

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΚΟΥ ΣΑΡΩΤΗ LASER ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΣΘΕΤΩΝ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΕΣΜΕΥΣΕΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΑΝΤΩΝΙΟΣ Ι. ΠΡΟΚΟΣ
ΑΘΗΝΑ, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΚΟΥ ΣΑΡΩΤΗ LASER
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΣΘΕΤΩΝ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΕΣΜΕΥΣΕΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΑΝΤΩΝΙΟΣ Ι. ΠΡΟΚΟΣ

Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός ΕΜΠ

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Γιώργος Καρράς (επιβλέπων)

Καθηγητής ΕΜΠ

Ανδρέας Γεωργόπουλος

Καθηγητής ΕΜΠ

Πέτρος Πατιάς

Καθηγητής ΑΠΘ

ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2012

Η παρούσα διατριβή χρηματοδοτήθηκε από το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών

Πρόλογος

Τον Μάιο 2004 έγινε ο ορισμός του θέματος και της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής μου. Χρηματοδότηση για την έρευνα αυτή παρείχε το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών. Η ανάκτηση τρισδιάστατης πληροφορίας είναι ένα αντικείμενο που απασχολεί τον χώρο της φωτογραμμετρίας αλλά και της όρασης υπολογιστών. Είναι ένα πεδίο το οποίο μελετάται εδώ και πολλά χρόνια και έχουν προταθεί πολλές διαφορετικές μέθοδοι. Ήδη από την δεκαετία του '70, κυρίως από τον χώρο της όρασης υπολογιστών, γίνεται προσπάθεια για ανάκτηση 3D πληροφορίας με χρήση σαρωτών. Προσωπικά, μου είναι ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον πεδίο έρευνας γιατί συνδυάζει γεωμετρικές αλλά και ραδιομετρικές προσεγγίσεις από δύο επικαλυπτόμενους επιστημονικούς χώρους.

Στην διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διατριβής παρουσιάστηκαν προφορικά σε διεθνή συνέδρια οι εξής πρόδρομες εργασίες:

Prokos A., Karras G., Grammatikopoulos L., 2009. Design and evaluation of a photogrammetric 3D surface scanner. *XXII CIPA Symposium on Digital Documentation, Interpretation & Presentation of Cultural Heritage*, October 11-15, Kyoto, Japan.

Prokos A., Karras G., Petsa E., 2010. Automatic 3D surface reconstruction by combining stereovision with the slit-scanner approach. *ISPRS Commission V MidTerm Symposium*, Newcastle-upon-Tyne, June 22-24 (*International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII, Part 5, pp. 505-509).

Prokos A., Kalisperakis I., Karras G., 2011. Automatic point cloud generation and registration with a stereovision slit-scanner. *4th International Workshop 3D-ARCH 2001 "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures"*, 2-4 March, Trento, Italy (*International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-5/W16).



IKY



ΕΛΛΗΝΙΚΗ
ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΑΤΙΚΩΝ ΥΠΟΤΡΟΦΙΩΝ
STATE SCHOLARSHIPS FOUNDATION

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Γιώργο Καρρά για την υποστήριξη και την καθοδήγηση. Η βοήθειά του υπήρξε καθοριστική στο να οδηγηθώ στο αποτέλεσμα αυτό, καθώς πρότεινε πολλές και ενδιαφέρουσες βελτιώσεις και με κρατούσε στην σωστή επιστημονική πορεία. Το θέμα της διατριβής διαμορφώθηκε μετά από πολύωρες συζητήσεις με την καθηγήτρια ΤΕΙ Αθήνας Έλλη Πέτσα, τον καθηγητή εφαρμογών ΤΕΙ Αθήνας Δρ. Λάζαρο Γραμματικόπουλο και τον Δρ. Αग्रονόμο Τοπογράφο Μηχανικό Ηλία Καλησπεράκη. Τα τέσσερα αυτά άτομα με ενέταξαν σε μία ομάδα όπου, λόγω της άριστης συνεργασίας που υπήρχε, η παρούσα διατριβή έγινε χωρίς δυσκολίες. Επίσης ευχαριστώ τους Αρίστο Γεωργίου, ΕΕΔΙΠ, και τον Δρ. Γεώργιο Χατζηστέλιο, ΙΔΑΧ της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, που μου παραχώρησαν για μέτρηση και έλεγχο ορισμένα δοκίμια του Μετροτεχνικού Εργαστηρίου ΕΜΠ.

Αφορμή για την ενασχόλησή μου με το αντικείμενο αυτό ήταν μία συζήτηση με τον φίλο μου Παμίνιο (Επαμεινώνδα Μαρκόπουλο), ο οποίος μου είχε δείξει ένα εμπορικό προϊόν το οποίο ήλπιζε, κάποια στιγμή, να αποκτήσει. Αργότερα, πολλοί φίλοι βοήθησαν με τον έναν ή τον άλλο τρόπο. Απ' αυτούς θα αναφέρω την υποψήφια διδάκτορα ΕΜΠ Άρτεμη Βαλάνη, τον Αग्रονόμο και Τοπογράφο Μηχανικό Μάκη Ντούσκο, τον λέκτορα της Σχολής Κώστα Καραντζάλο και φυσικά την φίλη μου κεραμίστρια Αντιγόνη Πανταζή για την παραχώρηση γλυπτού της.

Θα ήταν παράλειψη να μην ευχαριστήσω την μητέρα μου για την ηθική της συμπαράσταση καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας αυτής. Τέλος, ευχαριστώ και την καλή μου φίλη Αντιγόνη Μιμίδου για την υποστήριξη αλλά και τα καλά της λόγια ειδικά σε στιγμές δικού μου άγχους.

Περίληψη

Η διατριβή παρουσιάζει τον σχεδιασμό, την υλοποίηση και την αξιολόγηση ενός 3D σαρωτή χαμηλού κόστους για μικρά αντικείμενα, κατά την λειτουργία του οποίου αξιοποιούνται και γεωμετρικές δεσμεύσεις προκειμένου να αυξηθεί η ακρίβεια και η αξιοπιστία του.

Ο σαρωτής που περιγράφεται εδώ συνδυάζει τεχνικές στερεοσκοπικής όρασης με τεχνικές σαρωτών τριγωνισμού laser. Δύο μηχανές δικτύου (απλές web cameras), βαθμονομημένες αυτόματα εκ των προτέρων, παρατηρούν το ίχνος ενός χειροκίνητου επιπέδου laser πάνω στην επιφάνεια του υπό σάρωση αντικειμένου. Η απεικονιζόμενη γραμμή του laser επιτρέπει να επιλυθεί αυτόματα το πρόβλημα των ομολογιών μεταξύ εικονοσημείων και, τελικά, να υπολογίζονται οι συντεταγμένες 3D σημείων με εφαρμογή των απλών εξισώσεων παράλλαξης σε επιπολικές εικόνες. Η επίλυση αυτή ενισχύεται από επιπλέον γεωμετρικές δεσμεύσεις. Αναλυτικότερα, τα βήματα της διαδικασίας είναι τα εξής:

Το σύστημα βαθμονομείται αυτόματα βάσει της μεθόδου της δέσμης (εκτίμηση των εσωτερικών προσανατολισμών των δύο μηχανών και του υπό ορθή κλίμακα σχετικού προσανατολισμού τους) από τις στερεοσκοπικές λήψεις ενός 2D πεδίου ελέγχου τύπου σκακιέρας. Για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης αναπτύχθηκε αλγόριθμος ώστε να αναγνωρίζεται το σύστημα συντεταγμένων του πεδίου και να συλλέγονται τα σημεία του, ενώ αυτόματα εκτιμώνται και οι αρχικές τιμές των παραμέτρων. Έτσι, τα ζεύγη εικόνων που λαμβάνονται κατά την σάρωση μπορούν πλέον να επανασυσταθούν επιπολικά (με εξάλειψη των σφαλμάτων που έχουν μοντελοποιηθεί κατά την βαθμονόμηση). Στις χρησιμοποιούμενες επιπολικές εικόνες απεικονίζεται μόνο το ίχνος του laser καθώς από τις αρχικές εικόνες αφαιρείται το υπόβαθρο, ενώ παράλληλα εφαρμόζονται φίλτρα εξομάλυνσης για να αμβλύνονται οι επιπτώσεις του θορύβου. Η αναζήτηση ομολόγων σημείων περιορίζεται επομένως στις ομόλογες επιπολικές γραμμές.

Ομόλογα σημεία θεωρούνται οι τομές των επιπολικών γραμμών με τις γραμμές του laser, δηλαδή τα μέγιστα της έντασης της εικόνας σε κάθε επιπολική γραμμή. Από τις διαδικασίες ανίχνευσης κορυφής που δοκιμάστηκαν επελέγη τελικά η προσαρμογή καμπύλης Gauss στο προφίλ των τόνων. Η τελική θέση της κορυφής προκύπτει με την ταυτόχρονη προσαρμογή τριών καμπυλών Gauss, όπου οι πρόσθετες καμπύλες παρεμβάλλονται στις δύο διαγώνιες διευθύνσεις δια της αρχικής εκτίμησης της θέσης της κορυφής. Η θέση της κορυφής παραμένει επί της επιπολικής γραμμής, αλλά λαμβάνεται υπόψη και η ευρύτερη γειτονιά της αρχικής εκτίμησης ώστε να μειώνεται με τον τρόπο αυτό η επίδραση του θορύβου. Η αβεβαιότητα προσδιορισμού της θέσης του σημείου επί της επιπολικής είναι κριτήριο για τον αποκλεισμό σημείων κατά την διαδικασία της σάρωσης.

Η αρχική εκτίμηση των 3D συντεταγμένων των σημείων από τις εξισώσεις παράλλαξης (λύση χωρίς περίσσεια μετρήσεων) ενισχύεται με την εισαγωγή πρόσθετων γεωμετρικών δεσμεύσεων:

- Όλα τα σημεία του χώρου που ανακατασκευάζονται από κάθε ζεύγος εικόνων οφείλουν είναι συνεπίπεδα ως σημεία που ανήκουν στο επίπεδο του laser.
- Η τοποθέτηση του αντικειμένου στην κόγχη που σχηματίζεται από δύο επίπεδα (η οποία προηγουμένως έχει σαρωθεί) επιτρέπει να εισάγεται μια επιπλέον δέσμευση συνεπιπεδότητας για τα ανακατασκευασμένα σημεία που ανήκουν στα επίπεδα αυτά.
- Τέλος, γειτονικά σημεία δεν πρέπει να απέχουν μεταξύ τους πέραν ενός ορίου (στοιχείο εξομάλυνσης της ανακατασκευαζόμενης επιφάνειας).

Η διατριβή μελετά την επίδραση των εν λόγω δεσμεύσεων και εξετάζει την επιβολή τους ως αυστηρών ή ελαστικών. Η γενικότερη λύση που δίδεται στην διατριβή είναι εκείνη όπου οι συντεταγμένες των σημείων μίας πλήρους σάρωσης και όλοι οι άγνωστοι συντελεστές των επιπέδων εκτιμώνται ταυτόχρονα σε ενιαία επαναληπτική συνόρθωση. Η εισαγωγή γεωμετρικών δεσμεύσεων ενισχύει την λύση προσφέροντας περίσσεια παρατηρήσεων, επομένως αυξάνοντας την αξιοπιστία της, ενώ επιτρέπει να αντιμετωπιστεί και το πρόβλημα των πολλαπλών μεγίστων που οφείλεται σε αποκρύψεις ή ανακλάσεις. Τέλος, το παραγόμενο νέφος σημείων μπορεί να συμπληρωθεί με τιμές χρώματος από τις εικόνες υποβάθρου, οι οποίες προκύπτουν από το σύνολο των δεδομένων με την τεχνική του χρονικού διαμέσου.

Δεδομένου ότι για ένα πλήρες 3D μοντέλο του αντικειμένου απαιτούνται πολλές σαρώσεις από διαφορετικές θέσεις, τα επιμέρους νέφη σημείων πρέπει να συγχωνευθούν σε ενιαίο νέφος, πχ. με γνωστούς αλγόριθμους όπως ο ICP. Η πλήρης αυτοματοποίηση της διαδικασίας προϋποθέτει ότι η απαραίτητη αρχική προσέγγιση των παραμέτρων μετασχηματισμού για τον ICP πρέπει επίσης να εκτιμηθεί αυτόματα. Εν προκειμένω αυτό βασίζεται στις ίδιες τις εικόνες, εφόσον υπάρχει η ελάχιστη υφή στο αντικείμενο που θα επέτρεπε να ανιχνευτούν σημεία ενδιαφέροντος επαρκούς αριθμού και κατάλληλης κατανομής. Με τους αλγόριθμους SIFT και RANSAC εντοπίζονται ομόλογα σημεία (βάσει του επιπολικού πίνακα) σε ζεύγη εικόνων αποτελούμενα από λήψεις από διαφορετικές (γειτονικές) θέσεις σάρωσης, για τα οποία παρεμβάλλονται 3D σημεία στα νέφη από κάθε θέση σάρωσης. Έτσι, οι 2D ομολογίες ανάγονται σε ομολογίες στον 3D χώρο, οπότε είναι πλέον δυνατός ο αυτόματος μετασχηματισμός στερεού σώματος μεταξύ των δύο επικαλυπτόμενων νεφών.

Τελικό βήμα είναι η εξομάλυνση του παραγόμενου νέφους σημείων. Στην διατριβή αξιολογούνται διάφοροι αλγόριθμοι εξομάλυνσης, οι οποίοι εφαρμόζονται στα συνενωμένα ή και τα επιμέρους νέφη σημείων. Εδώ επιλέγεται εξομάλυνση υπό την θεώρηση ότι η επιφάνεια προσεγγίζεται τοπικά με στοιχειώδεις μαθηματικές επιφάνειες, με δυνατότητα εισαγωγής ανισοτροπικής κατανομής βαρών ώστε να λαμβάνεται υπόψη και το τοπικό ανάγλυφο της επιφάνειας.

Η ακρίβεια μιας τυπικής διάταξης του σαρωτή είναι της τάξης των 0.2 mm, όπως εκτιμήθηκε τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά. Για την πρακτική αξιολόγηση της ακρίβειας σαρώθηκαν αντικείμενα γνωστών διαστάσεων, ενώ ο σαρωτής δοκιμάστηκε επίσης έναντι εμπορικών σαρωτών, υψηλού και χαμηλού κόστους, με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η διατρι-

βή ολοκληρώνεται με την παρουσίαση και αξιολόγηση όλων των εφαρμογών που πραγματοποιήθηκαν, τα συμπεράσματα και τις προτάσεις της εργασίας, και, τέλος, την χρησιμοποιηθείσα βιβλιογραφία.

DEVELOPMENT OF A PHOTOGRAMMETRIC LASER SCANNER USING ADDITIONAL GEOMETRICAL CONSTRAINTS

Anthony Prokos

Ph.D. Dissertation

National Technical University of Athens, Greece
School of Rural and Surveying Engineering
Department of Surveying
Laboratory of Photogrammetry

January 2012

Abstract

This thesis presents the development, implementation and evaluation of a low cost surface scanner for small objects using additional constraints for increasing its robustness and accuracy.

The scanner described here combines stereovision and the “slit-scanner” principle. Two web cameras, which are automatically pre-calibrated, view the trace of a moving hand-held laser plane in the scene. The laser line helps solve the correspondence problem and, finally, calculate the coordinates of 3D surface points by using the simple parallax equations on epipolar images. Triangulation is then strengthened by extra geometric constraints. In more detail, the steps of the procedure are as follows:

The system is calibrated automatically with bundle adjustment in order to estimate the interior and the true-to-scale relative orientation of the two web cameras by processing stereo pairs of a 2D chess-board. For the purposes of this dissertation an algorithm was developed to automatically recognize the pattern coordinate system, collect all nodes of the chess-board and estimate initial values for all unknowns. This allows image pairs acquired during scanning to be re-sampled to (distortion-free) epipolar images. These images only depict the trace of the laser after subtraction of the background; also, smoothing filters are applied to reduce noise effects. The search for point homologues is thus confined on corresponding epipolar lines.

Homologous points are defined as intersections of the epipolar lines with the viewed laser profiles (intensity peaks on each image row). Among a variety of tested methods, Gaussian curve fitting on each laser profile was chosen for peak detection. Peak position is given by simultaneously fitting three Gaussian profiles, with the additional curves being interpolated in the two diagonal directions through the initial peak approximation. This exploits information from the peak neighbourhood, while still keeping the detected point on the epipolar row.

The accuracy of peak position functions as criterion for point acceptance.

The initial calculation of the 3D coordinates for all points by means of the parallax equations (solution with no redundancy) is strengthened by imposing extra geometric constraints to the solution:

- All points reconstructed from the laser stripe of each image pair should belong to the laser plane.
- Placing the object in a corner formed by two intersecting planes (which have been previously scanned) allows introducing an extra co-planarity constraint for all points lying on these background planes.
- Neighbouring points should have compatible depth values (smoothing effect).

The influence of these constraints, enforced either as ‘hard’ or ‘soft’ constraints, is examined and evaluated. The suggested solution estimates all unknown values of a whole scanning process in a single adjustment step. The introduction of geometric constraints strengthens the solution by offering a redundancy of observations, thus increasing reliability, and also allows addressing the problem of multiple intensity maxima due to occlusions or reflections. Finally, the point cloud generated can be augmented with RGB values by projection of background images generated automatically from the data set with a time median approach.

In order to obtain a full 3D model of an object, several scans from different positions must be fused, using algorithms such as ICP. In the context of a fully automatic procedure, initial estimates for translation and rotation for ICP must also be automatically calculated. Here information from the background images is used, provided that the object is sufficiently textured for an interest operator to extract sufficient points, both in number and in distribution. Using the SIFT and RANSAC algorithms, homologous points are extracted (via the fundamental matrix) between the images from adjacent scan positions. The 2D point pairs are upgraded to 3D by interpolation to the respective point clouds, thus making a rigid body transformation between the two point clouds possible.

In the final step, the generated point cloud is smoothened. Several smoothing algorithms are evaluated and applied to the individual or the combined point clouds. For smoothing, it is assumed that the object may be locally approximated by basic mathematical surfaces, while an anisotropic approach depending on local surface shape is also introduced.

The accuracy of the scanner is in the order of 0.2 mm, as evaluated both theoretically and experimentally. For the practical evaluation, objects of known dimensions were scanned, while the system was also tested against a high-cost and a low-cost commercial scanner.

The dissertation concludes with a presentation and evaluation of all applications carried out, its conclusions and suggestions, and finally the cited references.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	i
Ευχαριστίες	ii
Περίληψη	iii
Abstract	vi

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1. Το πλαίσιο της διατριβής	2
1.2. Συλλογή 3D πληροφορίας	4
1.2.1. Γενικά	4
1.2.2. Συστήματα ενεργού φωτός	6
1.2.2.1. Σαρωτές παλμού	6
1.2.2.2. Σαρωτές διαφοράς φάσης φέροντος κύματος	7
1.2.3. Συστήματα παθητικού φωτός	8
1.2.3.1. Σαρωτές τριγωνισμού	8
1.2.3.2. Σαρωτές δομημένου φωτός	13
1.2.3.3. Παλαιότερες τεχνικές οπτικής σάρωσης.....	16
1.2.3.4. Τοπογραφία moiré	17
1.2.4. 3D πληροφορία αποκλειστικά από εικόνες	18
1.2.4.1. Πυκνή συνταύτιση εικόνων.....	18
1.2.4.2. Σχήμα από σκίαση και σχήμα από σιλουέτες	19
1.2.5. Άλλες μέθοδοι σάρωσης	21
1.3. Στόχος της διατριβής.....	22
1.4. Διάγραμμα ροής της μεθόδου σάρωσης	24
1.4.1. Συλλογή δεδομένων	24
1.4.2. Αυτόματη επεξεργασία δεδομένων	25
1.5. Πρωτοτυπία της διατριβής.....	25
1.6. Διάρθρωση της διατριβής	26

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Βαθμονόμηση του συστήματος

2.1.	Εισαγωγικά	29
2.2.	Εσωτερικός προσανατολισμός.....	32
2.3.	Σχετικός προσανατολισμός με κλίμακα	34
2.4.	Μέθοδος της δέσμης	34
2.5.	Αρχικές τιμές	36
2.6.	Ελάχιστες παρατηρήσεις.....	36
2.7.	Αυτόματη αναγνώριση πεδίου ελέγχου	37
2.8.	Εκτέλεση διαδικασίας	39
2.9.	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων βαθμονόμησης.....	43

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Προεπεξεργασία και δημιουργία επιπολικών εικόνων

3.1.	Εισαγωγικά	48
3.2.	Επιπολική γεωμετρία	48
3.3.	Επιπολικές εικόνες	49
3.4.	Λήψη εικόνων	52
3.5.	Αφαίρεση υποβάθρου	52
3.6.	Μείωση θορύβου	54

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Εξαγωγή σημείων

4.1.	Εισαγωγικά	59
4.2.	Μέγιστη τιμή	61
4.3.	Χρήση κατωφλίου	62
4.4.	Μέγιστο παραβολής.....	62
4.5.	Μέγιστο παραβολής κάθετα στην λωρίδα laser.....	62
4.6.	Μέγιστο καμπύλης Gauss	63
4.7.	Μέγιστο καμπύλης Gauss κάθετα στην λωρίδα laser	63
4.8.	Κέντρο βάρους	63
4.9.	Χρήση φίλτρων πεπερασμένης ωστικής απόκρισης.....	64

4.10. Μονοδιάστατη ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση.....	64
4.11. Άμεση μέτρηση σημείων.....	65
4.12. Αξιολόγηση μεθόδων.....	65
4.13. Διεύρυνση της περιοχής άντλησης ραδιομετρικής πληροφορίας	68
4.13.1. Συμμετοχή σειρών της εικόνας εκατέρωθεν της επιπολικής γραμμής.....	68
4.13.2. Συμμετοχή πληροφορίας από περισσότερες διευθύνσεις	68
4.14. Το πρόβλημα των πολλαπλών μεγίστων	71
4.15. Ακρίβεια προσδιορισμού σημείου	71
4.16. Αποδοχή σημείων	72

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Ανακατασκευή 3D νέφους σημείων

5.1. Εισαγωγικά.....	77
5.2. Εξωτερικά επίπεδα.....	78
5.3. Αλγόριθμοι 3D ανακατασκευής.....	80
5.3.1. Εμπροσθοτομία χωρίς δεσμεύσεις	81
5.3.2. Αυστηρή δέσμευση άγνωστου επιπέδου laser	81
5.3.3. Ελαστική δέσμευση άγνωστου επιπέδου laser.....	82
5.3.4. Αυστηρές δεσμεύσεις άγνωστου επιπέδου laser και γνωστών εξωτερικών επιπέδων ..	83
5.3.5. Ελαστική δέσμευση άγνωστου επιπέδου laser και αυστηρή δέσμευση γνωστών εξωτερικών επιπέδων	83
5.3.6. Ενιαία συνόρθωση πλήρους θέσης σάρωσης με ελαστικές δεσμεύσεις άγνωστου επιπέδου laser και άγνωστων εξωτερικών επιπέδων	84
5.3.7. Ενιαία συνόρθωση πλήρους θέσης σάρωσης με πρόσθετη δέσμευση εξομάλυνσης	84
5.3.8. Κοινή συνόρθωση πολλών θέσεων σάρωσης με και χωρίς πρόσθετη δέσμευση εξομάλυνσης.....	86
5.4. Αξιολόγηση μεθόδων επίλυσης	86
5.5. Πολλαπλά μέγιστα	90
5.6. Απόδοση φωτοϋφής	91

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Συνένωση και επεξεργασία νεφών σημείων

6.1. Εισαγωγικά.....	94
----------------------	----

6.2.	Διαγραφή σημείων.....	94
6.3.	Συνένωση νεφών σημείων.....	94
6.3.1.	Γενικά.....	94
6.3.2.	Αυτόματη συνένωση νεφών.....	97
6.4.	Εξομάλυνση νέφους σημείων.....	103
6.4.1.	Φίλτρο μέσου όρου.....	108
6.4.2.	Φίλτρο διαμέσου.....	108
6.4.3.	Ισοτροπική προσαρμογή επιπέδου.....	110
6.4.4.	Ισοτροπική προσαρμογή ελλειπτικού παραβολοειδούς.....	111
6.4.5.	Ανισοτροπική προσαρμογή επιπέδου.....	111
6.4.6.	Ανισοτροπική προσαρμογή ελλειπτικού παραβολοειδούς.....	112
6.4.7.	Αξιολόγηση μεθόδων εξομάλυνσης.....	112
6.5.	Διαγραφή σημείων εκτός πληθυσμού.....	115

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Αξιολόγηση της ακρίβειας του συστήματος

7.1.	Παράγοντες επηρεασμού της ακρίβειας.....	117
7.2.	Θεωρητική εκτίμηση ακρίβειας.....	119
7.3.	Πρακτική εκτίμηση ακρίβειας.....	121
7.3.1.	Σάρωση επιπέδων.....	121
7.3.2.	Σάρωση κυλίνδρων.....	123
7.3.2.1.	Σωλήνας PVC.....	123
7.3.2.2.	Κύλινδρος Μετροτεχνικού Εργαστηρίου ΕΜΠ.....	125
7.3.3.	Δοκίμιο Μετροτεχνικού Εργαστηρίου ΕΜΠ.....	126
7.4.	Σύγκριση με εμπορικούς σαρωτές.....	128
7.4.1.	Σαρωτής υψηλού κόστους (<i>SL2 Scanner</i>).....	128
7.4.1.1.	Σάρωση κυλίνδρου.....	128
7.4.1.2.	Σάρωση σύνθετων επιφανειών.....	129
7.4.2.	Σαρωτής χαμηλού κόστους (<i>David Laser Scanner</i>).....	131
7.4.2.1.	Σάρωση επιπέδου.....	132
7.4.2.2.	Σάρωση κυλίνδρου.....	134
7.5.	Αξιολόγηση ακρίβειας.....	135

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Εφαρμογές

8.1.	Εισαγωγικά	138
8.2.	Δερμάτινο κουτί	139
8.3.	Κεραμική κεφαλή	140
8.4.	Κεραμικός κουμπάρας	141
8.5.	Αγαλματίδιο Αφροδίτης	143
8.6.	Πλαστικός κουμπάρας	145
8.7.	Κέρμα	146
8.8.	Πρόσωπο	147
8.9.	Κορμός ανθρώπου	148

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

Συμπεράσματα – Προτάσεις

9.1.	Ανακεφαλαίωση	150
9.2.	Υλοποίηση αλγορίθμου	151
9.3.	Αξιολόγηση της μεθόδου και προτάσεις	152

Βιβλιογραφία	155
---------------------------	------------

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1

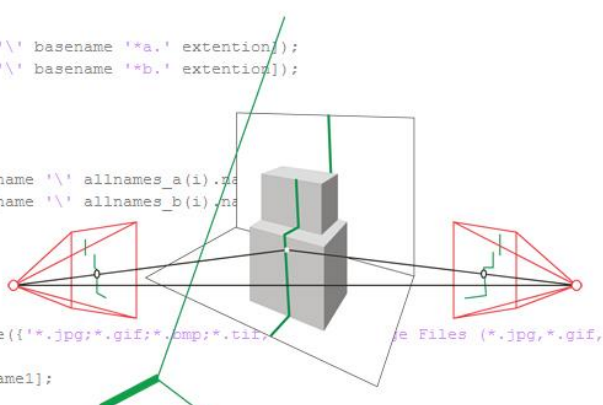
```
- function imagenames = filenameinput

imagenames = [];
%Read image

reply = input('Do you want to select each image? Y/N [N]: ', 's');
if isempty(reply)
    reply = 'N';
end

if upper(reply) == 'N'
    dir_name = 'data_20'; %uigetdir('', 'Directory with the files'); %
    basename = input('Input Base Name: ', 's');
    extention = input('Input File Extension [bmp]: ', 's');
    if isempty(extention)
        extention = 'bmp';
    end
    allnames_a = dir([dir_name '\' basename '*a.' extention]);
    allnames_b = dir([dir_name '\' basename '*b.' extention]);
    size = size(allnames_a,1);

    imagenames{size,2} = '';
    for i=1:size
        imagenames{i,1} = [dir_name '\' allnames_a(i).name];
        imagenames{i,2} = [dir_name '\' allnames_b(i).name];
    end
else
    dir2 = 1;
    numofim = 0;
    while dir2~=0
        [imname1,dir1]=uigetfile({'*.jpg;*.gif;*.bmp;*.tif;*.tiff','Image Files (*.jpg,*.gif,*.bmp,*.tif,*.tiff)'));
        if dir1~=0
            im1path = [dir1 imname1];
        else
            return
        end
        [imname2,dir2]=uigetfile({'*.jpg;*.gif;*.bmp;*.tif;*.tiff','Image Files (*.jpg,*.gif,*.bmp,*.tif,*.tiff)'));
        if dir2~=0
            numofim = numofim + 1;
            im2path = [dir2 imname2];
            imagenames{numofim,1} = im1path; %ok<AGROW>
            imagenames{numofim,2} = im2path; %ok<AGROW>
            pause(.5)
        end
    end
end
```



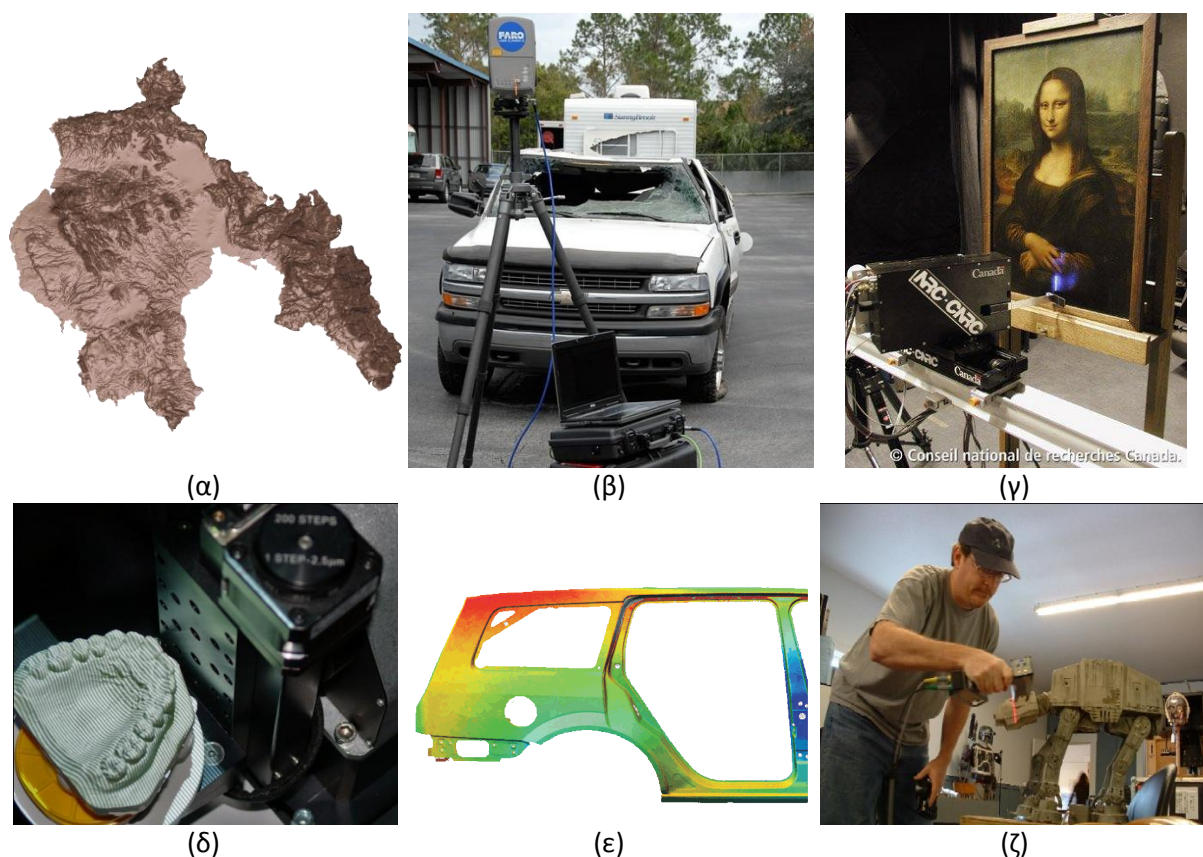
1. Εισαγωγή

1.1. Το πλαίσιο της διατριβής

Η βασικότερη εργασία που αναλαμβάνει ο τοπογράφος μηχανικός είναι η συλλογή χωρικής πληροφορίας, η οποία αποδίδεται συνήθως μέσω ενός χάρτη ή διαγράμματος ή και ενός 3D μοντέλου. Σε αυτό το πλαίσιο, τα τελευταία χρόνια υπάρχουν ραγδαίες εξελίξεις, ειδικά δε στον επιστημονικό χώρο της Φωτογραμμετρίας με την εισαγωγή των ψηφιακών εικόνων. Η απλή γνώση των τιμών χρώματος μίας εικόνας έχει επιτρέψει την μερική (ή σε ορισμένες περιπτώσεις και την πλήρη) αυτοματοποίηση όλων των κλασικών προβλημάτων προσανατολισμού της Φωτογραμμετρίας όσο και εκείνου της 3D ανακατασκευής. Σήμερα, για παράδειγμα, υπάρχει η δυνατότητα για αυτόματο αεροτριγωνισμό ή για αυτόματη παραγωγή ενός ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου από αεροφωτογραφίες. Βέβαια ο επιστημονικός χώρος της Φωτογραμμετρίας, ιδιαιτέρως στο παρελθόν, είχε στραμμένο το ενδιαφέρον του κυρίως στην αεροφωτογραμμετρία και την παραγωγή χαρτών. Από την άλλη μεριά, ο χώρος της όρασης υπολογιστών έχει προσφέρει, και εξακολουθεί να προσφέρει, καινοτόμους αυτόματους αλγορίθμους προσανατολισμού αλλά και ανακατασκευής, που έχουν πλέον δώσει αποφασιστική ώθηση στην έρευνα και τον αυτοματισμό στα συνεχώς διευρυνόμενα πεδία της “εγγύς φωτογραμμετρίας” (close-range photogrammetry). Τα προβλήματα της τελευταίας, ως γνωστόν, δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν, τις περισσότερες τουλάχιστον φορές, με τις τυπικές μεθόδους της αεροφωτογραμμετρίας, κυρίως λόγω της συχνής απουσίας a priori πληροφορίας σχετικά με την γεωμετρική διάταξη των λήψεων όσο και της χρήσης μηχανών λήψης με άγνωστη εσωτερική γεωμετρία.

Το ειδικότερο θέμα της αυτόματης 3D ανακατασκευής αντικειμένων από εικόνες είναι ένα κεντρικό ζήτημα της “εγγύς φωτογραμμετρίας” (και αποτελεί το πλαίσιο στο οποίο κινείται και η παρούσα διατριβή, αφού θέμα της είναι η δημιουργία ενός φωτογραμμετρικού σαρωτή τρισδιάστατων επιφανειών). Πράγματι, η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει αυξήσει τις απαιτήσεις του τεχνικού κόσμου αλλά και των χρηστών για λεπτομερείς τρισδιάστατες αναπαραστάσεις αντικειμένων. Στο παρελθόν, για να καταγραφούν το σχήμα και οι διαστάσεις των αντικειμένων γινόταν κατά βάση χρήση ορθών προβολών και τομών βασισμένων στην μέτρηση επιλεγμένων διακριτών σημείων. Η εισαγωγή του ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου και επιφανείας αποτέλεσε το πρώτο σημαντικό βήμα προς την πλήρη περιγραφή επιφανειών. Σήμερα πια, ολοένα και περισσότεροι επιστημονικοί (και όχι μόνο) χώροι ζητούν πρόσβαση σε συστήματα αποτύπωσης “πυκνής” τρισδιάστατης πληροφορίας (όπου ο όρος “πυκνή” αντιδιαστέλλεται με την συλλογή διακριτών σημείων). Το πεδίο αυτό βρίσκεται ουσιαστικά στο σταυροδρόμι φωτογραμμετρίας, όρασης υπολογιστών και γραφικών υπολογιστών (Leberl, 2003). Μπορούν να αναφερθούν πολλά παραδείγματα αξιοποίησης πυκνής 3D πληροφορίας (βλ. εντελώς ενδεικτικά Jongeling et al., 2007, Cignoni & Scopigno, 2008, Marcon et al., 2009, Hieu et al., 2010). Από τα καθ’ ημάς ψηφιακά μοντέλα επιφανείας έως

εφαρμογές στον κινηματογράφο και την 3D εικονική κίνηση, υπάρχουν πολλά πεδία εφαρμογής, όπως η τεκμηρίωση της πολιτιστικής κληρονομιάς, οι ιατρικές εφαρμογές, η ανακατασκευή ατυχημάτων, ο μετρηολογικός έλεγχος βιομηχανικών αντικειμένων κ.λπ. (Εικ. 1.1).



Εικόνα 1.1: Παραδείγματα 3D μοντέλων: α) Ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου νομού Μεσσηνίας. β) Ανακατασκευή ατυχήματος (πηγή: ιστοσελίδα FARO – βλ. Βιβλιογραφία). γ) Σάρωση της Τζιοκόντας (πηγή: ιστοσελίδα National Research Council Canada – βλ. Βιβλιογραφία). δ) Σάρωση εκμαγείου οδοντοστοιχίας (πηγή: ιστοσελίδα RSI GmbH – βλ. Βιβλιογραφία). ε) Έλεγχος πλαισίου αυτοκινήτου (πηγή: ιστοσελίδα Breuckmann GmbH – βλ. Βιβλιογραφία). ζ) Σάρωση μακέτας για χρήση σε κινηματογραφική ταινία (πηγή: ιστοσελίδα Polhemus – βλ. Βιβλιογραφία).

Πολύ συνοπτικά και εν είδει απλών ενδεικτικών παραδειγμάτων, μεγάλο ενδιαφέρον, κυρίως για τον χώρο της αρχαιολογίας αλλά ακόμα και του τουρισμού, παρουσιάζει η τεκμηρίωση αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς. Από την τρισδιάστατη καταγραφή ενός αντικειμένου μπορούν, για παράδειγμα, να αντληθούν πληροφορίες για την κατασκευή του όσο και για τις επιπτώσεις του χρόνου σε αυτό. Μέσω μάλιστα της πληροφορίας αυτής μπορεί, ακόμα, να βοηθηθεί το έργο της συντήρησης με το να βρεθούν, για παράδειγμα, αυτόματα οι σωστές θέσεις σαρωμένων θραυσμάτων. Και βέβαια η πλήρης 3D τεκμηρίωση τέτοιων αντικειμένων επιτρέπει και την ανάπτυξη τουριστικών εφαρμογών, όπως η αναπαραγωγή αντικειμένων και η δυνατότητα δημιουργίας εικονικών Διαδικτυακών μουσείων. Αλλά και ο χώρος της ιατρικής είναι από τους πρώτους που είχε χρειαστεί 3D δεδομένα. Η μελέτη και αντιμετώπιση ορθοπεδικών προβλημάτων όπως σκολίωσης και κύφωσης, για παράδειγμα, ή και ερωτημάτων που ανακύπτουν στην ορθοδοντική, διευκολύνονται αποφασιστικά από την ύπαρξη λεπτομερών 3D μοντέλων. Ακόμα, η 3D πληροφορία οχημάτων μετά από ατύχη-

μα επιτρέπει να εντοπίζονται περιοχές αδυναμίας του αμαξώματος για την βελτίωση της ασφάλειας. Παράλληλα, η 3D πληροφορία για βιομηχανικά προϊόντα στο τέλος μίας γραμμής παραγωγής επιτρέπει να βρεθούν οι αποχές από τον αρχικό σχεδιασμό, και έτσι να αξιολογηθεί αυτό ως αποδεκτό ή όχι, ενώ με περιοδικούς ελέγχους μπορεί να μετρηθεί και η αναπόφευκτη παραμόρφωση που υφίστανται οι χρησιμοποιούμενες μήτρες.

Ωστόσο ο χώρος που ζητεί σήμερα περισσότερο από κάθε άλλον 3D πληροφορία είναι ίσως εκείνος του κινηματογράφου, των παιχνιδιών και γενικότερα της 3D εικονικής κίνησης (3D animation). Είναι, για παράδειγμα, συχνά πιο εύκολο να δημιουργηθεί μια αναλογική μακέτα του αντικειμένου που θα εισαχθεί στην ταινία ή το ηλεκτρονικό παιχνίδι παρά να δημιουργηθεί το αντικείμενο απευθείας στον υπολογιστή. Η μακέτα σαρώνεται ώστε η ζητούμενη πληροφορία να υποστεί πλέον επεξεργασία σε περιβάλλον γραφικών. Ταυτόχρονα, αυξάνει ο αριθμός των παιχνιδιών όπου απαιτείται η δημιουργία 3D μοντέλων σε πραγματικό χρόνο. Πρόκειται για έναν οικονομικά και εμπορικά πολύ δυναμικό χώρο, ο οποίος μάλιστα έχει ωθήσει στην ανάπτυξη νέων φθηνών μεθόδων αποτύπωσης.

Οι πολύ συνοπτικές αυτές αναφορές για την ζήτηση για 3D πληροφορία σε εφαρμογές μικρών αποστάσεων υποδηλώνουν και την ανάγκη για την ανάπτυξη ολοένα και απλούστερων, οικονομικότερων, ακριβέστερων και πιο εύρωστων αλγορίθμων 3D ανακατασκευής, η οποία διαπιστώνεται σήμερα. Έτσι, ακολουθεί μια συνοπτική παρουσίαση σύγχρονων μεθόδων για την αυτόματη παραγωγή 3D μοντέλων για επίγειες εφαρμογές.

1.2. Συλλογή 3D πληροφορίας

1.2.1. Γενικά

Στην γενική περίπτωση, η φωτογραμμετρία μπορεί να δώσει τις 3D διαστάσεις ενός αντικειμένου εφόσον αυτό έχει απεικονιστεί από δύο τουλάχιστον θέσεις. Για να γίνει αυτό πρέπει, στην απλή τυπική περίπτωση, να είναι γνωστοί ο εσωτερικός και εξωτερικός προσανατολισμός των μηχανών, οπότε από τις ομολογίες σημείων στις επικαλυπτόμενες εικόνες υπολογίζονται οι 3D συντεταγμένες τους (τομή αντίστοιχων οπτικών ακτίνων). Προφανώς υπάρχουν και άλλες επιλογές για να αντιμετωπιστεί το ζήτημα των προσανατολισμών, όπως πχ. η χρήση προβολικών σχέσεων (όπου δεν απαιτείται γνώση της γεωμετρίας της μηχανής). Ακόμα, οι προσανατολισμοί (εσωτερικός και εξωτερικός ή σχετικός) είναι δυνατόν, βέβαια, να πραγματοποιούνται σε ένα βήμα και να έπεται ανεξάρτητη φάση 3D ανακατασκευής, ενώ προσανατολισμοί και 3D ανακατασκευή μπορούν να ενοποιηθούν και σε μια ενιαία επίλυση. Στην παρούσα διατριβή η διαδικασία προσανατολισμού του διεικονικού συστήματος πραγματοποιείται σε ένα πρώτο βήμα και έπεται η σάρωση του αντικειμένου.

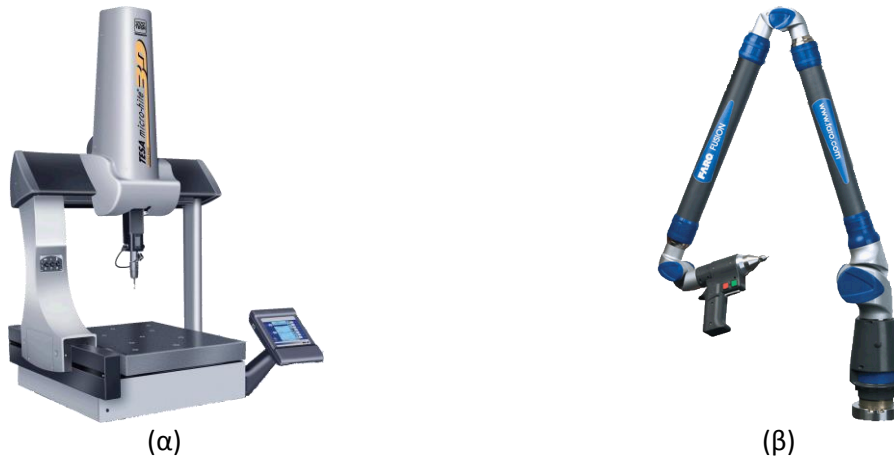
Η αυτοματοποίηση των παραπάνω διαδικασιών (προσανατολισμών και 3D ανακατασκευής) συγκεντρώνει τα τελευταία χρόνια το κύριο ερευνητικό ενδιαφέρον στην Φωτογραμμετρία.

Τα ζητήματα του εσωτερικού και του σχετικού προσανατολισμού δύο ή και περισσότερων εικόνων έχουν επιλυθεί ικανοποιητικά, ενώ και το θέμα του εξωτερικού προσανατολισμού μπορεί να αντιμετωπιστεί αυτόματα υπό όρους. Στο Κεφάλαιο 2 της διατριβής γίνεται αναφορά σε ειδικές μεθόδους για τον αυτόματο υπολογισμό του εσωτερικού προσανατολισμού σε επίγειες εφαρμογές. Από απλές ομολογίες εικονοσημείων μπορεί βέβαια να πραγματοποιηθεί αυτόματος σχετικός προσανατολισμός μεταξύ δύο ή πολλών εικόνων γνωστής εσωτερικής γεωμετρίας, αλλά αυτό είναι δυνατόν και για μη βαθμονομημένες μηχανές ώστε να βρεθεί ο επιπολικός πίνακας στερεοζεύγους ή και ο πλήρης προσανατολισμός περισσότερων εικόνων σε αυθαίρετο σύστημα και κλίμακα (Hartley & Zisserman, 2000, Faugeras & Luong, 2001, Frahm et al., 2010, Καλησπεράκης, 2010). Βέβαια για τον πλήρη υπολογισμό του εξωτερικού προσανατολισμού εικόνων σε ένα δεδομένο σύστημα χώρου είναι αναγκαίο να χρησιμοποιήσει κανείς κατάλληλους στόχους (Ganci & Hanley, 1998, Fraser, 1997). Στην παρούσα διατριβή (Κεφάλαιο 2) χρησιμοποιείται ειδικός στόχος στην ενιαία διαδικασία αυτόματης αποκατάστασης του εσωτερικού και του υπό ορθή κλίμακα σχετικού προσανατολισμού στερεοζεύγους. Σημειώνεται πάντως πως, σε άλλο σημείο της διατριβής που αναφέρεται στον προσανατολισμό νεφών σημείων (ενότητα 6.3.2), γίνεται χρήση και του επιπολικού πίνακα στερεοζεύγους.

Όσον αφορά την αυτοματοποίηση της εύρεσης ομολογιών για την 3D ανακατασκευή, μπορεί εδώ να γίνει εξ αρχής μία διάκριση βάσει της προσέγγισης που υιοθετείται. Η μία τεχνική αναφέρεται στην τυπική ψηφιακή συνταύτιση εικόνας (image matching) σε μία ή περισσότερες εικόνες, διαδικασία η οποία μάλλον μπορεί να εκτελεστεί για όλα τα σημεία της εικόνας (πυκνή συνταύτιση εικόνων – dense image matching, βλ. ενότητα 1.2.4.1). Έχει διαπιστωθεί από νωρίς ότι τα αποτελέσματα της συνταύτισης μπορούν να βελτιωθούν εάν ενισχυθεί η υφή με τεχνητό τρόπο (Grün & Baltsavias, 1989, d'Aruzzo, 1998). Όμως αυτή η προβαλλόμενη τεχνητή υφή μπορεί και να είναι τέτοια που στην ουσία να “κωδικοποιεί” το αντικείμενο, ώστε να υποβοηθείται η εύρεση ομολογιών αποκλειστικά στα κωδικοποιημένα σημεία (αυτή την τεχνική υιοθετεί ο σαρωτής της παρούσας διατριβής). Στην τρίτη περίπτωση αντικαθίσταται η μια μηχανή από έναν προβολέα. Η παραμόρφωση του προβαλλόμενου σχηματισμού από το ανάγλυφο του αντικειμένου, όπως αυτός παρατηρείται από την μηχανή, περιέχει την ζητούμενη 3D πληροφορία. Στις τεχνικές αυτές επιλέγεται προφανώς προβαλλόμενο μοτίβο που να αναγνωρίζεται σχετικά εύκολα στην εικόνα με τρόπο αυτόματο. Στην τελευταία αυτή κατηγορία ανήκουν οι σαρωτές δομημένου φωτός και οι σαρωτές τριγωνισμού (βλ. ενότητες 1.2.3.1 και 1.2.3.2) που χρησιμοποιούν μία μηχανή, αλλά και “οπτικοί σαρωτές” της προ αυτοματισμού περιόδου, οι οποίοι παρουσιάζουν σημαντικό ιστορικό ενδιαφέρον (ενότητα 1.2.3.3). Υπό μία έννοια, στην κατηγορία αυτή εμπίπτουν, τέλος, και οι σαρωτές που χρησιμοποιούν τεχνικές τοπογραφίας moiré (ενότητα 1.2.3.4).

Μέχρι πρόσφατα, πάντως, για την σάρωση αντικειμένων περιορισμένων διαστάσεων με υψηλή απαίτηση ακριβείας (κάτω του mm ή και της τάξης των μερικών μm) έμοιαζε σχεδόν υποχρεωτική η λύση των συσκευών μέτρησης συντεταγμένων (coordinate-measuring machine). Οι συσκευές αυτές καταγράφουν απευθείας τις συντεταγμένες μίας ακίδας μόλις

αυτή έρθει σε επαφή με το αντικείμενο. Έχουν είτε την μορφή “γέφυρας”, όπου η ακίδα κινείται στις τρεις διευθύνσεις X , Y και Z ανεξάρτητα, είτε την μορφή βραχίονα, όπου η ακίδα κινείται με μεγαλύτερη ελευθερία (Εικ.1.2). Για την πλήρη καταγραφή της μορφής του αντικειμένου, ο χρήστης ή το σύστημα κινεί την ακίδα πάνω στην επιφάνειά του. Το αποτέλεσμα είναι πράγματι πολύ ακριβές, αλλά η διαδικασία είναι χρονοβόρα και, όταν απαιτείται η συμβολή του χρήστη, προφανώς και κοπιαστική (Στρατάκος, 2007).



Εικόνα 1.2: Συσκευές μέτρησης συντεταγμένων: α) τύπου γέφυρας (πηγή: ιστοσελίδα TESA – βλ. Βιβλιογραφία), β) τύπου βραχίονα (πηγή: ιστοσελίδα FARO – βλ. Βιβλιογραφία).

Οι συσκευές μέτρησης συντεταγμένων είναι μία αμιγώς μηχανική απάντηση στο πρόβλημα συλλογής σημείων της επιφάνειας αντικειμένων που απαιτεί επαφή με το αντικείμενο. Στον αντίποδα βρίσκονται σαρωτές που δεν απαιτούν τέτοια επαφή. Πρόκειται για οπτικούς σαρωτές, σαρωτές δομημένου φωτός και σαρωτές laser. Με τον όρο “σαρωτές laser” εννοούνται, γενικά, συστήματα διαφορετικών τεχνολογιών και αρχών λειτουργίας. Κατ’ αρχάς πρέπει να γίνει διαχωρισμός με βάση τις ιδιότητες της χρησιμοποιούμενης δέσμης laser. Έτσι, υπάρχουν συστήματα με ενεργό φως, που αξιοποιούν δηλαδή τις ιδιότητες του φωτός (μήκος κύματος, ταχύτητα) για να μετρηθεί η ζητούμενη απόσταση, και παθητικά συστήματα όπου το laser (ή η δέσμη φωτός) απλώς κωδικοποιεί την επιφάνεια.

1.2.2. Συστήματα ενεργού φωτός

1.2.2.1. Σαρωτές παλμού

Το φως είναι ένα κύμα, του οποίου οι ιδιότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μετρηθούν αποστάσεις. Οι σαρωτές laser παλμού (time of flight [TOF] laser scanners) χρησιμοποιούν την ταχύτητα του φωτός για τον υπολογισμό αποστάσεων (Εικ. 1.3α). Στέλνουν έναν παλμό φωτός laser και μετρούν τον χρόνο που χρειάζεται αυτός για να φτάσει στο αντικείμενο, να ανακλαστεί και να επιτρέψει στην συσκευή. Η διαδικασία δεν διαφέρει ουσιαστικά από εκείνη ενός κοινού γεωδαιτικού σταθμού. Η βασική διαφορά είναι πως ο σταθμός μετράει αποστάσεις από διακριτά σημεία, ενώ ο σαρωτής μετράει συνεχώς σημεία που ορί-

ζονται βάσει γωνιακού βήματος καθοριζόμενου από τον χρήστη. Συνήθως επιλέγεται η απόσταση μεταξύ των συλλεγόμενων σημείων για δεδομένη απόσταση από τον σαρωτή. Η πυκνότητα των συλλεγόμενων σημείων εξαρτάται βέβαια από αυτή την επιλογή (σκόπιμο είναι, γενικά, το βήμα συλλογής να είναι μεγαλύτερο από την ακρίβεια του συστήματος). Τα συστήματα αυτά έχουν σχεδόν ομοιογενή σφάλματα σε ολόκληρο το εύρος των μετρήσεών τους. Από τους σαρωτές παλμού μπορεί τελικά να αναμένεται ακρίβεια καλύτερη του 1 cm. Οι σαρωτές αυτοί ενδείκνυνται για την σάρωση σχετικά μεγάλων αντικειμένων, όταν δηλαδή η απαίτηση ακριβείας είναι της τάξης μερικών cm, όπως πχ. σε τεχνικά έργα. Η απόσταση μεταξύ σαρωτή και αντικειμένου μπορεί θεωρητικά να φτάσει τα 2 km, αλλά στην πράξη συνήθως δεν ξεπερνά τις μερικές εκατοντάδες m.

1.2.2.2. Σαρωτές διαφοράς φάσης φέροντος κύματος

Για μεγαλύτερη ακρίβεια, υπάρχουν σαρωτές που υπολογίζουν αποστάσεις χρησιμοποιώντας το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου φωτός (Εικ. 1.3β). Εδώ το εκπεμπόμενο κύμα ανακλάται στην επιφάνεια του αντικειμένου και επιστρέφει στον σαρωτή υπό διαφορετική φάση. Η διαφορά φάσης μεταξύ εκπεμπόμενου και επιστρέφοντος κύματος, δεδομένου του μήκους κύματος, εξαρτάται από την απόσταση σαρωτή-αντικειμένου. Για αύξηση της ακρίβειας, το κύμα αυτό διαμορφώνεται, φέροντας κύματα με πολύ μικρότερο μήκος. Προφανώς, οι σαρωτές διαφοράς φάσης φέροντος κύματος (phase-shifting scanners) έχουν περιορισμένη εμβέλεια μέτρησης, ίση με το μισό μήκος του φέροντος κύματος, και οριακά μπορούν να μετρούν έως και στα 120 m. Εδώ είναι δυνατή η επιλογή μεγαλύτερης πυκνότητας σημείων καθώς η ακρίβεια της μέτρησης (της τάξης μερικών mm) είναι ανώτερη εκείνης από τους σαρωτές TOF. Επειδή μάλιστα για κάθε σημείο λαμβάνεται μόνο μία μέτρηση, η ταχύτητά τους είναι σημαντικά μεγαλύτερη εκείνης των σαρωτών TOF. Λόγω της περιορισμένης εμβέλειάς τους, οι σαρωτές αυτοί προσφέρονται για αντικείμενα μεσαίων διαστάσεων, όπου υπάρχει απαίτηση ακρίβειας της τάξης μερικών mm, όπως πχ. αγάλματα.



Εικόνα 1.3: α) Σαρωτής τύπου παλμού (πηγή: ιστοσελίδα Leica – βλ. βιβλιογραφία). β) Σαρωτής τύπου διαφοράς φάσης φέροντος κύματος (πηγή: ιστοσελίδα FARO – βλ. βιβλιογραφία).

Για λόγους πληρότητας πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι παραλλαγές των σαρωτών παλμού

τοποθετούνται και σε αεροσκάφη με σκοπό την σάρωση της γήινης επιφάνειας ή σε άλλες κινούμενες πλατφόρμες, όπως σε αυτοκίνητα για την σάρωση δρόμων. Στα συστήματα αυτά ο σημαντικότερος παράγων ακρίβειας είναι ο προσανατολισμός της δέσμης του laser για κάθε μέτρηση. Αυτός υπολογίζεται με χρήση GPS, INS και κατάλληλων μαθηματικών εργαλείων (πχ. φίλτρου Kalman).

1.2.3. Συστήματα παθητικού φωτός

Σε αντιδιαστολή προς τους σαρωτές που μετρούν αποστάσεις με αξιοποίηση των ιδιοτήτων του φωτός (ταχύτητα, μήκος κύματος) και παρουσιάστηκαν συνοπτικά στην προηγούμενη ενότητα, οι τεχνικές σάρωσης που παρουσιάζονται εδώ χρησιμοποιούν φωτεινούς σχηματισμούς (light patterns) προκειμένου να “κωδικοποιήσουν” την επιφάνεια του αντικειμένου.

1.2.3.1. Σαρωτές τριγωνισμού

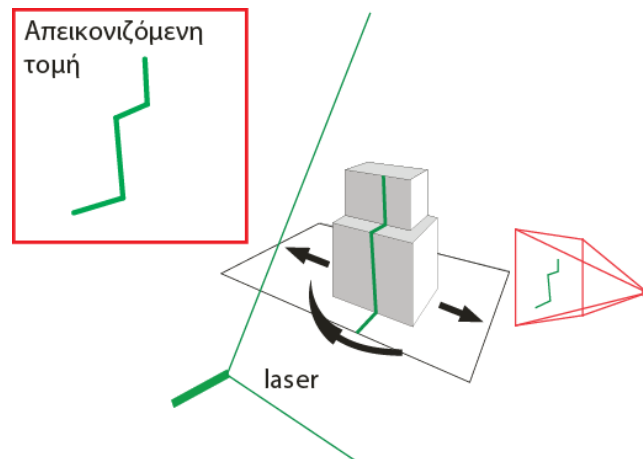
Πρόκειται ίσως για τους πιο διαδεδομένους σαρωτές για μικρά και μεσαίου μεγέθους αντικείμενα, κυρίως λόγω απλότητας κατασκευής και σχετικά χαμηλού κόστους (Blais, 2004). Σε αυτά τα συστήματα μία φωτογραφική μηχανή παρατηρεί το αντικείμενο καθώς αυτό τέμνεται από ένα φωτεινό επίπεδο που δημιουργεί μία λωρίδα (ή, σπανιότερα, καθώς αυτό τέμνεται από μία φωτεινή ακτίνα που δημιουργεί ένα σημείο) στην επιφάνειά του. Οι τρισδιάστατες συντεταγμένες των σημείων (ή του σημείου) που φωτίζονται μπορούν να υπολογιστούν εάν είναι γνωστή η εξίσωση, δηλαδή η θέση και ο προσανατολισμός, του φωτεινού επιπέδου (ή της φωτεινής ακτίνας) στο σύστημα της μηχανής. Οι τρεις συντεταγμένες X, Y, Z των σημείων υπολογίζονται χωρίς περίσσεια παρατηρήσεων από την συνθήκη συγγραμμικότητας και την εξίσωση του επιπέδου ή της ακτίνας:

$$\begin{aligned} X &= -Z \frac{x}{c} \\ Y &= -Z \frac{y}{c} \\ AX + BY + CZ + D &= 0 \end{aligned} \quad (1.1)$$

όπου:

x, y	εικονοσυντεταγμένες φωτιζόμενου σημείου
X, Y, Z	συντεταγμένες χώρου του σημείου στο σύστημα της μηχανής
c	σταθερά μηχανής (τα υπόλοιπα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού θεωρούνται γνωστά και στην εξίσωση έχουν απαλειφθεί)
A, B, C, D	συντελεστές επιπέδου.

Προφανώς το φωτεινό επίπεδο (ή η ακτίνα) πρέπει να μην διέρχεται από το κέντρο προβολής της μηχανής. Για παλαιότερες αναφορές σε σαρωτές τριγωνισμού με προβολή επιπέδου καθώς επίσης και για συστήματα με προβολή σημείου βλ. Besl (1988).



Εικόνα 1.4: Αρχή λειτουργίας σαρωτών τριγωνισμού με επίπεδο.

Η περιγραφείσα διαδικασία παράγει μια τομή (ένα προφίλ) της επιφάνειας του αντικειμένου. Για την πλήρη σάρωσή του απαιτείται κίνηση είτε του επιπέδου είτε του αντικειμένου είτε και των δύο (Εικ. 1.4). Ο Joel (1974) προτείνει ήδη μία αναλογική εφαρμογή της μεθόδου καταγράφοντας διαδοχικά, στην ίδια φωτογραφική επιφάνεια, τις τομές του αντικειμένου από ένα επίπεδο φωτός καθώς το όλο σύστημα κινείται κατακόρυφα. Η ελεγχόμενη αυτή κίνηση του φωτεινού επιπέδου υλοποιήθηκε αργότερα σε εμπορικές συσκευές με μηχανισμούς ακριβείας (Turner-Smith & Harris, 1986), το κόστος οποίων είναι συνήθως υψηλό. Έκτοτε έχουν εμφανιστεί πολλές εμπορικές συσκευές σαρωτών τριγωνισμού (αρκετές από αυτές αναφέρονται στην επισκόπηση του Blais, 2004). Παράλληλα με τις εμπορικές λύσεις, η απλότητα της μεθόδου αυτής έχει οδηγήσει και στην δημιουργία σαρωτών τριγωνισμού είτε με κοινές ψηφιακές μηχανές είτε, παλαιότερα, με μηχανές βίντεο (Moss et al., 1989), ενώ στόχος αρκετών ερευνητών είναι η δημιουργία σαρωτών χαμηλού κόστους χωρίς μηχανισμούς ακριβείας. Στις λύσεις αυτές συνήθως απαιτείται παρέμβαση του χρήστη, ο οποίος πχ. χειρίζεται μία συσκευή παραγωγής του προαναφερθέντος επιπέδου. Χρησιμοποιούνται μάλιστα και εξωτερικοί στόχοι για να οριστεί η θέση του επιπέδου που απαιτείται για τον τριγωνισμό. Εφόσον πάντως διατίθεται μηχανισμός ακριβείας που ορίζει την θέση του επιπέδου στο σύστημα της μηχανής, είναι δυνατόν να δημιουργηθεί, με σχετικά απλό τρόπο, ένας σαρωτής τριγωνισμού (Στρατάκος, 2007).

Αξιοσημείωτος σαρωτής χαμηλού κόστους ήταν εκείνος των Bouguet & Perona (1998), οι οποίοι ανέπτυξαν ένα πολύ ενδιαφέρον σύστημα χρησιμοποιώντας μία μηχανή δικτύου (web camera) και την σκιά που δημιουργεί μια ράβδος φωτιζόμενη από μία απλή λάμπα γραφείου (Εικ. 1.5α). Αρχικά τοποθετούν πεδίο βαθμονόμησης τύπου σκακιέρας σε ένα επίπεδο (επιφάνεια γραφείου) και βαθμονομούν εσωτερικά και εξωτερικά την μηχανή. Οι συντεταγμένες του σημείου από το οποίο προβάλλεται το φως (λάμπα γραφείου) υπολογίζονται μέσω του μήκους ενός μολυβιού. Από τις εικονοσυντεταγμένες της βάσης του μολυβιού και της σκιάς της μύτης του στο επίπεδο του γραφείου, όταν αυτό τοποθετηθεί κάθετα στο γραφείο, μπορεί να υπολογιστεί ευθεία στον χώρο που περιλαμβάνει το σημείο προβολής του φωτός. Από δύο ή περισσότερες τέτοιες ευθείες προκύπτει η ζητούμενη θέση του. Κατόπιν

ο χρήστης κινεί μία ράβδο κάτω από την λάμπα, η οποία δημιουργεί σκιά στο αντικείμενο. Αν το αντικείμενο έχει τοποθετηθεί έτσι ώστε να είναι ορατό το επίπεδο του γραφείου στο επάνω και το κάτω τμήμα της εικόνας, οι 3D συντεταγμένες σημείων του αντικειμένου προκύπτουν ως εξής. Εντοπίζεται με υποψηφιακή ακρίβεια η θέση της σκιάς σε κάθε καρέ κατά μήκος μίας γραμμής στην πάνω και μίας στην κάτω περιοχή της εικόνας, πράγμα που δίνει την θέση του επιπέδου της σκιάς σε κάθε καρέ με ακρίβεια δεκαδικού εικονοψηφίδας στην εικόνα. Έτσι, μπορεί να παρεμβληθεί και η χρονική στιγμή μεταξύ διαδοχικών καρέ κατά την οποία η σκιά διήλθε από το κέντρο κάθε εικονοψηφίδας. Τις τελευταίες διαδικασίες περιγράφουν αναλυτικότερα οι Curless & Levoy (1995).

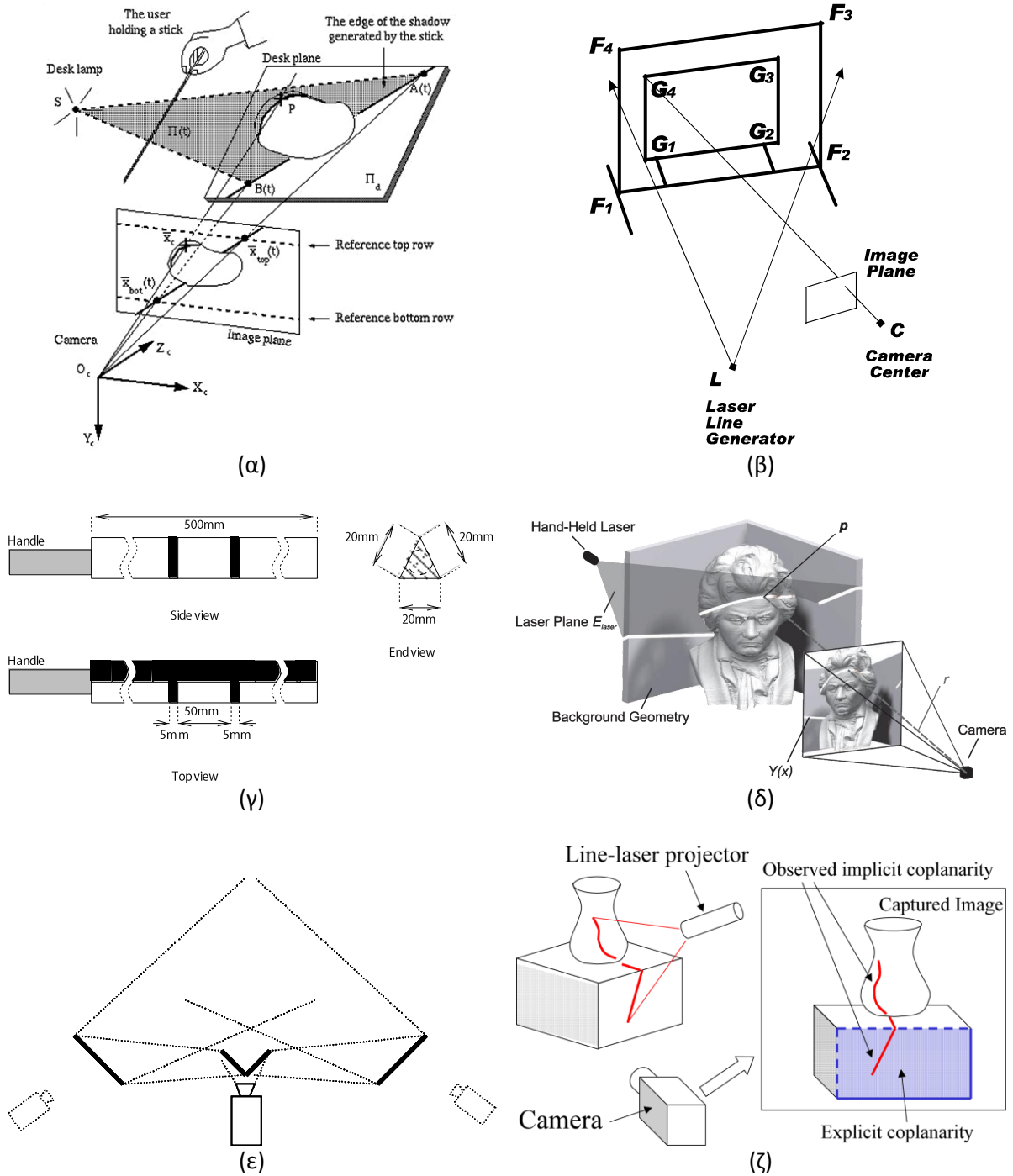
Οι Fisher et al. (1999) χρησιμοποιούν επίσης σκιά από ράβδο. Εδώ η ράβδος βρίσκεται στο οπτικό πεδίο της μηχανής δικτύου κατά την σάρωση και είναι δυνατός ο υπολογισμός της θέσης της στο σύστημα της μηχανής. Πρόκειται για ράβδο τριγωνικής διατομής, της οποίας οι δύο πλευρές που είναι ορατές στην μηχανή είναι βαμμένες μια λευκή και μια μαύρη. Στην λευκή πλευρά υπάρχουν και δύο μαύρες λωρίδες (Εικ. 1.5γ). Η διάταξη αυτή επιτρέπει την γνώση της θέσης της ράβδου σε κάθε καρέ της μηχανής. Με γνωστή και την θέση της πηγής φωτός μπορούν έτσι να βρεθούν οι 3D συντεταγμένες των σημείων του αντικειμένου στα όρια της σκιάς της ράβδου.

Οι Furukawa & Kawasaki (2003), από την άλλη μεριά, παρατηρούν την συσκευή παραγωγής του επιπέδου κατά την σάρωση. Πρόκειται για συσκευή παραγωγής επιπέδου laser που φέρει LED τα οποία ορίζουν σύστημα συντεταγμένων. Από τις θέσεις των LED σε κάθε καρέ της μηχανής υπολογίζεται η θέση της συσκευής και άρα του επιπέδου του laser. Η συσκευή βαθμονομείται με σάρωση ενός παραλληλεπιπέδου γνωστών διαστάσεων. Επίσης προτείνεται διαδικασία βελτίωσης των αποτελεσμάτων βάσει ορισμένων γνωστών σημείων του χώρου και επιβολή ανάλογων δεσμεύσεων.

Οι Zagorchev & Goshtasby (2006) χρησιμοποιούν δύο παράλληλα επίπεδα πλαίσια (Εικ. 1.5β) σε γνωστή απόσταση, και το αντικείμενο τοποθετείται ανάμεσά τους. Όπως και σε άλλες εφαρμογές που παρουσιάζονται εδώ αλλά και στον σαρωτή της παρούσας διατριβής, χρησιμοποιείται συσκευή παραγωγής επιπέδου laser. Εκτός από το αντικείμενο, το επίπεδο αυτό τέμνει και το διπλό πλαίσιο, οπότε σε κάθε καρέ ανιχνεύονται οι θέσεις τομής του επιπέδου του laser με το πλαίσιο. Από τις θέσεις αυτές υπολογίζεται η εξίσωση του επιπέδου στο σύστημα της μηχανής, δεδομένου ότι σε προηγούμενο βήμα έχει βαθμονομηθεί η μηχανή σε σχέση με το διπλό αυτό πλαίσιο.

Οι Winkelbach et al. (2006) αυξάνουν τις παρατηρήσεις των σημείων που ορίζουν το επίπεδο του laser τοποθετώντας το αντικείμενο σε μία ορθή γωνία (Εικ. 1.5δ). Το επίπεδο του laser τέμνει το αντικείμενο καθώς και τα δύο εξωτερικά επίπεδα που ορίζουν την γωνία δημιουργώντας δύο ευθύγραμμα τμήματα. Σε κάθε καρέ αναγνωρίζονται τα δύο αυτά ευθύγραμμα τμήματα που ορίζουν την θέση του επιπέδου του laser στο σύστημα της μηχανής, και υπολογίζονται οι 3D συντεταγμένες για όλα τα σημεία του αντικειμένου που έχουν τηθεί από το επίπεδο του laser. Ο σαρωτής αυτός έχει χρησιμοποιηθεί και στο Κεφάλαιο 7 της

διατριβής για λόγους σύγκρισης.



Εικόνα 1.5: Εφαρμογές σαρωτών τριγωνισμού χαμηλού κόστους: α) Αρχή λειτουργίας του συστήματος των Bouguet & Perona (1998). β) Αναπαράσταση του διπλού πλαισίου των Zagorchev & Goshtasby (2006) για τον προσανατολισμό του επιπέδου του laser. γ) Κατασκευαστικές λεπτομέρειες της ράβδου των Fisher et al. (1999). δ) Το αντικείμενο τοποθετείται στην γωνία δύο κάθετων επιπέδων στο σύστημα των Winkelbach et al. (2006). ε) Δημιουργία των δύο εικονικών μηχανών στο σύστημα των Davis & Chen (2001) μέσω μίας μηχανής και διάταξης κατόπτρων. ζ) Απεικόνιση δεσμεύσεων συνεπιπεδότητας, εσωτερικών ή έμμεσων (implicit) και εξωτερικών ή άμεσων (explicit), στην προσέγγιση των Kawasaki & Furukawa (2007).

Οι Davis & Chen (2001) αποφεύγουν την διαδικασία εύρεσης της θέσης του επιπέδου laser σε κάθε καρέ προτείνοντας τριγωνισμό με δύο λήψεις. Μάλιστα για να παρακάμψουν και το πρόβλημα του συγχρονισμού δύο μηχανών προτείνουν διάταξη κατόπτρων για την προσομοίωση δύο μηχανών από μία (Εικ. 1.5ε). Οι θέσεις των σημείων του αντικείμενου προκύπτουν με απλή εμπροσθοτομία. Το επίπεδο laser κωδικοποιεί το αντικείμενο, διευκολύνοντας έτσι την εύρεση ομολογιών. Ομόλογα σημεία προκύπτουν στην μεν αριστερή εικόνα ως σημεία τομής των γραμμών της με την λωρίδα του laser, στην δε δεξιά ως τομές της επιπολικής γραμμής με την λωρίδα.

Οι Chu et al. (2001) επίσης αποφεύγουν την εύρεση της θέσης του laser στο σύστημα της μηχανής. Αντ' αυτού εργάζονται σε σύστημα συντεταγμένων οριζόμενο από τις ακμές ενός κύβου που περικλείει το αντικείμενο. Στις κορυφές του κύβου υπάρχουν 8 LED και άλλα 2 στον άξονα Z. Από τις απεικονίσεις των LED και μέσω σημείων φυγής ορίζεται το σύστημα συντεταγμένων του κύβου. Η θέση του επιπέδου του laser στο σύστημα συντεταγμένων του κύβου βρίσκεται από τις τρεις τουλάχιστον τομές του με τις ακμές του κύβου, οπότε μπορούν πλέον να προσδιοριστούν τα σημεία τομής του αντικείμενου με το επίπεδο του laser. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει μάλιστα και την κίνηση της μηχανής γύρω από το αντικείμενο για την πλήρη σάρωσή του αφού όλες οι συντεταγμένες υπολογίζονται στο σταθερό σύστημα του κύβου, οπότε δεν απαιτείται η συνένωση νεφών από διαφορετικές θέσεις σάρωσης.

Ορισμένες ομοιότητες με την μεθοδολογία της παρούσας διατριβής παρουσιάζει η προσέγγιση των Leotta et al. (2007). Ζεύγος βαθμονομημένων μηχανών καταγράφει το ίχνος χειροκίνητου επιπέδου laser, τα σημεία του οποίου εντοπίζονται με παρεμβολή παραβολής επί των επιπολικών γραμμών. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της προσέγγισής τους είναι πως αξιοποιούν το γεγονός ότι όλα τα 3D σημεία που ανακατασκευάζονται από μια γραμμή laser οφείλουν να κείνται στο επίπεδο που ορίζεται από το laser. Το επίπεδο παρεμβάλλεται στα ανακατασκευασμένα σημεία του αντικείμενου (εφόσον αυτά δεν είναι πολύ κοντά σε ευθεία στον χώρο). Η εξίσωση του επιπέδου χρησιμοποιείται εκ των υστέρων ως απόλυτη δέσμευση, δηλαδή όλα τα ανακατασκευασμένα σημεία μεταφέρονται σε αυτό. Παράλληλα, όσα σημεία του ίχνους του laser φαίνονται μόνο σε μια εικόνα προσδιορίζονται στον χώρο μονοεικονικά, ως τομή της προβολικής ακτίνας με το προσδιορισμένο επίπεδο. Η υλοποίηση αυτή είχε σχετικά περιορισμένη ακρίβεια (παρεμβολές σε κύλινδρο και σφαίρα, αντίστοιχων διαμέτρων 8 cm και 10 cm, είχαν αντίστοιχο σφάλμα προσαρμογής ± 0.54 mm και ± 1.57 mm). Ένα δεύτερο αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό της εργασίας αυτής είναι ότι μέσω της εξίσωσης του επιπέδου laser αποκαθίσταται ομογραφία μεταξύ των εικόνων, διά της οποίας απορρίπτονται οι εσφαλμένες λύσεις σε περίπτωση που έχουν εντοπιστεί πολλαπλά μέγιστα έντασης του laser στις επιπολικές γραμμές. Σε επόμενη δημοσίευσή τους (Leotta et al., 2008) συνδυάζουν βάσει της ίδιας προσέγγισης σύστημα με μία μηχανή και 4 καθρέπτες (catadioptric stereo rig) με υψηλής ποιότητας οπτικό εξοπλισμό, προκειμένου να αποφύγουν σφάλματα λόγω μη συγχρονισμού των λήψεων και μη ομοιόμορφης προβολής του laser. Σε αυτό αποδίδουν την βελτίωση της ακρίβειας που επιτυγχάνουν (το αντίστοιχο σφάλμα προσαρμογής για τον κύλινδρο και την σφαίρα ήταν εδώ ± 0.31 mm και ± 0.36 mm).

Η προσέγγιση των Kawasaki & Furukawa (2007) διαφέρει, καθώς σε όλα τα συστήματα, όπως άλλωστε και σε αυτό της παρούσας διατριβής, η μηχανή ή οι μηχανές λήψης θεωρούνται γνωστές ή βαθμονομούνται προ της σάρωσης. Αντίθετα, εδώ γίνεται χρήση δεσμεύσεων συνεπιπεδότητας, εσωτερικών και εξωτερικών (Εικ. 1.5ζ). Εσωτερική (έμμεση) συνθήκη συνεπιπεδότητας θεωρείται το γεγονός ότι όλα τα σημεία που θα ανακατασκευαστούν από ένα καρέ πρέπει να ανήκουν σε ένα επίπεδο, το επίπεδο του laser. Οι εξωτερικές (άμεσες) συνθήκες συνεπιπεδότητας προκύπτουν από το αντικείμενο, στις περιοχές δηλαδή του αντικειμένου που αναγνωρίζονται μετά από την σάρωση ως επίπεδες τα σημεία πρέπει να είναι όντως συνεπίπεδα. Οι δύο αυτές μορφές δέσμευσης συνεπιπεδότητας επιτρέπουν να ανακατασκευαστεί η επιφάνεια, το προϊόν όμως έχει σχέση 3D προβολικού μετασχηματισμού με την πραγματικότητα (η συνεπιπεδότητα διατηρείται υπό 3D προβολικό μετασχηματισμό). Η αναγωγή στον ευκλείδειο χώρο, όπως και η εκτίμηση της εσωτερικής γεωμετρίας της μηχανής, πραγματοποιούνται με την εισαγωγή δεσμεύσεων καθετότητας (ή και παραλληλίας) μεταξύ των ανακατασκευασμένων επιπέδων. Η δέσμευση της καθετότητας μπορεί να επιβληθεί με επιλογή κάθετων επιπέδων στον χώρο του αντικειμένου είτε με σάρωση του αντικειμένου με συσκευή που προβάλλει δύο μεταξύ τους κάθετα επίπεδα laser.

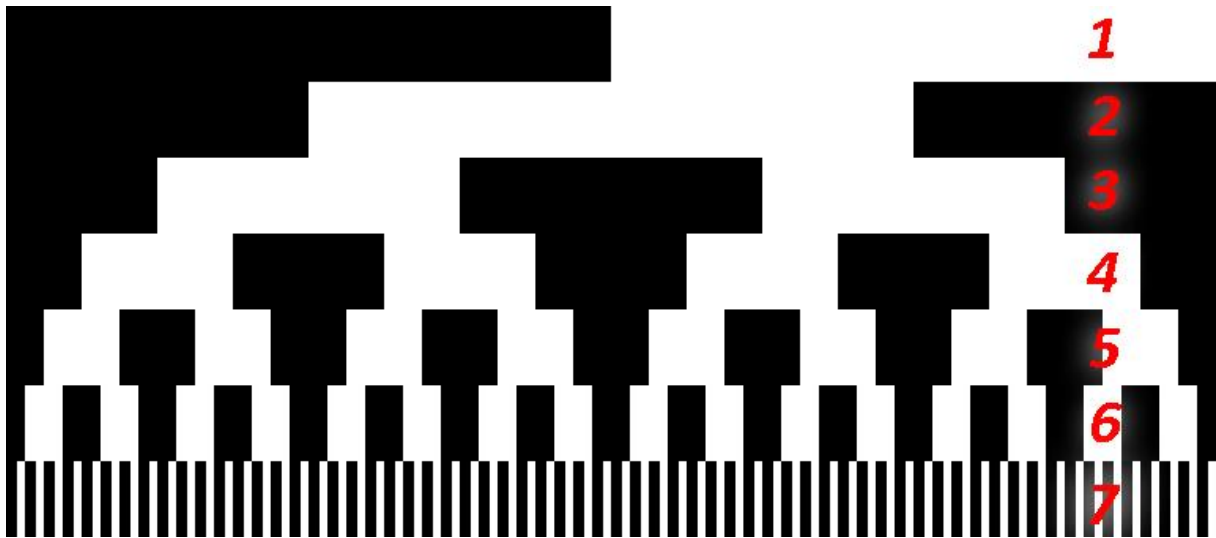
Ο σαρωτής που αναπτύχθηκε και παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή συνδυάζει στοιχεία από τις μεθόδους των Davis & Chen (2001) και Kawasaki & Furukawa (2007). Αποτελείται δηλαδή από δύο μηχανές, ενώ χρησιμοποιούνται και πρόσθετες δεσμεύσεις συνεπιπεδότητας για να βελτιωθεί η ποιότητα αλλά και η αξιοπιστία του αποτελέσματος.

