονται για το σωστό προγραμματισμό και υλοποίηση όλων των ενεργειών που αναμεσά τους είναι και το σημαντικό βήμα της συλλογής των δεδομένων (φωτογράφιση). Η όλη διαδικασία που θα περιγραφεί χρησιμοποιεί συγκεκριμένο παράδειγμα (μία ξυλόγλυπτη μάσκα), αλλά προφανώς η όλη προσέγγιση έχει γενικότερη εφαρμογή. Στην Εικόνα V.1 παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα υποσύνολο του συνόλου των φωτογραφιών που ελήφθησαν με τη χρήση μίας mirrorless φωτογραφικής μηχανής τύπου Samsung NX1000 με ανάλυση φωτογραφίας 20 MPixels, με φακό που προσφέρει εστιακή απόσταση 20-50 mm (αποδίδει μια εστιακή απόσταση αντίστοιχη 30-77 mm σε 35 mm πλήρους καρέ), διαθέτει οπτικό αισθητήριο μεγέθους 369.72 mm<sup>2</sup> (23.7 mm x 15.6 mm), με μέγεθος εικονοστοιχείου 4.33 μm. Η συλλογή των φωτογραφιών έγινε σε εσωτερικό χώρο χωρίς επαγγελματικό φωτισμό σε συνθήκες φωτισμού γραφείου. Πιο συγκεκριμένα, οι ρυθμίσεις της φωτογραφικής μηχανής κατά τη συλλογή ήταν οι εξής:  $f/22$  αριθμός διαφράγματος ανοίγματος, χρόνος έκθεσης 2 δεύτερα, ISO 200, εστιακή απόσταση 50 mm. Η ξύλινη μάσκα τοποθετήθηκε σε μια χαμηλού κόστους χειροκίνητη βάση περιστροφής, η οποία είχε καλυφθεί με λευκό χαρτί. Συνολικά για το εν λόγω έργο ελήφθησαν 36 χρήσιμες φωτογραφίες, οι οποίες λόγω της αυτόματης φωτομέτρησης του φωτογραφικού συστήματος παρουσίασαν μια σχετικά ομοιόμορφη φωτεινότητα και χρωματική απόδοση και καμία περαιτέρω διαδικασία επεξεργασίας των φωτογραφιών δεν εφαρμόστηκε. Για τη πλήρη αποτύπωση του αντικειμένου όμως θα χρειαζόνταν μεγαλύτερο πλήθος φωτογραφιών όπου θα το παρουσίαζαν και από την πίσω πλευρά.

Επίσης, αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι μια από τις πλέον καταστρεπτικές διαδικασίες επεξεργασίας είναι αυτή της αποκοπής τμημάτων των φωτογραφιών και πρέπει να αποφεύγεται σε κάθε περίπτωση καθώς οδηγεί στη συνέχεια το σύστημα ανάκτησης γεωμετρίας να χάσει το συγχρονισμό του λόγω μεταβολής του εκτιμώμενου οπτικού κέντρου της περικομμένης φωτογραφίας.

### V.3 Δημιουργία του 3Δ ψηφιακού αντιγράφου

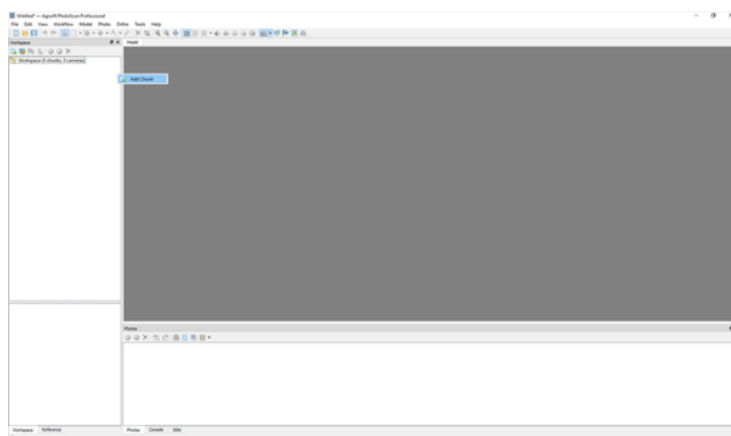
Μετά τη φωτογράφιση και την επιλογή των χρήσιμων φωτογραφιών έρχεται η σειρά για τη χρήση λογισμικού που υλοποιεί τη μέθοδο της Δομής από κίνηση. Στο παράδειγμα που παρουσιάζεται γίνεται χρήση του λογισμικού Agisoft Metashape (μέχρι το 2018 γνωστό ως Photoscan), το οποίο υλοποιεί με αποδοτικό τρόπο τη μέθοδο και μπορεί να παράγει ικανοποιητικά 3Δ μοντέλα. Στο λογισμικό αυτό μπορεί να εφαρμοστεί μια διαδικασία 5 βημάτων όπως φαίνεται στην Εικόνα V.2. Πρώτο βήμα μετά την έναρξη του λογισμικού είναι η δημιουργία ενός νέου υποέργου (Chunk όπως ονομάζονται στο λογισμικό) το



**Εικόνα V.1.** Υποσύνολο φωτογραφιών για την παραγωγή 3Δ μοντέλου.



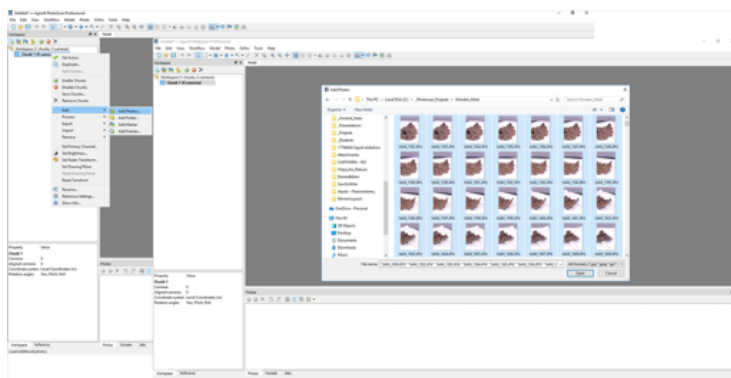
**Εικόνα V.2.** Βήματα εφαρμογής της Δομής από κίνηση.



**Εικόνα V.3.** Δημιουργία νέου “υποέργου”.

οποίο θα περιλαμβάνει σύνολο φωτογραφιών και θα μπορεί να αποκατασταθεί ανεξάρτητα ως 3Δ ψηφιακό αντίγραφο (Εικόνα V.3).

Επόμενο βήμα είναι η επιλογή και εισαγωγή στο εν λόγω υποέργο (Chunk 1) του συνόλου των φωτογραφιών που θα χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή του 3Δ ψηφιακού αντιγράφου (Εικόνα V.4). Αφού οι εικόνες εισαχθούν, παρουσιάζονται ως μικρογραφίες σε αντίστοιχο χώρο και μπορεί να αρχίσει η διαδικασία με την ευθυγράμμιση των φωτογραφιών (align photos).



**Εικόνα V.4.** Εισαγωγή του συνόλου των φωτογραφιών στο "υπόεργο".

Η διαδικασία της ευθυγράμμισης φωτογραφιών ουσιαστικά υλοποιεί τη μέθοδο της Δομής από κίνηση όπως αρχικά είχε προταθεί, και αναμένεται να προκύψει ένα αραιό 3Δ νέφος σημείων που θα απεικονίζει χονδρικά το 3Δ ψηφιακό αντίγραφο που θα παραχθεί τελικά (Εικόνα V.5). Στη φάση αυτή, ανάλογα και με τις συνθήκες φωτογράφισης και το φωτογραφικό σύστημα, γίνεται, γενικά, χρήση παραμέτρων με λίγες απαιτήσεις, πχ:

Accuracy: highest, Pair preselection: Generic, Point limit: 5000

Στη συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία δημιουργίας πυκνού νέφους σημείων (Build dense cloud) που ουσιαστικά υλοποιεί παραλλαγή της μεθόδου MVS χρησιμοποιώντας το αραιό νέφος σημείων που έχει ήδη παραχθεί (Εικόνα V.6). Λόγω της εφαρμογής που στοχεύει σε απλή δημοσίευση στον Ιστό, οι παράμετροι μπορούν να οριστούν με μια σχετικά «χαλαρότητα»:

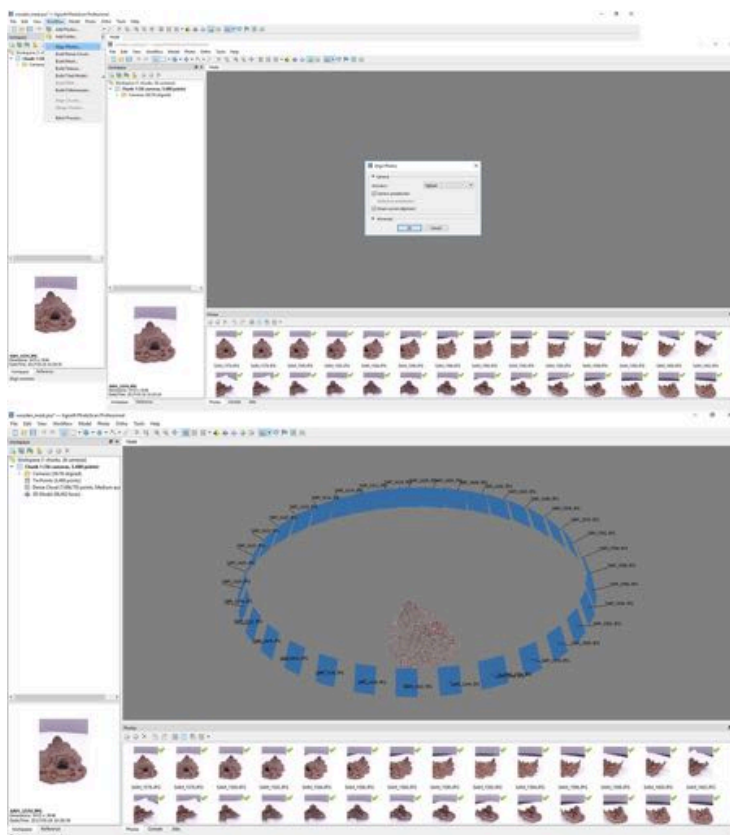
Quality: Medium, Advanced: defaults

Επόμενο (τρίτο) βήμα αποτελεί η δημιουργία της πολυγωνικής πλεγματοσειράς (Build mesh) (Εικόνα V.7), μια διαδικασία που ουσιαστικά ενώνει τα σημεία του πυκνού νέφους 3Δ σημείων σε μια κατά το δυνατόν ενιαία 3Δ επιφάνεια, ολοκληρώνοντας τον κύκλο υπολογισμών που σχετίζονται με τη γεωμετρική απόδοση του αντικειμένου που έχει αναγνωριστεί από τις φωτογραφίες που χρησιμοποιήθηκαν. Κι εδώ οι παράμετροι μπορούν να επιλεγούν με σχετική ευκολία, και ενδεικτικά αναφέρονται:

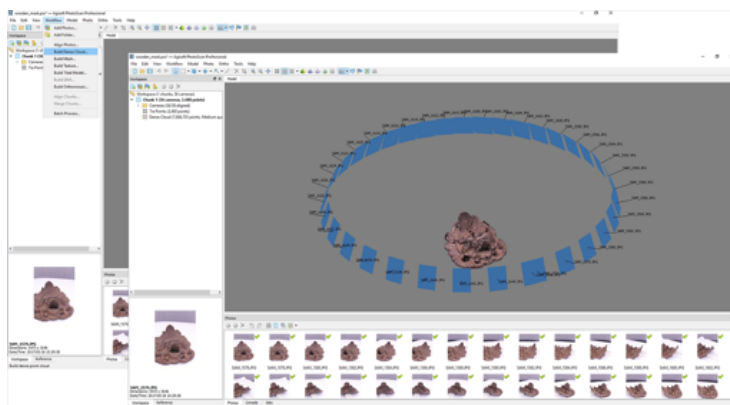
Surface type: Arbitrary, Source data: Dense cloud, Polygon count: High

Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι αν και η απεικόνιση φαίνεται να έχει μια ικανοποιητική χρωματική απόδοση της επιφάνειας του αντικειμένου, η απόδοση αυτή βασίζεται μόνο στα σημεία του πυκνού νέφους και είναι ημιτελής. Για



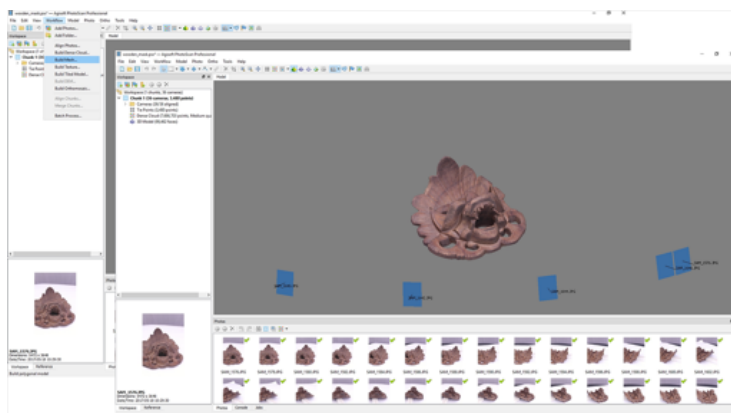


Εικόνα V.5. 1: ευθυγράμμιση φωτογραφιών (Align photos).

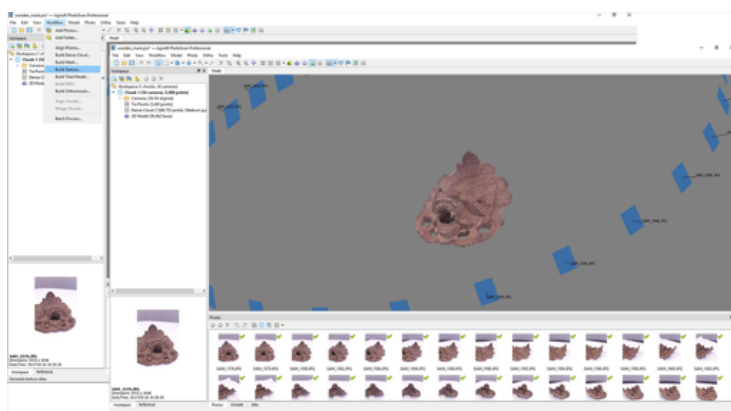


Εικόνα V.6. Βήμα 2: δημιουργία πυκνού νέφους (Build dense cloud).

το λόγο αυτό εφαρμόζεται το τέταρτο και τελευταίο βήμα της διαδικασίας που υλοποιεί τη δημιουργία της πραγματική υφής του 3D ψηφιακού αντιγράφου. Η διαδικασία εκτελείται μέσω της επιλογής Build texture με εύκολα επιλεγμένες



Εικόνα V.7. Βήμα 3: δημιουργία πλεγματοσειράς (Build mesh).



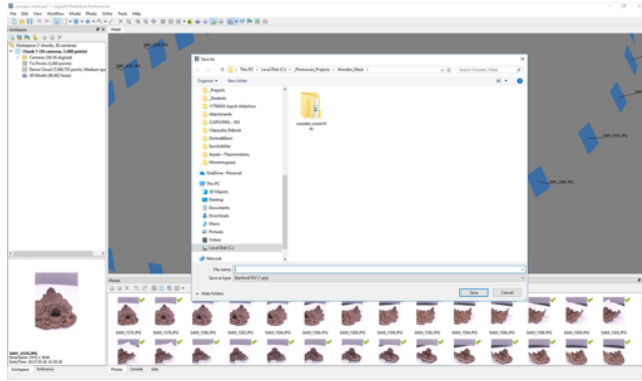
Εικόνα V.8. Βήμα 4: δημιουργία υφής (Build texture).

παραμέτρους

Mapping mode: Generic, Blending mode: Mosaic, Texture size: 4096

και έχει ως αποτέλεσμα την τελική φωτορεαλιστική απόδοση του 3Δ ψηφιακού αντιγράφου (Εικόνα V.8).

Τελικό βήμα για την αποθήκευση του ψηφιακού αντιγράφου είναι η εξαγωγή του από το λογισμικό υπό μια μορφή αρχείου που είναι επιθυμητή είτε για περαιτέρω επεξεργασία είτε για δημοσίευση στον Ιστό. Στη διαδικασία που περιγράφεται στο παρόν Παράρτημα προτείνεται η εξαγωγή σε μορφότυπο PLY είτε OBJ (Εικόνα V.9) που οδηγεί συνήθως στην αποθήκευση δύο αρχείων, ενός που περιγράφει τη γεωμετρία του αντιγράφου και ενός που περιγράφει τη χρωματική υφή (συνήθως Joint Photographic Experts Group (JPEG) ή Portable Network Graphics (PNG)).



Εικόνα V.9. Εξαγωγή του τελικού 3Δ ψηφιακού αντιγράφου.