1.2.3.2. Σαρωτές δομημένου φωτός

Προκειμένου να ληφθούν πολλές τομές του επιπέδου με το αντικείμενο, στους σαρωτές τριγωνισμού πρέπει να κινείται το επίπεδο ή το αντικείμενο ώστε σε κάθε θέση να λαμβάνεται μία εικόνα της τομής (προφίλ του αντικειμένου). Στους σαρωτές δομημένου φωτός προβάλλονται ταυτόχρονα διάφοροι σχηματισμοί (patterns), οι οποίοι επιτρέπουν να υλοποιούνται πολλά επίπεδα φωτός από έναν προβολέα. Η ταυτοποίηση των επιπέδων γίνεται με χρήση άλλων σχηματισμών, όπως αναφέρεται συνοπτικά στην συνέχεια, που προβάλλονται πριν ή μετά από την προβολή των πολλών επιπέδων. Υπάρχουν τρεις κύριες κατηγορίες σαρωτών δομημένου φωτός, οι σαρωτές δυαδικού κώδικα, οι N-αδικού κώδικα και οι σαρωτές λόγου της έντασης (intensity ratio).

Οι σαρωτές δυαδικού κώδικα (Posdamer & Altschuler, 1982) είναι οι πλέον διαδεδομένοι σαρωτές δομημένου φωτός. Προβάλλουν πολλές λευκές λωρίδες φωτός (Εικ. 1.6, μοτίβο 7), οι οποίες ορίζουν πολλά επίπεδα στον χώρο. Η τομή τους με την επιφάνεια δημιουργεί αντίστοιχα πολλά προφίλ. Για να υπολογιστούν οι 3D συντεταγμένες αυτών των προφίλ πρέπει, αφενός, να είναι γνωστές οι εξισώσεις των επιπέδων στο σύστημα της μηχανής που παρατηρεί το αντικείμενο και, αφετέρου, να είναι γνωστή η αντιστοιχία των επιπέδων με τις παρατηρούμενες τομές. Το πρώτο θέμα αντιμετωπίζεται με βαθμονόμηση του συστήματος

που προηγείται της σάρωσης. Η ταυτοποίηση των επιπέδων γίνεται με την διαδοχή άλλων κατάλληλων μοτίβων δυαδικού κώδικα μικρότερης ανάλυσης. Όλες οι εικονοψηφίδες του προβολέα που ανήκουν σε μία γραμμή, λευκή ή μαύρη (Εικ. 1.6, μοτίβο 7), λαμβάνουν έναν μοναδικό δυαδικό κώδικα βάσει των απεικονίσεων των βοηθητικών αυτών μοτίβων (Εικ. 1.6, μοτίβα 1-6), κωδικός ο οποίος προφανώς χαρακτηρίζει και το αντίστοιχο επίπεδο. Για παράδειγμα, στην Εικ. 1.6 το επίπεδο που δημιουργείται από την τελευταία δεξιά λευκή λωρίδα του μοτίβου 7 έχει τον μοναδικό κωδικό 1000001. Το πλάτος των λωρίδων του τελευταίου μοτίβου στο αντικείμενο πρέπει να είναι μεγαλύτερο της εδαφοψηφίδας της μηχανής. Για την ορθότερη κατηγοριοποίηση κάθε εικονοψηφίδας της μηχανής σε λευκό ή σε μαύρο οι Kalisperakis et al. (2011) προβάλλουν μετά από κάθε μοτίβο φωτός και το αντίθετό του. Έτσι, λευκές χαρακτηρίζονται οι εικονοψηφίδες των οποίων η διαφορά είναι θετική. Οι Rocchini et al. (2001) βάσει της ίδιας αρχής προβάλλουν έγχρωμες λωρίδες φωτός που επιτρέπουν να αναγνωριστούν περιοχές υπό σκιά. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται προβλήματα που προκύπτουν από αποκρύψεις οι οποίες είναι συνήθεις σε αντικείμενα με σύνθετη γεωμετρία. Ο Gühring (2001) αλλάζει το τελευταίο μοτίβο προβάλλοντας μερικές ισάπεχουσες γραμμές που κινούνται σταδιακά και καλύπτουν ολόκληρο το αντικείμενο, επιτυγχάνοντας έτσι μεγαλύτερη ανάλυση κατά την σάρωση.



Εικόνα 1.6: Διαδοχή δυαδικών μοτίβων σε σαρωτές δομημένου φωτός. Τα μοτίβα 1-6 χρησιμεύουν στην ταυτοποίηση όλων των επιπέδων του μοτίβου 7. Για κάθε λευκή λωρίδα του μοτίβου 7 υπάρχει μοναδικός δυαδικός κωδικός ως συνδυασμός των μοτίβων 1-6.

Οι σαρωτές δυαδικού κώδικα αποτελούν στην ουσία υποκατηγορία των σαρωτών N-αδικού κώδικα. Σε αντίθεση με τους σαρωτές δυαδικού κώδικα όπου απαιτείται προβολή πολλών μοτίβων για την συλλογή της 3D πληροφορίας, οι σαρωτές N-αδικού κώδικα προβάλλουν λιγότερα μοτίβα φωτός για να κωδικοποιήσουν τα επίπεδα χρησιμοποιώντας για κάθε μοτίβο περισσότερους των δύο τόνων. Στην προσέγγιση των Caspi et al. (1998) προβάλλονται στο αντικείμενο τόννοι RGB. Πριν από την σάρωση λαμβάνονται δύο εικόνες, μία απλώς με τον φωτισμό του περιβάλλοντος και μία καθώς προβάλλεται λευκό φως από τον προβολέα. Από την ανάλυση των εικόνων αυτών αποφασίζεται αυτόματα το πλήθος των τόνων όπως

και το πλήθος των επιπέδων που χρησιμοποιούνται για την σάρωση. Αντίστοιχη προσέγγιση αλλά με τόνους του γκριζου παρουσιάζουν οι Horn & Kiryati (1999), όπου και πάλι με την προβολή ομοιογενούς τόνου αποφασίζεται ο βέλτιστος αριθμός τόνων και επιπέδων. Μάλιστα η μέθοδος αυτή παρουσιάζεται ως η γενίκευση των μεθόδων δομημένου φωτός (δυαδικού κώδικα, N-αδικού κώδικα, λόγου έντασης).

Οι σαρωτές λόγου έντασης αποτελούν την ακραία περίπτωση σαρωτών N-αδικού κώδικα καθώς σε ένα μοτίβο προβάλλονται όλοι οι τόνοι. Στους σαρωτές αυτούς προβάλλονται συνήθως δύο μοτίβα φωτός. Στο πρώτο ο τόνος αυξάνει γραμμικά από μαύρο σε λευκό από την μία άκρη της προβαλλόμενης εικόνας στην άλλη. Η διαδοχική αύξηση του τόνου αντιστοιχεί σε διαδοχικά επίπεδα, όπου κάθε επίπεδο ορίζεται από την ευθεία ίδιου τόνου της προβαλλόμενης εικόνας. Το δεύτερο μοτίβο έχει μόνο έναν τόνο σε ολόκληρη την εικόνα και χρησιμοποιείται για την ταυτοποίηση των επιπέδων που προβάλλονται από το πρώτο. Την απεικόνιση των μοτίβων αυτών στο αντικείμενο καταγράφει μια μηχανή. Για να εξαλειφθούν οι διαφορές μεταξύ προβαλλόμενων και καταγραφόμενων τόνων δημιουργείται ο λόγος των δύο απεικονίσεων (Carrhill & Hummel, 1985). Η μέθοδος αυτή είναι γρήγορη αφού απαιτεί προβολή μονάχα δύο μοτίβων φωτός, είναι όμως και ευαίσθητη στην παρουσία θορύβου και ενδεχόμενη μη καλή εστίαση του αντικειμένου. Η μέθοδος έχει και παραλλαγές με στόχο να βελτιωθεί η ταυτοποίηση των επιπέδων, όπως πχ. εκείνη των Savarese et al. (1999) οι οποίοι προτείνουν και τρίτο μοτίβο πριονωτής μορφής.

Στη βιβλιογραφία πάντως έχουν καταγραφεί και ορισμένες μέθοδοι με σαρωτές δομημένου φωτός που δεν εμπίπτουν στην προηγούμενη κατάσταση. Αρκετοί, για παράδειγμα, έχουν χρησιμοποιήσει γραφήματα de Bruijn για την δημιουργία των μοτίβων κωδικοποίησης των αντικειμένων. Ο Rajdla (1995) εφήρμοσε την διαδικασία σάρωσης με ένα μόνο μοτίβο δυαδικού κώδικα που είχε προταθεί παλαιότερα, ενώ και οι Zhang et al. (2002) χρησιμοποιούν γραφήματα de Bruijn και δημιουργούν ένα μόνο έγχρωμο μοτίβο. Η ανακατασκευή του αντικειμένου από μία μόνο εικόνα επιτρέπει να καταγραφούν σε τρεις διαστάσεις ακόμα και δυναμικές σκηνές. Δυναμική σκηνή μπορεί να καταγράψει και το σύστημα των Proesmans et al. (1998), χωρίς να είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός του κάθε προβαλλόμενου επιπέδου βάσει της παραδοχής ότι το προβαλλόμενο μοτίβο αποτελεί ορθή προβολή. Η παραδοχή στηρίζεται στην τοποθέτηση των μηχανών προβολής και καταγραφής σε μικρή μεταξύ τους απόσταση και μακριά από το αντικείμενο. Το μοτίβο που προβάλλεται είναι συστοιχία μικρών τετραγώνων που ορίζουν τα επίπεδα. Η βαθμονόμηση γίνεται με σάρωση κόγχης δύο επιπέδων υπό γνωστή γωνία. Το σύστημα καταγράφει και τον τόνο του αντικειμένου. Οι Reiss & Tommaselli (2011) επίσης καταγράφουν δυναμική σκηνή προβάλλοντας ένα μόνο μοτίβο φωτός με αλληλουχία μοναδιαίων υποπεριοχών. Οι υποπεριοχές αυτές είναι μεγέθους 3x3, στο κέντρο των οποίων υπάρχει τετράγωνο περιβαλλόμενο από σχήματα μορφής L. Με τον τρόπο αυτό αναγνωρίζεται κάθε προβαλλόμενο σημείο από τα γειτονικά του.

Οι Koninckx et al. (2003) αντλούν 3D πληροφορία προβάλλοντας μόνο ένα μοτίβο. Η πληροφορία βάθους λαμβάνεται από διαδοχικές λευκές και μαύρες λωρίδες (ανάλογες με εκείνες

του μοτίβου 7 της Εικ. 1.6). Η ταυτοποίηση κάθε λωρίδας γίνεται με την ταυτόχρονη προβολή μίας (ή περισσότερων) χρωματιστής πλάγιας λωρίδας. Με εξαγωγή σημείων κατά μήκος της λωρίδας αυτής και χρήση της γνωστής επιπολικής γεωμετρίας μεταξύ μηχανής και προβολέα, επιτυγχάνεται η ταυτοποίηση κάθε λευκής λωρίδας. Η διαδικασία προσαρμόζεται αυτόματα σε κάθε εφαρμογή ώστε να προβάλλονται ο κατάλληλος αριθμός πλάγιων λωρίδων σε βέλτιστες θέσεις.

Τα τελευταία χρόνια βασικός στόχος των σαρωτών δομημένου φωτός είναι η μείωση του κόστους (Knyaz, 2010) ή η καταγραφή επιφάνειας με κατά το δυνατόν λιγότερα μοτίβα φωτός, και ει δυνατόν με ένα, επειδή έτσι δίνεται η δυνατότητα καταγραφής δυναμικών σκηνών. Οι Rusinkiewicz et al. (2002) στηρίζονται σε δυαδικό κώδικα προβάλλοντας σε ταχεία διαδοχή 4 μοτίβα φωτός και εξασφαλίζοντας την δυνατότητα σάρωσης αντικειμένων που κινούνται αργά, οπότε ένα αντικείμενο μπορεί να σαρωθεί πλήρως από μία θέση του συστήματος με αργή κίνησή του. Κατά την σάρωση ο χρήστης βλέπει τα σημεία που συλλέγονται σε κάθε καρέ να συνενώνονται με τα ήδη σαρωμένα. Η ακρίβεια της συνένωσης είναι χαμηλή κατά την διάρκεια της σάρωσης, αλλά με μετεπεξεργασία λαμβάνεται ακριβές τελικό αποτέλεσμα. Οι Huang et al. (2003) προτείνουν σαρωτή δομημένου φωτός που προβάλλει ημιτονοειδή έγχρωμα μοτίβα. Κάθε κανάλι (RGB) απέχει σε φάση κατά 120° από το προηγούμενο. Ο προβολέας έχει αλλοιωθεί με την αφαίρεση του φίλτρου χρώματος, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται τόνοι του γκρίζου. Στο σύστημα αυτό μπορούν να καταγραφούν τα τρία εναλλασσόμενα μοτίβα με την γνωστή διαφορά φάσης σε λιγότερο από 10 ms, οπότε καταγράφονται αντικείμενα σε πραγματικό χρόνο. Οι Zhang & Huang (2004) και Zhang (2005) επεκτείνουν την μέθοδο αυτή χρησιμοποιώντας κύματα τραπεζοειδούς μορφής αντί ημιτονοειδούς, με συνέπεια την ταχύτερη ταυτοποίηση κάθε επιπέδου και άρα μείωση των υπολογιστικών απαιτήσεων του σαρωτή. Ημιτονοειδή μορφή κύματος χρησιμοποιούν οι Weise et al. (2007), αλλά παρατηρούν με σύστημα δύο μηχανών και μπορούν να μειώσουν τα κυματοειδή σφάλματα στην επιφάνεια του 3D μοντέλου που προκύπτουν από την κίνηση του αντικειμένου εξάγοντας την ταχύτητα κάθε παρατηρούμενου σημείου. Με τον τρόπο αυτό μάλιστα επιτυγχάνεται σάρωση πολλών αντικειμένων, στερεών ή μεταβαλλόμενων κατά το σχήμα, με διαφορετικές ταχύτητες.

Να σημειωθούν και βιβλιογραφικές αναφορές όπου οι σαρωτές τριγωνισμού θεωρούνται υποκατηγορία των σαρωτών δομημένου φωτός (Zhang, 2005), ενώ οι Remondino & El-Hakim (2006) θεωρούν ότι ισχύει αντίστροφο. Η παρούσα διατριβή διακρίνει τις μεθόδους βάσει του εάν τα προβαλλόμενα επίπεδα είναι ένα ή περισσότερα. Φυσικά, το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για να υπολογιστούν οι 3D συντεταγμένες παραμένει το ίδιο και στις δύο κατηγορίες μεθόδων (Εξ. (1.1)). Για περισσότερα σχετικά με τους σαρωτές δομημένου φωτός και την κατάταξή τους βλ. Batlle et al. (1998) και Salvi et al. (2004, 2010).

1.2.3.3. Παλαιότερες τεχνικές οπτικής σάρωσης

Θα αναφερθούν, τέλος, εδώ για λόγους πληρότητας σαρωτές με σημαντικό ιστορικό ενδια-

φέρον, που άλλωστε ουσιαστικά αποτελούν και την θεωρητική βάση για τους περισσότερους σύγχρονους σαρωτές. Οι πρώτοι “οπτικοί σαρωτές” είχαν ως στόχο την απευθείας μέτρηση ισοϋψών καμπυλών, συνήθως σε ανθρώπινο σώμα ή πρόσωπο. Αυτό γινόταν με την από τα πλάγια προβολή κατακόρυφων γραμμών στο αντικείμενο και την μετωπική θέαση του αποτελέσματος (light sectioning). Έτσι, ο Pierson (1961) πρόβαλλε έγχρωμες λωρίδες σε ανθρώπινο σώμα για να υπολογίσει τον όγκο του. Για την διαστασιολόγηση χαρακτηριστικών του προσώπου ο Lovesey (1966) χρησιμοποίησε προβολή λευκών λωρίδων, ενώ ο Cobb (1971) πρότεινε την εισαγωγή έγχρωμων λωρίδων για καλύτερη αναγνώρισή τους και δύο φακών, ενός για τον προβολέα και ενός για την μηχανή, ώστε να διορθώσει την μη παραλληλία των προβαλλομένων επιπέδων φωτός. Οι Peacock et al. (1984) αυτοματοποίησαν την διαδικασία υπολογισμού της 3D επιφάνειας προβάλλοντας τις εικόνες σε τράπεζα σάρωσης και σαρώνοντας τις καμπύλες.

Στην γενικότερη περίπτωση όπου οι άξονες του προβολέα και της μηχανής δεν είναι κάθετοι πρέπει να βρεθεί ο μεταξύ τους προσανατολισμός, οπότε ο προβολέας αναλαμβάνει τον ρόλο δεύτερης μηχανής. Έτσι, μετά από τον προσανατολισμό υπολογίζονται με εμπροσθοτομία οι 3D συντεταγμένες των σημείων του αντικειμένου που κωδικοποιούνται από τον προβολέα (Irish & Renner, 1977). Ο Ethrog (1987) αναλύει τις διαδικασίες βαθμονόμησης τέτοιων σαρωτών (raster stereography). Ο Renner (1977) πρόβαλλε κίτρινο γραμμών στο σώμα ασθενών υπό ακτινοθεραπεία ώστε να βρεθεί η καταλληλότερη δοσολογία για κάθε ασθενή. Οι Elad et al. (1988) χρησιμοποίησαν προβολή παράλληλων λωρίδων και αποτύπωσαν δυναμικές σκηνές, έχοντας μάλιστα επιτύχει την αυτοματοποίηση τοποθετώντας το αντικείμενο σε γνωστό πεδίο μετρήσεων. Την πλήρη αυτοματοποίηση των σαρωτών αυτών παρουσίασαν σε σειρά δημοσιεύσεων οι Frobin & Hierholzer (1981, 1983, 1991). Οι οπτικοί αυτοί σαρωτές μπορούν να θεωρηθούν πρόγονοι των σαρωτών δομημένου φωτός.

1.2.3.4. Τοπογραφία moiré

Η προβολή φωτός μέσω δύο μη παράλληλων γραμμικών πλεγμάτων δημιουργεί κροσσούς υπέρθεσης moiré. Παρόμοιο αποτέλεσμα επιτυγχάνεται με την προβολή πλέγματος και την φωτογράφιση του αντικειμένου μέσω ενός δευτέρου πλέγματος (ή και φωτογράφιση μέσω του ίδιου πλέγματος από άλλη θέση). Η μαθηματική ανάλυση του φαινομένου δεν διαφέρει από εκείνη της συμβολομετρίας κυμάτων. Όταν η προβολή γίνεται σε αντικείμενο με ανάγλυφο, οι παρατηρούμενοι κροσσοί είναι δυνατόν να αντιπροσωπεύουν (μη ισαπέχουσες) ισοϋψείς καμπύλες. Βασικό πλεονέκτημα είναι εδώ ότι απαιτείται μόνο μία εικόνα για την ανάκτηση της 3D πληροφορίας. Έτσι, η τεχνική των κροσσών moiré (μέθοδος της σκιάς) υπήρξε πολύ δημοφιλής, ειδικά τις δεκαετίες του 1980 και 1990, για μαζικές εφαρμογές σε θέματα ορθοπεδικής πχ. σε σχολεία. Ωστόσο η αυτοματοποίηση της μέτρησης των κροσσών είναι πιο σύνθετη σε σχέση με άλλους σχηματισμούς, οπότε η μέθοδος δεν χρησιμοποιείται πλέον, στην αρχική της τουλάχιστον εκδοχή. Για περισσότερα στοιχεία για τις τεχνικές moiré και το σχετικό θεωρητικό υπόβαθρο βλ. Πέτσα (1981), Besl (1988) και Καρράς (1992).

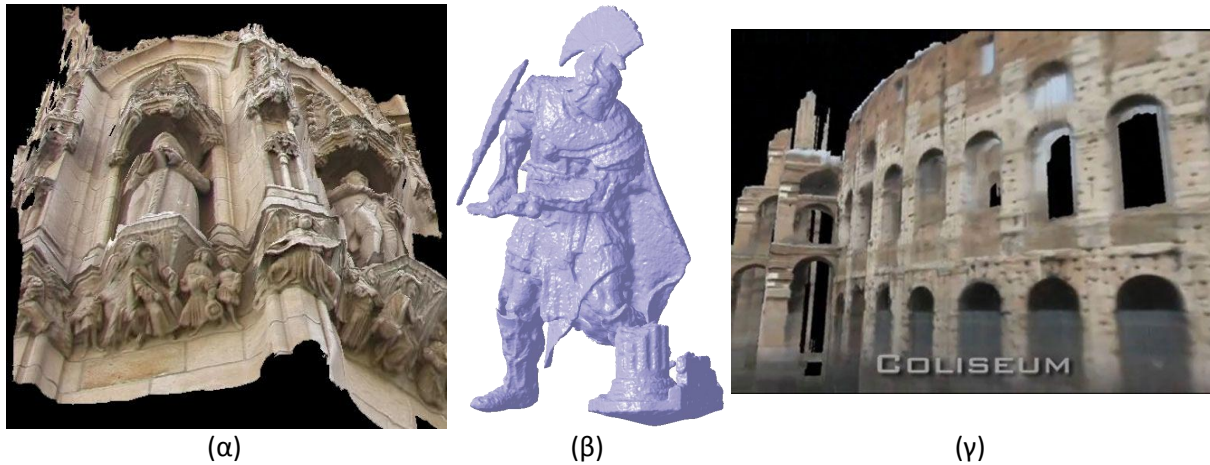
1.2.4. 3D πληροφορία αποκλειστικά από εικόνες

1.2.4.1. Πυκνή συνταύτιση εικόνων

Στο πεδίο της αυτόματης συνταύτισης εικόνων έχουν γίνει, και γίνονται, εντυπωσιακά βήματα προόδου. Τα τελευταία μάλιστα χρόνια, κυρίως στον χώρο της όρασης υπολογιστών, μελετάται η πυκνή συνταύτιση εικόνων (dense image matching). Εδώ πρόκειται στην ουσία για μια γενίκευση της διαδικασίας συνταύτισης εικόνας ώστε να βρίσκονται ομολογίες όχι απλώς για διακριτά ή “πρόσφορα” σημεία, αλλά για όλα τα σημεία της εικόνας (δηλαδή για όλες τις εικονοψηφίδες). Το πρόβλημα αυτό είναι φυσικά ιδιαίτερα σύνθετο αλλά και εξαιρετικά ενδιαφέρον, καθώς δίνει την δυνατότητα, και μάλιστα με πολύ χαμηλό κόστος (ουσιαστικά το κόστος μιας φωτογραφικής μηχανής), να προσδιορίζεται πυκνή 3D πληροφορία από τις επικαλυπτόμενες περιοχές των εικόνων. Μία δυσκολία του προβλήματος έγκειται στο ότι για να απλοποιηθεί κάπως η εύρεση ομολογιών, η βάση του ζεύγους εικόνων είναι σκόπιμο να είναι μικρή (short baseline), πράγμα που έχει ως συνέπεια αλληλοτομίες με σχετικά δυσμενή γεωμετρία και συνεπώς λιγότερο ακριβή αποτελέσματα. Αλγορίθμους πυκνής συνταύτισης με μικρή βάση παρουσιάζει η συγκριτική επισκόπηση των Scharstein & Szeliski (2002). Για ακριβέστερα γεωμετρικά αποτελέσματα έχουν όμως προταθεί και αρκετές μέθοδοι πυκνής συνταύτισης μεγάλης βάσης (wide baseline) – βλ. την συγκριτική παρουσίαση των Seitz et al. (2006). Στις περιπτώσεις αυτές το πρόβλημα εύρεσης ομολογιών περιπλέκεται από αποκρύψεις, έντονες προοπτικές παραμορφώσεις, επαναλαμβανόμενα μοτίβα και, γενικά, προβλήματα που υπάρχουν στην συνταύτιση εικόνων, ιδίως σε επίγειες εφαρμογές.

Το ερευνητικό ενδιαφέρον για το πρόβλημα της πυκνής συνταύτισης είναι πράγματι μεγάλο (βλ. ενδεικτικά αποτελέσματα στην Εικ. 1.7). Αναφορές στο πρόβλημα υπάρχουν βέβαια από νωρίς, όπως πχ. στις μελέτες των Otto & Chau (1989) που δομούν χάρτες βάθους από εικόνες του δορυφόρου SPOT και των Okutomi & Kanade (1993) που αναζητούν πληροφορία βάθους από εικόνες όψεων κτηρίων, σταδιακά όμως οι μέθοδοι γίνονται πιο εύρωστες και τα αποτελέσματα πιο ακριβή (πχ. van Gool et al. 2002, Furukawa & Ponce, 2010). Οι σύγχρονες μέθοδοι πυκνής συνταύτισης ξεκινούν συνήθως από μια αδρή ανακατασκευή του αντικειμένου (που προκύπτει κατά κανόνα από τα 3D σημεία των προσανατολισμών που έχουν προκύψει αυτόματα από σημειακούς τελεστές), την οποία βελτιώνουν επαναληπτικά. Οι μέθοδοι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν και βάσει της συνάρτησης ομοιότητας των ομόλογων περιοχών των εικόνων που ελαχιστοποιείται σε κάθε επανάληψη. Οι Roy & Cox (1991), Boykov et al. (2001), Kolmogorov & Zabih (2002) και Tola et al. (2009) υπολογίζουν την βέλτιστη 3D επιφάνεια βάσει της θεωρίας των γραφημάτων (graph-cuts), οι Robert & Deriche (1996), Alvarez et al. (2002) και Strecha et al. (2003) μέσω μερικών διαφορικών εξισώσεων (PDE), ενώ οι Strecha et al. (2006) με την μέθοδο EM (expectation-maximization). Κατηγοριοποίηση αλγορίθμων μπορεί επίσης να γίνει ανάλογα με τον τρόπο αναπαράστασης της τελικής 3D επιφάνειας του αντικειμένου. Οι Strecha et al. (2003, 2006) και οι Gargallo et al. (2007) περιγράφουν την 3D επιφάνεια μέσω χαρτών βάθους (depth maps), οι Faugeras & Keriven (1998) μέσω επιπεδοσυνόλων (level sets), οι Kutulakos & Seitz (2000) και Treuille et

al. (2004) μέσω ογκοστοιχείων (voxels), οι Vogiatzis et al. (2007) μέσω κανάβου μεταβλητών 3D διευθύνσεων, οι Vu et al. (2009) μέσω τρισδιάστατων δικτύων τριγώνων (3D TIN) και οι Furukawa & Ponce (2010) μέσω νεφών σημείων με νόρμες.



Εικόνα 1.7: Παραδείγματα αποτελεσμάτων από διαδικασίες πυκνής συνταύτισης: α) Λεπτομέρεια του δημαρχείου του Leuven (van Gool et al., 2002). β) Ομοίωμα ρωμαίου στρατιώτη (Furukawa & Ponce, 2010). γ) Κολοσσαίο της Ρώμης (Frahm et al., 2010).

Τα τελευταία μάλιστα χρόνια έχουν αναφερθεί αλγόριθμοι που δημιουργούν 3D μοντέλα αντικειμένων όχι από εικόνες που έχουν ληφθεί επί τούτου αλλά απλώς από εικόνες που υπάρχουν στο Διαδίκτυο και συλλέγονται βάσει του ονόματος του αντικειμένου του οποίου ζητείται το 3D μοντέλο. Οι εικόνες αυτές από τυχαίες μηχανές κατηγοριοποιούνται, προσανατολίζονται, και βρίσκονται οι ομολογίες σημείων αυτόματα ώστε να δημιουργηθεί το επιθυμητό νέφος σημείων (Frahm et al., 2010). Ανάλογο αλγόριθμο παρουσίασε πρόσφατα και η Autodesk (http://labs.autodesk.com/utilities/photo_scene_editor/). Τα αποτελέσματα από τέτοιες προσεγγίσεις είναι πράγματι άκρως εντυπωσιακά, αλλά βέβαια υπολείπονται, προς το παρόν τουλάχιστον, σε ακρίβεια συγκρινόμενα με εκείνα από ειδικά συστήματα συλλογής πυκνής 3D πληροφορίας, όπως πχ. σαρωτές laser.

Για λόγους πληρότητας, τέλος, αναφέρεται πως η διαδικασία (σχετικά) πυκνής ανακατασκευής μπορεί φυσικά να γίνει και από τον άνθρωπο με τις κλασικές στερεοσκοπικές μεθόδους. Το αποτέλεσμα έχει την ακρίβεια που μπορεί να προσφέρει η φωτογραμμετρία, σε συνδυασμό βέβαια με την σχολαστικότητα του χειριστή. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να προκύψουν αποτελέσματα υψηλής ποιότητας (πχ. βλ. Εικ. 1.8), αλλά πρόκειται προφανώς για μια ιδιαίτερος κοπιαστική όσο και απαιτητική διαδικασία που προσφέρεται μόνο για περιορισμένης έκτασης εφαρμογές (Mavromati et al., 2003).

1.2.4.2. Σχήμα από σκίαση και σχήμα από σιλουέτες

Στην δημοσίευση του Horn (1989) παρουσιάζεται η μέθοδος του σχήματος από την σκίαση (shape from shading). Εδώ, από τον απεικονιζόμενο τόνο ενός αντικειμένου εξάγεται η τοπική διεύθυνση των κάθετων διανυσμάτων των σημείων της επιφάνειάς του, και, μέσω της

διεύθυνσης αυτής, δομείται εν συνεχεία η 3D επιφάνεια του αντικειμένου. Η βασική θεωρία της μεθόδου είναι ότι το αντικείμενο έχει επιφάνεια με ισοτροπική συμπεριφορά φωτεινότητας (Lambertian model). Με αυτή την παραδοχή, ο προσδιορισμός της επιφάνειας του αντικειμένου γίνεται με επίλυση μη γραμμικής διαφορικής εξίσωσης. Οι Prados & Faugeras (2003) βελτίωσαν το μοντέλο θεωρώντας μηχανή κεντρικής και όχι ορθής προβολής, και προτείνοντας μία νέα διαφορική εξίσωση. Μοντέλο κεντρικής προβολής πρότειναν και οι Tankus et al. (2003), οι οποίοι απέδειξαν επίσης πως η τιμή φωτεινότητας ενός σημείου δεν είναι άμεση συνάρτηση της απόστασης του σημείου από την μηχανή αλλά του φυσικού λογαρίθμου της απόστασης αυτής. Στην πράξη τα αποτελέσματα που δίνονται από την μέθοδο φαίνεται ότι είναι επισφαλής διότι κατά κανόνα οι επιφάνειες δεν ακολουθούν το ιδανικό αυτό μοντέλο φωτεινότητας.



Εικόνα 1.8: Σκιασμένο 3D μοντέλο τμήματος του τείχους του κάστρου Αιγοσθένων (Mavromati et al., 2003).

Γενίκευση της μεθόδου αυτής είναι η “πολυεικονική φωτομετρία” (photometric stereo). Ο Woodham (1980) έδειξε ότι μπορεί να βρεθεί με ανώτερη ακρίβεια ο προσανατολισμός των σημείων της επιφάνειας των αντικειμένων αν λαμβάνονται πολλές εικόνες από την ίδια θέση με αλλαγή για κάθε εικόνα της θέσης του φωτισμού. Η διαδικασία αυτή μπορεί να εφαρμοστεί και σε αντικείμενα που δεν πληρούν τις ιδανικές συνθήκες που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Τελευταία μάλιστα υπάρχουν αναφορές για την δημιουργία ειδικών θόλων με πολλές ελεγχόμενες φωτεινές πηγές και μηχανές λήψης για την καταγραφή κινούμενων αντικειμένων (Vlasic et al., 2009). Για περισσότερα επί του θέματος βλ. Zhang et al. (1999).

Τέλος, οι Vaillant & Faugeras (1990) παρουσίασαν τον τρόπο με τον οποίο περιγράφεται η σιλουέτα (περίγραμμα) αντικειμένων από απεικονίσεις τους. Η πληροφορία της σιλουέτας από διάφορες θέσεις του αντικειμένου τελικά δημιουργεί το “οπτικό κέλυφος” του (visual hull), το στερεό δηλαδή εντός του οποίου βρίσκεται το αντικείμενο (Boyer & Berger, 1997). Συνηθέστερος τρόπος αναπαράστασης της γεωμετρίας του αντικειμένου είναι μέσω ογκοστοιχείων (voxel), ενώ σε κάθε επανάληψη της διαδικασίας το μέγεθος τους μειώνεται (Szeliski, 1993, Mercier & Meneveaux, 2005). Τα εσωτερικά τμήματα του αντικειμένου ανακατα-

σκευάζονται με τεχνικές ψηφιακής συνταύτισης εικόνων (Esteban & Schmitt, 2004).

1.2.5. Άλλες μέθοδοι σάρωσης

Τελευταία έχουν γίνει δημοφιλείς οι λεγόμενες 3D μηχανές (range cameras) με την χρησιμοποίησή τους σε “παιγνιδομηχανές”. Η αρχή λειτουργίας τους δεν διαφέρει από εκείνη που αναφέρθηκε στην ενότητα 1.2.2, και συνήθως η μέτρηση απόστασης γίνεται μέσω της διαφοράς φάσης φέροντος κύματος. Βασική διαφορά είναι ότι εδώ γίνεται μέτρηση απόστασης από κάθε εικονοψηφίδα των μηχανών αυτών. Δηλαδή εκπέμπεται ηλεκτρομαγνητικός παλμός και υπάρχουν πολλοί δέκτες κατανεμημένοι σε κάναβο (Lange & Seitz, 2001, Weingarten et al., 2004, May et al., 2009). Προς το παρόν οι μηχανές αυτές έχουν πολύ μικρή ανάλυση, αλλά η ακρίβειά τους σε αποστάσεις μερικών m είναι της τάξης των 1-2 cm.

Ένας άλλος τρόπος μέτρησης του βάθους βασίζεται στην εστίαση του φακού [shape from focus] (Nayar & Nakagawa, 1989, Helmlí & Scherer, 2001, Niederöst et al., 2003). Οι κάμερες χρησιμοποιούν σύστημα φακών για την καταγραφή μεγάλης έντασης φωτός σε μικρό χρονικό διάστημα. Το σύστημα αυτό απαιτεί εστίαση ώστε να φαίνεται καθαρά το αντικείμενο που καταγράφεται. Ο Krotkov (1987) περιγράφει την σχέση μεταξύ εστίασης και απόστασης του αντικειμένου. Μπορεί, λοιπόν, να βρεθεί η απόσταση των απεικονιζόμενων αντικειμένων από την αντίστοιχη εστίαση. Απαιτείται σχολαστική βαθμονόμηση της μηχανής σε όλες τις θέσεις εστίασής της. Τα αποτελέσματα της μεθόδου είναι σχετικά ανακριβή και υποβαθμίζονται καθώς αυξάνει το βάθος πεδίου του φακού, ωστόσο υπάρχουν αρκετές τεχνικές για την βελτίωσή τους (Asif & Tae-Sun Choi, 2001, Pradeep & Rajagopalan, 2007).

Τέλος, πολύ απλοί σαρωτές είναι οι σαρωτές υγρού (γάλακτος ή μελανιού – fluid scanners, ink ή milk scanners) που επίσης βασίζονται σε εικόνες από μία μηχανή. Η διάταξη αποτελείται από μία λεκάνη, ένα υγρό πλήρωσης (γάλα ή μελάνι) και την μηχανή. Το αντικείμενο τοποθετείται στην λεκάνη, η οποία γεμίζει σταδιακά με γνωστό ρυθμό ανόδου της στάθμης με γάλα ή μελάνι, ανάλογα με το χρώμα του αντικειμένου. Η μηχανή παρατηρεί την λεκάνη και το αντικείμενο από ψηλά, καταγράφοντας την τομή της στάθμης του υγρού με την επιφάνεια, δηλαδή μία ισοϋψή καμπύλη που μπορεί να εξαχθεί αυτόματα αν υπάρχει μεγάλη αντίθεση αντικειμένου και υγρού. Η ακρίβεια αυτών των ιδιοκατασκευών είναι περιορισμένη.

Ως κατακλείδα της Εισαγωγής σημειώνεται πως όλες οι μέθοδοι που παρουσιάστηκαν μετρούν τις συντεταγμένες σημείων στην επιφάνεια των αντικειμένων βάσει δειγματοληψίας, δηλαδή συλλέγονται σημεία σε θέσεις της επιφάνειας του αντικειμένου που ορίζονται από την συσκευή σάρωσης (ή τον χρήστη) και όχι από το ίδιο το αντικείμενο, δηλαδή την μορφή του. Υπ’ αυτή την έννοια δεν συλλέγονται σημεία ενδιαφέροντος του αντικειμένου, όπως εξοχές, ακμές κ.λπ., αλλά σημεία σε τυχαία κατανομή, σε κάναβο ή κατά μήκος κάποιων λωρίδων είτε και γενικά σε σχηματισμούς που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Για τον λόγο αυτό η χρήση σαρωτών ενδείκνυται, προφανώς, για την συλλογή 3D πληροφορίας αντικειμένων τυχαίας μορφής. Αντίθετα, για την μοντελοποίηση πιο απλών επιφανειών, πχ. επιπε-

δογενών, απαιτείται σημαντική επεξεργασία μετά από την σάρωση. Για τέτοια αντικείμενα είναι ενδεχομένως προσφορότερες άλλες προσεγγίσεις.

1.3. Στόχος της διατριβής

Στα προηγούμενα τεκμηριώθηκε η σημαντική ζήτηση για 3D δεδομένα που υπάρχει σήμερα σε μεγάλο εύρος πεδίων εφαρμογής. Αλλά εκτός από το προφανές πρακτικό ενδιαφέρον, το θέμα της συλλογής πυκνής 3D πληροφορίας παρουσιάζει και έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον, όπως άλλωστε προκύπτει και από την ευρεία ποικιλία μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί για τον σκοπό αυτό. Στην προηγούμενη επισκόπηση παρουσιάστηκαν οι κύριες μέθοδοι 3D ανακατασκευής, και ιδιαίτερα οι βασικοί τύποι των χρησιμοποιούμενων σήμερα σαρωτών, μεταξύ των οποίων μάλιστα εμφανίζονται και ορισμένες πολύ ενδιαφέρουσες υλοποιήσεις σαρωτών τριγωνισμού και δομημένου φωτός. Από την εξέταση των προσεγγίσεων αυτών συνάγεται ότι, τελικά, τρία είναι σήμερα τα κυρίως ζητούμενα:

- το χαμηλό κόστος, σε συνδυασμό με την απλότητα της κατασκευής και της λειτουργίας
- ο αυτοματισμός όλων των διαδικασιών βαθμονόμησης, συλλογής και επεξεργασίας
- η υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

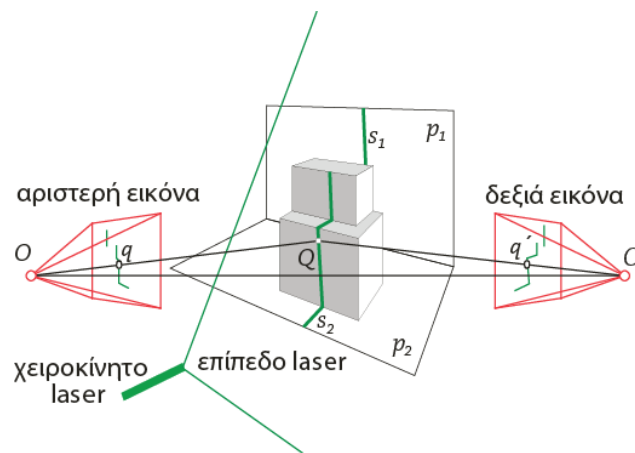
Το χαμηλό κόστος όσο και η απλότητα κατασκευής και λειτουργίας δίνουν την δυνατότητα να διαδοθούν ευρύτερα τέτοιες μέθοδοι σάρωσης, και μάλιστα να χρησιμοποιούνται όχι μόνο από ειδικούς σε πολλούς τομείς εφαρμογής. Αντίστοιχα πλεονεκτήματα παρουσιάζει ο αυτοματισμός με τον κατά το δυνατόν περιορισμό της ανθρώπινης παρέμβασης, γεγονός που επίσης τείνει να εξασφαλίζει μεγαλύτερη ταχύτητα αλλά και την αντικειμενικότητα του τελικού αποτελέσματος. Τέλος, η υψηλή ακρίβεια (με την ακριβή βαθμονόμηση, την αλγοριθμική ευρωστία και την εισαγωγή τεχνικών για την ενίσχυση της ακρίβειας όσο και της αξιοπιστίας) διευρύνει το εύρος των εφαρμογών, ενώ παράλληλα συντείνει και στην μείωση της ανάγκης για χειρωνακτική επεξεργασία του νέφους σημείων από μεριάς χρήστη.

Σε αυτό το πνεύμα, κεντρικός στόχος της παρούσας διατριβής είναι – με συνδυασμό υπαρχουσών προσεγγίσεων και πρωτότυπων λύσεων – η δημιουργία μίας νέας προσέγγισης για την συλλογή 3D νεφών σημείων, η οποία θα συνδυάζει ακριβώς το χαμηλό κόστος και την απλότητα με την πλήρη αυτοματοποίηση όλων των διαδικασιών αλλά και την εξασφάλιση της ακρίβειας και αξιοπιστίας του τελικού αποτελέσματος. Ειδικότερα, η απαίτηση για ακρίβεια και αξιοπιστία (απαλοιφή χονδροειδών σφαλμάτων) επιβάλλει να διερευνηθούν όλες οι δυνατότητες για αυτόματο έλεγχο και βελτίωση των αποτελεσμάτων σε όλα τα βήματα που απαιτούνται για την καταγραφή, συνένωση και επεξεργασία των 3D σημειοσυνόλων.

Ο στόχος αυτός εξειδικεύεται, βέβαια, με την επιλογή μιας συγκεκριμένης υλοποίησης και μιας επιδιωκόμενης ακρίβειας, επομένως εξειδικεύεται και όσον αφορά το μέγεθος των αντικειμένων που είναι δυνατόν να σαρωθούν. Η διατριβή υλοποιεί ένα σύστημα συνδυάζοντας δύο τεχνικές, την στερεοσκοπική ανακατασκευή και τον τριγωνισμό με χρήση κινούμε-

νου επιπέδου (Εικ. 1.9). Το ζητούμενο του χαμηλού κόστους αντιμετωπίζεται με την χρήση δύο μηχανών δικτύου (web cameras), ανάλυσης 640×480 , και χειροκίνητης συσκευής για την παραγωγή φωτεινού επιπέδου. Με απαιτούμενη ακρίβεια καλύτερη των 0.5 mm στο αντικείμενο, η ανάλυση των μηχανών αναπόφευκτα, έτσι, περιορίζει το μέγεθος των αντικειμένων που μπορούν να αποδοθούν λεπτομερώς στα χονδρικά όρια του $0.3 \times 0.3 \times 0.3 \text{ m}^3$. Σημειώνεται ότι η εμβέλεια του χρησιμοποιούμενου laser είναι σημαντικά μεγαλύτερη (θα ήταν δυνατή η σάρωση πχ. ενός αυτοκινήτου), αλλά κάτι τέτοιο συνεπάγεται μηχανές ανώτερης ανάλυσης είτε μείωση της ζητούμενης ακρίβειας, άρα δεν εμπίπτει τους συγκεκριμένους στόχους της διατριβής.

Από την άλλη μεριά, το μικρότερο αντικείμενο που μπορεί στην πράξη να αποδοθεί είναι διάστασης $3\text{-}4 \text{ cm}$ λόγω του πλάτους της λωρίδας του laser ($\sim 0.5 \text{ mm}$) αλλά και επειδή η μικρότερη υλοποιήσιμη βάση των μηχανών είναι $\sim 10 \text{ cm}$ λόγω του μεγέθους τους. Όσον αφορά το ανάγλυφο του αντικειμένου, αυτό πρέπει γενικά να είναι $\geq 1 \text{ cm}$, κυρίως λόγω της κάπως ακανόνιστης κάλυψης του αντικειμένου με το χειροκίνητο laser αλλά και για να έχουν νόημα οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές εξομάλυνσης (πάντως στο Κεφάλαιο 8 δίδεται παράδειγμα εφαρμογής στην περίπτωση μικρότερου αναγλύφου). Τέλος, η χειροκίνητη συσκευή παραγωγής επιπέδου laser επιβάλλει κατ' αρχήν τα αντικείμενα να είναι ακίνητα στερεά σώματα (όρος που επίσης δεν είναι απολύτως δεσμευτικός, όπως δείχνουν ορισμένα παραδείγματα του Κεφαλαίου 8).



Εικόνα 1.9: Το αντικείμενο, παρατηρούμενο από δύο μηχανές, σαρώνεται από το χειροκίνητο laser, το οποίο τέμνει και τα εξωτερικά επίπεδα p_1, p_2 κατά τα αντίστοιχα ευθύγραμμα τμήματα s_1, s_2 .

Πέραν των επιλεγμένων συνιστωσών του συστήματος που εξασφαλίζουν το χαμηλό κόστος, και ο υπόλοιπος σχεδιασμός είναι προσαρμοσμένος στην επίτευξη των στόχων της διατριβής όσον αφορά τον αυτοματισμό και την ακρίβεια/αξιοπιστία. Η αυτόματη βαθμονόμηση του συστήματος με την βοήθεια απλού 2D πεδίου ελέγχου επιτρέπει να δημιουργούνται ακριβείς επιτολικές εικόνες. Η κωδικοποίηση της επιφάνειας του αντικειμένου με το επίπεδο laser διευκολύνει την αυτόματη εύρεση ομολογιών στις εξομαλυμένες επιτολικές εικόνες, με χρήση ραδιομετρικής πληροφορίας από το περιβάλλον των σημείων και παράλληλο αποκλεισμό εσφαλμένων ομολογιών. Οι λύσεις από απλές εμπροσθοτομίες βελτιώνονται χά-

ρη σε τρεις γεωμετρικές δεσμεύσεις. Η πρώτη επιβάλλει την συνεπιτεδότητα όλων των σημείων που προκύπτουν από μια τομή του επιπέδου laser με την επιφάνεια. Παράλληλα, το αντικείμενο τοποθετείται εντός γωνίας (κόγχης) σχηματιζόμενης από δύο επίπεδα, οπότε τα σημεία της τομής του επιπέδου του laser με τα δύο εξωτερικά επίπεδα οφείλουν να ικανοποιούν και τις εξισώσεις του αντίστοιχου επιπέδου (στην Εικ. 1.9 τα σημεία των ευθύγραμμων τμημάτων s_1 και s_2 πρέπει να ανήκουν όχι μόνο το επίπεδο του laser αλλά και στα αντίστοιχα επίπεδα p_1 και p_2). Η τρίτη δέσμευση (εξομάλυνσης) επιβάλλει τα ανακατασκευαζόμενα γειτονικά σημεία της επιφάνειας να μην απέχουν μεταξύ τους πέραν ενός ορίου. Οι γεωμετρικές δεσμεύσεις ενισχύουν την γεωμετρία της ανακατασκευής, αλλά παράλληλα επιτρέπουν και εντοπισμό χονδροειδών σφαλμάτων. Τέλος, οι διαδικασίες αυτοματισμού επεκτείνονται τόσο στην συνένωση όλων των επιμέρους σημειοσυνόλων σε ενιαίο νέφος σημείων όσο και στην μετεπεξεργασία για την εξομάλυνση των νεφών.

1.4. Διάγραμμα ροής της μεθόδου σάρωσης

Όπως έχει αναφερθεί, βασικός στόχος της διατριβής είναι η δημιουργία ενός αυτόματου σαρωτή 3D επιφανειών για μικρά αντικείμενα. Εδώ περιγράφονται επιγραμματικά τα βασικά βήματα της μεθόδου, που επιτρέπουν να προκύψει το νέφος σημείων του αντικειμένου.

1.4.1. Συλλογή δεδομένων

Η διαδικασία ξεκινά με την βαθμονόμηση του σαρωτή. Αρχικά επιλέγει ο χρήστης την κατάλληλη βάση και απόσταση λήψης των μηχανών βάσει του μεγέθους του αντικειμένου, αλλά και της ζητούμενης ακρίβειας, και εστιάζει τους φακούς των μηχανών. Έπειτα λαμβάνονται τουλάχιστον 2 (στην πράξη 5 και πλέον) στερεοζεύγη που πεδίου βαθμονόμησης, που εν προκειμένω είναι τύπου σκακιέρας. Το μέγεθος και το βήμα της τελευταίας πρέπει να είναι κατάλληλα για την κλίμακα των εικόνων, ώστε να καλύπτεται μεγάλο μέρος των εικόνων και με επαρκές πλήθος σημείων. Η σχετική θέση και η εστίαση των δύο μηχανών οφείλει βέβαια να παραμείνει σταθερή καθ' όλη την διάρκεια των εργασιών σάρωσης. Στην συνέχεια σαρώνεται η κόγχη που σχηματίζεται από την τομή δύο επιπέδων και εντός της οποίας πρόκειται να τοποθετηθεί το αντικείμενο (ενότητα 5.2). Η σχετική θέση της κόγχης και του συστήματος πρέπει επίσης να παραμείνει σταθερή μέχρι το πέρας της σάρωσης.

Η συλλογή των δεδομένων ολοκληρώνεται με την σάρωση του αντικειμένου, το οποίο τοποθετείται εντός της κόγχης των εξωτερικών επιπέδων. Η διαδικασία της σάρωσης πραγματοποιείται με συνεχή διεικονική καταγραφή της επιφάνειας του αντικειμένου, καθώς αυτό σαρώνεται χειροκίνητα με το επίπεδο laser (βάσει υποδείξεων που αναφέρονται στην ενότητα 5.2). Η διαδικασία αυτή της σάρωσης επαναλαμβάνεται με αλλαγή θέσης του αντικειμένου, όσες φορές αυτό απαιτείται για την πλήρη σάρωσή του. Σε κάθε νέα θέση του αντικειμένου πρέπει βέβαια να υπάρχει επαρκής επικάλυψη με την προηγούμενη ώστε να είναι δυνατή η συνένωση των ανεξάρτητων σημειοσυνόλων, και τελικά η δημιουργία ενός συνολικού νέφους σημείων.

1.4.2. Αυτόματη επεξεργασία δεδομένων

Στην φάση της αυτόματης επεξεργασίας των δεδομένων βαθμονομείται αρχικά το σύστημα (Κεφάλαιο 2) με στοιχεία εισόδου τα στερεοζεύγη της σκακιάρας και το βήμα της. Στην συνέχεια, μετά από την επιπολική επανασύσταση και την ραδιομετρική επεξεργασία των στερεοζευγών του αντικειμένου, εντοπίζονται σε αυτά ομόλογα σημεία ως τομές της απεικονιζόμενης λωρίδας του laser με τις επιπολικές ευθείες, γεγονός που κατ' αρχήν επιτρέπει την ανακατασκευή της επιφάνειας (εμπροσθοτομία). Έτσι υπολογίζονται και αρχικές τιμές για τους συντελεστές των δύο επιπέδων της κόγχης από τα δεδομένα της δικής τους ανεξάρτητης σάρωσης (ενότητα 5.2).

Στο σημείο αυτό ο χρήστης επιλέγει την τελική μέθοδο 3D ανακατασκευής (ενότητα 5.3), όπου εδώ μπορεί κανείς να επιλέξει μεταξύ εναλλακτικών γεωμετρικών δεσμεύσεων που ισχυροποιούν την επίλυση (λαμβάνοντας παράλληλα υπ' όψιν και την αξιολόγησή τους που υπάρχει στην ενότητα 5.4). Η μέθοδος προσφέρει ακόμα την δυνατότητα να απορρίπτονται, βάσει των στατιστικών χαρακτηριστικών τους, σημεία της επιφάνειας του αντικειμένου ως χονδροειδή σφάλματα (ενότητα 4.16). Για να εκτιμηθεί η τιμή που θα αποτελέσει κριτήριο για την απόρριψη σημείων επιλέγεται από τον χρήστη περιοχή του αντικειμένου χωρίς απότομες μεταβολές κλίσης.

Προϊόν αυτής της διαδικασίας 3D ανακατασκευής είναι ένα νέφος σημείων για κάθε διαφορετική θέση σάρωσης του αντικειμένου. Το συνολικό νέφος σημείων προκύπτει με την συνένωση όλων των επιμέρους νεφών. Αρχικές τιμές για τον μετασχηματισμό μεταξύ των νεφών σημείων μπορούν είτε να δοθούν χειροκίνητα με επιλογή τριών ομόλογων σημείων τους είτε όμως και να εκτιμηθούν αυτόματα με αξιοποίηση των εικόνων υποβάθρου, όπως αυτό περιγράφεται στην ενότητα 6.3.2.

Το τελικό αποτέλεσμα δημιουργείται με εξομάλυνση του νέφους (ενότητα 6.4). Η διαδικασία αυτή απαιτεί πάντως μια σχετική εμπειρία, καθώς η επιλογή της μεθόδου εξομάλυνσης και των παραμέτρων της δεν είναι πάντοτε αυτονόητη, δηλαδή πρέπει να επιλέγεται κατά τρόπον ώστε να απομακρυνθεί ο θόρυβος χωρίς να αλλοιώνεται η γεωμετρία του αντικειμένου. Βάσει της πρακτικής εμπειρίας που αποκτήθηκε κατά την εκπόνησης της διατριβής, μία “ήπια” εξομάλυνση πριν από την συνένωση των νεφών σημείων και μία πιο “δραστική” μετά από την συνένωσή τους δίνει καλύτερα αποτελέσματα.

1.5. Πρωτοτυπία της διατριβής

Η κύρια πρωτοτυπία της παρούσας διατριβής έγκειται ακριβώς στην ίδια την δημιουργία ενός νέου σαρωτή 3D επιφανειών μικρών αντικειμένων, ο οποίος χαρακτηρίζεται από το πολύ χαμηλό του κόστος, τον πλήρη αυτοματισμό σε όλες ανεξαιρέτως τις φάσεις της λειτουργίας του και την εξασφάλιση της ζητούμενης ακρίβειας του τελικού αποτελέσματος. Οι διαδικασίες που αφορούν την βαθμονόμηση του συστήματος, την εύρεση ομόλογων εικονοση-

μείων, την συνόρθωση των παρατηρήσεων, τον εντοπισμό χονδροειδών σφαλμάτων, την συνένωση γειτονικών νεφών και τις διαδικασίες εξομάλυνσής τους λειτουργούν κατά τρόπο αυτόματο, βάσει του αναπτυχθέντος λογισμικού. Η όλη μεθοδολογία βασίζεται, κατ' αρχήν, στον συνδυασμό της διεικονικής προσέγγισης και της λογικής των σαρωτών τριγωνισμού, με παράλληλη εισαγωγή πρωτότυπων λύσεων και αλγορίθμων τόσο στον πυρήνα της μεθόδου όσο και στην αντιμετώπιση επιμέρους διαδικασιών της.

Έτσι, ειδικότερο βασικό στοιχείο πρωτοτυπίας της διατριβής θεωρείται η εισαγωγή γεωμετρικών δεσμεύσεων στην ενιαία συνόρθωση που αντιμετωπίζει το πρόβλημα της ανακατασκευής. Σε αντίθεση με την πλειονότητα των σχετικών προσεγγίσεων που χρησιμοποιούν τα ελάχιστα δεδομένα και επιλύουν χωρίς περίσσεια, εδώ η εισαγωγή δεσμεύσεων συνεπιπρόσθιτας παίξει έναν διπλό ρόλο: αφενός μεν η επιβολή γνωστών δεσμεύσεων σε μέρος των ανακατασκευαζόμενων σημείων ενισχύει την λύση και την ευρωστία της ανακατασκευής, αφετέρου δε η περίσσεια αυτή παρατηρήσεων επιτρέπει ακριβώς να ενισχυθεί η αξιοπιστία της μεθόδου και η δυνατότητα εντοπισμού χονδροειδών αποκλίσεων. Ταυτόχρονα, η εισαγωγή στην συνόρθωση εξομαλυντικής δέσμευσης για τα γειτονικά σημεία συνδέει τα σημεία μεταξύ τους και άρα επιτρέπει, και από αυτή την άποψη, να εντοπίζονται χονδροειδή σφάλματα και να αμβλύνεται ο θόρυβος της ανακατασκευής.

Επιπλέον, κατά την ανάπτυξη των ενδιάμεσων βημάτων της διατριβής διατυπώθηκαν λύσεις για ορισμένες από τις απαιτούμενες διαδικασίες που επίσης εμφανίζουν στοιχεία πρωτοτυπίας. Οι κυριότερες τέτοιες περιπτώσεις είναι:

- Η πλήρως αυτόματη διαδικασία βαθμονόμησης διεικονικού συστήματος από λήψεις ενός 2D πεδίου ελέγχου μορφής σκακιέρας (Κεφάλαιο 2).
- Η τεχνική ανίχνευσης μεγίστου της έντασης κατά μήκος γραμμής (1D πρόβλημα) με αξιοποίηση πληροφορίας από την 2D γειτονιά του σημείου (Κεφάλαιο 4).
- Τέλος, για την εκ των υστέρων εξομάλυνση του νέφους σημείων βελτιώθηκαν υπάρχουσες μέθοδοι, και ειδικότερα προβλέφθηκε η δυνατότητα για ανισοτροπική προσέγγιση βάσει της τοπικής γεωμετρίας της επιφάνειας (Κεφάλαιο 6).

1.6. Διάρθρωση της διατριβής

Στο παρόν **Κεφάλαιο 1** ορίστηκε το πλαίσιο της διατριβής και παρουσιάστηκαν οι βασικότερες μέθοδοι συλλογής πυκνής 3D πληροφορίας με έμφαση σε εκείνες που χρησιμοποιούν εικόνες. Επίσης διατυπώθηκε ο στόχος και το αντικείμενο της παρούσας διατριβής, όπως και τα στοιχεία πρωτοτυπίας που αυτή παρουσιάζει.

Το **Κεφάλαιο 2** περιγράφει την μεθοδολογία βαθμονόμησης του συστήματος της σάρωσης. Εξηγείται η πλήρως αυτόματη διαδικασία κατά την οποία ο αλγόριθμος δέχεται εικόνες ενός επίπεδου πεδίου ελέγχου τύπου σκακιέρας και εκτιμά τις παραμέτρους των εσωτερικών προσανατολισμών των δύο μηχανών του συστήματος όπως και τον σταθερό προσανατολι-

σμό της μιας ως προς την άλλη. Η διαδικασία αξιολογείται βάσει αποτελεσμάτων βαθμονόμησης που δίδονται.

Το **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζει τον τρόπο απόκτησης των επιτολικών εικόνων που τελικά χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή της 3D πληροφορίας, οι οποίες περιέχουν μόνο την λωρίδα του laser (τομή του επιπέδου laser με το αντικείμενο) με αφαίρεση του υποβάθρου από κάθε καρέ. Ακόμα, εφαρμόζονται και αξιολογούνται διαδικασίες μείωσης του θορύβου.

Στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφεται η διαδικασία εξαγωγής των ομόλογων σημείων, τα οποία δεν είναι παρά οι τομές της λωρίδας του laser με τις ομόλογες επιτολικές γραμμές (σειρές της εικόνας). Αξιολογούνται μέθοδοι εντοπισμού του μεγίστου της έντασης, και τελικά προτείνεται η ταυτόχρονη προσαρμογή τριών καμπυλών Gauss, ενώ εξηγείται η διαδικασία απόρριψης αβέβαιων σημείων.

Το **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζει τα μαθηματικά μοντέλα 3D ανακατασκευής που διατυπώθηκαν και εξετάστηκαν στο πλαίσιο της διατριβής. Αξιολογούνται οι λύσεις που προκύπτουν από τις απλές σχέσεις παράλλαξης με την διαδοχική επιβολή διαφορετικών εκφράσεων και συνδυασμών των προαναφερθεισών γεωμετρικών δεσμεύσεων, και τελικά προτείνεται ενιαία διαδικασία συνόρθωσης με όλες τις δεσμεύσεις. Ακόμα, αντιμετωπίζεται το θέμα των πολλαπλών μεγίστων έντασης, και εξηγείται η διαδικασία απόδοσης φωτοϋφής (photo-texture) στο νέφος σημείων.

Στο **Κεφάλαιο 6** ολοκληρώνεται η περιγραφή της δημιουργίας του νέφους σημείων με την παρουσίαση μεθόδων επεξεργασίας του, που αφορούν κυρίως την αυτόματη συνένωση νεφών και την εξομάλυνσή τους. Για την συνένωση χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος ICP, αρχικές τιμές για τον οποίο εξασφαλίζονται αυτόματα με αξιοποίηση των εικόνων υποβάθρου και του σημειακού τελεστή SIFT. Για την εξομάλυνση ελέγχονται ορισμένες δημοσιευμένες μέθοδοι, μια από τις οποίες επεκτείνεται και βελτιώνεται.

Στο **Κεφάλαιο 7** διερευνώνται και αξιολογούνται, θεωρητικά αλλά και πρακτικά, τα σφάλματα του σαρωτή. Το θεωρητικά αναμενόμενο σφάλμα επιβεβαιώνεται και με την πειραματική αξιολόγηση της ακρίβειας, η οποία στηρίζεται στην σάρωση δοκιμίων γνωστών διαστάσεων, όπως επίσης και στην άμεση σύγκριση του σαρωτή της διατριβής με δύο εμπορικούς σαρωτές, έναν υψηλού και έναν χαμηλού κόστους.

Στο **Κεφάλαιο 8** παρουσιάζονται και σχολιάζονται όλες οι εφαρμογές που πραγματοποιήθηκαν με τον σαρωτή, μαζί με τα σχετικά δεδομένα (γεωμετρία λήψης, αριθμός σαρώσεων, πλήθος σημείων). Τέλος, στο **Κεφάλαιο 9** εκτίθενται τα συμπεράσματα της διατριβής, ενώ ακόμα διατυπώνονται σκέψεις και προτάσεις για ενδεχόμενες μελλοντικές επεκτάσεις της μεθόδου. Η διατριβή ολοκληρώνεται με την αναλυτική **Βιβλιογραφία** που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνησή της.

ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

2

```
clear
close all
clc

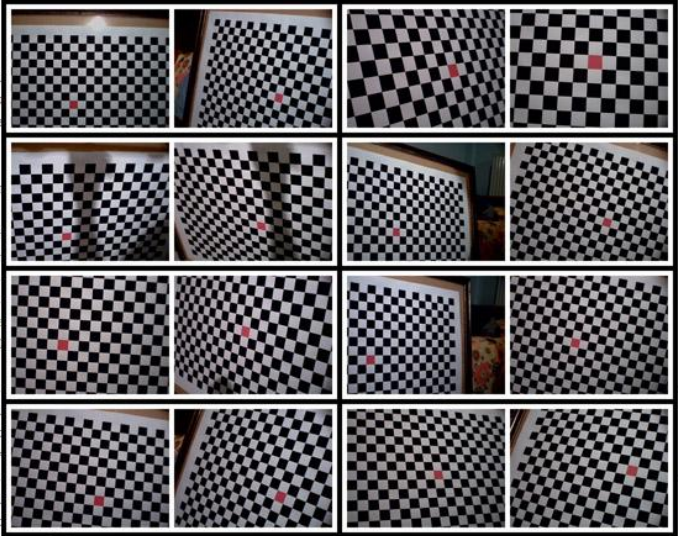
s = warning('query','all');
warning off all

% Εισαγωγή εικονοσυντεταγμένων των σημείων του κανάβου. Cell Array κάθε
% γραμμή έχει δύο στήλες και αναφέρεται σε κάθε νέα θέση του του συστήματος
% των δύο μηχανών. Σε κάθε κελί του πίνακα υπάρχει ένας πίνακας με τις
% εικονοσυντεταγμένες των κορυφών. Η στήλη 1 έχει τους κωδικούς η στήλη 2
% έχει την x συντεταγμένη και η στήλη 3 έχει την y συντεταγμένη. Αν κάποιο
% σημείο του κανάβου δεν φαίνεται στην εικόνα, ο κωδικός του είναι 0.

reply = input('Do you want data from new images? Y/N [Y]: ', 's');
if isempty(reply)
    reply = 'Y';
end

if upper(reply) == 'Y'
    imagenames = find_images('*.jpg');
    im_scale = input('Enter image scale: ');
    if isempty(im_scale)
        im_scale = 1;
    end
    nops = size(imnames,1);

    im1data{nops,1} = imread(imnames{nops,1});
    im2data{nops,1} = imread(imnames{nops,1});
    allcodes1{nops,1} = find_corners(im1data,im_scale);
    allcodes2{nops,1} = find_corners(im2data,im_scale);
    nopt=0; % Number of points
    h = waitbar(0.0, 'Progress');
    for i = 1:nops
        [im1data{i,1}, allcodes1{i,1}] = find_corners(im1data{i,1},im_scale);
        nopt = nopt + 1;
        waitbar((2*i-1)/nops, h);
        [im2data{i,1}, allcodes2{i,1}] = find_corners(im2data{i,1},im_scale);
        nopt = nopt + 1;
        waitbar(i/nops, h);
    end
end
```



2. Βαθμονόμηση του συστήματος

2.1. Εισαγωγικά

Ο σαρωτής, πριν από την χρήση του για την συλλογή 3D δεδομένων, πρέπει να βαθμονομηθεί. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η βαθμονόμηση αναφέρεται όχι απλώς στις μηχανές λήψης αλλά και στο ίδιο το σύστημα συνολικά. Έτσι, κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης πρέπει να βρεθούν τόσο τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού για τις δύο μηχανές όσο και ο σταθερός σχετικός προσανατολισμός τους με την σωστή κλίμακα. Για λόγους απλότητας αλλά και ταχύτητας της όλης διαδικασίας, αυτό πρέπει να γίνει με το να εισάγονται στο λογισμικό βαθμονόμησης οι δυνατόν μόνον εικόνες.

Η βαθμονόμηση της μηχανής συνιστά βασικό πρόβλημα της φωτογραμμετρίας όσο και της όρασης υπολογιστών. Οι σχετικές μέθοδοι (βλ. πχ. επισκοπήσεις των Clarke & Fryer, 1998, Salvi et al., 2002, Villa-Urriol et al., 2004) εμφανίζουν μεγάλη ποικιλία. Για παράδειγμα, μπορούν να βασίζονται σε μια ή περισσότερες εικόνες, είναι δυνατόν να χρησιμοποιούν διαφορετικά μοντέλα για να περιγραφεί η γεωμετρία της μηχανής, οι παρατηρούμενες οντότητες μπορούν να είναι, εκτός από σημεία, και γραμμικά στοιχεία (Γραμματικόπουλος, 2007). Ακόμα, η όλη διαδικασία συχνά βασίζεται σε πεδία ελέγχου, ωστόσο πλήρης βαθμονόμηση της μηχανής είναι δυνατή και χωρίς καμία *a priori* μετρητική πληροφορία, δηλαδή από απλές ομολογίες εικονοσημείων σε τουλάχιστον τρεις εικόνες από την ίδια μηχανή (Maybank & Faugeras, 1992), ενώ από απλές ομολογίες σε δύο εικόνες δυνατή είναι μόνον η μερική βαθμονόμησης της (Hartley, 1992). Για αποτελέσματα μερικής βαθμονόμησης από απλές ομολογίες σε δύο εικόνες βλ. Kalisperakis et al. (2005), ενώ για τα σχετικά ζητήματα βλ. αναλυτικότερα Καλησπεράκης (2010). Ωστόσο σκόπιμο είναι, όταν κάτι τέτοιο είναι δυνατόν δίχως να περιπλέκεται υπερβολικά η όλη διαδικασία, να αξιοποιείται και εξωτερική γεωμετρική πληροφορία προκειμένου τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης να είναι συμβατά με ανακατασκευή του χώρου υποκείμενη σε αξιόπιστες γεωμετρικές δεσμεύσεις (βλ. πχ. Καλούση, 2006).

Έτσι, η βαθμονόμηση της μηχανής στην πράξη βασίζεται συνήθως σε πεδία ελέγχου – ή, γενικότερα, σε διάταξη φωτοσταθερών σημείων – και τις αντιστοιχίες των στόχων με τις απεικονίσεις τους σε μια ή περισσότερες εικόνες. Αλλά τα 3D πεδία είναι δυνατόν σε πολλές περιπτώσεις να υποκατασταθούν από πολύ απλούστερους 2D σχηματισμούς, συνήθως με την τυπική μορφή μιας σκακιέρας που απεικονίζεται σε περισσότερες εικόνες από την ίδια μηχανή. Εάν πράγματι ζητούμενο είναι, στην ιδεατή περίπτωση, μια μηχανή να βαθμονομείται εντελώς αυτόματα από απλές λήψεις (Fiala & Shu, 2005), ουσιώδες πλεονέκτημα τέτοιων σχηματισμών είναι ότι, χάρη στην έντονη αντίθεση και την κανονικότητά τους, προσφέρονται για διαδικασίες αυτοματισμού μέσω αυτόματης εξαγωγής χαρακτηριστικών (Douskos et al., 2008). Έτσι, στο Διαδίκτυο διατίθενται αρκετά τέτοια λογισμικά ελεύθερης πρόσβασης.

Βασικές εργασίες αναφοράς για τις κυριότερες μεθόδους βαθμονόμησης που χρησιμοποιούνται σήμερα στο πλαίσιο αυτό είναι εκείνες των Tsai (1987) και Zhang (1998), όπου οι παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού των εικόνων υπολογίζονται από τις εικονοσυντεταγμένες σημείων διατεταγμένων σε επίπεδο υπό την μορφή σκακιάρας. Αυτό το πεδίο ελέγχου φωτογραφίζεται υπό διαφορετικές γωνίες, και οι εικόνες εισάγονται σε αλγόριθμο ο οποίος υπολογίζει τους ζητούμενους αγνώστους.

Οι αλγόριθμοι αυτοί στηρίζονται γενικά στην λογική της “βαθμονόμησης μέσω επιπέδων” (plane-based calibration), που διατυπώθηκε από τους Sturm & Maybank (1999) και Zhang (1999), διαδικασία βασιζόμενη στους 2D προβολικούς μετασχηματισμούς μεταξύ ενός επιπέδου και απεικονίσεών του, οι οποίοι οδηγούν σε γραμμικό σύστημα ως προς τις εσωτερικές παραμέτρους της μηχανής. Έτσι, προκύπτουν άμεσα προσεγγιστικές τιμές για τις παραμέτρους, στις οποίες γενικά δεν περιλαμβάνεται η ακτινική διαστρόφη του φακού (Sánchez et al., 2006), ενώ η βαθμονόμηση ολοκληρώνεται με μια πλήρη μη γραμμική διαδικασία συνόρθωσης. Πάντως, όπως θα αναφερθεί στην συνέχεια, στην παρούσα εργασία η αυτόματη εκτίμηση αρχικών τιμών των παραμέτρων γίνεται με διαφορετικό τρόπο.

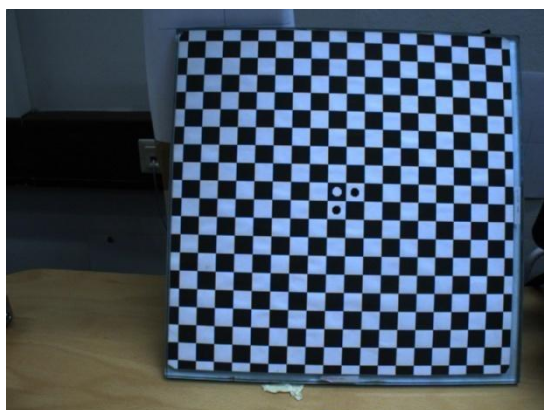
Το πιο διαδεδομένο σχετικό λογισμικό στον χώρο της όρασης υπολογιστών είναι το *Camera Calibration Toolbox for Matlab®* του J.-Y. Bouguet (βλ. ιστοσελίδα του στην Βιβλιογραφία). Ο αλγόριθμος έχει επίσης υλοποιηθεί σε γλώσσα προγραμματισμού C++ και περιλαμβάνεται στην βιβλιοθήκη Open Source Computer Vision Library (Intel). Πρόκειται για μια ημιαυτόματη διαδικασία, όπου το πρόγραμμα τροφοδοτείται με τις εικόνες του επιπέδου πεδίου ελέγχου, ενώ ο χρήστης καλείται να ορίσει σε όλες τις εικόνες τα όρια του απεικονιζόμενου κανάβου καθώς και τον αριθμό των σειρών και στηλών του. Εν συνεχεία, το πρόγραμμα εντοπίζει τις κορυφές της σκακιάρας με υποψηφιακή ακρίβεια μέσω του τελεστή Harris. Σημειώνεται πως εάν ο φακός εμφανίζει σημαντική ακτινική διαστρόφη θα πρέπει ο χρήστης να εισαγάγει και αρχικές εκτιμήσεις για τις τιμές των παραμέτρων της. Οι άγνωστοι τελικά υπολογίζονται με την μέθοδο της δέσμης, με αρχικές τιμές που έχουν προκύψει από “βαθμονόμηση μέσω επιπέδων”. Άλλες τεχνικές με μεγαλύτερο βαθμό αυτοματοποίησης (βλ. ιστοσελίδα του Bouguet), ορισμένες από τις οποίες στην ουσία δεν είναι παρά επεκτάσεις αυτού του βασικού αλγορίθμου, προϋποθέτουν ειδικούς στόχους, μη συμμετρική σκακιάρα, υποθέσεις για το μέγεθος της διαστρόφης του φακού ή εμφάνιση στις εικόνες ολόκληρης της σκακιάρας. Το ενδιαφέρον πάντως επί του θέματος συνεχίζεται. Πρόσφατα, για παράδειγμα, οι Zhou et al. (2009) και de la Escalera & Armingol (2010) παρουσίασαν διαφορετικές προσεγγίσεις για τον εντοπισμό των κορυφών της σκακιάρας βασιζόμενοι στους μετασχηματισμούς Radon και Hough, αντίστοιχα.

Στο Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας της ΣΑΤΜ ΕΜΠ, και με αφετηρία σχετική διπλωματική εργασία (Ντούσκος, 2006, Douskos et al., 2007), έχει υλοποιηθεί αλγόριθμος για αυτόματη βαθμονόμηση μηχανής από πολλαπλές απεικονίσεις σκακιάρας, ο οποίος αφαίρεσε πλήρως την συμμετοχή του χρήστη, επιτρέποντας υπολογισμό των παραμέτρων αποκλειστικά από εικόνες και με μοναδική a priori πληροφορία το γεγονός ότι η σκακιάρα αποτελείται από τε-

τράγωνο. Ο αλγόριθμος αυτός αναγνωρίζει αυτόματα τον κάναβο στις εικόνες με χρήση του τελεστή Harris και μια τεχνική αυτόματης επιλογής και διάταξης των σημείων σε ευθείες δύο ορθογωνικών διευθύνσεων. Το λογισμικό αυτό (Douskos et al., 2009) διατίθεται πλέον ελεύθερα στο Διαδίκτυο (portal.survey.ntua.gr/main/labs/photo/staff/gkarras/fauccal).

Βέβαια, επειδή στόχος στην περίπτωση εκείνη είναι μόνον ο εσωτερικός προσανατολισμός των εικόνων, το πεδίο ελέγχου δεν χρειάζεται να ορίζεται μονοσήμαντα, δηλαδή να έχει συγκεκριμένη αρχή, συγκεκριμένους άξονες (ποιος είναι ο X και ποιος ο Y) ή γνωστή κλίμακα (η διάσταση του τετραγώνου μπορεί να δίδεται αυθαίρετα). Από αυτήν την απλοποίηση προκύπτει βέβαια εσφαλμένος εξωτερικός προσανατολισμός των μηχανών, υπό την έννοια ότι οι εξωτερικοί προσανατολισμοί των εικόνων αναφέρονται σε διαφορετικό σύστημα για κάθε εικόνα, πράγμα όμως που δεν επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα της βαθμονόμησης της μηχανής, αφού για αυτήν οι εξωτερικοί προσανατολισμοί είναι εν προκειμένω αδιάφοροι.

Για να θεωρείται όμως ένα σύστημα δύο μηχανών πλήρως βαθμονομημένο απαιτείται προφανώς και η γνώση της σχετικής θέσης των μηχανών. Υπ' αυτή την έννοια, το διαθέσιμο λογισμικό ήταν μόνο εν μέρει αξιοποιήσιμο στο πλαίσιο της διατριβής, χρειάστηκε δηλαδή να τροποποιηθεί σημαντικά αφού εδώ πλέον απαιτείται η βαθμονόμηση όχι απλώς των μηχανών αλλά και της σχετικής διάταξής τους στον χώρο, δηλαδή η βαθμονόμηση του όλου συστήματος. Αυτό φυσικά υπαγορεύει την ανάγκη να οριστεί πλήρως και μονοσήμαντα ένα σύστημα αναφοράς της σκακιέρας, δηλαδή με συγκεκριμένη αρχή, άξονες και κλίμακα. Το ελεύθερο λογισμικό που διατίθεται από το Institute of Robotics & Mechatronics του γερμανικού αεροδιαστημικού κέντρου DLR (βλ. ιστοσελίδα *DLR CalDe – DLR CalLab*) επιλύει αυτό το πρόβλημα αυτόματα, υπό την προϋπόθεση ότι η σκακιέρα περιλαμβάνει στο κέντρο της τρεις ειδικούς κυκλικούς στόχους (Εικ. 2.1), αλλιώς απαιτείται παρέμβαση του χρήστη (επιπλέον, παρέμβασή του απαιτείται και για την απομάκρυνση εσφαλμένων σημείων).



Εικόνα 2.1: Τυπική εικόνα που απαιτείται για το λογισμικό CalLab – CalDe.

Εδώ υιοθετήθηκε ένας απλούστερος τρόπος ορισμού του συστήματος αναφοράς, δηλαδή ένα τετράγωνο της σκακιέρας είναι, αντί μαύρο, κόκκινο. Το κόκκινο αυτό τετράγωνο ορίζει την αρχή και επαρκή προσανατολισμό του συστήματος συντεταγμένων της σκακιέρας, ενώ αναγκαία είναι βέβαια και η γνώση της διάστασης των τετραγώνων για να οριστεί η κλίμα-

κα. Έτσι, για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής διατυπώθηκε, όπως θα παρουσιαστεί εν συνεχεία, αλγόριθμος για την αυτόματη εύρεση των παραμέτρων του εσωτερικού και του σχετικού προσανατολισμού υπό ορθή κλίμακα. Στοιχεία εισόδου στο λογισμικό αυτό είναι μόνο τα στερεοζεύγη του πεδίου ελέγχου και η διάσταση των φατνίων της σκακιάρας. Με την διατύπωση “επαρκής προσανατολισμός του συστήματος” υπονοείται εδώ ότι οι άξονες X και Y δεν ορίζονται μονοσήμαντα, δηλαδή το σύστημα συντεταγμένων του χώρου έχει αβεβαιότητα στροφής στο επίπεδο ανά 90° και μετάθεσης κατά ένα τετράγωνο. Αυτό σημαίνει πως οι εξωτερικοί προσανατολισμοί που προκύπτουν από την συνόρθωση δέσμης δεν ανταποκρίνονται κατ’ ανάγκην στην πραγματική διάταξη των λήψεων ως προς την σκακιάρα, ζητούμενο όμως εδώ είναι ο σχετικός προσανατολισμός των μηχανών, ο οποίος δεν επηρεάζεται από αυτή την αβεβαιότητα στον προσανατολισμό του συστήματος του χώρου.

Τέλος, πριν από την αναλυτική παρουσίαση της διαδικασίας βαθμονόμησης σκόπιμο είναι, για λόγους πληρότητας, να γίνει μνεία στο πώς βαθμονομούνται οι άλλες υλοποιήσεις σαρωτών με χρήση μηχανής οι οποίες έχουν αναφερθεί στην Εισαγωγή. Έτσι, οι Bouguet & Perona (1998) και οι Leotta et al. (2007) αξιοποιούν το προαναφερθέν λογισμικό βαθμονόμησης μηχανής του Bouguet. Οι Fisher et al. (1999) εφαρμόζουν διαδικασία εμπειρικής βαθμονόμησης απεικονίζοντας κανονικό κανάβο από δύο αποστάσεις. Οι Davis & Chen (2001) εφαρμόζουν την διαδικασία βαθμονόμησης κατά Heikkilä & Silvén (1997) με κυκλικούς στόχους επί επιπέδου. Όπως προαναφέρθηκε, οι Zagorchev & Goshtasby (2006) χρησιμοποιούν δύο παράλληλα επίπεδα πλαίσια που αξιοποιούνται για να βρεθεί η θέση του κέντρου προβολής της μηχανής, ενώ η διαστροφή του φακού υπολογίζεται από απεικόνιση κανονικού κανάβου. Οι Winkelbach et al. (2006) χρησιμοποιούν τους στόχους από τα εξωτερικά επίπεδα του συστήματός τους και μετά υπολογίζουν τον εσωτερικό και εξωτερικό προσανατολισμό με τον αλγόριθμο του Tsai (1987). Τέλος, οι Kawasaki & Furukawa (2007) βαθμονομούν την μηχανή, όπως αναφέρθηκε και στην Εισαγωγή, ταυτόχρονα με τον υπολογισμό όλων των αγνώστων με χρήση των εσωτερικών και εξωτερικών δεσμεύσεων συνεπιπεδότητας και καθετότητας μεταξύ επιπέδων του παραγόμενου μοντέλου.