## V.4 Επεξεργασία του 3Δ ψηφιακού αντιγράφου

Πολλές φορές είναι αναγκαία η επεξεργασία του παραγόμενου 3Δ αντιγράφου, είτε για περικοπή «άχρηστης» πληροφορίας, είτε για περιορισμό του εύρους της ανακατασκευασμένη σκηνής, είτε για την τοποθέτηση του κέντρου βάθους το αντιγράφου στο κέντρο συστήματος συντεταγμένων προβολής, είτε ακόμη και στην κλιμάκωση του αντιγράφου, καθώς, όπως έχει αναφερθεί, η ανακατασκευή SFM-MVS οδηγεί σε ανάκτηση της δομής σε τυχαίο σύστημα συντεταγμένων. Επεξεργασία του αντιγράφου μπορεί να γίνει είτε μέσα στο ίδιο λογισμικό του Agisoft Metashape (μέχρι το 2018 γνωστό ως Photoscan) όπου παρέχει βασικά εργαλεία περικοπής, είτε σε άλλα λογισμικά επεξεργασίας 3Δ εικόνων. Για τους σκοπούς του παρόντος Παραρτήματος παρουσιάζεται η επιλογή χρήσης του ελεύθερου λογισμικού MeshLab.

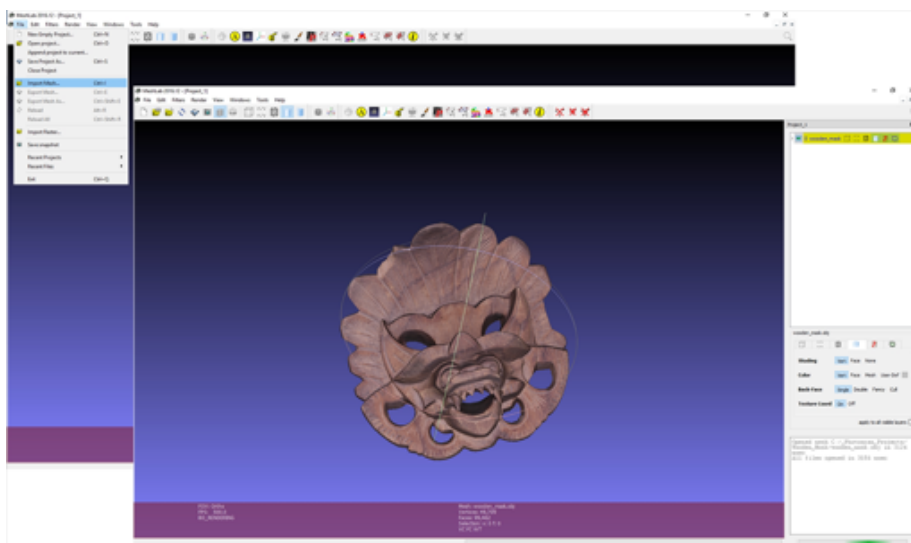
Πρώτη ενέργεια είναι η εισαγωγή του αντιγράφου στο MeshLab μέσω της επιλογής Import mesh (Εικόνα V.10). Μια από τις βασικές ενέργειες επεξεργασίας είναι η τοποθέτηση του κέντρου του συστήματος συντεταγμένων της 3Δ σκηνής περίπου στο κέντρο βάρους, ώστε να είναι πιο εύκολη και κατανοητή η πλοήγηση στο αντίγραφο όταν δημοσιευθεί στον Ιστό (Εικόνα V.11). Αυτό γίνεται από την επιλογή

Normals, Curvature and Orientation >  
Transform: Move, Translate, Center

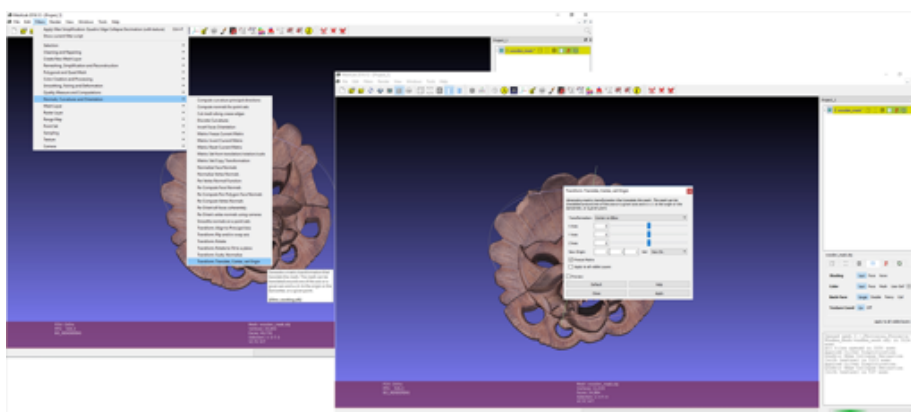
όπου επιλέγεται ο μηδενισμός των αξόνων και η ενεργοποίηση των επιλογών

translate center of bbox to the origin, Freeze Matrix

Τελικό και πολύ σημαντικό βήμα πριν την αποθήκευση για δημοσίευση στον Ιστό αποτελεί η απλοποίηση της γεωμετρίας του 3Δ αντιγράφου, καθώς αναμένεται έως αυτό το σημείο να αντιστοιχεί σε πολύ μεγάλο αρχείο δεδομένων.



**Εικόνα V.10.** Εισαγωγή 3D ψηφιακού αντιγράφου στο MeshLab.

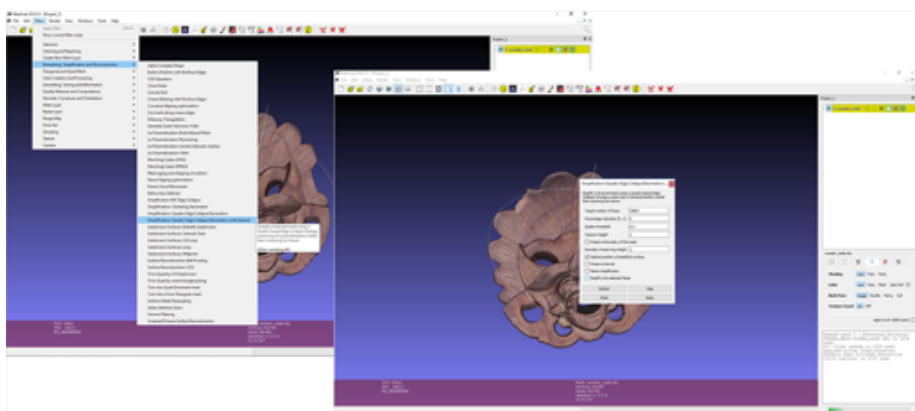


**Εικόνα V.11.** Επανατοποθέτηση του κέντρου του συστήματος συντεταγμένων.

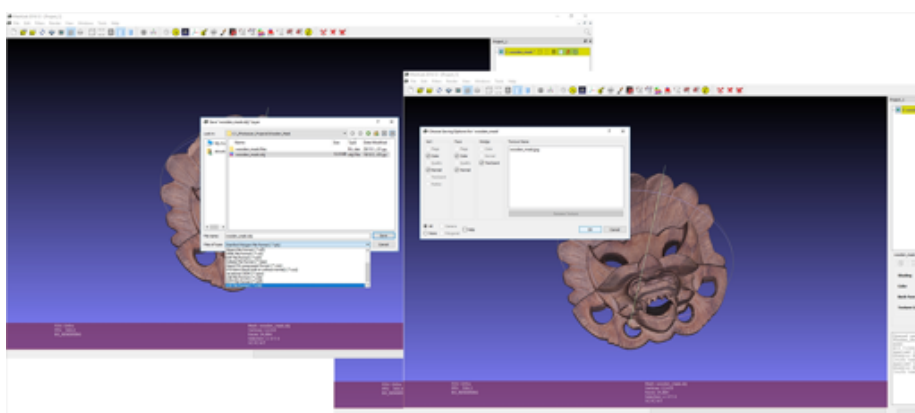
Για την απλοποίηση των 3D μοντέλων το MeshLab διαθέτει την επιλογή

Remeshing, Simplification and Reconstruction >  
Quartic Edge Collapse Decimation (with texture)

όπου κανείς πρέπει να πειραματιστεί με το πλήθος των Target number of faces, ώστε να επιτύχει την καλύτερη σχέση μικρού αρχείου και ικανοποιητικής γεωμετρίας για φωτορεαλιστική απεικόνιση (Εικόνα V.12). Τέλος ακολουθεί αποθήκευση του 3D αντιγράφου για τον Ιστό (Εικόνα V.13) μέσω της επιλογής Export Mesh As και επιλογή του τύπου αρχείου X3D και τυπικές ρυθμίσεις όπως:



**Εικόνα V.12.** Απλοποίηση του 3D ψηφιακού αντιγράφου.



**Εικόνα V.13.** Αποθήκευση του 3D ψηφιακού αντιγράφου για δημοσίευση στον Ιστό.

Vert: Color, Face:Normal, Wedge: TexCoord

και επιλογή του αρχείου της υφής (συνήθως ένα JPG ή PNG αρχείο).

## V.5 Δημιουργία ιστοσελίδας 3Δ ψηφιακού αντιγράφου

Εφόσον το τελικό 3Δ ψηφιακό αντίγραφο έχει αποθηκευτεί σε μορφότυπο X3D είναι δυνατή η άμεση δημοσίευσή του στον Παγκόσμιο Ιστό χωρίς περαιτέρω επεξεργασία ή την ανάγκη για εγκατάσταση άλλων λογισμικών. Αυτό που απαιτείται είναι να δημιουργηθεί μια στοιχειώδης ιστοσελίδα που θα περιλαμβάνει το 3Δ αντίγραφο. Ο απλούστερος τρόπος είναι να γίνει χρήση του HyperText Markup Language (HTML) κώδικα που ακολουθεί, ο οποίος μπορεί να προσαρμοστεί εύκολα στις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής:

**Κώδικας V.1:** Βασικός κώδικας ιστοσελίδας παρουσίασης 3Δ μοντέλου.

---

```

1 <html>
2 <head>
3 <meta http-equiv='Content-Type' content='text/html'; charset=utf-8'></
  meta>
4 <!-- connect to the x3dom resource -->
5 <link rel='stylesheet' type='text/css' href='http://www.x3dom.org/x3dom
  /release/x3dom.css'></link>
6 <script type='text/javascript' src='http://www.x3dom.org/x3dom/release/
  x3dom.js'></script>
7 </head>
8 <body bgcolor=black text=white leftmargin=0 topmargin=0 marginwidth=0
  marginheight=0>
9 <!-- load and display the 3D model -->
10 <x3d id='3d_model' showStat='false' showLog='false' x='0px' y='0px'
  style='width:100%; height:100%;'>
11 <scene>
12 <Background skyColor='0 0 0'></Background>
13 <inline url='column.x3d' ></inline>
14 <scene>
15 </x3d>
16 </body>
17 </html>

```

---

# Κατάλογος Εικόνων

1.1	Ψηφιογραφικές και διανυσματικές εικόνες . . . . .	3
1.2	Μη-φωτορεαλιστική απόδοση 3Δ σκηνής . . . . .	6
1.3	Φωτορεαλισμός με το λογισμικό Blender 3D – Classroom Demo Scene . . . . .	6
1.4	Δημιουργία και προβολή 3Δ γραφικών σε 2Δ μονάδα εξόδου .	8
1.5	Μέθοδοι απεικόνισης 3Δ διακριτών επιφανειών . . . . .	12
1.6	Υπολογισμός διανυσμάτων επιφάνειας . . . . .	12
1.7	Ογκομετρικές αναπαραστάσεις προτομής σε διαφορετικές αναλύσεις (μείωση του όγκου voxel οδηγεί σε αύξηση της ανάλυσης)	16
1.8	Παράδειγμα μετατροπής δύο τριγώνων με μια κοινή ακμή (1-3) σε παραμετρική επιφάνεια οριζόμενη στον 3Δ χώρο . . . . .	16
1.9	Μοντέλο πολλαπλών αναλύσεων και επίπεδα λεπτομέρειας . .	21
1.10	Απομείωση τριγωνικής πλεγματοσειράς . . . . .	21
1.11	Παράδειγμα δημιουργίας χαρτών για normal mapping και displacement mapping και εφαρμογή του normal mapping σε απλό παραλληλεπίπεδο . . . . .	23
1.12	Παράδειγμα displacement mapping . . . . .	23
1.13	Ορισμός χρωμάτων σε OpenGL . . . . .	24
2.1	Μέσα προβολής πολιτιστικού αποθέματος . . . . .	29
2.2	Διάθλαση και διασκορπισμός φωτός λείζερ στην επιφάνεια ενός μαρμάρου τύπου Θάσου . . . . .	36
2.3	Γραφική αναπαράσταση της απροσδιοριστίας στη μέτρηση ανακλώμενης δέσμης σε φωτοπερατή επιφάνεια . . . . .	36
2.4	Επιφανειακές καμπυλώσεις που δημιουργούν περιορισμούς στην ψηφιοποίηση . . . . .	37
2.5	Ανακλάσεις στην επιφάνεια και ασυνέχειες της δέσμης φωτός λείζερ . . . . .	37
2.6	Αδυναμία αποφυγής πρόσκρουσης . . . . .	37
2.7	Μέθοδοι και αποτελεσματικότητα αντίληψης του βάθους . . .	39
2.8	Συγκριτικό γράφημα διαστάσεων πραγματικών αντικειμένων .	42
2.9	Νόμος ημίτονων, νόμος συνημιτόνων, όμοια τρίγωνα και τριγωνισμός με αριθμητικό παράδειγμα . . . . .	51
2.10	Η διαδικασία τριγωνισμού σημειακής ακτίνας λείζερ . . . . .	52

2.11	Μοτίβα δομημένου φωτός λέιζερ . . . . .	52
2.12	Σύνθετο σύστημα τριγωνισμού λέιζερ με χρήση καθρέπτη . . .	54
2.13	Αρχή λειτουργίας συγχρονισμένου περιστροφικού συστήματος τριγωνισμού λέιζερ με φακό μεγάλης εστιακής απόστασης . .	55
2.14	Αρχή λειτουργίας περίπλοκου σαρωτή λέιζερ με πολλαπλούς καθρέφτες . . . . .	56
2.15	Ακτίνα λέιζερ γραμμικού μοτίβου εντός και εκτός εστίασης . .	58
2.16	Όρια περίθλασης και σχέση διαστάσεων μεταξύ ακτίνας λέιζερ και αντικειμένου . . . . .	58
2.17	Διάχυση ακτίνας λέιζερ πάνω σε επιφάνεια μετρούμενου αντικειμένου . . . . .	59
2.18	Τύποι επιφανειών και συμπεριφορά τους στην ανάκλαση δέσμης λέιζερ . . . . .	61
2.19	Περιπτώσεις εσφαλμένου υπολογισμού βάθους . . . . .	61
2.20	Παράδειγμα νέφους σημείων με θόρυβο μέτρησης και επιπτώσεις στην προκύπτουσα πλεγματοσειρά . . . . .	63
2.21	Διαδικασία μεθόδου Σχήμα από σιλουέτα . . . . .	65
2.22	Παράδειγμα αυτοματοποιημένου συστήματος Σχήμα από σιλουέτα . . . . .	65
2.23	Απλός τρόπος αφαίρεσης φόντου σε εφαρμογές Σχήματος από σιλουέτα . . . . .	67
2.24	Σύγκριση αποτελεσμάτων μεθόδων αφαίρεσης φόντου . . . .	68
2.25	Ο όγκος που δημιουργεί η προοπτική προβολή μιας σιλουέτας σε 3Δ χώρο . . . . .	69
2.26	Η τεχνική της άμεσης τομής σε πλεγματοσειρά από πολλαπλές σιλουέτες . . . . .	70
2.27	Ομαλοποίηση υψής με ανάμειξη τιμών εικονοστοιχείων στα όρια διαφορετικών φωτογραφιών . . . . .	71
2.28	Παράδειγμα κοίλης επιφάνειας που δεν εμφανίζεται στις σιλουέτες . . . . .	72
2.29	Μείωση γεωμετρικού σφάλματος με την αύξηση του πλήθους σιλουετών . . . . .	73
2.30	Απόκρυψη γεωμετρικών ατελειών μέσω ικανοποιητικής πληροφορίας υψής . . . . .	74
2.31	Ανατομία μιας χαμηλής ποιότητας εκδοχής ενός 3Δ ψηφιακού αντιγράφου . . . . .	74
2.32	Γεωμετρικά σφάλματα σε ανακατασκευασμένη κύλινδρο με Σχήμα από σιλουέτα . . . . .	74
2.33	Θέσεις φωτογράφισης και ο αντίκτυπος τους στην 3Δ ανακατασκευή στη Σχήμα από σιλουέτα . . . . .	75
2.34	Μικρό πλήθος σιλουετών και σφάλματα 3Δ ανακατασκευής στη Σχήμα από σιλουέτα . . . . .	76