2.2. Εσωτερικός προσανατολισμός

Στην τυπική περίπτωση, τα ζητούμενα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού είναι οι συντεταγμένες του προοπτικού κέντρου στο σύστημα της εικόνας – δηλαδή η προβολή του στο επίπεδο της εικόνας (πρωτεύον σημείο x_o, y_o) και η απόστασή του από αυτό (σταθερά της μηχανής c) – καθώς και τα βασικά σφάλματα του φακού (συντελεστές πολυωνύμων ακτινικής και έκκεντρης διαστροφής). Πρόκειται για το τυπικό μοντέλο γεωμετρίας της μηχανής κατά Brown (1971). Επειδή όμως σήμερα χρησιμοποιούνται κυρίως ψηφιακές μηχανές λήψης, οφείλει να λαμβάνεται υπόψη και το ενδεχόμενο μη τετραγωνικής εικονοψηφίδας. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με χρήση διαφορετικών σταθερών μηχανής (c_x, c_y) στις δύο κύριες διευθύνσεις της εικόνας και εισαγωγή μιας επιπλέον παραμέτρου για την μη καθετότητα των αξόνων (skewness). Αυτή η προσέγγιση είναι γενικά γνωστή ως μοντέλο του Tsai

(1987). Δεδομένου ότι εν προκειμένω συμμετέχουν δύο μηχανές λήψης, πρέπει φυσικά αυτά τα στοιχεία να υπολογίζονται και για τις δύο μηχανές ξεχωριστά. Τέλος, σημειώνεται ότι εδώ η απόκλιση των αξόνων των εικόνων από την ορθογωνικότητα τελικά έχει αγνοηθεί, αφού αρχικοί έλεγχοι έδειξαν πως η επίδρασή της στην περίπτωση των δεδομένων μηχανών της διατριβής είναι αμελητέα.

Η ακτινική διαστροφή εκφράζεται μέσω του πολωνύμου:

$$\Delta r = K_0 r + K_1 r^3 + K_2 r^5 + \dots \quad (2.1)$$

όπου K_i οι συντελεστές του πολωνύμου και r η απόσταση του εικονοσημείου από το πρωτεύον σημείο (που γενικά θεωρείται ότι συμπίπτει με το κέντρο συμμετρίας της ακτινικής διαστροφής). Συνήθως αγνοούνται οι όροι μετά τον K_2 . Στην Εξ. (2.1) ο γραμμικός όρος $K_0 r$ περιγράφει ενιαία μεταβολή κλίμακας, δηλαδή είναι εξαρτημένος από την σταθερά της μηχανής c , οπότε σε μια συνόρθωση δεν μπορούν να συμμετέχουν και οι δύο παράμετροι ως άγνωστες (εδώ τίθεται $K_0 = 0$). Παράλληλα, σκόπιμο είναι χάριν εποπτικότητας να βαθμονομείται η καμπύλη της ακτινικής διαστροφής. Σε μια βαθμονομημένη καμπύλη αντιστοιχεί διαφορετική σταθερά μηχανής $c + \Delta c$, ενώ οι νέοι συντελεστές του πολωνύμου είναι:

$$\begin{aligned} K'_0 &= -\frac{\Delta c}{c} \\ K'_i &= \left(1 + \frac{\Delta c}{c}\right) K_i \end{aligned} \quad (2.2)$$

Για να βαθμονομηθεί η καμπύλη ακτινικής διαστροφής υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις. Μπορεί πχ. να τεθεί ως κριτήριο ο μηδενισμός της ακτινικής διαστροφής σε συγκεκριμένη ακτινική απόσταση ή να ζητηθεί ο μετασχηματισμός του πολωνύμου ώστε η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή της διαστροφής να είναι κατ' απόλυτη τιμή ίσες. Η μέθοδος που προσφέρει την σαφέστερη ίσως αντίληψη για το μέγεθος της ακτινικής διαστροφής απευθείας από το γράφημα υπολογίζει τον λόγο $\Delta c/c$ με ελαχιστοποίηση της μέσης τετραγωνικής τιμής της διαστροφής (Karras et al., 1998, Ντούσκος, 2006):

$$\frac{\Delta c}{c} = \frac{D_2 - D_1}{D_1 - 2D_2 + D_3} \quad (2.3)$$

όπου:

$$\begin{aligned} D_1 &= K_1^2 \frac{r_o^7}{7} + 2K_1 K_2 \frac{r_o^9}{9} + K_2^2 \frac{r_o^{11}}{11} \\ D_2 &= K_1 \frac{r_o^5}{5} + K_2 \frac{r_o^7}{7} \\ D_3 &= \frac{r_o^3}{3} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Είναι προφανές ότι όλες οι εκφράσεις της ακτινικής διαστροφής μαζί με τις αντίστοιχες σταθερές c συνιστούν λύσεις του εσωτερικού προσανατολισμού προβολικά ισοδύναμες.

Η ακτινική απόσταση r από το πρωτεύον σημείο στην Εξ. (2.1) αναφέρεται κατ' αρχήν στην αυστηρή κεντρική προβολή και όχι στις μετρημένες εικονοσυντεταγμένες (οι οποίες βέβαια έχουν υποστεί την επίδραση της ακτινικής διαστροφής). Έτσι, στην διαδικασία βαθμονόμησης προβάλλονται σε κάθε επανάληψη τα σημεία του χώρου στην εικόνα ώστε να ορίζονται ακτινικές αποστάσεις συμβατές με την κεντρική προβολή, μέσω των οποίων εκφράζεται η ακτινική διαστροφή. Αυτό είναι αναγκαίο γιατί στην διαδικασία επανασύστασης νέας εικόνας (εδώ, όπως θα αναφερθεί στην συνέχεια, των επιτολικών εικόνων) η ακτινική διαστροφή οφείλει να αναφέρεται στις "αληθείς" εικονοσυντεταγμένες και όχι τις μετρημένες.

Εκτός από την συμμετρική ακτινική διαστροφή, εδώ έχει συμπεριληφθεί και η έκκεντρη διαστροφή, όπως αυτή περιγράφεται στο μοντέλο του Brown (1971) εκφραζόμενη μέσω των συντελεστών p_1 και p_2 :

$$\begin{aligned}\Delta r_x &= p_1[r^2 + 2(x - x_o)^2] + 2p_2(x - x_o)(y - y_o) \\ \Delta r_y &= p_2[r^2 + 2(y - y_o)^2] + 2p_1(x - x_o)(y - y_o)\end{aligned}\quad (2.5)$$

Προφανώς, οι συντελεστές της ακτινικής και της έκκεντρης διαστροφής επίσης υπολογίζονται ξεχωριστά για τις δύο μηχανές.

2.3. Σχετικός προσανατολισμός με κλίμακα

Η βαθμονόμηση ενός ζεύγους μηχανών πρέπει επίσης να ορίζει πλήρως την θέση της μιας μηχανής ως προς την άλλη. Άγνωστες παράμετροι είναι, έτσι, οι συνιστώσες B_x , B_y , B_z της βάσης και οι στροφές ω_{12} , ϕ_{12} , κ_{12} του συστήματος συντεταγμένων της δεξιάς μηχανής ως προς εκείνο της αριστερής. Σε σχέση, δηλαδή, με τον σχετικό προσανατολισμό του στερεοζεύγους (5 παράμετροι), εδώ πρέπει να ορίζεται και η κλίμακα.

2.4. Μέθοδος της δέσμης

Οι τιμές όλων των παραμέτρων του προσανατολισμού επικαλυπτόμενων εικόνων (εξωτερικού και εσωτερικού) είναι δυνατόν να εκτιμηθούν σε ένα βήμα συνόρθωσης με την μέθοδο της δέσμης με αυτοβαθμονόμηση (Kraus, 2003). Η τυπική συνθήκη συγγραμμικότητας

$$\begin{bmatrix} x - x_{o1} \\ y - y_{o1} \\ -c_1 \end{bmatrix} = \lambda_1 \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \begin{bmatrix} X - X_{o1} \\ Y - Y_{o1} \\ Z - Z_{o1} \end{bmatrix} \quad (\text{αριστερή εικόνα}) \quad (2.6)$$

εφαρμόζεται εν προκειμένω μόνο για την αριστερή μηχανή, αφού ο εξωτερικός προσανατο-

λισμός της δεξιάς μηχανής είναι δεσμευμένος ως προς εκείνον της αριστερής μέσω του σταθερού σχετικού προσανατολισμού. Έτσι, επιβάλλεται δέσμευση σταθερής σχετικής θέσης των δύο μηχανών, και η θέση αυτή υπολογίζεται απευθείας από την συνόρθωση. Ειδικότερα, για την δεξιά μηχανή ισχύει η συνθήκη συγγραμμικότητας:

$$\begin{bmatrix} x - x_{o2} \\ y - y_{o2} \\ -c_2 \end{bmatrix} = \lambda_2 \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \begin{bmatrix} X - X_{o2} \\ Y - Y_{o2} \\ Z - Z_{o2} \end{bmatrix} \quad (\text{δεξιά εικόνα}) \quad (2.7)$$

όπου όμως:

$$\mathbf{R}_2 = \mathbf{R}_{12} \cdot \mathbf{R}_1 \quad (2.8)$$

$$\begin{bmatrix} X_{o2} \\ Y_{o2} \\ Z_{o2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{o1} \\ Y_{o1} \\ Z_{o1} \end{bmatrix} + \mathbf{R}_1^T \cdot \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Η Εξ. (2.7), λοιπόν, γράφεται τελικά μέσω των Εξ. (2.8) και (2.9) συναρτήσει της θέσης της αριστερής εικόνας και του σχετικού προσανατολισμού των δύο εικόνων ως εξής:

$$\begin{bmatrix} x - x_{o2} \\ y - y_{o2} \\ -c_2 \end{bmatrix} = \lambda_2 \cdot \mathbf{R}_{12} \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \left(\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \left(\begin{bmatrix} X_{o1} \\ Y_{o1} \\ Z_{o1} \end{bmatrix} + \mathbf{R}_1^T \cdot \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \right) \right) \quad (2.10)$$

όπου:

- x_{o1}, y_{o1}, c_1 στοιχεία εσωτερικού προσανατολισμού αριστερής εικόνας
- x_{o2}, y_{o2}, c_2 στοιχεία εσωτερικού προσανατολισμού δεξιάς εικόνας
- $\mathbf{R}_1$ πίνακας στροφής αριστερής εικόνας
- X_{o1}, Y_{o1}, Z_{o1} θέση σημείου λήψης αριστερής εικόνας
- $\mathbf{R}_2$ πίνακας στροφής δεξιάς εικόνας
- X_{o2}, Y_{o2}, Z_{o2} θέση σημείου λήψης δεξιάς εικόνας
- $\mathbf{R}_{12}$ πίνακας σχετικής στροφής εικόνων
- B_x, B_y, B_z συνιστώσες της βάσης μεταξύ των εικόνων.

Σε κάθε σημείο της αριστερής εικόνας καθενός από τα N στερεοζεύγη που συμμετέχουν σε μια διαδικασία βαθμονόμησης αντιστοιχεί μια Εξ. (2.6), ενώ σε κάθε σημείο των δεξιών εικόνων αντιστοιχεί μία Εξ. (2.10). Η συνόρθωση δέσμης χρησιμοποιεί το σύνολο αυτών των εξισώσεων για να εκτιμήσει τελικά τις τιμές:

- των $N \times 6$ παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού των αριστερών εικόνων των N στερεοζευγών (οι οποίες βέβαια δεν χρησιμεύουν στην συνέχεια)
- των 6 παραμέτρων του σχετικού προσανατολισμού, υπό σωστή κλίμακα, της δεξιάς

εικόνας στο σύστημα της αριστερής ($B_x, B_y, B_z, \omega_{12}, \varphi_{12}, \kappa_{12}$)

- των 2×8 παραμέτρων του εσωτερικού προσανατολισμού των δύο μηχανών.

2.5. Αρχικές τιμές

Οι τιμές των αγνώστων προκύπτουν από επίλυση με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Οι εξισώσεις είναι μη γραμμικές ως προς τους αγνώστους, άρα υπάρχει ανάγκη για αρχικές τιμές. Για τις παραμέτρους p_1, p_2 του εσωτερικού προσανατολισμού των δύο μηχανών μπορούν γενικά να χρησιμοποιηθούν οι μηδενικές τιμές. Η σταθερά της μηχανής εκτιμάται από τα σημεία φυγής των δύο κύριων διευθύνσεων που ορίζονται από τις γραμμές και στήλες των σημείων της σκακίερας, όπως αυτά απεικονίζονται σε κάθε εικόνα (Καρράς & Πέτσα, 1992). Επιπλέον, η διαδικασία παρεμβολής ευθειών επιτρέπει να εκτιμώνται τιμές και για τους συντελεστές της ακτινικής διαστροφής του φακού. Με δεδομένη, τέλος, την προσεγγιστική τιμή την σταθεράς της μηχανής, τα ελλείποντα 2 στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού της μηχανής (x_0, y_0) και τα 6 στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού κάθε εικόνας υπολογίζονται από τα αποτελέσματα αναγωγής του επιπέδου του κανάβου (η αναγωγή είναι δυνατή μετά από την αυτόματη εξαγωγή και ταξινόμηση των κορυφών του κανάβου που περιγράφονται στα επόμενα). Οι σχέσεις μέσω των οποίων υπολογίζονται, με γνωστή σταθερά μηχανής, οι τιμές των 8 παραμέτρων του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού από τους 8 συντελεστές ενός 2D προβολικού μετασχηματισμού ανάγονται στον Otto von Gruber (εδώ εφαρμόστηκαν όπως τις δίνει ο Bender, 1971).

2.6. Ελάχιστες παρατηρήσεις

Στόχος είναι να βαθμονομηθεί ένα σύστημα με δύο μηχανές από εικόνες επίπεδου αντικειμένου με γνωστά σημεία (“φωτοσταθερά”). Δύο εικόνες ενός επίπεδου αντικειμένου από την ίδια μηχανή αρκούν για να λυθεί το πρόβλημα, αφού δίνουν δύο προβολικούς μετασχηματισμούς (ομογραφίες) αναφερόμενους στην ίδια μηχανή. Εν προκειμένω, όμως, δύο εικόνες από μία θέση του συστήματος των δύο μηχανών, δηλαδή ένα στερεοζεύγος, δεν είναι αρκετά για να βρεθούν τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού των μηχανών. Ο λόγος είναι πως οι δύο μηχανές έχουν διαφορετικό εσωτερικό προσανατολισμό, οπότε στην ουσία εκείνο που προκύπτει από ένα στερεοζεύγος είναι απλώς δύο ανεξάρτητοι 2D προβολικοί μετασχηματισμοί ως προς το επίπεδο του χώρου, ένας για κάθε μηχανή. Για τον λόγο αυτό χρειάζονται τουλάχιστον δύο στερεοζεύγη, οπότε διατίθενται δύο 2D προβολικοί μετασχηματισμοί του επιπέδου του χώρου για κάθε μηχανή, και το πρόβλημα αντιμετωπίζεται. Προφανώς, σκόπιμο είναι να υπάρχουν περισσότερα ζεύγη εικόνων για πιο αξιόπιστη λύση. Και βέβαια, για να είναι ακριβής ο προσδιορισμός των παραμέτρων της ακτινικής και της έκκεντρης διαστροφής του φακού θα πρέπει, σε ορισμένες τουλάχιστον εικόνες, η σκακίερα να καλύπτει και περιοχές κοντά στα άκρα της εικόνας.

2.7. Αυτόματη αναγνώριση πεδίου ελέγχου

Όπως προαναφέρθηκε, επιλέχθηκε πεδίο ελέγχου με μορφή σκακιέρας, σχηματισμού που είναι ιδιαίτερα δημοφιλής για διαδικασίες βαθμονόμησης γιατί οι κορυφές ενός τέτοιου κανάβου προσδιορίζονται εύκολα με την βοήθεια τελεστή ανίχνευσης σημείων. Τα σημεία αυτά ορίζονται ως τομή ευθειών, η προβολή των οποίων είναι επίσης τεμνόμενες ευθείες, γεγονός που επιτρέπει την χρήση τελεστών ανίχνευσης σημείων όσο και ευθειών. Βέβαια έχουν αναφερθεί και άλλα σχήματα στόχων, πχ. κύκλοι (Heikkilä & Silvén, 1997) ή πιο σύνθετα σχήματα (Fiala & Shu, 2005). Η διαφορά είναι ότι κατά την ανίχνευση τέτοιων στόχων πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η αλλαγή του σχήματός τους λόγω κεντρικής προβολής.

Εδώ εφαρμόστηκε ο τελεστής ανίχνευσης σημείων Harris (Harris & Stephens, 1988) – βλ. και Εικ. 2.2β. Ο τελεστής διακρίνει σημεία από το περιβάλλον τους ως χαρακτηριστικά εξετάζοντας την μεταβολή των τόνων της εικόνας περί τα σημεία αυτά. Με την εφαρμογή του τελεστή συλλέγονται τα σημεία της εικόνας όπου εμφανίζει τοπικά μέγιστα η συνάρτηση:

$$w = \det(\mathbf{M}) - k(\text{trace}\mathbf{M})^2 \quad (2.11)$$

Η συνάρτηση αυτή χαρακτηρίζεται ως συνάρτηση “σημειακότητας” της εικόνας και παρουσιάζει μέγιστο στα σημεία όπου είναι μεγάλες οι δύο ιδιοτιμές του πίνακα $\mathbf{M}$:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial E}{\partial x}\right)^2 & \left(\frac{\partial E}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial E}{\partial y}\right) \\ \left(\frac{\partial E}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial E}{\partial y}\right) & \left(\frac{\partial E}{\partial y}\right)^2 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

όπου E η ένταση του τόνου του γκριζου. Ο αλγόριθμος του τελεστή Harris εφαρμόστηκε εδώ στην υλοποίηση που δίνει ο J.-Y. Bouguet στο ελεύθερο λογισμικό του, η οποία εξασφαλίζει υποψηφιακή (sub-pixel) ακρίβεια.

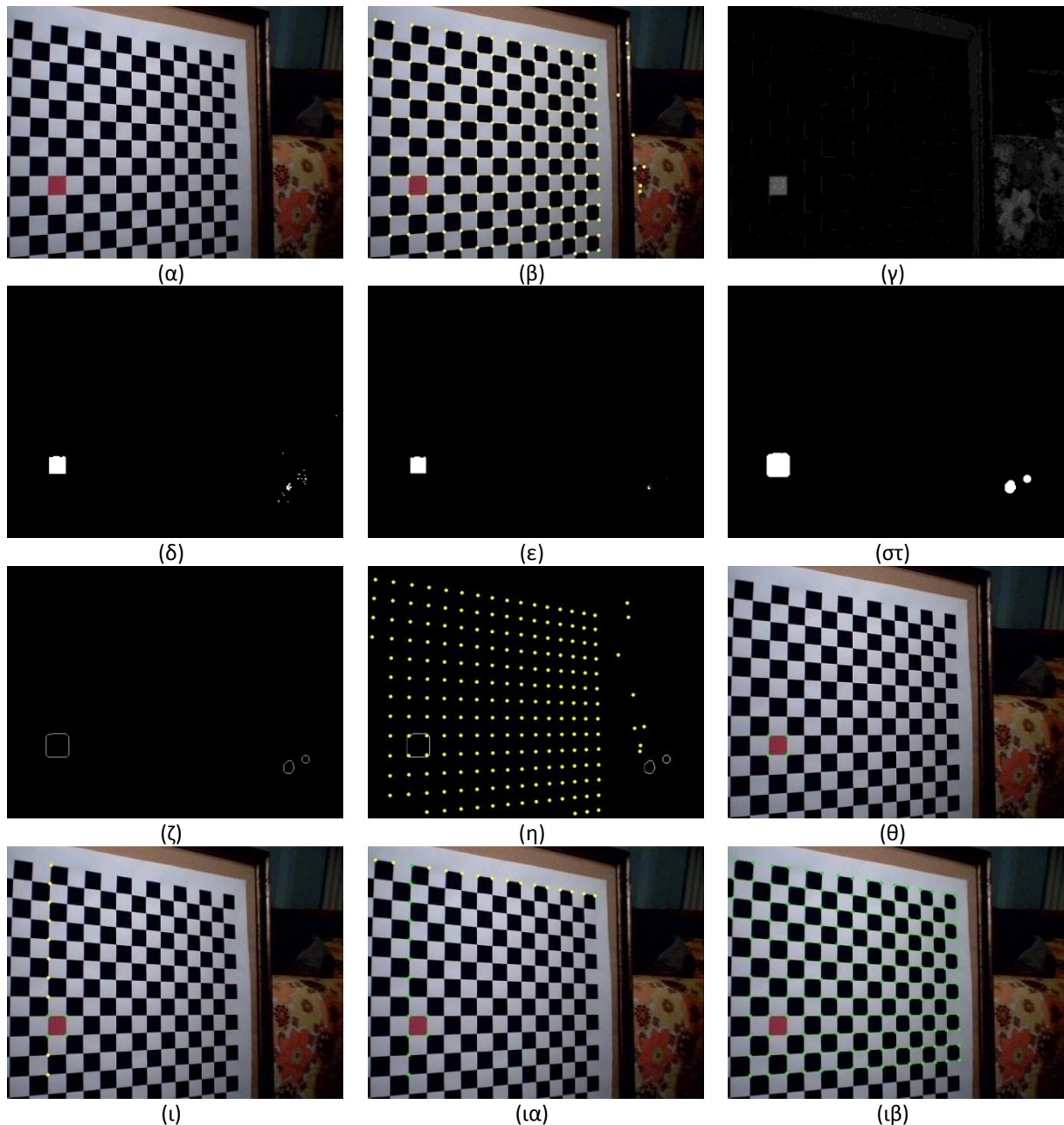
Με τον τρόπο αυτό συλλέγονται χαρακτηριστικά σημεία (“σημεία ενδιαφέροντος”) της εικόνας. Τέτοια σημεία είναι οι κόμβοι της σκακιέρας, αλλά βέβαια και τυχόν άλλα απεικονιζόμενα σημεία που επίσης διακρίνονται έντονα από το περιβάλλον τους. Από τα εξαχθέντα σημεία πρέπει να βρεθούν αυτόματα όσα ανήκουν αποκλειστικά στην σκακιέρα και να αντιστοιχιστούν με τα δικά της σημεία, ώστε τελικά να προκύψει η ένα προς ένα σχέση μεταξύ σημείων της σκακιέρας και ομόλογων εικονοσημείων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το πεδίο ελέγχου διαφέρει εδώ από μία τυπική σκακιέρα, έχοντας ένα κόκκινο τετράγωνο στην θέση ενός μαύρου ώστε να ορίζεται το σύστημα συντεταγμένων του πεδίου ελέγχου.

Για να αναγνωριστεί αυτόματα το κόκκινο τετράγωνο, αρχικά αφαιρείται το πράσινο κανάλι της εικόνας από το κόκκινο, με αποτέλεσμα μια εικόνα με υψηλότερη ένταση τόνων στις κόκκινες περιοχές της εικόνας (Εικ. 2.2γ). Στην εικόνα αυτή τίθεται τιμή κατωφλίου. Επειδή το πεδίο ελέγχου είναι εξ αρχής γνωστό, μπορεί να τεθεί μια σταθερή τιμή κατωφλίου 70 (για εικόνες 8 bit), η οποία αποδείχτηκε ικανοποιητική στο σύνολο των πειραμάτων. Στην

προκύπτουσα δυαδική εικόνα (Εικ. 2.2δ) οι λευκές περιοχές θα περιγράψουν την περιοχή περί το κόκκινο τετράγωνο και επίσης ορισμένες άλλες περιοχές, οι οποίες εν προκειμένω θεωρούνται θόρυβος. Για την απάλειψη του θορύβου επιβάλλεται το μορφολογικό φίλτρο της “διάβρωσης” (erosion) κατά 1-2 pixel (γενικά περί μορφολογικών φίλτρων βλ. πχ. Russ, 2007). Το αποτέλεσμα φαίνεται στην Εικ. 2.2ε. Υπάρχει βέβαια το ενδεχόμενο να παραμένει θόρυβος στην εικόνα. Επειδή όμως η ζητούμενη περιοχή οφείλει να ορίζεται από 4 σημεία Harris, είναι δυνατόν να διαχωριστεί από τις υπόλοιπες. Αναζητείται λοιπόν μια λευκή περιοχή της δυαδικής εικόνας που να περικλείει 4 από τα εξαχθέντα σημεία ενδιαφέροντος, οπότε θα θεωρηθεί ότι αυτά ορίζουν το κόκκινο τετράγωνο. Είναι, έτσι, σκόπιμο να αυξήσει κανείς τις λευκές περιοχές επιβάλλοντας το μορφολογικό φίλτρο της “διαστολής” (dilation) κατά 7-8 pixel (Εικ. 2.2στ), ώστε να εξασφαλιστεί ότι θα οριστεί περιοχή που θα περιλαμβάνει πλήρως το κόκκινο τετράγωνο. Εάν κατόπιν ανιχνευτούν στην τελική εικόνα τα όρια των λευκών περιοχών με φίλτρο ανίχνευσης ακμών Laplace, θα προκύψουν ένα ή περισσότερα πολύγωνα (Εικ. 2.2ζ), ένα από τα οποία αναμένεται να περικλείει 4 σημεία Harris που περιγράφουν το κόκκινο τετράγωνο (Εικ. 2.2η). Το κάτω αριστερά σημείο ορίζεται ως αρχή των αξόνων του συστήματος του κανάβου, λαμβάνοντας και τον αντίστοιχο κωδικό στο σύστημα αυτό. Το κάτω δεξιό σημείο ορίζει την διεύθυνση του θετικού ημιάξονα x και το πάνω αριστερά την διεύθυνση του θετικού ημιάξονα y (Εικ. 2.2θ).

Από την διαδικασία αυτή προκύπτει, έτσι, καλή εκτίμηση για τις δύο κύριες διευθύνσεις του κανάβου αλλά και για το βήμα του στις δύο αυτές διευθύνσεις. Είναι σαφές πως εάν σε κάποια ζεύγη θεωρηθεί (προφανώς και στις δύο εικόνες) ο άξονας X ως Y και αντίστροφα, αυτό δεν έχει επίπτωση στα ζητούμενα, δηλαδή τους εσωτερικούς προσανατολισμούς των εικόνων και τον σχετικό προσανατολισμό τους, χάρη βέβαια και στην τετραγωνική μορφή του κανάβου της σκακιέρας. Βάσει αυτών, και με αφετηρία τις κορυφές του κόκκινου τετραγώνου, μπορούν πλέον να επιλεγούν και τα υπόλοιπα σημεία της σκακιέρας μεταξύ των εξαχθέντων σημείων Harris. Από κάθε σημείο υπολογίζεται προσεγγιστική θέση για το επόμενο σημείο. Αν σε απόσταση 2–3 pixel περί αυτήν εντοπιστεί σημείο Harris, αυτό επιλέγεται και του αποδίδεται ο αντίστοιχος κωδικός στο σύστημα αναφοράς του κανάβου κ.ο.κ. Εφόσον για κάποιον λόγο δεν εντοπιστεί σημείο, ο αλγόριθμος συνεχίζει εκτιμώντας την θέση του επόμενου σημείου. Σε περίπτωση όπου δεν βρεθούν δύο συνεχόμενα σημεία ή αν η εκτιμώμενη θέση είναι εκτός εικόνας, τερματίζεται η ανίχνευση σημείων του κανάβου στην συγκεκριμένη διεύθυνση. Η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται κατά την διεύθυνση y (Εικ. 2.2ι) και την διεύθυνση x (Εικ. 2.2ια) μέχρις ότου συλλεγούν όλα τα σημεία του κανάβου (Εικ. 2.2ιβ).

Αποτέλεσμα είναι ένα σύνολο εικονοσημείων, για τα οποία είναι γνωστά αφενός οι εικονοσυντεταγμένες τους και αφετέρου, μέσω του κωδικού, η αντιστοιχία τους με τα σημεία του κανάβου, τα οποία έχουν γνωστές συντεταγμένες στο επίπεδο του αντικειμένου. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται και για την δεύτερη εικόνα του ζεύγους, και εν συνεχεία για όλα τα ζεύγη. Έτσι, με βάση και τις αρχικές τιμές των παραμέτρων, είναι τελικά δυνατόν να επιλυθεί αυτόματα, με συμμετοχή όλων των εικονοζευγών, η μέθοδος της δέσμης για να βρεθούν οι τιμές των αγνώστων της βαθμονόμησης, όπως αυτή αναλύθηκε προηγουμένως.



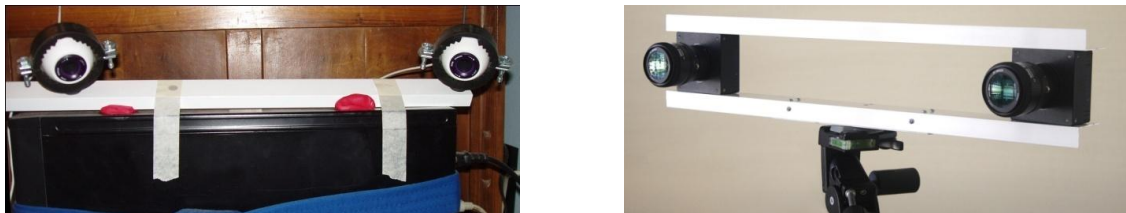
Εικόνα 2.2: (α) Αρχική εικόνα. (β) Σημεία Harris. (γ) Αφαίρεση πράσινου καναλιού από το κόκκινο. (δ) Εφαρμογή κατωφλίου. (ε) Εφαρμογή μορφολογικού φίλτρου διάβρωσης. (στ) Εφαρμογή μορφολογικού φίλτρου διαστολής. (ζ) Εύρεση πολυγώνων με φίλτρο ανίχνευσης ακμών Laplace. (η) Επίθεση σημείων Harris: ένα πολύγωνο περιέχει 4 σημεία. (θ) Το κάτω αριστερά σημείο ορίζεται ως αρχή των αξόνων, το κάτω δεξιά ορίζει την διεύθυνση x , το πάνω αριστερά την διεύθυνση y . (ι) Συλλογή σημείων κατά y . (ια) Συλλογή σημείων κατά x . (ιβ) Τελικά ταξινομημένα σημεία.

2.8. Εκτέλεση διαδικασίας

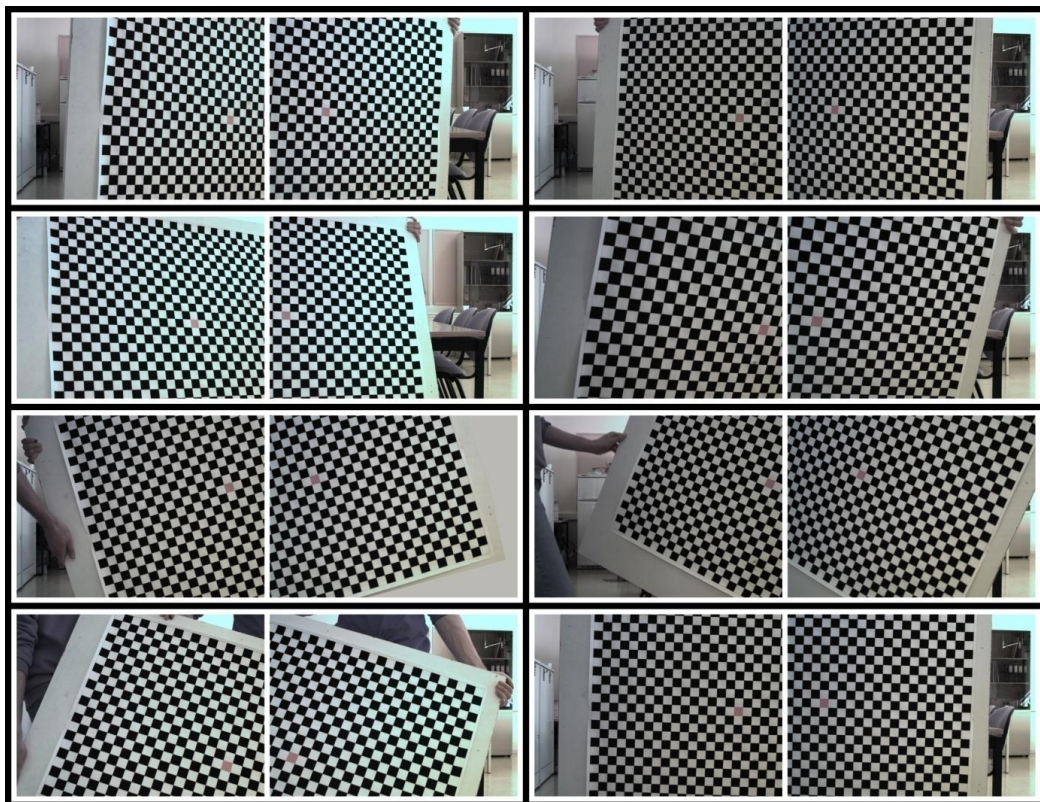
Οι μηχανές πακτώνονται σε ράβδο, με συγκλίνοντες άξονες και σε απόσταση που επιλέγεται βάσει του μεγέθους του αντικειμένου που θα σαρωθεί, και εστιάζονται στο αντικείμενο. Κατόπιν λαμβάνονται στερεοζεύγη του κανάβου (που έχει τυπωθεί σε απλό εκτυπωτή) με τις δύο μηχανές. Στις όλες τις εικόνες πρέπει απαραίτητως να φαίνεται το κόκκινο τετράγω-

νο, ενώ ο χρήστης εισάγει στο πρόγραμμα την τιμή του βήματος του κανάβου. Μετά από την πρώτη επίλυση υπάρχει η δυνατότητα του προγράμματος να απορρίψει σημεία με επιλογή κατωφλίου από τον χρήστη (πχ. $\pm 3\sigma_0$) στα εναπομένοντα σφάλματα των παρατηρήσεων. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να απομακρύνονται σημεία που είχαν συλλεγεί εσφαλμένα στην φάση της αναγνώρισης του κανάβου.

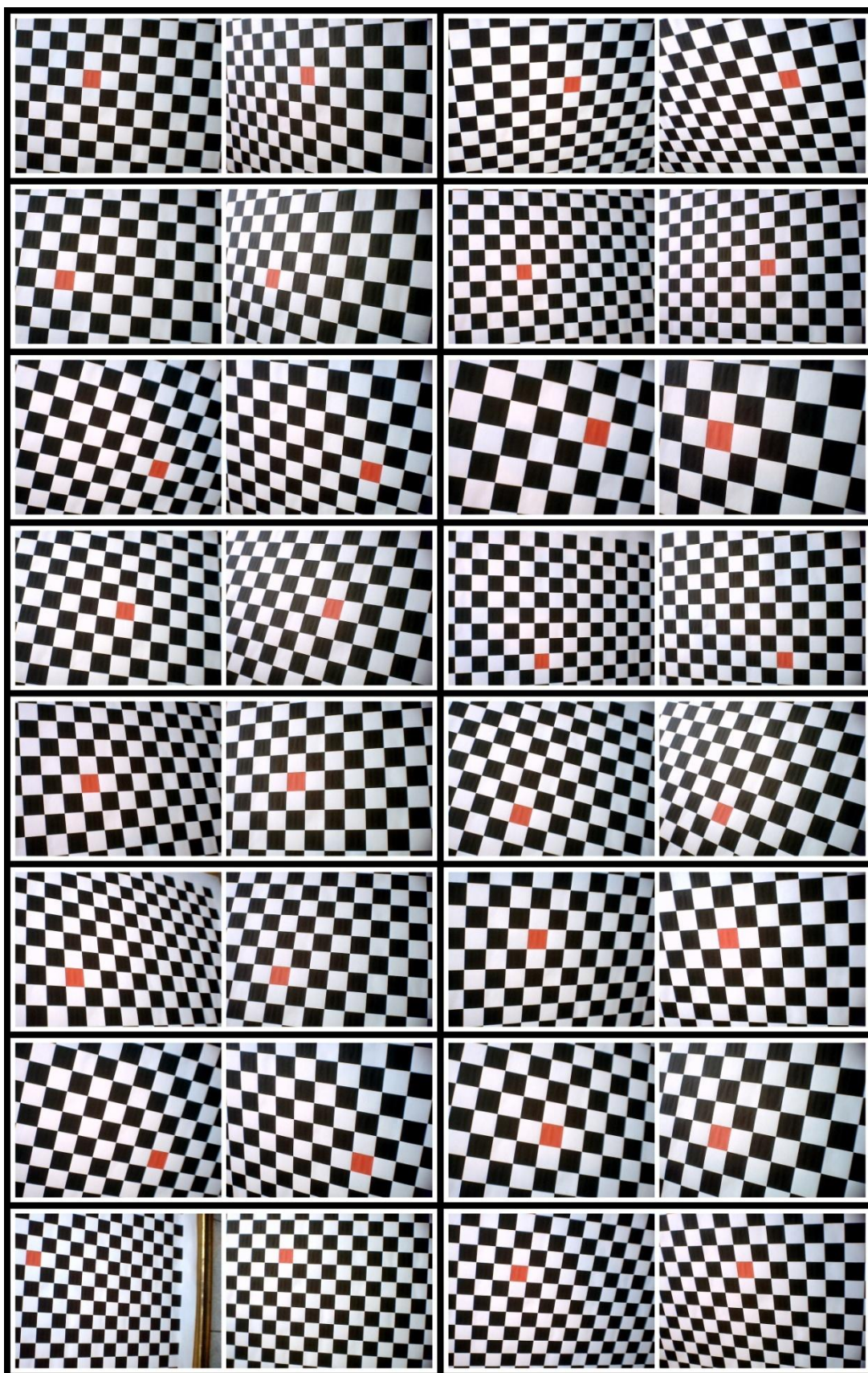
Η διαδικασία βαθμονόμησης εφαρμόστηκε σε δύο ζεύγη μηχανών. Το πρώτο αποτελείται από δύο απλές έγχρωμες μηχανές δικτύου μικρού κόστους, τύπου Onexcite 1.3M της Protia, και ανάλυσης 640×480 (Εικ. 2.3, αριστερά). Το άλλο ζεύγος μηχανών είναι του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας, μάρκας Basler και ανάλυσης 2352×1726 (Εικ. 2.3, δεξιά). Οι μηχανές εδώ διατάχθηκαν χωρίς σύγκλιση ώστε να ελεγχθούν δύο διαφορετικές γεωμετρίες. Οι εικόνες από τα δύο συστήματα φαίνονται στις Εικ. 2.4 και 2.5. Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης υπάρχουν στους Πίνακες 2.1 και 2.2, οι αρχικές καμπύλες της ακτινικής διαστρόφης των φακών, όπως αυτές προέκυψαν από την συνόρθωση, στις Εικ. 2.6 και 2.7, οι δε βαθμονομημένες καμπύλες στις Εικ. 2.8 και 2.9.



Εικόνα 2.3: Αριστερά: οι μηχανές δικτύου πακτωμένες με συγκλίνοντες άξονες σε ράβδο από αλουμίνιο. Δεξιά: οι μηχανές Basler με παράλληλους άξονες στερεωμένες σε δύο γωνίες από αλουμίνιο.



Εικόνα 2.4: Τα οκτώ ζεύγη εικόνων της εφαρμογής με τις μηχανές Basler.



Εικόνα 2.5: Τα 16 ζεύγη εικόνων της εφαρμογής με τις μηχανές δικτύου. Σε όλες τις εικόνες έχει καταγραφεί το κόκκινο τετράγωνο. Ο κάναβος καλύπτει γενικά ολόκληρη την εικόνα ώστε να εξασφαλίζεται ακριβής εκτίμηση των συντελεστών των πολυωνύμων της ακτινικής και της έκκεντρης διαστροφής του φακού.

Πίνακας 2.1

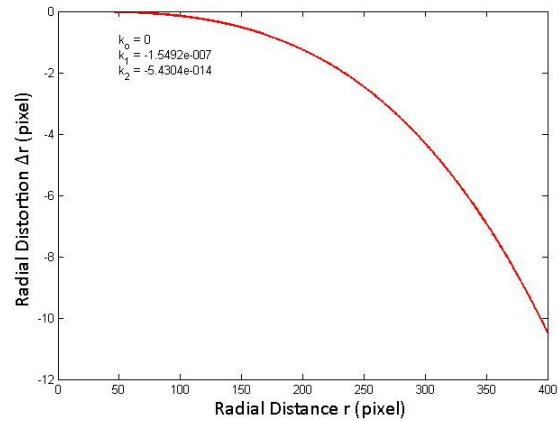
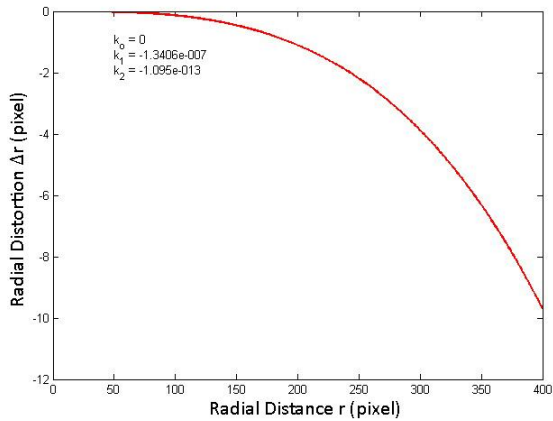
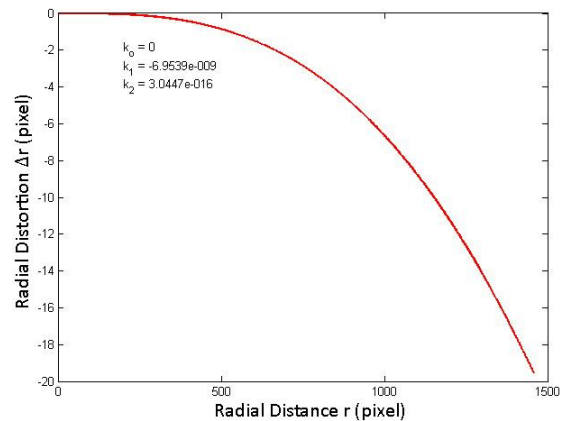
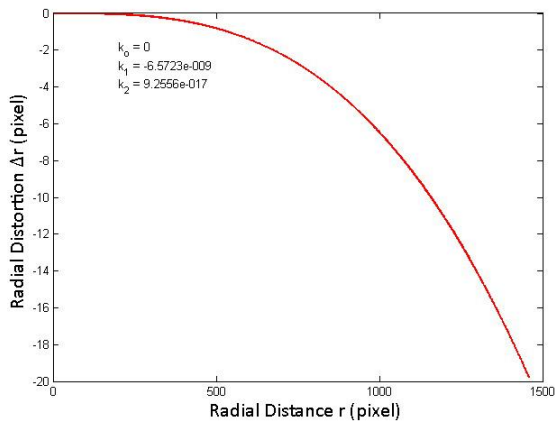
Αποτελέσματα βαθμονόμησης μηχανών δικτύου
(16 στερεοζεύγη)

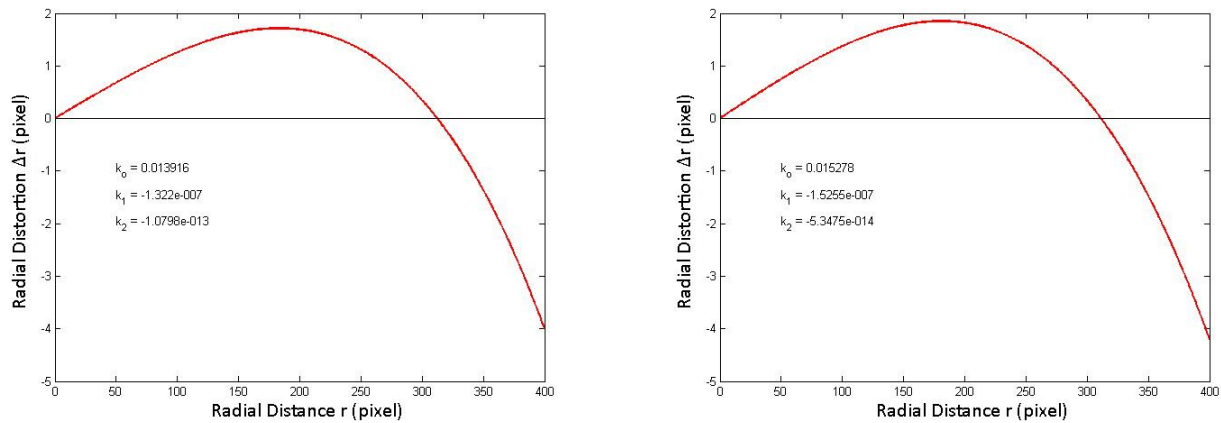
2920 σημεία (1525 στις αριστερές, 1395 στις δεξιές εικόνες)		
$\sigma_0 = \pm 0.19$ pixel		
	αριστερή μηχανή	δεξιά μηχανή
c_x (pix)	942.88 ± 0.33	953.78 ± 0.27
c_y (pix)	939.11 ± 0.35	950.04 ± 0.32
x_o (pix)	-25.27 ± 0.56	-61.03 ± 0.59
y_o (pix)	-12.12 ± 0.36	-9.92 ± 0.38
$k_1 (\times 10^{-07})$	-1.34 ± 0.03	-1.54 ± 0.02
$k_2 (\times 10^{-14})$	-10.95 ± 1.99	-5.43 ± 1.14
$p_1 (\times 10^{-06})$	3.71 ± 0.22	-3.74 ± 0.22
$p_2 (\times 10^{-06})$	-3.02 ± 0.16	-1.50 ± 0.15
Σχετικός προσανατολισμός με κλίμακα		
B_x (cm)	27.61 ± 0.01	
B_y (cm)	1.85 ± 0.00	
B_z (cm)	-11.39 ± 0.02	
ω (°)	-3.13 ± 0.03	
φ (°)	37.93 ± 0.04	
κ (°)	0.12 ± 0.01	

Πίνακας 2.2

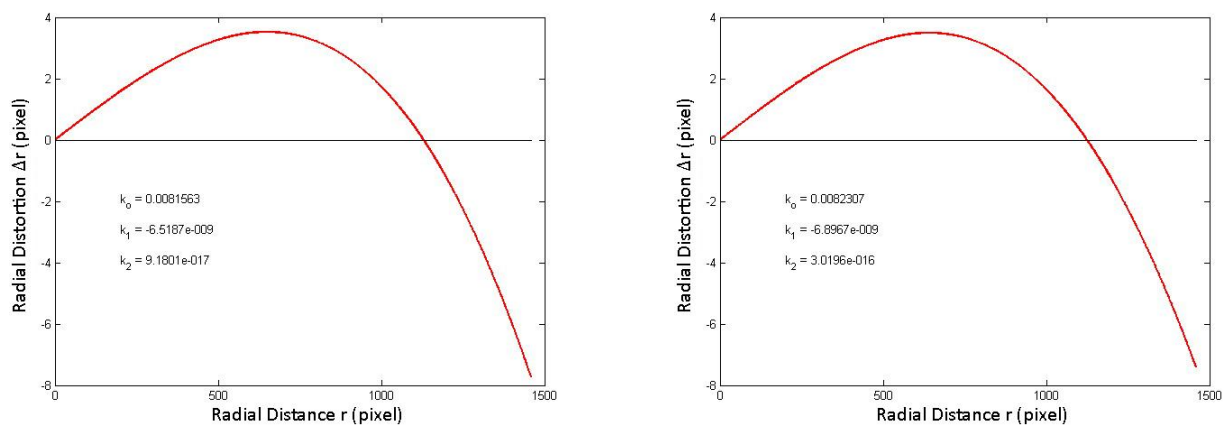
Αποτελέσματα βαθμονόμησης μηχανών Basler
(8 στερεοζεύγη)

3597 σημεία (1651 στις αριστερές, 1946 στις δεξιές εικόνες)		
$\sigma_0 = \pm 0.27$ pixel		
	αριστερή μηχανή	δεξιά μηχανή
c_x (pix)	4078.04 ± 0.91	4088.94 ± 0.91
c_y (pix)	4072.23 ± 0.89	4091.10 ± 0.90
x_o (pix)	22.19 ± 1.39	3.76 ± 1.36
y_o (pix)	13.18 ± 1.29	-12.53 ± 1.25
$k_1 (\times 10^{-09})$	-6.57 ± 0.10	-6.95 ± 0.10
$k_2 (\times 10^{-17})$	9.25 ± 4.92	30.44 ± 4.60
$p_1 (\times 10^{-07})$	-4.13 ± 0.33	-6.48 ± 0.33
$p_2 (\times 10^{-07})$	1.92 ± 0.27	-1.75 ± 0.25
Σχετικός προσανατολισμός με κλίμακα		
B_x (cm)	55.73 ± 0.00	
B_y (cm)	-0.16 ± 0.00	
B_z (cm)	0.96 ± 0.03	
ω (°)	-1.39 ± 0.02	
φ (°)	-0.02 ± 0.02	
κ (°)	0.00 ± 0.00	

**Εικόνα 2.6:** Αρχικές καμπύλες ακτινικής διαστρόφης των μηχανών δικτύου που προέκυψαν από την επίλυση.**Εικόνα 2.7:** Αρχικές καμπύλες ακτινικής διαστρόφης μηχανών Basler που προέκυψαν από την επίλυση.



Εικόνα 2.8: Βαθμονομημένες καμπύλες ακτινικής διαστροφής των μηχανών δικτύου.



Εικόνα 2.9: Βαθμονομημένες καμπύλες ακτινικής διαστροφής μηχανών Basler.

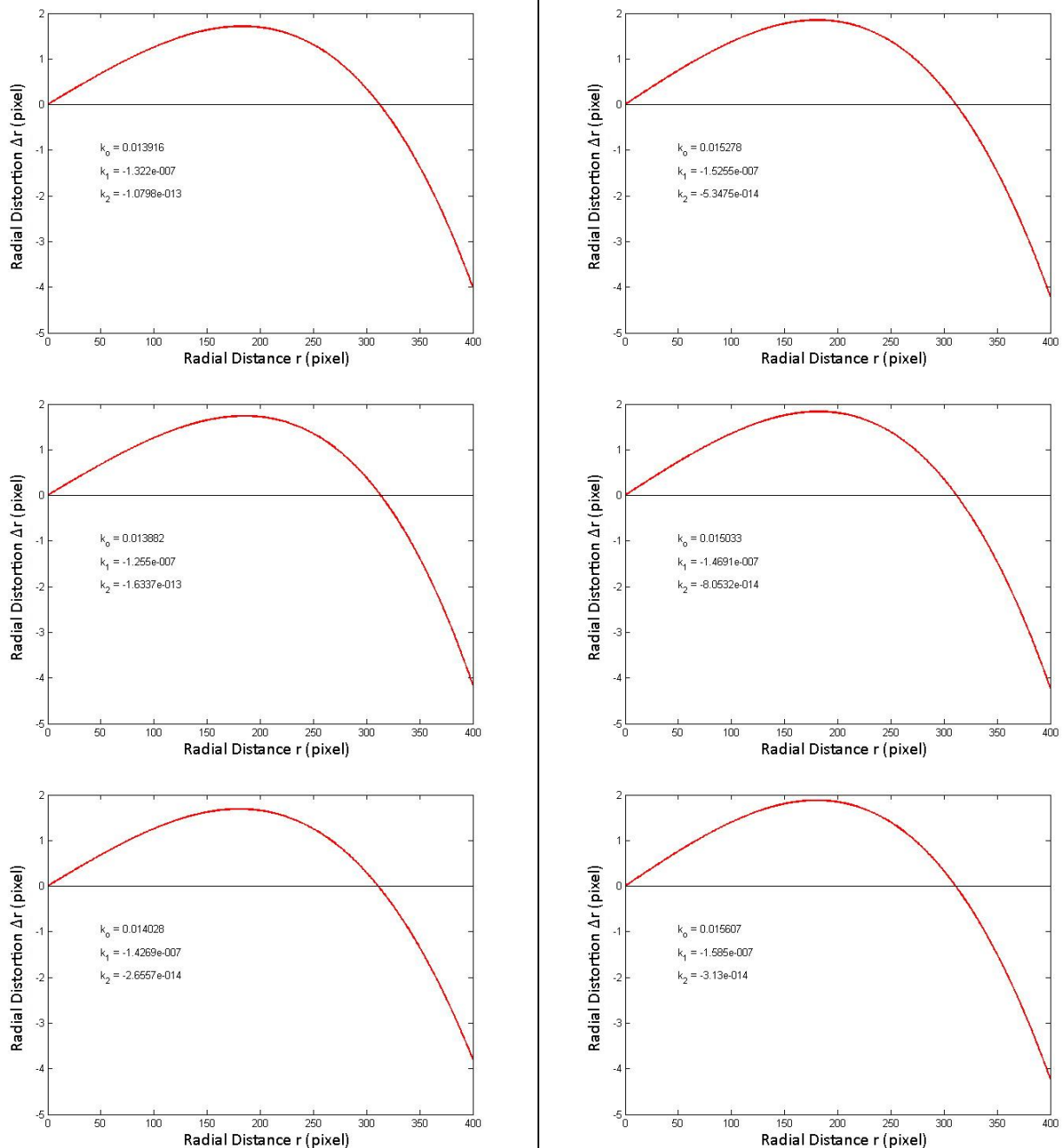
2.9. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων βαθμονόμησης

Όπως έχει αναφερθεί, ο κάναβος έχει τυπωθεί σε κοινό εκτυπωτή και οι κορυφές του έχουν εξαχθεί στις εικόνες με τον τελεστή Harris. Οι δύο αυτοί παράγοντες καθορίζουν την ακρίβεια της βαθμονόμησης. Ο τυπικός εκτυπωτής έχει ακρίβεια της τάξης του 0.1 mm (στην περίπτωση των μηχανών δικτύου το μέγεθος αυτό είναι περί το ένα δέκατο της εικονοψηφίδας στο επίπεδο του αντικειμένου) ενώ, κατά τους Ouyang et al. (2005), ο τελεστής Harris έχει υποψηφιακή ακρίβεια της τάξης της μισής εικονοψηφίδας.

Βάσει αυτών, τα αποτελέσματα κρίνονται ικανοποιητικά από άποψη ακρίβειας. Για παράδειγμα, το σφάλμα της συνόρθωσης είναι έως $\frac{1}{4}$ του pixel, η σταθερά της μηχανής εκτιμάται με αβεβαιότητα που δεν υπερβαίνει το $\pm 0.4\%$, οι δε συντελεστές της διαστροφής έχουν αβεβαιότητα σημαντικά μικρότερη της τιμής τους. Σχετικά μεγαλύτερη αβεβαιότητα επιδεικνύει η θέση του πρωτεύοντος σημείου, η ευαισθησία όμως της οποίας θεωρείται γενικά υψηλή συγκρινόμενη με άλλες παραμέτρους της γεωμετρίας της μηχανής (Ruiz et al., 2002). Φυσικά η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων αυξάνει με την αύξηση των παρατηρήσεων.

Ακόμα, με βάση όλες τις εικόνες από τις μηχανές δικτύου έγινε έλεγχος για να εκτιμηθεί η

επαναληψιμότητα της βαθμονόμησης. Το σύνολο των ζευγών της Εικόνας 2.5 χωρίστηκε σε δύο ομάδες (τα πρώτα 8 ζεύγη και τα υπόλοιπα 8) και εκτελέστηκε η διαδικασία βαθμονόμησης χωριστά για κάθε υποσύνολο. Τα αποτελέσματα, που εμφανίζονται στον Πίνακα 2.3, κρίνονται πρακτικά ισοδύναμα. Οι μικρές διαφορές ως προς τις τιμές του Πίνακα 2.1 αποδίδονται στο ότι εκεί τα αποτελέσματα έχουν προκύψει από διπλάσιο αριθμό εικόνων. Από την σύγκριση μάλιστα των καμπυλών της ακτινικής διαστρόφης (Εικ. 2.10) παρατηρείται ότι είναι πρακτικά ταυτόσημες. Διαφέρουν μόνο στα άκρα της εικόνας, όπου και εκεί όμως η υπολογιζόμενη ακτινική διαστρόφη έχει διαφορές μικρότερες από μια εικονοψηφίδα.



Εικόνα 2.10: Βαθμονομημένες καμπύλες ακτινικής διαστρόφης. Υποσύνολα από τα δεδομένα των μηχανών δικτύου (πάνω: όλα τα στερεοζεύγη, μέσον: τα 8 πρώτα, κάτω: τα 8 τελευταία). Αριστερά για την αριστερή μηχανή, δεξιά για την δεξιά.

Πίνακας 2.3

Αποτελέσματα βαθμονόμησης. Υποσύνολα από τα δεδομένα των μηχανών δικτύου (αριστερά: τα 8 πρώτα στερεοζεύγη, δεξιά: τα 8 τελευταία).

1501 σημεία (762 στις αριστερές, 739 στις δεξιές εικόνες)			1419 σημεία (763 στις αριστερές, 656 στις δεξιές εικόνες)		
$\sigma_0 = \pm 0.17$ pixel			$\sigma_0 = \pm 0.20$ pixel		
	αριστερή μηχανή	δεξιά μηχανή		αριστερή μηχανή	δεξιά μηχανή
c_x (pix)	943.41 ± 0.45	953.06 ± 0.32	c_x (pix)	943.29 ± 0.53	954.00 ± 0.51
c_y (pix)	939.92 ± 0.47	949.71 ± 0.39	c_y (pix)	939.38 ± 0.58	950.49 ± 0.59
x_o (pix)	-25.21 ± 0.67	-61.66 ± 0.77	x_o (pix)	-25.18 ± 0.88	-59.32 ± 0.86
y_o (pix)	-12.42 ± 0.45	-9.50 ± 0.47	y_o (pix)	-11.75 ± 0.56	-9.80 ± 0.56
$k_1 (\times 10^{-07})$	-1.27 ± 0.03	-1.49 ± 0.02	$k_1 (\times 10^{-07})$	-1.44 ± 0.04	-1.61 ± 0.03
$k_2 (\times 10^{-14})$	-16.56 ± 0.23	-8.17 ± 1.48	$k_2 (\times 10^{-14})$	-2.69 ± 3.24	-3.17 ± 1.65
$p_1 (\times 10^{-06})$	3.75 ± 0.27	-3.76 ± 0.28	$p_1 (\times 10^{-06})$	3.54 ± 0.34	-3.31 ± 0.33
$p_2 (\times 10^{-06})$	-3.39 ± 0.19	-1.28 ± 0.19	$p_2 (\times 10^{-06})$	-2.89 ± 0.24	-1.65 ± 0.23
Σχετικός προσανατολισμός με κλίμακα			Σχετικός προσανατολισμός με κλίμακα		
B_x (cm)	27.60 ± 0.01		B_x (cm)	27.59 ± 0.01	
B_y (cm)	1.81 ± 0.00		B_y (cm)	1.90 ± 0.01	
B_z (cm)	-11.42 ± 0.02		B_z (cm)	-11.40 ± 0.03	
ω (°)	-3.03 ± 0.04		ω (°)	-3.23 ± 0.05	
φ (°)	37.97 ± 0.05		φ (°)	37.80 ± 0.07	
κ (°)	0.10 ± 0.02		κ (°)	0.14 ± 0.02	

Ωστόσο, το να συγκρίνει κανείς απευθείας της τιμές παραμέτρων από διαφορετικές βαθμονομήσεις δεν είναι πάντοτε ασφαλές, δεδομένου πως οι τιμές των παραμέτρων εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού σε κάθε επίλυση είναι συσχετισμένες μεταξύ τους. Σαφέστερες κρίσεις είναι δυνατές εκ του αποτελέσματος, δηλαδή από τις επιπτώσεις που έχουν οι αβεβαιότητες της βαθμονόμησης στην ανακατασκευή της 3D επιφάνειας. Για να συγκριθούν λοιπόν ανεξάρτητες επιλύσεις βαθμονόμησης από διαφορετικές ομάδες εικόνων, έγινα δύο ανακατασκευές μιας επιφάνειας από τις ίδιες εικόνες, με χρήση όμως των αποτελεσμάτων βαθμονόμησης του Πίνακα 2.3 από τις δύο διαφορετικές 8άδες εικόνων, και τα νέφη σημείων που προέκυψαν συγκρίθηκαν μεταξύ τους. Ειδικότερα, σαρώθηκε το αντικείμενο (το ανθρώπινο πρόσωπο της ενότητας 8.8), με τα αντίστοιχα στοιχεία βαθμονόμησης δημιουργήθηκαν επιπολικές εικόνες (βλ. Κεφάλαιο 3), εντοπίστηκαν αυτόματα ομολόγα σημεία (βλ. Κεφάλαιο 4), παρήχθησαν εμπροσθοτομικά (με τον αλγόριθμο της ενότητας 5.3.1) δύο νέφη σημείων, ένα για κάθε επίλυση βαθμονόμησης, και, τέλος, τα δύο αυτά σημειοσύνολα συνταυτίστηκαν με τον αλγόριθμο ICP (βλ. ενότητα 6.3). Η μέση τετραγωνική διαφορά τους φαίνεται στον Πίνακα 2.4.

Πίνακας 2.4

Σύγκριση επιφανειών που προέκυψαν από επιλύσεις βαθμονόμησης με δύο διαφορετικές 8άδες εικόνων

Αριθμός σημείων	RMS διαφορά επιφανειών (mm)
23404	0.12

Δεδομένου ότι η αυτή η διαφορά οφείλεται στις αβεβαιότητες και των δύο ανεξάρτητων

δεδομένων βαθμονόμησης, εκτιμάται τελικά ότι το σφάλμα το οφειλόμενο σε μια επίλυση βαθμονόμησης είναι μικρότερο του 0.1 mm (διαίρεση με $\sqrt{2}$). Η τιμή αυτή είναι κάτω του 50% του εκτιμώμενου σφάλματος της 3D ανακατασκευής (όπως αυτό εκτιμάται στο Κεφάλαιο 7), οπότε συμπεραίνεται ότι η ακρίβεια της βαθμονόμησης είναι όντως επαρκής για τις ανάγκες της σάρωσης.

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύθηκε ο τρόπος με τον οποίο βαθμονομείται αυτόματα το σύστημα των δύο μηχανών δικτύου. Θεωρείται, έτσι, πλέον γνωστή η εσωτερική γεωμετρία των μηχανών όπως και η σχετική τους θέση (σε σωστή κλίμακα). Τα στοιχεία αυτά επαρκούν για να δημιουργηθούν επιπολικές εικόνες για κάθε στερεοζεύγος και, κατ' επέκταση, να απλοποιηθεί η διαδικασία εύρεσης ομολογιών. Στο επόμενο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι διαδικασίες για την δημιουργία επιπολικών εικόνων και την άμβλυνση του θορύβου τους.

ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΠΙΠΟΛΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ

3

```
% limits = [upleft_x upright_x downright_x downleft_x
%           upleft_y upright_y downright_y downleft_y
%           1           1           1           1]

limits = [-col_dim/2 col_dim/2 col_dim/2 -col_dim/2
          row_dim/2 row_dim/2 -row_dim/2 -row_dim/2];

limits(1,:) = limits(1,)-xo; % Principal Point
limits(2,:) = limits(2,)-yo;

rr2 = limits(1,:).*limits(1,:) + limits(2,:).*limits(2,:); % Radial Distance
rr4 = rr2 .* rr2;

rad_distor_x = limits(1,:) .* (k1*rr2 + k2*rr4); % Radial Distortion
rad_distor_y = limits(2,:) .* (k1*rr2 + k2*rr4);

tan_distor_x = p1*(rr2 + 2*limits(1,:).*limits(1,:)) + 2*p2*limits(1,:).*limits(2,:); % Decer
tan_distor_y = p2*(rr2 + 2*limits(2,:).*limits(2,:)) + 2*p1*limits(1,:).*limits(2,:);

limits = [limits(1,:) - rad_distor_x - tan_distor_x
          limits(2,:) - rad_distor_y - tan_distor_y
          ones(1,4)];

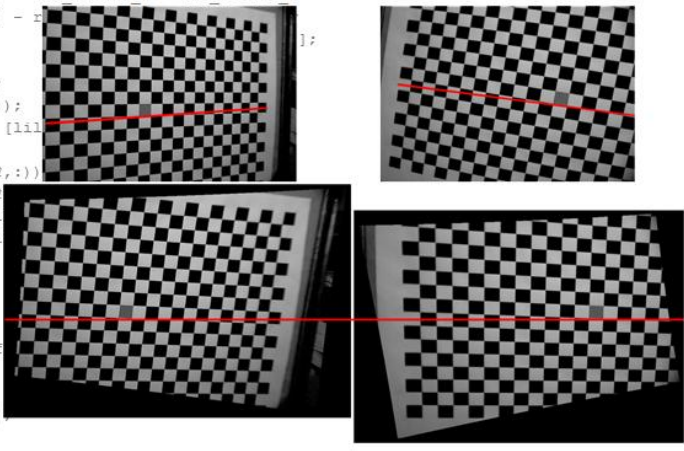
limits2 = H * limits;
lil1 = limits2(3,:);
limits2 = limits2 ./ [lil1 lil1 lil1 lil1];

up = max(limits2(2,:));
down = min(limits2(2,:));
left = min(limits2(1,:));
right = max(limits2(1,:));

ox=0;
oy=0;

x1 = flipplr(ox:-1:left);
x2 = ox: 1:right;
y1 = oy:-1:down;
y2 = flipplr(oy: 1:up);

prinx = -length(x1);
priny = length(y2);
```



3. Προεπεξεργασία και δημιουργία επιπολικών εικόνων

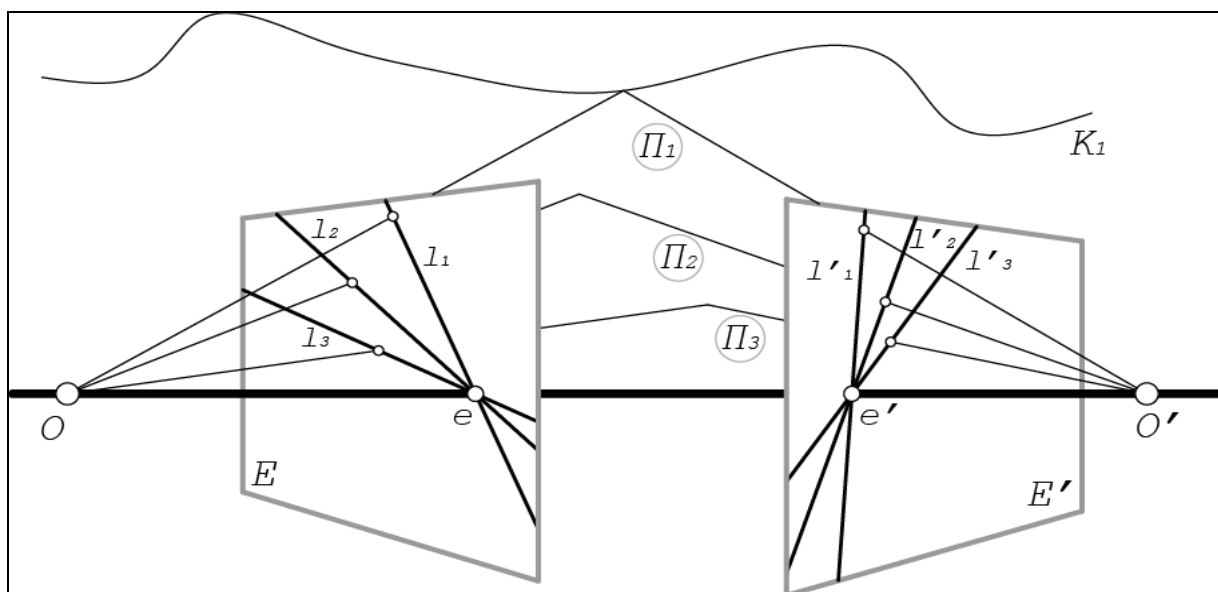
3.1. Εισαγωγικά

Όπως έχει αναφερθεί, όταν το αντικείμενο σαρώνεται με το βαθμονομημένο σύστημα κάθε ζεύγος εικόνων καταγράφει την τομή του επιπέδου του laser με την επιφάνεια του αντικειμένου. Πριν όμως από την καθαυτό διαδικασία μέτρησης, οι εικόνες πρέπει να υποστούν ορισμένες επεξεργασίες, γεωμετρικές και ραδιομετρικές. Ειδικότερα, η ανάγκη για απλοποίηση της διαδικασίας, που αποσκοπεί στην διευκόλυνση της αυτοματοποίησης, υπαγορεύει την αξιοποίηση της επιπολικής γεωμετρίας. Παράλληλα, απαιτείται εξομάλυνση του θορύβου στις επιπολικές εικόνες. Αυτές οι διαδικασίες περιγράφονται στο παρόν Κεφάλαιο.

3.2. Επιπολική γεωμετρία

Έστω ζεύγος σημείων O και O' του τρισδιάστατου χώρου (Εικ. 3.1). Τα σημεία αυτά ορίζουν ευθεία $O'O$ και δέσμη επιπέδων Π_i , τα οποία περιέχουν την ευθεία αυτή (αξονική δέσμη επιπέδων). Εάν υποθεθεί ότι τα σημεία O και O' είναι τα κέντρα δύο κεντρικών προβολών (προοπτικών απεικονίσεων) του χώρου στα επίπεδα προβολής E και E' , κάθε επίπεδο Π_i της δέσμης επιπέδων θα τέμνει τα επίπεδα των εικόνων σε ευθείες l_i και l'_i , αντίστοιχα, και την επιφάνεια του αντικειμένου σε καμπύλη K_i (έτσι, όλα τα σημεία της καμπύλης αυτής ορίζουν με την βάση του στερεοζεύγους το ίδιο επιπολικό επίπεδο και τις ίδιες επιπολικές ευθείες). Οι ευθείες l_i προφανώς θα συντρέχουν σε σημείο e και, αντίστοιχα, οι l'_i σε σημείο e' . Η προβολή της καμπύλης K_i στα επίπεδα προβολής θα είναι οι ευθείες l_i και l'_i , οι οποίες είναι προφανώς ομόλογες. Οι ευθείες αυτές ονομάζονται επιπολικές ευθείες του στερεοζεύγους, τα σημεία e και e' πόλοι του ζεύγους και τα επίπεδα Π_i επιπολικά επίπεδα.

Είναι γνωστό ότι είναι δυνατόν να υπολογιστεί η θέση των πόλων ζεύγους εικόνων κεντρικής προβολής (απαλλαγμένων από σφάλματα φακών) και η προσανατολισμένη δέσμη των επιπολικών γραμμών από τουλάχιστον 7 ομολογίες σημείων μεταξύ των εικόνων (Hartley & Zisserman, 2000, Faugeras & Luong, 2001). Με αυτόν τον τρόπο αποκαθίσταται η 2D επιπολική γεωμετρία των εικόνων, δηλαδή μπορεί να υπολογιστεί ο “επιπολικός πίνακας” (fundamental matrix) του ζεύγους. Ο επιπολικός πίνακας έχει 7 βαθμούς ελευθερίας, σε αντιδιαστολή προς τους 5 του τυπικού σχετικού προσανατολισμού της φωτογραμμετρίας (κι αυτό επειδή ο τυπικός φωτογραμμετρικός ορισμός αναφέρεται σε εικόνες γνωστού εσωτερικού προσανατολισμού). Βασικό χαρακτηριστικό του επιπολικού πίνακα είναι ότι μπορεί να υπολογιστεί από γραμμικές εξισώσεις. Αν είναι γνωστός ο επιπολικός πίνακας ζεύγους από την ίδια μηχανή και μπορεί να τεθεί μία δέσμευση στα 3 στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού, είναι δυνατόν να υπολογιστούν τα άλλα δύο στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού και ο σχετικός προσανατολισμός του ζεύγους. Για την τελευταία αυτή διαδικασία αναφέρονται αρκετοί αλγόριθμοι (πχ. εκείνοι των Hartley, 1992, και Καλησπεράκη, 2010).



Εικόνα 3.1: Τρία επιπολικά επίπεδα Π_i με τις αντίστοιχες επιπολικές ευθείες l_i και l'_i σε δύο επίπεδα προβολής (επίπεδα εικόνας) E και E' . Η ευθεία OO' τέμνει τα επίπεδα των εικόνων στα σημεία e και e' (πόλοι του στερεοζεύγους). Η καμπύλη K_1 είναι τομή του επιπολικού επιπέδου Π_1 με το αντικείμενο και επομένως απεικονίζεται στο επίπεδο E στην ευθεία l_1 και στο επίπεδο E' στην ομόλογη ευθεία l'_1 .

Βέβαια τα περί επιπολικού πίνακα δεν αφορούν κατ' αρχήν την παρούσα διατριβή, δεδομένου ότι το ζεύγος των μηχανών προβαθμονομείται εδώ ανεξάρτητα από την διαδικασία της σάρωσης. Αναφέρονται όμως επειδή ο επιπολικός πίνακας αξιοποιείται αργότερα για να βρεθούν αρχικές τιμές για την συνένωση των νεφών (ενότητα 6.3.2), αλλά και για λόγους πληρότητας, αφού και σε διαδικασίες σάρωσης θα ήταν δυνατόν να αξιοποιηθεί μια προσέγγιση βάσει του επιπολικού πίνακα με μη βαθμονομημένες μηχανές και επιβολή κατάλληλων γεωμετρικών δεσμεύσεων, όπως πχ. κάνουν οι Kawasaki & Furukawa (2007).

3.3. Επιπολικές εικόνες

Δύο επικαλυπτόμενες εικόνες γνωστού εσωτερικού προσανατολισμού είναι δυνατόν να μετασχηματιστούν, μέσω προβολικού μετασχηματισμού, σε εικόνες με επιπολικές γραμμές παράλληλες στον άξονα x των εικόνων, που δηλαδή συμπίπτουν με τις σειρές των ψηφιακών εικόνων. Τα επίπεδα εικόνων που έχουν αυτήν την ιδιότητα είναι παράλληλα στο διάνυσμα $\mathbf{B}$ της βάσης του ζεύγους. Οι εικόνες που προκύπτουν από αυτήν την διαδικασία ονομάζονται επιπολικές. Αξίζει να σημειωθεί ότι αν ο πόλος εικόνας στερεοζεύγους βρίσκεται εντός των ορίων της, τότε δεν είναι δυνατός τέτοιος μετασχηματισμός για ολόκληρη την εικόνα (ο πόλος δεν μπορεί να μεταφερθεί στο άπειρο). Έχουν παρουσιαστεί λύσεις για το συγκεκριμένο πρόβλημα, όπως εκείνη των Pollefeys et al. (1999) που προτείνουν πολικό μετασχηματισμό αντί του επίπεδου προβολικού, αλλά το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής δεν είναι εικόνα που ακολουθεί τους κανόνες της κεντρικής προβολής.

Στην περίπτωση αυτής της διατριβής δεδομένα από την βαθμονόμηση είναι τα στοιχεία του

εσωτερικού προσανατολισμού και ο σχετικός προσανατολισμός με κλίμακα, οπότε η επιπολική γεωμετρία είναι γνωστή και ορίζονται οι επιπολικές εικόνες. Στην διαδικασία δημιουργίας επιπολικών εικόνων, οι δύο εικόνες αρχικά στρέφονται ώστε να έχουν μοναδιαίο πίνακα στροφής στο σύστημα του χώρου (εδώ στο σύστημα του σχετικού προσανατολισμού, δηλαδή της αριστερής εικόνας) και μετά στρέφονται από κοινού ώστε να γίνουν συνεπίπεδες και παράλληλες στην βάση (Schenk, 2000, Mikhail et al., 2001, Θεοφάνους, 2004). Ο πίνακας στροφής που περιγράφει την διεύθυνση της βάσης προκύπτει από τις σχέσεις:

$$K = \arctan\left(\frac{B_y}{B_x}\right) \quad \Phi = \arctan\left(\frac{-B_z}{\sqrt{B_x^2 + B_y^2}}\right) \quad \Omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \quad (3.1)$$

$$\mathbf{R}_B = \mathbf{R}_\Omega \mathbf{R}_\Phi \mathbf{R}_K$$

Ως τιμή της στροφής Ω (η οποία δεν επηρεάζει την παραλληλία των εικόνων με την βάση) λαμβάνεται συνήθως ο μέσος όρος των στροφών ω των δύο εικόνων, προκειμένου να μην εισάγονται έντονες προοπτικές παραμορφώσεις στις τελικές εικόνες αλλά και να μην δημιουργούνται εικόνες μεγάλου όγκου.

Έτσι, υπολογίζονται οι ακόλουθοι πίνακες, όπου $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2$ οι πίνακες στροφής των εικόνων,

$$\mathbf{M}_1 = \mathbf{R}_B \mathbf{R}_1^T \quad \mathbf{M}_2 = \mathbf{R}_B \mathbf{R}_2^T \quad (3.2)$$

οι οποίοι επιβάλλουν τις δύο προαναφερθείσες στροφές στις δύο εικόνες.

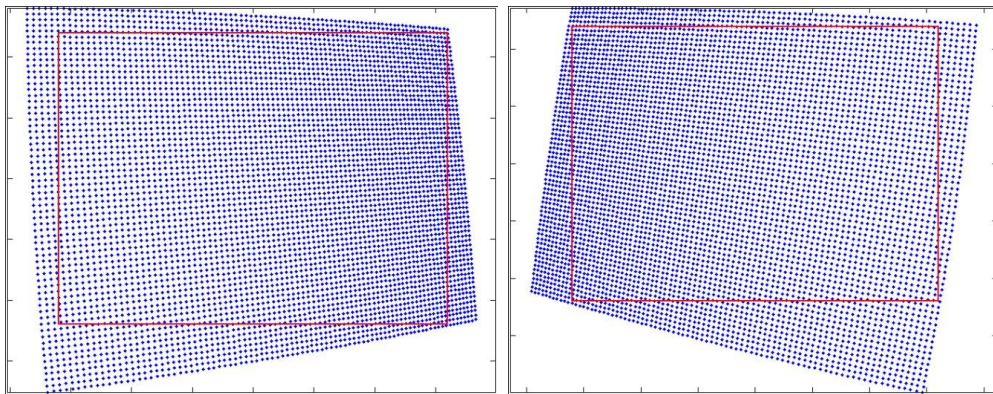
Ο τελικός μετασχηματισμός των συντεταγμένων για κάθε εικόνα είναι:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ -c' \end{bmatrix} = n\mathbf{M} \begin{bmatrix} x - x_o \\ y - y_o \\ -c \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

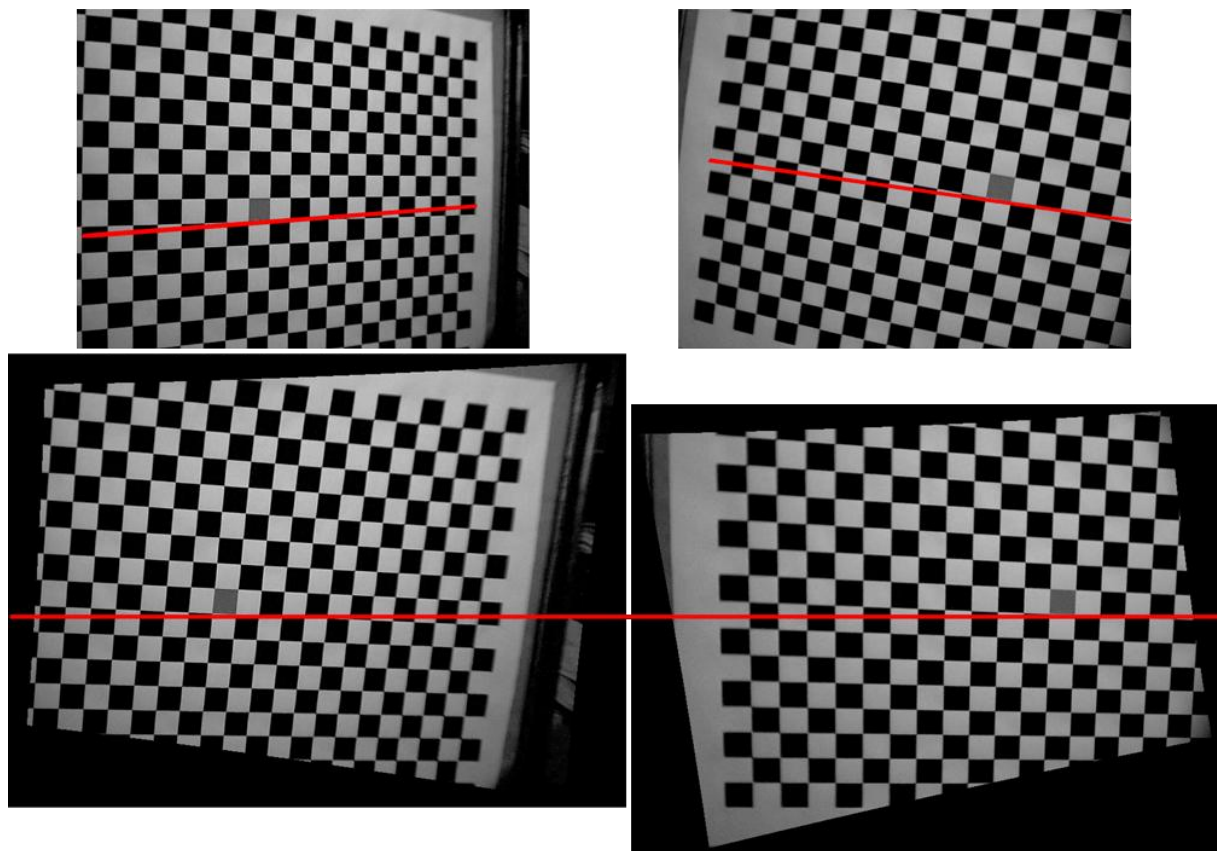
Η τελική σταθερά c' της μηχανής (που γενικά επιλέγεται να είναι κοινή για τις δύο εικόνες, ακόμα και όταν αυτές δεν προορίζονται για στερεοσκοπική παρατήρηση) μπορεί να επιλέγεται αυθαίρετα. Συνήθως χρησιμοποιείται τιμή μεγαλύτερη από την πραγματική ώστε να μην χάνεται πληροφορία από τις αρχικές εικόνες λόγω διαφορών κλίμακας (Kraus, 2003). Στην παρούσα εργασία, όπου το ζήτημα της απώλειας πληροφορίας δεν είναι σοβαρό, επιλέγεται η μεγαλύτερη από τις τιμές των $c_{x1}, c_{y1}, c_{x2}, c_{y2}$.