2.35 Παραδείγματα 3Δ ανακατασκευών με τη μέθοδο Σχήμα από σιλουέτα . . . . .	76
2.36 Εφαρμογή της μεθόδου Σχήμα από δομημένο φωτισμό . . . . .	78
2.37 Δυναδικά μοτίβα διαφορετικής χωρικής συχνότητας σε εφαρμογή Σχήμα από δομημένο φωτισμό . . . . .	80
2.38 Διαδικασία εξαγωγής 3Δ γεωμετρίας από στερεοζεύγος . . . . .	86
2.39 Επιπολική γεωμετρία . . . . .	86
2.40 Γενικευμένη διαδικασία αντιστοίχισης σημείων σε ένα στερεοζεύγος φωτογραφιών . . . . .	86
2.41 Τα διακριτά βήματα της στερεοφωτογράφισης . . . . .	87
2.42 3Δ ανακατασκευή με τη μέθοδο Δομή από κίνηση . . . . .	90
2.43 Αναπαράσταση του προβλήματος εντοπισμού των θέσεων λήψης φωτογραφιών στη Δομή από κίνηση . . . . .	91
2.44 Αναπαράσταση του προβλήματος εντοπισμού ομόλογου σημείου στον 3Δ χώρο σε τρεις όψεις . . . . .	92
2.45 Εκτιμώμενη θέση ομόλογου σημείου με γνωστό τον πίνακα μετασχηματισμών προβολής . . . . .	93
2.46 Αρχή λειτουργίας της μεθόδου Σχήμα από μεταβαλλόμενη εστίαση . . . . .	98
2.47 Φωτογραφίες μικρού βάθους πεδίου με μεταβαλλόμενη εστίαση για εφαρμογή της μεθόδου Σχήμα από μεταβαλλόμενη εστίαση . . . . .	98
2.48 Χάρτης βάθους που προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου Σχήμα από μεταβαλλόμενη εστίαση . . . . .	98
2.49 Απλοποιημένη αναπαράσταση συστήματος Σχήμα από σκιά . . . . .	99
2.50 Παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου Σχήμα από σκιά . . . . .	99
2.51 Αρχή λειτουργίας 3Δ ψηφιοποίησης με σύστημα μέτρησης συντεταγμένων με επαφή . . . . .	100
3.1 Συνδυασμός των μεθόδων Σχήμα από σιλουέτα και Σχήμα από στερεοφωτογράφιση . . . . .	113
4.1 Ροή εργασιών 3Δ ψηφιοποίησης: (α) Γενικό διάγραμμα διαδικασιών, (β) συνοπτική παρουσίαση διαδικασιών επεξεργασίας δεδομένων 3Δ ψηφιοποίησης . . . . .	132
4.2 Ομαλοποίηση νέφους σημείων . . . . .	134
4.3 Ευθυγράμμιση και ενοποίηση τμηματικών σαρώσεων . . . . .	137
4.4 Αποτελέσματα διαφορετικών αλγορίθμων απλοποίησης τριγωνικών πλεγματοσειρών . . . . .	140
4.5 Αναγνώριση ασυνεχειών σε πλεγματοσειρά . . . . .	141
4.6 Προβολή τμημάτων εικόνων πάνω στην πλεγματοσειρά για τη δημιουργία υφής . . . . .	142

5.1	Γραφικό περιβάλλον λογισμικού MeshLab για την ευθυγράμμιση τμηματικών σαρώσεων . . . . .	148
5.2	Εμφάνιση 3Δ μοντέλου στο γραφικό περιβάλλον του λογισμικού MeshLab . . . . .	149
5.3	Εμφάνιση 3Δ μοντέλου στο γραφικό περιβάλλον του λογισμικού CloudCompare . . . . .	150
5.4	Ομαλοποίηση χρωματικών διαφορών στο Viewpoint 3D Photo Studio . . . . .	150
5.5	Τεχνικές απόδοσης φωτοσκίασης και χαρακτηριστικών επιφάνειας από το λογισμικό MeshLab . . . . .	151
5.6	Οπτικοποίηση της απόκλισης μεταξύ επιφανειών με το λογισμικό CloudCompare . . . . .	152
6.1	Αντίγραφο κυκλαδικού γυναικείου ειδωλίου . . . . .	162
6.2	Θέσεις φωτογράφισης για το κυκλαδικό ειδώλιο . . . . .	163
6.3	Σύγκριση 3Δ δεδομένων σάρωσης λείζερ και Δομής από κίνηση για κυκλαδικό ειδώλιο . . . . .	163
6.4	Σύγκριση 3Δ δεδομένων σάρωσης λείζερ και δομής από κίνηση για το Κιουτουκλού . . . . .	165
I.1	Καλή πρακτική λήψης φωτογραφιών για κινητό αντικείμενο . . . . .	179
I.2	Καλή πρακτική λήψης φωτογραφιών για πρόσοψη κτηρίου . . . . .	180
I.3	Καλή πρακτική λήψης φωτογραφιών σε εσωτερικό χώρο . . . . .	180
I.4	Καλή πρακτική λήψης φωτογραφιών με σύγκλιση . . . . .	181
I.5	Γεωμετρικά στοιχεία προσδιορισμού της δειγματοληψίας εδάφους . . . . .	181
I.6	Ο λόγος $B/D$ και η επίπτωσή του στο σφάλμα μέτρησης . . . . .	183
I.7	Οι τρεις βασικές παράμετροι μίας φωτογραφικής μηχανής . . . . .	184
I.8	Οπτικοποίηση σχέσης διαφράγματος και βάθος πεδίου . . . . .	184
I.9	Προβολή σημείου $X$ από τον 3Δ χώρο στο επίπεδο της εικόνας . . . . .	186
I.10	Παραδείγματα από φωτοσταθερά φιλικά προς τη μέθοδο SFM-MVS συμβατά με το λογισμικό Agisoft Metashape (μέχρι το 2018 γνωστό ως Photoscan) . . . . .	187
I.11	Χρήση αυτόματης περιστρεφόμενης βάσης βηματικού κινητήρα με δυνατότητα χειρισμού από υπολογιστή . . . . .	191
I.12	Επίγεια συλλογή δεδομένων με τη χρήση μονόποδου μεταβλητού ύψους και ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής με δυνατότητα μετάδοσης εικόνας σε έξυπνη φορητή συσκευή . . . . .	192
I.13	Τυπική δομή ενός ΣμηΕΑ με σκελετό διάταξης $X$ (τετρακόπτερο) . . . . .	194
I.14	Ορισμός σημείου ενδιαφέροντος, σημείων που θα ακολουθήσει το ΣμηΕΑ καθώς και σημείου προσγείωσης/απογείωσης πάνω σε ψηφιακό χάρτη . . . . .	196

I.15	Αυτοματοποιημένη σάρωση κτηριακής δομής σε διαφορετικά ύψη με καθορισμένο σημείο ενδιαφέροντος . . . . .	196
II.1	Προσέγγιση θέσης σημείου $p$ στο χώρο μέσω ελαχιστοποίησης της απόστασης όλων των ακτίνων που συγκλίνουν στο ίδιο χαρακτηριστικό σημείο . . . . .	200
II.2	Επιπολική γεωμετρία δύο όψεων . . . . .	202
II.3	Ευθύγραμμα τμήματα και σημείο φυγής . . . . .	208
II.4	Βαθμονόμηση από σημεία φυγής . . . . .	209
II.5	Εκτίμηση πόζας από άμεσο γραμμικό μετασχηματισμό . . . .	216
II.6	Η προβολή ενός 3Δ σημείου σε μια 2Δ μέτρηση με ανάλυση βημάτων . . . . .	219
II.7	Προβολή ενός 3Δ σημείου σε μια 2Δ μέτρηση ως μια πλήρους ακολουθία μετασχηματισμών. Διακεκομμένες γραμμές δείχνουν την αντίστροφη κατεύθυνση . . . . .	219
III.1	Απεικόνιση του συστήματος $v$ στο σύστημα $u$ μέσω του πίνακα <b>A</b> . . . . .	226
III.2	Απλό παράδειγμα προσαρμογής ελαχίστων τετραγώνων . . .	231
III.3	Παράδειγμα προσαρμογής με δεδομένα με ισοτροπικά σφάλματα	233
IV.1	Τμήμα εικόνας σε οθόνη IPS LCD, macro φωτογραφία του τμήματος και μεγέθυνση σε ένα σημείο της φωτογραφίας . . . . .	244
IV.2	Σύστημα προβολής του χθες (αριστερά) και του σήμερα (δεξιά)	252
IV.3	Στερεοζεύγος εικόνων . . . . .	255
IV.4	Γυαλιά μπλε-κόκκινων φακών και αντίστοιχη σύνθετη εικόνα	256
IV.5	Γυαλιά με κάθετα πολωμένους φακούς και αντίστοιχη σύνθετη εικόνα . . . . .	256
IV.6	Προσαρμοζόμενη οθόνη κεφαλής . . . . .	257
IV.7	Αναπαράσταση της αίσθησης βάθους σε αυτοστερεοσκοπική οθόνη . . . . .	258
IV.8	Τυπικό δείγμα έγχρωμης 3Δ εκτύπωσης . . . . .	261
IV.9	Συσκευή 3Δ σμίλευσης και τυπικό δείγμα . . . . .	262
IV.10	Περιβάλλον εμπλουτισμένης παρουσίας 3Δ μοντέλων . . .	263
IV.11	Σελίδα παρουσίας 3Δ ψηφιοποιημένων αντικειμένων στο Διαδίκτυο . . . . .	264
IV.12	Περιήγηση στο 3Δ εικονικό μουσείο παραδοσιακών μουσικών οργάνων . . . . .	265
IV.13	Είσοδος σε χώρο εκθεμάτων και πληροφόρηση για συγκεκριμένο έκθεμα . . . . .	265
IV.14	Σύστημα εμπυθιστικής εικονικής πραγματικότητας . . . . .	267
IV.15	Το σύστημα ταξινόμησης Zeltzer . . . . .	269