Η αναφερθείσα διαδικασία περιγράφει την άμεση πορεία από τις αρχικές εικόνες στις επιπολικές. Για την επανασύσταση ψηφιακών εικόνων ακολουθείται, ως γνωστόν, η αντίστροφη πορεία μέσω του αντίστροφου μετασχηματισμού. Υπολογίζονται δηλαδή στην αρχική εικόνα οι θέσεις που αντιστοιχούν στα κέντρα των εικονοψηφίδων της τελικής επιπολικής εικόνας, και σε αυτές τις θέσεις πραγματοποιείται η παρεμβολή χρώματος για την δημιουρ-

γία της επιπολικής εικόνας. Δεδομένου δε πως υπάρχει η πληροφορία για τα σφάλματα της ακτινικής και της έκκεντρης διαστροφής των φακών, στον υπολογισμό των συντεταγμένων μπορεί να συμπεριλαμβάνεται η πληροφορία αυτή. Έτσι, στην παρούσα εργασία η επανασύσταση παράγει επιπολικές εικόνες απαλλαγμένες από την επίδραση των εν λόγω σφαλμάτων. Στην Εικ. 3.2 φαίνονται οι θέσεις των κέντρων των εικονοψηφίδων των τελικών επιπολικών εικόνων όπως αυτά μετασχηματίζονται στον κάναβο της αρχικής εικόνας. Στα άκρα των εικόνων γίνεται φανερό, από τις καμπυλωμένες ακμές που σχηματίζονται, η ύπαρξη ακτινικής διαστροφής. Τέλος, η Εικ. 3.3 παρουσιάζει ενδεικτικά ομόλογες επιπολικές ευθείες στις αρχικές και τις επιπολικές εικόνες ενός ζεύγους.



Εικόνα 3.2: Προβολή των θέσεων των κέντρων των εικονοψηφίδων των επιπολικών εικόνων όπως αυτά μετασχηματίζονται στο επίπεδο της αρχικής εικόνας (έχει προβληθεί ένα σημείο ανά δέκα).

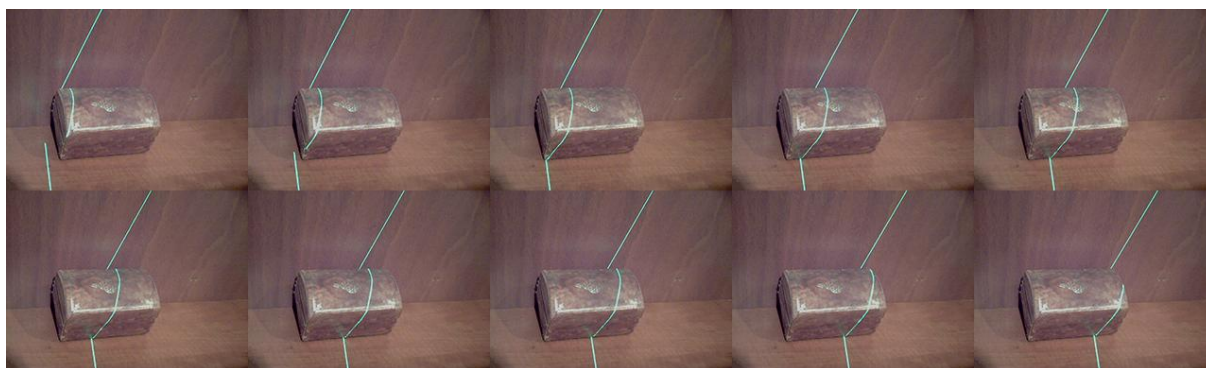


Εικόνα 3.3: Ζεύγος αρχικών (πάνω) και επιπολικών (κάτω) εικόνων. Με κόκκινο φαίνεται ζεύγος ομόλογων επιπολικών γραμμών στις δύο περιπτώσεις.

3.4. Λήψη εικόνων

Κατά την σάρωση ο χρήστης κινεί αργά το επίπεδο του laser στην επιφάνεια του αντικειμένου (με ταχύτητα $<20\text{--}30\text{ cm/min}$), ενώ οι μηχανές καταγράφουν τις διαδοχικές τομές του με αυτήν (Εικ. 3.4). Η λήψη των εικόνων γίνεται κατά κανόνα υπό κανονικές συνθήκες φωτισμού. Έτσι δίνεται η δυνατότητα να καταγράφεται και η χρωματική υφή της επιφάνειας του αντικειμένου ώστε, σε επόμενη φάση, να μπορεί να επενδυθεί το νέφος σημείων με φωτοϋφή. Βέβαια η ένταση του φωτισμού πρέπει να επιτρέπει να διακρίνεται η λωρίδα του laser στην επιφάνεια του αντικειμένου. Έτσι, για τις μη γυαλιστερές (ματ) επιφάνειες μπορεί να επιλέγεται ο κατάλληλος κάθε φορά εξωτερικός φωτισμός για την καταγραφή της υφής. Στην περίπτωση όμως γυαλιστερών επιφανειών η σάρωση πραγματοποιείται εδώ χωρίς άλλη πηγή φωτισμού πέραν του laser. Ωστόσο υπάρχουν και άλλες εναλλακτικές λύσεις, όπως πχ. η χρήση studio-flash ή έμμεσου φωτισμού.

Οι διαδικασίες που υλοποιούνται στην παρούσα διατριβή θα μπορούσαν να εφαρμοστούν σε ζεύγη εικόνων από συγχρονισμένα αρχεία βίντεο είτε σε διαδοχικές λήψεις ζευγών εικόνων από συγχρονισμένες μηχανές. Εδώ εφαρμόστηκε ο δεύτερος τρόπος συλλογής εικόνων, γιατί στην αρχική φάση σχεδιασμού της διατριβής δεν είχε εξασφαλιστεί αξιόπιστος τρόπος συγχρονισμού δύο μηχανών δικτύου. Προφανώς τα ζεύγη εικόνων πρέπει να λαμβάνονται ταυτόχρονα ή τουλάχιστον να μην υπάρχει κίνηση του συστήματος κατά την λήψη και των δύο εικόνων. Σημειώνεται ότι η συγκεκριμένη υλοποίηση απλώς συνεπάγεται κάποια αύξηση του χρόνου που απαιτείται για την συλλογή των εικόνων.

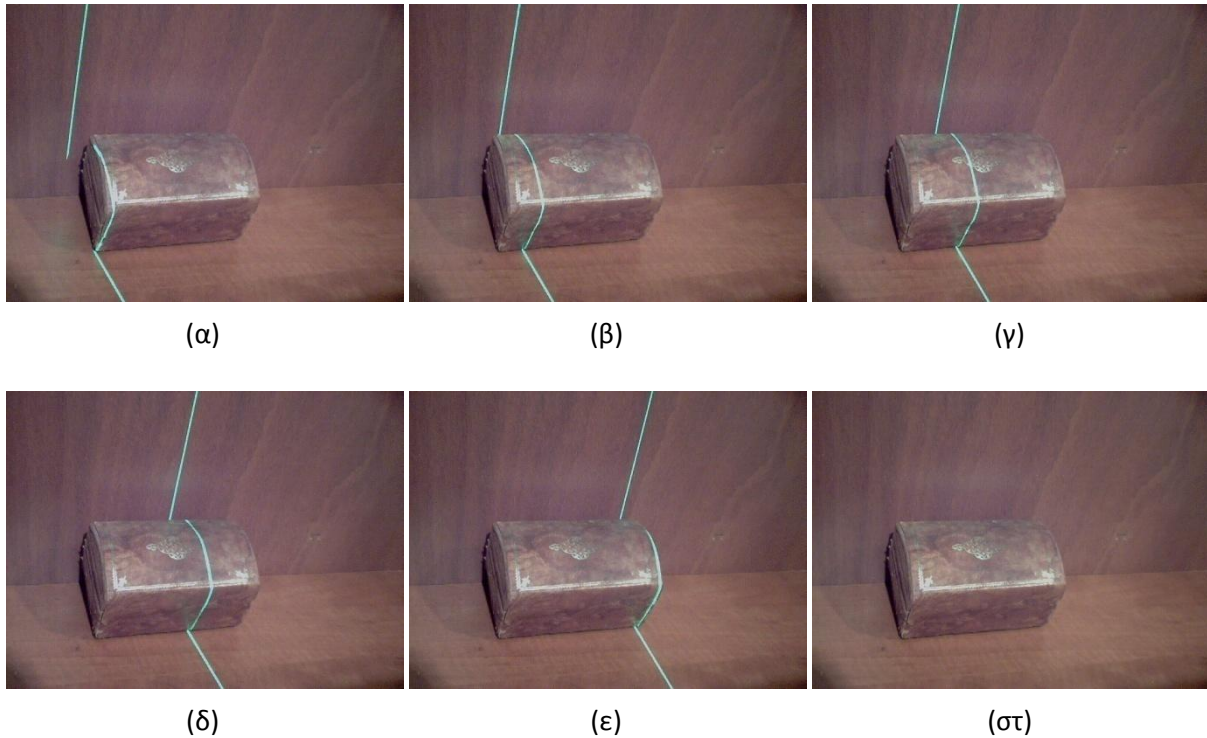


Εικόνα 3.4: Δέκα από τις εικόνες της αριστερής μηχανής για την σάρωση ενός δερμάτινου κουτιού.

3.5. Αφαίρεση υποβάθρου

Έχει αναφερθεί ότι οι εικόνες για την σάρωση λαμβάνονται κατά κανόνα με κανονικές συνθήκες φωτισμού. Στις εικόνες όμως που τελικά θα χρησιμοποιηθούν σκόπιμο είναι, για προφανείς λόγους απλοποίησης της αυτόματης διαδικασίας, να περιέχεται μόνο η τομή του laser με το αντικείμενο. Ως εκ τούτου θα πρέπει να αφαιρεθεί το υπόβαθρο (δηλαδή η εικόνα δίχως την γραμμή laser) από όλες τις εικόνες. Έτσι, της επιπολικής επανασύστασης προηγείται η διαδικασία αφαίρεσης του υποβάθρου.

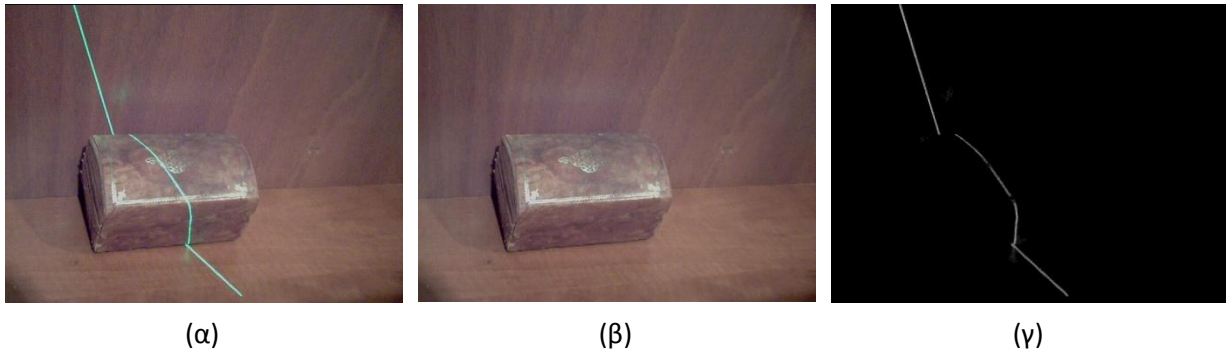
Το υποβάθρο είναι δυνατόν να ανακτηθεί ως ο μέσος όρος των τιμών χρώματος g σε μικρό αριθμό αρχικών εικόνων, υπό την προϋπόθεση πως η τιμή κάθε εικονοψηφίδας βρίσκεται εντός των ορίων $g_m \pm k\sigma$, όπου g_m ο μέσος όρος και σ η τυπική απόκλιση των τιμών χρώματος των αρχικών εικόνων στην αντίστοιχη θέση (συνήθως τίθεται $k = 1$). Η διαδικασία αυτή περιγράφεται αναλυτικότερα από τον Γραμματικόπουλο (2007).



Εικόνα 3.5: (α) – (ε) Πέντε εικόνες από την αριστερή μηχανή, από τις οποίες δημιουργείται με χρήση του χρονικού διαμέσου η εικόνα (στ) του υποβάθρου.

Για τις ανάγκες όμως της παρούσας διατριβής ήταν δυνατόν να επιλεγεί ο πιο απλός αλγόριθμος του χρονικού διαμέσου (Εικ. 3.5). Κάθε εικονοψηφίδα της τελικής εικόνας του υποβάθρου προκύπτει ως η μεσαία τιμή των τόνων των αρχικών εικόνων. Αυτή η προσέγγιση ήταν δυνατόν να εφαρμοστεί εδώ γιατί η σάρωση γίνεται συνήθως σε ελεγχόμενες συνθήκες φωτισμού, ενώ επίσης διαρκεί λίγο χρόνο, οπότε οι συνθήκες φωτισμού αναμένεται πως, πρακτικά, δεν θα έχουν μεταβληθεί κατά την διάρκεια της σάρωσης. Έτσι, είναι πλέον δυνατόν να απομονωθεί σε κάθε εικόνα, με απλή αφαίρεση του υποβάθρου, η τομή του laser με την επιφάνεια του αντικειμένου (Εικ. 3.6). Φυσικά, ένας απλούστερος τρόπος για να αποκτηθεί εικόνα υποβάθρου θα ήταν να ληφθεί μια επιπλέον εικόνα του αντικειμένου χωρίς την ύπαρξη του φωτεινού επιπέδου laser (βλ. πχ. Tsioukas et al., 2004, Koidis et al., 2004).

Στην συνέχεια, στα ζεύγη εικόνων στα οποία απεικονίζεται μόνο η λωρίδα του laser εκτελείται επιτολική επανασύσταση, όπως αυτό περιγράφηκε προηγουμένως (Εικ. 3.7).



Εικόνα 3.6: α) Εικόνα στην οποία έχει απεικονιστεί το laser και το υπόβαθρο. β) Η εικόνα του υποβάθρου. γ) Το αποτέλεσμα της αφαίρεσης του (β) από το (α). Από την αφαίρεση έχει προφανώς απομείνει μόνο η τομή του επιπέδου laser με το αντικείμενο.



Εικόνα 3.7: Επιπολικό ζεύγος της τομής του επιπέδου του laser με την επιφάνεια του αντικειμένου.

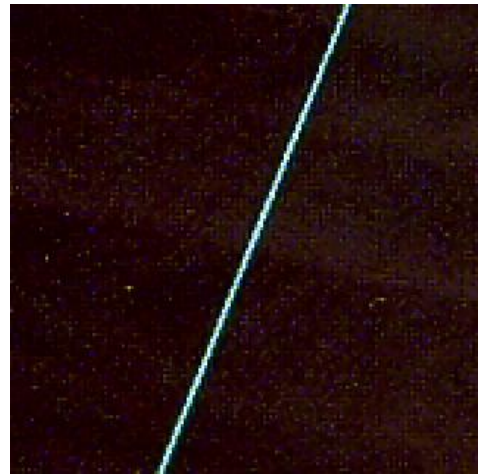
3.6. Μείωση θορύβου

Οι εικόνες που προκύπτουν από την αφαίρεση έχουν βέβαια και σημαντικό θόρυβο. Κύριοι λόγοι είναι η ποιότητα του laser αλλά και η ποιότητα των μηχανών λήψης (το πρόβλημα αφορά ιδίως τις μηχανές δικτύου). Τα πολύ φθηνά laser έχουν την τάση να δημιουργούν κάπως ασαφή όρια, όπως αυτό φαίνεται στην Εικ. 3.8α. Η παρουσία του θορύβου αναμένεται βέβαια ότι θα υποβαθμίζει τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν από τις εικόνες αυτές, επομένως πρέπει, κατά το δυνατόν, να μειωθεί. Για την μείωση του θορύβου εφαρμόστηκαν εδώ δύο φίλτρα εξομάλυνσης, αρχικά φίλτρο μεσαίας τιμής και κατόπιν φίλτρο Gauss (Εικ. 3.9).

Κατά την διάρκεια εκπόνησης της διατριβής χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές συσκευές για την παραγωγή του επιπέδου laser. Η πρώτη ήταν μια φθηνή συσκευή, της οποίας η συμβολή στον θόρυβο των εικόνων ήταν ιδιαίτερα έντονη, ενώ αργότερα χρησιμοποιήθηκε μια συσκευή ανώτερης ποιότητας, η οποία προξενούσε λιγότερο θόρυβο.



(α)



(β)

Εικόνα 3.8: Μεγέθυνση στην περιοχή του laser κατώτερης ποιότητας (α) και καλής ποιότητας (β). Η μεγέθυνση έχει γίνει ώστε το μέγεθος της εικονοψηφίδας στο αντικείμενο να είναι περίπου ίσο στις δύο εικόνες. Το laser καλής ποιότητας έχει εμφανώς σαφέστερα όρια. Εκτός από τον θόρυβο του laser, φαίνεται και η παρουσία θορύβου προερχόμενου από τις μηχανές.

Προκειμένου να αποφασιστεί η κατάλληλη διάσταση των φίλτρων εξομάλυνσης πραγματοποιήθηκαν αρκετοί έλεγχοι, από τους οποίους παρουσιάζεται εδώ ένα παράδειγμα. Χρησιμοποιήθηκαν απεικονίσεις των τομών μιας επίπεδης επιφάνειας με το επίπεδο του laser (από την πρώτη συσκευή) σε διεύθυνση περίπου κάθετη στις σειρές της εικόνας. Στα ευθύγραμμα αυτά τμήματα στην εικόνα εφαρμόστηκαν τα δύο προαναφερθέντα φίλτρα, με αλλαγή κάθε φορά της διάστασής τους όπως και της τυπικής απόκλισης σ του φίλτρου Gauss. Κάθε ευθύγραμμο τμήμα ελέγχθηκε με αυτόματη εξαγωγή σημείων σε κάθε σειρά της εικόνας (διαδικασία που αναλύεται στο επόμενο Κεφάλαιο) και προσαρμογή εξίσωσης ευθείας στα σημεία. Αυτό έγινε για 8 συνολικά εικόνες με διαφορετική θέση των ευθειών. Ο Πίνακας 3.1 παρουσιάζει την τυπική απόκλιση της προσαρμογής ευθείας (ο χαρακτηρισμός πχ. [9 5] για το μέγεθος του παραθύρου του φίλτρου σημαίνει πως αυτό αποτελείται από 9 γραμμές και 5 στήλες.)

Τελικά, για το υποδεέστερης ποιότητας laser (κόκκινο) κρίθηκε ότι οι τελικές σαρώσεις έπρεπε να γίνουν με εφαρμογή στις εικόνες φίλτρου διαμέσου διάστασης [11 5] και στην συνέχεια φίλτρου εξομάλυνσης Gauss διάστασης [9 5] με $\sigma = 1.5$. Αντίστοιχα, για το laser καλής ποιότητας (πράσινο) εφαρμόστηκε μόνο φίλτρο Gauss διάστασης [3 3] με $\sigma = 1$. Σημειώνεται πάντως πως η αναφορά στις διαδικασίες εξομάλυνσης για την περίπτωση του κόκκινου laser υπάρχει εδώ απλώς για λόγους πληρότητας, αφού αφορά απλώς την αρχική φάση διερεύνησης και πειραματισμού της διατριβής. Τελικά, όλες οι 3D ανακατασκευές που παρουσιάζονται και αξιολογούνται στα επόμενα κεφάλαια της διατριβής έχουν γίνει με το πράσινο laser.

Πίνακας 3.1. Αποτελέσματα της ακρίβειας (σ) της παρεμβολής ευθειών

Εικόνα 1 (σ: σε pixel)					
		Μέγεθος παραθύρου Gauss			σ Gauss
		[5 5]	[7 5]	[9 5]	
Μέγεθος παραθύρου διαμέσου	[3 3]	0.16	0.16	0.16	1
	[5 5]	0.22	0.22	0.22	
	[9 5]	0.19		0.19	
	[9 5]			0.19	1.5
	[11 5]			0.18	

Εικόνα 2 (σ: σε pixel)					
		Μέγεθος παραθύρου Gauss			σ Gauss
		[5 5]	[7 5]	[9 5]	
Μέγεθος παραθύρου διαμέσου	[3 3]	0.16	0.16	0.16	1
	[5 5]	0.22	0.22	0.22	
	[9 5]	0.19		0.19	
	[9 5]			0.19	1.5
	[11 5]			0.18	

Εικόνα 3 (σ: σε pixel)					
		Μέγεθος παραθύρου Gauss			σ Gauss
		[5 5]	[7 5]	[9 5]	
Μέγεθος παραθύρου διαμέσου	[3 3]	0.16	0.16	0.16	1
	[5 5]	0.21	0.21	0.21	
	[9 5]	0.18		0.18	
	[9 5]			0.18	1.5
	[11 5]			0.17	

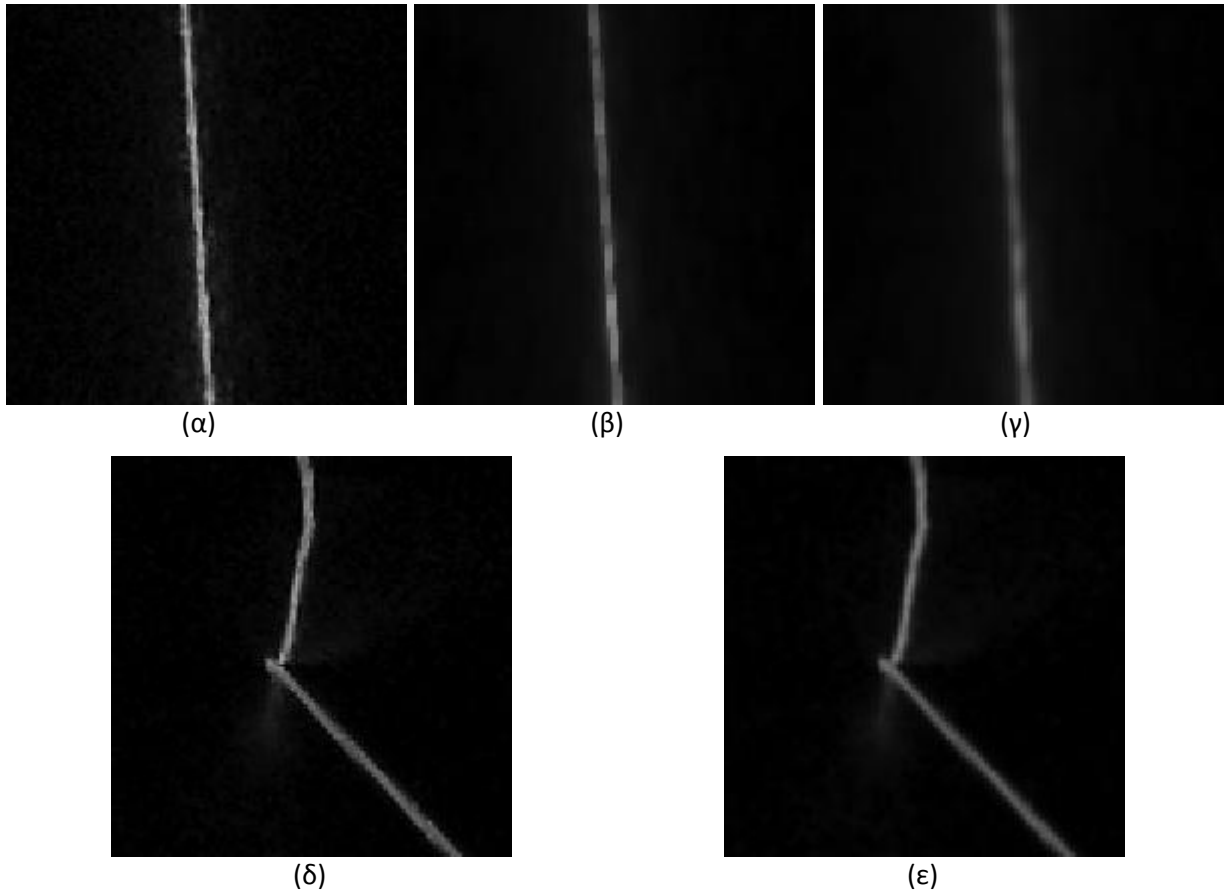
Εικόνα 4 (σ: σε pixel)					
		Μέγεθος παραθύρου Gauss			σ Gauss
		[5 5]	[7 5]	[9 5]	
Μέγεθος παραθύρου διαμέσου	[3 3]	0.15	0.15	0.15	1
	[5 5]	0.20	0.20	0.20	
	[9 5]	0.17		0.17	
	[9 5]			0.18	1.5
	[11 5]			0.17	

Εικόνα 5 (σ: σε pixel)					
		Μέγεθος παραθύρου Gauss			σ Gauss
		[5 5]	[7 5]	[9 5]	
Μέγεθος παραθύρου διαμέσου	[3 3]	0.15	0.15	0.15	1
	[5 5]	0.17	0.17	0.17	
	[9 5]	0.15		0.15	
	[9 5]			0.15	1.5
	[11 5]			0.14	

Εικόνα 6 (σ: σε pixel)					
		Μέγεθος παραθύρου Gauss			σ Gauss
		[5 5]	[7 5]	[9 5]	
Μέγεθος παραθύρου διαμέσου	[3 3]	0.18	0.18	0.18	1
	[5 5]	0.17	0.17	0.17	
	[9 5]	0.14		0.14	
	[9 5]			0.14	1.5
	[11 5]			0.13	

Εικόνα 7 (σ: σε pixel)					
		Μέγεθος παραθύρου Gauss			σ Gauss
		[5 5]	[7 5]	[9 5]	
Μέγεθος παραθύρου διαμέσου	[3 3]	0.25	0.25	0.25	1
	[5 5]	0.22	0.22	0.22	
	[9 5]	0.17		0.17	
	[9 5]			0.16	1.5
	[11 5]			0.15	

Εικόνα 8 (σ: σε pixel)					
		Μέγεθος παραθύρου Gauss			σ Gauss
		[5 5]	[7 5]	[9 5]	
Μέγεθος παραθύρου διαμέσου	[3 3]	0.35	0.35	0.35	1
	[5 5]	0.30	0.30	0.30	
	[9 5]	0.25		0.25	
	[9 5]			0.23	1.5
	[11 5]			0.21	



Εικόνα 3.9: Πάνω: α) Λεπτομέρεια αρχικής εικόνας με το laser κατώτερης ποιότητας, β) εφαρμογή φίλτρου διαμέσου, γ) εφαρμογή φίλτρου Gauss. Κάτω: δ) λεπτομέρεια από την Εικ. 3.7 (laser καλής ποιότητας), ε) εφαρμογή φίλτρου Gauss.

Με εφαρμογή των προηγούμενων διαδικασιών σε όλες τις εικόνες προκύπτουν επιπολικές εικόνες με μειωμένο θόρυβο, οι οποίες ουσιαστικά περιέχουν μόνο την τομή του επιπέδου του laser με την επιφάνεια του αντικειμένου, αλλά έχουν βέβαια και ιδιότητες που διευκολύνουν τις μετέπειτα εργασίες. Έτσι, το μονοδιάστατο πρόβλημα της ανίχνευσης ομολογιών απλοποιείται εδώ σημαντικά αφού οι επιπολικές ευθείες ταυτίζονται με τις σειρές της εικόνας, οπότε δεν χρειάζεται για κάθε ανίχνευση ομόλογου σημείου να πραγματοποιείται ξεχωριστή πράξη παρεμβολής τόνων στην διεύθυνση των επιπολικών γραμμών. Στο επόμενο Κεφάλαιο περιγράφεται ακριβώς η διαδικασία αυτή της εύρεσης των ομολογιών. Επιπλέον όμως οι επιπολικές εικόνες αναφέρονται στην κανονική περίπτωση του στερεοζεύγους, οπότε και η θέση των ομολόγων σημείων στον 3D χώρο μπορεί στην συνέχεια να υπολογίζεται από τις απλές σχέσεις της παράλλαξης.

ΕΞΑΓΩΓΗ ΣΗΜΕΙΩΝ

4

```
% Get Image Coordinates and Pair Them
[XX1, XX2] = get_laser_coords_filter(laserbw1, laserbw2, prinx1, priny1, prinx2, priny2);
case 2 % Local Maximum Parabola
% Get Image Coordinates and Pair Them
[XX1, XX2] = get_laser_coords_localmaxparabola(laser1, laser2, prinx1, priny1, prinx2, priny2);
case 3 % Local Maximum Parabola Perpendicular
% Get Image Coordinates and Pair Them
[XX1, XX2] = get_laser_coords_localmaxparabolaperp(laser1, laser2, prinx1, priny1, prinx2, priny2);
case 4 % Local Maximum Gauss
% Get Image Coordinates and Pair Them
[XX1, XX2] = get_laser_coords_localmaxgauss(laser1, laser2, prinx1, priny1, prinx2, priny2);
case 5 % Local Maximum Gauss Perpendicular
% Get Image Coordinates and Pair Them
[XX1, XX2] = get_laser_coords_localmaxgaussperp(laser1, laser2, prinx1, priny1, prinx2, priny2);
case 6 % Linear Least Square Matching
% Get Image Coordinates and Pair Them
[XX1, XX2] = get_laser_coords_LSM(laser1, laser2, prinx1, priny1, prinx2, priny2);
case 7 % Center Weight
% Get Image Coordinates and Pair Them
[XX1, XX2] = get_laser_coords_weight(laser1, laser2, prinx1, priny1, prinx2, priny2);
case 8 % By Hand
% Get Image Coordinates and Pair Them
[XX1, XX2] = get_laser_coords_hand(laser1, laser2, prinx1, priny1, prinx2, priny2);
end

[XYZ, stats{ima}] = intersection([0 0 cend], [0 0 cend], Rb, exterior1(1:3), exterior2(1:3));
big = [big ; XYZ]; %#ok<AGROW>
end
%dlmwrite('toixos.txt', XYZ);

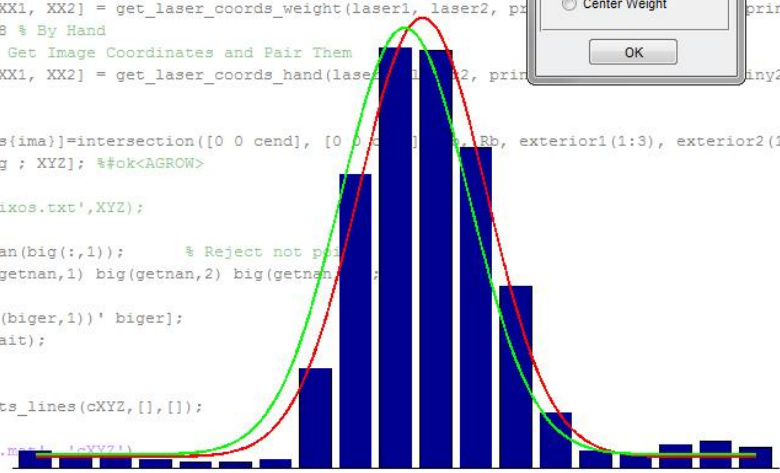
getnan = ~isnan(big(:,1)); % Reject not pairs
biger = [big(getnan,1) big(getnan,2) big(getnan,3)];

cXYZ = [(1:size(biger,1))' biger];
delete (handwait);
toc

make_dxf_points_lines(cXYZ, [], []);

save ('points.m', 'cXYZ');

warning(s);
```



4. Εξαγωγή σημείων

4.1. Εισαγωγικά

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί η μέθοδος με την οποία εντοπίζεται το μέγιστο της έντασης της γραμμής laser στην εικόνα και, κατ' επέκταση, αποκαθίστανται οι ομολογίες σημείων για την σάρωση. Στην διαδικασία αυτή αξιοποιείται η επιπολική γεωμετρία, δηλαδή τα ομόλογα σημεία δεσμεύονται επί των επιπολικών γραμμών. Η απεικόνιση του laser στις εικόνες είναι μία φωτεινή λωρίδα. Εφόσον ο χρήστης του σαρωτή κινεί το επίπεδο laser ώστε να παραμένει χονδρικά κάθετο στην διεύθυνση της βάσης, η λωρίδα αυτή τέμνει επίσης περίπου κάθετα (δηλαδή υπό ευνοϊκή γωνία τομής) και τις επιπολικές γραμμές. Η τομή της λωρίδας του laser με τις επιπολικές γραμμές ορίζει ομόλογα εικονοσημεία. Στην ουσία, έτσι, το πρόβλημα είναι κατ' αρχήν μονοδιάστατο, και εν προκειμένω η εύρεση ομολογιών ισοδυναμεί απλώς με εντοπισμό των μεγίστων (peak) της έντασης των απεικονιζόμενων λωρίδων laser κατά μήκος των επιπολικών γραμμών. Το παρόν κεφάλαιο πραγματεύεται την εύρεση αυτών των σημείων.

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο όπου περιγράφηκε η διαδικασία δημιουργίας επιπολικών εικόνων, οι εικόνες αυτές έχουν τις ιδιότητες της “κανονικής περίπτωσης του στερεοζεύγους”. Συνεπώς ισχύουν οι γνωστές απλές εξισώσεις της παράλλαξης και της εμπροσθοτομίας που χαρακτηρίζουν αυτήν την γεωμετρία (Πατιάς, 1991):

$$\begin{aligned} X &= \frac{Bx_1}{p} = B - \frac{Bx_2}{p} \\ Y &= \frac{By_1}{p} = \frac{By_2}{p} \\ Z &= -\frac{Bc}{p} \end{aligned} \tag{4.1}$$

όπου:

X, Y, Z	οι συντεταγμένες χώρου του σημείου στο σύστημα της αριστερής εικόνας
x_1, x_2, y_1, y_2	οι εικονοσυντεταγμένες του σημείου στις δύο εικόνες
$p = x_1 - x_2$	η παράλλαξη του σημείου
B	το μήκος της βάσης του στερεοζεύγους
c	η κοινή σταθερά των δύο μηχανών.

Στην ενότητα 3.4 αναφέρθηκε το πώς απομονώνεται η λωρίδα laser από το υπόβαθρο. Οι εικόνες που προκύπτουν είναι επιπολικές με μια φωτεινή λωρίδα σε σκούρο περιβάλλον. Ζητούμενο λοιπόν είναι να εντοπιστεί το σημείο με την υψηλότερη – και βέβαια πάνω από ένα κατώφλι – τιμή τόνων κατά μήκος των σειρών της εικόνας (peak detection).

Στην βιβλιογραφία έχουν αναφερθεί και συγκριθεί διαφορετικές μέθοδοι που προσεγγίζουν το πρόβλημα αυτό (Fisher & Naidu, 1996, Forest et al., 2004), χωρίς πάντοτε να καταλήγουν

σε ίδια συμπεράσματα (Usamentiaga et al., 2012). Γενικά, πάντως, είναι αποδεκτό ότι, θεωρητικά, η ένταση κάθετα στο ίχνος του laser εμφανίζει κατανομή καμπύλης Gauss (Davis et al., 2005, McKeon & Flynn, 2008). Σε αρκετές υλοποιήσεις, έτσι, το κέντρο της γραμμής laser εντοπίζεται με υποψηφιακή ακρίβεια στο μέγιστο της καμπύλης Gauss που προσαρμόζεται βέλτιστα στην κατανομή της έντασης κάθετα στο ίχνος του laser (Isgrò et al., 2005, Usamentiaga et al., 2012) ή ως το σημείο “διέλευσης από το μηδέν” (zero-crossing) της πρώτης παραγώγου της καμπύλης Gauss, σε συνδυασμό με εφαρμογή φίλτρων για την άμβλυνση του θορύβου (Blais & Rioux, 1986, Forest et al., 2004, Geronès, 2007).

Δεδομένου ότι η ακρίβεια εντοπισμού των μεγίστων είναι κατ’ αρχήν ο κρισιμότερος παράγων της μεθόδου, αφού αντανakλάται άμεσα στην 3D ανακατασκευή της επιφάνειας, κρίθηκε σκόπιμο για τους σκοπούς της διατριβής να ελεγχθούν διάφοροι σχετικοί αλγόριθμοι. Ειδικότερα, στις επόμενες ενότητες εξετάζονται και αξιολογούνται οι εξής αλγόριθμοι:

- Μέγιστη τιμή
- Χρήση κατωφλίου
- Μέγιστο παραβολής
- Μέγιστο παραβολής κάθετα στη λωρίδα laser
- Μέγιστο καμπύλης Gauss
- Μέγιστο καμπύλης Gauss κάθετα στη λωρίδα laser
- Κέντρο βάρους
- Χρήση φίλτρων πεπερασμένης ωστικής απόκρισης (finite impulse response, FIR)
- Μονοδιάστατη ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση
- Άμεση μέτρηση σημείων (για έλεγχο και σύγκριση).

Προηγουμένως, όμως, είναι σκόπιμο να θιγούν εδώ ορισμένα γενικότερα σχετικά θέματα. Κατ’ αρχάς, πρέπει να γίνει μία αρχική εκτίμηση για κάθε θέση μεγίστου. Έτσι, οι περιοχές κατά μήκος της επιπολικής γραμμής με τιμές φωτεινότητας που υπερβαίνουν ένα κατώφλι θεωρείται ότι περιγράφουν μία κορυφή. Όμως πρέπει και το πλάτος των περιοχών αυτών να βρίσκεται εντός συγκεκριμένων ορίων. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να υπερβαίνει τα 2~3 pixel για να αποφεύγεται ο τοπικός θόρυβος. Από την άλλη μεριά, για να αποφεύγονται περιοχές όπου έχει διαχυθεί ο φωτισμός από το laser λόγω αντανάκλασης ή όπου το επίπεδο του laser τείνει εφάπτόμενο σε κυρτές επιφάνειες, το εύρος των περιοχών αρχικής εκτίμησης δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 10~15 pixel. Οι τιμές αυτές έχουν προκύψει εμπειρικά και ικανοποιούν τις περιπτώσεις που αντιμετωπίστηκαν, ενδέχεται όμως για κάποια αντικείμενα (πχ. γυαλιστερά) να χρειαστούν επαναπροσδιορισμό. Ας σημειωθεί επίσης ότι η ανίχνευση μεγίστων στις επιπολικές γραμμές μπορεί να αποδώσει περισσότερες λύσεις στην μία ή και τις δύο εικόνες. Το ζήτημα της ορθής επιλογής τους αντιμετωπίζεται στις ενότητες 4.14 και 5.5.

Ένα δεύτερο θέμα είναι ότι η διαδικασία εντοπισμού μεγίστου επί της επιπολικής γραμμής συνιστά εγγενώς μια μονοδιάστατη διαδικασία, όπου κάθε σειρά της εικόνας αντιμετωπίζε-

ται ανεξάρτητα προκειμένου να υπολογιστεί η κορυφή της έντασης που αντιστοιχεί σε αυτή την σειρά. Συνεπώς, οι προαναφερθείσες μέθοδοι χειρίζονται κάθε σειρά της εικόνας ως ανεξάρτητο σήμα (Forest, 2004). Υπό ιδεατές συνθήκες, οι μέθοδοι αυτές παρέχουν μια διαδοχή θέσεων στην εικόνα που συγκροτούν συνεχή λωρίδα laser. Αλλά υπό πραγματικές, και επομένως μη πλήρως ελεγχόμενες, συνθήκες πρακτικής εφαρμογής, η σειρά θέσεων στις οποίες ανιχνεύεται η λωρίδα laser ενδέχεται λόγω θορύβου να περιγράφει μια ασυνεχή λωρίδα, ενώ μπορεί να εμφανίζονται και κενά σε περιοχές όπου δεν ανιχνεύτηκε λωρίδα laser. Κατά συνέπεια, όπως παρατηρούν οι Usamentiaga et al. (2012), απλός εντοπισμός του μεγίστου δεν επαρκεί πάντοτε για την ακριβή εύρεση των ζητούμενων σημείων. Η αποκατάσταση της ομαλής συνέχειας των λωρίδων μπορεί να αντιμετωπίζεται με διαδικασίες “συνένωσης μεγίστων” (peak linking), βάσει προσεγγίσεων που στις εφαρμογές της όρασης υπολογιστών εντάσσονται στο γενικό πρόβλημα της “συνένωσης ακμών” (edge linking), με την αξιοποίηση ραδιομετρικής πληροφορίας από την γειτονιά των εξαχθέντων σημείων. Ύστερα από μια τέτοια “πλήρωση κενών” (hole filling), η λωρίδα μπορεί να προσεγγιστεί και με παρεμβολή spline (Isgró et al., 2005). Στην προκειμένη περίπτωση δεν ενδιαφέρει η αποκατάσταση της συνέχειας της λωρίδας, αφού τυχόν ασυνέχειές της ενδέχεται να οφείλονται και σε αποκρύψεις λόγω αναγλύφου. Ενδιαφέρει όμως να αντιμετωπιστεί η διαταραχή της ομαλής συνέχειάς της λόγω θορύβου. Στην ενότητα 4.13 εξηγείται πώς αντιμετωπίστηκε αυτό το ζήτημα, με μια προσέγγιση που γεωμετρικά μεν παραμένει μονοδιάστατη αλλά ραδιομετρικά αξιοποιεί πληροφορία και από το περιβάλλον του σημείου.

Αξίζει πάντως να σημειωθεί ότι όλες οι μέθοδοι που αναφέρθηκαν, όπως επίσης και εκείνες που εξετάζονται σε αυτή την διατριβή, απαντούν στο ερώτημα “πού βρίσκεται η λωρίδα του laser στην εικόνα;” Οι Curless & Levoy (1995) έχουν προτείνει μία διαφορετική προσέγγιση σε περίπτωση που η καταγραφή της πληροφορίας έχει γίνει σε βίντεο, υπάρχει δηλαδή σταθερός και γρήγορος ρυθμός συλλογής εικόνων. Εδώ θεωρείται ότι η λωρίδα του laser κινείται στην εικόνα με σταθερό ρυθμό (ιδίως για μικρά χρονικά διαστήματα μεταξύ λίγων καρέ του βίντεο) και διεύθυνση, και ότι διέρχεται από όλα τα pixel της εικόνας (ή του τμήματός της που ενδιαφέρει) κάποια συγκεκριμένη χρονική στιγμή (καρέ του βίντεο). Απαντάται λοιπόν με ακρίβεια δεκαδικού το ερώτημα σε ποια χρονική στιγμή (σε ποια ενδιάμεση στιγμή μεταξύ διαδοχικών καρέ του βίντεο) διέρχεται το επίπεδο του laser από κάθε αέριο pixel. Παράλληλα δομείται και σχέση μεταξύ της θέσης του επιπέδου laser και του χρόνου. Πρόκειται, δηλαδή, για μία χρονική ανάλυση του προβλήματος. Οι Davis et al. (2005) προτείνουν συνδυασμό της χωρικής και της χρονικής ανάλυσης. Η προσέγγιση αυτή δεν ήταν δυνατόν να αξιοποιηθεί στην παρούσα διατριβή λόγω του τρόπου καταγραφής της πληροφορίας (συλλογή χωρίς σταθερό ρυθμό).

4.2. Μέγιστη τιμή

Ως ζητούμενο σημείο θεωρείται εκείνο με την μέγιστη τιμή φωτεινότητας κατά μήκος της επιπολικής γραμμής. Η απλή αυτή μέθοδος δεν προσφέρει υποψηφιακή ακρίβεια αλλά εί-

ναι βέβαια η ταχύτερη όλων. Βασίζεται στην παραδοχή ότι οι εικόνες είναι πλήρως απαλλαγμένες από θόρυβο, ενώ παράλληλα θεωρείται ότι κάθε εικονοψηφίδα έχει τιμή ανεξάρτητη των γειτονικών της.

4.3. Χρήση κατωφλίου

Η τεχνική αυτή περιγράφεται από τον Jordan (1981) και δέχεται ότι η κορυφή ενός σήματος βρίσκεται στο μέσον δύο σημείων x_1 και x_2 , όπου x_1, x_2 οι θέσεις διέλευσης του σήματος από μία προκαθορισμένη τιμή. Εδώ η μέθοδος εφαρμόστηκε ως εξής. Αρχικά τίθεται τιμή κατωφλίου στην επιτολική εικόνα, και στο αποτέλεσμα εφαρμόζεται φίλτρο ανίχνευσης ακμών Laplace. Με τον τρόπο αυτό προκύπτουν τα όρια της απεικόνισης του laser όπου η ένταση ξεπερνά το κατώφλι, οπότε μπορεί να θεωρηθεί πως σε κάθε γραμμή η μέγιστη τιμή έντασης βρίσκεται στο μέσον της περιοχής που καταλαμβάνει η κατωφλιωμένη ένταση του laser. Η μέθοδος αυτή προσφέρει υποψηφιακή ακρίβεια στο επίπεδο της μισής εικονοψηφίδας. Ακόμα, η ακρίβειά της εξαρτάται άμεσα από την επιλογή της τιμής κατωφλίου, ενώ επίσης είναι ευαίσθητη στον θόρυβο.

4.4. Μέγιστο παραβολής

Εδώ η παραδοχή είναι ότι η κατανομή των τιμών g του τόνου κατά μήκος κάθε γραμμής της εικόνας (επιτολικές γραμμές) ακολουθεί συνάρτηση παραβολής. Βάσει αυτού, μπορεί να εξαχθεί η θέση της μέγιστης τιμής της απεικόνισης του laser ως το μέγιστο της συνάρτησης:

$$g = a \cdot x^2 + b \cdot x + c \quad (4.2)$$

Η θέση του μεγίστου είναι:

$$x_{max} = \frac{-b}{2a} \quad (4.3)$$

Για παρεμβολή με την μέθοδο αυτή συνήθως δεν επιλέγονται πολλές τιμές εκατέρωθεν μίας αρχικής εκτίμησης, αφού αν πχ. συμβεί να συμμετέχουν στα άκρα αρκετές χαμηλές τιμές (σκούροι τόνοι) το φαινόμενο δεν προσομοιάζει προφανώς με παραβολή. Η προσαρμογή παραβολής έχει καταγραφεί στην βιβλιογραφία και δοκιμαστεί για την ακρίβειά της (Fisher & Naidu, 1996), ενώ έχει χρησιμοποιηθεί και για σύγκριση με άλλες μεθόδους (Blais & Rioux, 1986, Forest et al., 2004).

4.5. Μέγιστο παραβολής κάθετα στην λωρίδα laser

Η διαφορά της μεθόδου αυτής με την προηγούμενη είναι πως η καμπύλη παραβολής πα-

ρεμβάλλεται όχι κατά μήκος της επιτολικής γραμμής αλλά κάθετα στην διεύθυνση της λωρίδας του laser. Έτσι, αρχικά πρέπει να εκτιμηθεί, βάσει των κλίσεων της εικόνας, η διεύθυνση της λωρίδας του laser στην γειτονιά της πρώτης εκτίμησης του μεγίστου (ως πρώτη εκτίμηση λαμβάνεται η θέση του αριθμητικού μεγίστου στην επιτολική γραμμή). Έπειτα γίνεται παρεμβολή τόνων στην κάθετη διεύθυνση στην θέση της πρώτης εκτίμησης, στους οποίους προσαρμόζεται η παραβολή. Πέραν όσων αναφέρθηκαν προηγουμένως σχετικά, θα πρέπει να σημειωθεί ότι το σημείο που εξάγεται από την διαδικασία αυτή δεν θα ανήκει απαραίτητως στην επιτολική γραμμή. Για τον λόγο αυτό ως ζητούμενο σημείο θεωρείται τελικά η προβολή του μεγίστου στην εξεταζόμενη σειρά της εικόνας.

4.6. Μέγιστο καμπύλης Gauss

Η μέθοδος είναι ανάλογη με εκείνη της ενότητας 4.4, αλλά στους τόνους g κατά μήκος της επιτολικής γραμμής παρεμβάλλεται καμπύλη Gauss:

$$g = a \cdot e^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}} + d \quad (4.4)$$

Εδώ, εκτός των b και c , πρέπει να εκτιμηθούν και οι παράμετροι a (κλίμακα) και d (μετάθεση). Την θέση του μεγίστου δίνει η τιμή της παραμέτρου b . Σε αντίθεση βέβαια με την περίπτωση της παραβολής, εδώ δεν τίθεται ζήτημα περιορισμού του εύρους της περιοχής παρεμβολής αφού η μορφή της καμπύλης μπορεί ακριβώς να ενσωματώνει τις μικρές τιμές έντασης στα άκρα της περιοχής. Στην βιβλιογραφία η μέθοδος συνήθως μελετάται και συγκρίνεται με την προσαρμογή παραβολής.

4.7. Μέγιστο καμπύλης Gauss κάθετα στην λωρίδα laser

Η προσέγγιση αυτή είναι ανάλογη με εκείνη της ενότητας 4.5 για καμπύλη Gauss.

4.8. Κέντρο βάρους

Η προσέγγιση αυτή αναφέρεται στην βιβλιογραφία ως μέθοδος του κέντρου βάρους (Fisher & Naidu, 1996) ή του κεντροειδούς (Alexander & Ng, 1991) είτε και ως μέθοδος ροπής (Χατζηαυγουστίδης, 2002). Η θέση του μεγίστου προκύπτει από τον βεβαρημένο μέσο όρο των συντεταγμένων x των τόνων κατά μήκος της επιτολικής γραμμής, με βάρος κάθε συντεταγμένης την τιμή g του τόνου στην αντίστοιχη θέση:

$$x_{max} = \frac{\sum x_i g_i}{\sum g_i} \quad (4.5)$$

4.9. Χρήση φίλτρων πεπερασμένης ωστικής απόκρισης

Τα φίλτρα πεπερασμένης ωστικής απόκρισης (*finite impulse response* – FIR) έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή μεγίστου (Blais & Rioux, 1986, Forest et al., 2004). Οι αλγόριθμοι βασίζονται στην παραγωγή του σήματος και την απαλοιφή του θορύβου υψηλής συχνότητας με φίλτρα FIR, με τελικό στόχο να βρεθεί το σημείο διέλευσης από το μηδέν (zero-crossing) της πρώτης παραγώγου της συνάρτησης των τόνων της επιτολικής γραμμής. Έτσι, αρχικά υπολογίζεται η (εξομαλυμένη) πρώτη παράγωγος στην διεύθυνση της επιτολικής γραμμής με συνέλιξη με φίλτρα του τύπου:

$$[\dots 1 \quad 1 \quad 0 \quad -1 \quad -1 \dots] \quad (4.6)$$

Ως “τάξη” των φίλτρων αναφέρεται η διάστασή τους μείον 1, και βέβαια όσο μεγαλώνει η τάξη τόσο εντονότερη είναι η εξομάλυνση. Τελικά, υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή η θέση στην οποία το αποτέλεσμα της συνέλιξης της επιτολικής γραμμής με το φίλτρο διέρχεται από το μηδέν.

Για τις ανάγκες της διατριβής έγιναν δύο εφαρμογές με την χρήση φίλτρων FIR κατά τους Blais & Rioux (1986) με φίλτρα 2^{ης} και 4^{ης} τάξης.

4.10. Μονοδιάστατη ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση

Η προσέγγιση αυτή διακρίνεται από τις προηγούμενες κατά το ότι ζητούμενο εδώ δεν είναι το μέγιστο της έντασης αλλά απευθείας ομόλογα σημεία επί των ιχνών του laser στις δύο εικόνες. Υπ’ αυτή την έννοια μπορεί να επιλέγεται αυθαίρετα μία εικονοψηφίδα στην αριστερή εικόνα, πχ. εκείνη με την μεγαλύτερη τιμή έντασης (ενότητα 4.2), και να αναζητείται το ομόλογο σημείο στην δεξιά εικόνα επί της ομόλογης επιτολικής γραμμής. Αφού ζητούμενο είναι η υποψηφιακή ακρίβεια, είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθεί ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση, αντί πχ. της απλούστερης προσέγγισης βάσει του συντελεστή συσχέτισης.

Η ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση εικόνας χρησιμοποιεί συνήθως ως γεωμετρικό μοντέλο τον 2D αφινικό μετασχηματισμό των 6 παραμέτρων (Grün, 1985). Στην προκειμένη περίπτωση ο μετασχηματισμός εκφυλίζεται σε μετασχηματισμό ομοιότητας 2 παραμέτρων (μετάθεση, κλίμακα), ενώ μπορούν να εισαχθούν 2 ακόμα μεταβλητές για την ραδιομετρία της εικόνας (αντίθεση, φωτεινότητα). Αυτό εκφράζεται ως:

$$f(x) = g(a \cdot x + b) \cdot \text{contr} + \text{bright} \quad (4.7)$$

όπου

$f(x)$ η συνάρτηση τόνων της αριστερής εικόνας (προτύπου)

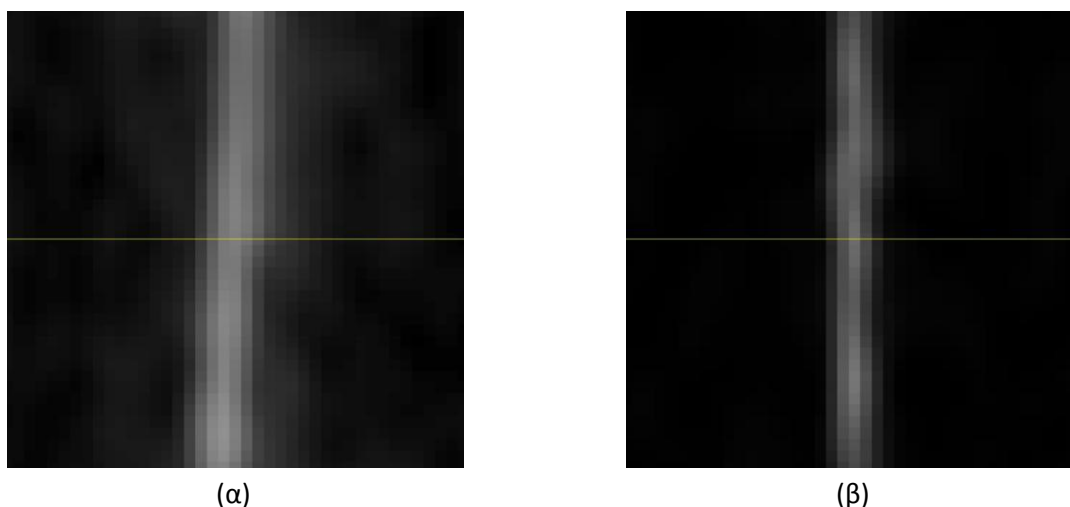
$g(x)$ η συνάρτηση τόνων της δεξιάς εικόνας (παραθύρου σύγκρισης)

<i>a</i>	ο ζητούμενος συντελεστής κλίμακας
<i>b</i>	ο ζητούμενος συντελεστής μετάθεσης
<i>contr</i>	η ζητούμενη παράμετρος αντίθεσης της εικόνας
<i>bright</i>	η ζητούμενη παράμετρος φωτεινότητας της εικόνας.

Οι τιμές των αγνώστων βρίσκονται επαναληπτικά με συνόρθωση των διαφορών στις τιμές τόνου των δύο εικόνων. Για να ληφθεί υπόψη και το πρόβλημα του θορύβου, αντί να γίνει η σύγκριση μόνο κατά μήκος μίας γραμμής των εικόνων συμμετέχουν εδώ τρεις γραμμές (η επιπολική γραμμή και από μία γραμμή εκατέρωθεν αυτής). Τελικό αποτέλεσμα είναι η θέση στην δεξιά εικόνα του σημείου που είναι ομόλογο του μεγίστου της αριστερής εικόνας.

4.11. Άμεση μέτρηση σημείων

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έγιναν και άμεσες μετρήσεις σημείων από τον γράφοντα, ο οποίος (υπό κατάλληλη μεγέθυνση και σε οθόνη όπου υποδεικνυόταν η επιπολική γραμμή – βλ. Εικ. 4.1) επέλεγε την θέση όπου εκτιμούσε ότι η φωτεινότητα κατά μήκος της επιπολικής είχε την μέγιστη τιμή. Φυσικά εδώ δεν μετρήθηκαν όλα τα σημεία που προέκυψαν από τις άλλες αυτοματοποιημένες μεθόδους, αλλά οπωσδήποτε ικανός αριθμός για να είναι αξιόπιστη η σύγκριση.



Εικόνα 4.1: Τυπικές εικόνες άμεσης μέτρησης σημείων: α) για το κόκκινο laser, β) για το πράσινο laser. Με κίτρινη γραμμή υποδεικνύεται η επιπολική γραμμή.

4.12. Αξιολόγηση μεθόδων

Ενδεικτικό παράδειγμα εφαρμογής των διαφορετικών προσεγγίσεων φαίνεται στην Εικ. 4.3 στο τέλος αυτής της ενότητας. Για την αξιολόγηση των μεθόδων σαρώθηκε επίπεδη επιφάνεια (μελαμίνη), η οποία ανακατασκευάστηκε με την βοήθεια των διαφορετικών τεχνικών. Η σάρωση έγινε με τις μηχανές δικτύου ανάλυσης 640×480 με χρήση και των δύο συσκευών παραγωγής της δέσμης, του κατώτερης ποιότητας κόκκινου και του ανώτερης ποιότητας (με δυνατότητα εστίασης) πράσινου laser μήκους κύματος 532 nm (Εικ. 4.2). Με το κόκκινο la-

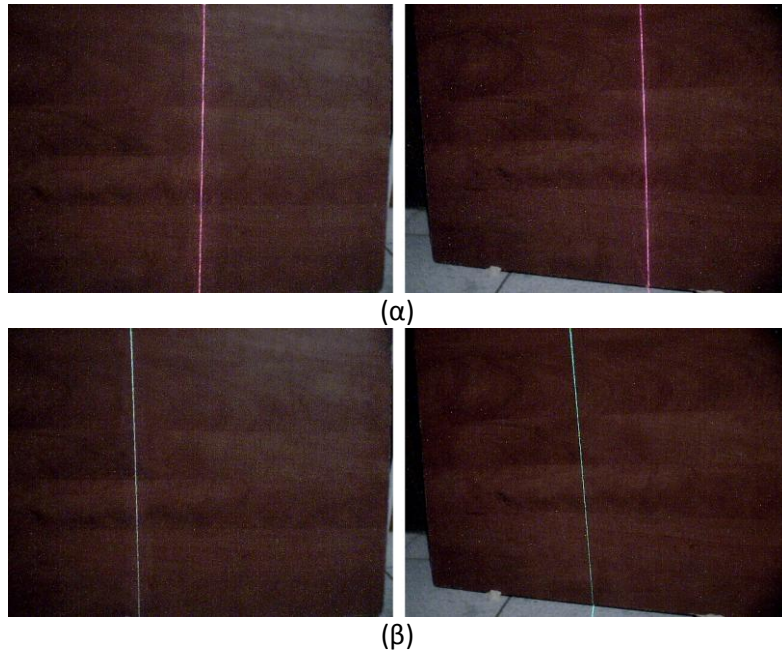
ser ελήφθησαν 31 στερεοζεύγη, με το πράσινο 25. Μετά από την αφαίρεση του υποβάθρου και την δημιουργία των επιτολικών εικόνων, στις εικόνες με το κόκκινο και το πράσινο laser εφαρμόστηκαν τα αντίστοιχα φίλτρα εξομάλυνσης που αναφέρθηκαν στην ενότητα 3.6.

Χρησιμοποιήθηκαν όλες οι μέθοδοι εξαγωγής κορυφής (μεγίστου έντασης) σε κάθε γραμμή για όλα τα στερεοζεύγη. Άρα είναι γνωστές οι εικονοσυντεταγμένες $y_1 = y_2 = y$ (σειρά επιτολικών εικόνων) και x_1, x_2 (εξαγωγή κορυφής) κάθε σημείου. Μπορούν να εφαρμοστούν, συνεπώς, οι Εξ. (4.1) της παράλλαξης για τον υπολογισμό 3D συντεταγμένων. Συνολικά ανακατασκευάστηκαν ~9500 σημεία με το κόκκινο laser και ~9000 σημεία με το πράσινο. Σε κάθε νέφος σημείων προσαρμόστηκε εξίσωση επιπέδου. Κριτήριο αξιολόγησης για τις μεθόδους είναι το τυπικό σφάλμα σ_o της προσαρμογής επιπέδου. Οι τιμές του σ_o που παρουσιάζει ο Πίνακας 4.1 αναφέρονται σε διεύθυνση κάθετη στο προσαρμοζόμενο επίπεδο.

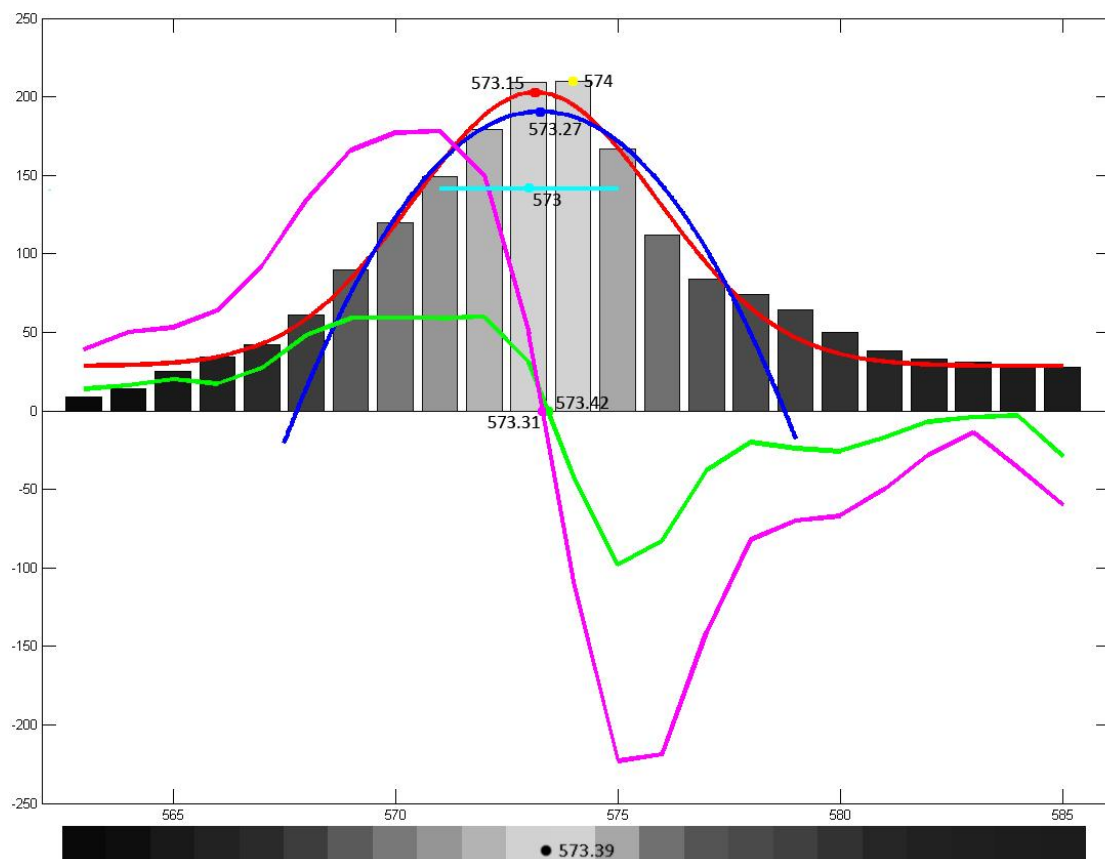
Πίνακας 4.1
Ακρίβεια (σ_o) παρεμβολής επιπέδου

Μέθοδος	σ_o (mm)	
	κόκκινο laser	πράσινο laser
Μέγιστη τιμή	0. 66	0. 49
Χρήση κατωφλίου	0. 43	0. 33
Μέγιστο παραβολής	0. 38	0. 24
Μέγιστο παραβολής κάθετα στην λωρίδα laser	0. 38	0. 24
Μέγιστο καμπύλης Gauss	0. 32	0. 21
Μέγιστο καμπύλης Gauss κάθετα στην λωρίδα laser	0. 32	0. 21
Κέντρο θάρους	0. 35	0. 24
Φίλτρο FIR 2 ^{ης} τάξης	0. 37	0. 25
Φίλτρο FIR 4 ^{ης} τάξης	0. 34	0. 22
Μονοδιάστατη ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση	0. 35	0. 22
Άμεση μέτρηση σημείων	0. 31	0. 24

Παρατηρείται ότι τα καλύτερα αποτελέσματα – τουλάχιστον βάσει των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν εδώ – δίνουν οι δύο μέθοδοι μεγίστου καμπύλης Gauss. Πρέπει πάντως να επισημανθεί πως στην περίπτωση του χαμηλής ποιότητας laser οι μέθοδοι παρεμβολής καμπύλης παραβολής και καμπύλης Gauss κάθετα στην λωρίδα ήταν κάπως πιο ευαίσθητες στην παρουσία θορύβου, με συνέπεια εσφαλμένη εκτίμηση της κλίσης της λωρίδας laser, και άρα παρεμβολή τόνων σε διεύθυνση που σε ορισμένες θέσεις απέκλινε από την κάθετη. Στις περιπτώσεις αυτές ορισμένα 3D σημεία ήταν εκτός πληθυσμού και αποκλείστηκαν από την παρεμβολή του επιπέδου. Έτσι, ως βασική μέθοδος εντοπισμού του μεγίστου της έντασης επιλέγεται τελικά η παρεμβολή καμπύλης Gauss στην διεύθυνση της επιτολικής γραμμής (η οποία άλλωστε, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.1, δίνει ίδια αποτελέσματα με εκείνα της άμεσης μέτρησης). Ας σημειωθεί ότι στην άμεση μέτρηση σημείων (από τον χρήστη) με το κόκκινο laser η εκτίμηση της θέσης της κορυφής ήταν πιο εύκολη διότι το πάχος της λωρίδας ήταν μεγαλύτερο εκείνου του πράσινου laser (Εικ. 4.2) επιτρέποντας σαφέστερη εκτίμηση της θέσης του κέντρου.



Εικόνα 4.2: Τυπικά στερεοζεύγη που ελήφθησαν για τον έλεγχο προσαρμογής επιπέδου α) με το κατώτερης ποιότητας κόκκινο laser και β) με το καλής ποιότητας πράσινο laser.



Εικόνα 4.3: Εφαρμογή διαφόρων μεθόδων κατά μήκος επιτολικής γραμμής με τόνους: 9 14 25 34 42 61 90 120 149 179 209 210 167 112 84 74 64 50 38 33 31 29 28. Παρουσιάζονται οι μέθοδοι που αναπαριστώνται γραφικά. **Κίτρινο:** Θέση μέγιστης τιμής (574). **Κυανό:** Μέσων κατωφλίου (573), τιμή κατωφλίου 140. **Μπλε:** Θέση μεγίστου παραβολής (573.27). **Κόκκινο:** Θέση μεγίστου καμπύλης Gauss (573.15). **Πράσινο:** φίλτρο FIR 2^{ης} τάξης (573.42). **Ματζέντα:** φίλτρο FIR 4^{ης} τάξης (573.31). **Μαύρο:** Άμεση μέτρηση σημείου (573.39).

4.13. Διεύρυνση της περιοχής άντλησης ραδιομετρικής πληροφορίας

Όλες οι προαναφερθείσες μέθοδοι αντιμετωπίζουν το φαινόμενο ως πρόβλημα αμιγώς μονοδιάστατο. Με την λογική αυτή, η θέση της κορυφής της καμπύλης προκύπτει αποκλειστικά από τους τόνους της εικόνας σε μία μόνο διεύθυνση. Δηλαδή αγνοείται η ραδιομετρική πληροφορία της ευρύτερης γειτονιάς της κορυφής, οπότε και ενδέχεται το αποτέλεσμα να είναι επηρεασμένο από τοπικό θόρυβο. Για εκτιμηθεί λοιπόν η θέση του μεγίστου με αξιοποίηση της ραδιομετρικής πληροφορίας του περιβάλλοντος του σημείου, αλλά και να μειωθεί η επίδραση του τοπικού θορύβου, εξετάστηκαν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις:

- Συμμετοχή σειρών της εικόνας εκατέρωθεν της επιτολικής γραμμής
- Συμμετοχή πληροφορίας από περισσότερες διευθύνσεις.

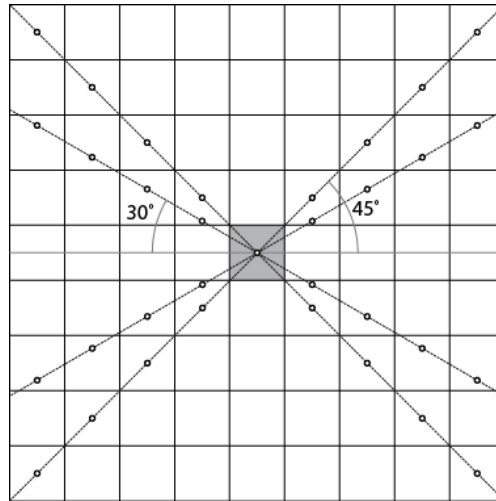
4.13.1. Συμμετοχή σειρών της εικόνας εκατέρωθεν της επιτολικής γραμμής

Στην περίπτωση αυτή συμμετέχουν 3, 5 ή 7 σειρές της εικόνας (δηλαδή η επιτολική γραμμή και 1, 2 ή 3 σειρές, αντίστοιχα, εκατέρωθεν αυτής) και γίνεται ταυτόχρονη παρεμβολή καμπυλών Gauss κατά την Εξ. (4.4) με κοινό άγνωστο την παράμετρο b . Εδώ ενυπάρχει η παραδοχή πως η θέση της κορυφής μεταβάλλεται ομαλά από σειρά σε σειρά της εικόνας. Στις τρεις εκατέρωθεν σειρές δίδεται αντίστοιχο βάρος $(1/2)^2$, $(1/3)^2$ και $(1/4)^2$. Οι προσεγγίσεις αυτές αναφέρονται στον Πίνακα 4.2 ως $gauss\pm1$, $gauss\pm2$ και $gauss\pm3$.

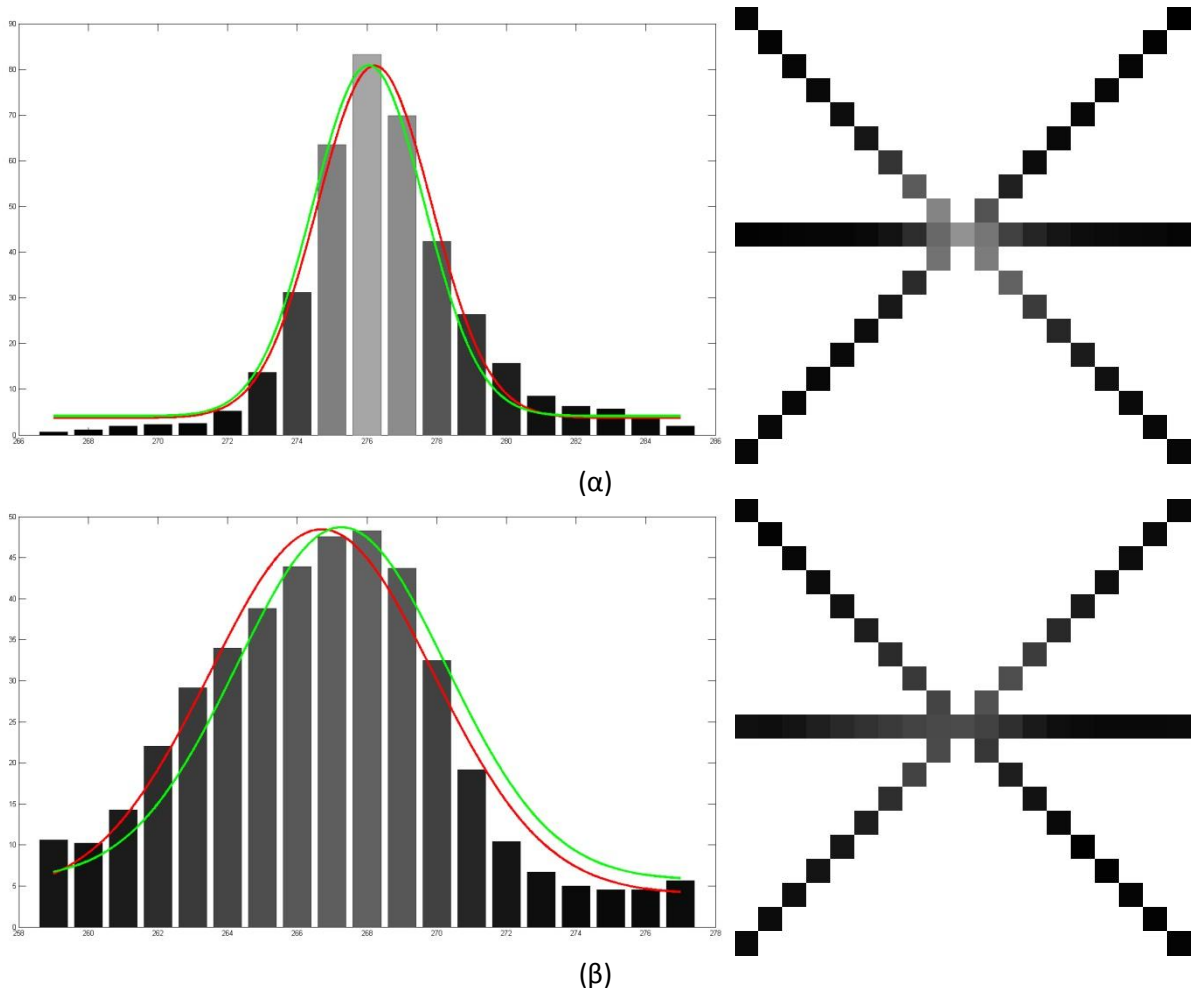
4.13.2. Συμμετοχή πληροφορίας από περισσότερες διευθύνσεις

Εδώ θεωρείται ότι η ραδιομετρική πληροφορία κατά μήκος της επιτολικής γραμμής σχετίζεται με την πληροφορία σε διαφορετικές διευθύνσεις μέσω της αρχικής εκτίμησης του μεγίστου της έντασης επί της επιτολικής γραμμής. Στην πράξη χρησιμοποιήθηκε πληροφορία τόνου στις διευθύνσεις 30° και 45° ως προς τις σειρές της εικόνας, όπως επίσης και σε συνδυασμό τους. Αρχικά εκτιμάται η θέση του μεγίστου κατά την ενότητα 4.2, και έπειτα χρησιμοποιούνται οι τιμές χρώματος στην εκάστοτε συμμετέχουσα διεύθυνση των 30° ή 45° (μέσω της αρχικής εκτίμησης της θέσης του μεγίστου) στις ακέραιες θέσεις pixel στην διεύθυνση x . Με τον τρόπο αυτό αποφεύγει κανείς πράξεις παρεμβολής τόνου στην διεύθυνση των 45° , ενώ παράλληλα οι τιμές αυτές μπορούν να προβληθούν με απλό τρόπο στην επιτολική ευθεία (Εικ. 4.4).

Έτσι προσαρμόζονται ταυτόχρονα τρεις καμπύλες Gauss επί της επιτολικής γραμμής με κοινό άγνωστο την παράμετρο b της Εξ. (4.4), δηλαδή μια καμπύλη με βάση την κατανομή της έντασης στην διεύθυνση της επιτολικής γραμμής και δύο στις τιμές του τόνου των συμμετρικών διευθύνσεων όπως αυτές προβάλλονται επί της επιτολικής γραμμής. Οι επιπλέον τιμές συμμετέχουν με βάρος $(1/2)^2$ η καθεμία εφόσον χρησιμοποιείται ένα ζεύγος διευθύνσεων (των $\pm 30^\circ$ ή των $\pm 45^\circ$), και με βάρη $(1/2)^2$ και $(1/3)^2$, αντίστοιχα, όταν χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα οι διευθύνσεις των $\pm 30^\circ$ και των $\pm 45^\circ$. Στον Πίνακα 4.2 αναφέρονται οι προσεγγίσεις αυτές ως $gauss\pm 30^\circ$, $gauss\pm 45^\circ$ και $gauss\pm 30^\circ\pm 45^\circ$.



Εικόνα 4.4: Διευθύνσεις των 30° και 45° (για την σειρά των 45° δεν απαιτείται παρεμβολή).



Εικόνα 4.5: Δύο παραδείγματα (α και β) εντοπισμού μεγίστου. *Αριστερά:* καμπύλη προσαρμοσμένη κατά μήκος της επιτολικής γραμμής (κόκκινη καμπύλη) και προσαρμογή στην ίδια διεύθυνση αλλά με ταυτόχρονη συμμετοχή και των τόνων στις διευθύνσεις των $\pm 45^\circ$ (πράσινη καμπύλη). *Δεξιά:* η επιτολική γραμμή μαζί με τις διευθύνσεις των $\pm 45^\circ$. Το σημείο της εικόνας (α) ορίζεται ακριβέστερα σε σχέση με εκείνο της εικόνας (β), όπως προέκυψε και από το σφάλμα σ_b προσδιορισμού της θέσης της κορυφής (0.054 pixel έναντι 0.145 pixel, αντίστοιχα).

Η Εικ. 4.5 δείχνει δύο προσαρμοσμένες καμπύλες για δύο σημεία με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Η κόκκινη καμπύλη έχει προκύψει από προσαρμογή καμπύλης Gauss κατά μήκος αποκλειστικά της επιτολικής γραμμής, η πράσινη είναι η καμπύλη Gauss στην διεύθυνση της επιτολικής γραμμής, που όμως προσαρμόστηκε ταυτόχρονα με αντίστοιχες καμπύλες στις διευθύνσεις των $\pm 45^\circ$. Φαίνεται στα παραδείγματα αυτά ότι, ανάλογα με την τοπική διακύμανση της ραδιομετρικής πληροφορίας, η συμμετοχή επιπλέον διευθύνσεων είναι δυνατόν να μεταβάλει σημαντικά την θέση του εκτιμώμενου μεγίστου. Για το πρώτο σημείο (πάνω), οι κορυφές από τις δύο λύσεις απείχαν 0.17 pixel, ενώ για το δεύτερο (κάτω) απείχαν 0.57 pixel. Παράλληλα, η ραδιομετρική “ποιότητα” των σημείων εκδηλώνεται βέβαια σε διαφορές στην ακρίβεια προσδιορισμού της θέσης. Έτσι, στην ταυτόχρονη προσαρμογή των τριών καμπυλών για το πρώτο σημείο (Εικ. 4.5α) προέκυψε σφάλμα $\sigma_b = \pm 0.054$ pixel, ενώ για το δεύτερο σημείο (Εικ. 4.5β) σφάλμα $\sigma_b = \pm 0.145$ pixel. Το στατιστικό σφάλμα προσδιορισμού της θέσης είναι, φυσικά, βασικό κριτήριο για την αποδοχή των ανακατασκευαζόμενων σημείων (βλ. ενότητα 4.16).

Για να αξιολογηθούν οι μέθοδοι χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση και τα δεδομένα που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο για την επιλογή του μεγέθους των φίλτρων εξομάλυνσης. Στον Πίνακα 4.2, που παρουσιάζει τα αποτελέσματα προσαρμογής ευθείας στις εκτιμηθείσες θέσεις των μεγίστων για 8 εικόνες, φαίνεται και το αποτέλεσμα της απλής προσαρμογής στην επιτολική γραμμή (*gauss*). Ακόμα, η διαδικασία που περιγράφηκε στην ενότητα 4.12 (παρεμβολή επιπέδου) εφαρμόστηκε και εδώ, με τα ίδια δεδομένα, για τις μεθόδους: α) με συμμετοχή δύο σειρών εκατέρωθεν της επιτολικής, β) με συμμετοχή της διεύθυνσης των 45° . Ο Πίνακας 4.3 παρουσιάζει το τυπικό σφάλμα της προσαρμογής επιπέδων.

Πίνακας 4.2 Ακρίβεια σ_o (σε pixel) παρεμβολής ευθειών σε 8 εικόνες

Μέθοδος	εικόνα 1	εικόνα 2	εικόνα 3	εικόνα 4	εικόνα 5	εικόνα 6	εικόνα 7	εικόνα 8	μέση τιμή
<i>gauss</i>	0.187	0.181	0.170	0.174	0.148	0.131	0.157	0.213	0.172
<i>gauss</i> ± 1	0.186	0.180	0.169	0.173	0.148	0.129	0.157	0.211	0.171
<i>gauss</i> ± 2	0.185	0.178	0.168	0.172	0.147	0.128	0.156	0.208	0.169
<i>gauss</i> ± 3	0.184	0.175	0.167	0.171	0.146	0.127	0.154	0.206	0.168
<i>gauss</i> $\pm 45^\circ$	0.178	0.173	0.165	0.169	0.142	0.126	0.151	0.202	0.165
<i>gauss</i> $\pm 30^\circ$	0.183	0.177	0.168	0.172	0.146	0.128	0.155	0.207	0.168
<i>gauss</i> $\pm 30^\circ \pm 45^\circ$	0.180	0.175	0.166	0.170	0.144	0.127	0.153	0.203	0.166

Πίνακας 4.3
Ακρίβεια παρεμβολής επιπέδου

Μέθοδος	σ_o (mm)	
	κόκκινο laser	πράσινο laser
<i>gauss</i>	0. 319	0. 211
<i>gauss</i> ± 2	0. 313	0. 201
<i>gauss</i> $\pm 45^\circ$	0. 308	0. 196

Η εξαγωγή κορυφής που αξιοποιεί την ραδιομετρική πληροφορία από το περιβάλλον της αρχικής εκτίμησης του σημείου φαίνεται ότι όντως, ακόμα και σε αυτή την απλή περίπτωση

επίπεδου αντικειμένου, βελτιώνει την ακρίβεια προσδιορισμού της θέσης της κορυφής, όπως προκύπτει από τους Πίνακες 4.2 και 4.3. Τα αποτελέσματα από τις μεθόδους που εξετάστηκαν εδώ δεν διαφέρουν σημαντικά, ωστόσο η λήψη πρόσθετης πληροφορίας από την διεύθυνση των $\pm 45^\circ$ έδωσε κατά τι ακριβέστερα αποτελέσματα. Έτσι, αυτή η προσέγγιση υιοθετήθηκε ως η τυπική μέθοδος αυτόματης μέτρησης εικονοσημείων. Η σημασία της συμμετοχής του περιβάλλοντος των σημείων έχει βέβαια μεγαλύτερη σημασία στην περίπτωση σάρωσης πιο σύνθετων επιφανειών. Πράγματι, σε προβληματικές περιοχές οι καμπύλες σε περισσότερες διευθύνσεις τείνουν σε διαφορετικές θέσεις μεγίστου, πράγμα που εκδηλώνεται σε υψηλή αβεβαιότητα προσδιορισμού της εκτιμώμενης θέσης. Επομένως τέτοια σημεία είναι δυνατόν να αποκλείονται από την 3D ανακατασκευή (βλ. και ενότητα 4.16).

4.14. Το πρόβλημα των πολλαπλών μεγίστων

Έως τώρα έχει υποθεθεί ότι η επιπολική γραμμή τέμνει την λωρίδα laser σε ένα το πολύ σημείο. Αυτή η θεώρηση είναι γενικά σωστή, αλλά ενδέχεται κάποιες φορές να υπάρχουν περισσότερα από ένα σημεία τομής εξαιτίας της εκτροπής λόγω αναγλύφου (ή και να παρερμηνεύονται ως σημεία τομής πχ. φωτεινές κηλίδες λόγω αντανάκλασεων της επιφάνειας). Αρχικό βήμα λοιπόν για να ανιχνευτεί η σωστή κορυφή επί μίας επιπολικής γραμμής είναι να βρεθεί σε πόσα σημεία εντοπίζονται τομές, όπως επίσης και μια αρχική εκτίμηση της θέσης τους. Σε κάθε σειρά της εικόνας, έτσι, τίθεται ένα κατώφλι και καταγράφεται ο αριθμός των εμφανίσεων πάνω από το κατώφλι αυτό. Έπειτα, για κάθε εμφάνιση ανιχνεύεται η θέση της μέγιστης τιμής. Με αυτή την αρχική εκτίμηση, η ακριβής θέση της κορυφής προκύπτει με προσαρμογή τριών καμπυλών Gauss, όπως προαναφέρθηκε, με χρήση των διευθύνσεων $\pm 45^\circ$.

Αν σε μία ή και τις δύο εικόνες εντοπίζονται στις ομόλογες επιπολικές ευθείες περισσότερες από μία κορυφές, υπάρχει δυνατότητα ανακατασκευής περισσότερων 3D σημείων χωρίς να υπάρχει a priori γνώση για το ποιο σημείο είναι το σωστό. Ως εκ τούτου, στις σειρές των εικόνων που εμφανίζουν περισσότερα μέγιστα αυτά αποθηκεύονται χωριστά, και οι αντίστοιχες σειρές αντιμετωπίζονται όπως αναλύεται στην ενότητα 5.5 του επόμενου κεφαλαίου.

4.15. Ακρίβεια προσδιορισμού σημείου

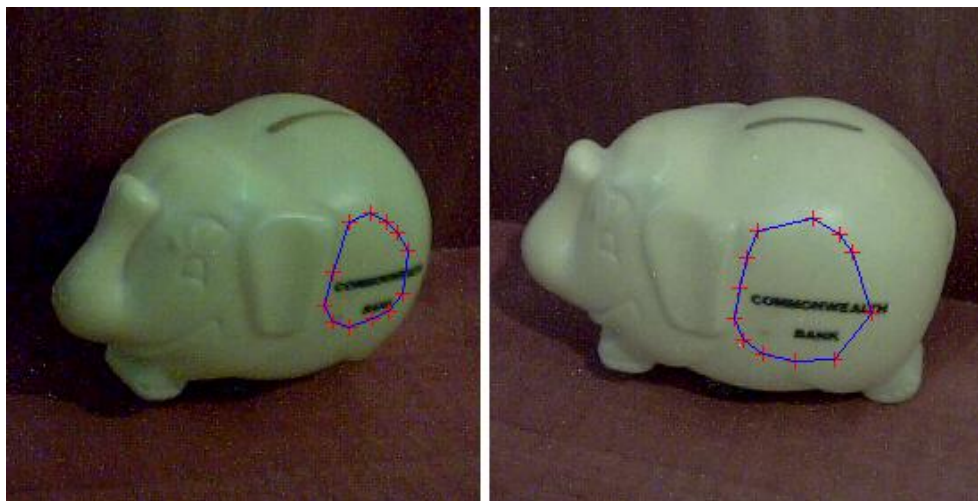
Η διαδικασία προσαρμογής καμπύλης Gauss που περιγράφηκε στην ενότητα 4.13 συνοδεύεται από το σφάλμα σ_b προσδιορισμού της θέσης της κορυφής από την Εξ. (4.4). Υπολογίστηκε η μέση τετραγωνική τιμή από όλες τις τιμές σ_b από όλα τα στερεοζεύγη που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο των διαδικασιών σάρωσης και προσαρμογής επιπέδου που περιγράφηκε προηγουμένως. Στην περίπτωση του κόκκινου laser παρατηρήθηκε μέσο σφάλμα προσδιορισμού της κορυφής της καμπύλης ± 0.09 pixel, ενώ για το πράσινο laser η τιμή αυτή ήταν ± 0.05 pixel. Οι τιμές αυτές, βέβαια, έχουν προκύψει από ιδιαίτερα ευνοϊκά δεδομένα (σάρωση επιπέδου), και συνεπώς δεν θεωρούνται αντιπροσωπευτικές για την σάρωση επιφανειών τυχαίας μορφής. Ωστόσο η εκτίμηση $\sigma_x = \pm 0.1$ pixel για την ακρίβεια προσδιο-

ρισμού της εικονοσυντεταγμένης x των σημείων για το πράσινο laser, με το οποίο έγιναν και οι υπόλοιπες εφαρμογές, θεωρείται λογική (αυτό προκύπτει και από το παράδειγμα της ενότητας 4.16). Η τιμή αυτή θα αποτελέσει και την βάση για την θεωρητική εκτίμηση της ακρίβειας του συστήματος στο Κεφάλαιο 7.

4.16. Αποδοχή σημείων

Η τιμή σ_b , η οποία εκφράζει την αβεβαιότητα προσδιορισμού του μεγίστου με προσαρμογή καμπύλης Gauss, μπορεί όμως να θεωρηθεί και κριτήριο αποδοχής του σημείου συγκρινόμενη με κάποια τιμή αναφοράς. Για να εκτιμηθεί μια αξιόπιστη τιμή αναφοράς σε κάθε εφαρμογή, στις εικόνες υποβάθρου υποδεικνύονται περιοχές του αντικειμένου όπου δεν υπάρχει έντονη αλλαγή κλίσης της επιφάνειας (βλ. παράδειγμα στην Εικ. 4.6). Στις περιοχές αυτές αναμένεται ότι ο προσδιορισμός της θέσης της κορυφής της καμπύλης Gauss γίνεται με μικρό σφάλμα. Από τις τιμές σ_b που συνοδεύουν τα σημεία που εξάγονται στις περιοχές αυτές υπολογίζεται η μέση τετραγωνική τιμή, η οποία αντιπροσωπεύει την τιμή αναφοράς σ_a . Ένα σημείο θεωρείται αποδεκτό εφόσον το σφάλμα του σ_b είναι μικρότερο του $5 \times \sigma_a$.

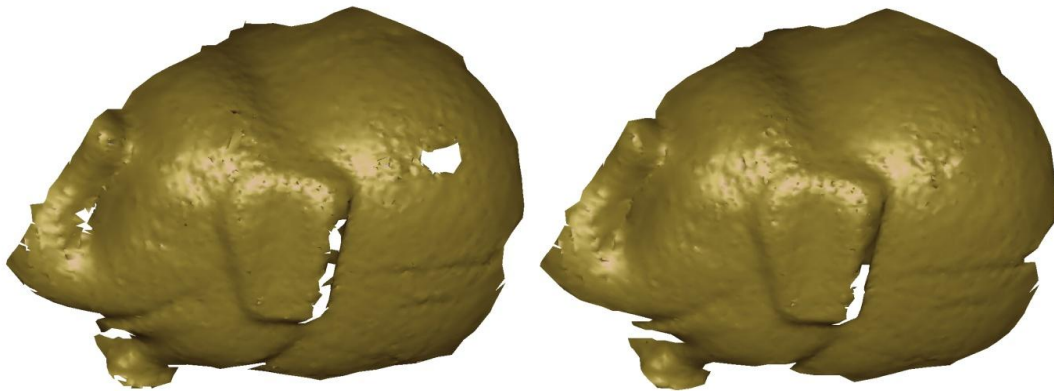
Προφανώς, η επιλογή αυτή των περιοχών για την εκτίμηση της τιμής σ_a πρέπει να γίνεται για κάθε αντικείμενο που σαρώνεται, αφού το σφάλμα επηρεάζεται, μεταξύ άλλων, από τις συνθήκες φωτισμού και τις ανακλαστικές ιδιότητες της επιφάνειας. Στις περιοχές που υποδείχθηκαν στο παράδειγμα της Εικ. 4.6 (το αντικείμενο είναι ένας πλαστικός κουμπάρας) υπήρχαν 5387 διαφορετικές τιμές σ_b , οι οποίες έδωσαν τιμή αναφοράς $\sigma_a = \pm 0.089$ pixel.



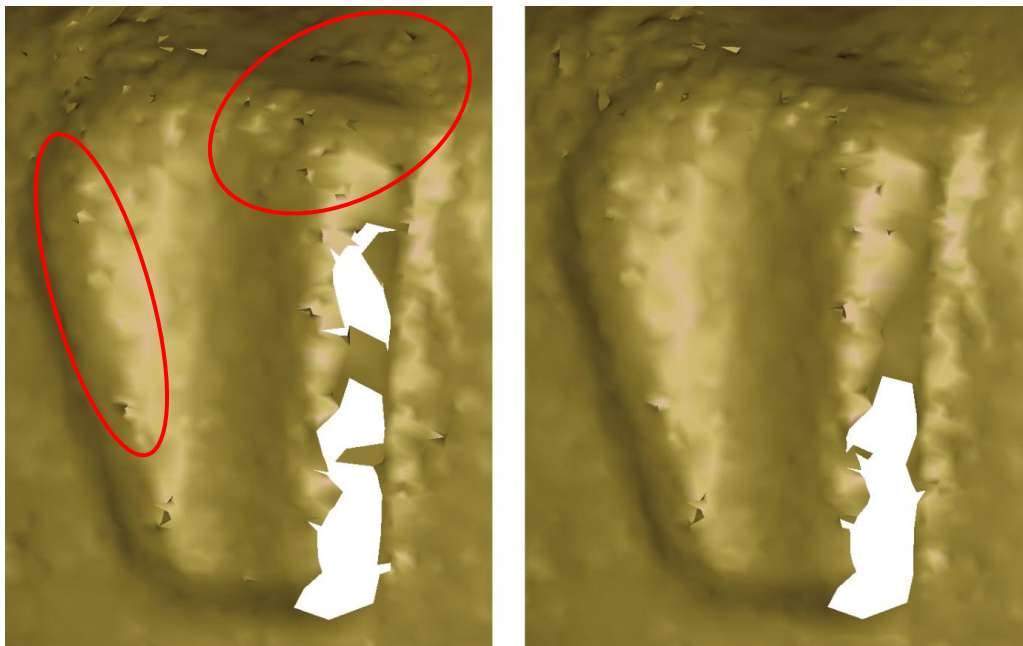
Εικόνα 4.6: Επιλογή περιοχών σε εικόνες υποβάθρου όπου δεν υπάρχει έντονη αλλαγή κλίσης στην επιφάνεια του αντικειμένου. Στις περιοχές αυτές αναμένεται πως η θέση της κορυφής της καμπύλης Gauss θα έχει προσδιοριστεί με μικρό σφάλμα.

Στην Εικ. 4.7 φαίνονται ενδεικτικά, χωρίς άλλη εξομάλυνση, τα τριγωνισμένα νέφη σημείων από μια θέση σάρωσης που έχουν προκύψει χωρίς και με απόρριψη σημείων κατά τα προηγούμενα (η δημιουργία του νέφους εξηγείται στο επόμενο κεφάλαιο). Για τον τριγωνισμό έχει τεθεί ως μέγιστο μήκος πλευράς τριγώνων το 1 mm. Παρατηρείται ότι με την απόρριψη 564 σημείων (3% των σημείων) η επιφάνεια εμφανίζει μια ελαφρά εξομάλυνση, ενώ ταυτό-

χρονα διευκολύνεται το λογισμικό τριγωνισμού να προσαρμόσει καλύτερα την επιφάνεια στα δεδομένα σημεία, με συνέπεια να εμφανίζονται λιγότερα κενά στο τριγωνισμένο μοντέλο. Σημειώνεται ότι η επιφάνεια που δημιουργείται από το λογισμικό τριγωνισμού εμφανίζει “εξογκώματα” στα σημεία που απέχουν λίγο από αυτήν, ενώ τα σημεία που απέχουν περισσότερο δεν συμμετέχουν στην δημιουργία της επιφάνειας, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται κενά. Η Εικ. 4.8 παρουσιάζει μεγεθυμένη την περιοχή του αφτιού του ελέφанта. Βασική διαφορά ύστερα από την απόρριψη μη αποδεκτών σημείων (σημείων με αβέβαιο προσδιορισμό θέσης της κορυφής) είναι ότι έχει μειωθεί σημαντικά το μέγεθος του κενού στην επιφάνεια.



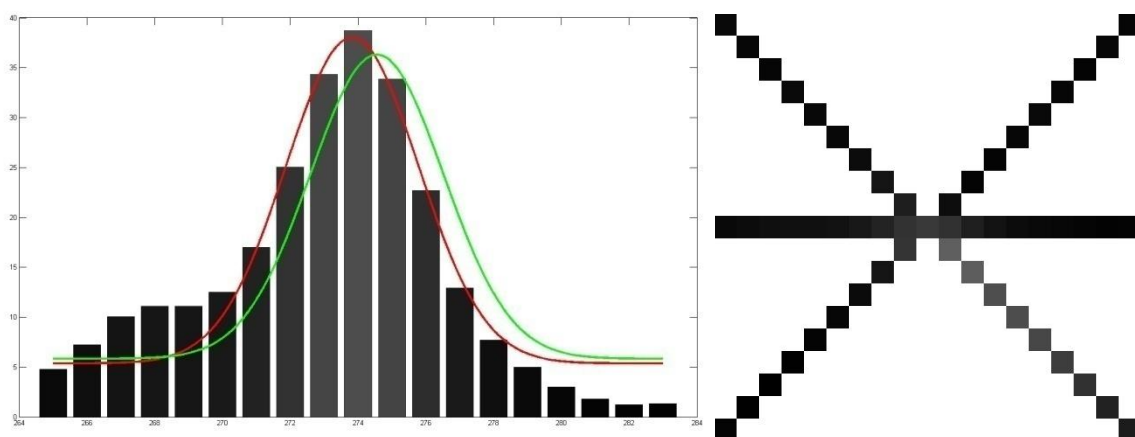
Εικόνα 4.7: Τριγωνισμένα νέφη σημείων. Αριστερά: πλήρη αρχικά δεδομένα (18881 σημεία). Δεξιά: αποδεκτά σημεία βάσει της τιμής σ_b της προσαρμογής καμπύλης Gauss (18317 σημεία, δηλαδή απορρίφθηκε το 3% των σημείων).



Εικόνα 4.8: Τριγωνισμένα νέφη σημείων (λεπτομέρεια της Εικ. 4.7). Αριστερά: πλήρη αρχικά δεδομένα. Δεξιά: αποδεκτά σημεία βάσει της τιμής σ_b της προσαρμογής καμπύλης Gauss. Έχουν σημειωθεί περιοχές της επιφάνειας που εξομαλύνονται ελαφρώς μετά από την αφαίρεση των σημείων.



Εικόνα 4.9: Λεπτομέρεια εικόνας: στο σημείο που υποδεικνύεται το σφάλμα στον προσδιορισμό της θέσης του μεγίστου της καμπύλης Gauss είναι $\sigma_b = \pm 0.542$ pixel. Το σημείο αυτό απορρίπτεται λόγω του μεγέθους του σφάλματος προσδιορισμού της θέσης του.



Εικόνα 4.10: Προσαρμογή καμπύλης Gauss στο σημείο της Εικ. 4.9 (αριστερά). Παρουσιάζονται οι προσαρμοσμένες καμπύλες κατά μήκος της επιτολικής γραμμής χωρίς (κόκκινη καμπύλη) και με την συμμετοχή των διευθύνσεων των $\pm 45^\circ$ (πράσινη καμπύλη). Δεξιά φαίνεται η επιτολική γραμμή μαζί με τις διευθύνσεις των $\pm 45^\circ$.

Ενδεικτικά, τέλος, εξετάζεται εδώ ένα χαρακτηριστικό σημείο από εκείνα που απορρίπτονται. Η Εικ. 4.9 δείχνει σε μεγέθυνση την γειτονιά ενός σημείου τομής του επιπέδου laser με την επιφάνεια του αντικειμένου. Καθώς το σημείο βρίσκεται στα όρια της επιφάνειας, στις δύο διευθύνσεις των $\pm 45^\circ$ δεν υπάρχουν δεδομένα πάνω από το σημείο αφού εκεί πλέον απεικονίζεται το υπόβαθρο του αντικειμένου. Σε αυτό το σημείο το σφάλμα προσδιορισμού της θέσης του μεγίστου της καμπύλης Gauss είναι $\sigma_b = \pm 0.542$ pixel. Για το συγκεκριμένο σημείο φαίνονται στην Εικ. 4.10 οι προσαρμοσμένες καμπύλες Gauss με και χωρίς συμμετοχή των διευθύνσεων των $\pm 45^\circ$.

Στο Κεφάλαιο αυτό επιλέχθηκε, μεταξύ 12 μεθόδων που εξετάστηκαν, ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται η εύρεση ομολόγων σημείων. Κάθε σημείο που εξάγεται συνοδεύεται από ένα στατιστικό μέτρο ακρίβειας, που επιτρέπει μάλιστα και την αποδοχή ή απόρριψή του. Τα ομόλογα σημεία που τελικά γίνονται αποδεκτά αντιπροσωπεύουν 3D σημεία, η ανακατασκευή των οποίων αναλύεται στο Κεφάλαιο που έπεται.

ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗ 3D ΝΕΦΟΥΣ ΣΗΜΕΙΩΝ

5

```
% Matrix A
A = [Ap1 sparse(size(Ap1,1),size(Ap2,2)) sparse(size(Ap1,1),si
      sparse(size(Ap2,1),size(Ap1,2)) Ap2 sparse(size(Ap2,1),si
      sparse(size(Alp,1),size(Ap1,2)) sparse(size(Alp,1),size(Ap2,2)) Alp
      sparse(size(Av ,1),size(Ap1,2)) sparse(size(Av ,1),size(Ap2,2)) sparse(size(Av ,1),si

length = size(Ap1,1) - length1;
diagind = 1:length;
pvalues = ones(length,1)*mean_scale;
Pp2 = sparse(diagind,diagind,pvalues,length,length);

length = size(Ap2,1) - length2 + size(Alp,1);
diagind = 1:length;
pvalues = ones(length,1)*mean_scale;
Pp4 = sparse(diagind,diagind,pvalues,length,length);

% Weight Matrix
P = [Pp1 sparse(size(Pp1,1),size(Pp1,1),s
      sparse(size(Pp2,1),size(Pp1,2)) Pp2 sparse(size(Pp2,1),s
      sparse(size(Pp3,1),size(Pp1,2)) sparse(size(Pp3,1),s
      sparse(size(Pp4,1),size(Pp1,2)) sparse(size(Pp4,1),s
      sparse(size(Pv,1),size(Pp1,2)) sparse(size(Pv,1),s

% Difference Matrix
dL = [dLp1
      dLp2
      dLlp
      dLv ];

% LS
met = (A'*P*A)\(A'*P*dL);

% Update Values
% External planes
if withangle
    coeff1(1) = coeff1(1) + met(1);
    coeff1(2) = coeff1(2) + met(2);
    coeff1(4) = coeff1(4) + met(3);

    coeff2(1) = coeff2(1) + met(4);
    coeff2(2) = coeff2(2) + met(5);
```



5. Ανακατασκευή 3D νέφους σημείων

5.1. Εισαγωγικά

Στο προηγούμενο Κεφάλαιο αναπτύχθηκε ο τρόπος με τον οποίο εντοπίζονται τα ομόλογα σημεία σε επιπολικές εικόνες και υπολογίζονται οι εικονοσυντεταγμένες τους. Σε αυτό το Κεφάλαιο μελετώνται τεχνικές για τον προσδιορισμό των 3D συντεταγμένων του νέφους σημείων. Η προφανής μέθοδος της απλής εμπροσθοτομίας στην κανονική περίπτωση του στερεοζεύγους ενισχύεται, αλλά ταυτόχρονα αποκτά και περίσσεια παρατηρήσεων, με την χρήση γεωμετρικών δεσμεύσεων, εσωτερικών και εξωτερικών (ή έμμεσων και άμεσων, κατά την διάκριση των Kawasaki & Furukawa, 2007). Αυτό επιτρέπει να ενισχυθεί η γεωμετρική αξιοπιστία της λύσης, με παράλληλη δυνατότητα εντοπισμού χονδροειδών σφαλμάτων.

Η βασική εσωτερική δέσμευση που επιβάλλεται κατά την ανακατασκευή υπαγορεύει ότι όλα τα 3D σημεία που προκύπτουν από μία τομή του επιπέδου του laser με το αντικείμενο είναι συνεπίπεδα (κείνται στο επίπεδο του laser). Αλλά εσωτερική δέσμευση μπορεί επίσης, υπό ευρύτερη έννοια, να θεωρηθεί και μια εκ των υστέρων διαδικασία εξομάλυνσης του τελικού νέφους η οποία περιορίζει κάθε σημείο ώστε να μην απέχει πέραν ενός ορίου από τα γειτονικά του στην διεύθυνση του βάθους.

Η εξωτερική δέσμευση που επιβάλλεται κάνει χρήση του περιβάλλοντος του αντικειμένου. Όπως έχει αναφερθεί, το αντικείμενο τοποθετείται κατ' αρχήν εντός μίας γωνίας (κόγχης) που σχηματίζεται από την τομή δύο επιπέδων. Τα υπολογιζόμενα σημεία που προκύπτουν από την τομή του laser με τα επίπεδα αυτά οφείλουν να ανήκουν στο αντίστοιχο εξωτερικό επίπεδο, ενώ βέβαια πρέπει ταυτόχρονα να ανήκουν και στο προαναφερθέν επίπεδο του laser μαζί με όλα τα σημεία του αντικειμένου που προέρχονται από την συγκεκριμένη λωρίδα του laser (εσωτερική δέσμευση). Η βασική ιδέα εν προκειμένω είναι ότι η συμμετοχή εξωτερικών επιπέδων βελτιώνει την όλη 3D ανακατασκευή του χώρου (αντικείμενο + εξωτερικά επίπεδα), αφού για ορισμένα από τα σημεία εισάγεται στην ενιαία συνόρθωση η πρόσθετη a priori γεωμετρική πληροφορία της συνεπιπεδότητας. Επιπλέον, ο προσδιορισμός των συνεπίπεδων σημείων αναμένεται ότι, κατ' αρχήν, θα εμφανίζει υψηλότερη ακρίβεια σε σχέση με το καθαυτό αντικείμενο χάρη στην μεγαλύτερη σαφήνεια και το απλό σχήμα του ίχνους του laser στην εικόνα. Σημειώνεται πάντως πως η εξωτερική αυτή δέσμευση παραμένει προαιρετική, υπό την έννοια ότι τα εξωτερικά επίπεδα είναι δυνατόν να απουσιάζουν εξ ολοκλήρου ή το αντικείμενο να καταλαμβάνει μεγάλο χώρο στην εικόνα (αυξάνοντας έτσι την χωρική ανάλυση, δηλαδή την εδαφοψηφίδα). Στην δεύτερη αυτή περίπτωση ενδέχεται σε ορισμένες εικόνες να μην υπάρχει επαρκές μήκος απεικόνισης της τομής του laser με τα εξωτερικά επίπεδα, με συνέπεια να μην είναι δυνατόν να τεθεί στα αντίστοιχα στερεοζεύγη η εξωτερική δέσμευση.

5.2. Εξωτερικά επίπεδα

Για να επιβληθεί η εξωτερική δέσμευση πρέπει να υπάρχει πληροφορία για τις εξισώσεις των επιπέδων στο τρέχον σύστημα συντεταγμένων (είτε αυτές χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια ως γνωστές είτε απλώς ως αρχικές προσεγγίσεις). Η μόνη απαίτηση για τα επίπεδα αυτά είναι απλώς να σχηματίζουν μία γωνία, δεν υπάρχει δηλαδή κατ' αρχήν περιορισμός για την γωνία αυτή. Προφανώς, για να διαχωριστούν τα επίπεδα αυτά αυτόματα, όπως αναφέρεται στην συνέχεια, σκόπιμο είναι η γωνία αυτή να είναι κοντά στις 90° . Έτσι, πριν από την διαδικασία σάρωσης του αντικειμένου σαρώνονται τα επίπεδα, οπότε προκύπτουν διαδοχικά στερεοζεύγη που απεικονίζουν δύο 3D ευθείες (τομές του επιπέδου του laser με τα δύο εξωτερικά επίπεδα). Καθώς, όπως έχει ήδη αναφερθεί, το επίπεδο του laser κινείται έτσι ώστε να τέμνει σχεδόν κάθετα την βάση των δύο μηχανών, σκόπιμο είναι η ευθεία τομής των εξωτερικών επιπέδων να είναι χονδρικά παράλληλη με την βάση των μηχανών και να απεικονίζεται κοντά στον άξονα x της εικόνας. Αυτό σημαίνει ότι η μία ομάδα σημείων θα είναι, γενικά, στην πάνω περιοχή της εικόνας και η άλλη στην κάτω (Εικ. 5.1).

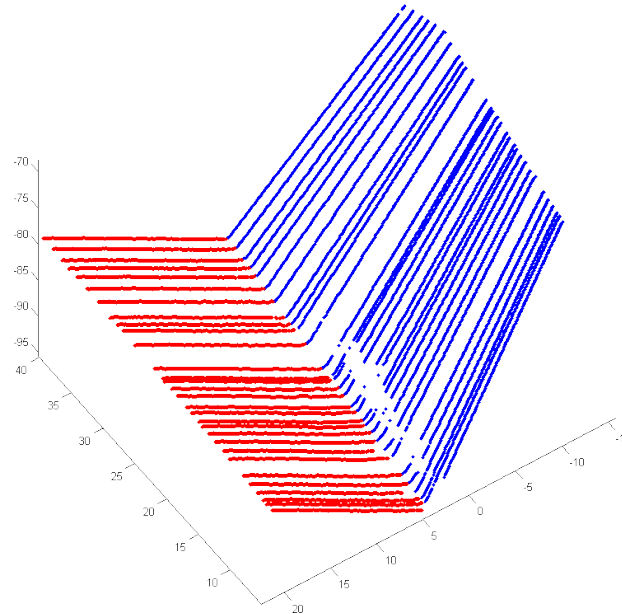


Εικόνα 5.1: Τυπικό στερεοζεύγος για την σάρωση των εξωτερικών επιπέδων (Επίπεδα 1 και 2).

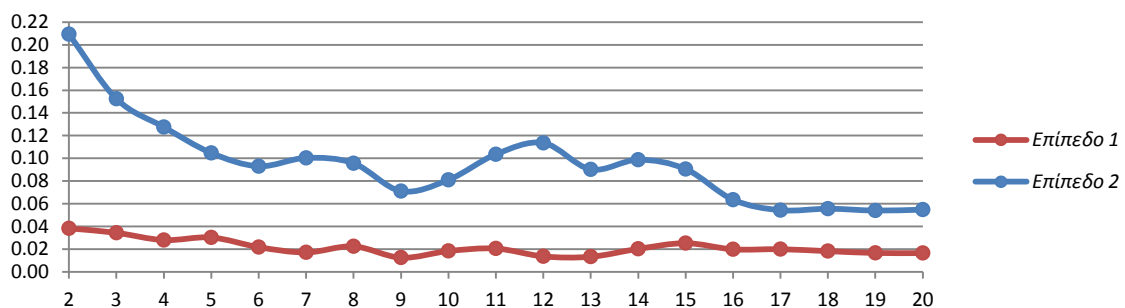
Αυτό διευκολύνει τον αυτόματο διαχωρισμό των σημείων κάθε στερεοζεύγους στις δύο ομάδες των 3D σημείων που αντιστοιχούν στα δύο εξωτερικά επίπεδα (τα σημεία προσδιορίζονται με απλή εμπροσθοτομία, βλ. ενότητα 5.3.1) ώστε να προσαρμοστούν δύο 3D ευθείες στα ανακατασκευασμένα σημεία. Αρχικά προσαρμόζεται μία 3D ευθεία στο σύνολο των σημείων ενός στερεοζεύγους με χρήση της μεθόδου RANSAC (Fischler & Bolles, 1981, Hartley & Zisserman, 2000). Όσα σημεία γίνονται αποδεκτά αποθηκεύονται, στα δε υπόλοιπα προσαρμόζεται μία δεύτερη 3D ευθεία, της οποίας τα σημεία αποθηκεύονται χωριστά. Τα δύο σημειοσύνολα διακρίνονται σε “πάνω” και “κάτω” βάσει της μέσης εικονοσυντεταγμένης τους y σε μία από τις δύο εικόνες. Αυτό επαναλαμβάνεται για όλα τα στερεοζεύγη, οπότε τελικά προκύπτουν δύο, θεωρητικά επίπεδα, νέφη σημείων (Εικ. 5.2), στα οποία και προσαρμόζονται εξισώσεις επιπέδου.

Έχει φανεί από πειραματισμούς ότι για να υπολογιστούν οι συντελεστές των επιπέδων δεν απαιτείται μεγάλος αριθμός στερεοζευγών. Η Εικ. 5.3 δείχνει πώς μεταβάλλεται, συναρτή-

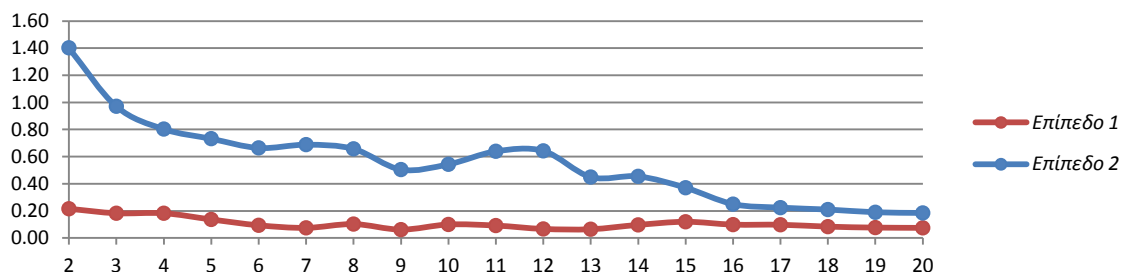
σει του αριθμού των ζευγών (και άρα του αριθμού των 3D ευθειών ανά επίπεδο), η διαφορά της γωνίας των προσδιοριζόμενων επιπέδων και της απόστασής τους από την αρχή του συστήματος συντεταγμένων σε σύγκριση με τα αποτελέσματα από 30 ζεύγη (δηλαδή από 30 ευθείες ανά επίπεδο). Παρατηρείται ότι πέραν των 15 στερεοζευγών (15 ευθειών ανά επίπεδο) οι διαφορές ήδη είναι πολύ μικρές. Γενικά πάντως πρέπει για ασφάλεια να λαμβάνεται μεγαλύτερος αριθμός στερεοζευγών και το laser να καλύπτει πλήρως τα επίπεδα.



Εικόνα 5.2: Τα δύο επίπεδα νέφη σημείων όπως διαχωρίζονται μετά από την σάρωση.



(α) γωνίες σε μοίρες



(β) απόσταση σε mm

Εικόνα 5.3: Μεταβολή συναρτήσεων του αριθμού των 3D ευθειών ανά επίπεδο της διαφοράς α) της κλίσης του επιπέδου από την κλίση του επιπέδου από 30 ευθείες, β) της απόστασης του επιπέδου από την αρχή του συστήματος συντεταγμένων από την απόσταση του επιπέδου από 30 ευθείες.

Ακόμα, στο συγκεκριμένο παράδειγμα της Εικ. 5.1 το “Επίπεδο 1” σχηματίζει μικρότερη γωνία με τα επίπεδα των εικόνων σε σχέση με το “Επίπεδο 2” και επίσης καταλαμβάνει μεγαλύτερη έκταση στις εικόνες. Συνέπεια είναι να υπολογίζονται τα στοιχεία του με υψηλότερη συνοχή (βλ. Εικ. 5.3). Πάντως ακόμα και για το “Επίπεδο 2” η διαφορά της γωνίας του μετά από τα 15 στερεοζεύγη σε σύγκριση με τα 30 είναι περί τις $0^{\circ}.05$, ενώ και η διαφορά της απόστασής του από την αρχή του συστήματος δεν ξεπερνά τα 0.2 mm.

Με αυτή την διαδικασία αρχίζει η σάρωση των αντικειμένων. Είναι προφανές ότι μέχρι την ολοκλήρωση κάθε σάρωσης, η σχετική θέση των επιπέδων και των μηχανών πρέπει να παραμένει αμετάβλητη. Σκόπιμο είναι όμως, εάν αυτό είναι δυνατόν, να παραμένει η σχέση αυτή αμετάβλητη και καθ’ όλη την διάρκεια της σάρωσης του αντικειμένου, δηλαδή να παραμένουν ακίνητες οι μηχανές και τα επίπεδα αλλά να κινείται το αντικείμενο προκειμένου να σαρωθεί πλήρως. Στην περίπτωση αυτή, σε μία ενιαία συνόρθωση όλων των επιμέρους σαρώσεων οι εξισώσεις των επιπέδων παραμένουν οι ίδιες. Αυτό βέβαια σημαίνει ότι στην τυπική διαδικασία πλήρους σάρωσης το σύστημα των μηχανών και τα επίπεδα παραμένουν ακίνητα, ενώ είναι το αντικείμενο που στρέφεται ή/και μετατίθεται προκειμένου να σαρωθεί πλήρως.

5.3. Αλγόριθμοι 3D ανακατασκευής

Όπως έχει αναφερθεί, για την ανακατασκευή του 3D μοντέλου (τα 3D σημεία του χώρου που ανακατασκευάζονται από κάθε θέση σάρωσης ορίζουν μια απεικόνιση 2.5D) διατυπώθηκαν εδώ και αξιολογήθηκαν επιλύσεις με και χωρίς επιβολή μίας ή περισσότερων γεωμετρικών δεσμεύσεων. Οι μέθοδοι που ελέγχθηκαν και εξετάζονται στα επόμενα είναι, επιγραμματικά, οι εξής:

- Εμπροσθοτομία χωρίς δεσμεύσεις
- Αυστηρή δέσμευση άγνωστου επιπέδου laser
- Ελαστική δέσμευση άγνωστου επιπέδου laser
- Αυστηρές δεσμεύσεις άγνωστου επιπέδου laser και γνωστών εξωτερικών επιπέδων
- Ελαστική δέσμευση άγνωστου επιπέδου laser και αυστηρή δέσμευση γνωστών εξωτερικών επιπέδων
- Ενιαία συνόρθωση πλήρους θέσης σάρωσης με ελαστικές δεσμεύσεις άγνωστου επιπέδου laser και άγνωστων εξωτερικών επιπέδων
- Ενιαία συνόρθωση πλήρους θέσης σάρωσης με ελαστικές δεσμεύσεις άγνωστου επιπέδου laser και άγνωστων εξωτερικών επιπέδων με ταυτόχρονη πρόσθετη δέσμευση εξομάλυνσης
- Ενιαία συνόρθωση όλων των θέσεων σάρωσης με ελαστικές δεσμεύσεις άγνωστου επιπέδου laser και άγνωστων εξωτερικών επιπέδων χωρίς και με πρόσθετη δέσμευση εξομάλυνσης.

5.3.1. Εμπροσθοτομία χωρίς δεσμεύσεις

Έχει ήδη γίνει αναφορά στις απλές εξισώσεις της παράλλαξης για τον υπολογισμό των 3D συντεταγμένων σημείων του χώρου στην κανονική περίπτωση του στερεοζεύγους:

$$\begin{aligned} X &= \frac{Bx_1}{p} = B - \frac{Bx_2}{p} \\ Y &= \frac{By_1}{p} = \frac{By_2}{p} \\ Z &= -\frac{Bc}{p} \end{aligned} \quad (5.1)$$

όπου:

X, Y, Z	οι συντεταγμένες χώρου του σημείου στο σύστημα της αριστερής εικόνας
$p = x_1 - x_2$	η παράλλαξη του σημείου
x_1, x_2, y_1, y_2	οι εικονοσυντεταγμένες του σημείου ($y_1 \equiv y_2$)
B	το μήκος της βάσης του στερεοζεύγους
c	η κοινή σταθερά των δύο εικόνων (οι επιπολικές εικόνες έχουν κοινό c).

Οι συντεταγμένες X, Y, Z που προκύπτουν από τις Εξ. (5.1) αναφέρονται στο σύστημα συντεταγμένων της αριστερής επιπολικής εικόνας. Έτσι, η επίλυση πραγματοποιείται χωρίς περίσσεια δεδομένων αφού $y_1 \equiv y_2$ (δηλαδή δεν υπάρχει έλεγχος για την ακρίβεια της ανακατασκευής). Παράλληλα, τα αποτελέσματα της επίλυσης αυτής αποτελούν αρχικές τιμές για όλες τις υπόλοιπες μεθόδους επίλυσης που παρουσιάζονται στην συνέχεια.

5.3.2. Αυστηρή δέσμευση άγνωστου επιπέδου laser

Στην περίπτωση αυτή λαμβάνεται επιπλέον υπόψη ότι τα 3D σημεία από κάθε ζεύγος οφείλουν να κείνται στο επίπεδο του laser. Έτσι, κατ' αρχάς υπολογίζονται με απλές εμπροσθοτομίες προσεγγιστικές τιμές για όλα τα σημεία του στερεοζεύγους και κατόπιν προσαρμόζεται στα σημεία αυτά εξίσωση επιπέδου ώστε να προκύψουν αρχικές τιμές για τους συντελεστές της. Κύριοι άγνωστοι στην τελική επίλυση είναι οι συντεταγμένες X και Z όλων των σημείων ενός στερεοζεύγους, ενώ πρόσθετοι άγνωστοι είναι οι τρεις από τους συντελεστές του επιπέδου $AX + BY + CZ + D = 0$ του laser. Η συντεταγμένη Y των σημείων (που προκύπτει από το επιπολικό επίπεδο) εκφράζεται συναρτήσει της συντεταγμένης Z βάσει της Εξ. (5.1). Δεδομένης της γεωμετρίας της διάταξης, στην εξίσωση του επιπέδου δεσμεύεται ο συντελεστής $A = 1$ λόγω του ότι το επίπεδο laser τέμνει τον άξονα X σχεδόν κάθετα, και άρα είναι $A \neq 0$. Η λύση δίδεται από την σχέση (Mikhail, 1976):

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \mathbf{N}^{-1}\mathbf{u} + \mathbf{N}^{-1}\mathbf{D}_1^T\mathbf{P}_1^{-1}(\mathbf{h} - \mathbf{D}_1\mathbf{N}^{-1}\mathbf{u} - \mathbf{D}_2\mathbf{x}') \\ \mathbf{x}' &= \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{D}_2^T\mathbf{P}_1^{-1}(\mathbf{h} - \mathbf{D}_1\mathbf{N}^{-1}\mathbf{u})) \end{aligned} \quad (5.2)$$

όπου:

x	διάνυσμα διορθώσεων κύριων αγνώστων (συντεταγμένες X, Z σημείων)
x'	διάνυσμα διορθώσεων πρόσθετων αγνώστων (συντελεστές επιπέδου)
A	πίνακας σχεδιασμού
P	πίνακας βαρών
b	διάνυσμα παρατηρήσεων
$N = A^T P A$	πίνακας συντελεστών κανονικών εξισώσεων
$u = A^T P b$	διάνυσμα εναπομενόντων σφαλμάτων
D_1	πίνακας συντελεστών κύριων αγνώστων των εξισώσεων δέσμησης
D_2	πίνακας συντελεστών πρόσθετων αγνώστων των εξισώσεων δέσμησης
$h = D_1 x + D_2 x'$	διάνυσμα σφαλμάτων κλεισίματος των εξισώσεων δέσμησης
$P_1 = D_1 N^{-1} D_1^T$	
$R = D_2^T P_1^{-1} D_2$	

Στην συνόρθωση αυτή οι παρατηρήσεις δεν είναι ισοβαρείς. Κάθε εικονοσημείο συμμετέχει με βάρος αντιστρόφως ανάλογο του τετραγώνου του σφάλματος σ_b με το οποίο προσδιορίστηκε το μέγιστο της καμπύλης Gauss κατά την διαδικασία εξαγωγής του σημείου, όπως αυτή αναλύθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο.

5.3.3. Ελαστική δέσμηση άγνωστου επιπέδου laser

Εδώ η δέσμηση συνεπιτεδότηας δεν είναι ανελαστική, δηλαδή εισάγεται στην συνόρθωση ως ψευδοπαρατήρηση. Άγνωστοι είναι, όπως και προηγουμένως, οι συντεταγμένες X και Z όλων των σημείων ενός στερεοζεύγους, όπως επίσης και οι τρεις συντελεστές B, C, D του επιπέδου του laser. Η επίλυση γίνεται κατά τα γνωστά (Δερμάνης, 1987):

$$x = N^{-1}u \quad (5.3)$$

όπου:

x	διάνυσμα αγνώστων
A	πίνακας σχεδιασμού
P	πίνακας βαρών
b	διάνυσμα παρατηρήσεων
$N = A^T P A$	πίνακας συντελεστών κανονικών εξισώσεων
$u = A^T P b$	διάνυσμα υπολοίπων

Τα βάρη των εξισώσεων παρατήρησης των σημείων είναι ίδια με εκείνα της προηγούμενης επίλυσης (συνάρτηση της αβεβαιότητας προσδιορισμού των εικονοσημείων). Ως βάρος των ψευδοπαρατηρήσεων, οι οποίες αναφέρονται στον 3D χώρο, χρησιμοποιείται το αντίστροφο του τετραγώνου της εδαφοψηφίδας προκειμένου να τις αναγάγει στον χώρο της εικόνας. Είναι σαφές ότι με την χρήση ελαστικών δεσμεύσεων τα τελικά ανακατασκευαζόμενα σημεία δεν θα ικανοποιούν απολύτως την εξίσωση του επιπέδου laser.

5.3.4. Αυστηρές δεσμεύσεις άγνωστου επιπέδου laser και γνωστών εξωτερικών επιπέδων

Από προηγούμενο βήμα (ενότητα 5.2) είναι γνωστές οι εξισώσεις των εξωτερικών επιπέδων στο σύστημα της αριστερής μηχανής, όπως επίσης και αρχικές τιμές από τις Εξ. (5.1) για τις συντεταγμένες χώρου των παρατηρούμενων σημείων ενός στερεοζεύγους. Θέτοντας μία τιμή κατωφλίου για την απόσταση σημείου από επίπεδο, τα σημεία διαχωρίζονται μετά από την σάρωση σε τρία σύνολα. Το ένα σημειοσύνολο περιλαμβάνει τα σημεία της επιφάνειας του αντικειμένου. Τα άλλα δύο περιλαμβάνουν σημεία που ανήκουν στα δύο εξωτερικά επίπεδα, δηλαδή οφείλουν να ικανοποιούν τις εξισώσεις του αντίστοιχου επιπέδου.

Η επίλυση αυτή αποτελεί μία ιδιόζουσα περίπτωση καθώς τα σημεία που ανήκουν στα εξωτερικά επίπεδα ανήκουν ταυτόχρονα και σε δύο γνωστά επίπεδα, δηλαδή το επιπολικό επίπεδο και το επίπεδο του laser. Έτσι, από τα τρία αυτά επίπεδα άγνωστο κατά την επίλυση είναι μόνο το επίπεδο του laser, για το οποίο υπολογίζονται βέλτιστοι συντελεστές. Επομένως, τα σημεία που ανήκουν στα εξωτερικά επίπεδα έχουν μόνο έναν βαθμό ελευθερίας, ο οποίος συναρτάται με την θέση του επιπέδου του laser. Έτσι, σε κάθε επανάληψη υπολογίζεται η συντεταγμένη Z των σημείων αυτών, ενώ οι συντεταγμένες X και Y προκύπτουν από τις δεσμεύσεις του επιπολικού και του αντίστοιχου εξωτερικού επιπέδου. Φυσικά, για τα σημεία του αντικειμένου υπάρχουν, όπως και προηγουμένως, δύο βαθμοί ελευθερίας, οι συντεταγμένες X και Z , ενώ η συντεταγμένη Y προκύπτει από το επιπολικό επίπεδο (στην συνόρθωση εκφράζεται συναρτήσει του Z).

Η επίλυση πραγματοποιείται μέσω της Εξ. (5.2), όπου κύριοι άγνωστοι είναι οι συντεταγμένες των 3D σημείων ενός στερεοζεύγους και πρόσθετοι άγνωστοι είναι οι τρεις ανεξάρτητοι συντελεστές του επιπέδου του laser, ενώ τα βάρη είναι ίδια με εκείνα της επίλυσης που αναλύθηκε στην ενότητα 5.3.2.

5.3.5. Ελαστική δέσμευση άγνωστου επιπέδου laser και αυστηρή δέσμευση γνωστών εξωτερικών επιπέδων

Και σε αυτή την περίπτωση η δέσμευση του επιπέδου laser μπορεί να τεθεί ως ψευδοπαρατήρηση, δηλαδή να αντιμετωπιστεί η δέσμευση ως ελαστική. Έτσι, τα σημεία που υπολογίζονται στα εξωτερικά επίπεδα δεν προκύπτουν μονοσήμαντα, όπως προηγουμένως, ως τομή τριών επιπέδων. Οι άγνωστοι προφανώς είναι οι ίδιοι με την επίλυση της ενότητας 5.3.4, ωστόσο τα σημεία που προκύπτουν τελικά δεν θα ικανοποιούν απολύτως την υπολογιζόμενη εξίσωση του επιπέδου laser.

Η συνόρθωση βασίζεται στην Εξ. (5.3) με βάρη ίδια με εκείνα της ενότητας 5.3.3.

5.3.6. Ενιαία συνόρθωση πλήρους θέσης σάρωσης με ελαστικές δεσμεύσεις άγνωστου επιπέδου laser και άγνωστων εξωτερικών επιπέδων

Οι επίλυσεις ως τώρα αφορούσαν ανεξάρτητα στερεοζεύγη, δηλαδή μεμονωμένες λωρίδες laser. Στην επίλυση αυτής της ενότητας συνορθώνονται ενιαία όλες οι παρατηρήσεις που προκύπτουν από όλα τα στερεοζεύγη μίας θέσης σάρωσης. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει πλέον να αντιμετωπιστούν και τα εξωτερικά επίπεδα ως άγνωστα, δηλαδή να επαναπροσδιοριστούν οι συντελεστές τους με βάση τις αρχικές εκτιμήσεις τους. Για να αυξηθούν μάλιστα οι παρατηρήσεις που αφορούν τα εξωτερικά επίπεδα και να ενισχυθεί γεωμετρικά η λύση, είναι δυνατόν να συμμετέχουν στην συνόρθωση και τα στερεοζεύγη που ελήφθησαν κατά την ανεξάρτητη σάρωση των εξωτερικών επιπέδων (ενότητα 5.2). Οι δεσμεύσεις συνεπιπεδότητας τίθενται ως ψευδοπαρατηρήσεις, και η λύση προκύπτει από την Εξ. (5.3). Τα βάρη είναι ίδια με εκείνα που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη επίλυση.

Αν λοιπόν από μία θέση σάρωσης έχουν προκύψει N στερεοζεύγη (από την σάρωση του αντικειμένου και των εξωτερικών επιπέδων), οι άγνωστοι θα είναι:

- οι 6 συντελεστές των 2 εξωτερικών επιπέδων
- οι 3 συντελεστές για καθένα από τα N επίπεδα του laser
- οι συντεταγμένες X και Z όλων των M σημείων των N λωρίδων laser (η συντεταγμένη Y των σημείων προκύπτει, κατά τα προαναφερθέντα, από το αντίστοιχο επιπολικό επίπεδο, εκφραζόμενη συναρτήσει του Z).

Έτσι το σύνολο των αγνώστων είναι $3 \times 2 + 3 \times N + 2 \times M$. Αξίζει έτσι να επισημανθεί πως σε μια τέτοια επίλυση το πλήθος των εξισώσεων παρατήρησης (και ψευδοπαρατήρησης) και των αγνώστων είναι πλέον αρκετά μεγάλο. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι σε τυπική σάρωση με τις μηχανές δικτύου (ανάλυσης 640×480) από μία θέση σάρωσης προκύπτουν χονδρικά 500.000 εξισώσεις παρατήρησης με 300.000 αγνώστους.

5.3.7. Ενιαία συνόρθωση πλήρους θέσης σάρωσης με πρόσθετη δέσμευση εξομάλυνσης

Η προηγούμενη επίλυση αφορά μία θέση σάρωσης (μία περιοχή της επιφάνειας του αντικειμένου), οπότε κάθε σημείο υπολογίζεται μαζί με όλα τα γειτονικά του. Μπορεί λοιπόν να εισαχθεί στην ίδια την διαδικασία της συνόρθωσης και μία “εσωτερική” δέσμευση εξομάλυνσης. Η δέσμευση αυτή τίθεται ως ψευδοπαρατήρηση (δηλαδή όχι ως αυστηρή δέσμευση), η οποία κάθε φορά εμπλέκει $n + 1$ άγνωστες παραμέτρους Z και έχει την εξής μορφή:

$$Z_{point} = \sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{n} \quad (5.4)$$

όπου:

Z_{point} η συντεταγμένη Z του εκάστοτε σημείου

Z_i οι συντεταγμένες Z των γειτονικών σημείων

n το πλήθος των συμμετεχόντων γειτονικών σημείων.

Η Εξ. (5.4) δεσμεύει την συντεταγμένη Z του εκάστοτε σημείου ώστε να μην διαφέρει πλέον ενός ορίου από τις συντεταγμένες Z των γειτονικών του σημείων, δηλαδή έχει ως συνέπεια την εξομάλυνση του προκύπτοντος νέφους σημείων (η συντεταγμένη Z επιλέχτηκε λόγω της δεδομένης γεωμετρίας του συστήματος). Η εύρεση των γειτονικών σημείων πραγματοποιείται στο επίπεδο της αριστερής επιτολικής εικόνας του ζεύγους. Γειτονικό θεωρείται κάθε σημείο εντός ενός παραθύρου περί το εξεταζόμενο σημείο. Η απαιτούμενη γνώση της αντιστοιχίας μεταξύ 3D χώρου (ακριβέστερα 2.5D χώρου) και εικόνας υπάρχει από την διαδικασία ανίχνευσης κορυφών, μέσω της οποίας έχουν ήδη αποθηκευτεί όσα ζεύγη ομόλογων εικονοσημείων πρόκειται να συμμετάσχουν στην ανακατασκευή.

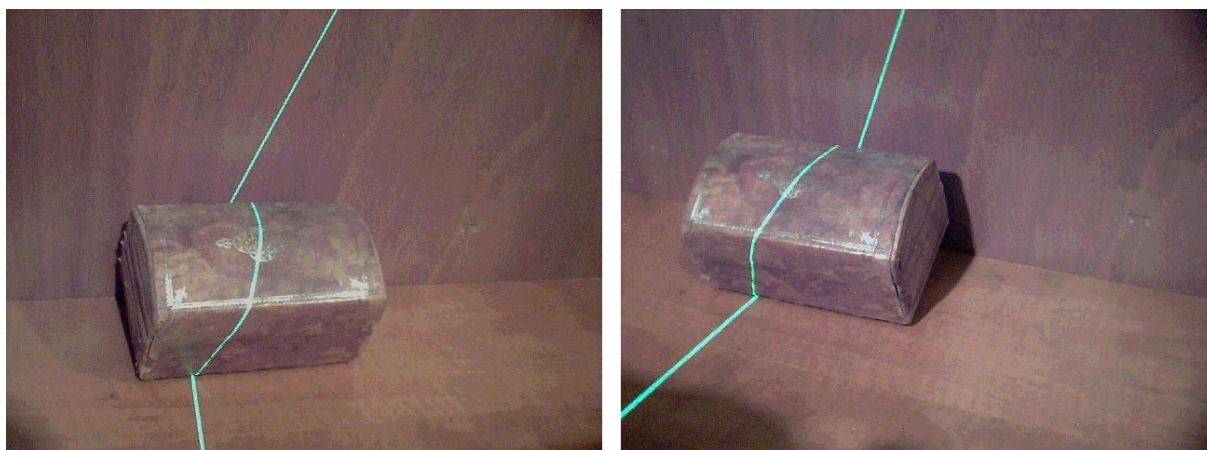
Το μέγεθος του παραθύρου προφανώς επηρεάζει τον βαθμό εξομάλυνσης. Στο πλαίσιο της διατριβής αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί μικρό παράθυρο μεγέθους 3×3 , καθώς στο επόμενο Κεφάλαιο θα αναλυθούν πιο εξειδικευμένες μέθοδοι για την *a posteriori* εξομάλυνση νέφους σημείων.

Ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει το *a posteriori* τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους σ_o για την επίλυση αυτής καθώς και της προηγούμενης ενότητας. Δεδομένου του μέσου βάρους των σημείων των αντικειμένων, μπορεί να εκτιμηθεί το σφάλμα σ_o των επιλύσεων σε μονάδες pixel. Το βάρος των σημείων, όπως αναφέρθηκε, ισούται με $1/\sigma_b^2$, όπου σ_b (pixel) το σφάλμα εκτίμησης της θέσης της κορυφής, όπως αυτό περιγράφηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο. Τα αντικείμενα του Πίνακα 5.1 είναι ένας κύλινδρος (Εικ. 5.5), ένας κουμπαράς (Εικ. 5.7β), ένα δερμάτινο κουτί και μία κεραμική κεφαλή (Εικ. 5.4).

Πίνακας 5.1. Τυπικό σφάλμα 3D ανακατασκευής

Αντικείμενο	Μέση ακρίβεια προσδιορισμού εικονοσημείων σ_b (pixel)	Ενιαία συνόρθωση πλήρους θέσης σάρωσης		Ενιαία συνόρθωση πλήρους θέσης σάρωσης με δέσμευση εξομάλυνσης	
		σ_o	σ_o (pixel)	σ_o	σ_o (pixel)
κύλινδρος	0.07	0.93	0.06	1.11	0.07
κουμπαράς	0.09	1.21	0.11	1.28	0.12
δερμάτινο κουτί	0.09	1.18	0.11	1.23	0.11
κεραμικό κεφάλι	0.09	1.35	0.12	1.39	0.12

Από τον Πίνακα 5.1 φαίνεται ότι, τουλάχιστον στα συγκεκριμένα παραδείγματα, δεν εμφανίστηκαν αισθητές διαφορές μεταξύ των δύο επιλύσεων, δηλαδή το σφάλμα της συνόρθωσης δεν αυξήθηκε σημαντικά με την εισαγωγή της δέσμευσης εξομάλυνσης. Αυτό σημαίνει ότι, εφόσον η διαδικασία έχει πραγματοποιηθεί με προσοχή και έχουν ήδη απαλειφθεί τυχόν χονδροειδώς αποκλίνουσες τιμές με κριτήριο την ακρίβεια εκτίμησης της θέσης του μεγίστου της έντασης (ενότητα 4.16), γενικά δεν αναμένονται σημαντικά χονδροειδή σφάλματα. Η διαδικασία αυτή εξομάλυνσης, ωστόσο, σκόπιμο είναι να διατηρείται ως ένα βασικό μέτρο προφύλαξης, ιδιαίτερα δε αφού λόγω του μικρού μεγέθους του χρησιμοποιούμενου παραθύρου δεν αλλοιώνει σημαντικά την ανακατασκευή.



(α)



(β)

Εικόνα 5.4: Τυπικά ζεύγη κατά την σάρωση α) του δερμάτινου κουτιού και β) της κεραμικής κεφαλής.

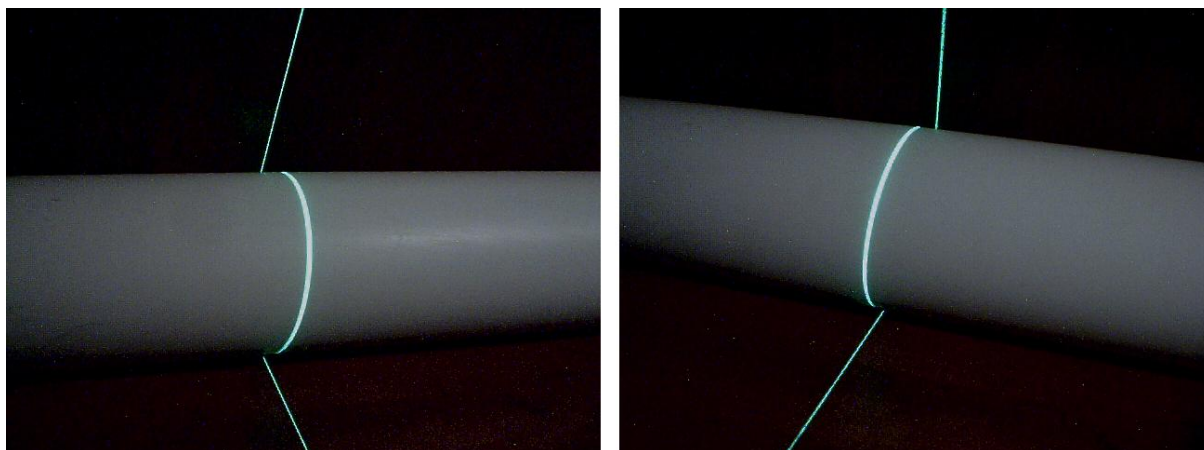
5.3.8. Κοινή συνόρθωση πολλών θέσεων σάρωσης με και χωρίς πρόσθετη δέσμευση εξομάλυνσης

Οι δύο προηγούμενες επιλύσεις μπορούν να επεκταθούν συμπεριλαμβάνοντας περισσότερες θέσεις σάρωσης σε μία ενιαία επίλυση. Ο μόνος περιορισμός που υπάρχει εν προκειμένω είναι η διατιθέμενη υπολογιστική ισχύς. Κάθε θέση σάρωσης που προστίθεται συνεπάγεται αύξηση του αριθμού των αγνώστων και των εξισώσεων παρατήρησης κατά την προαναφερθείσα τάξη μεγέθους. Η επίλυση κατά τα άλλα παραμένει στην ουσία ίδια με τις δύο προηγούμενες, αλλά προστίθενται περισσότερες παρατηρήσεις για τα εξωτερικά επίπεδα.

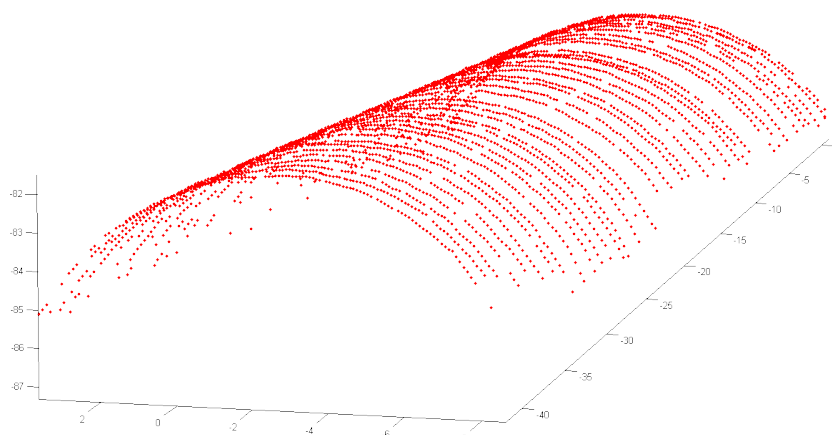
5.4. Αξιολόγηση μεθόδων επίλυσης

Οι διαφορετικές μέθοδοι 3D ανακατασκευής συγκρίθηκαν αρχικά με την σάρωση κυλινδρικής επιφάνειας (Εικ. 5.5) και την προσαρμογή κυλίνδρου στο νέφος σημείων (Εικ. 5.6) που προέκυψε μετά από επιλύσεις με όλες τις προαναφερθείσες μεθόδους. Ο κύλινδρος είναι ένας σωλήνας PVC ονομαστικής διαμέτρου 125 mm. Η σάρωση έγινε από μία θέση σάρωσης σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού, και συνολικά ελήφθησαν 37 στερεοζεύγη (37 λωρίδες la-

ser). Τα νέφη σημείων από τις διαφορετικές επιλύσεις περιελάμβαναν 3721 σημεία, τα οποία κάλυπταν περί το 35% της περιφέρειας του αντικειμένου. Κριτήριο ακρίβειας των μεθόδων είναι το σ_0 τυπικό σφάλμα της προσαρμογής εξίσωσης κυλίνδρου, ενώ πρόσθετο κριτήριο ορθότητας είναι η ίδια η τιμή της διαμέτρου της προσαρμοσμένης επιφάνειας. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.2.



Εικόνα 5.5: Τυπικό στερεοζεύγος από την σάρωση του κυλίνδρου.



Εικόνα 5.6: Ανακατασκευή κυλίνδρου (επίλυση: “ενιαία συνόρθωση πλήρους θέσης σάρωσης”).

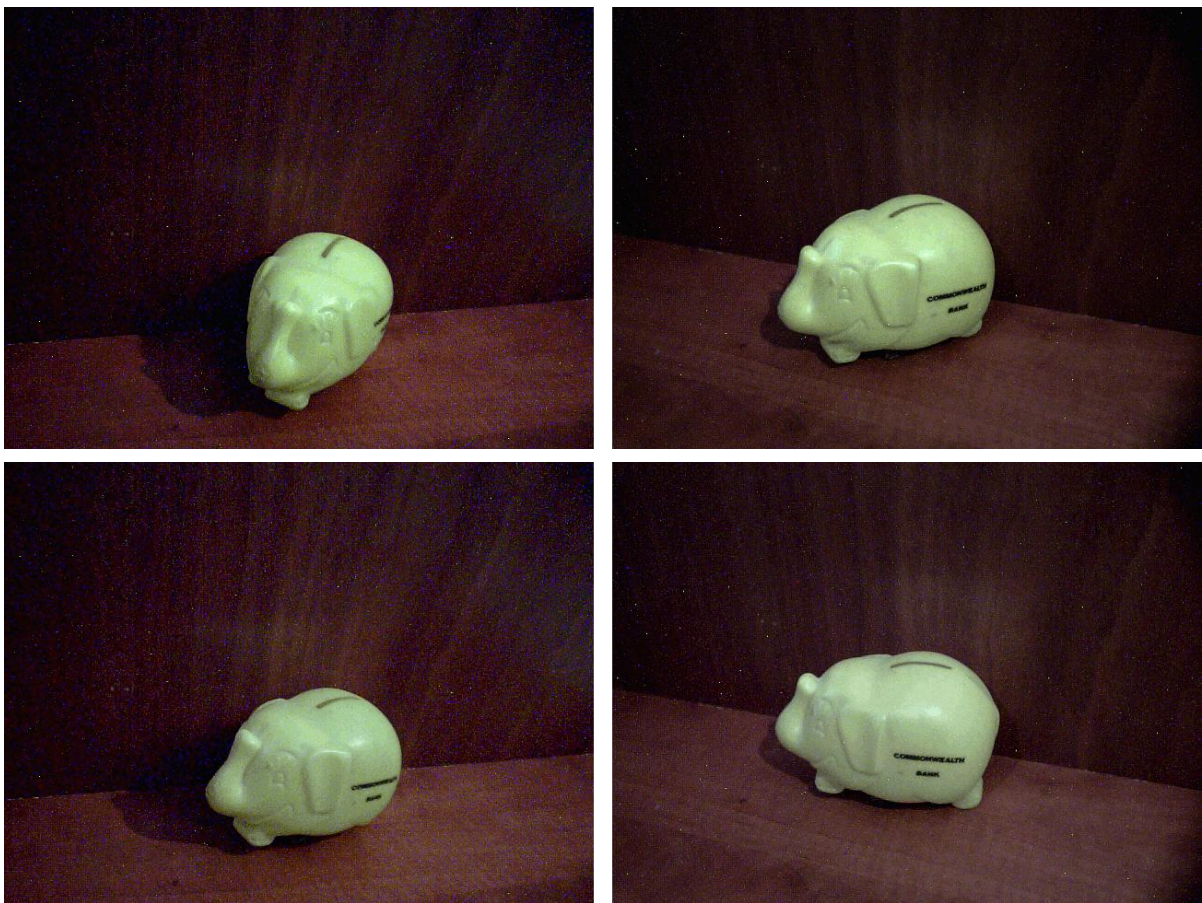
Πίνακας 5.2. Ακρίβεια προσαρμογής κυλίνδρου (σ_0) ανά μέθοδο επίλυσης

Μέθοδος επίλυσης	Διάμετρος κυλίνδρου (mm)	Τυπικό σφάλμα διαμέτρου (mm)	σ_0 (mm)
Εμπροσθοτομία χωρίς δεσμεύσεις	125.32	0.04	0.21
Αυστηρή δέσμευση άγνωστου επιπέδου <i>laser</i>	125.28	0.04	0.21
Ελαστική δέσμευση άγνωστου επιπέδου <i>laser</i>	125.23	0.04	0.19
Αυστ. δεσμ. άγν. επιπ. <i>laser</i> και γνωσ. εξωτερικών επιπέδων	125.31	0.04	0.20
Ελασ. δέσμ. άγν. επιπ. <i>laser</i> και αυστ. δέσμ. γνωσ. εξωτ. επιπ.	125.15	0.04	0.19
Ενιαία συνόρθωση πλήρους θέσης σάρωσης	125.08	0.04	0.19
Ενιαία συνόρ. πλήρους θέσης σάρωσης με δέσμ. εξομάλυνσης	125.11	0.04	0.19

Από τον Πίνακα 5.2 προκύπτει ότι η διαδοχική επιβολή δεσμεύσεων εμφανίζεται να βελτιώνει την ακρίβεια αλλά και την γεωμετρική ορθότητα του νέφους σημείων. Αν και οι διαφο-

ρές είναι όντως μικρές, μια δεύτερη παρατήρηση είναι ότι, γενικά, οι ελαστικές δεσμεύσεις δίνουν καλύτερα αποτελέσματα (αφού οι άκαμπτες δεσμεύσεις περιορίζουν την ελευθερία της επίλυσης, με αποτέλεσμα τυχόν σφάλματα στις δεσμεύσεις να οδηγούν σε εσφαλμένη εκτίμηση των σημείων). Σημαντική ακόμα είναι η επισήμανση ότι η ενιαία συνόρθωση όλων των λωρίδων laser, που συνδυάζεται με ελαστικές δεσμεύσεις, εμφανίζει μεγαλύτερη εγγύτητα ανακατασκευής προς την γεωμετρία της πραγματικής επιφάνειας (διάμετρος).

Ανάλογα συμπεράσματα προκύπτουν και από έλεγχο επαναληψιμότητας των μεθόδων. Για τον σκοπό αυτό έγινε επικαλυπτόμενη σάρωση και ανακατασκευή, με όλες τις μεθόδους, ενός αντικειμένου από δύο διαφορετικές θέσεις. Το αντικείμενο ήταν ένας πλαστικός κουμπάρας (Μ-Π-Υ: 15-10-10 cm), η σάρωση από δύο θέσεις (Εικ. 5.7) έγινε με βάση του συστήματος των μηχανών περί τα 40 cm και από απόσταση λήψης 90 cm (μέγεθος εδαφοψηφίδας ~1 mm). Τα δύο νέφη από κάθε μέθοδο ανακατασκευής συνταυτίστηκαν στην κοινή περιοχή τους (βλ. ενδεικτικό αποτέλεσμα στην Εικ. 5.8) με την επαναληπτική μέθοδο πλησιέστερου σημείου (ICP), η οποία αναλύεται στο επόμενο Κεφάλαιο (ενότητα 6.3). Κριτήριο της ακρίβειας είναι εδώ η μέση τετραγωνική απόσταση (RMS) των τελικών πλησιέστερων σημείων μετά το πέρας της συνταύτισης, η οποία είναι ένδειξη για την ομοιότητα των ανεξάρτητων ανακατασκευών με τις δύο μεθόδους.



Εικόνα 5.7: Τα στερεοζεύγη υποβάθρου (πάνω και κάτω) για τις δύο θέσεις σάρωσης.

Ο Πίνακας 5.3 παρουσιάζει την μέση τετραγωνική απόσταση (RMS) των πλησιέστερων σημείων όπως αυτά προέκυψαν μετά από την προσαρμογή με τον αλγόριθμο ICP. Ως κοντινά

σημεία θεωρήθηκαν όσα απείχαν απόσταση μικρότερη των 2 mm. Επίσης, στον ίδιο πίνακα φαίνεται το πλήθος των σημείων των δύο νεφών που συνενώνονται και το πλήθος των ομολογιών. Οι τιμές RMS που προέκυψαν θεωρούνται συγκρίσιμες διότι τα ομόλογα σημεία σε όλες τις μεθόδους είναι ουσιαστικά ισάριθμα (περί τα 9000). Το πλήθος των θέσεων σάρωσης στην μέθοδο της κοινής επίλυσης περισσότερων θέσεων ήταν προφανώς δύο.

Πίνακας 5.3. Έλεγχος επαναληψιμότητας βάσει της συνταύτισης νεφών

Μέθοδος επίλυσης	Πλήθος σημείων			RMS αποστάσεων (mm)
	Νέφος 1	Νέφος 2	Ομόλογα	
<i>Εμπροσθοτομία χωρίς δεσμεύσεις</i>	17476	18855	9028	0.269
<i>Αυστηρή δέσμευση άγνωστου επιπέδου laser</i>	17265	18555	8938	0.263
<i>Ελαστική δέσμευση άγνωστου επιπέδου laser</i>	17476	18855	9053	0.266
<i>Αυστ. δεσμ. άγν. επιπ. laser και γνωσ. εξωτερικών επιπ.</i>	17476	18855	8973	0.272
<i>Ελασ. δέσμ. άγν. επιπ. laser και αυστ. δέσμ. γνωσ. εξ. επιπ.</i>	17476	18855	9018	0.266
<i>Ενιαία συνόρθωση πλήρους θέσης σάρωσης</i>	17476	18855	9050	0.264
<i>Ενιαία συνόρ. πλήρ. θέσης σάρωσης με δέσμ. εξομάλυνσης</i>	17476	18855	9060	0.263
<i>Ενιαία συνόρθωση όλων των θέσεων σάρωσης</i>	17476	18855	9057	0.263
<i>Ενιαία συνόρ. όλων των θέσεων με δέσμευση εξομάλυνσης</i>	17476	18855	9063	0.263

Όπως και στον προηγούμενο Πίνακα 5.2, παρατηρείται εδώ πως οι διαφορές είναι, βέβαια, πολύ μικρές. Σημειώνεται πάντως ότι και εδώ το RMS των αποστάσεων μεταξύ των δύο νεφών βελτιώνεται ελαφρώς με την επιβολή δεσμεύσεων, ενώ η κοινή συνόρθωση λωρίδων ή και θέσεων σάρωσης δίνει καλά αποτελέσματα. Αξίζει, παρεμπιπτόντως, να επισημανθεί ότι οι τιμές RMS της συνταύτισης δύο ανεξάρτητων νεφών δίνουν μια πρώτη εκτίμηση σχετικά με την ακρίβεια της 3D ανακατασκευής ως μέτρο των διαφορών τους. Δεδομένου ότι οι τιμές του Πίνακα 5.3 οφείλονται σε σφάλματα δύο νεφών, η εκτιμώμενη μέση ακρίβεια της ανακατασκευής με την συγκεκριμένη διάταξη είναι, έτσι, περί τα 0.2 mm. Το θέμα της ακρίβειας αναλύεται στο Κεφάλαιο 7.



Εικόνα 5.8: Τα συνενωμένα νέφη σημείων, μετά από τριγωνισμό, με φωτοϋφή (βλ. ενότητα 5.6).

Τέλος, στον Πίνακα 5.4 συγκρίνονται οι επιλύσεις συνόρθωσης πλήρους θέσης σάρωσης, με και χωρίς επιβολή εξομάλυνσης, με την εμπροσθοτομία χωρίς δεσμεύσεις. Παρουσιάζονται

οι διαφορές των συντεταγμένων ΔX , ΔY , ΔZ των σημείων μεταξύ των επιλύσεων εκφράσμενες με την μέση τετραγωνική τιμή και την μέγιστη διαφορά τους. Παρουσιάζεται, δηλαδή, το μέγεθος της μετακίνησης των σημείων που επιφέρουν οι δεσμεύσεις ή και η εξομάλυνση. Η σύγκριση έχει γίνει για τον κουμπαρά (Εικ. 5.7β) και το δερμάτινο κουτί (Εικ. 5.4α).

Πίνακας 5.4 Σύγκριση νεφών σε σχέση με την επίλυση χωρίς δεσμεύσεις (σε mm)

	κουμπαράς (18.855 σημεία)		κουτί (12.565 σημεία)	
	<i>Ενιαία συνόρθωση πλήρους θέσης σάρωσης</i>	<i>Ενιαία συνόρθωση πλήρους θέσης σάρωσης με δέσμευση εξομάλυνσης</i>	<i>Ενιαία συνόρθωση πλήρους θέσης σάρωσης</i>	<i>Ενιαία συνόρθωση πλήρους θέσης σάρωσης με δέσμευση εξομάλυνσης</i>
RMS ΔX	0.001	0.001	0.002	0.002
RMS ΔY	0.000	0.000	0.000	0.000
RMS ΔZ	0.005	0.005	0.007	0.007
max ΔX	0.035	0.036	0.051	0.051
max ΔY	0.009	0.009	0.012	0.014
max ΔZ	0.167	0.170	0.173	0.176

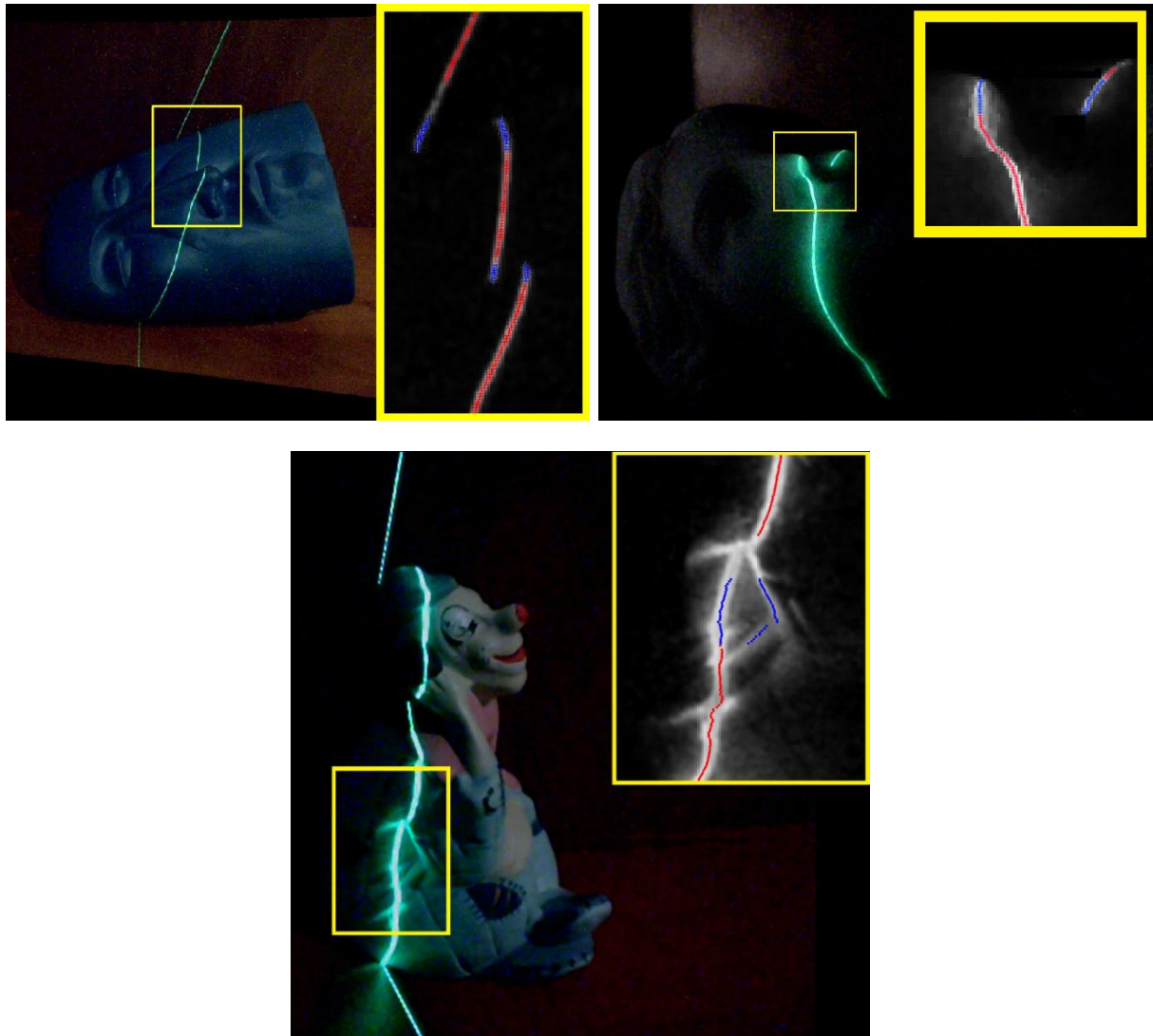
Οι τιμές RMS είναι μικρές, άρα στα περισσότερα σημεία η μετακίνηση που επιβάλλουν οι επιλύσεις είναι σχεδόν αμελητέα. Οι μέγιστες, όμως, διαφορές δεν είναι αμελητέες, δηλαδή υπάρχουν περιοχές όπου η παρέμβαση των δεσμεύσεων είναι σημαντική, και μάλιστα βελτιωτική των αποτελεσμάτων (όπως φαίνεται στους Πίνακες 5.2, 5.3). Οι μεγαλύτερες μεταβολές συμβαίνουν βέβαια στην διεύθυνση του βάθους (ενώ είναι γενικά πολύ μικρές στην διεύθυνση Y , η οποία επηρεάζεται μόνον από την κλίμακα, δηλαδή τις μεταβολές στην τιμή του Z). Η επίδραση της εξομάλυνσης δεν φαίνεται να έχει κάποια αισθητή επίδραση.

Γενικό συμπέρασμα από τους προηγηθέντες ελέγχους είναι ότι η ενιαία λύση με γεωμετρικές δεσμεύσεις είναι προτιμότερη τόσο από άποψη αποτελεσμάτων όσο και χάρη στο ότι ενισχύεται η γεωμετρική σταθερότητα των επιλύσεων (robustness), αφού οι επιβαλλόμενες δεσμεύσεις αφορούν το σύνολο της ανακατασκευής. Πάντως, η δέσμευση εξομάλυνσης εύλογα αναμένεται ότι θα αντιμετωπίζει προβλήματα σε περιοχές απότομης αλλαγής κλίσης της επιφάνειας. Έτσι, στο επόμενο κεφάλαιο αναπτύσσεται διαδικασία για την εκ των υστέρων εξομάλυνση του νέφους σημείων, στην οποία λαμβάνονται υπόψη οι αλλαγές κλίσης.