IV.16 Σχηματική αναπαράσταση τεχνολογιών στην εμβυθιστική ει- κονική πραγματικότητα . . . . .	270
IV.17 Συσκευές εισόδου δεδομένων εικονικής πραγματικότητας . . .	270
IV.18 Συσκευές 3Δ απεικόνισης εικονικής πραγματικότητας . . . .	270
IV.19 Αρχή λειτουργίας Cave . . . . .	271
V.1 Υποσύνολο φωτογραφιών για την παραγωγή 3Δ μοντέλου . .	281
V.2 Βήματα εφαρμογής της Δομής από κίνηση . . . . .	281
V.3 Δημιουργία νέου "υποέργου" . . . . .	281
V.4 Εισαγωγή του συνόλου των φωτογραφιών στο "υποέργο" . . .	282
V.5 1: ευθυγράμμιση φωτογραφιών (Align photos) . . . . .	283
V.6 Βήμα 2: δημιουργία πυκνού νέφους (Build dense cloud) . . .	283
V.7 Βήμα 3: δημιουργία πλεγματοσειράς (Build mesh) . . . . .	284
V.8 Βήμα 4: δημιουργία υφής (Build texture) . . . . .	284
V.9 Εξαγωγή του τελικού 3Δ ψηφιακού αντιγράφου . . . . .	285
V.10 Εισαγωγή 3Δ ψηφιακού αντιγράφου στο MeshLab . . . . .	286
V.11 Επανατοποθέτηση του κέντρου του συστήματος συντεταγμένων	286
V.12 Απλοποίηση του 3Δ ψηφιακού αντιγράφου . . . . .	287
V.13 Αποθήκευση του 3Δ ψηφιακού αντιγράφου για δημοσίευση στον Ιστό . . . . .	287

# Κατάλογος Πινάκων

1.1	Ενδεικτικός συγκριτικός πίνακας σύγχρονων επιταχυντών 3Δ γραφικών . . . . .	5
1.2	Παράδειγμα λογικής δομής τριγωνικής πλεγματοσειράς . . . .	15
1.3	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσης τριγώνων ή τετράπλευρων στην αναπαράσταση πλεγματοσειρών . . . . .	15
1.4	Βασικοί γεωμετρικοί μετασχηματισμοί . . . . .	18
2.1	Αντικειμενική σύγκριση επτά αντιπροσωπευτικών μεθόδων Σχήμα από δομημένο φωτισμό . . . . .	83
3.1	Βαθμός αβεβαιότητας μετρήσεων στο 3Δ ψηφιακό αντίγραφο της Μαγδαληνής του Ντονατέλλο . . . . .	116
3.2	Κριτήρια επιλογής μεθόδου και συστήματος 3Δ ψηφιοποίησης	124
4.1	Διαφοροποιήσεις πλήθους κορυφών σε τριγωνικές πλεγματοσειρές . . . . .	139
6.1	Δεδομένα 3Δ ψηφιοποίησης του Δαβίδ του Μικελάντζελο . .	157
6.2	Διαφορετικές εκδόσεις του 3Δ ψηφιακού αντίγραφου της Αθηνάς του Αρέτσο . . . . .	161
6.3	Μέση και τυπική απόκλιση μεταξύ των δύο ψηφιακών αντιγράφων του κυκλαδικού ειδωλίου . . . . .	163
6.4	Μέσες και τυπικές αποκλίσεις των επιφανειών των δύο τύπων δεδομένων (TOF λείζερ – Δομή από κίνηση) του Κιουτουκλού	165
I.1	Λογισμικά που υλοποιούν τη μέθοδο Δομή από κίνηση . . . .	172
I.2	Δείγματα προβληματικών δεδομένων για τη μέθοδο SFM-MVS	188
IV.1	Σύγκριση μεταξύ εμπορικά διαθέσιμων τεχνολογιών προβολής	241



# Ακρωνύμια

- API** Application Programming Interface. 5, 23
- ASCII** American Standard Code for Information Interchange. 13
- bpp** bits per pixel. 2, 4, 157, 240
- CAD** Computer Aided Design. 146, 271
- CCD** Charge Coupled Device. 53, 84
- CMOS** Complementary Metal Oxide Semiconductor. 53
- CRT** Cathode Ray Tube. 241, 243, 245, 250, 251
- DLP** Digital Light Processor. 239, 241, 253
- DMD** Digital Micro-mirror Device. 80, 241, 252–254
- dpi** dots per inch. 2, 239, 240, 261
- Gbps** Giga bits per sample. 5
- GIS** Geographical Information Systems. 2
- HTML** HyperText Markup Language. 288
- IPS** In-Plane Switching. 244
- JPEG** Joint Photographic Experts Group. 284
- Laser** Light amplification through stimulated emission of radiation. 28
- LCD** Liquid Crystal Display. 80, 239, 241, 244, 246, 247, 250, 251, 254, 256, 257
- MHz** Mega Herz. 5

**MVS** Multiple View Stereo. 89, 92

**NURBS** Non-Uniform Rational B-Splines. 149

**OBJ** Wavefront Geometry Definition File Format. 34, 284

**OpenGL** Open Graphics Language. 1, 5, 23, 24

**PLY** Polygon File Format. 34, 284

**PNG** Portable Network Graphics. 284

**ppi** pixels per inch. 2, 239, 240, 244

**RGB** Red Green Blue. 24, 247

**SfM** Structure from Motion. 88, 89

**SfM-MVS** Structure from Motion-Multiple View Stereo. 89, 90, 93, 94, 113, 118, 164, 172, 173, 175, 177, 178, 183, 186–189, 192, 195, 196, 279, 285

**SIFT** Scale-Invariant Feature Transform. 89–91

**SNR** signal to noise ratio. 62

**STL** Stereolithography File Format. 160

**SURF** Speeded Up Robust Features. 89–91

**TFT** Thin Film Transistor. 244, 245, 249, 260

**TOF** Time of Flight. 50, 118, 165

**VRML** Virtual Reality Modelling Language. 34

**X3D** Extensible 3D File Format. 34, 286, 288

**XYZ** XYZ File Format. 34



# Γλωσσάρι

**3Δ εκτύπωση** είναι η δημιουργία φυσικών αντικειμένων μέσω μηχανοτρονικού συστήματος που μεταχειρίζεται κατάλληλα υλικά και ελέγχεται από υπολογιστή. 30, 31, 191, 248, 260, 261

**αβεβαιότητα** (ή σφάλμα μέτρησης) είναι η περιοχή γύρω από μετρηθείσα τιμή, μέσα στην οποία βρίσκεται η πραγματική τιμή της μετρηθείσας ποσότητας. 85, 115, 116

**ακρίβεια** (ως απόδοση του όρου accuracy) είναι η εγγύτητα μεταξύ του αποτελέσματος μιας δοκιμής και της αποδεκτής τιμής αναφοράς. Για την περίπτωση ενός μετρητικού οργάνου είναι ένα κατασκευαστικό χαρακτηριστικό ενώ για περίπτωση μιας μέτρησης ορίζεται μέσω του προσδιορισμού της ορθότητας (trueness) και της πιστότητας (precision).