5.5. Πολλαπλά μέγιστα

Στην ενότητα 4.14 αναφέρθηκε ότι ενδέχεται, σε μία ή και στις δύο ομόλογες επιπολικές ευθείες, να εντοπιστούν περισσότερες από μια κορυφές λόγω αποκρύψεων σε περιοχές απότομων μεταβολών του αναγλύφου ή και λόγω αντανάκλασεων της επιφάνειας του αντικειμένου (Εικ. 5.9). Κάθε συνδυασμός κορυφής στην αριστερή εικόνα με κορυφή στην δεξιά δίνει ένα 3D σημείο. Από τα σημεία αυτά πρέπει να διαχωριστούν και να γίνουν δεκτά όσα αποτελούν αληθή σημεία της επιφάνειας. Έτσι, τα πολλαπλά σημεία αποθηκεύονται χωριστά

κατά την διαδικασία εντοπισμού σημείων και ελέγχονται μετά από την συνόρθωση ως εξής. Οι επιλύσεις που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες δίνουν και την πληροφορία των συντελεστών των επιπέδων του laser. Κριτήριο εγκυρότητας, συνεπώς, ενός τέτοιου 3D σημείου αποτελεί η απόστασή του από το αντίστοιχο επίπεδο του laser. Αν λοιπόν τεθεί ένα κατώφλι απόστασης, μπορούν να αναγνωριστούν τα έγκυρα σημεία και να τα προστεθούν στο νέφος που έχει ήδη δημιουργηθεί.

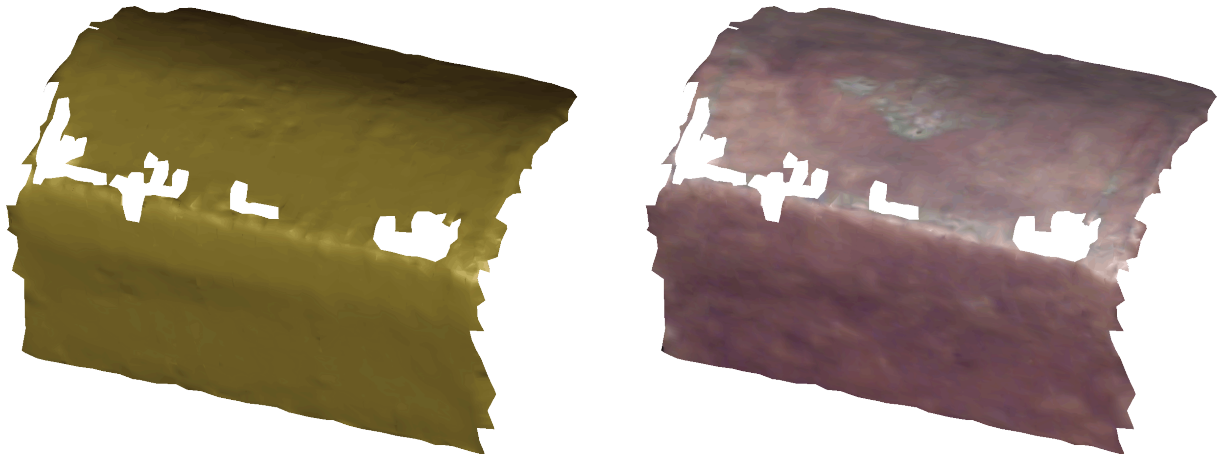


Εικόνα 5.9: Μία κορυφή (κόκκινα σημεία) και δύο κορυφές (μπλε σημεία) κατά μήκος των επιπολικών γραμμών. Στα δύο επάνω παραδείγματα ο εντοπισμός δύο κορυφών επί της επιπολικής οφείλεται σε αποκρύψεις λόγω απότομων μεταβολών του αναγλύφου, ενώ στο κάτω παράδειγμα οφείλεται σε αντανάκλαση.

5.6. Απόδοση φωτοϋφής

Μετά από την ανακατασκευή, η σχέση μεταξύ του 3D χώρου και των εικόνων είναι γνωστή. Είναι δυνατόν, επομένως, τα σημεία που έχουν ανακατασκευαστεί να λάβουν πληροφορία τόνου από τις εικόνες υποβάθρου προκειμένου να συμπληρωθεί το νέφος σημείων με φω-

τοῦφῃ (ὅπως πχ. στο παράδειγμα της Εικ. 5.10). Σε περίπτωση που η σάρωση πραγματοποιείται υπό δυσμενείς συνθήκες φωτισμού, είναι δυνατόν να ληφθούν νέες εικόνες υποβάθρου υπό καλύτερες συνθήκες φωτισμού. Τελικά, στην θέση της απεικόνισης κάθε 3D σημείου στις δύο εικόνες υποβάθρου παρεμβάλλεται τόνος, και ο μέσος όρος των τόνων αποδίδεται στο εκάστοτε σημείο.



Εικόνα 5.10: Το τριγωνισμένο μοντέλο του δερμάτινου κουτιού της Εικ. 5.4α από μία σάρωση, χωρίς και με φωτοϋφή.

Η απόδοση χρώματος στα συλλεγέντα σημεία του νέφους είναι ένας άμεσος τρόπος για την δημιουργία μοντέλων χρωματισμένων με φωτοϋφή, για μια πρώτη οπτικοποίηση, και υλοποιήθηκε εδώ απλώς επειδή είναι διαθέσιμα τα δεδομένα. Η απόδοση φωτοϋφής υψηλής ποιότητας στο τριγωνισμένο 3D μοντέλο, με χρωματισμό των τριγώνων του, είναι βέβαια μια αρκετά πιο σύνθετη διαδικασία, βασιζόμενη πχ. στην δημιουργία ενός “άτλαντα υφής” (texture atlas) με την μείξη χρώματος από γειτονικές εικόνες (βλ. ενδεικτικά Rocchini et al., 2002, Hernández Esteban, 2004). Όμως το θέμα αυτό δεν εμπίπτει στο αντικείμενο της διατριβής.

Μέχρι τώρα έχουν παρουσιαστεί οι διαδικασίες με τις οποίες συλλέγεται το πρωτογενές νέφος σημείων. Ειδικότερα, στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν και αξιολογήθηκαν μέθοδοι 3D ανακατασκευής των σημείων με χρήση πρόσθετων γεωμετρικών δεσμεύσεων. Στο Κεφάλαιο που ακολουθεί αναλύονται οι διαδικασίες που απαιτούνται για να προκύψει ένα εξομαλυμένο νέφος σημείων του πλήρους αντικειμένου.

ΣΥΝΕΝΩΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΝΕΦΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ

6

```
if FileName ==0
    return
end

set(handles.drop_pose,'enable','on');
set(handles.delete_but,'enable','on');
set(handles.del_outliers,'enable','on');
set(handles.smooth_but,'enable','on');
set(handles.smooth_thresh,'enable','on');
set(handles.check_smooth_size,'enable','on');
set(handles.save_but,'enable','on');
set(handles.export_but,'enable','on');

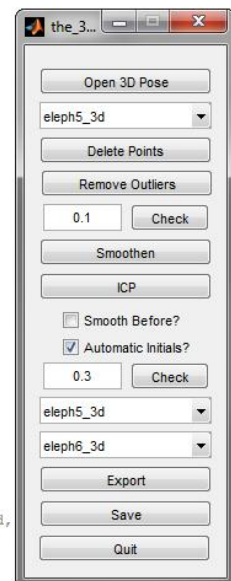
handles.numofposes = handles.numofposes +1;
if handles.numofposes>=2
    set(handles.icp_but,'enable','on');
end

% Update drop list
contents = cellstr(get(handles.drop_pose,'String'));
contents{handles.numofposes,1} = FileName(1:end-4);
set(handles.drop_pose,'String',contents)
% Load Data
pcd_cloud = cell2mat(struct2cell(load([PathName FileName])));
handles.pcd{handles.numofposes}.cloud = pcd_cloud;
% PCD color
ind = mod(handles.numofposes,6)+1;
handles.pcd{handles.numofposes}.color = handles.color_code(ind);
% PCD figure handle
scrsz = get(0,'ScreenSize');
figsize = scrsz + [250 0 -250 0];
handles.pcd{handles.numofposes}.fighand = handles.numofposes * 100;

figure(handles.pcd{handles.numofposes}.fighand)
set(handles.pcd{handles.numofposes}.fighand,'name',FileName(1:end-4),'NumberTitle','off','Pos
plot3(handles.pcd{handles.numofposes}.cloud(:,1),handles.pcd{handles.numofposes}.cloud(:,2),h

guidata(hObject, handles);

% --- Executes on button press in delete_but.
function delete_but_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to delete_but (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure containing handles and variable values specified in the gui function, this
function delete_but_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to delete_but (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure containing handles and variable values specified in the gui function, this
```



6. Συνένωση και επεξεργασία νεφών σημείων

6.1. Εισαγωγικά

Η διαδικασία σάρωσης αντικειμένων μπορεί να χωριστεί σε δύο βασικές φάσεις. Η πρώτη είναι η συλλογή και διαχείριση της πληροφορίας ώστε αρχικά να αποκτηθεί ένα νέφος σημείων, διαδικασία που αναλύθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο. Η δεύτερη φάση αφορά την επεξεργασία των καταγεγραμμένων σημειοσυνόλων. Οι δύο κύριες διαδικασίες της δεύτερης αυτής ενότητας είναι, αφενός, η συνένωση των ανεξάρτητων επικαλυπτόμενων νεφών ώστε να προκύψει ένα πλήρες 3D σημειοσύνολο του αντικειμένου και, αφετέρου, η εξομάλυνση αυτού του ενιαίου νέφους ώστε να αφαιρεθούν, κατά το δυνατόν, οι επιδράσεις του θορύβου των μετρήσεων. Οι διαδικασίες αυτές, όπως επίσης και ορισμένες άλλες επικουρικές, εξετάζονται στο παρόν Κεφάλαιο.

6.2. Διαγραφή σημείων

Μετά από την καταγραφή ενός νέφους σημείων μπορεί συχνά να προκύψει η ανάγκη να διαγράψει απευθείας ο ίδιος ο χρήστης έναν αριθμό σημείων. Τα σημεία αυτά είναι δυνατόν να έχουν προκύψει είτε ως σφάλματα που για κάποιον λόγο δεν έχουν εντοπιστεί και αφαιρεθεί αυτομάτως ή, συνηθέστερα, μπορεί να αποτελούν τμήμα του νέφους που περιγράφει σημεία εκτός του καθαυτό αντικειμένου (πχ. στηρίγματα). Έτσι, πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα να διαγράφονται τα σημεία αυτά με απλό οπτικό έλεγχο του νέφους σημείων.

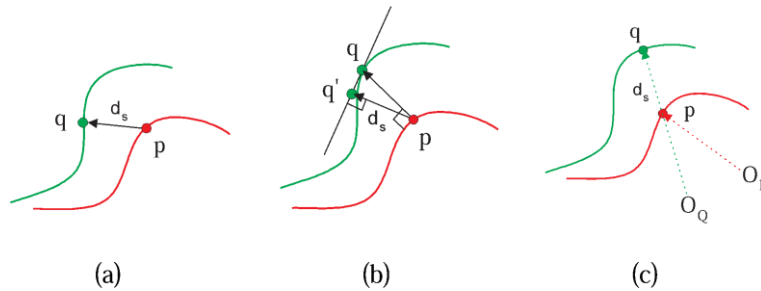
6.3. Συνένωση νεφών σημείων

6.3.1. Γενικά

Όπως συμβαίνει και με τους περισσότερους σαρωτές, για να προκύψει το πλήρες 3D μοντέλο ενός αντικειμένου απαιτείται συνήθως σάρωσή του από διαφορετικές θέσεις. Έτσι, από κάθε θέση σάρωσης καταγράφεται ένα νέφος σημείων που αναφέρεται στο σύστημα συντεταγμένων της αριστερής επιπολικής εικόνας. Τα νέφη αυτά πρέπει να συνενωθούν σε κοινό σύστημα συντεταγμένων. Προς τούτο συνήθως επιβάλλεται μετασχηματισμός στερεού σώματος μεταξύ των νεφών, δηλαδή τρεις στροφές και τρεις μεταθέσεις, αλλά βέβαια είναι δυνατοί και άλλοι μετασχηματισμοί, πχ. μετασχηματισμός ομοιότητας (Akca, 2004).

Για την συνένωση δύο σημειοσυνόλων αναφέρονται πολλές μέθοδοι στην βιβλιογραφία, οι οποίες μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες (Park & Subbarao, 2005), όπως φαίνεται σχηματικά και στην Εικ. 6.1. Στην πρώτη περίπτωση αντιστοιχίζονται σημεία του ενός σημειοσυνόλου με σημεία του δεύτερου. Η σημαντικότερη μέθοδος αυτής της κατηγορίας είναι η

επαναληπτική μέθοδος πλησιέστερου σημείου (Iterative Closest Point – ICP) (Besl & McKay, 1992, Zhang, 1994). Στη δεύτερη κατηγορία μεθόδων, σημεία του ενός συνόλου αντιστοιχίζονται με επιφάνεια του δεύτερου (Bergevin et al., 1996, Chen & Medioni, 1992, Akca, 2004, Park & Subbarao, 2005), ενώ στην τρίτη περίπτωση αντιστοιχίζονται μεταξύ τους σημεία τα οποία έχουν προκύψει ως προβολές στις δύο επιφάνειες μέσω των σημείων συλλογής των νεφών (Blais & Levine, 1995). Η συνένωση νεφών στην παρούσα διατριβή πραγματοποιείται με την επαναληπτική μέθοδο πλησιέστερου σημείου (ICP), που γενικά είναι η πιο διαδεδομένη και ελεγμένη, ενώ ταυτόχρονα υπάρχουν και αρκετές υλοποιήσεις της στο Διαδίκτυο.



Εικόνα 6.1: Κατηγορίες μεθόδων συνένωσης σημειοσυνόλων: αντιστοίχιση a) σημείου με σημείο, b) σημείου με επιφάνεια, c) σημείου με προβολή σημείου (κατά Park & Subbarao, 2005).

Ο αλγόριθμος ICP αναπτύχθηκε με τις δημοσιεύσεις των Besl & McKay (1992), Chen & Medioni (1992) και Zhang (1994), οι οποίοι στηρίχτηκαν στο μαθηματικό μοντέλο των Arun et al. (1987) που υπολογίζει, με ανάλυση ιδιοζυγών τιμών (SVD), την βέλτιστη στροφή και μετάθεση μεταξύ δύο σημειοσυνόλων με δεδομένες ομολογίες σημείων. Εάν λοιπόν διατίθενται δύο επικαλυπτόμενα νέφη σημείων και αρχική εκτίμηση της μεταξύ τους στροφής και μετάθεσης, ο αλγόριθμος μπορεί συνοπτικά να περιγραφεί ως εξής:

1. Εύρεση ομολογιών μεταξύ των νεφών (εγγύτερα σημεία).
2. Υπολογισμός της κατάλληλης στροφής και μετάθεσης μεταξύ των νεφών ώστε να ελαχιστοποιείται η απόσταση των ομολόγων σημείων.
3. Επανάληψη των βημάτων 1 και 2 έως ότου επέλθει σύγκλιση.

Πρόκειται για τον αλγόριθμο που κυρίως χρησιμοποιείται για την συνένωση σημειοσυνόλων αλλά και για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων στις εργασίες που προτείνουν διαφορετική μέθοδο συνένωσης. Κυριότερα προβλήματα του αλγορίθμου ICP είναι ότι θεωρείται σχετικά αργός και επίσης ότι υπάρχει περίπτωση να συγκλίνει σε τοπικό μέγιστο της συνάρτησης ελαχιστοποίησης. Για τον λόγο αυτό έχουν προταθεί αρκετές παραλλαγές του, όπου εξετάζεται η αλλαγή μίας τουλάχιστον από τις παραμέτρους (Rusinkiewicz & Levoy, 2001):

- Επιλογή υποσυνόλου των ομολόγων σημείων σε ένα ή και τα δύο νέφη
- Επιλογή ομολογιών
- Απόδοση βάρους στις ομολογίες
- Απόρριψη αριθμού ομολογιών
- Τρόπος υπολογισμού της απόστασης του βήματος 2 του αλγορίθμου
- Μέθοδος ελαχιστοποίησης που χρησιμοποιείται στο βήμα 2 του αλγορίθμου.

Για περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τις παραλλαγές του ICP βλ. Rusinkiewicz & Levoy (2001) και Campbell & Flynn (2001).

Στην εργασία των Eggert et al. (1998), της διαδικασίας υπολογισμού του μετασχηματισμού μεταξύ των νεφών προηγείται εξομάλυνσή τους ώστε να υπολογιστεί μετασχηματισμός κατά το δυνατόν ανεξάρτητος τοπικού θορύβου. Έτσι, και στην παρούσα διατριβή προηγείται διαδικασία εξομάλυνσης Laplace (βλ. ενότητα 6.4.1) προκειμένου να υπολογιστούν η βέλτιστη στροφή και μετάθεση μεταξύ των νεφών. Ο αλγόριθμος ICP υπολογίζει την στροφή και μετάθεση μεταξύ των εξομαλυμένων νεφών σημείων, αλλά αυτός ο μετασχηματισμός επιβάλλεται στην συνέχεια στα αρχικά, δηλαδή τα μη εξομαλυμένα, νέφη.

Όπως έχει αναφερθεί, ο αλγόριθμος ICP χρειάζεται αρχική εκτίμηση της στροφής και μετάθεσης μεταξύ των δύο νεφών. Αυτή μπορεί να δοθεί είτε από τον χρήστη είτε με αυτόματες διαδικασίες. Οι τελευταίες χρησιμοποιούν γεωμετρικά ή ραδιομετρικά εργαλεία για την συνένωση νεφών χωρίς εισαγωγή αρχικών τιμών. Οι Faugeras & Hebert (1983) επιτυγχάνουν την συνένωση νεφών μετά από αναγνώριση και συνταύτιση οντοτήτων οριζόμενων στο επικαλυπτόμενο τμήμα των νεφών. Οι Johnson & Hebert (1997) δημιουργούν πολικές απεικονίσεις των νεφών και μέσω αυτών επιτυγχάνουν μία αρχική συνένωση. Οι Mian et al. (2004) χωρίζουν τα νέφη σε τμήματα και υπολογίζουν για κάθε τμήμα έναν τανυστή 4^{ου} βαθμού, και στην συνέχεια προσδιορίζουν ομολογίες μεταξύ των τανυστών βάσει συντελεστή συσχέτισης. Τέλος, ένα ανάλογο του αλγορίθμου SIFT στον 3D χώρο έχουν προτείνει οι Taati et al. (2007) δημιουργώντας περιγραφείς (descriptors) σημείων στα δύο νέφη, βάσει των οποίων εκτιμούνται ομολογίες, και μετά χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος RANSAC για την συνένωση.

Παράλληλα, έχουν προταθεί και ραδιομετρικές μέθοδοι, οι οποίες αξιοποιούν είτε την πληροφορία τόνου RGB που δίνει ο σαρωτής είτε την τιμή έντασης που επιστρέφουν ορισμένοι 3D σαρωτές. Μία χειροκίνητη διαδικασία, η οποία όμως περιγράφει εποπτικά την γεωμετρία της μεθόδου, προτείνουν οι Al-Manasir & Fraser (2006). Αρχικά προσανατολίζεται μία φωτογραφική μηχανή ως προς τον σαρωτή, και εν συνεχεία τα νέφη σημείων που προκύπτουν από διαφορετικές θέσεις σάρωσης προσανατολίζονται βάσει των σχετικών προσανατολισμών που συνδέουν τις φωτογραφικές απεικονίσεις από τις ίδιες θέσεις. Η μέτρηση ομολόγων σημείων για την επίλυση του σχετικού προσανατολισμού γίνεται από τον χρήστη. Αντίθετα, οι Kang et al. (2007) προτείνουν αυτόματη διαδικασία εύρεσης του μετασχηματισμού μεταξύ δύο νεφών με χρήση εικόνων. Εδώ εξάγονται σημεία με τον τελεστή Moravec και βρίσκονται αρχικές ομολογίες με τον συντελεστή συσχέτισης. Η διαδικασία είναι επαναληπτική, καθώς σε κάθε επανάληψη ανιχνεύονται καλύτερες ομολογίες για τα εξαχθέντα σημεία με χρήση του μετασχηματισμού στερεού σώματος μεταξύ των δύο νεφών της προηγούμενης επανάληψης. Τον συγκεκριμένο αλγόριθμο επέκτειναν οι Kang & Zlatanov (2007) και Kang et al. (2009) αλλάζοντας τις εικόνες σε πανοραμικές και χρησιμοποιώντας τον τελεστή SIFT. Τον ίδιο τελεστή χρησιμοποιούν άλλωστε και οι Böhm & Becker (2007) εξάγοντας σημεία από εξωτερικές εικόνες όπως και από τις εικόνες ανακλαστικότητας του σαρωτή, οπότε προσανατολίζουν σε ένα βήμα τα διαφορετικά νέφη σημείων όσο και τις εξωτερικές

εικόνες. Οι Wang & Brenner (2008) εξάγουν σημεία SIFT από τις εικόνες ανακλαστικότητας του σαρωτή και αξιολογούν κάθε σημείο χωριστά βάσει της μέσης και της Γκαουσιανής καμπυλότητας, επιτρέποντας έτσι την απόρριψη σημείων. Μια πιο ολοκληρωμένη λύση προτείνουν οι Barnea & Filin (2007), οι οποίοι αξιοποιούν πληροφορία από φωτογραφική μηχανή προσαρμοσμένη στον σαρωτή για να προσανατολίσουν νέφη σημείων από διαφορετικές θέσεις σάρωσης. Αρχικά εξάγουν σημεία με τον τελεστή SIFT σε εικόνες από τις συγκεκριμένες θέσεις και εξάγουν ομολογίες, οι οποίες ελέγχονται με τον αλγόριθμο RANSAC. Για να υλοποιήσουν τον μετασχηματισμό στερεού σώματος ανάγουν τις ομολογίες στον 3D χώρο, προβάλλοντας τα νέφη στις εικόνες. Η μεθοδολογία αυτή εξετάζεται αναλυτικότερα στα επόμενα, δεδομένου ότι εφαρμόστηκε στο πλαίσιο της διατριβής για να υπολογιστούν αυτοματά οι αρχικές τιμές του ICP. Στην διπλωματική εργασία της Κυπαρίσση (2011), που χρησιμοποιεί παρόμοια προσέγγιση, φαίνεται μάλιστα ότι εάν υπάρχουν αρκετές ομολογίες, η μέθοδος δίνει συγκρίσιμα αποτελέσματα με τον αλγόριθμο ICP. Θαδειχθεί όμως ότι και με πολύ μικρό αριθμό ομολογιών είναι κατ' αρχήν δυνατόν να πάρει κανείς επαρκείς αρχικές τιμές για την εκκίνηση και σύγκλιση του ICP (βλ. και Prokos et al., 2011).

Υπό μία έννοια, οι εργασίες που αξιοποιούν απευθείας ραδιομετρική πληροφορία εξωτερικών εικόνων για την εύρεση αρχικών τιμών για τον ICP μπορούν να θεωρηθούν παραλλαγή της διαδικασίας προσανατολισμού εικόνων στο σύστημα ενός νέφους σημείων βάσει της ραδιομετρικής πληροφορίας (εικόνες έντασης ή εικόνες RGB) που συλλέγει ο ίδιος ο σαρωτής. Στην βιβλιογραφία αναφέρονται αρκετές προσεγγίσεις αυτού του τύπου (Elstrom et al., 1998, Stamos & Allen, 2000, Yu et al., 2001, Dias et al., 2002, Kurazume et al., 2002, Forkuo & King, 2004, Abmayr et al., 2008).

6.3.2. Αυτόματη συνένωση νεφών

Στην παρούσα διατριβή, λοιπόν, έγινε χρήση της ραδιομετρικής πληροφορίας από τις διαθέσιμες εικόνες του υποβάθρου. Προϋποτίθεται επαρκής επικάλυψη των νεφών (η οποία εξασφαλίζεται στην φάση της καταγραφής) για την χρήση του αλγορίθμου ICP, πράγμα που φυσικά σημαίνει ότι υπάρχει και στις εικόνες υποβάθρου επικαλυπτόμενο τμήμα του αντικειμένου μεταξύ των δύο θέσεων σάρωσης. Άρα εφόσον βρεθεί ο υπό αληθή κλίμακα σχετικός προσανατολισμός μεταξύ μίας από τις δύο μηχανές από την μία θέση σάρωσης με μία από τις δύο μηχανές της δεύτερης θέσης, το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως αρχική τιμή για την εκκίνηση του ICP και την μετέπειτα συνένωση των νεφών. Όντως, δεδομένου ότι ο (υπό σωστή κλίμακα) σχετικός προσανατολισμός μεταξύ των δύο μηχανών του συστήματος είναι γνωστός, ο (υπό σωστή κλίμακα) σχετικός προσανατολισμός οποιουδήποτε συνδυασμού εικόνων από τα δύο ζεύγη εικόνων γειτονικών θέσεων σάρωσης μπορεί να δώσει τις ζητούμενες εκτιμήσεις αρχικών τιμών για τον προσανατολισμό των αντίστοιχων νεφών σημείων.

Η διαδικασία αυτή ζητείται να είναι αυτόματη. Επομένως, με την προϋπόθεση ότι στην περιοχή επικάλυψης η επιφάνεια του αντικειμένου έχει επαρκή υφή, είναι δυνατόν μέσω του

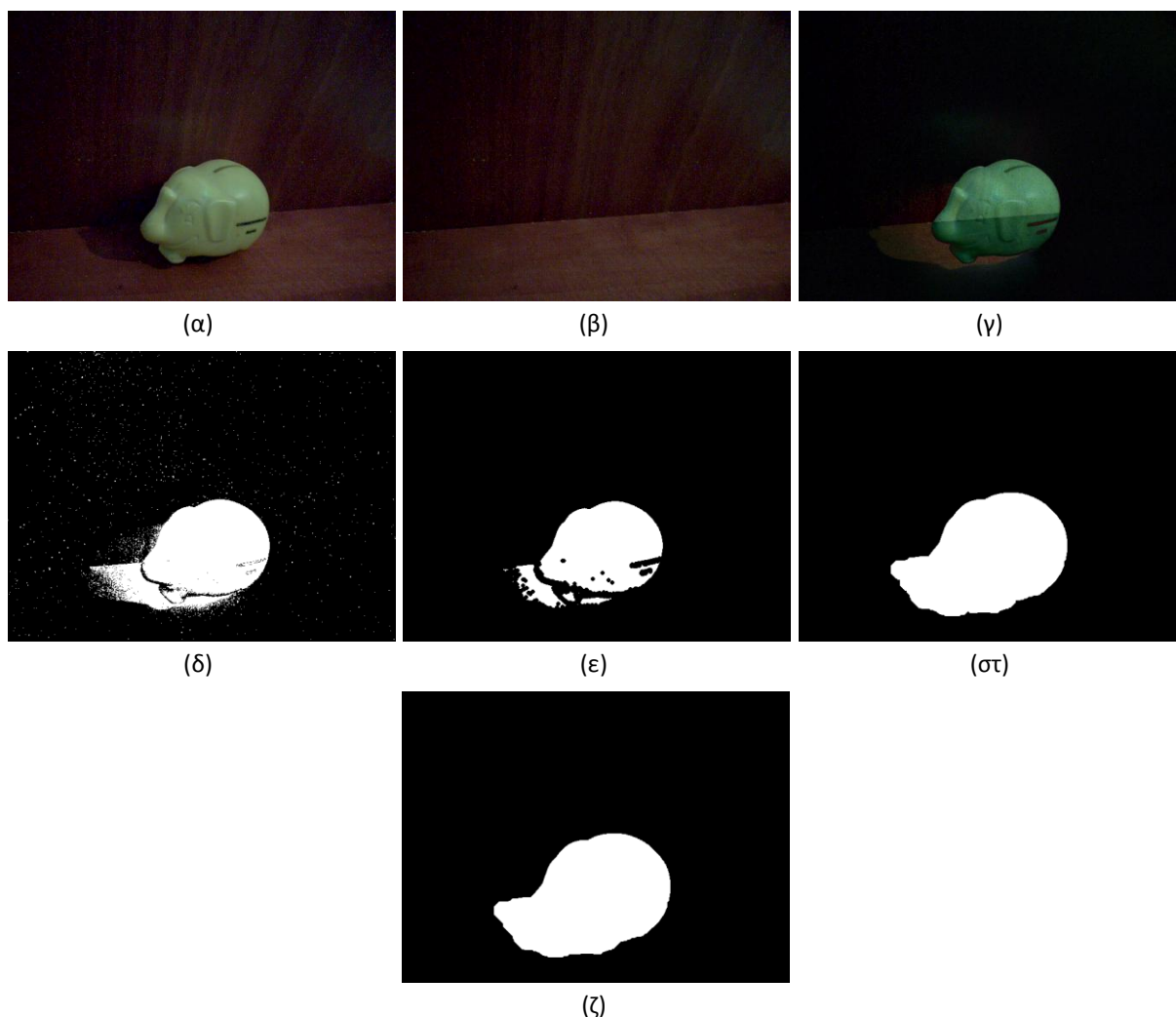
αλγορίθμου SIFT (Lowe, 2004) να εξαχθούν χαρακτηριστικά σημεία με περιγραφείς. Μέσω αυτών εκτιμώνται ομολογίες σημείων μεταξύ των δύο εικόνων, οι οποίες όμως πρέπει επιπλέον να ικανοποιούν την επιπολική γεωμετρία του στερεοζεύγους (το οποίο αποτελείται από μια εικόνα από κάθε θέση σάρωσης). Έτσι, με χρήση του αλγορίθμου RANSAC (Fischler & Bolles, 1981, Hartley & Zisserman, 2000) προσδιορίζονται οι επαληθευόμενες ομολογίες, και μέσω αυτών ο επιπολικός πίνακας του ζεύγους εικόνων (ή απευθείας ο δεσμευμένος επιπολικός πίνακας, δεδομένου πως η γεωμετρία των μηχανών είναι γνωστή – βλ. Μπουτσικάκης, 2003, Καλησπεράκης, 2010). Με τον τρόπο αυτό, έχει προσδιοριστεί ο (υπό άγνωστη κλίμακα) σχετικός προσανατολισμός δύο εικόνων υποβάθρου, μιας από κάθε θέση σάρωσης, και μέσω αυτού (δεδομένης της γνωστής σχέσης των μηχανών του συστήματος) ο σχετικός προσανατολισμός (επίσης με άγνωστη κλίμακα) των νεφών σημείων που έχουν συλλεγεί από αυτές τις θέσεις.

Βέβαια, κατά την εξαγωγή σημείων ενδέχεται να προκύψουν και σημεία που δεν ανήκουν στο αντικείμενο αλλά στο υποβάθρο, δηλαδή τα δύο εξωτερικά επίπεδα. Αλλά από την διαδικασία σάρωσης των εξωτερικών επιπέδων (ενότητα 5.2) υπάρχει η εικόνα υποβάθρου αυτής της σάρωσης, όπως επίσης υπάρχουν και οι εικόνες υποβάθρου από την σάρωση κάθε πλευράς του αντικειμένου. Έτσι (βλ. Εικ. 6.2) η αφαίρεση των εικόνων αυτών, η εν συνεχεία κατωφλίωση της διαφοράς και η διαδοχική εφαρμογή μορφολογικών φίλτρων διάβρωσης, διαστολής και κλεισίματος της κατωφλιωμένης εικόνας οριοθετούν την θέση του αντικειμένου στην εικόνα. Συνεπώς, μόνο όσα εξαχθέντα σημεία ανήκουν πράγματι στο αντικείμενο (λευκή περιοχή Εικόνας 6.2ζ) δικαιούνται να συμμετάσχουν στον προσδιορισμό του σχετικού προσανατολισμού.

Με τον τρόπο αυτό, βέβαια, ενδέχεται να γίνουν κατ' αρχήν δεκτά και σημεία τα οποία ανήκουν στην σκιά του αντικειμένου (βλ. Εικ. 6.2ζ). Για να αποφευχθεί αυτό, λαμβάνονται τα ακόλουθα μέτρα (υπενθυμίζεται ότι στο σύστημα η σχέση μηχανών–υποβάθρου παραμένει σταθερή και οι διαφορετικές θέσεις σάρωσης προκύπτουν από κίνηση του αντικειμένου).

- Στην περίπτωση όπου το ζεύγος αποτελείται από τις δύο αριστερές ή τις δύο δεξιές εικόνες των δύο θέσεων σάρωσης, εξαιρούνται της διαδικασίας προσδιορισμού του προσανατολισμού, ως σημεία της σκιάς, όσα σημεία μετά από την αρχική εκτίμηση των ομολογιών έχουν ίδιες εικονοσυντεταγμένες στις δύο εικόνες.
- Όταν, αντίθετα, το εξεταζόμενο ζεύγος συγκροτείται από μια αριστερή και μια δεξιά εικόνα των δύο θέσεων σάρωσης, αποκλείονται ως σημεία της σκιάς όσα από τα 3D σημεία που προκύπτουν εμπροσθοτομικά από τις κατ' αρχήν ομολογίες από τον αλγόριθμο SIFT ικανοποιούν την εξίσωση ενός των δύο εξωτερικών επιπέδων υποβάθρου.

Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται να επιβαρυνθεί ο αλγόριθμος RANSAC με τον εντοπισμό και τέτοιων εξ ορισμού εσφαλμένων σημείων, πράγμα που πιθανόν θα δυσκόλευε την ανίχνευση των άλλων χονδροειδώς εσφαλμένων ομολογιών που ούτως ή άλλως αναμένεται ότι θα υπάρχουν στα αντιστοιχισμένα σημεία SIFT, τα οποία μάλιστα ενδέχεται να είναι λίγα.



Εικόνα 6.2: α) Εικόνα αντικειμένου. β) Εικόνα των δύο εξωτερικών επιπέδων. γ) Αφαίρεση των δύο προηγούμενων. δ) Κατωφλίωση αφαίρεσης (τιμή κατωφλίου: 30). ε) Μορφολογική διάβρωση κατωφλίωσης (ακτίνα δίσκου: 4 pixel). στ) Μορφολογική διαστολή διάβρωσης (ακτίνα δίσκου: 15 pixel). ζ) Μορφολογικό κλείσιμο διαστολής (ακτίνα δίσκου: 15 pixel). Η εικόνα αυτή αποτελεί “μάσκα” για τα εξαχθέντα σημεία: όσα σημεία ανήκουν στη λευκή περιοχή της εικόνας γίνονται αποδεκτά.

Για την συνέχεια υπάρχουν δύο δυνατές προσεγγίσεις στο πρόβλημα εύρεσης αρχικών τιμών. Στη μία εκδοχή, η υπολογισμένη στροφή και μετάθεση μπορούν να επιβληθούν απευθείας στο δεύτερο νέφος, ώστε αυτό να προσαρμοστεί στο πρώτο. Σκόπιμο είναι βέβαια να προηγηθεί ακριβέστερος προσδιορισμός του σχετικού προσανατολισμού με επαναληπτική διαδικασία (με την συνθήκη συνεπιτεδότητας) και αρχικές τιμές εκείνες που προέκυψαν από την γραμμική επίλυση, ενώ φυσικά πρέπει να υπολογιστεί και η κλίμακα του στερεομοντέλου. Αυτή είναι δυνατόν να εκτιμηθεί από το νέφος σημείων, δηλαδή με το αναχθούν οι ομολογίες εικονοσημείων σε ομολογίες στο νέφος, αφού είναι γνωστή η σχέση που έχουν τα νέφη με τις εικόνες υποβάθρου από την φάση εξαγωγής σημείων (Κεφάλαιο 4). Συγκεκριμένα, αφού σε κάθε σημείο του 3D μοντέλου αντιστοιχεί ένα γνωστό εικονοσημείο σε κάθε εικόνα, μπορεί αντίστροφα σε κάθε εικονοσημείο να παρεμβληθεί ένα 3D σημείο. Από τις αποστάσεις των εξαχθέντων σημείων στο στερεομοντέλο και το νέφος προκύπτει η ζητούμενη εκτίμηση της κλίμακας.

Στην πράξη φάνηκε πως η τελευταία αυτή διαδικασία είναι ευαίσθητη σε σφάλματα. Ενώ δηλαδή προκύπτει καλή αρχική εκτίμηση για την στροφή των δύο νεφών, η εκτιμώμενη μετάθεσή τους ενδέχεται να μην είναι επαρκής λόγω ανακριβούς εκτίμησης της κλίμακας, γεγονός που σε ορισμένες περιπτώσεις δεν επέτρεψε την εκκίνηση του ICP. Για να αποφευχθεί αυτό, η μετάθεση μπορεί να προκύψει είτε από την διαφορά των κέντρων βάρους των δύο ομολογων 3D σημειοσυνόλων είτε και απλώς από ένα ομόλογο σημείο στα δύο νέφη. Σημειώνεται ότι μια τέτοια λύση με ένα σημείο υιοθετείται στην περίπτωση όπου δεν είναι δυνατόν να βρεθούν στα δύο νέφη περισσότερα ομόλογα σημεία όπως απαιτεί η δεύτερη μέθοδος, η οποία είναι και εκείνη που κατά βάση υιοθετήθηκε στην παρούσα διατριβή.

Η άλλη, λοιπόν, προσέγγιση είναι πιο απλή και στηρίζεται στον μετασχηματισμό στερεού σώματος μεταξύ των δύο νεφών βάσει 3 τουλάχιστον ομολογων 3D σημείων. Τα ομόλογα 3D σημεία προκύπτουν με παρεμβολή των ομολογων εικονοσημείων στα δύο νέφη, όπως προαναφέρθηκε. Η ελαχιστοτετραγωνική επίλυση και αυτού του μετασχηματισμού χρειάζεται αρχικές τιμές, οι οποίες όμως μπορούν να δοθούν κατά τους Arun et al. (1987). Για την προσέγγιση αυτή πρέπει να υπάρχουν 3D ομολογίες για τουλάχιστον 3 εξαχθέντα σημεία SIFT. Σε ορισμένες δοκιμές ήταν αδύνατον να εξαχθούν 3D ομολογίες για όλα τα ομόλογα εικονοσημεία λόγω αποκρύψεων είτε επειδή τα σημεία αυτά ανήκαν σε περιοχή του αντικειμένου που δεν είχε σαρωθεί. Σημειώνεται πως η σάρωση είναι δυνατή σε περιοχές του αντικειμένου με τριπλή ορατότητα (από τις δύο μηχανές και από το επίπεδο του laser). Αν λοιπόν έχει πχ. εξαχθεί σημείο SIFT σε περιοχή του αντικειμένου που αποκρύβεται στην άλλη μηχανή, δεν θα υπάρχει για το σημείο αυτό αντίστοιχο 3D σημείο. Έτσι, για λιγότερες από τρεις 3D ομολογίες πρέπει να εφαρμόζεται, όπως προαναφέρθηκε, η προηγούμενη προσέγγιση που απαιτεί μόνο ένα ομόλογο 3D σημείο για την μετάθεση.

Προφανώς, και για τις δύο προσεγγίσεις χρειάζονται τουλάχιστον 7 ομολογίες σημείων στις εικόνες υποβάθρου προκειμένου να υπολογιστεί ο επιπολικός πίνακας του στερεοζεύγους (ή 8 για τον υπολογισμό του δεσμευμένου επιπολικού πίνακα). Δεν είναι, ωστόσο, απαραίτητο όλες αυτές οι 2D ομολογίες να αναχθούν σε 3D ομολογίες. Για την πρώτη προσέγγιση χρειάζεται μία 3D ομολογία, για την δεύτερη τρεις.

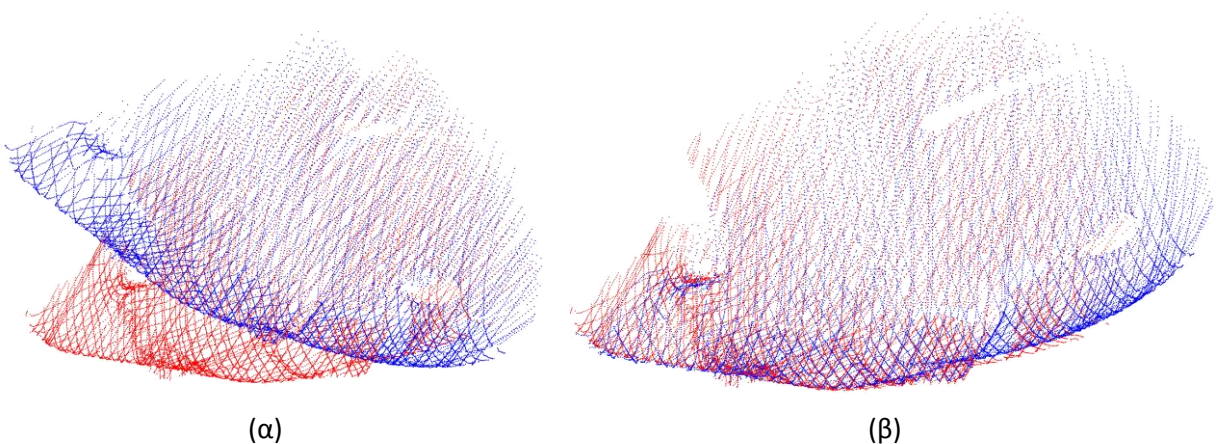
Η διάταξη της παρούσας διατριβής αποτελείται από δύο μηχανές, επιτρέποντας έτσι 4 δυνατά στερεοζεύγη μεταξύ δύο γειτονικών θέσεων σάρωσης. Η διαδικασία εκτελείται για όλα τα δυνατά στερεοζεύγη. Τελικά, ως αρχική τιμή για τον αλγόριθμο του ICP λαμβάνεται ο μέσος όρος των τιμών στροφής και μετάθεσης από όλα τα ζεύγη στα οποία κατέστη δυνατή η εύρεση ομολογιών και αρχικών τιμών για τον μετασχηματισμό.

Στην Εικ. 6.4 παρουσιάζονται τα δύο νέφη (τα οποία αντιστοιχούν στις δύο θέσεις σάρωσης της Εικ. 6.3) πριν και μετά από την διαδικασία εύρεσης και χρήσης αρχικών τιμών. Ακόμα και οπτικά είναι σαφές πως τα νέφη έχουν πλησιάσει επαρκώς ώστε να εφαρμοστεί ο αλγόριθμος ICP. Για καλύτερη εποπτεία, στην Εικ. 6.5α έχει προσαρμοστεί επιφάνεια στα νέφη που έχουν συνενωθεί βάσει αρχικών τιμών μετασχηματισμού στερεού σώματος. Τα δύο σημειοσύνολα έχουν πλησιάσει τόσο ώστε η επιφάνεια που δημιουργείται να περιγράφει αρ-

κετά καλά το αντικείμενο, αλλά και με προφανή παρουσία θορύβου εξαιτίας του ατελούς προσανατολισμού. Η εφαρμογή του ICP, που είναι δυνατή με αυτές τις αρχικές τιμές, επιτρέπει να προσαρμοστούν βέλτιστα τα δύο νέφη (Εικ. 6.5β).

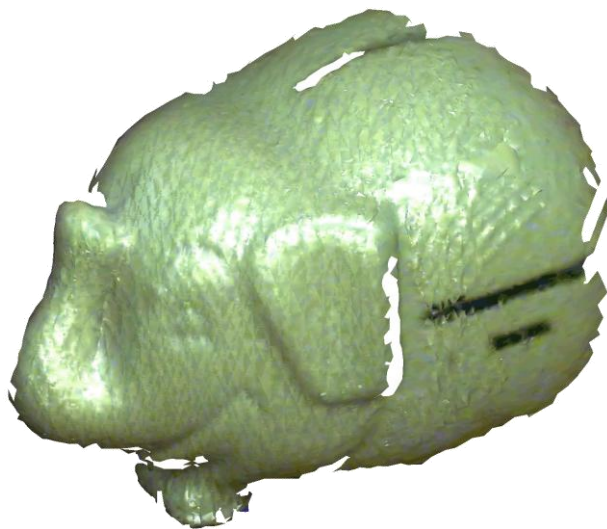


Εικόνα 6.3: Ομολογίες σημείων SIFT. α) Αριστερή εικόνα από την δεύτερη θέση σάρωσης. β) Δεξιά εικόνα από την πρώτη θέση σάρωσης.



Εικόνα 6.4: Τα δύο νέφη σημείων (κόκκινο από την πρώτη θέση, μπλε από την δεύτερη). α) Αρχική θέση. β) Μετά από μετασχηματισμό βάσει αρχικών τιμών.

Στην Εικ. 6.6 παρουσιάζεται και ένα παράδειγμα με δύο στερεοζεύγη, στα οποία αποκαταστάθηκαν ομολογίες σημείων SIFT που βρίσκονται σχεδόν σε μία διεύθυνση (δύο συστάδες σημείων). Παρ' όλη την δυσμενή αυτή κατανομή, ήταν δυνατόν να υπολογιστεί αυτόματα μετασχηματισμός στερεού σώματος, ο οποίος προσάρμοσε επιτυχώς τα δύο επικαλυπτόμενα νέφη (Εικ. 6.7).



(α)



(β)

Εικόνα 6.5: Το συνενωμένο νέφος σημείων με φωτοϋφή: α) μετά από τον μετασχηματισμό βάσει αρχικών τιμών και β) μετά από την εφαρμογή του αλγορίθμου ICP.



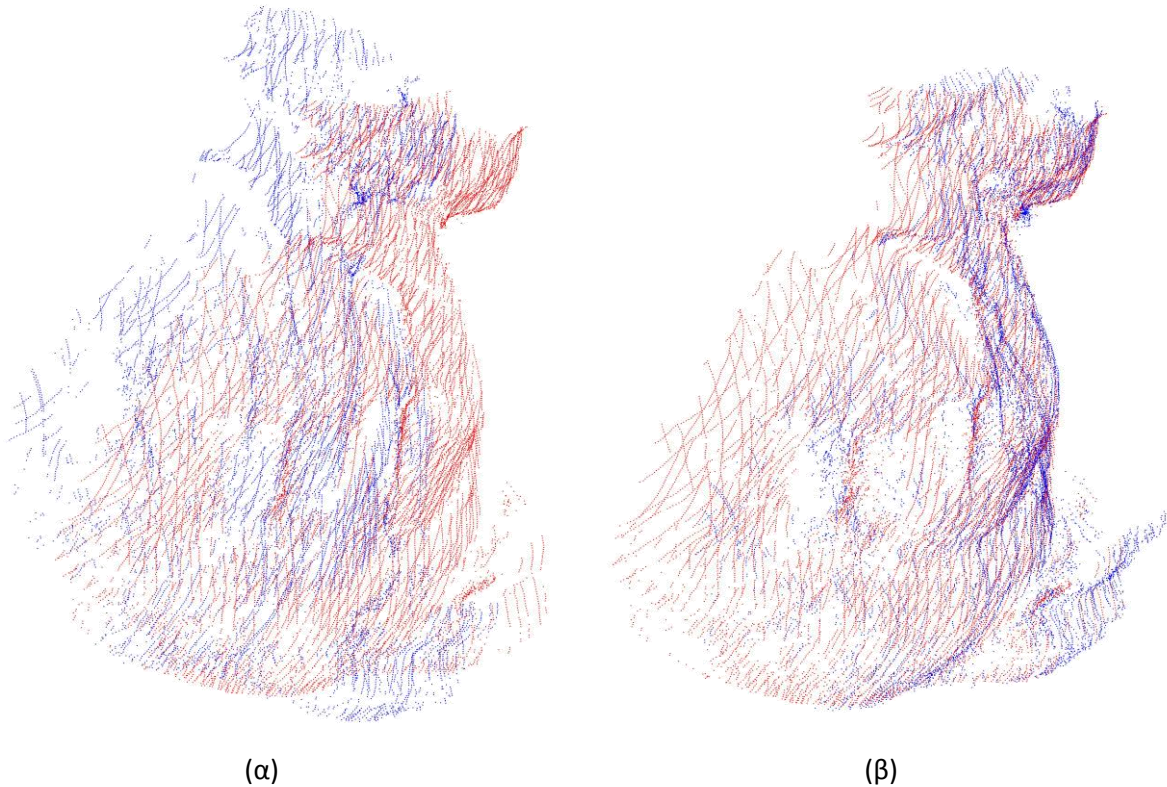
(α)



(β)



Εικόνα 6.6: Δύο στερεοζεύγη: α) Δεξιά εικόνα από την πρώτη θέση σάρωσης με την αριστερή εικόνα της δεύτερης θέσης. β) Δεξιά εικόνα από την πρώτη θέση σάρωσης με την δεξιά εικόνα της δεύτερης θέσης.

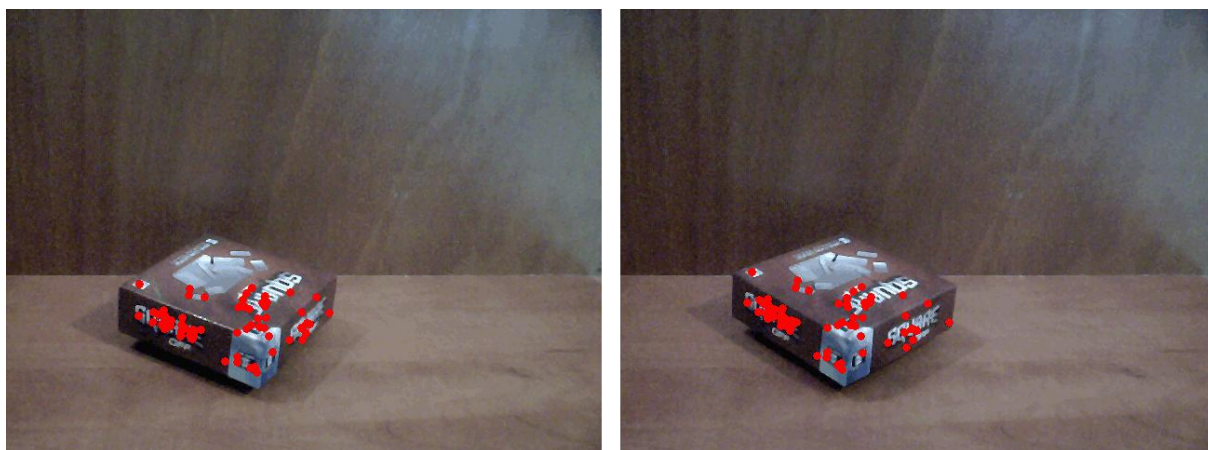


Εικόνα 6.7: Τα δύο νέφη σημείων (κόκκινο από την πρώτη θέση και μπλε από την δεύτερη). α) Αρχική θέση. β) Μετά από τον μετασχηματισμό βάσει αρχικών τιμών.

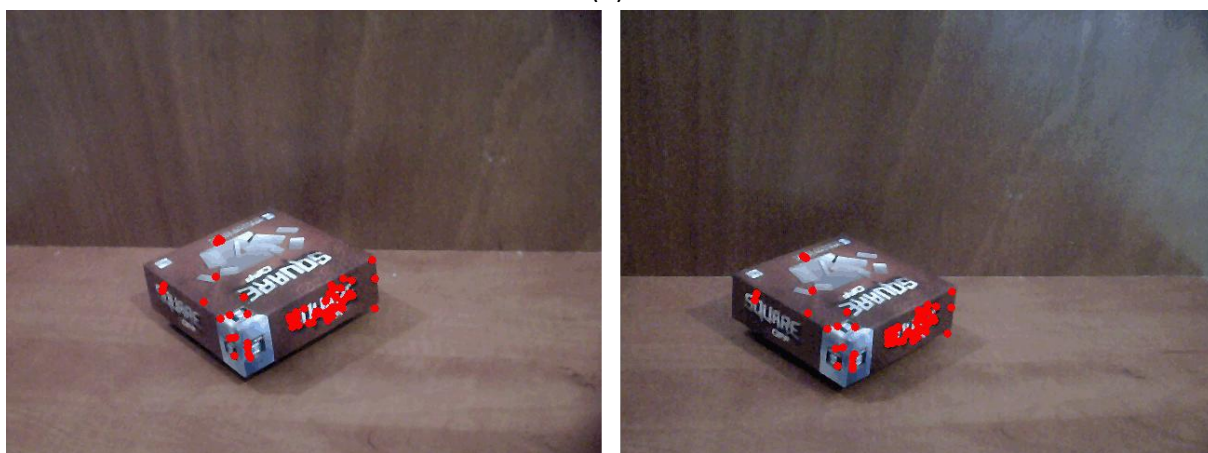
Τέλος, στην Εικόνα 6.8 παρουσιάζεται μια περίπτωση, η αντιμετώπιση την οποίας ήταν πιο απλή γιατί το αντικείμενο, ένα κουτί, είχε έντονη υφή, επιτρέποντας έτσι εξαγωγή πολλών ομόλογων χαρακτηριστικών σημείων. Ακόμα, στην Εικ. 6.9 παρουσιάζονται τα νέφη πριν και μετά από τον μετασχηματισμό βάσει των αρχικών τιμών στροφής και μετάθεσης.

6.4. Εξομάλυνση νέφους σημείων

Η εξομάλυνση ενός νέφους σημείων εφαρμόζεται για να μειωθούν οι επιδράσεις του θορύβου. Είναι μία διαδικασία κατά την οποία τα σημεία ενός συνόλου μετακινούνται με τελικό σκοπό να δημιουργηθεί ένα καινούργιο σημειοσύνολο που θα ικανοποιεί ορισμένες προκαθορισμένες συνθήκες, διατηρώντας όμως κατά βάση την αρχική τοπολογία των σημείων. Ερευνητές από τον χώρο των πεπερασμένων στοιχείων είχαν αρχικά ασχοληθεί με αυτό το ζήτημα της εξομάλυνσης. Στόχος τους ήταν η δημιουργία ενός ομοιογενώς τριγωνισμένου πλέγματος σημείων, το οποίο δηλαδή να αποτελείται από σχεδόν ισόπλευρα τρίγωνα. Η δημιουργία ενός αρχικού πλέγματος ήταν σχετικά απλή διαδικασία, αλλά το πλέγμα έπρεπε να εξομαλυνθεί ώστε να επιτευχθεί η ομοιογένεια. Μία από τις πρώτες μεθόδους εξομάλυνσης είναι η μέθοδος Laplace (Buell & Bush, 1972). Κατά την εξομάλυνση αυτή, το εκάστοτε σημείο του νέφους μεταφέρεται στο κέντρο βάρους των γειτονικών του σημείων ή, όπως αναφέρεται από τους Cavendish (1974) και Lo (1985), στο κεντροειδές του πολυγώνου που το περικλείει.



(α)



(β)

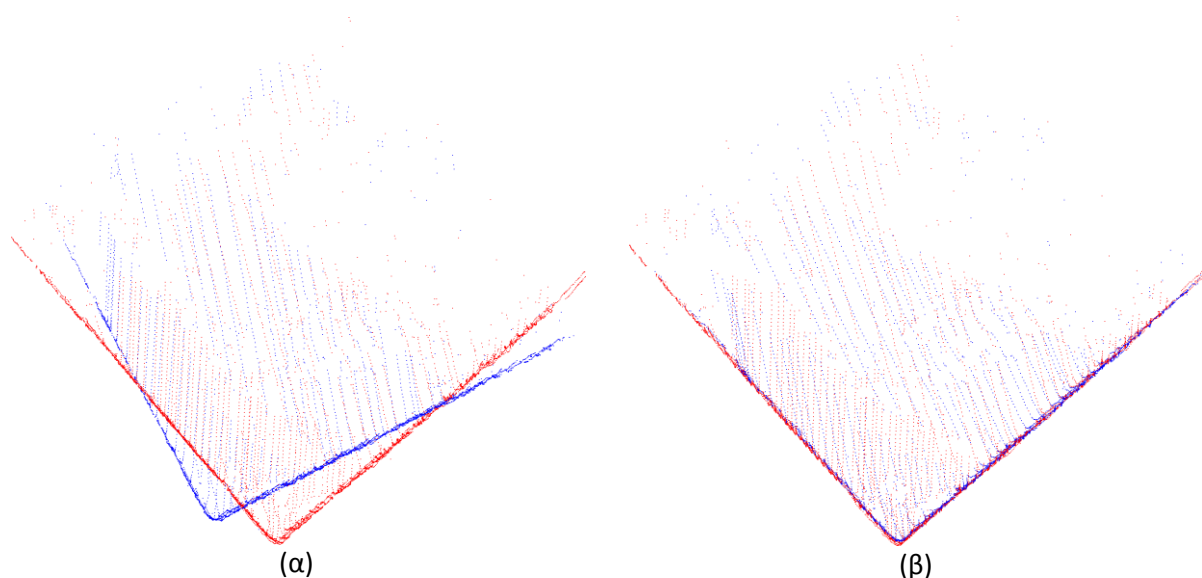


(γ)

Εικόνα 6.8: Τρία ζεύγη από το παράδειγμα του κουτιού: α) Αριστερή εικόνα από την πρώτη θέση σάρωσης με την αριστερή της δεύτερης θέσης. β) Δεξιά εικόνα από την πρώτη θέση σάρωσης με την αριστερή της δεύτερης θέσης. γ) Δεξιά εικόνα από την πρώτη θέση σάρωσης με την δεξιά της δεύτερης θέσης.

Για την μέθοδο Laplace έχουν αναφερθεί πολλές παραλλαγές. Έτσι, οι Blacker & Stephenson (1991) πρότειναν διαφορετικά βάρη για κάθε γειτονικό σημείο κατά τον υπολογισμό του κέντρου βάρους. Ένα από τα προβληματικά χαρακτηριστικά της μεθόδου της εξομάλυνσης Laplace είναι ότι, ενώ για εσωτερικά σημεία του πλέγματος ο αλγόριθμος αποδίδει ικανοποιητικά, ενδέχεται να αλλάξει η τοπολογία των σημείων που βρίσκονται κοντά σε κοίλα ό-

ρια του πλέγματος. Για να αποφευχθούν τέτοιες περιπτώσεις, οι Canann et al. (1997) και Field (1988) προτείνουν την υπό όρους μετακίνηση του εκάστοτε σημείου. Άλλο μειονέκτημα της μεθόδου είναι πως έχει την τάση να αλλοιώνει το σχήμα του αρχικού νέφους μειώνοντας τις εξωτερικές του διαστάσεις. Μάλιστα αν υποτεθεί ότι ο αλγόριθμος εφαρμοστεί άπειρες φορές, το νέφος σημείων θα εκφυλιστεί σε σημείο. Οι Vollmer et al. (1999) προτείνουν λοιπόν να υπολογίζεται κατ' αρχάς η θέση του εκάστοτε σημείου ως το κέντρο βάρους των γειτονικών του, όπως δηλαδή περιγράφεται από την εξομάλυνση Laplace. Σε δεύτερη φάση, για κάθε σημείο υπολογίζεται νέα μετακίνηση που ισούται με το αντίθετο της συνισταμένης των μετακινήσεων των γειτονικών του σημείων όπως αυτές έχουν προκύψει από την πρώτη φάση. Για να αποφεύγεται μείωση των διαστάσεων των νεφών, ο Taubin (1995) προτείνει επαναληπτικό αλγόριθμο που εναλλάσσει διαδικασίες μείωσης και αύξησης των διαστάσεων των νεφών. Τέλος, οι Desbrun et al. (1999) προτείνουν μέθοδο εξομάλυνσης με δέσμευση του όγκου της τελικής επιφάνειας για να αποφεύγεται μείωση των διαστάσεων.



Εικόνα 6.9: Τα δύο νέφη σημείων (κόκκινο από την πρώτη θέση και μπλε από την δεύτερη). α) Αρχική θέση. β) Μετά από τον μετασχηματισμό βάσει αρχικών τιμών.

Οι μέθοδοι εξομάλυνσης εφαρμόζονται συνήθως σε τριγωνισμένα νέφη με δεδομένη τοπολογία, οπότε για κάθε σημείο τα γειτονικά του είναι εκείνα με τα οποία αυτό έχει τοπολογική σύνδεση μέσω του τριγωνισμού. Μια απλή, λοιπόν, μέθοδος εξομάλυνσης αποσκοπεί στο να κατανείμει εξίσου τις γωνίες του εκάστοτε σημείου με τα γειτονικά του, να προκύψουν δηλαδή κατά το δυνατόν μόνον ισόπλευρα τρίγωνα (Radi & Selberherr, 1998). Οι Frey & Field (1991) προτείνουν μία υπό όρους αλλαγή της τοπολογίας του πλέγματος αλλάζοντας τις συνδέσεις μεταξύ των σημείων του και στην συνέχεια επιβάλλουν εξομάλυνση Laplace. Οι Freitag (1997) και Freitag et al. (1999) συνδυάζουν τα δύο αυτά βήματα αλλάζοντας όταν χρειάζεται την τοπολογία του πλέγματος και επιδιώκοντας κατόπιν να μεγιστοποιηθεί η μικρότερη γωνία κάθε τριγώνου (ή τετραέδρου όταν πρόκειται για στερεό σώμα). Οι Parthasarathy & Kodiyalam (1991) προϋποθέτουν πλέγμα που έχει δημιουργηθεί από γεννήτριες πλεγμάτων πεπερασμένων στοιχείων και άρα έχει γνωστή τοπολογία. Η εξομάλυνση εδώ γί-

νεται με την επίλυση ενός συστήματος που δέχεται τις αναλογίες των πλευρών των τριγώνων (ή των τετραέδρων στον τρισδιάστατο χώρο) του πλέγματος. Προστίθεται μάλιστα και η δέσμευση ότι το εμβαδόν κανενός τριγώνου (ή ο όγκος κανενός τετραέδρου σε 3D) δεν θα πέσει κάτω από ένα ορισμένο κατώφλι.

Άλλες προσεγγίσεις χρησιμοποιούν δυνάμεις μετατόπισης για τον καθορισμό έλξης και απώθησης μεταξύ των σημείων του νέφους, οι οποίες είναι δυνατόν να προσομοιωθούν με τις φυσικές δυνάμεις μεταξύ των ατόμων. Οι Shimada (1993) και Yamada et al. (1996) προτείνουν την δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιώντας “φυσαλίδες”. Μεταξύ των φυσαλίδων επιβάλλονται ελκτικές και απωθητικές δυνάμεις, και στα κέντρα τους τοποθετούνται τα σημεία του πλέγματος. Μέσω ελκτικών και απωθητικών δυνάμεων δημιουργούν το πλέγμα και οι Bossen & Heckbert (1996). Να σημειωθεί πάντως ότι οι δύο τελευταίες μέθοδοι δεν αποτελούν αμιγείς μεθόδους εξομάλυνσης διότι, ενώ δημιουργούν εξομαλυμένα πλέγματα, δίνουν την δυνατότητα στον αλγόριθμο να προσθέτει ή να αφαιρεί σημεία ώστε να επιτευχθεί ο στόχος της εξομάλυνσης, αλλάζοντας έτσι την αρχική τοπολογία του πλέγματος.

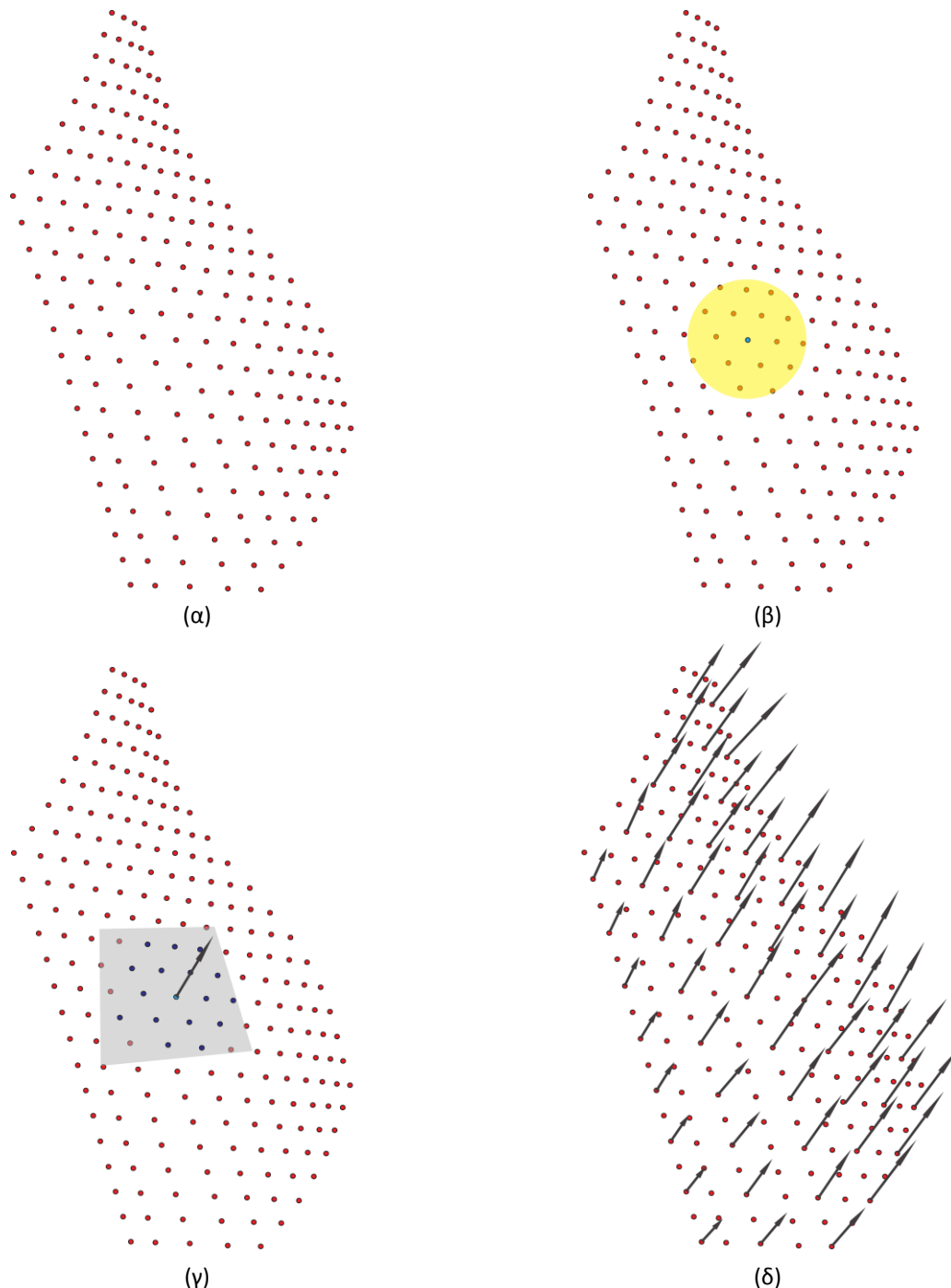
Οι Jones et al. (2003) και Fleishman et al. (2003) εργάζονται με τριγωνισμένα νέφη σημείων. Προβάλλουν κάθε σημείο στα επίπεδα των γειτονικών του τριγώνων και λαμβάνουν ως νέο σημείο τον βεβαρυμμένο μέσο όρο των προβολών. Οι Mederos et al. (2003) εφαρμόζουν παρόμοια διαδικασία αλλά απευθείας σε νέφος σημείων. Για κάθε σημείο προσαρμόζεται επίπεδο στα γειτονικά του και το επίπεδο αυτό θεωρείται ως εκτίμηση της άγνωστης επιφάνειας. Κάθε σημείο συμμετέχει με βάρος μειούμενο με την απόστασή του από το κεντρικό. Στην παρούσα διατριβή η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται απλοποιημένη ως προς τα βάρη και επεκτείνεται ως προς την χρησιμοποιούμενη επιφάνεια.

Ορισμένοι μελετητές έχουν όμως προτείνει και ανισοτροπικές μεθόδους εξομάλυνσης νέφους σημείων, με τις οποίες επιδιώκεται να διαχωριστεί ο θόρυβος από την αλλαγή γεωμετρίας της επιφάνειας. Οι Lange & Polthier (2005) αξιοποιούν την μέση καμπυλότητα ως ανισοτροπικό μέτρο για να επιτύχουν την εξομάλυνση. Οι Zhang et al. (2006) και Richter (2009) αποδίδουν χαρακτηριστικά πεδίου θερμοκρασίας στο νέφος σημείων και επιτρέπουν στην “θερμότητα” να διαχέεται μόνο στο εσωτερικό του πεδίου χωρίς να επιδρά στην εξωτερική πλευρά, πράγμα που για ένα νέφος σημείων σημαίνει ότι η εξομάλυνση επηρεάζει μόνο την γειτονιά κάθε σημείου, διατηρώντας παράλληλα την πληροφορία ορίων του νέφους.

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής εφαρμόστηκαν οι εξής μέθοδοι εξομάλυνσης:

- Φίλτρο μέσου όρου (εξομάλυνση Laplace)
- Φίλτρο διαμέσου
- Ισοτροπική προσαρμογή επιπέδου
- Ισοτροπική προσαρμογή ελλειπτικού παραβολοειδούς
- Ανισοτροπική προσαρμογή επιπέδου
- Ανισοτροπική προσαρμογή ελλειπτικού παραβολοειδούς

Μέχρι στιγμής το νέφος σημείων δεν έχει δομή, υπό την έννοια ότι δεν έχει τριγωνιστεί, ή γενικότερα δομηθεί, κάποια επιφάνεια και ότι κάθε σημείο, ακόμα και αν έχει υπολογιστεί εξαρτώμενο από τα γειτονικά του, αποτελεί αυτόνομη οντότητα (βλ. Εικ. 6.10α).



Εικόνα 6.10: α) Αρχικό νέφος σημείων. β) Εύρεση γειτονικών σημείων βάσει κατωφλίου απόστασης. γ) Προσαρμογή επιπέδου στα γειτονικά σημεία, απόδοση στο σημείο του κάθετου διανύσματος του. δ) Τελικό νέφος σημείων με διανύσματα (φαίνονται τα διανύσματα σε υποσύνολο των σημείων.)

Απαιτείται επομένως για κάθε σημείο κάθε νέφους να βρεθούν τα γειτονικά του. Και τούτο γιατί οι μέθοδοι εξομάλυνσης πρέπει να είναι εφαρμόσιμες σε αποτελέσματα σάρωσης, από μία μόνο θέση σάρωσης ή και συνενωμένα νέφη, για τα οποία φυσικά δεν υπάρχει γνώ-

ση γειτνίασης. Η δομή που εν προκειμένω αποκτά κάθε σημείο του (μη τριγωνισμένου) νέφους είναι λοιπόν η γνώση των γειτονικών του, όπως επίσης και ένα διάνυσμα για να αναχθεί σε “προσανατολισμένο σημείο” (*oriented point*), κατά την ορολογία των Johnson & Herbert (1997).

Έτσι, για κάθε σημείο αναζητούνται τα γειτονικά του με βάση ένα κατώφλι απόστασης (Εικ. 6.10β). Εάν βρεθούν τουλάχιστον δύο γειτονικά σημεία μπορεί να προσαρμοστεί επίπεδο, του οποίου το κάθετο διάνυσμα μπορεί να αποδοθεί στο σημείο (Εικ. 6.10γ). Με την διαδικασία αυτή όλα τα σημεία του νέφους αποκτούν προσανατολισμό (Εικ. 6.10δ). Κατ’ αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μία στοιχειώδης γεωμετρία για το νέφος σημείων, η οποία αξιοποιείται στις διαδικασίες εξομάλυνσης που εξετάζονται στην συνέχεια.

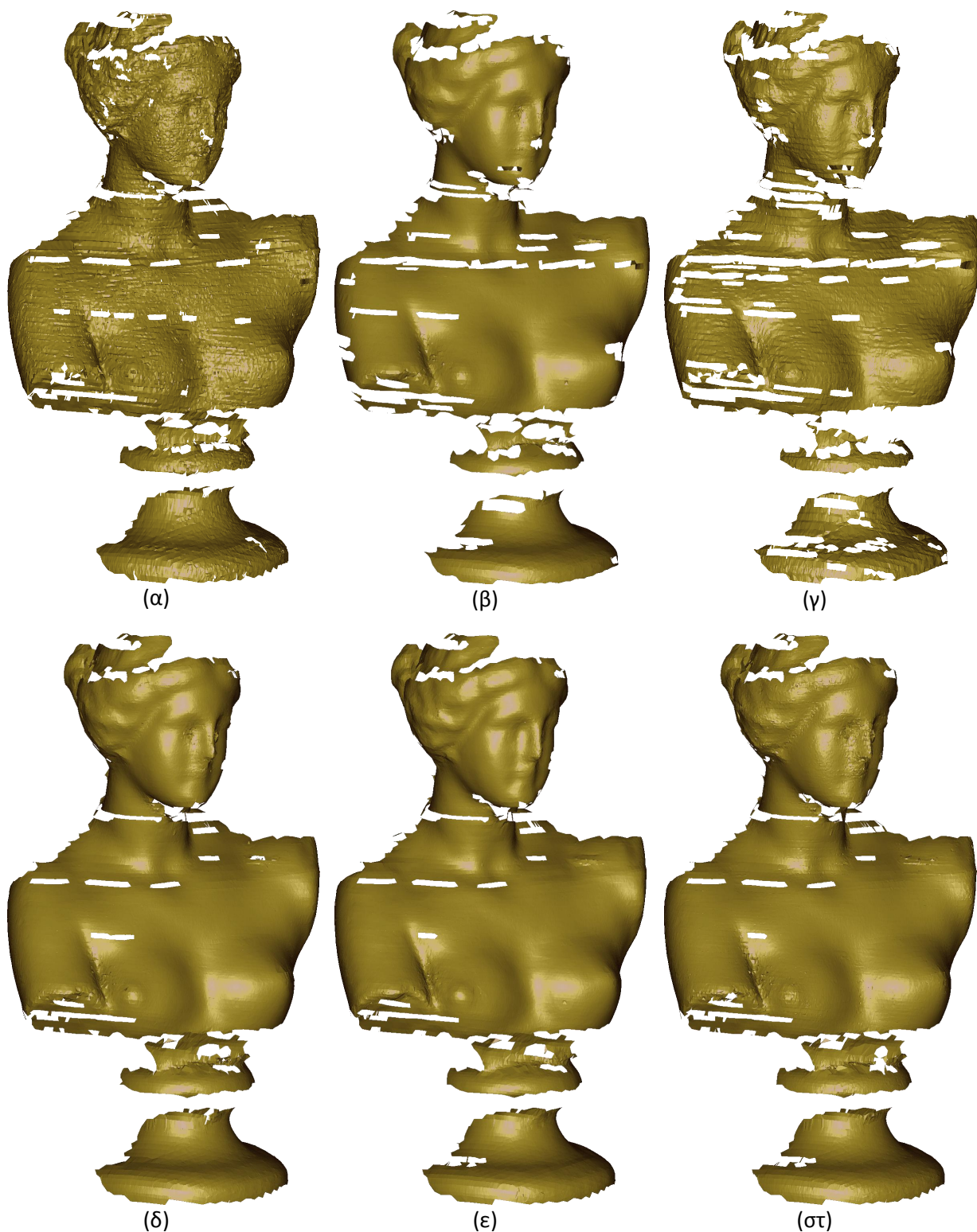
Το προαναφερθέν κατώφλι απόστασης για την αναζήτηση γειτονικών σημείων πρέπει να επιλέγεται μεγαλύτερο από την αναμενόμενη ακρίβεια των σημείων ώστε να μπορούν όντως να εξαλειφθούν οι επιδράσεις του θορύβου. Μία τιμή κατωφλίου 3πλάσια ή 4πλάσια της ακρίβειας κρίνεται ως κατ’ αρχήν ικανοποιητική. Όπως όμως έχει αναφερθεί, το επίπεδο του laser στον σαρωτή της παρούσας διατριβής είναι χειροκίνητο, με συνέπεια η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών γραμμών σάρωσης να εξαρτάται από την σχολαστικότητα του χρήστη. Η τιμή λοιπόν του κατωφλίου πρέπει να είναι τέτοια ώστε κατά την αναζήτηση γειτονικών σημείων να επιλέγονται και σημεία από τις γειτονικές γραμμές σάρωσης (για τον λόγο αυτό στο παράδειγμα της Εικόνας 6.11 έχει επιλεγεί κατώφλι 1 mm).

6.4.1. Φίλτρο μέσου όρου

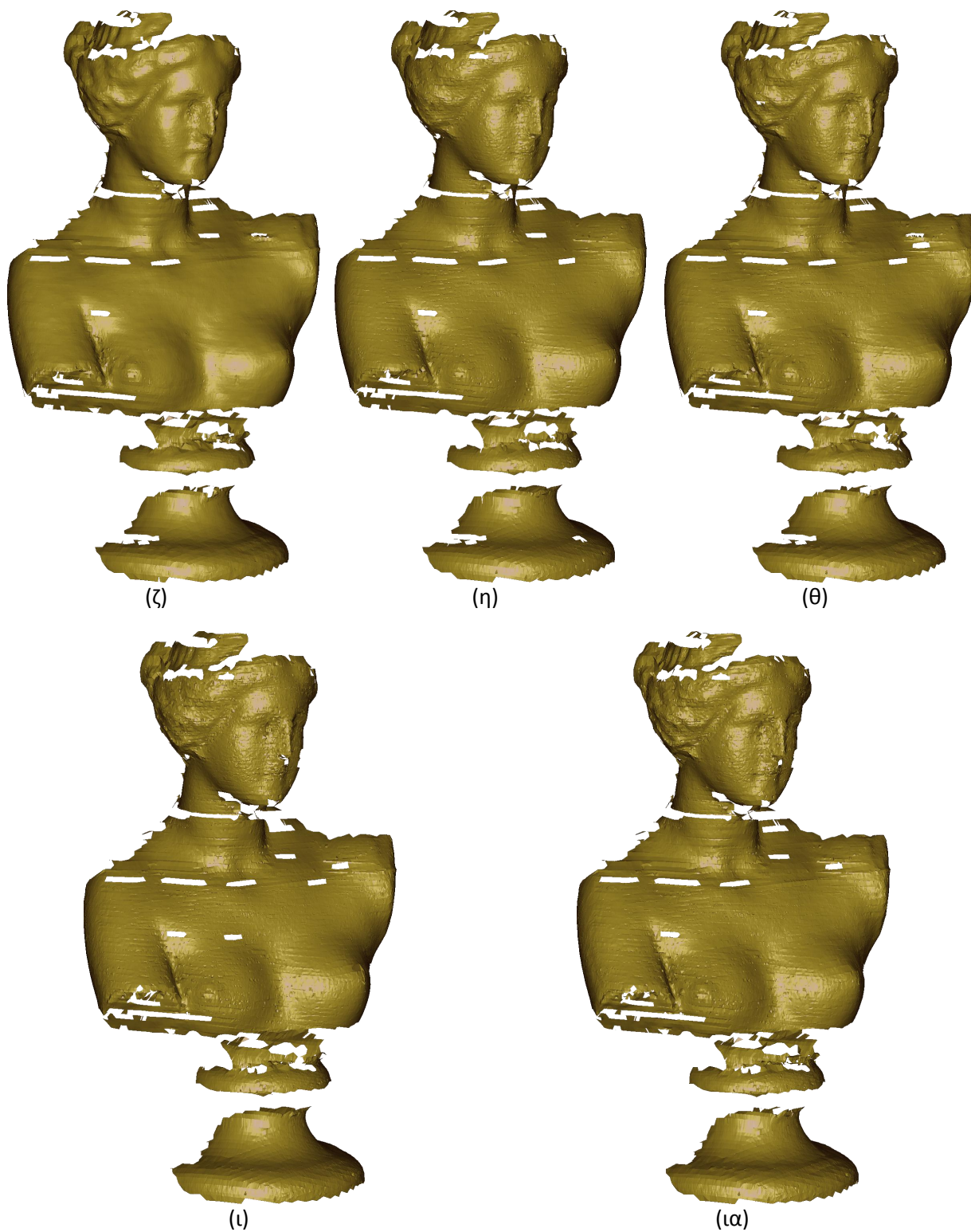
Ο πιο απλός τρόπος για την εξομάλυνση νέφους σημείων είναι η μέθοδος του μέσου όρου (Laplacian smoothing). Η θέση κάθε σημείου επαναπροσδιορίζεται ως ο μέσος όρος, με ή χωρίς βάρη, της θέσης των γειτονικών του (Buell & Bush, 1972). Στην παρούσα διατριβή εφαρμόστηκε χωρίς βάρη. Εδώ ως γειτονικά θεωρούνται τα σημεία που βρίσκονται σε απόσταση από το σημείο μικρότερη του κατωφλίου των 1 mm, όπως αυτό εξηγήθηκε προηγουμένως, και όχι εκείνα με τα οποία υπάρχει τοπολογική σύνδεση τριγωνισμού, όπως αναφέρει η θεωρία της μεθόδου, ελλείψει εν προκειμένω μίας τέτοιας τοπολογίας (Εικ. 6.10β). Το αποτέλεσμα εφαρμογής της μεθόδου φαίνεται στην Εικ. 6.11β, όπου αυτή έχει εφαρμοστεί σε νέφος με θόρυβο οφειλόμενο σε ανακριβή προσανατολισμό δύο επικαλυπτομένων νέφων (Εικ. 6.11α). Σε αυτό το αρχικό νέφος έχουν άλλωστε εφαρμοστεί και όλες οι μέθοδοι εξομάλυνσης που παρουσιάζονται εδώ.

6.4.2. Φίλτρο διαμέσου

Πρόκειται για παραλλαγή της προηγούμενης προσέγγισης. Οι νέες συντεταγμένες του εκάστοτε σημείου προκύπτουν ως ο διάμεσος των συντεταγμένων των γειτονικών του σημείων (Εικ. 6.11γ). Όπως φαίνεται, το φίλτρο αυτό, που γενικά είναι καταλληλότερο για μεμονωμένο θόρυβο (spikes), διατηρεί εν προκειμένω περισσότερο θόρυβο συγκρινόμενο με εκείνο του μέσου όρου.