\*Ο ορισμός περί μετρήσεων προέρχεται από την απόφαση 2002/657/EK της Επιτροπής, της 12ης Αυγούστου 2002 (<https://goo.gl/UYNvkn>). 3, 10, 28, 29, 32, 34, 35, 39, 42, 43, 45, 46, 49–53, 55, 57, 59, 62, 66, 67, 70, 77–80, 84, 88, 89, 97, 98, 100, 101, 111, 112, 115, 119, 123, 124, 130, 133, 141, 147, 151, 158–161, 174, 183, 191, 195, 208, 209, 214, 247, 261, 265

**ανάκλαση** είναι το φυσικό φαινόμενο της αλλαγής διεύθυνσης διάδοσης ενός κύματος μέσα στο ίδιο μέσο λόγω της ύπαρξης διαχωριστικής επιφάνειας. 4, 9, 34–38, 44, 46, 55, 57, 60, 61, 95, 176

**ανάλυση** ή διακριτική ικανότητα (resolution στην Αγγλική) ενός οργάνου μέτρησης είναι η ελάχιστη μεταβολή μετρούμενου μεγέθους που μπορεί να αναγνωρισθεί από το σύστημα μέτρησης. Σε μια εικόνα δύο διαστάσεων (φωτογραφία) είναι αντίστοιχη της πυκνότητας των εικονοστοιχείων που απαρτίζουν την εικόνα, ενώ σε ένα μοντέλο τριών διαστάσεων είναι οι πυκνότητα των σημείων στο χώρο που αποτελούν το νέφος σημείων του μοντέλου. 2, 3, 10, 16, 21, 22, 28, 32, 34, 42, 45, 46, 50, 57, 59, 79, 80, 83, 84, 89, 93, 97, 98, 101, 111, 112, 114, 116, 119, 120, 123, 133, 137, 149, 156, 158, 162–164, 173, 175, 177, 180–183, 214, 237–241, 244, 245, 248, 249, 261, 265

**βαθμονόμηση** είναι η διαδικασία με την οποία διορθώνεται το συστηματικό σφάλμα μέτρησης ενός μετρητικού οργάνου. Συστηματικό σφάλμα είναι μια μόνιμη απόκλιση στις μετρήσεις που παράγει ένα όργανο, η οποία μπορεί να διορθωθεί με τη μέτρηση δείγματος αναφοράς. 41, 44, 56, 57, 65, 66, 82, 85, 114, 115, 117, 122, 123, 156, 163, 174, 177, 186

**βάθος πεδίου** είναι το εύρος αποστάσεων από ένα φωτογραφικό σύστημα, μέσα στο οποίο είναι σε εστίαση όλα τα αντικείμενα της σκηνής. 55, 84, 97, 98, 176, 184, 188, 189

**βάθος χρώματος** είναι το πλήθος των δυαδικών ψηφίων (bits) που χρησιμοποιούνται ανά εικονοστοιχείο για την απεικόνιση των χρωμάτων σε μια οθόνη ή για την περιγραφή των χρωμάτων μιας εικόνας και εκφράζεται σε μονάδες bits per pixel (bpp). 2, 46, 157, 240

**γραμμική παρεμβολή** είναι μια γραμμική μέθοδος πρόβλεψης τιμών ενός μεγέθους που μεταβάλλεται ως προς μια συγκεκριμένη μεταβλητή (πχ. χρόνος) από ήδη γνωστές τιμές του εν λόγω μεγέθους, υποθέτοντας ότι το μέγεθος αυτό μεταβάλλεται με γραμμικό τρόπο σε σχέση με τη συγκεκριμένη μεταβλητή στην οποία μελετάται η μεταβολή του. 59, 139, 141

**γραφικά** είναι, γενικά, οι εικόνες και τα βίντεο που δημιουργούνται με τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών. 1–3, 7, 22, 238, 271

**διάθλαση** είναι το φυσικό φαινόμενο της εκτροπής της ευθύγραμμης τροχιάς διάδοσης ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος (όπως το φως) όταν διέρχεται από ένα διαπερατό μέσο σε ένα άλλο. 4, 9, 35, 36, 115

**διακριτό** διακριτό είναι κάθε μέγεθος του οποίου τιμές λαμβάνονται με προκαθορισμένο ρυθμό δειγματοληψίας. 4, 16–18, 59

**εικονική πραγματικότητα** είναι η επικρατέστερη απόδοση του όρου virtual reality από την Αγγλική και υπονοεί μια ψηφιακή πραγματικότητα υπό τη μορφή αλληλεπιδραστικής εφαρμογής σε υπολογιστή που προσομοιώνει συνθήκες του πραγματικού κόσμου και στοχεύει στη δημιουργία εμπειριών παρόμοιων με αυτές του πραγματικού κόσμου. 31, 160, 237, 262, 266, 268–272

**εικονικό** είναι η επικρατέστερη απόδοση του όρου virtual από την Αγγλική (αν και θεωρείται καλύτερη η απόδοση ως «δυνητικό») που υποδηλώνει οτιδήποτε είναι ψηφιακό δημιούργημα σε υπολογιστή και προσομοιώνει κάτι από τον πραγματικό κόσμο (πχ. εικονικό μουσείο, εικονικός κόσμος). 30, 31, 93, 147, 159, 260, 262–264, 266, 268, 269, 272

**εικονικό μουσείο** είναι ειδική κατηγορία ψηφιακού εικονικού κόσμου, ο οποίος προσομοιώνει την εμπειρία της επίσκεψης σε ένα εκθεσιακό ή μουσειακό

χώρο όπου εκτίθεται είτε ψηφιακά εκθέματα είτε ψηφιακά αντίγραφα πραγματικών εκθεμάτων. 263–266

**εικονοστοιχείο** (ως απόδοση του όρου pixel της Αγγλικής) είναι το μοναδιαίο στοιχείο μιας ψηφιογραφικής εικόνας που καθορίζει το διακριτό χρώμα της εικόνας σε συγκεκριμένη διακριτή θέση πάνω στο επίπεδο της εικόνας. 4, 10, 16, 17, 66, 67, 77–82, 85, 86, 93, 94, 96, 97, 142, 173, 175, 181, 182, 185, 186, 239, 244, 246, 248–250, 257

**επαυξημένη πραγματικότητα** (ως απόδοση του όρου augmented reality από την Αγγλική) είναι η τεχνικά ενισχυμένη εμπειρία της πραγματικότητας, συνήθως με την υπέρθεση ψηφιακής πληροφορίας σε οπτικοακουστική πληροφορία του πραγματικού κόσμου. 31

**θόρυβος** είναι η κάθε μορφής αρνητική επιρροή σε με διαδικασία μέτρησης που μπορεί να προέρχεται από πληθώρα πηγών, όπως η ηλεκτρονική παρεμβολή, κραδασμοί, κοκ. 34, 59–62, 117, 134, 137, 203

**λείζερ** (εκ του όρου Laser της Αγγλικής) είναι η εκπομπή συμφασικού μονοχρωματικού φωτός, ενισχυμένου μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής ακτινοβολίας. 28, 33, 35–40, 44, 45, 48, 50–62, 71, 76, 77, 90, 97, 100, 122, 247, 262, 289

**μαγικός φανός** (ως απόδοση του πρωτότυπου magic lantern ή του λατινικού laterna magica) είναι ένας πρώιμος τύπος προβολέα εικόνας που χρησιμοποιεί εικόνες ζωγραφισμένες, τυπωμένες ή παραγόμενες φωτογραφικά σε διαφανείς πλάκες (συνήθως κατασκευασμένες από γυαλί), έναν ή περισσότερους φακούς και μια πηγή φωτός. 63

**νέφος σημείων** είναι ένα σύνολο ελεύθερων σημείων σε αυθαίρετο σύστημα συντεταγμένων εικονικού 3Δ χώρου που περιγράφονται από τις συντεταγμένες τους στις τρεις διαστάσεις και, προαιρετικά, από παραμέτρους χρώματος. 11, 13, 34, 47, 63, 75, 83, 93, 147–149, 151, 213, 217

**οπτικό πεδίο** είναι ο χώρος μπροστά από ένα οπτικό σύστημα που είναι πλήρως ορατός από το σύστημα. 22, 39, 47, 55, 68, 116, 122, 123, 130, 147, 239

**περίθλαση** είναι το φυσικό φαινόμενο της διάχυσης ενός κύματος προς όλες τις κατευθύνσεις όταν συναντά κάποιο εμπόδιο ή μία οπή με διαστάσεις παραπλήσιες του μήκους κύματός του. 4, 57, 58, 176

**πιστότητα** (ως απόδοση του όρου precision) είναι η εγγύτητα μεταξύ των αποτελεσμάτων ανεξάρτητων δοκιμών υπό ρητά καθορισμένες (προκαθορισμένες) συνθήκες. Το μέτρο της πιστότητας εκφράζεται συνήθως με

όρους μη πιστότητας και υπολογίζεται ως τυπική απόκλιση του αποτελέσματος της δοκιμής.