Εικόνα 6.11: α) Αρχικό νέφος σημείων με θόρυβο οφειλόμενο σε ανακριβή προσανατολισμό δύο επικαλυπτομένων νεφών. Στο νέφος αυτό έχει γίνει εξομάλυνση με τις μεθόδους: β) φίλτρο μέσου όρου, γ) φίλτρο διαμέσου, δ) ισοτροπική προσαρμογή επιπέδου, ε) ισοτροπική προσαρμογή ελλειπτικού παραβολοειδούς, στ) ανισοτροπική προσαρμογή επιπέδου, ζ) ανισοτροπική προσαρμογή ελλειπτικού παραβολοειδούς, η) ανισοτροπική προσαρμογή επιπέδου με 10 επαναλήψεις, θ) ανισοτροπική προσαρμογή ελλειπτικού παραβολοειδούς με 10 επαναλήψεις, ι) ανισοτροπική προσαρμογή επιπέδου με 100 επαναλήψεις, ια) ανισοτροπική προσαρμογή ελλειπτικού παραβολοειδούς με 100 επαναλήψεις.



Εικόνα 6.11: Συνέχεια

6.4.3. Ισοτροπική προσαρμογή επιπέδου

Οι διαδικασίες εξομάλυνσης αποσκοπούν στο να εξαχθεί η “αληθής” επιφάνεια από το νέφος σημείων που την περιγράφει. Βασική λοιπόν παραδοχή της συγκεκριμένης προσέγγι-

σης είναι ότι η επιφάνεια είναι, τοπικά, στοιχειωδώς επίπεδη. Εδώ, όπως έχει αναφερθεί, προσαρμόζεται εξίσωση επιπέδου στα γειτονικά του εκάστοτε σημείου και αποδίδεται σε αυτό το κάθετο διάνυσμα του επιπέδου (Εικ. 6.10). Γίνεται λοιπόν η παραδοχή ότι η ζητούμενη μετακίνηση των σημείων λόγω εξομάλυνσης πρέπει να περιορίζεται στην διεύθυνση του αντίστοιχου διανύσματος. Το μέτρο της μετακίνησης στην μέθοδο αυτή ισούται με το εναπομένον σφάλμα, δηλαδή την αποχή, του σημείου από το προσαρμοσμένο επίπεδο (Εικ. 6.11δ). Κατά την προσαρμογή επιπέδου όλα τα γειτονικά σημεία, σε αντιδιαστολή με την προσέγγιση των Mederos et al. (2003), συμμετέχουν εδώ ισοβαρώς.

6.4.4. Ισοτροπική προσαρμογή ελλειπτικού παραβολοειδούς

Για αντικείμενα με πιο ελεύθερη ή σύνθετη μορφή είναι δυνατόν να επεκταθεί η παραδοχή της στοιχειωδώς επίπεδης επιφάνειας σε επιφάνεια ανώτερης τάξης. Με στόχο να προκύψει μια εξίσωση απλή (γραμμική ως προς την τρίτη διάσταση), διατηρείται η διεύθυνση του διανύσματος του σημείου που έχει υπολογιστεί από την παρεμβολή επιπέδου και προσαρμόζεται στα γειτονικά σημεία ελλειπτικό παραβολοειδές με άξονα στην διεύθυνση του διανύσματος (Εξ. (6.1)):

$$w = au^2 + bv^2 + cuv + du + ev + f \quad (6.1)$$

όπου:

a, b, c, d, e, f οι συντελεστές του ελλειπτικού παραβολοειδούς
 u, v, w οι συντεταγμένες των γειτονικών σημείων σε τοπικό τρισσορθογώνιο σύστημα αναφοράς με άξονα w παράλληλο στο διάνυσμα του σημείου.

Το μέτρο της μετακίνησης στην μέθοδο αυτή ισούται με το εναπομένον σφάλμα προσαρμογής του παραβολοειδούς στο σημείο. Αποτέλεσμα εφαρμογής της μεθόδου φαίνεται στην Εικ. 6.11ε. Για να προσαρμοστεί η επιφάνεια πρέπει προφανώς να έχουν ανευρεθεί τουλάχιστον 5 γειτονικά του εκάστοτε σημείου.

6.4.5. Ανισοτροπική προσαρμογή επιπέδου

Η μέθοδος που παρουσιάστηκε στην ενότητα 6.4.3 υπολογίζει ένα πλήρες διάνυσμα μετατόπισης (διεύθυνση και μέτρο) για το εκάστοτε σημείο, βασιζόμενη στην παραδοχή ότι τα γειτονικά σημεία του περιγράφουν ένα επίπεδο. Αυτή η παραδοχή είναι όντως αποδεκτή για περιοχές του αντικειμένου χωρίς έντονες ασυνέχειες και ακμές. Σε περιοχές όμως όπου αυτό δεν ισχύει, ο αλγόριθμος οφείλει να μην επιβάλλει πλήρως την υπολογιζόμενη μετατόπιση αλλά ποσοστό της, εξαρτώμενο από την συνεπιπεδότητα των σημείων της γειτονιάς. Αν όλα τα σημεία είναι συνεπίπεδα, οφείλουν και τα διανύσματά τους να είναι μεταξύ τους παράλληλα. Είναι λοιπόν λογικό η γωνία μεταξύ των διανυσμάτων των γειτονικών σημείων και του διανύσματος του εξεταζόμενου σημείου να καθορίζει το ποσοστό εφαρμογής της υπολογιζόμενης μετατόπισης. Έτσι, αν τα διανύσματα είναι παράλληλα θα επιβληθεί η πλήρης μετατόπιση, ενώ εάν αντίθετα τα διανύσματα είναι κάθετα δεν θα υπάρξει μετατόπιση

(βάσει της υπόθεσης ότι το σημείο αυτό ανήκει σε ακμή). Οι ενδιάμεσες τιμές ποσοστού μπορούν να καθοριστούν μέσω κατάλληλης συνάρτησης (edge stopping function). Εδώ για λόγους απλότητας η επιλεγείσα συνάρτηση είναι γραμμική.

Πρέπει λοιπόν να υπολογιστεί μία μέση τιμή γωνίας μεταξύ του διανύσματος του σημείου και των διανυσμάτων των γειτονικών του. Βάσει της σκέψης ότι πιθανή αλλαγή διεύθυνσης θα περιγράφεται κυρίως από τα γειτονικά σημεία που βρίσκονται μακρύτερα από το κεντρικό, ως βάρος για να υπολογιστεί ο μέσος όρος των γωνιών μεταξύ των διανυσμάτων χρησιμοποιείται η απόσταση των σημείων. Τα απομακρυσμένα σημεία έχουν, άρα, μεγαλύτερο βάρος από τα κοντινά. Σημειώνεται ότι για να αποβεί επιτυχής η εξομάλυνση με ανισοτροπικό φίλτρο πρέπει ο θόρυβος να είναι μικρότερος από την αλλαγή γεωμετρίας της θεωρητικής επιφάνειας, να είναι δηλαδή μεγάλος ο λόγος της μεταβολής προς τον θόρυβο (signal to noise ratio). Με τον τρόπο αυτό εξομαλύνεται ο θόρυβος, ενώ η αλλαγή γεωμετρίας αναγνωρίζεται και διατηρείται. Αποτέλεσμα εφαρμογής της μεθόδου φαίνεται στην Εικ. 6.11στ.

6.4.6. Ανισοτροπική προσαρμογή ελλειπτικού παραβολοειδούς

Η μέθοδος αυτή είναι ανάλογη της προηγούμενης, αλλά αντί προσαρμογής επιπέδου η μετατόπιση υπολογίζεται με προσαρμογή ελλειπτικού παραβολοειδούς (βλ. ενότητα 6.4.4). Αποτέλεσμα εφαρμογής της μεθόδου φαίνεται στην Εικ. 6.11ζ.

Για τις δύο τελευταίες ανισοτροπικές προσεγγίσεις προβλέφθηκε και η δυνατότητα για σταδιακή εξομάλυνση του νέφους με διαδοχικές επαναλήψεις. Σε κάθε επανάληψη υπολογίζεται η μετατόπιση του σημείου αλλά επιβάλλεται μόνο το $1/N$ της μετατόπισης αυτής, όπου N ο αριθμός των επαναλήψεων. Με τον τρόπο αυτό αναγνωρίζεται ότι η υπολογιζόμενη μετατόπιση αναμένεται να είναι υπερβολική και άρα προσεγγίζεται επαναληπτικά η ζητούμενη “αληθής” επιφάνεια. Οι Εικ. 6.11η-ια δείχνουν αποτελέσματα εφαρμογής των δύο φίλτρων (βάσει επιπέδου και παραβολοειδούς) στο αρχικό νέφος με 10 και 100 επαναλήψεις.

6.4.7. Αξιολόγηση μεθόδων εξομάλυνσης

Με στόχο την ποσοτική αξιολόγηση των μεθόδων εξομάλυνσης σαρώθηκε ένα αντικείμενο δύο φορές από παρόμοια θέση σάρωσης, αρχικά με τον σαρωτή της διατριβής και εν συνεχεία με τον εμπορικό οπτικό σαρωτή *SL2 Scanner* της εταιρίας *XYZRGB® Inc.* του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας του ΕΜΠ, εκτιμώμενης ακρίβειας 0.1 mm (βλ. ενότητα 7.4.1). Το αντικείμενο ήταν ένα αγαλματίδιο από πολυεστέρα, ύψους ~15 cm, με μορφολογία που κρίνεται αντιπροσωπευτική για πολλά πιθανά αντικείμενα σάρωσης. Η επιφάνεια που προέκυψε από τον *SL2 Scanner* θεωρείται εδώ ως “αληθής” και χρησιμοποιείται ως αναφορά. Το νέφος σημείων από τον σαρωτή της διατριβής εξομαλύνθηκε με τις προαναφερθείσες μεθόδους εξομάλυνσης. Στην συνέχεια όλα τα εξομαλυνμένα νέφη προσαρμόστηκαν στο νέφος από τον *SL2 Scanner* μέσω του αλγορίθμου ICP (παράδειγμα προσαρμογής φαίνεται στην

Εικ. 6.12). Κριτήριο αξιολόγησης είναι εν προκειμένω η μέση τετραγωνική απόσταση (RMS) των ομολόγων σημείων, όπως αυτά προέκυψαν από τον ICP.



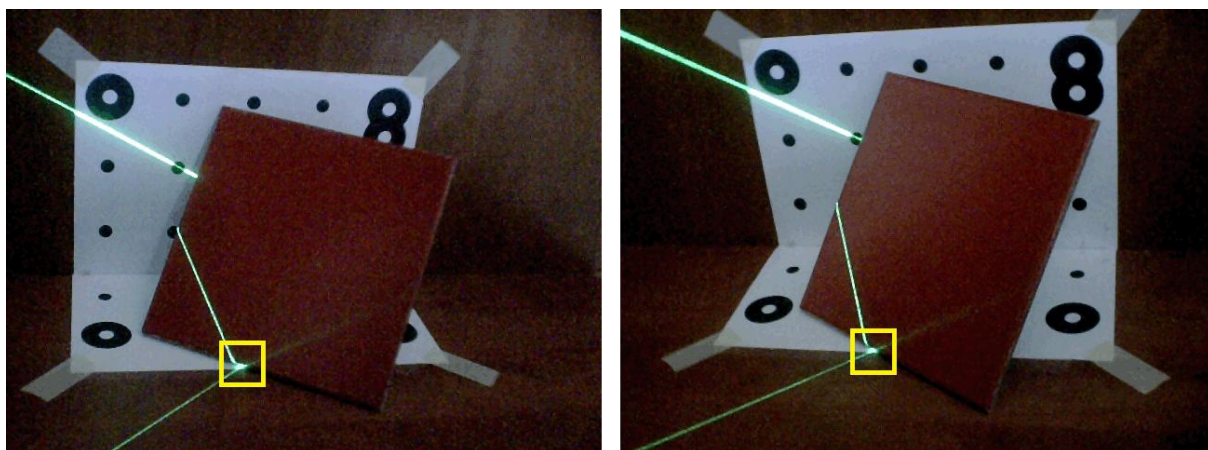
Εικόνα 6.12: Νέφη για την σύγκριση μέσω εφαρμογής του ICP. Με κυανό το νέφος από τον *SL2 Scanner* και με κόκκινο το νέφος από τον σαρωτή της διατριβής.

Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στον Πίνακα 6.1, όπου φαίνεται ότι υπάρχει μικρή μεν αλλά υπαρκτή βελτίωση της προσαρμογής των σημείων του νέφους στην “αληθή” επιφάνεια του αντικειμένου, με εξαίρεση το φίλτρο διαμέσου που έδωσε τιμή μέτρου προσαρμογής κατά τι μεγαλύτερη από εκείνη του αρχικού νέφους. Ειδικά επισημαίνονται οι μέθοδοι ισοτροπικής παρεμβολής επιπέδου και ελλειπτικού παραβολοειδούς, οι οποίες εμφανίζονται να επιφέρουν την πιο αισθητή βελτίωση της επιφάνειας του αντικειμένου, γεγονός που αποτυπώνεται και οπτικά στις Εικ. 6.11δ και 6.11ε. Από την παρατήρηση, μάλιστα, των αποτελεσμάτων της Εικ. 6.11 προκύπτει ότι ουσιαστικά με όλες τις μεθόδους το μοντέλο έχει εξομαλυνθεί, καθώς έχουν μειωθεί οι εξάρσεις της επιφάνειας (*spikes*) και γενικά η αδρότητά της, ενώ παράλληλα έχει δοθεί η δυνατότητα στο λογισμικό τριγωνισμού να κλείσει αρκετά από τα κενά που υπήρχαν στο αρχικό θορυβώδες νέφος λόγω ακριβώς της ύπαρξης εξάρσεων.

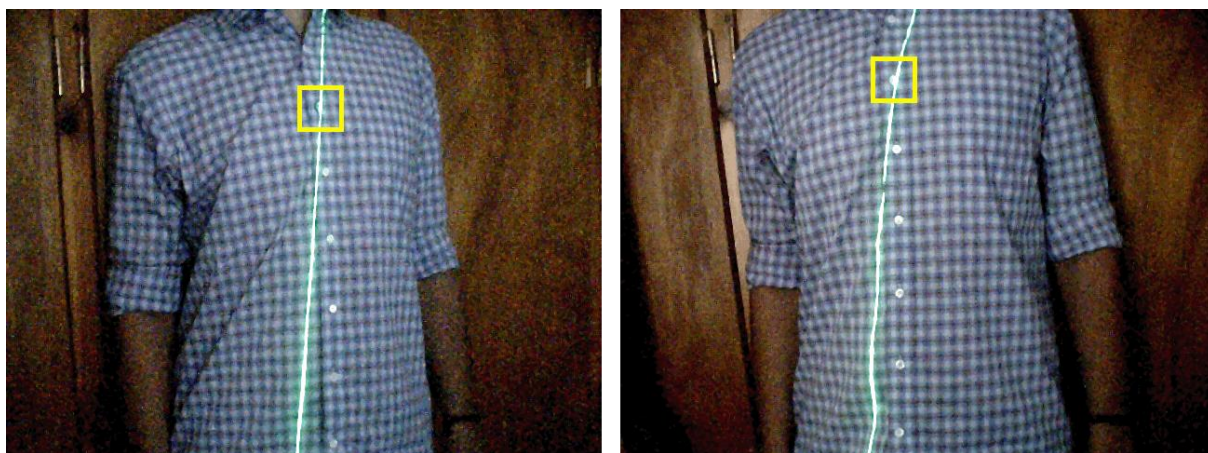
Πίνακας 6.1

Αξιολόγηση μεθόδων εξομάλυνσης με εφαρμογή του αλγορίθμου ICP.

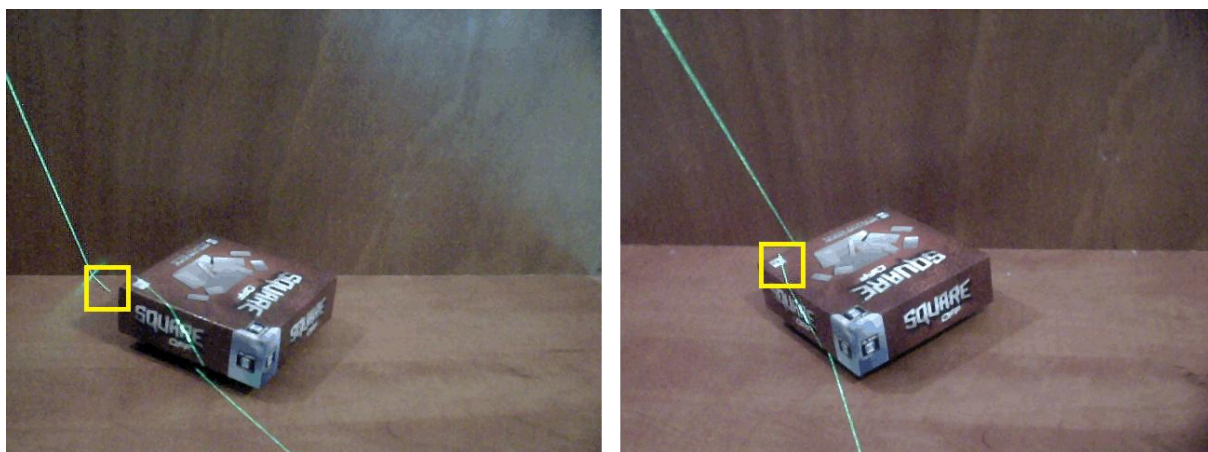
Μέθοδος εξομάλυνσης	Πλήθος σημείων			RMS αποκλίσεων (mm)
	Σαρωτής διατριβής	<i>SL2 Scanner</i>	Ομόλογα	
<i>Αρχικό νέφος</i>	13132	8719	3516	0.25
<i>Φίλτρο μέσου όρου</i>	13132	8719	3120	0.23
<i>Φίλτρο διαμέσου</i>	13132	8719	3081	0.25
<i>Ισοτροπική προσαρμογή επιπέδου</i>	13132	8719	3497	0.22
<i>Ισοτροπ. προσ. ελλειπτ. παραβολ.</i>	13132	8719	3501	0.21
<i>Ανισοτροπική προσ. επιπέδου</i>	13132	8719	3502	0.22
<i>Ανισοτροπική προσ. ελλειπτ. παραβ.</i>	13132	8719	3503	0.23
<i>Αν. προσ. επιπέδου 10 επαναλήψεις</i>	13132	8719	3500	0.23
<i>Αν. προσ. ελλειπτ. παραβ. 10 επαναλ.</i>	13132	8719	3492	0.23



(α)



(β)



(γ)

Εικόνα 6.13: Στερεοζεύγη που έδωσαν εσφαλμένα σημεία. α) Η ανάκλαση στην επιφάνεια του εξωτερικού επιπέδου προκάλεσε εσφαλμένη εύρεση της θέσης της κορυφής κατά μήκος της επιπολικής γραμμής. Το σημείο που προέκυψε δεν ταξινομήθηκε ως σημείο του εξωτερικού επιπέδου, αλλά ως σημείο του αντικειμένου. β) Ο διαφορετικός προσανατολισμός του γυαλιστερού κουμπιού σε σχέση με τις δύο μηχανές απέδωσε διαφορετική εμφάνιση στις δύο εικόνες του ζεύγους, οπότε το κέντρο της λωρίδας laser στην δεξιά εικόνα προέκυψε μετατοπισμένο. γ) Ο αλγόριθμος συνέδεσε εσφαλμένα σημείο της δεξιάς εικόνας με σημείο του εξωτερικού επιπέδου στην αριστερή. Στην δεξιά εικόνα του ζεύγους βρέθηκε σημείο στην λευκή περιοχή του κουτιού που δεν βρέθηκε στην αριστερή λόγω του κατωφλίου φωτεινότητας.

6.5. Διαγραφή σημείων εκτός πληθυσμού

Από την διαδικασία της σάρωσης προκύπτουν, γενικά, και ορισμένα σημεία που βρίσκονται εκτός πληθυσμού (outliers). Τα σημεία αυτά ενδέχεται να έχουν προκύψει είτε ως σφάλματα που για κάποιο λόγο δεν έχουν εντοπιστεί και αφαιρεθεί αυτομάτως είτε, συνηθέστερα, λόγω ακατάλληλων τιμών κατωφλίου που τέθηκαν κατά την σάρωση (πχ. για το πλάτος αρχικής εκτίμησης της θέσης κορυφής [ενότητα 4.1] ή για την απόσταση από τα εξωτερικά επίπεδα για τον διαχωρισμό των σημείων στις τρεις ομάδες [ενότητα 5.3.4]). Στην Εικ. 6.13 παρουσιάζονται τρία παραδείγματα σημείων εκτός πληθυσμού, που πρέπει δηλαδή να αφαιρεθούν. Η αναγνώριση και αφαίρεση των σημείων αυτών πρέπει βέβαια, κατά το δυνατόν, να γίνει αυτόματα. Δεδομένων των προφυλάξεων που λαμβάνονται στην διαδικασία της συλλογής, τα σημεία αυτά συνήθως δεν αφορούν την επιφάνεια του αντικειμένου αλλά είναι απομονωμένα. Ως σημεία λοιπόν εκτός πληθυσμού θεωρούνται εν προκειμένω σημεία στα οποία δεν είναι δυνατόν να προσαρμοστεί επίπεδο διότι δεν εντοπίζονται γειτονικά τους ή όμως και σημεία των οποίων η εναπομένουσα απόκλιση από την τοπική προσαρμογή επιπέδου είναι μεγαλύτερη από το 5πλάσιο του *a posteriori* τυπικού σφάλματος της προσαρμογής.

Με το παρόν Κεφάλαιο, στο οποίο περιγράφηκε η διαδικασία συνένωσης επικαλυπτόμενων νεφών και η εξομάλυνσή τους, ολοκληρώνονται οι διαδικασίες για την συλλογή και επεξεργασία του νέφους σημείων. Στο επόμενο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η ανάλυση των σφαλμάτων του σαρωτή της διατριβής.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

7

```
% Initial values
Y = XYZ(:,2);
r = (max(Y)-min(Y))/2;

size20 = round(size/20);
begg = mean(XYZ(1:size20,:),1);
endd = mean(XYZ(end-size20:end,:),1);

vx = endd(1) - begg(1);
vy = (endd(2) - begg(2))/vx;
vz = (endd(3) - begg(3))/vx;

t = - begg(1)/1;
yo = begg(2) + t*vy;
zo = begg(3) + t*vz - r/2;

A = zeros(size,5);
dL = zeros(size,1);
dx = 1000;
while max(abs(dx))>limit
    Po = [0 yo zo];
    V = [1 vy vz];
    for i=1:size
        x1 = XYZ(i,1);
        y1 = XYZ(i,2);
        z1 = XYZ(i,3);

        P1 = [x1 y1 z1];

        dis = point_3dline_dist(Po, V, P1);

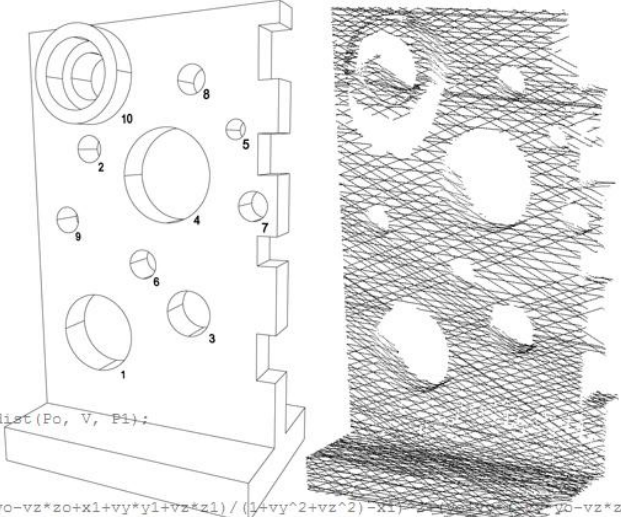
% Partial Diff

f_yo = -1/2/((( -vy*yo-vz*zo+x1+vy*y1+vz*z1)/(1+vy^2+vz^2)-x1)^2+(yo+vy*( -vy*yo-vz*zo+
f_zo = -1/2/((( -vy*yo-vz*zo+x1+vy*y1+vz*z1)/(1+vy^2+vz^2)-x1)^2+(yo+vy*( -vy*yo-vz*zo+

f_vy = -1/2/((( -vy*yo-vz*zo+x1+vy*y1+vz*z1)/(1+vy^2+vz^2)-x1)^2+(yo+vy*( -vy*yo-vz*zo+
f_vz = -1/2/((( -vy*yo-vz*zo+x1+vy*y1+vz*z1)/(1+vy^2+vz^2)-x1)^2+(yo+vy*( -vy*yo-vz*zo+

f_r = 1;

% Design Matrix
```



7. Αξιολόγηση της ακρίβειας του συστήματος

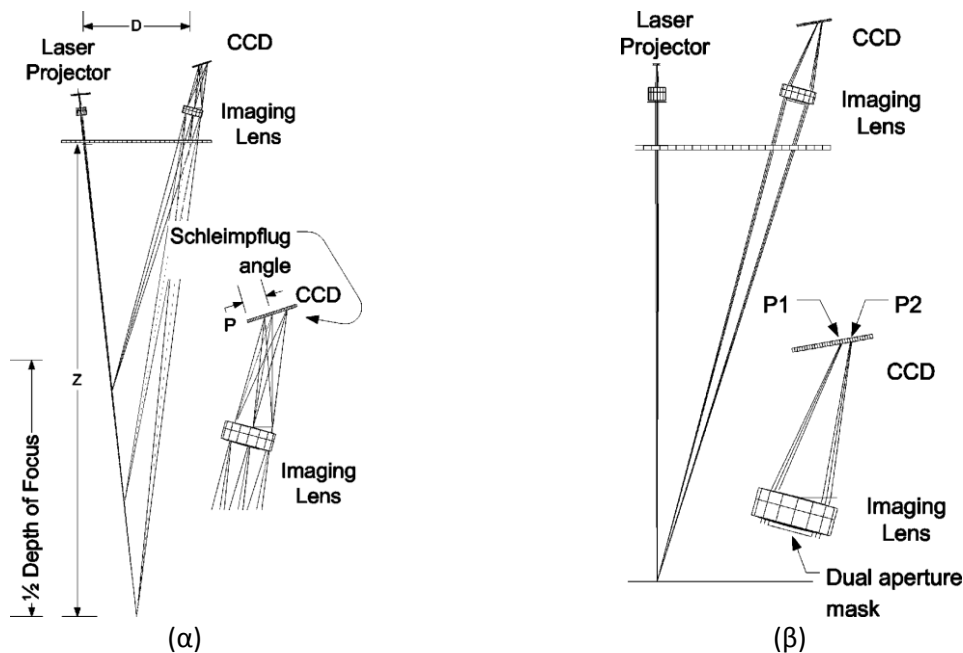
7.1. Παράγοντες επηρεασμού της ακρίβειας

Βασικός παράγων που επηρεάζει την ακρίβεια ενός συστήματος που χρησιμοποιεί ψηφιακές μηχανές είναι η χωρική τους ανάλυση, τόσο στο επίπεδο της εικόνας (εικονοψηφίδα) όσο βέβαια, και κυρίως, στον χώρο του αντικειμένου, όπως δηλαδή αυτή ανάγεται με την κλίμακα της απεικόνισης (εδαφοψηφίδα). Παράλληλα, ο σαρωτής της παρούσας διατριβής εμπλέκει δύο μηχανές, οπότε πρέπει να έχει εξασφαλιστεί καλή γεωμετρία λήψης (ευνοϊκή γωνία αλληλοτομίας των προβολικών ακτίνων, άρα ευνοϊκή μετάδοση του σφάλματος των μετρήσεων στον προσδιορισμό του βάθους) με την επιλογή της κατάλληλης βάσης, δεδομένης της απόστασης λήψης. Σχετικά, τέλος, με το laser που χρησιμοποιείται, θα πρέπει να επιτυγχάνεται κατά το δυνατόν μικρό πάχος λωρίδας στο αντικείμενο. Όπως πάντως έχει δειχθεί στο Κεφάλαιο 4, η μέτρηση του σαρωτή αναφέρεται στην θέση της τομής των επιπολικών γραμμών με την λωρίδα του laser. Έτσι, στην ενότητα 7.2 εκτιμάται η ακρίβεια του συστήματος βάσει της ακρίβειας προσδιορισμού της θέσης της τομής αυτής.

Αξίζει να σημειωθεί πως ένας ακόμα παράγων που αφορά την ακρίβεια συστημάτων που χρησιμοποιούν laser, συνεπώς και του συστήματος της παρούσας διατριβής, είναι το φαινόμενο speckle (Baribeau & Rioux, 1991a και 1991b, Levoy, 1999) που είναι αποτέλεσμα συμβολής κυμάτων. Το φαινόμενο αυτό εκδηλώνεται ως σκοτεινές και φωτεινές περιοχές στην απεικόνιση της τομής μίας δέσμης laser με μία επιφάνεια. Μία δέσμη laser, εν αντιθέσει με το φως που προέρχεται από τον ήλιο ή από έναν λαμπτήρα, είναι κύμα μονοχρωματικού φωτός και έχει μία μόνο φάση. Αυτό που καταγράφεται από μία μηχανή (ή το ανθρώπινο μάτι) είναι η αντανάκλαση της δέσμης αυτής σε μία επιφάνεια που προφανώς έχει ανωμαλίες (ακόμα και αν οι ανωμαλίες αυτές είναι πολύ μικρές). Αποτέλεσμα της αντανάκλασης φωτός laser από μία ανώμαλη επιφάνεια είναι να καταγράφεται σε κάθε σημείο της εικόνας μονοχρωματικό φως, υπό διαφορετική όμως πλέον φάση. Οι περιοχές όπου δύο “όρη” (μέγιστα) ή δύο “κοιλάδες” (ελάχιστα) του κύματος συναντώνται, ως αποτέλεσμα της αντανάκλασης από διαφορετικά σημεία της επιφάνειας, απεικονίζονται ως φωτεινές, ενώ περιοχές όπου ένα “όρος” συναντά “κοιλάδα” του κύματος απεικονίζονται ως σκοτεινές. Η συμπεριφορά του φαινομένου είναι τυχαία, υπό την έννοια ότι εξαρτάται πρωτίστως από το τυχαίο της επιφάνειας στην οποία ανακλάται η δέσμη. Επειδή βέβαια τα οπτικά συστήματα της μηχανής και της συσκευής παραγωγής της δέσμης του laser επηρεάζουν την πορεία του φωτός, κατώτερης ποιότητας laser και μηχανές επιτείνουν το φαινόμενο. Για περισσότερα σχετικά με το φαινόμενο speckle βλ. Goodman (1975).

Κατά τον σχεδιασμό εμπορικών συστημάτων δίνεται και η δυνατότητα χρήσης συγκεκριμένων διατάξεων που είτε δίνουν την δυνατότητα καλύτερης εστίασης είτε αυξάνουν πλασματικά τις παρατηρήσεις. Συγκεκριμένα, υπάρχουν εμπορικά συστήματα σάρωσης με οπτικά μέσα που κάνουν χρήση της συνθήκης Scheimpflug, η οποία επιτρέπει μεγαλύτερο βάθος πεδίου (Beraldin et al., 1994, Prasad & Jensen, 1995). Το επίπεδο προβολής της μηχανής και

ο οπτικός άξονας δεν είναι κάθετα μεταξύ τους, οπότε με χρήση της συνθήκης αυτής αυξάνει το βάθος πεδίου της μηχανής, επιτρέποντας έτσι την σάρωση αντικειμένων με εντονότερο ανάγλυφο. Στην Εικ. 7.1α παρουσιάζεται σχηματική αναπαράσταση της συνθήκης, όπου απεικονίζεται και η αύξηση του βάθους πεδίου. Σε αυτή τη διατριβή δεν ήταν βέβαια δυνατόν να εφαρμοστεί η συνθήκη Scheimpflug, αφού εδώ πρόκειται για σαρωτή χαμηλού κόστους με υλικά ήδη κατασκευασμένα για διαφορετικό σκοπό. Για τον ίδιο λόγο δεν ήταν δυνατόν να χρησιμοποιηθεί μηχανή με διάφραγμα διπλού ανοίγματος (dual aperture). Τέτοιο διάφραγμα δίνει το πλεονέκτημα της περίσσειας παρατήρησης, με χρήση όμως μόνο μίας μηχανής (Blais, 2004). Τα διαφράγματα διπλού ανοίγματος δημιουργούν στο επίπεδο προβολής της μηχανής δύο απεικονίσεις ενός σημείου, και έτσι διπλασιάζονται πλασματικά οι παρατηρήσεις. Στην Εικ.7.1β φαίνεται πώς ένα σημείο του χώρου απεικονίζεται στα δύο σημεία P1, P2 στο επίπεδο προβολής. Διάφραγμα διπλού ανοίγματος έχει αξιοποιήσει ο εμπορικός σαρωτής *BIRIS 3D Laser Camera* του Εθνικού Συμβουλίου Έρευνας του Καναδά NRC (http://iitatlns2.iit.nrc.ca/vit-tiv/biris-scanner-print_e.html).



Εικόνα 7.1: Απεικονίσεις α) της συνθήκης Scheimpflug και β) του διαφράγματος διπλού ανοίγματος (κατά Blais, 2004).

Το σύστημα της διατριβής καταγράφει φως από αντανάκλαση, οπότε οι κανόνες της φωτομετρίας αναμένεται ότι επίσης επηρεάζουν την απόδοση του σαρωτή. Τα βασικότερα μεγέθη που ενδιαφέρουν εδώ είναι η φωτεινότητα της συσκευής παραγωγής του επιπέδου laser, η ανακλαστικότητα του αντικειμένου που σαρώνεται και, καθώς η μέτρηση γίνεται υπό κανονικές συνθήκες φωτισμού, η φωτεινότητα του διάχυτου φωτισμού του περιβάλλοντος. Η τελική τιμή έντασης που καταγράφουν οι μηχανές είναι συνάρτηση των παραπάνω, αλλά και των διευθύνσεων φωτισμού και αντανάκλασης. Στην παρούσα διατριβή το θέμα αυτό έχει αντιμετωπιστεί εμπειρικά μέσω των συνθηκών που συνιστάται να τηρούνται κατά την λήψη των εικόνων (ενότητα 3.4). Παράλληλα, γίνεται η παραδοχή ότι τα όποια σφάλματα

της απεικόνισης τα οφειλόμενα τις συνθήκες φωτισμού, όπως επίσης και στο φαινόμενο speckle, αντιμετωπίζονται και εν πολλοίς απορροφώνται κατά την διαδικασία μείωσης του θορύβου των εικόνων (ενότητα 3.6) και κατά τον εντοπισμό της τομής κάθε επιπολικής ευθείας με την λωρίδα του laser (Κεφάλαιο 4). Για περισσότερα, πάντως, σχετικά με το θέμα βλ. Κεφάλαιο 12 στον Smith (2008).

7.2. Θεωρητική εκτίμηση ακρίβειας

Δεδομένων του εξοπλισμού (μηχανές λήψης, laser) και της γεωμετρίας (λόγος βάσης προς απόσταση λήψης), η ακρίβεια του σαρωτή της παρούσας διατριβής εξαρτάται κατά βάση από την ακρίβεια προσδιορισμού της τομής κάθε επιπολικής γραμμής με την παρατηρούμενη λωρίδα laser. Στο Κεφάλαιο 4 (ενότητα 4.15) είχε εξηγηθεί ότι η ακρίβεια αυτή εκτιμάται ως $\sigma_x = \pm 0.1$ pixel. Η γεωμετρία της λήψης εμπίπτει εν προκειμένω στην λεγόμενη συγκλίνοια περίπτωση του στερεοζεύγους (δηλαδή εικόνων με έντονες στροφές φ). Η μετάδοση του σφάλματος των εικονοσυντεταγμένων στις υπολογιζόμενες 3D συντεταγμένες στην περίπτωση τέτοιας γεωμετρίας έχουν μελετηθεί από τους Abdel-Aziz & Karara (1974) και Marzan & Karara (1976). Ωστόσο, οι μετρήσεις εδώ πραγματοποιούνται όχι στις αρχικές αλλά τις επιπολικές εικόνες, οι οποίες βέβαια εμπίπτουν στην λεγόμενη κανονική περίπτωση του στερεοζεύγους. Έτσι, οι βασικές εξισώσεις μέσω των οποίων υπολογίζονται οι 3D συντεταγμένες των σημείων, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι οι απλές εξισώσεις της παράλλαξης.

Με βάση την εκτιμώμενη ακρίβεια προσδιορισμού της θέσης της κορυφής της λωρίδας laser ($\sigma_x = \pm 0.1$ pixel), προκύπτει για την παράλλαξη $p = x_1 - x_2$ μια εκτίμηση σφάλματος $\sigma_p = \sigma_x \sqrt{2} \approx \pm 0.15$ pixel. Τα σφάλματα των εικονοσυντεταγμένων και της παράλλαξης μεταδίδονται στις υπολογιζόμενες 3D συντεταγμένες χώρου των σημείων μέσω των γνωστών σχέσεων που προκύπτουν από παραγωγή των Εξ. (5.1):

$$\begin{aligned}\sigma_Z &= \pm \frac{Z}{c} \frac{Z}{B} \sigma_p \\ \sigma_X &= \pm \frac{Z}{c} \sigma_x \\ \sigma_Y &= \pm \frac{y}{c} \sigma_Z\end{aligned}\tag{7.1}$$

Σημειώνεται ότι στον υπολογισμό του σ_X έχει αγνοηθεί, όπως συμβαίνει συνήθως στις απλές σχέσεις μετάδοσης σφάλματος της κανονικής περίπτωσης, η επίδραση του σ_Z (αντίθετα, αυτή έχει ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό του σ_Y για λόγους εξηγούνται στη συνέχεια). Οι περισσότεροι έλεγχοι για την εκτίμηση της ακρίβειας του σαρωτή σε πραγματικές συνθήκες (βλέπε παρακάτω), αλλά και οι περισσότερες εφαρμογές, έγιναν με παρόμοιες συνθήκες γεωμετρίας: μηχανές δικτύου ανάλυσης 640×480, $B = 300$ mm, $Z_{μέσο} = 550 \sim 700$ mm, $c = 950$ pixel, από όπου προκύπτει $p_{μέσο} = 400 \sim 520$ pixel. Δεδομένης της γεωμετρίας, από τις Εξ. (7.1) εκτιμώνται τα σφάλματα $\sigma_X = 0.04 \sim 0.05$ mm και $\sigma_Z = 0.15 \sim 0.25$ mm. Ό-

σον αφορά την συντεταγμένη Y , θεωρείται προφανώς ότι η μέτρηση της εικονοσυντεταγμένης y δεν έχει σφάλμα, ως απλή επιλογή επιτολικής γραμμής, οπότε, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 5, η συντεταγμένη Y προκύπτει συναρτήσεως του Z . Άρα το σφάλμα στην διεύθυνση Y αποδίδεται αποκλειστικά στο σφάλμα προσδιορισμού της συντεταγμένης Z . Συνεπώς το σ_Y μηδενίζεται στον άξονα x της επιτολικής εικόνας και αυξάνει με την τιμή της εικονοσυντεταγμένης y . Αν υποθεθεί τυπική διάσταση κατά y της επιτολικής εικόνας περί τα 700 pixel, η μέγιστη τιμή που λαμβάνει το σφάλμα στην διεύθυνση Y (για $y = 350$ pixel) είναι $\sigma_Y = 0.05 \sim 0.10$ mm. Τελικά λοιπόν για τον προσδιορισμό της θέσης σημείου εκτιμάται μια συνολική ακρίβεια $\sigma_{3D} = 0.15 \sim 0.25$ mm.

Βέβαια, σφάλματα εισάγουν στις τιμές των 3D συντεταγμένων και οι αβεβαιότητες με τις οποίες έχουν προσδιοριστεί τα στοιχεία του εσωτερικού και του σχετικού προσανατολισμού. Ωστόσο, χάρη στην υψηλή ακρίβεια προσδιορισμού τους με την αυτόματη διαδικασία βαθμονόμησης του συστήματος των μηχανών, η μετάδοση του πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας των τιμών των εν λόγω παραμέτρων στην τιμή του υπολογιζόμενου βάθους (σ_Z) δεν έχει αισθητή επίπτωση στο τελικό αποτέλεσμα, όπως έδειξαν ενδεικτικοί έλεγχοι μετάδοσης σφαλμάτων. Για την μετάδοση σφάλματος στην εμπροσθοτομία χρησιμοποιήθηκε ο υποπίνακας μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας διαστάσεων 12×12 που αφορά τις 6 παραμέτρους του προσανατολισμού της δεξιάς εικόνας στο σύστημα της αριστερής και τις 6 παραμέτρους της γεωμετρίας των δύο μηχανών (3 για κάθε μηχανή). Η συμμετοχή των παραμέτρων της διαστροφής του φακού δεν έδειξε κάποια ουσιαστική διαφορά. Οι έλεγχοι έγιναν για τυπικές τιμές του μήκους της βάσης και της απόστασης λήψης.

Ενδεικτικά αποτελέσματα για τις τιμές του σ_Z εμφανίζει ο Πίνακας 7.1, όπου αναφέρονται ακόμα το μήκος B της βάσης και η μέση απόσταση λήψης H . Επισημαίνεται πως τα σφάλματα σ_Z δεν εξαρτώνται μόνο από τον λόγο $H:B$, αφού τα μεταδιδόμενα σφάλματα του προσανατολισμού προέρχονται από διαφορετική κάθε φορά βαθμονόμηση του συστήματος και άρα διαφέρουν από περίπτωση σε περίπτωση. Φαίνεται έτσι ότι η επίπτωση των σφαλμάτων του προσανατολισμού στον προσδιορισμό των 3D συντεταγμένων, και εν προκειμένω του βάθους, είναι αμελητέα συγκρινόμενη με την επίδραση της αβεβαιότητας των μετρήσεων.

Πίνακας 7.1

Μετάδοση σφάλματος των παραμέτρων της βαθμονόμησης

Μήκος Βάσης B (cm)	10	20	30	40
Απόσταση Λήψης H (cm)	15	40	50	95
σ_Z (mm)	0.011	0.018	0.013	0.007

Τέλος, αναγκαίο είναι να γίνει αναφορά στο γεωμετρικό σφάλμα που πηγάζει από ενδεχόμενο ατελή συγχρονισμό των δύο μηχανών. Κατά τον χρόνο συγγραφής του παρόντος διατίθενται πλέον στην αγορά στερεοσκοπικές μηχανές δικτύου (stereo web cameras), όπως είναι η *Minoru 3D Webcam*, που θεωρείται ότι καταγράφουν συγχρονισμένα αρχεία. Αυτό το προϊόν δεν υπήρχε κατά την έναρξη της παρούσας έρευνας. Προκειμένου να εξασφαλιστεί, λοιπόν, ο συγχρονισμός των καρέ από τις δύο μηχανές που συνθέτουν τα στερεοζεύγη, ο

αλγόριθμος της λήψης των εικόνων έχει προβλέψει τα εξής βήματα:

1. Ενεργοποίηση της αριστερής μηχανής και καταγραφή της εικόνας.
2. Ενεργοποίηση της δεξιάς μηχανής και καταγραφή της εικόνας.
3. Εκπομπή ηχητικού σήματος ως ένδειξης για την ολοκλήρωση της λήψης.
4. Παύση μικρής διάρκειας ~ 1 sec (επιλέγεται από τον χρήστη).
5. Επανάληψη των βημάτων 1-4 για το επόμενο στερεοζεύγος.

Ο στόχος είναι να αποφεύγεται η κίνηση του laser κατά την διάρκεια καταγραφής των εικόνων. Έτσι, ο χαρακτηριστικός ήχος που σηματοδοτεί την ολοκλήρωση της λήψης δίνει την δυνατότητα να κινεί ο χρήστης το επίπεδο laser μόνο κατά την διάρκεια των προγραμματισμένων παύσεων.

Στο *Matlab*[®], όπου και προγραμματίστηκαν οι αλγόριθμοι της διατριβής, υπάρχει η δυνατότητα για χρονομέτρηση μεταξύ της εκτέλεσης σειρών του κώδικα. Έτσι, είναι γνωστό ότι τα βήματα 1 και 2 δεν διαρκούν συνολικά περισσότερο από 12 ms, οπότε ως σφάλμα συγχρονισμού μπορεί να θεωρηθεί το ήμισυ αυτού του χρόνου, δηλαδή 6 ms. Άρα, αν υποθεθεί ότι ο χρήστης δεν κινείται κατά βήματα αλλά τηρεί την υπόδειξη περί “αργής” κίνησης του laser (η οποία δόθηκε στην ενότητα 3.4 ως ≤ 30 cm/min), τότε το ίχνος του στην επιφάνεια του αντικειμένου θα έχει μετακινηθεί μεταξύ αριστερής και δεξιάς λήψης κατά ≤ 30 μ m, δηλαδή κατά την απόσταση που διανύει η λωρίδα του laser με την προαναφερθείσα ταχύτητα σε χρόνο 6 ms. Η γεωμετρία εδώ είναι ταυτόσημη με εκείνη της ύπαρξης παράλλαξης κατά X στο στερεομοντέλο εξαιτίας σφαλμάτων του σχετικού προσανατολισμού, η οποία, όπως είναι γνωστό, προκαλεί υψομετρική παραμόρφωση ΔZ του μοντέλου μεταδιδόμενη μέσω του λόγου H:B της απόστασης λήψης H προς το μήκος B της βάσης του στερεοζεύγους (Kraus, 2003). Θεωρώντας την δυσμενέστερη γεωμετρία H:B = 1:3 που παρουσιάζεται στην διατριβή, αυτή η μετάθεση των 30 μ m προξενεί μέγιστη αναμενόμενη υψομετρική παραμόρφωση λόγω μη συγχρονισμού $\Delta Z < 0.1$ mm. Συνεπώς, όπως προκύπτει άλλωστε και από τα επόμενα, το αναμενόμενο μέγιστο σφάλμα λόγω ατελούς συγχρονισμού των εικόνων είναι πολύ μικρότερο από την αναμενόμενη ακρίβεια του συστήματος. Τέλος, σημειώνεται ότι μια εντελώς άλλη λογική για την αποφυγή σφαλμάτων λόγω ατελούς συγχρονισμού θα ήταν βέβαια η χρήση μιας μηχανής και καθρεπτών (Leotta et al., 2008).

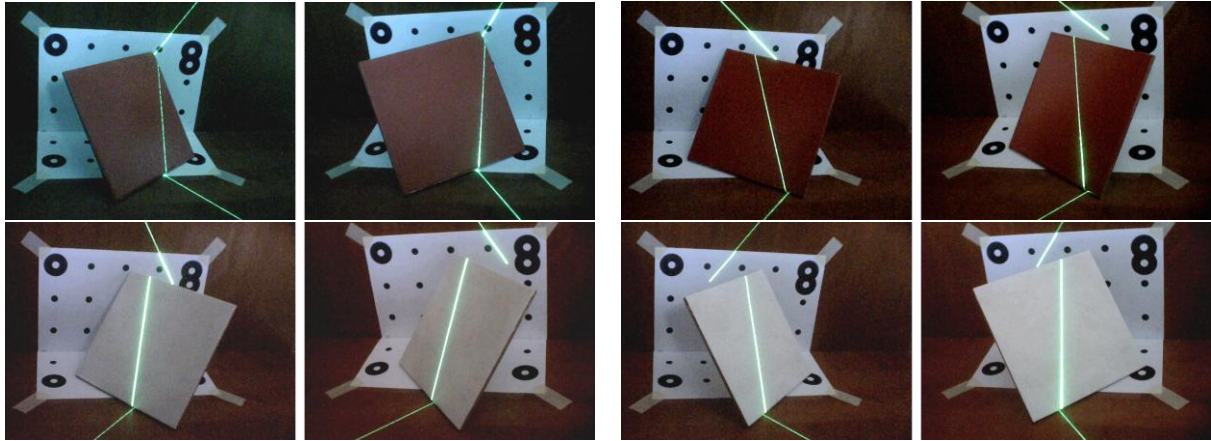
7.3. Πρακτική εκτίμηση ακρίβειας

Για να εκτιμηθεί πρακτικά η ακρίβεια του σαρωτή σαρώθηκαν κατ’ αρχάς κανονικές επιφάνειες, επίπεδες και κυλινδρικές, οι οποίες, πέραν της κανονικότητας, είχαν και γνωστές διαστάσεις. Στα νέφη σημείων προσαρμόστηκαν οι αντίστοιχες θεωρητικές επιφάνειες, και αξιολογήθηκε η ακρίβεια προσαρμογής καθώς και η εκτίμηση των γνωστών διαστάσεων.

7.3.1. Σάρωση επιπέδων

Για τον σκοπό της πειραματικής αξιολόγησης με χρήση επιπέδων σαρώθηκαν δύο κεραμικά

πλακίδια $20 \times 20 \text{ cm}^2$ από δύο φορές και υπό διαφορετική γωνία (Εικ. 7.2). Η σάρωση έγινε έτσι ώστε να μπορούν αργότερα να εισαχθούν τα δεδομένα και στο πρόγραμμα *David Laser Scanner* (βλ. ενότητα 7.4.2.1). Η μέση απόσταση λήψης ήταν $\sim 60 \text{ cm}$, ενώ η βάση των μηχανών $\sim 30 \text{ cm}$, οπότε κατά την ενότητα 7.2 η αναμενόμενη ακρίβεια είναι $\sigma_{3D} = 0.20 \text{ mm}$.



Εικόνα 7.2: Στερεοζεύγη από την σάρωση των κεραμικών πλακιδίων. Πάνω: κόκκινο υπό δύο γωνίες λήψης, κάτω: λευκό υπό δύο γωνίες λήψης. Στις εικόνες φαίνεται, ακόμα, το πεδίο βαθμονόμησης για την επεξεργασία με τον σαρωτή *David Laser Scanner*.

Κριτήριο σφάλματος εδώ είναι το *a posteriori* σφάλμα της προσαρμογής εξίσωσης επιπέδου στο νέφος (Πίνακας 7.2). Για να απομακρυνθούν χονδροειδή σφάλματα, μετά από μία πρώτη προσαρμογή αφαιρούνται τα σημεία με εναπομένον σφάλμα μεγαλύτερο του $5 \times \sigma_o$ και εκτελείται εκ νέου προσαρμογή. Για τον λόγο αυτό στους πίνακες του παρόντος κεφαλαίου υπάρχει η στήλη “Πλήθος χονδροειδών σφαλμάτων”. Η διαδικασία αυτή εκτελείται για όλες τις προσαρμογές επιφανειών που παρουσιάζονται εδώ. Η ακρίβεια προσαρμογής βρίσκεται μέσα στα αναμενόμενα όρια, ενώ υπάρχουν λίγα χονδροειδή σφάλματα (συμβατά με τα αναμενόμενα στο διάστημα $\pm 5 \times \sigma_o$).

Πίνακας 7.2 Αποτελέσματα προσαρμογής επιπέδων στα δεδομένα σάρωσης των κεραμικών πλακιδίων.

Επίπεδο	Πλήθος σημείων	Πλήθος χονδροειδών σφαλμάτων	σ_o (mm)
κόκκινο_1	7157	0	0.19
κόκκινο_2	12316	0	0.18
λευκό_1	8408	1	0.17
λευκό_2	13567	3	0.17

Επειδή, προφανώς, στην πράξη γενικά δεν αντιμετωπίζονται κανονικές επιφάνειες γνωστής εξίσωσης, δηλαδή η διαχείριση του θορύβου όσο και των χονδροειδών σφαλμάτων πρέπει να γίνεται με τους αλγορίθμους της εξομάλυνσης, κρίθηκε σκόπιμο να δοκιμαστεί και η διαδικασία αυτόματης εξομάλυνσης. Βέβαια, η εξομάλυνση μέσω επιπέδου ή παραβολοειδούς είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για επίπεδα (ή τους κυλίνδρους της επόμενης ενότητας). Σκοπός λοιπόν ήταν, κυρίως, να επαληθευτεί η λειτουργία των αλγορίθμων εξομάλυνσης και, ακό-

μα, να διαπιστωθεί πώς συμπεριφέρεται η εξομάλυνση 2^{ου} βαθμού σε επίπεδο αντικείμενο και η εξομάλυνση επιπέδου στην περίπτωση κυλίνδρου. Έτσι, στην συνέχεια τα νέφη εξομαλύνθηκαν με τις μεθόδους ισοτροπικής προσαρμογής επιπέδου και ισοτροπικής προσαρμογής ελλειπτικού παραβολοειδούς που αναλύθηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο. Τα αποτελέσματα της προσαρμογής στα εξομαλυμένα νέφη φαίνονται στον Πίνακα 7.3.

Πίνακας 7.3 Προσαρμογή επιπέδων σε εξομαλυμένα νέφη κεραμικών πλακιδίων.

Μέθοδος εξομάλυνσης	Επίπεδο	Πλήθος σημείων	Πλήθος χονδροειδών σφαλμάτων	σ_o (mm)
Ισοτροπική προσαρμογή επιπέδου	κόκκινο 1	7157	0	0.12
	κόκκινο 2	12316	0	0.13
	λευκό 1	8409	0	0.13
	λευκό 2	13569	0	0.12
Ισοτροπική προσαρμογή ελλειπτικού παραβολοειδούς	κόκκινο 1	7157	0	0.14
	κόκκινο 2	12316	0	0.14
	λευκό 1	8409	0	0.14
	λευκό 2	13569	0	0.13

Φαίνεται μια βελτίωση προσαρμογής σε σχέση με τον Πίνακα 7.2, με συμμετοχή όλων των σημείων. Το παραβολοειδές τοπικά εκφυλίζεται σε επίπεδο, οπότε τα αποτελέσματα πρακτικά συμπίπτουν για τις δύο εξομαλύνσεις. Περισσότερα επίπεδα σαρώθηκαν κατά την μελέτη δοκιμίου του Μετροτεχνικού Εργαστηρίου του ΕΜΠ (βλ. ενότητα 7.3.3).

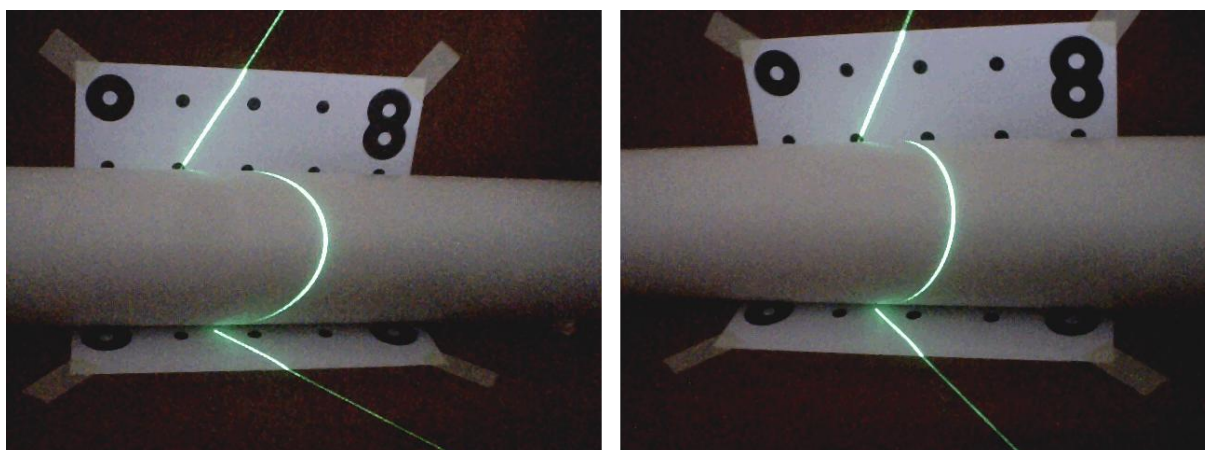
7.3.2. Σάρωση κυλίνδρων

Στην επόμενη δοκιμή, όπως αναφέρθηκε, σαρώθηκαν κυλινδρικά αντικείμενα και προσαρμόστηκε η αντίστοιχη εξίσωση στο παραγόμενο νέφος. Βασικό κριτήριο ακρίβειας είναι το *a posteriori* τυπικό σφάλμα της προσαρμογής, συνδυαζόμενο με το κριτήριο της υπολογιζόμενης διαμέτρου. Στην προκειμένη περίπτωση η υπολογιζόμενη διάμετρος έχει μικρότερη βαρύτητα καθώς κάθε νέφος αντιπροσωπεύει σχετικά περιορισμένο ποσοστό της περιμέτρου του κυλίνδρου από το οποίο υπολογίζεται η διάμετρος, ενώ επιπλέον σε μία περίπτωση δεν ήταν γνωστή η ακρίβεια με την οποία δίδεται η ονομαστική τιμή της διαμέτρου.

7.3.2.1. Σωλήνας PVC

Στο Κεφάλαιο 5 είχε παρουσιαστεί η σάρωση του συγκεκριμένου κυλίνδρου (σωλήνας PVC ονομαστικής διαμέτρου 125 mm) και η προσαρμογή μαθηματικής επιφάνειας για την αξιολόγηση των μεθόδων ανακατασκευής. Εδώ παρατίθενται τα στοιχεία εκείνης της προσαρμογής μαζί με δύο ακόμα ανεξάρτητες σαρώσεις του ίδιου δοκιμίου, με αρκετά διαφορετικό πλήθος σημείων η καθεμία. Οι δύο τελευταίες σαρώσεις έγιναν έτσι ώστε να είναι δυνατή η εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα *David Laser Scanner* (βλ. ενότητα 7.4.2.2). Στις σαρώσεις αυτές (Εικ. 7.3) η μέση απόσταση λήψης ήταν περίπου 60 cm και η βάση των μηχανών περίπου 30 cm, οπότε σύμφωνα με την ενότητα 7.2 η αναμενόμενη ακρίβεια είναι $\sigma_{3D} = 0.20$ mm. Τα αποτελέσματα της προσαρμογής για τις τρεις σαρώσεις φαίνονται στον

Πίνακα 7.4, μαζί με τις μέσες τιμές που έχουν προκύψει με βάρος τον αριθμό των σημείων.



Εικόνα 7.3: Τυπικό στερεοζεύγος από την σάρωση του σωλήνα PVC. Φαίνεται επίσης το πεδίο βαθμονόμησης για την επεξεργασία με τον σαρωτή *David Laser Scanner*.

Πίνακας 7.4 Αποτελέσματα προσαρμογής κυλίνδρου στον σωλήνα PVC.

	Πλήθος σημείων	Κάλυψη Περιμέτρου	Πλήθος χονδροειδών σφαλμάτων	Σφάλμα προσαρμογής (mm)	Διάμετρος (mm)	Σφάλμα διαμέτρου (mm)
<i>cylinder_1</i>	3721	35%	0	0.19	125.11	0.04
<i>cylinder_2</i>	2595	30%	0	0.28	125.16	0.06
<i>cylinder_3</i>	8237	35%	0	0.20	124.88	0.03
Μέση τιμή				0.22	124.99	0.04

Τα αποτελέσματα στις δύο περιπτώσεις συμπίπτουν με τα αναμενόμενα. Στην περίπτωση της δεύτερης σάρωσης, εκείνης με τον μικρότερο αριθμό σημείων, η ακρίβεια προσαρμογής είναι κάπως μικρότερη. Δεδομένου ότι δεν αποκλείστηκε κανένα σημείο ως χονδροειδής απόκλιση, η συγκεκριμένη σάρωση εκτιμάται ως θορυβώδης σε σχέση με τις άλλες (αλλά και όλες τις επόμενες), και άρα ενδεχομένως ως εκτελεσθείσα με μικρότερη προσοχή. Τέλος, τα νέφη εξομαλύνθηκαν και με τις δύο προαναφερθείσες μεθόδους, με αποτελέσματα προσαρμογής που παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.5.

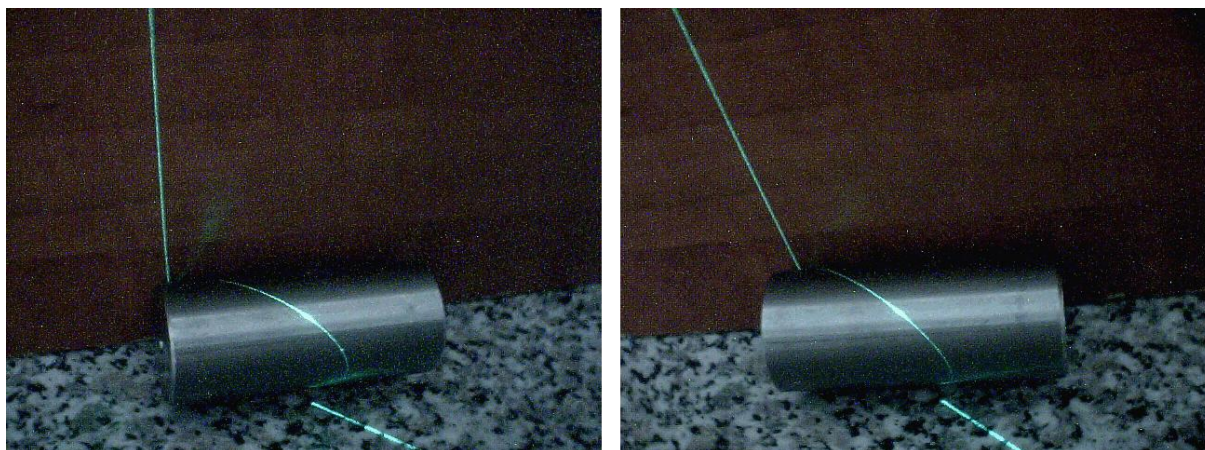
Πίνακας 7.5 Αποτελέσματα προσαρμογής κυλίνδρου στον σωλήνα PVC.

Μέθοδος εξομάλυνσης	Κύλινδρος	Πλήθος σημείων	Πλήθος χονδροειδών σφαλμάτων	Σφάλμα προσαρμογής (mm)	Διάμετρος (mm)	Σφάλμα διαμέτρου (mm)
Ισοτροπική προσαρμογή επιπέδου	<i>cylinder_1</i>	3721	0	0.13	125.10	0.03
	<i>cylinder_2</i>	2595	0	0.20	125.16	0.04
	<i>cylinder_3</i>	8237	0	0.14	125.02	0.02
προσαρμογή ελλειπτικού παραβολοειδούς	<i>cylinder_1</i>	3721	0	0.14	125.06	0.03
	<i>cylinder_2</i>	2595	0	0.23	125.12	0.05
	<i>cylinder_3</i>	8237	0	0.14	124.88	0.02

Και εδώ οι διαδικασίες εξομάλυνσης μείωσαν αισθητά τα σφάλματα προσαρμογής (επαναλαμβάνεται η επισήμανση πως, και εδώ, οι εξομαλύνσεις αυτές ταιριάζουν ιδιαίτερα στο εξεταζόμενο αντικείμενο).

7.3.2.2. Κύλινδρος Μετροτεχνικού Εργαστηρίου ΕΜΠ

Στο πλαίσιο της διατριβής σαρώθηκαν ακόμα δύο δοκίμια του Μετροτεχνικού Εργαστηρίου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Το πρώτο δοκίμιο ήταν ο υπ' αριθμόν 273 κύλινδρος που φαίνεται στην Εικ. 7.4. Το ύψος του είναι περίπου 70 mm, ενώ η διάμετρός του είναι 29.991 mm, μετρημένη με μονοαξονική συσκευή μέτρησης με ακρίβεια $\pm 1.5 \mu\text{m}$.

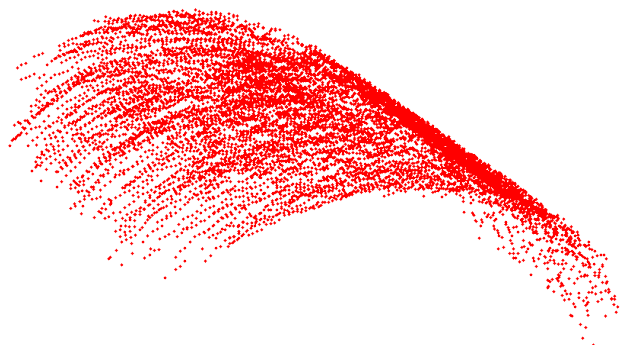


Εικόνα 7.4: Τυπικό στερεοζεύγος από την σάρωση του υπ' αριθμόν 273 κυλίνδρου του Μετροτεχνικού Εργαστηρίου του ΕΜΠ. Η ανάκλαση του laser στο κάτω μέρος του αντικειμένου δεν εισήγαγε σφάλματα, εν προκειμένω χάρη κυρίως στο όριο που τίθεται για το αποδεκτό πλάτος της λωρίδας (βλ. ενότητα 4.1).

Στην μέτρηση του δοκιμίου η βάση του συστήματος ήταν περίπου 10 cm, ενώ η μέση απόσταση λήψης περίπου 30 cm, οπότε κατά την ενότητα 7.2 η αναμενόμενη ακρίβεια είναι $\sigma_{3D} = \pm 0.15 \text{ mm}$. Στον Πίνακα 7.6 φαίνονται τα αποτελέσματα της ελαχιστοτετραγωνικής προσαρμογής της επιφάνειας στο νέφος σημείων (Εικ. 7.5), ενώ ο Πίνακα 7.7 παρουσιάζει τα αποτελέσματα μετά από τις δύο μεθόδους εξομάλυνσης.

Πίνακας 7.6 Αποτελέσματα προσαρμογής κυλίνδρου.

Πλήθος σημείων	Ποσοστό Περιμέτρου	Πλήθος χονδροειδών σφαλμάτων	Σφάλμα προσαρμογής (mm)	Διάμετρος (mm)	Σφάλμα διαμέτρου (mm)
9465	25%	2	0.15	29.81	0.02



Εικόνα 7.5: Νέφος σημείων που προέκυψε από την σάρωση του υπ' αριθμόν 273 κυλίνδρου του Μετροτεχνικού Εργαστηρίου του ΕΜΠ.

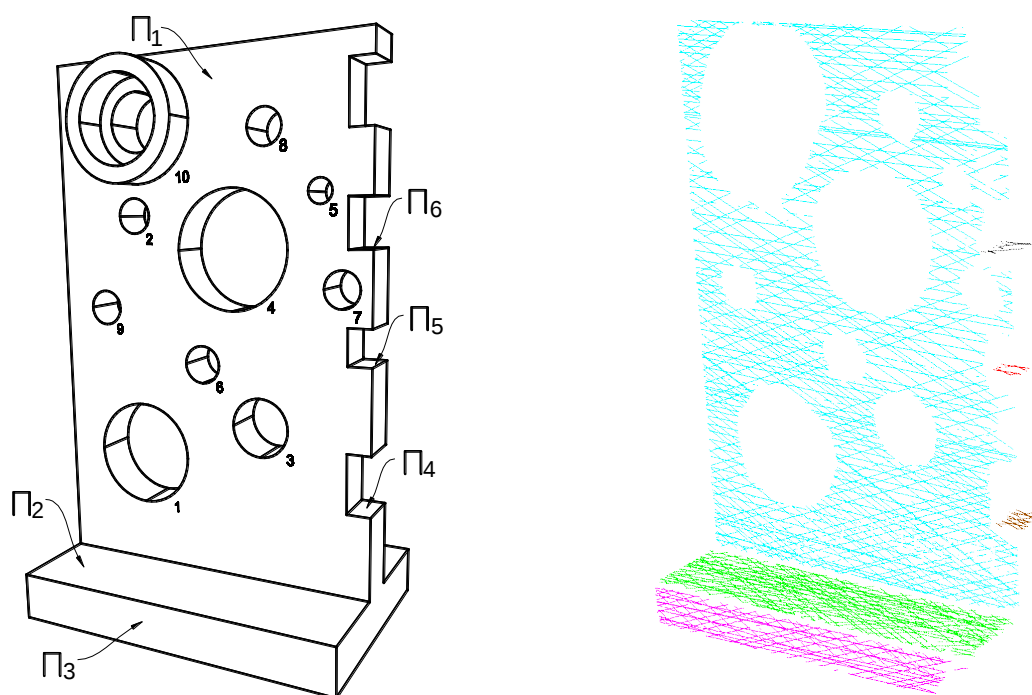
Πίνακας 7.7 Αποτελέσματα προσαρμογής κυλίνδρου σε εξομαλυμένα νέφη.

Μέθοδος εξομάλυνσης	Πλήθος σημείων	Πλήθος χονδροειδών σφαλμάτων	Σφάλμα προσαρμογής (mm)	Διάμετρος (mm)	Σφάλμα διαμέτρου (mm)
Ισοτροπ. προσαρ. επιπέδου	9467	0	0.08	29.82	0.01
Ισοτροπ. προσαρ. ελλ. παραβολ.	9467	0	0.10	29.82	0.01

Τα αποτελέσματα είναι και εδώ αποδεκτά όσον αφορά την ακρίβεια προσαρμογής όσο και τον προσδιορισμό της διαμέτρου του κυλίνδρου, που διαφέρει από την τιμή αναφοράς κατά 0.18 mm (με ποσοστό κάλυψης μόλις 25% της περιμέτρου του όλου στερεού).

7.3.3. Δοκίμιο Μετροτεχνικού Εργαστηρίου ΕΜΠ

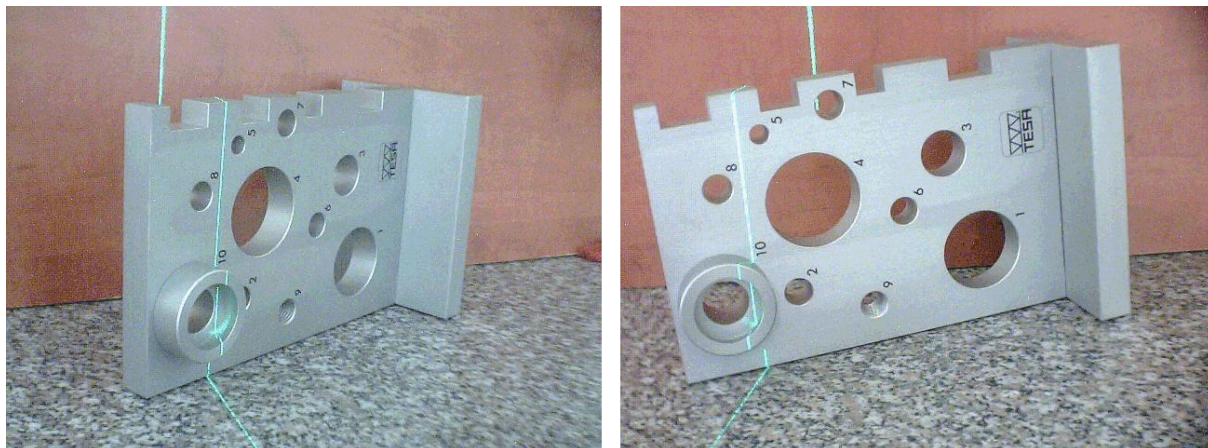
Το Μετροτεχνικό Εργαστήριο του ΕΜΠ διαθέσεε ένα ακόμα δοκίμιο, η γεωμετρία του οποίου επέτρεπε την προσαρμογή επιπέδων και, μέσω της προσαρμογής αυτής, να διαπιστωθεί η ακρίβεια μέτρησης γωνιών και αποστάσεων με τον σαρωτή της διατριβής. Το δοκίμιο είναι κατασκευασμένο από την εταιρία *TESA* και φέρει τον κωδικό 00760124 (*Practice piece*). Οι εξωτερικές διαστάσεις του δοκιμίου είναι περίπου $Y-M-B = 24-15-10 \text{ cm}^3$. Στην Εικόνα 7.6 φαίνεται μία γραμμική απεικόνιση του δοκιμίου και το νέφος σημείων που προέκυψε από την σάρωση, χρωματικά διαχωρισμένο στα έξι επίπεδα Π_1 - Π_6 (ο διαχωρισμός έγινε από τον γράφοντα).



Εικόνα 7.6: Το δοκίμιο της εταιρίας TESA. Αριστερά: γραμμική απεικόνιση του δοκιμίου στην οποία υποδεικνύονται τα έξι επίπεδα. Δεξιά: διαχωρισμός του νέφους σημείων σε επίπεδα. Η αντιστοιχία των χρωμάτων είναι Π_1 : κυανό, Π_2 : πράσινο, Π_3 : ματζέντα, Π_4 : κίτρινο, Π_5 : κόκκινο, Π_6 : μαύρο.

Στην σάρωση του δοκιμίου (Εικ. 7.7) η βάση ήταν περίπου 30 cm και η μέση απόσταση λήψης 60 cm, οπότε κατά την ενότητα 7.2 η αναμενόμενη ακρίβεια είναι $\sigma_{3D} = \pm 0.20 \text{ mm}$. Ο

Πίνακας 7.8 παρουσιάζει τους συντελεστές των επιπέδων που προσαρμόστηκαν στα επιμέρους τμήματα του νέφους σημείων με την εξίσωση $AX + BY + CZ + D = 0$ (υπό δέσμευση του μέτρου του κάθετου διανύσματος να ισούται με μονάδα: $A^2 + B^2 + C^2 = 1$), ενώ επίσης υπάρχουν το πλήθος των σημείων κάθε επιπέδου και το σφάλμα προσαρμογής του.



Εικόνα 7.7: Τυπικό ζεύγος από την σάρωση του δοκιμίου του Μετροτεχνικού Εργαστηρίου του ΕΜΠ.

Πίνακας 7.8 Αποτελέσματα προσαρμογής επιπέδων στα διαχωρισμένα νέφη σημείων.

Επίπεδο	A	B	C	D (mm)	Πλήθος σημείων	Πλήθος χονδροειδών σφαλμάτων	σ_o (mm)
Π ₁	0.41791	-0.29365	0.85971	314.272	28570	0	0.14
Π ₂	-0.90816	-0.12365	0.39992	489.243	8339	0	0.12
Π ₃	0.41775	-0.29347	0.85985	274.301	4397	0	0.14
Π ₄	-0.90812	-0.12487	0.39964	454.112	268	0	0.15
Π ₅	-0.90811	-0.12532	0.39953	394.311	100	0	0.10
Π ₆	-0.90828	-0.12614	0.39888	349.127	94	0	0.09

Οι τιμές σ_o που αναφέρονται στα επίπεδα Π₄ – Π₆ δεν μπορούν να θεωρηθούν ιδιαίτερα αξιόπιστες αφού η επιφάνεια των επιπέδων αυτών είναι πολύ μικρή. Από τα στοιχεία του Πίνακα 7.8 είναι όμως δυνατόν να βρεθούν οι γωνίες και οι αποστάσεις μεταξύ επιπέδων.

Πίνακας 7.9 Γωνίες και αποστάσεις μεταξύ των επιπέδων του δοκιμίου.

	Γωνίες (°)				Αποστάσεις (mm)			
	Αληθής τιμή	Διαφορά από αληθή τιμή	Αληθής τιμή	Διαφορά από αληθή τιμή	Αληθής τιμή	Μετρημένη τιμή	Αληθής τιμή	Μετρημένη τιμή
Επίπεδο	Π ₁		Π ₂		Π ₁		Π ₂	
Π ₂	90	0.034	—	—	—	—	—	—
Π ₃	0	0.016	90	0.044	40.156	40.08±0.14	—	—
Π ₄	90	0.042	0	0.072	—	—	34.888	35.10±0.15
Π ₅	90	0.044	0	0.098	—	—	94.892	94.88±0.09
Π ₆	90	0.023	0	0.155	—	—	139.919	139.81±0.08

Για τις αποστάσεις μεταξύ των (σχεδόν) παράλληλων επιπέδων υπολογίζεται ο μέσος όρος των αποστάσεων των σημείων του “δευτερεύοντος” επιπέδου από το “κύριο” επίπεδο. Εδώ

ως “κύρια” επίπεδα έχουν θεωρηθεί τα Π_1 και Π_2 ως πιο αξιόπιστα. Τα αποτελέσματα, καθώς και οι “αληθείς” τιμές που έχουν δοθεί από το Μετροτεχνικό Εργαστήριο του ΕΜΠ, παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.9. Οι αληθείς τιμές των μηκών έχουν μετρηθεί με συσκευή μέτρησης συντεταγμένων ακρίβειας $\pm 2.5 \mu\text{m}$, ενώ οι παραλληλίες και καθετότητες μεταξύ των επιπέδων θεωρήθηκαν ως εκ κατασκευής.

Τα αποτελέσματα κρίνονται ως ικανοποιητικά. Οι αποστάσεις μεταξύ επιπέδων αποκλίνουν λιγότερο από 0.1 mm από τις αληθείς (με εξαίρεση την απόσταση των Π_2 και Π_4 που είναι 0.21 mm), ενώ και οι διαφορές στις γωνίες μεταξύ των επιπέδων δεν υπερβαίνουν τις 0.10° (με εξαίρεση την γωνία των Π_2 και Π_6 που είναι 0.16°).

7.4. Σύγκριση με εμπορικούς σαρωτές

Εκτός από την εκτίμηση της ακρίβειας ενός σαρωτή βάσει επιφανειών γνωστής γεωμετρίας ή και γνωστών διαστάσεων, ένας επιπλέον τρόπος αξιολόγησης είναι η σύγκριση με άλλα συστήματα κατά τεκμήριο ανώτερης ακρίβειας ή και συστήματα που έχουν αντίστοιχη λειτουργία. Ο σαρωτής της διατριβής συγκρίθηκε έτσι, για τον σκοπό του περαιτέρω ελέγχου, και με δύο εμπορικούς σαρωτές, έναν υψηλού και έναν χαμηλού κόστους.

7.4.1. Σαρωτής υψηλού κόστους (SL2 Scanner)

Ο σαρωτής υψηλού κόστους που χρησιμοποιήθηκε εδώ είναι ο *SL2 Scanner*, της εταιρίας *XYZRGB® Inc.*, που ανήκει στο Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας του ΕΜΠ. Πρόκειται για έναν σαρωτή δομημένου φωτός δυαδικού κώδικα (βλ. Εισαγωγή). Τα βασικά του μέρη είναι δύο φωτογραφικές μηχανές *uEye 5MP* και ένας προβολέας *DLP Infocus IN35W*. Ο χειρισμός του συστήματος πραγματοποιείται μέσω ενός μέσου *H/Y*, στον οποίο είναι εγκατεστημένο το σχετικό λογισμικό της εταιρίας *XYZRGB®*. Η αναμενόμενη ακρίβεια του συγκεκριμένου σαρωτή του επιτρέπει να λειτουργήσει ως μέτρο αναφοράς για τον σαρωτή της διατριβής. Ειδικότερα, η ακρίβεια του σαρωτή έχει εκτιμηθεί στο παρελθόν στο Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας σε συνεργασία με το Μετροτεχνικό Εργαστήριο του ΕΜΠ. Η αναφερόμενη από τον κατασκευαστή ακρίβεια των $50 \mu\text{m}$ κρίθηκε ότι είναι εφικτή, υπό ορισμένες προϋποθέσεις (Georgopoulos et al., 2010). Δεδομένων πάντως των συνθηκών κατά τις σαρώσεις για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής, μία αναμενόμενη ακρίβεια της τάξης των $100 \mu\text{m}$ κρίθηκε εδώ ως πιο ρεαλιστική.

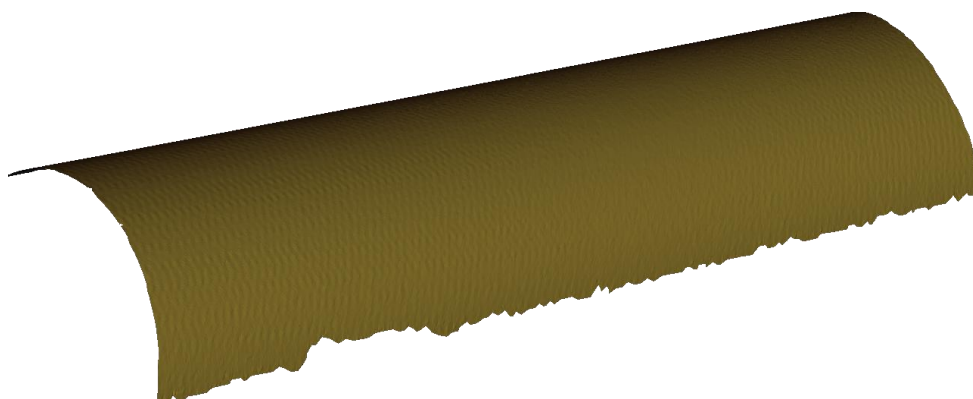
7.4.1.1. Σάρωση κυλίνδρου

Αρχικά σαρώθηκε ο κύλινδρος που χρησιμοποιήθηκε στην ενότητα 7.3.2.1. και στα παραχθέντα νέφη σημείων προσαρμόστηκε εξίσωση κυλίνδρου. Τα νέφη αντιπροσωπεύουν περίπου το 35% της περιμέτρου (Εικ. 7.8). Τα αποτελέσματα της προσαρμογής, όπως επίσης και οι μέσες τιμές από τις τρεις σαρώσεις που πραγματοποιήθηκαν, φαίνονται στον Πίνακα 7.10. Για λόγους άμεσης σύγκρισης υπάρχουν στον πίνακα αυτόν και οι υπολογισμένες μέ-

σες τιμές των αντίστοιχων μεγεθών από τον σαρωτή της διατριβής.

Πίνακας 7.10 Αποτελέσματα προσαρμογής κυλίνδρου σε αποτελέσματα από τον *SL2 Scanner*.