\*Ο ορισμός προέρχεται από την απόφαση 2002/657/EK της Επιτροπής, της 12ης Αυγούστου 2002 (<https://goo.gl/UYNvkn>). 3, 28, 29, 32, 64, 72, 74, 80, 84, 139

**πολυγωνική πλεγματοσειρά** (ως απόδοση του όρου polygonal mesh της Αγγλικής) είναι μια γενικευμένη δομή από συνδεδεμένα πολύγωνα σε 3Δ χώρο που ορίζει μια επιφάνεια στον 3Δ χώρο. 11, 15, 18, 93, 136–139, 141, 142, 149, 152, 156

**πολυγωνικό πλέγμα** (ως απόδοση του όρου polygonal mesh της Αγγλικής) είναι μια γενικευμένη δομή από συνδεδεμένα πολύγωνα σε 3Δ χώρο που ορίζει μια επιφάνεια στον 3Δ χώρο. 15, 137

**πόλωση** (του φωτός) είναι το φυσικό φαινόμενο κατά το οποίο το επίπεδο ταλάντωσης του ηλεκτρικού πεδίου του φωτός είναι το ίδιο για όλα τα φωτόνια. Το φως που παρουσιάζει αυτή την ιδιαιτερότητα ονομάζεται πολωμένο, ενώ, αντίθετα, στη γενική περίπτωση το φως αποτελείται από πολλές ακτίνες διαφορετικού επιπέδου ταλάντωσης και θεωρείται μη πολωμένο. 93, 176, 189, 243, 244, 255, 256

**σάρωση** είναι η μέτρηση ενός αντικειμένου ή μιας σκηνής σημείο προς σημείο σε μια προκαθορισμένη πορεία. 28, 35, 39, 42, 51, 53–57, 60–62, 114–116, 121, 123, 130, 131, 133, 135, 136, 146, 156, 157, 159, 161, 163–165, 193, 196, 197

**σκέδαση** (του φωτός) είναι ο διασκορπισμός των φωτεινών ακτίνων όταν προσέσουν σε μικροσκοπικά σωματίδια και είναι προϊόν πολλαπλής ανάκλασης. Πρόκειται για απορρόφηση του φωτός και επανεκπομπή του από τα μικροσκοπικά σωματίδια πάνω στα οποία προσπίπτει χωρίς τη μεταβολή των συχνοτήτων του φωτός. 60, 93

**στερεοζεύγος** είναι ένα ζεύγος φωτογραφιών που λαμβάνονται με συγκεκριμένη τοπολογία με σκοπό την στερεοσκοπική όραση, κατ' αναλογία με τη βιολογική διοπτική όραση. 85, 86, 255

**τριγωνική πλεγματοσειρά** (ως απόδοση του όρου triangular mesh της Αγγλικής) είναι μια στοιχειώδης δομή από συνδεδεμένα τρίγωνα σε 3Δ χώρο που ορίζει μια επιφάνεια στον 3Δ χώρο. 14, 15, 18, 139, 140, 152, 158, 161, 165

**τριγωνικό πλέγμα** (ως απόδοση του όρου triangular mesh της Αγγλικής) είναι μια στοιχειώδης δομή από συνδεδεμένα τρίγωνα σε 3Δ χώρο που ορίζει μια επιφάνεια στον 3Δ χώρο. 14, 17

**τριγωνισμός** είναι μια γεωμετρική μέθοδος με την οποία είναι δυνατός ο προσδιορισμός της απόστασης ενός αντικειμένου από δύο σημεία, τα οποία είναι σε γνωστές σχετικές μεταξύ τους θέσεις, με την εκμετάλλευση της γεωμετρίας του τριγώνου που δημιουργείται μεταξύ των γνωστών σημείων και του αντικειμένου. 51, 52, 79, 199, 201, 207, 213

**τριγωνοποίηση** στο πλαίσιο των 3Δ γραφικών είναι η μετατροπή ενός νέφους σημείων σε τριγωνικό πλέγμα. 14

**τυπική απόκλιση** είναι ένα μέτρο που χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση της διασποράς ενός συνόλου τιμών δεδομένων. Χαμηλή τυπική απόκλιση υποδεικνύει ότι οι τιμές τείνουν να είναι κοντά στο μέσο όρο του συνόλου, ενώ μια υψηλή τυπική υποδεικνύει ότι οι τιμές κατανέμονται σε ένα ευρύτερο εύρος τιμών. 54, 83, 163–165

**υφή** (ως απόδοση του όρου texture της Αγγλικής) νοείται ως το χρώμα της επιφάνειας ενός αντικειμένου. 3–5, 8, 10, 14, 15, 22, 40, 41, 43, 44, 56, 69–75, 84, 87, 95, 96, 112, 113, 120, 123, 124, 131, 132, 137, 141, 142, 145, 148–150, 156, 157, 174, 186, 213, 261

**φίλτρο** είναι μια πολύ γενική έννοια με διαφοροποιήσεις ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής, αλλά, σε κάθε περίπτωση, αναφέρεται σε ένα σύστημα ή εξάρτημα ή μέθοδο που έχει σκοπό την αποκοπή τμήματος μιας ροής. 149–151, 176, 189, 243, 247, 253, 255–258

**φωτογλυπτική** είναι η προβολή αντικειμένου σε 3 διαστάσεις με συγχρονισμένες προβολές φωτογραφιών που έχουν ληφθεί από διάφορες οπτικές γωνίες γύρω από το αντικείμενο που επινοήθηκε και κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον Γάλλο καλλιτέχνη François Willème το 1860. 63, 64

**φωτογραμμετρία** είναι η υπολογιστική μέθοδος με την οποία είναι δυνατός ο προσδιορισμός διαστάσεων αντικειμένων με χρήση κλασικών διδιάστατων φωτογραφιών. 28, 33, 40, 50, 76, 89, 115, 133, 149, 159, 171, 175, 183, 204, 215, 266

**χάρτης βάθους** είναι μια ψηφιογραφική εικόνα δύο διαστάσεων, η οποία ως τιμές εικονοστοιχείων έχει γκρίζους τόνους που αντιστοιχούν στην απόσταση του εικονιζόμενου αντικειμένου από το θεατή. 86, 97–99

**χάρτης υφής** (ως απόδοση του όρου texture map της Αγγλικής) είναι μια ειδικά κατασκευασμένη ψηφιογραφική εικόνα δύο διαστάσεων που περιέχει την υφή (επιφανειακό χρώμα) ενός 3Δ αντικειμένου. 142, 214

**ψηφιακό** ψηφιακό είναι κάθε διακριτό μέγεθος, του οποίου οι τιμές είναι κβαντισμένες βάσει προκαθορισμένου κανόνα κβαντισμού. 2, 30–33, 48, 60,

61, 64, 65, 68, 71–73, 97, 99, 111, 112, 114–117, 119–122, 128, 130, 131, 133, 135, 137–139, 145, 146, 148–152, 156, 158, 159, 161, 164, 171, 178, 186–188, 193, 195, 196, 206, 207, 213, 214, 237–239, 254, 258–261, 264

**ψηφιογραφική εικόνα** είναι κάθε ψηφιακή εικόνα που αποτελείται από εικονοστοιχεία. 2, 8, 9, 14, 15, 17, 21, 22, 150

**ψηφιοποίηση** είναι η μετατροπή ενός φυσικού μεγέθους σε ψηφιακό μέσω εξειδικευμένων μετρήσεων. 1, 3, 7, 14, 27–29, 31–46, 48, 51–60, 62, 64, 72, 75, 78–80, 88, 89, 94, 96, 100, 111–124, 127–136, 138, 141, 142, 145, 146, 151, 155–162, 171, 173, 174, 178, 180–182, 186, 187, 189, 190, 192, 225, 230, 238, 263–265

## Ευρετήριο

- Δομή από κίνηση, 28, 34, 39, 40, 45,  
49, 88–91, 111–113, 118–120,  
124, 131, 162–165, 171–173,  
184, 199, 202, 207, 211, 213,  
214, 230, 233, 279–282
- Μέτρηση χρόνου πτήσης ακτίνων λεί-  
ζερ, 40, 50, 118, 165
- Μέτρηση χρόνου πτήσης ακτίνων λεί-  
ζερ, 164, 165
- Μικροσκοπία, 40, 42, 44
- Ολογραφία, 40, 47, 48, 258
- Σχήμα από δομημένο φωτισμό, 39, 40,  
45, 59, 76–78, 80, 82–84, 111,  
118–120, 124, 157, 159–161
- Σχήμα από μεταβαλλόμενη εστίαση, 40,  
97, 98
- Σχήμα από σιλουέτα, 28, 39, 40, 63–  
65, 71, 73–76, 111–113, 118–  
120, 124, 131
- Σχήμα από σκιά, 40, 95, 99
- Σχήμα από στερεοφωτογράφιση, 40, 85,  
88, 89, 95, 111–113
- Σχήμα από υφή, 40, 95
- Σχήμα από φωτομετρία, 40, 96
- Σχήμα από φωτοσκίαση, 40, 94–96
- Τομογραφία, 40, 48, 49
- Τοπογραφία, 40, 181
- Τριγωνισμός ακτίνων λέιζερ, 33, 35,  
36, 38, 40, 44, 51–56, 59, 62,  
71, 76, 90, 97, 100, 111–114,  
118–120, 122, 124, 159, 161–  
163
- Φωτογραμμετρία, 28, 33, 40, 50, 76,  
89, 115, 133, 149, 159, 171,  
175, 183, 204, 215, 266