Σάρωση	Πλήθος σημείων	Ποσοστό Περιμέτρου	Πλήθος χονδροειδών σφαλμάτων	Σφάλμα προσαρμογής (mm)	Διάμετρος (mm)	Σφάλμα διαμέτρου (mm)
<i>cylinder_I</i>	97415	35%	0	0.11	124.87	0.03
<i>cylinder_II</i>	79275	35%	0	0.13	125.07	0.04
<i>cylinder_III</i>	82552	35%	0	0.10	124.99	0.03
Μέση τιμή				0.11	124.97	0.03
Μέση τιμή από σαρωτή διατριβής (από Πίνακα 7.4)				0.22	124.99	0.04



Εικόνα 7.8: Ανακατασκευασμένη επιφάνεια κυλίνδρου από την σάρωση με τον *SL2 Scanner*.

Η τιμή του σφάλματος της προσαρμογής, όπως αναμένεται, είναι μικρότερη (περίπου υποδιπλάσια) από την εκτιμώμενη ακρίβεια του σαρωτή της διατριβής, οπότε ο έλεγχος μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστος για τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην ενότητα 7.3.2.1. Οι μέσες τιμές της διαμέτρου ουσιαστικά συμπίπτουν, ενώ οι μέγιστες διαφορές στις τιμές της διαμέτρου μεταξύ σαρώσεων είναι 0.20 mm για αυτόν το σαρωτή έναντι 0.28 mm για τον σαρωτή της διατριβής (Πίνακας 7.4).

7.4.1.2. Σάρωση σύνθετων επιφανειών

Εκτός από κανονικές επιφάνειες, σκόπιμο είναι ο έλεγχος του σαρωτή της διατριβής να γίνει και με αντικείμενα τυχαίας μορφής, λόγος για τον οποίο για την σύγκριση βάσει του σαρωτή υψηλού κόστους σαρώθηκαν και πιο σύνθετες επιφάνειες. Κάθε αντικείμενο σαρώθηκε και με τους δύο σαρωτές, αυτόν της διατριβής και τον *SL2 Scanner*, από παρόμοια θέση σάρωσης. Εν συνεχεία, τα ανεξάρτητα νέφη από τις σαρώσεις με τα δύο διαφορετικά συστήματα συνενώθηκαν με τον αλγόριθμο ICP (βλ. ενότητα 6.3). Δεδομένου ότι οι επιφάνειες είναι εδώ άγνωστες, ως κριτήριο ακρίβειας για την σύγκριση λαμβάνεται η μέση τετραγωνική απόσταση (RMS) των αντιστοιχισμένων σημείων όπως αυτά προκύπτουν από τον αλγόριθμο συνένωσης ICP, η οποία αντιπροσωπεύει, έτσι, ένα μέτρο της ταύτισης των επιφανειών που έχουν προκύψει από τους δύο σαρωτές. Με τον τρόπο αυτό ελέγχεται η ομοιότητα του νέφους σημείων από τον σαρωτή της διατριβής με εκείνο από τον (θεωρούμενο υπέρτερης

ακρίβειας) εμπορικό σαρωτή.

Τα αντικείμενα που σαρώθηκαν είναι ένα πολυεστερικό αγαλματίδιο της Αφροδίτης και ένα πλαστικός κουμπαράς. Η πρώτη επιφάνεια σαρώθηκε από δύο θέσεις και με τους δύο σαρωτές, ενώ για την δεύτερη έγινε μία σάρωση με τον εμπορικό σαρωτή υψηλού κόστους και δύο ανεξάρτητες σαρώσεις με τον σαρωτή της διατριβής (βλ. συνένωση των νεφών στην Εικ. 7.9). Στον Πίνακα 7.11 παρουσιάζονται οι μέσες τετραγωνικές αποστάσεις των αντιστοιχισμένων σημείων των νεφών μετά από την συνταύτισή τους με τον αλγόριθμο ICP.

Πίνακας 7.11

Σύγκριση με *SL2 Scanner* μέσω αντικειμένων ελεύθερης μορφής.

Αντικείμενο	Πλήθος σημείων			RMS αποστάσεων (mm)
	Σαρωτής διατριβής	<i>SL2 Scanner</i>	Ομόλογα σημεία	
<i>Αφροδίτη 1</i>	15788	7451	4459	0.30
<i>Αφροδίτη 2</i>	13132	8719	3516	0.25
<i>κουμπαράς 1</i>	17474	14105	7039	0.25
<i>κουμπαράς 2</i>	18830	14105	9129	0.24

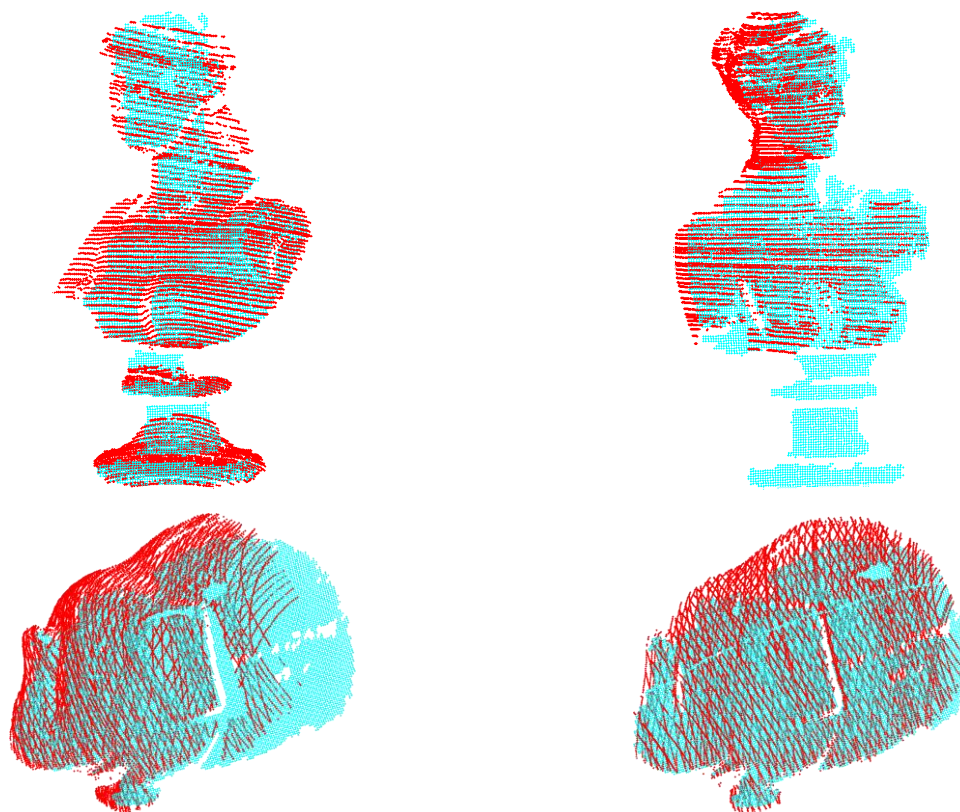
Τα αποτελέσματα κρίνονται και εδώ ικανοποιητικά. Εάν θεωρηθούν ακρίβειες περί τα 0.2 mm για τον σαρωτή της διατριβής και 0.1 mm για τον εμπορικό σαρωτή, μέσες τετραγωνικές διαφορές των δύο νεφών περί τα 0.25 mm είναι συμβατές με αυτές τις τιμές.

Όπως μάλιστα φαίνεται στον Πίνακα 7.12, οι τιμές ομοιότητας των επιφανειών βελτιώνονται όταν επιβληθούν στα νέφη από τον σαρωτή της διατριβής οι μέθοδοι εξομάλυνσης ισοτροπικής προσαρμογής επιπέδου και ισοτροπικής προσαρμογής ελλειπτικού παραβολοειδούς (οι οποίες παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο). Ίσως δε η μέθοδος προσαρμογής ελλειπτικού παραβολοειδούς να δίνει ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα συγκρινόμενα με εκείνη της προσαρμογής επιπέδου, καθώς επιτρέπει μεγαλύτερη ελευθερία στην τοπικά προσαρμοζόμενη επιφάνεια.

Πίνακας 7.12

Σύγκριση εξομαλυμένων νεφών με νέφη από τον *SL2 Scanner*

Μέθοδος εξομάλυνσης	Αντικείμενο	Πλήθος σημείων			RMS αποστάσεων (mm)
		Σαρωτής διατριβής	<i>SL2 Scanner</i>	Ομόλογα	
Ισοτροπική προσαρμογή επιπέδου	<i>Αφροδίτη 1</i>	15788	7451	4444	0.26
	<i>Αφροδίτη 2</i>	13132	8719	3497	0.22
	<i>κουμπαράς 1</i>	17474	14105	6997	0.23
	<i>κουμπαράς 2</i>	18830	14105	9101	0.22
Ισοτροπική προσαρμογή ελλειπτικού παραβολοειδούς	<i>Αφροδίτη 1</i>	15788	7451	4447	0.26
	<i>Αφροδίτη 2</i>	13132	8719	3501	0.21
	<i>κουμπαράς 1</i>	17474	14105	7019	0.23
	<i>κουμπαράς 2</i>	18830	14105	9098	0.21



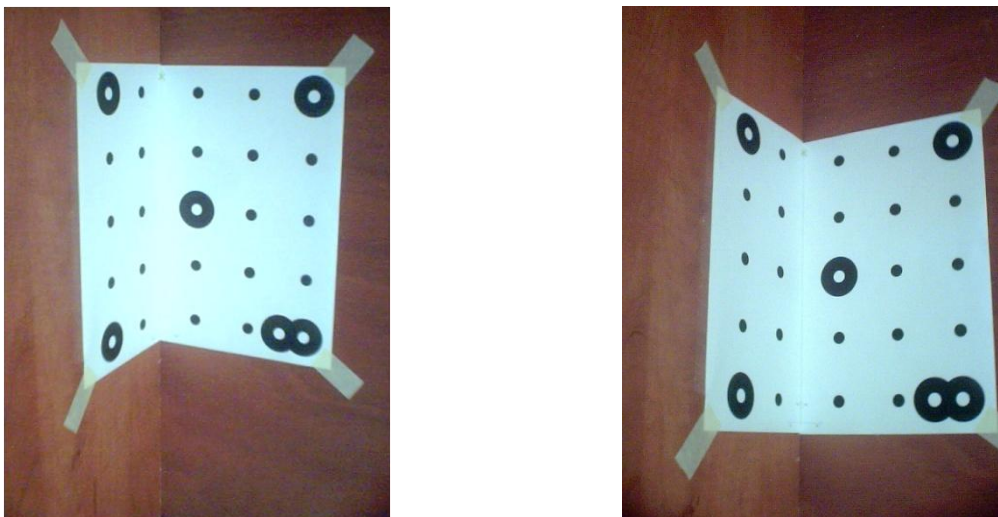
Εικόνα 7.9: Νέφη σημείων των δυο επιφανειών που χρησιμοποιήθηκαν για την σύγκριση μέσω του ICP. Με κυανό το νέφος από τον SL2 Scanner, με κόκκινο το νέφος από τον σαρωτή της διατριβής.

7.4.2. Σαρωτής χαμηλού κόστους (*David Laser Scanner*)

Όπως έχει αναφερθεί, η σάρωση των επιπέδων που παρουσιάστηκε στην ενότητα 7.3.1, όπως επίσης η σάρωση των δύο κυλίνδρων στην ενότητα 7.3.2.1, έγιναν κατά τρόπο ώστε να είναι δυνατή η εισαγωγή των δεδομένων στο λογισμικό *David Laser Scanner* (Winkelbach et al., 2006). Η έκδοση του προγράμματος που αξιοποιήθηκε για την σύγκριση είναι η V1.4b, η οποία είχε αντληθεί από την ιστοσελίδα των δημιουργών της www.david-laserscanner.com το 2007, όταν ακόμα το πρόγραμμα διετίθετο δωρεάν. Στην έκδοση αυτή του προγράμματος του σαρωτή *David* προσφέρεται η δυνατότητα για σάρωση σε πραγματικό χρόνο μέσω των εικόνων που καταγράφει μία μηχανή δικτύου, όπως επίσης και για σάρωση βάσει δεδομένων από αρχείο βίντεο που έχει ληφθεί προηγουμένως. Εδώ επελέγη η δεύτερη διαδικασία, κυρίως διότι στόχος ήταν να χρησιμοποιηθούν τα ίδια δεδομένα και για τους δύο σαρωτές, αλλά και γιατί οι εικόνες που είχαν συλλεγεί κατά την σάρωση απαιτούσαν επεξεργασία. Κατ' αρχάς οι εικόνες έπρεπε να στραφούν γιατί ο σαρωτής *David* προϋποθέτει πως η τομή των δύο κάθετων επιπέδων είναι περίπου παράλληλη στον άξονα y του συστήματος της μηχανής. Επίσης, επειδή ο σαρωτής *David* προϋποθέτει ότι υπάρχει απόλυτο σκοτάδι κατά την σάρωση, από κάθε εικόνα αφαιρέθηκε το υπόβαθρο σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί στην ενότητα 3.5. Τελικά, από τις επεξεργασμένες εικόνες συντέθηκε αρχείο βίντεο (χωρίς συμπίεση δεδομένων), το οποίο εισήχθη στο πρόγραμμα του σαρωτή *David* για την δημιουργία του νέφους σημείων.

Τα αντικείμενα που σαρώθηκαν είχαν τοποθετηθεί εντός ορθής γωνίας υλοποιημένης με την βοήθεια σχεδιαστικού τριγώνου (όπως δηλαδή θα την υλοποιούσε και κάποιος πραγματικός χρήστης του προγράμματος αυτού). Μετά, και αφού είχαν εισαχθεί τα δεδομένα στον αλγόριθμο που περιγράφηκε στην ενότητα 5.2, υπολογίστηκε η γωνία μεταξύ των εξωτερικών επιπέδων $A_1X + B_1Y + C_1Z + D_1 = 0$ και $A_2X + B_2Y + C_2Z + D_2 = 0$. Αν δεσμευτούν τα μέτρα των κάθετων διανυσμάτων των επιπέδων να ισούνται με την μονάδα, η γωνία των επιπέδων προκύπτει ως $\arccos([A_1 \ B_1 \ C_1]^T \cdot [A_2 \ B_2 \ C_2]^T)$ από το εσωτερικό γινόμενο των διανυσμάτων. Έτσι εξακριβώθηκε ότι η γωνία μεταξύ των δύο επιπέδων ήταν $89^\circ.70$.

Επίσης, στα δύο επίπεδα είχαν τοποθετηθεί τα απαιτούμενα κατάλληλα πεδία βαθμονόμησης του συγκεκριμένου σαρωτή (Εικ. 7.10). Βάσει των οδηγιών του πρέπει οι παρατηρούμενες τομές του επιπέδου του laser με τα δυο κάθετα επίπεδα να σχηματίζουν μία σαφώς τεθλασμένη γραμμή, και επιπλέον αυτές πρέπει να έχουν επαρκές μήκος ώστε να μπορεί να προσδιοριστεί αυτόματα η θέση του επιπέδου από τον σαρωτή *David*, όπως εξηγήθηκε στην Εισαγωγή. Επειδή μάλιστα ο σαρωτής της παρούσας διατριβής χρησιμοποιεί δύο μηχανές, η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνει δύο φορές, μία για κάθε μηχανή. Υπενθυμίζεται εδώ πως για να γίνουν μετρήσεις αξιοποιήσιμες και από τους δύο σαρωτές έπρεπε να ολοκληρωθεί η λήψη των δεδομένων και να ακολουθήσει μετεπεξεργασία τους. Αυτό συνεπάγεται ότι ορισμένες λωρίδες laser ενδέχεται να μην πληρούν τις προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν και άρα να μην παράγουν σημεία με τον σαρωτή *David*. Συνέπεια είναι ότι τα αντίστοιχα νέφη περιλαμβάνουν μικρότερο αριθμό σημείων, περίπου το $\frac{1}{4}$, από τα αντίστοιχα του σαρωτή της διατριβής (όπως προκύπτει και από σύγκριση των Πινάκων 7.13 και 7.15).



Εικόνα 7.10: Στερεοζεύγος εικόνων των δύο κάθετων επιπέδων με τα πεδία βαθμονόμησης του σαρωτή *David* (οι εικόνες είναι στραμμένες ώστε να πληρούν τις προϋποθέσεις του σαρωτή). Η διαδικασία σάρωσης μπορεί να εκτελεστεί δύο φορές, μια για κάθε μηχανή.

7.4.2.1. Σάρωση επιπέδου

Στην ενότητα 7.3.1 είχαν παρουσιαστεί 4 σαρώσεις επίπεδων αντικειμένων (κεραμικά πλα-

κίδια $20 \times 20 \text{ cm}^2$), τα αποτελέσματα των οποίων δόθηκαν στον Πίνακα 7.2. Με αυτά τα δεδομένα εικόνων μπορούν να εκτελεστούν 8 επιλύσεις με τον σαρωτή *David Laser Scanner*. Στον Πίνακα 7.13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσαρμογής επιπέδων στα δεδομένα σάρωσης των κεραμικών πλακιδίων με τον συγκεκριμένο σαρωτή (με α και β χαρακτηρίζονται οι επιλύσεις από τις δύο μηχανές).

Πίνακας 7.13 Αποτελέσματα προσαρμογής επιπέδων στα δεδομένα σάρωσης των κεραμικών πλακιδίων επεξεργασμένα με τον σαρωτή *David Laser Scanner*.

Επίπεδο	Πλήθος σημείων	Πλήθος χονδροειδών σφαλμάτων	σ_o (mm)	σ_o (mm) από σαρωτή διατριβής
κόκκινο 1 α	2411	1	0.27	0.19
κόκκινο 1 β	1144	2	0.33	
κόκκινο 2 α	2650	2	0.22	0.18
κόκκινο 2 β	1846	1	0.21	
λευκό 1 α	1731	0	0.37	0.17
λευκό 1 β	944	2	0.26	
λευκό 2 α	5226	4	0.29	0.17
λευκό 2 β	1843	0	0.29	

Αρχικά επισημαίνεται η σαφής μείωση του αριθμού των σημείων που περιγράφουν το επίπεδο σε σύγκριση με τον σαρωτή της διατριβής (πρβλ. Πίνακα 7.2) αφού, όπως προαναφέρθηκε, ορισμένες από τις λωρίδες του laser δεν επιλύθηκαν από το πρόγραμμα του σαρωτή. Στις περιπτώσεις των λωρίδων αυτών είτε το μήκος τομής του laser με τα δύο κάθετα επίπεδα ήταν πολύ μικρό είτε η γωνία μεταξύ των απεικονίσεων των τομών αυτών ήταν ακατάλληλη για να προσδιοριστεί η θέση του επιπέδου του laser. Αυτό θα μπορούσε να είχε αποφευχθεί αν γινόταν κανονική χρήση του προγράμματος (δηλαδή σε πραγματικό χρόνο) και όχι με μετεπεξεργασία δεδομένων όπως έγινε εδώ. Σε μια τέτοια περίπτωση όμως δεν θα ήταν δυνατόν να χρησιμοποιηθούν τα ίδια ακριβώς δεδομένα από τους δύο σαρωτές, οπότε προτιμήθηκε η εκδοχή της μετεπεξεργασίας.

Για να υπάρξει πιο αντικειμενική σύγκριση μεταξύ των δύο σαρωτών, από τα πλήρη δεδομένα επελέγησαν μόνο οι εικόνες οι οποίες ήταν δυνατόν να επιλυθούν με το πρόγραμμα του σαρωτή *David*. Τα στερεοζεύγη αυτά χρησιμοποιήθηκαν στον αλγόριθμο της διατριβής. Έτσι έγιναν 8 ακόμα επιλύσεις με τον σαρωτή της διατριβής προκειμένου να υπάρχουν άμεσα συγκρίσιμα δεδομένα για τους σαρωτές, δηλαδή νέφη με παρόμοιο αριθμό σημείων. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 7.14 (στον οποίο τα αποτελέσματα από τον σαρωτή *David* είναι προφανώς τα ίδια του Πίνακα 7.13).

Από τους Πίνακες 7.13 και 7.14 φαίνεται ότι ο σαρωτής της διατριβής δίνει πιο ακριβή αποτελέσματα από τον σαρωτή *David*. Η εισαγωγή της δεύτερης μηχανής όσο και η χρήση εξωτερικών δεσμεύσεων εκτιμάται ότι αυξάνουν την ακρίβεια του παραγόμενου νέφους.

Πίνακας 7.14 Σύγκριση αποτελεσμάτων σαρωτή *David Laser Scanner* – σαρωτή διατρίβης για παρόμοιο αριθμό σημείων.

Επίπεδο	<i>David Laser Scanner</i>			Σαρωτής διατρίβης		
	Πλήθος σημείων	Πλήθος χονδροειδών σφαλμάτων	σ_o (mm)	Πλήθος σημείων	Πλήθος χονδροειδών σφαλμάτων	σ_o (mm)
κόκκινο 1 α	2411	1	0.27	2515	0	0.19
κόκκινο 1 β	1144	2	0.33	1203	0	0.18
κόκκινο 2 α	2650	2	0.22	2732	0	0.18
κόκκινο 2 β	1846	1	0.21	2146	0	0.18
λευκό 1 α	1731	0	0.37	1797	1	0.17
λευκό 1 β	944	2	0.26	1140	0	0.17
λευκό 2 α	5226	4	0.29	5437	0	0.17
λευκό 2 β	1843	0	0.29	2031	1	0.17

7.4.2.2. Σάρωση κυλίνδρου

Ομοίως, τα δεδομένα από τις δύο σαρώσεις του κυλινδρικού σωλήνα PVC που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 7.3.2.1 υπέστησαν επεξεργασία με το πρόγραμμα *David Laser Scanner* και στα νέφη προσαρμόστηκαν κύλινδροι. Η διαδικασία εκτελέστηκε και εδώ δύο φορές για κάθε σάρωση, μία για κάθε μηχανή (α, β). Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 7.15.

Από την σύγκριση των μέσων όρων των αποτελεσμάτων μεταξύ του σαρωτή χαμηλού κόστους *David* και αυτού της διατρίβης φαίνεται ότι ο υπολογιζόμενος μέσος κύλινδρος από τον πρώτο σαρωτή έχει κάπως μεγαλύτερη αβεβαιότητα (υπενθυμίζεται ότι η τιμή 0.22 mm του σαρωτή της διατρίβης οφείλεται σε μία μέτρηση που κρίθηκε ως ιδιαίτερα θορυβώδης – βλ. ενότητα 7.3.2.1 και Πίνακα 7.3).

Πίνακας 7.15 Αποτελέσματα προσαρμογής κυλίνδρου στον σωλήνα PVC από επεξεργασία με τον σαρωτή *David Laser Scanner*.

Κύλινδρος	Πλήθος σημείων	Ποσοστό Περιμέτρου	Πλήθος χονδροειδών σφαλμάτων	Σφάλμα προσαρμογής (mm)	Διάμετρος (mm)	Σφάλμα διαμέτρου (mm)
<i>cylinder_2_α</i>	1758	30%	0	0.25	124.17	0.06
<i>cylinder_2_β</i>	1587	30%	0	0.30	123.57	0.09
<i>cylinder_3_α</i>	2903	35%	0	0.26	124.00	0.03
<i>cylinder_3_β</i>	3569	40%	0	0.31	122.25	0.05
Μέσος όρος				0.28	123.32	0.05
Μέση τιμή από σαρωτή <i>SL2 Scanner</i> (Πίν. 7.10)				0.11	124.97	0.03
Μέση τιμή από σαρωτή διατρίβης (Πίν. 7.4)				0.22	124.99	0.04

Από την άλλη μεριά, η τιμή της υπολογιζόμενης διαμέτρου από τις σαρώσεις με τον σαρωτή *David Laser Scanner* απέχει πολύ σημαντικά (η διαφορά της μέσης τιμής είναι –1.34%) από την ονομαστική τιμή των 125 mm σε σχέση με τον σαρωτή της διατρίβης αλλά και τον εμπορικό σαρωτή υψηλής ακρίβειας *SL2 Scanner*. Τέλος, όπως και προηγουμένως, επελέγησαν

οι εικόνες (και κατ' επέκταση τα στερεοζεύγη) που αντιστοιχούν στα καρέ για τα οποία ήταν εφικτός ο υπολογισμός σημείων με τον σαρωτή *David* ώστε να υπάρχουν και για τον σαρωτή της διατριβής νέφη παρόμοιου πλήθους σημείων. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 7.16. Σημειώνεται ότι για τον σαρωτή της διατριβής δίδονται επίσης τέσσερα αποτελέσματα, καθώς για κάθε εικόνα που χρησιμοποιείται στον σαρωτή *David* δημιουργείται ένα ζεύγος, όπου προφανώς τα ζεύγη που προκύπτουν από την αριστερή και δεξιά εικόνα κάθε σάρωσης έχουν κατά βάση τις ίδιες λωρίδες laser (για τον λόγο αυτό οι περιπτώσεις *α* και *β* δίνουν σχεδόν ταυτόσημα αποτελέσματα).

Πίνακας 7.16 Αποτελέσματα προσαρμογής κυλίνδρου στον PVC σωλήνα από επεξεργασία με τον σαρωτή *David Laser Scanner* (παρόμοιος αριθμός σημείων).

Σαρωτής	Κύλινδρος	Πλήθος σημείων	Ποσοστό Περιμέτρου	Πλήθος χονδροειδών σφαλμάτων	Σφάλμα προσαρμογής (mm)	Διάμετρος (mm)	Σφάλμα διαμέτρου (mm)
<i>David Laser Scanner</i>	<i>cylinder_2_α</i>	1758	30%	0	0.25	124.17	0.06
	<i>cylinder_2_β</i>	1587	30%	0	0.30	123.57	0.09
	<i>cylinder_3_α</i>	2903	35%	0	0.26	124.00	0.03
	<i>cylinder_3_β</i>	3569	40%	0	0.31	122.25	0.05
	Μέσος όρος				0.28	123.32	0.05
Σαρωτής διατριβής	<i>cylinder_2_α</i>	1912	30%	0	0.26	125.14	0.05
	<i>cylinder_2_β</i>	1670	30%	0	0.27	125.15	0.06
	<i>cylinder_3_α</i>	3084	35%	0	0.20	124.88	0.03
	<i>cylinder_3_β</i>	3372	35%	0	0.20	124.90	0.04
	Μέσος όρος				0.22	125.03	0.04

Τα αποτελέσματα από παρεμφερή αριθμό σημείων δεν αλλάζουν την γενική εικόνα. Αξίζει, πάντως, να σημειωθεί πως ο σαρωτής *David* δέχεται ως δεδομένο ότι η γωνία μεταξύ των δύο εξωτερικών επιπέδων είναι αυστηρά ίση με 90°. Επομένως, η όποια αποχή από την ορθογωνικότητα συνεπάγεται παραμόρφωση του παραγόμενου νέφους.

7.5. Αξιολόγηση ακρίβειας

Τα προηγηθέντα εμφανίζουν την θεωρητικά αναμενόμενη ακρίβεια να επαληθεύεται και πρακτικά (το ότι στις προσαρμογές επιπέδων η ακρίβεια εμφανίζεται καλύτερη από την αναμενόμενη οφείλεται βέβαια στις ιδανικές συνθήκες για τον ακριβή εντοπισμό κορυφής της καμπύλης Gauss κατά την σάρωση επιπέδων). Αυτό προκύπτει από τις προσαρμογές κυλίνδρων όσο και από το κριτήριο του μεγέθους της διαμέτρου που (παρ' ότι ίσως δεν έχει την ίδια βαρύτητα με το σ_0 της προσαρμογής) ικανοποιείται από τον σαρωτή της διατριβής. Αλλά και η σύγκριση του σαρωτή με τους αντίστοιχους εμπορικούς, και ιδίως με τον υψηλής ακρίβειας και κόστους σαρωτή του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας, αποδίδει τα αναμενόμενα αποτελέσματα, υποδηλώνοντας έτσι ότι η θεωρητική εκτίμηση της ακρίβειας είναι όντως ρεαλιστική.

Στο Κεφάλαιο αυτό αναλύθηκαν τα σφάλματα του συστήματος της διατριβής τόσο από θεωρητική άποψη όσο και με σάρωση αντικειμένων γνωστής γεωμετρίας και προσαρμογή των αντίστοιχων επιφανειών. Επίσης, ο σαρωτής αξιολογήθηκε σε σύγκριση με αντίστοιχους εμπορικούς σαρωτές χαμηλού αλλά και υψηλού κόστους. Στο επόμενο Κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα στοιχεία για τις βασικές πρακτικές εφαρμογές που έγιναν με τον σαρωτή στο πλαίσιο της διατριβής.

8

8. Εφαρμογές

8.1. Εισαγωγικά

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται πληρέστερα και σχολιάζονται οι πρακτικές εφαρμογές που έγιναν στο πλαίσιο της διατριβής και έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί ως παραδείγματα είτε για έλεγχο σε ζητήματα που εξετάστηκαν σε προηγούμενα Κεφάλαια. Οι απεικονίσεις που παρουσιάζονται εδώ έχουν προκύψει μετά από τριγωνισμό των νεφών σημείων σε διαθέσιμο λογισμικό. Υπάρχει ακόμα συνοδευτικός πίνακας όπου αναφέρονται το πλήθος σημείων από κάθε θέση σάρωσης και το τυπικό σφάλμα σ_o της ανακατασκευής. Η τιμή του σ_o δίνεται και ως καθαρός αριθμός, όπως δηλαδή προέκυψε άμεσα από την επίλυση με χρήση βαρών, αλλά και ως εκτίμηση σε μονάδες μm μέσω της μέσης ακρίβειας σ_b του προσδιορισμού εικονοσημείων (βλ. διαδικασία ανίχνευσης κορυφής στο Κεφάλαιο 4) όπως αυτή εκτιμήθηκε σε κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή.

Πέραν αυτών, παρουσιάζονται και τρεις ειδικότερες εφαρμογές (ενότητες 8.7–8.9) προκειμένου να αξιολογηθεί η συμπεριφορά του σαρωτή σε ορισμένες οριακές περιπτώσεις. Πρόκειται για: α) την σάρωση ενός αντικειμένου πολύ μικρών διαστάσεων σε σχέση με τα κατ' αρχήν προβλεπόμενα (λόγω των περιορισμών που θέτει το πλάτος της λωρίδας του laser, η ανάλυση των εικόνων και το ελάχιστο δυνατό μήκος της βάσης του ζεύγους), και β) την σάρωση δυο αντικειμένων που δεν είναι στερεά σώματα (ανθρώπινο πρόσωπο και ανθρώπινος κορμός).

8.2. Δερμάτινο κουτί



Οι διαστάσεις του κουτιού είναι περίπου Μ-Π-Υ: 14-9-7 cm³. Η σάρωση ολόκληρου του αντικειμένου (χωρίς την βάση του) έγινε από 4 θέσεις σάρωσης με βάση του συστήματος των μηχανών περί τα 40 cm και από απόσταση λήψης περίπου 80 cm.

Θέσεις σάρωσης	1	2	3	4
Πλήθος σημείων	15347	22760	26499	26322
σ_b (pixel)	0.09	0.09	0.10	0.10
σ_o ανακατασκευής	1.23	1.19	1.32	1.27
σ_o ανακατασκευής (pixel)	0.11	0.11	0.13	0.12

8.3. Κεραμική κεφαλή



Η κεραμική κεφαλή είναι γλυπτό χωρίς όνομα της γλύπτριας *Αντιγόνης Πανταζή* με στοιχεία *ceramic sculpture, stoneware, terra sigillatta*. Το ύψος του γλυπτού είναι περίπου 35 cm. Για την πλήρη σάρωση του γλυπτού (χωρίς την βάση του) απαιτήθηκαν 11 θέσεις σάρωσης. Η βάση του συστήματος ήταν περίπου 40 cm, ενώ η απόσταση λήψης περίπου 80 cm. Στο μοντέλο δεν έχει αποδοθεί υφή. Το αντικείμενο αυτό είναι το δεύτερο που μετρήθηκε πλήρως στο πλαίσιο της διατριβής και η απόδοσή του κρίνεται ως απολύτως ικανοποιητική.

Θέσεις σάρωσης	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Πλήθος σημείων	65682	58101	23437	38093	68316	56863	14187	40223	49629	22485	22073
σ_b (pixel)	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	0.08	0.08	0.11	0.09	0.08
σ_o ανακατασκευής	1.39	1.24	1.15	1.17	1.36	1.41	1.29	1.10	1.27	1.30	1.16
σ_o ανακατασκευής (pixel)	0.12	0.12	0.10	0.12	0.13	0.14	0.11	0.09	0.14	0.12	0.10



8.4. Κεραμικός κουμπαράς



Ο κεραμικός κουμπαράς έχει ύψος περίπου 20 cm. Κατά την σάρωση, η βάση του συστήματος ήταν περίπου 30 cm και η απόσταση λήψης περίπου 40 cm. Στο μοντέλο έχει αποδοθεί φωτούφή. Κατά την συνένωση των νεφών η διαφορά υφής από διαφορετικές θέσεις σάρωσης εμφανίζεται ως χρωματικός θόρυβος στην επιφάνεια του μοντέλου. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στον μη βέλτιστο φωτισμό κατά την σάρωση, ειδικότερα δε στην περίπτωση μίας των εικόνων. Για να περιοριστεί το φαινόμενο αυτό, στις περιοχές που σαρώθηκαν από τουλάχιστον δύο θέσεις έγινε επιλογή σημείων από την θέση για την οποία ο φωτισμός θεωρήθηκε καλύτερος. Αυτό, πάντως, αφορά αποκλειστικά τον χρωματισμό του μοντέλου και όχι την 3D ανακατασκευή, η οποία, όπως φαίνεται και από τις επόμενες εικόνες, κρίθηκε ως ικανοποιητική. Ακόμα, στον πίνακα παρουσιάζεται το πλήθος των σημείων που προέκυψαν από την επίλυση.



Θέσεις σάρωσης	1	2	3
Πλήθος σημείων	70154	50558	58967
σ_h (pixel)	0.09	0.10	0.10
σ_o ανακατασκευής	1.01	1.07	1.12
σ_o ανακατασκευής (pixel)	0.09	0.11	0.11



8.5. Αγαλματίδιο Αφροδίτης



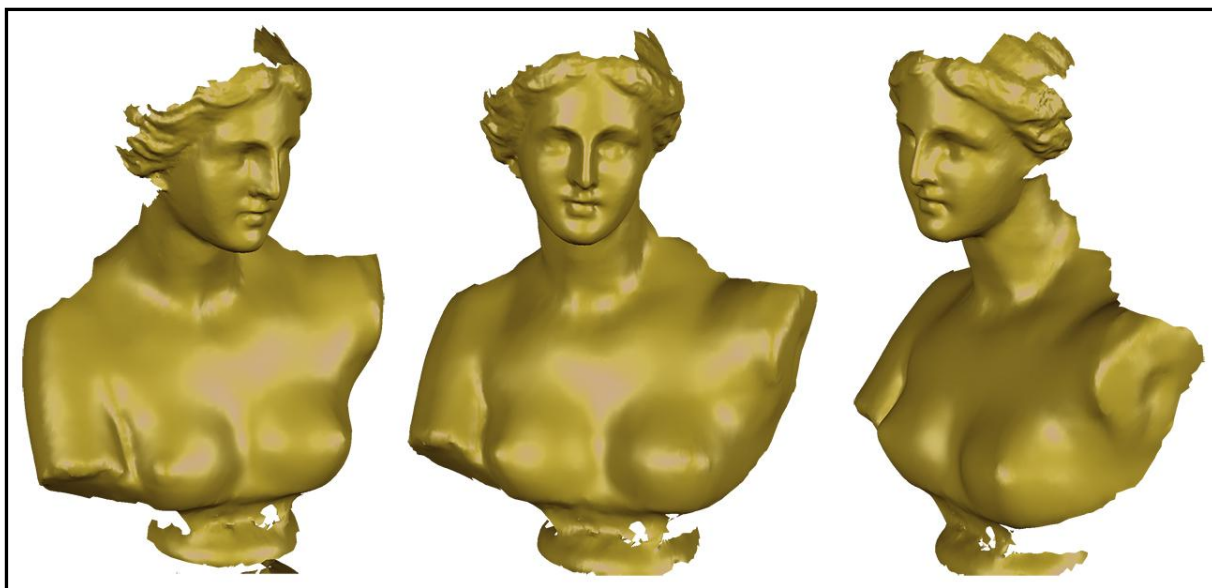
Το αγαλματίδιο της Αφροδίτης είναι ένα τουριστικό ενθύμιο από πολυεστέρα ύψους περίπου 15 cm. Κατά την σάρωση η βάση του συστήματος ήταν περί τα 20 cm, ενώ η απόσταση λήψης ήταν περίπου 40 cm. Πρόκειται για περίπτωση επιφάνειας με κατά τόπους πολύ διαφορετική διακύμανση του αναγλύφου, η οποία είναι επομένως σκόπιμο να σαρωθεί και με διαφορετικές γεωμετρίες λήψης. Ο στόχος της πρώτης σάρωσης ήταν να καταγραφεί το εμπρόσθιο μέρος του αντικειμένου ώστε να προκύψει η επιφάνεια κυρίως του κορμού του αγαλματιδίου (η βάση του ήταν εκτός εστίασης και δεν έχει αποτυπωθεί ευκρινώς). Είναι σαφές από την παραπάνω εικόνα (δεξιά) ότι η ανάλυση σάρωσης δεν επαρκεί εν προκειμένω για να συλλάβει ικανοποιητικά το ανάγλυφο του προσώπου. Τα δεδομένα της σάρωσης αυτής είναι τα ακόλουθα:

Θέσεις σάρωσης	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Πλήθος σημείων	26456	11031	5237	14196	7950	7722	8851	9010	6330
σ_b (pixel)	0.08	0.12	0.09	0.11	0.10	0.09	0.08	0.11	0.10
σ_o ανακατασκευής	1.09	1.14	1.01	1.17	1.16	1.21	1.27	1.14	1.29
σ_o ανακατασκευής (pixel)	0.09	0.14	0.09	0.13	0.12	0.11	0.11	0.13	0.13

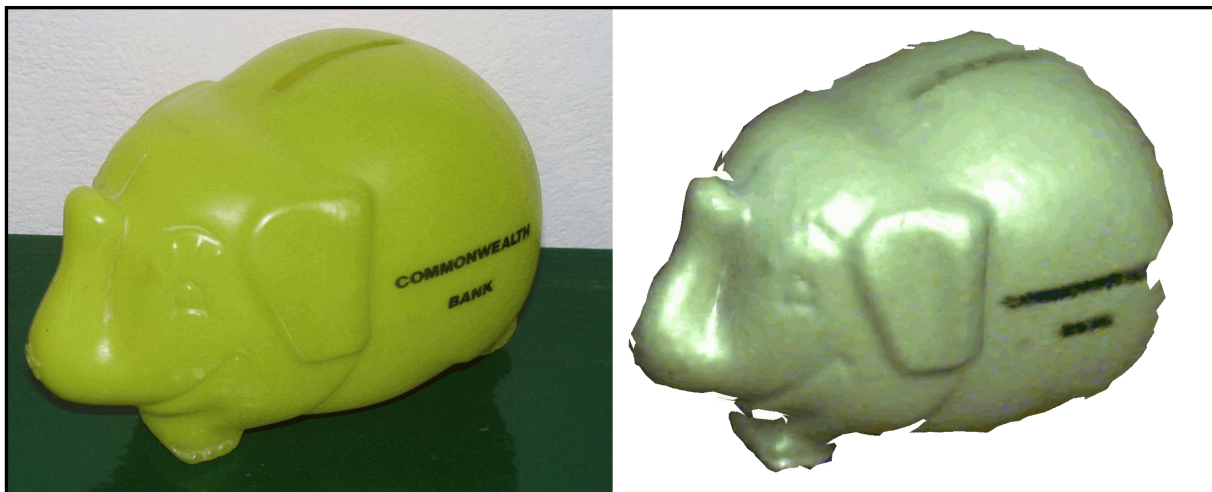
Για τις λεπτομέρειες του προσώπου, το αγαλματίδιο σαρώθηκε εκ νέου με αλλαγή της βάσης του συστήματος σε περίπου 10 cm και από απόσταση λήψης περί τα 15 cm. Στόχος της δεύτερης σάρωσης ήταν αποκλειστικά η περιοχή του προσώπου του αγαλματιδίου (το ύψος του προσώπου είναι περίπου 3.5 cm). Τα αποτελέσματα αυτής της σάρωσης φαίνονται στην επόμενη εικόνα και τα δεδομένα της στον επόμενο πίνακα. Τελικά οι δύο ξεχωριστές φάσεις σάρωσης συντέθηκαν σε ένα ενιαίο μοντέλο με το ικανοποιητικό αποτέλεσμα που παρουσιάζεται στην επόμενη σελίδα.



Θέσεις σάρωσης	1	2	3
Πλήθος σημείων	36193	35827	32382
σ_b (pixel)	0.09	0.08	0.09
σ_o ανακατασκευής	1.02	1.10	1.07
σ_o ανακατασκευής (pixel)	0.09	0.09	0.10



8.6. Πλαστικός κουμπαράς



Οι διαστάσεις του αντικειμένου είναι περίπου Μ-Π-Υ: 15-10-10 cm³. Η σάρωση έγινε από δύο θέσεις με βάση του συστήματος των μηχανών περί τα 40 cm και από απόσταση λήψης περίπου 90 cm.

Θέσεις σάρωσης	1	2
Πλήθος σημείων	17476	18855
σ_b (pixel)	0.09	0.09
σ_θ ανακατασκευής	1.30	1.28
σ_θ ανακατασκευής (pixel)	0.12	0.12

8.7. Κέρμα



Πρόκειται για κέρμα δολαρίου Αυστραλίας (1985). Η εφαρμογή αυτή είναι κατά κάποιον τρόπο ακραία διότι ο σχεδιασμός του συστήματος (ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε και κυρίως η δέσμη laser) δεν προβλέπεται για σάρωση αντικειμένων τόσο μικρού μεγέθους. Η διάμετρος του κέρματος είναι περίπου 2 cm, ενώ η βάση του συστήματος ήταν 10 cm (η ελάχιστη δυνατή διάσταση βάσης με τις δεδομένες μηχανές λήψης). Δόθηκε προσοχή ώστε το κέρμα να καλύπτει κατά το δυνατόν μεγαλύτερη περιοχή της εικόνας, οπότε το μέγεθος της εδαφοψηφίδας στην εφαρμογή αυτή είναι μικρότερο από 0.1 mm. Το πάχος της λωρίδας του laser στην επιφάνεια ήταν ~0.5 mm, δηλαδή αντιστοιχούσε σε 5 εικονοψηφίδες. Έτσι, η εξαγωγή του μεγίστου του ίχνους του laser ήταν αβέβαιη, με συνέπεια το τελικό νέφος σημείων να είναι ιδιαίτερα θορυβώδες. Επειδή το ανάγλυφο του κέρματος είναι πολύ μικρό, στην απεικόνιση πάνω δεξιά τα μεγέθη της τρίτης διάστασης έχουν διπλασιαστεί. Η σάρωση του κέρματος έγινε από 4 θέσεις σάρωσης, με στροφή του συστήματος περί το κέντρο του.

Θέσεις σάρωσης	1	2	3	4
Πλήθος σημείων	27856	29368	21400	22858
σ_b (pixel)	0.24	0.30	0.25	0.29
σ_o ανακατασκευής	1.21	1.17	1.11	1.22
σ_o ανακατασκευής (pixel)	0.29	0.35	0.27	0.35

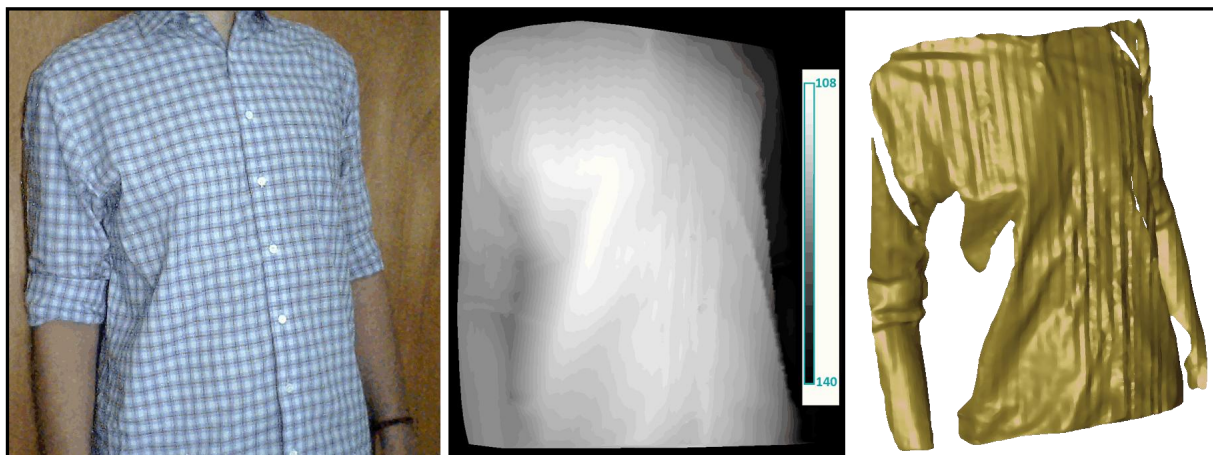
8.8. Πρόσωπο



Το πρόσωπο του γράφοντος σαρώθηκε από δύο θέσεις, με βάση περί τα 30 cm. Οι λήψεις για την φωτοϋφή έγιναν ακριβώς μετά από την σάρωση του προσώπου δεδομένου ότι αυτή πραγματοποιήθηκε με κλεισμένα μάτια εξαιτίας του laser. Έχει σημειωθεί ήδη ότι ο αλγόριθμος της λήψης που χρησιμοποιείται στην σημερινή υλοποίηση του συστήματος είναι σχετικά αργός (βλ. ενότητα 3.4), με συνέπεια η σάρωση να διαρκεί μερικά λεπτά κατά τα οποία απαιτείται ακινησία, γεγονός στο οποίο εντοπίζεται και η δυσκολία της εφαρμογής αυτής.

Θέσεις σάρωσης	1	2
Πλήθος σημείων	16096	15803
σ_b (pixel)	0.11	0.10
σ_o ανακατασκευής	1.37	1.42
σ_o ανακατασκευής (pixel)	0.15	0.14

8.9. Κορμός ανθρώπου



Ο κορμός ενός ανθρώπου σαρώθηκε ενδεικτικά από μία θέση με βάση 60 cm. Στην εφαρμογή αυτή δεν υπήρχαν τα εξωτερικά επίπεδα, οπότε δεν έγινε η επίλυση “ενιαία συνόρθωση πλήρους θέσης σάρωσης με ελαστικές δεσμεύσεις άγνωστου επιπέδου laser και άγνωστων εξωτερικών επιπέδων” που παρουσιάστηκε στην ενότητα 5.3.6. Η επίλυση που επιλέχθηκε είναι η “ελαστική δέσμευση άγνωστου επιπέδου laser” (ενότητα 5.3.3). Το νέφος αποτελείται από 47.913 σημεία. Ανάμεσα στην εικόνα του αντικειμένου και το τριγωνισμένο νέφος σημείων παρουσιάζεται και ένας χάρτης βάθους του κορμού, δηλαδή απεικόνιση αποστάσεων από την αριστερή επιπολική εικόνα. Η σάρωση διήρκεσε 1-2 λεπτά (βλ. σχετικά ενότητα 3.4) και η διεύθυνση σάρωσης ήταν καθ’ ύψος του κορμού. Έτσι, στο τελικό αποτέλεσμα εμφανίζεται να έχει καταγραφεί και η επίδραση της αναπνοής του ανθρώπου, η οποία προκαλεί έναν κυματοειδή (“ριγωτό”) σχηματισμό. Αυτό διότι οι καταγραφές των λωρίδων του laser αναφέρονται σε διαφορετικές φάσεις του κύκλου της αναπνοής.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

9

```
figure(fighand2)
hold off
plot3(pcd2(:,1),pcd2(:,2),pcd2(:,3),point_color2), axis equal

set(gca, 'CameraPosition', camPos2); % camera position
set(gca, 'CameraTarget', camTgt2); % where the camera is pointing to
set(gca, 'CameraUpVector', camUpVect2); % camera 'up' vector

end_pcd = move_pcd_3points(point1, point2, pcd2);

temphand = figure('name','Joined Beginning','NumberTitle','off', 'Position',figsize);

plot3(pcd1(:,1),pcd1(:,2),pcd1(:,3),point_color1), axis equal
hold on
plot3(end_pcd(:,1),end_pcd(:,2),end_pcd(:,3),point_color2), axis equal

reply = questdlg('Do you want to continue?', 'Yes/No', 'Yes');

if strcmp(reply, 'No')
    delete(temphand);
    end_pcd = [];
    return
end

% Smooth if needed
size = size(end_pcd, 1);
if checksmooth
    icp_pcd1 = smooth_pcd(pcd1, 3*res, 0);
    icp_end_pcd = smooth_pcd(end_pcd, 3*res, 0);
else
    icp_pcd1 = pcd1;
    icp_end_pcd = end_pcd;
end

while strcmp(reply, 'Yes')
    delete(temphand);
    [R, t, corr, ~, icp_end_pcd] = icp2(icp_pcd1, icp_end_pcd',
    assignin('base', 'corr', corr);
    icp_end_pcd = icp_end_pcd';
    TT = [ones(size,1)*t(1) ones(size,1)*t(2) ones(size,1)*t(3)];
```



9. Συμπεράσματα – Προτάσεις

9.1. Ανακεφαλαίωση

Στην παρούσα διατριβή έχει παρουσιαστεί ένας νέος αυτοματοποιημένος σαρωτής τρισδιάστατων επιφανειών. Με εξαίρεση την λήψη των αρχικών εικόνων για την βαθμονόμηση και την κίνηση του επιπέδου του laser από τον χρήστη, η όλη διαδικασία σάρωσης του αντικειμένου, από την βαθμονόμηση της συσκευής έως την συλλογή, συνένωση και επεξεργασία του τελικού νέφους σημείων, είναι αυτοματοποιημένη. Σε όλα τα ενδιάμεσα βήματα υλοποιήθηκαν και αξιολογήθηκαν μέθοδοι για την μείωση των επιδράσεων του θορύβου και την αποφυγή χονδροειδών σφαλμάτων, με συνέπεια το τελικό νέφος σημείων να έχει, γενικά, την ζητούμενη υψηλή ακρίβεια, όπως έδειξαν οι εκτεταμένοι έλεγχοι. Παράλληλα, η εισαγωγή γεωμετρικών δεσμεύσεων εξασφαλίζει περίσσεια δεδομένων, δυνατότητες εντοπισμού χονδροειδών σφαλμάτων και, γενικότερα, ευρωστία της 3D ανακατασκευής. Υπ' αυτή την έννοια, ο στόχος της διατριβής – η δημιουργία ενός νέου αυτοματοποιημένου σαρωτή χαμηλού κόστους και συγκεκριμένης ακρίβειας – θεωρείται ότι έχει ουσιαστικά επιτευχθεί. Αναλυτικότερα:

- Αναπτύχθηκε κατ' αρχάς μέθοδος βαθμονόμησης του σαρωτή με στοιχεία εισόδου στερεοζεύγη ενός επίπεδου πεδίου ελέγχου μορφής σκακιάρας (με ειδική κωδικοποίηση ενός τετραγώνου της για να ορίζεται σύστημα αναφοράς). Αποτέλεσμα, όπως αναλύθηκε, είναι οι εσωτερικοί προσανατολισμοί των δύο μηχανών και ο αμοιβαίος προσανατολισμός τους υπό σωστή κλίμακα. Η επιφάνεια του αντικειμένου σαρώνεται με το βαθμονομημένο σύστημα, ενώ κατόπιν οι εικόνες υφίστανται επεξεργασία ώστε να προκύψουν εξομαλυμένες επιπολικές εικόνες της παρατηρούμενης λωρίδας του laser απομονωμένης από το υπόβαθρό της.
- Ως ομόλογα εικονοσημεία (τομές ομόλογων επιπολικών γραμμών με την λωρίδα του laser) για την εμπροσθοτομική 3D ανακατασκευή επελέγησαν οι θέσεις της κοινής κορυφής τριών καμπυλών Gauss που προσαρμόζονται στις τιμές έντασης της λωρίδας σε ομόλογες επιπολικές ευθείες των δύο εικόνων. Η πρώτη καμπύλη βρίσκεται επί της επιπολικής γραμμής και οι άλλες στις δύο διαγώνιες διευθύνσεις 45° , οπότε για η εκτίμηση των ζητούμενων θέσεων ο αλγόριθμος λαμβάνει υπόψη την κατανομή της έντασης και στην γειτονιά του σημείου, εξομαλύνοντας τον θόρυβο.
- Για να ενισχυθεί η γεωμετρική ευρωστία και η αξιοπιστία της 3D ανακατασκευής εισήχθησαν στην συνόρθωση και αξιολογήθηκαν συνδυασμοί δεσμεύσεων συνεπιπεδότητας και γειτνίασης των σημείων του χώρου. Τελικά επιλέχθηκε η ενιαία συνόρθωση των εικόνων από κάθε θέση σάρωσης με χρήση όλων των δεσμεύσεων.
- Τα νέφη από κάθε θέση σάρωσης συνενώνονται αυτόματα σε ενιαίο σημειοσύνολο με τον αλγόριθμο συνένωσης νεφών ICP, για τον οποίο οι αρχικές τιμές σχετικής στροφής και μετάθεσης μεταξύ επικαλυπτομένων νεφών εκτιμώνται αυτόματα με την βοήθεια

τελεστή σημείων εφαρμοζόμενου στις εικόνες υποβάθρου. Για την τελική εξομάλυνση του νέφους των σημείων επεκτάθηκαν υπάρχουσες μέθοδοι ώστε να λαμβάνεται σε κάποιο βαθμό υπόψη και η μορφολογία του αντικειμένου.

- Για να αξιολογηθεί η απόδοση του συστήματος σαρώθηκαν γνωστά δοκίμια ακριβείας, ενώ έγιναν και συγκρίσεις με εμπορικά διαθέσιμους σαρωτές. Οι έλεγχοι επιβεβαίωσαν ότι η ακρίβεια της μεθόδου βρίσκεται περί την θεωρητικά αναμενόμενη εκτίμηση των ± 0.25 mm για μία τυπική γεωμετρία του συστήματος με τις δεδομένες μηχανές λήψης.

Έτσι, μια βασική διαπίστωση (που βέβαια προϋπήρχε αλλά επιβεβαιώθηκε και από την όλη ερευνητική εργασία της διατριβής όσο και από την μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας) είναι πως στην εποχή της ψηφιακής εικόνας είναι όντως σε πολλές περιπτώσεις δυνατόν να δημιουργήσει κανείς, με πολύ απλό εξοπλισμό, συστήματα που παράγουν αποτελέσματα καλής ποιότητας με τρόπο αυτοματοποιημένο και αξιόπιστο. Καθοριστικό, προφανώς, στοιχείο είναι στις περιπτώσεις αυτές οι αλγόριθμοι που αναπτύσσονται και οι υλοποιήσεις τους.

9.2. Υλοποίηση αλγορίθμου

Όλες οι αλγοριθμικές διαδικασίες της διατριβής προγραμματίστηκαν και εκτελέστηκαν στην πλατφόρμα του *Matlab*®. Κύριο ζητούμενο, όπως έχει αναφερθεί, ήταν να αυτοματοποιηθούν όλα τα βήματα της διαδικασίας σάρωσης. Το *Matlab*® δεν είναι, βέβαια, γλώσσα προγραμματισμού αλλά περισσότερο μια πρόσφορη πλατφόρμα όπου μπορεί εύκολα κανείς να υλοποιεί μια συγκεκριμένη σκέψη. Για τον λόγο αυτό ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε στην παρούσα διατριβή είναι μεν αυτοματοποιημένος, αλλά είναι και πολύ αργός όσο και δύσ-χρηστος. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για να προκύψει το νέφος σημείων από τις εικόνες από μία θέση σάρωσης απαιτείται επεξεργασία περίπου μίας ώρας. Ο χρόνος αυτός σε μία γλώσσα προγραμματισμού θα μπορούσε να είναι περίπου ίσος με τον χρόνο που χρειάζεται ο χρήστης να σαρώσει με το επίπεδο του laser το αντικείμενο, δηλαδή το αρχικό νέφος θα μπορούσε να λαμβάνεται σε περίπου πραγματικό χρόνο.

Συνοπτικά αναφέρεται ότι για τον σαρωτή της διατριβής απαιτήθηκε η σύνταξη αλγορίθμων για τις εξής διαδικασίες:

- Βαθμονόμηση του συστήματος
 - Εντοπισμός κορυφών και συστήματος συντεταγμένων του πεδίου ελέγχου
 - Επίλυση με την μέθοδο της δέσμης
- Δημιουργία επιπολικών εικόνων διορθωμένων από συστηματικά σφάλματα και θόρυβο
- Εντοπισμός μεγίστων έντασης με διαφορετικές μεθόδους
- Επίλυση 3D ανακατασκευής (μέθοδοι χωρίς ή με δεσμεύσεις)
- Απόδοση φωτοϋφής στο νέφος σημείων
- Εύρεση αρχικών τιμών για την συνένωση νεφών από τις εικόνες υποβάθρου
- Εξομάλυνση νέφους σημείων
- Διαγραφή σημείων εκτός πληθυσμού

Πρέπει βέβαια να σημειωθεί πως ορισμένα τμήματα του κώδικα υπήρχαν έτοιμα, είτε στο Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας του ΕΜΠ είτε στο Διαδίκτυο. Ειδικότερα:

- Από την ιστοσελίδα *Matlab and Octave Functions for Computer Vision and Image Processing* του P. Kovesi αντλήθηκαν ρουτίνες για εφαρμογή του τελεστή σημείων Harris (ακρίβειας εικονοψηφίδας) και για τον αλγόριθμο RANSAC (<http://www.csse.uwa.edu.au/~pk/research/matlabfns/>)
- Από το *Camera Calibration Toolbox* του J.-Y. Bouguet χρησιμοποιήθηκαν ρουτίνες για εφαρμογή του τελεστή σημείων Harris (υποψηφιδικής ακρίβειας) (<http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/>)
- Η υλοποίηση αλγορίθμου του ICP που χρησιμοποιήθηκε έχει γίνει από τον A.S. Mian (<http://www.csse.uwa.edu.au/~ajmal/code.html>)
- Η χειροκίνητη επιλογή συγκεκριμένων σημείων σε νέφος σημείων γίνεται βάσει κώδικα του B. Taati (<http://www.mathworks.com.au/matlabcentral/fileexchange/7594-click3dpoint>)
- Ο κώδικας του τελεστή SIFT είναι βέβαια του D. Lowe (<http://www.cs.ubc.ca/~lowe/keypoints/>).
- Τέλος, για ορισμένους φωτογραμμετρικούς υπολογισμούς, και κυρίως για την εκτίμηση αρχικών τιμών του εξωτερικού προσανατολισμού εικόνας από συντελεστές αναγωγής, αξιοποιήθηκε κώδικας των Λ. Γραμματικόπουλου και Η. Καλησπεράκη.

9.3. Αξιολόγηση της μεθόδου και προτάσεις

Όπως αναφέρθηκε, ο σαρωτής της διατριβής κρίθηκε ότι ικανοποιεί τους στόχους που είχαν τεθεί εξ αρχής σχετικά με την αυτοματοποίηση και το μικρό κόστος, όσο όμως και την ακρίβεια χάρη και στην προσπάθεια ελέγχου, κατά το δυνατόν, σφαλμάτων που υπεισέρχονται στην διαδικασία συλλογής της 3D πληροφορίας. Βέβαια το σύστημα, αλλά και η ίδια η προσέγγιση, έχουν και ορισμένους προφανείς περιορισμούς.

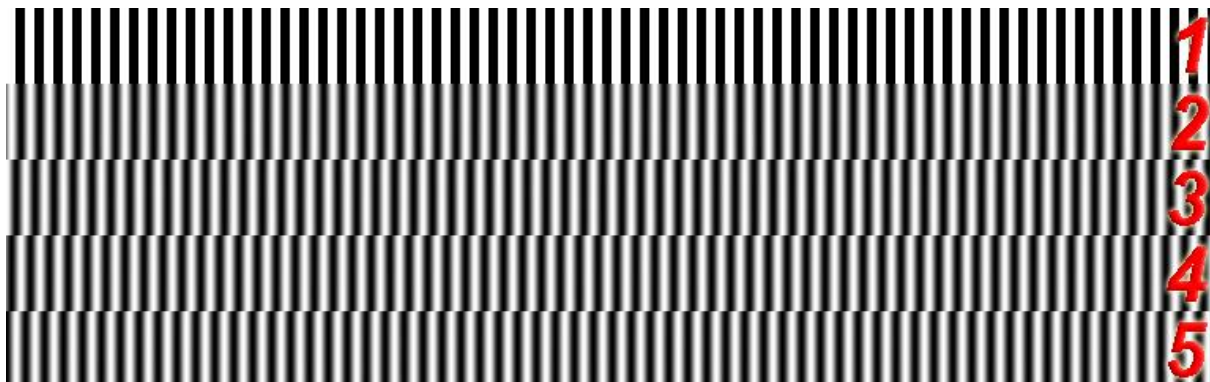
Κατ' αρχάς, η μέθοδος σάρωσης που προτείνεται στην διατριβή εμφανίζει την απαίτηση της τριπλής ορατότητας, δηλαδή για να καταγραφεί ένα 3D σημείο πρέπει να είναι ορατό από τις δύο μηχανές και από το επίπεδο του laser. Αλλά αυτό δεν είναι παρά το τίμημα για την δυνατότητα να τεθούν γεωμετρικές δεσμεύσεις και, κατά συνέπεια, να ενισχυθεί η αξιοπιστία του συλλεγόμενου νέφους σημείων. Ένα άλλο πρόβλημα που θέτει ο σαρωτής, ως χειροκίνητος, είναι η αναμενόμενη διαφορετική ανάλυση στην διεύθυνση της λωρίδας του laser και κάθετα σε αυτήν. Κατά μήκος της λωρίδας υπάρχουν κατά κανόνα παρατηρήσεις ανά εικονοψηφίδα, αντιθέτως η ανάλυση στην διεύθυνση κάθετα στη λωρίδα εξαρτάται από την προσοχή και την επιμέλεια που επιδεικνύει σαρώνοντας ο χρήστης. Αν πχ. το laser κινείται πολύ γρήγορα το τελικό μοντέλο θα έχει κενά. Ο μόνος τρόπος να αποφευχθεί αυτό το πρόβλημα, για τον σαρωτή της παρούσας διατριβής, θα ήταν τα σημεία που καταγράφονται στις εικόνες να εμφανίζονται σε πραγματικό χρόνο σε οθόνη υπολογιστή, ώστε ο χειριστής να ελέγχει την πληρότητα της σάρωσης. Αυτό δεν έχει υλοποιηθεί στην διατριβή.

Η προσέγγιση που αναπτύχθηκε στην διατριβή είναι ότι το τελικό νέφος σημείων παράγεται από την συνένωση επιμέρους νεφών από διαφορετικές θέσεις, τα οποία έχουν ληφθεί με το σύστημα και το αντικείμενο ακίνητα. Μία πιθανή παραλλαγή με την πηγή laser σταθεροποιημένη στο ζεύγος των δύο μηχανών (η οποία ήταν και η πρώτη εκδοχή που εξετάστηκε στην αρχική φάση της διατριβής) βασίζεται προφανώς στην δυνατότητα ελεύθερης κίνησης του συστήματος μηχανών-laser ως προς το ακίνητο αντικείμενο. Στην περίπτωση αυτή, παράλληλα, χρειάζονται και στόχοι περί το αντικείμενο που θα υλοποιούν δίκτυο τριγωνισμού (οι συντεταγμένες τους δεν απαιτείται να είναι γνωστές). Εφόσον προβλεφθεί η δυνατότητα αναγνώρισης των στόχων, οι εικόνες μπορούν να συνδέονται μέσω αυτών και, μόλις ολοκληρωθεί η σάρωση, μπορούν να υπολογιστούν οι βέλτιστες 3D συντεταγμένες για όλους τους στόχους με συνόρθωση δέσμης. Η λύση ενισχύεται αν το αντικείμενο σαρωθεί από όλες τις πλευρές (δηλαδή απεικονιστούν οι ίδιοι στόχοι στην αρχή και το τέλος της διαδικασίας). Το πλεονέκτημα μιας τέτοιας προσέγγισης είναι ότι το άμεσο αποτέλεσμα είναι ένα ενιαίο νέφος σημείων. Θεωρήθηκε όμως ότι το κέρδος αυτό είναι μικρό απέναντι στην αβεβαιότητα της 3D ανακατασκευής που εισάγεται από το γεγονός ότι τελικά κάθε λωρίδα δίνει σημεία του νέφους εξαρτώμενα από την ακρίβεια του εξωτερικού προσανατολισμού της συγκεκριμένης εικόνας. Ακόμα, μια τέτοια προσέγγιση δυσχεραίνει την χρήση εξωτερικών επιπέδων.

Ωστόσο ο σημαντικότερος περιορισμός του σαρωτή της διατριβής είναι τελικά η κωδικοποίηση του αντικειμένου με το χειροκίνητο επίπεδο laser. Αυτό σημαίνει ότι κάθε εικόνα μπορεί να αποδώσει μόνο μια τομή της επιφάνειας, γεγονός που συνεπάγεται υπερβολικά μεγάλο αριθμό εικόνων αλλά ουσιαστικά και αδυναμία να καταγραφούν κινούμενα αντικείμενα. Όμως το ίδιο αποτέλεσμα θα μπορούσε να επιτευχθεί και με την προβολή παράλληλων φωτεινών λωρίδων, πράγμα που ισοδυναμεί με ταυτόχρονες τομές με πολλά επίπεδα. Η αναγνώριση των ομόλογων λωρίδων στις δύο εικόνες θα μπορούσε να γίνει με τεχνικές των σαρωτών δομημένου φωτός που αναφέρθηκαν στην Εισαγωγή ή, απλούστερα, με διαφορετικό χρωματισμό συγκεκριμένων λωρίδων. Μάλιστα, στο πνεύμα του σαρωτή της διατριβής, σκόπιμο θα ήταν το τυπικό μοτίβο δυαδικού κώδικα να αντικατασταθεί από λωρίδες με κατανομή έντασης ημιτονοειδούς μορφής για καλύτερη προσαρμογή της καμπύλης στις παρατηρούμενες τιμές έντασης, και επομένως ακριβέστερη υποψηφιδική εκτίμηση της θέσης της κορυφής. Έτσι, αντί του τυπικού δυαδικού μοτίβου 1 της Εικ. 9.1 προτείνεται το ημιτονοειδές μοτίβο 2, του οποίου μάλιστα η κύλιση (μοτίβα 3-5) επιτρέπει να επιτευχθεί μεγαλύτερη ανάλυση σάρωσης.

Προφανώς, μια τέτοια αλλαγή θα επιφέρει μετατροπές σε αρκετά από τα βήματα της συλλογής του νέφους σημείων. Σημαντικότερο ζήτημα είναι εκείνο των γεωμετρικών δεσμεύσεων, δεδομένου πως δεν υφίστανται πλέον προβαλλόμενα επίπεδα αλλά επιφάνειες που προκύπτουν από το (κοινό για όλες τις επιφάνειες) σημείο προβολής και τις καμπυλωμένες λόγω διαστροφής του φακού του προβολέα ευθείες του μοτίβου. Αυτό δεν επηρεάζει σημαντικά την δέσμευση των εξωτερικών επιπέδων, αλλά για να εισαχθεί δέσμευση για την επιφάνεια προβολής πρέπει τουλάχιστον να είναι γνωστή η ακτινική διαστροφή του φακού

του προβολέα ώστε να υλοποιηθεί κάποια από τις δυνατές αντιμετώπισεις του προβλήματος.



Εικόνα 9.1: Προτεινόμενα μοτίβα φωτός για την αντικατάσταση του επιπέδου laser.

Όλες οι διαδικασίες που αναφέρθηκαν στην παρούσα διατριβή συντείνουν σε ένα τελικό αποτέλεσμα, την δημιουργία ενός νέφους σημείων. Μία ενδιαφέρουσα εξέλιξη της έρευνας αυτής θα ήταν να ενσωματωθεί στην όλη διαδικασία και ο τριγωνισμός του νέφους σε 3D επιφάνεια. Η εξέλιξη αυτή προσφέρει σημαντικές επιλογές περαιτέρω επεξεργασίας σε θέματα όπως η εξομάλυνση της επιφάνειας, η πλήρωση κενών, η κατάτμηση της επιφάνειας σε αυτοτελείς οντότητες ή ακόμα και η εξαγωγή αντικειμένων. Φυσικά η εργασία θα μπορούσε να συνεχιστεί αξιοποιώντας περαιτέρω και πληροφορία απευθείας από τις εικόνες, πχ. για πλήρωση ενδεχόμενων κενών στο νέφος σημείων ή για να αντιμετωπιστούν οι δυσκολίες που γενικά αντιμετωπίζουν οι σαρωτές στην απόδοση ακμών.

Βιβλιογραφία

- Abdel-Aziz Y.I., Karara H.M., 1974. Expected accuracy of convergent photos. *Photogrammetric Engineering*, 40(11), pp. 1341-1346.
- Abmayr T., Härtl F., Hirzinger G., Burschka D. Fröhlich C., 2008. Automatic registration of panoramic 2.5D scans and color images. *EuroCOW 2008, International Calibration and Orientation Workshop*, Castelldefels, Spain (on CDROM).
- Akca D., 2004. A new algorithm for 3D surface matching. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXV(B7), pp. 960-965.
- Alexander B. F., Ng K. C., 1991. Elimination of systematic error in subpixel accuracy centroid estimation. *Optical Engineering*, 30(9), pp. 1320-1331.
- Al-Manasir K., Fraser C., 2006. Registration of terrestrial laser scanner data using imagery. *Photogrammetric Record*, 21 (115), pp. 255-268.
- Alvarez L., Deriche R., Weickert J., Sanchez J., 2002. *Dense Disparity Map Estimation Respecting Image Discontinuities: a PDE and Scale-Space Based Approach*. INRIA, Rapport de Recherche No. 3874, pp. 31.
- Arun K., Huang T., Blostein S., 1987. Least-squares fitting of two 3-D point sets. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 9(5), pp. 698-700.
- Asif M., Tae-Sun C., 2001. Shape from focus using multilayer feed-forward neural networks. *IEEE Transactions on Image Processing*, 10(11), pp. 1670-1675.
- Baribeau R., Rioux M., 1991a. Influence of speckle on laser range finders. *Applied Optics*, 30, pp. 2873-2878.
- Baribeau R., Rioux M., 1991b. Centroid fluctuations of speckled targets. *Applied Optics*, 30, pp. 3752-3755.
- Barnea S., Filin S., 2007. Registration of terrestrial laser scans via image based features. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVI(3/W52), pp. 32-37.
- Batlle J., Mouaddib E., Salvi J., 1998. Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem: a survey. *Pattern Recognition*, 31(7), pp. 963-982.
- Bender L.U., 1971. *Analytical Photogrammetry: A Collinear Theory*. Final Technical Report RADC-TR-71-147, Rome Air Development Center, New York.

- Beraldin J.A., Rioux M., Blais F., Couvillon R.A., 1994. Digital three-dimensional imaging in the infrared at the National Research Council of Canada. *International Symposium on Optics, Imaging, and Instrumentation, Proc. SPIE*, pp. 208-225.
- Bergevin R., Soucy M., Gagnon H., Laurendeau D., 1996. Toward a general multi-view registration technique. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 18 (5), pp. 540 - 547
- Besl P.J., 1988. Active, optical range imaging sensors. *Machine Vision and Applications*, 1(2), pp. 127-152.
- Besl P.J., McKay N.D., 1992. A method for registration of 3D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2), pp. 239-256.
- Blackner T.D., Stephenson M.B., 1991. Paving: a new approach to automated quadrilateral mesh generation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 32, pp. 811-847.
- Blais F., Rioux M., 1986. Real-time numerical peak detector. *Signal Processing*, 11, pp. 145-155.
- Blais F., 2004. Review of 20 years of range sensor development. *Journal of Electronic Imaging*, 13(1), pp. 231-240.
- Blais G., Levine M.D., 1995. Registering multiview range data to create 3D computer objects. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 17(8), pp. 820-824.
- Böhm J. Becker S., 2007. Automatic marker-free registration of terrestrial laser scans using reflectance features. *Proc. 8th Optical 3D Measurement Techniques*, Wichmann, vol. I, pp. 338-344
- Bossen F.J., Heckbert P.S., 1996. A pliant method for anisotropic mesh generation. *Proc. 5th International Meshing Roundtable*, pp. 63-74.
- Bouguet J.Y.: *Camera Calibration Toolbox for Matlab*
http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/ (τελευταία πρόσβαση: 21.09.10)
- Bouguet J.Y., Perona P., 1998. 3D photography on your desk. *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 43-50.
- Boyer E., Berger M., 1997. 3D surface reconstruction using occluding contours. *International Journal of Computer Vision*, 22(3), pp. 219-233.
- Boykov Y., Veksler O., Zabih R., 2001. Fast approximate energy minimization via graph cuts. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 23(11), pp. 1222-1239.
- Breuckmann GmbH: <http://www.breuckmann.com/> (τελευταία πρόσβαση: 16.02.11)

- Brown, D.C., 1971. Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering*, 37(8), pp. 855-866.
- Buell W. R., Bush B. A., 1972. Mesh generation – a survey. *Journal of Engineering for Industry Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, Ser. B 95 1, pp. 332-338.
- Campbell R.J., Flynn P.J., 2001. A survey of free-form object representation and recognition techniques. *Computer Vision and Image Understanding*, 81(2), pp. 166-210.
- Canann S.A., Liu Y.C., Mobley A.V., 1997. Automated 3D surface meshing to address today's industrial needs. *Finite Elements in Analysis and Design*, 25(1-2), pp. 185-198.
- Carrihill B., Hummel R., 1985. Experiments with the intensity ratio depth sensor. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 32, pp. 337-358.
- Caspi D., Kiryati N., Shamir J., 1998. Range imaging with adaptive color structured light. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20(5), pp. 470-480.
- Cavendish J. C., 1974. Automatic triangulation of arbitrary planar domains for the finite element method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 8, pp. 679-696.
- Chen Y., Medioni G., 1992. Object modelling by registration of multiple range images. *Image and Vision Computing*, 10(3), 145-155.
- Chu C., Hwang S., Jung S., 2001. Calibration-free approach to 3D reconstruction using light stripe projections on a cube frame. *Proc 3rd International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*, pp. 13-19.
- Cignoni P., Scopigno R., 2008. Sampled 3D models for CH applications: a viable and enabling new medium or just a technological exercise? *ACM Journal on Computing and Cultural Heritage*, 1(1), article 2.
- Clarke T.A., Fryer J.G., 1998. The development of camera calibration methods and models. *The Photogrammetric Record*, 16(91), pp. 51-66.
- Cobb J., 1971. *A projected grid method for recording the shape of the human face*. Royal Aircraft Establishment, Technical Report No. 71184.
- Curless B., Levoy M., 1995. Better optical triangulation through spacetime analysis. *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV '95)*, pp. 987-994.
- Γραμματικόπουλος Λ., 2007. *Γεωμετρική Πληροφορία από Μεμονωμένες Εικόνες στην Φωτογραμμετρία και την Όραση Υπολογιστών*. Διδακτορική Διατριβή, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.
- d'Apuzzo N., 1998. Automated photogrammetric measurement of human faces. *Internation-*

- al Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 32(B5), pp. 402-407.
- Davis J., Chen X., 2001. A laser range scanner designed for minimum calibration complexity. *Proc. 3^d International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp. 91- 98.
- Davis J., Ramamoorthi R., Rusinkiewicz S., 2005. Spacetime stereo: a unifying framework for depth from triangulation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 27(2), pp. 296-302.
- de la Escalera A., Armingol J.M., 2009. Automatic chessboard detection for intrinsic and extrinsic camera parameter calibration. *Sensors*, 10(3), pp. 2027-2044.
- Δερμάνης Α., 1986 & 1987. *Συνορθώσεις Παρατηρήσεων και Θεωρία Εκτίμησης*. Τόμοι Ι και ΙΙ, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Desbrun M., Meyer M., Schröder P., Barr A. H., 1999. Implicit fairing of irregular meshes using diffusion and curvature flow. *Proc. SIGGRAPH '99*, pp. 317-324.
- Dias P., Sequeira V., Gonçalves J. G. M., Vaz F., 2002. Automatic registration of reflectance and color intensity image for 3D reconstruction. *Robotics and Autonomous Systems*, 39, pp. 157-168.
- DLR CalLab – CalDe Software: <http://www.dlr.de/rm/desktopdefault.aspx/tabid-3925/>
(τελευταία πρόσβαση: 23.10.10)
- Douskos V., Kalisperakis I., Karras G., 2007. Automatic calibration of digital cameras using planar chess-board patterns. *Proc 8th Optical 3-D Measurement Techniques VIII*, Wichmann, vol. I, pp. 132-140.
- Douskos V., Kalisperakis I., Karras G.E., Petsa E., 2008. Fully automatic camera calibration using regular planar patterns. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(B5), pp. 21-26.
- Douskos V., Grammatikopoulos L., Kalisperakis I., Karras G., Petsa E., 2009. FAUCCAL: an open source toolbox for fully automatic camera calibration. *Proc. XXII CIPA Symposium on Digital Documentation, Interpretation & Presentation of Cultural Heritage*, October 11-15, Kyoto, Japan.
- Eggert D.W., Fitzgibbon A.W., Fisher R.B., 1998. Simultaneous registration of multiple range views for use in reverse engineering of CAD models. *Computer Vision & Image Understanding*, 69(3), pp. 253–272.
- Elad D., Zeltser R., Sahar M., Avidor J.M., Einav S., Rosenberg N., 1988. A simplified measuring technique with application to biomedical engineering. *Biostereometrics '88, Proc. SPIE*, vol. 1030, pp. 64-72.
- Elstrom M. D., Smith P. W., Abidi M. A., 1998. Stereo-based registration of LADAR and color

- imagery. *Intelligent Robots and Computer Vision XVII: Algorithms, Techniques and Active Vision*, Proc. SPIE, vol. 3522, pp. 343-354.
- Esteban C.H., Schmitt F., 2004. Silhouette and stereo fusion for 3D object modeling. *Computer Vision and Image Understanding*, 96(3), pp. 367-392.
- Ethrog U., 1987. Calibration and model reconstruction of rasterstereographic systems. *Proc. ASPRS-ACMS Annual Convention: Non-Topographic Photogrammetry*, pp. 29-35.
- FARO: <http://www.faro.com> (τελευταία πρόσβαση: 16.02.11)
- Faugeras O., Luong Q.T., 2001. *The Geometry of Multiple Images*. The MIT Press, Cambridge, Mass.
- Faugeras O.D., Hebert M., 1983. A 3-D recognition and positioning algorithm using geometrical matching between primitive surfaces. *Proc. 8th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI '83)*, vol. 2, pp. 996-1002.
- Faugeras O., Keriven R., 1998. Complete dense stereovision using level set methods. *Proc. 5th European Conference on Computer Vision (ECCV)*, pp. 379-393.
- Faugeras O., Toscani G., 1986. The calibration problem for stereo. *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 15-20.
- Fiala, M., Shu, C., 2005. *Fully Automatic Camera Calibration Using Self-Identifying Calibration Targets*. Technical Report 48306/ ERB-1130, NRC Canada, pp. 26.
- Field D.A., 1988. Laplacian smoothing and Delaunay triangulations. *Communications in Applied Numerical Methods*, 4, pp. 709-712.
- Fisher R.B., Naidu D.K., 1996. A comparison of algorithms for subpixel peak detection. *Advances in Image Processing, Multimedia and Machine Vision*, Springer, pp. 385-404.
- Fisher R.B., Ashbrook A.P., Robertson C., Werghi N., 1999. A low-cost range finder using a visually located, structured light source. *Proc. 2nd International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling (3DIM '99)*, pp. 24-33.
- Fischler M., Bolles R., 1981. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the Association for Computing Machinery*, 24(6), pp. 381-395.
- Fleishman S., Drori I., Cohen-Or D., 2003. Bilateral mesh denoising. *ACM Transactions on Graphics*, 22(3), pp. 950-953.
- Forest J., Salvi J., Cabruja E., Pous C., 2004. Laser stripe peak detector for 3D scanners. A FIR filter approach. *Proc. 17th IEEE International Conference on Pattern Recognition (ICPR '04)*, vol. 3, pp. 646 – 649.

- Forest J., 2004. *New Methods for Triangulation-Based Shape Acquisition Using Laser Scanners*. Ph.D. Thesis, Dept. of Electronics, Computer Science and Automatic Control, University of Girona, Spain.
- Forkuo E.K., King B., 2004. Registration of photogrammetric imagery and laser scanner point clouds. *ASPRS Annual Conference*, Denver, Colorado, 23-28 May, paper no. 0058.
- Frahm J.M., Fite-Georgel P., Gallup D., Johnson T., Raguram R., Wu C., Jen Y.H., Dunn E., Clipp B., Lazebnik S., Pollefeys M., 2010. Building Rome on a cloudless day. *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, pp. 1–14.
- Fraser C.S., 1997. Innovations in automation for vision metrology systems. *Photogrammetric Record*, 15(90), pp. 901-911.
- Freitag L., 1997. On combining Laplacian and optimization-based mesh smoothing techniques. *AMD Trends in Unstructured Mesh Generation*, ASME, 220, pp.37-43.
- Freitag L., Jones M., Plassmann P., 1999. A parallel algorithm for mesh smoothing. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 20(6), pp. 2023-2040.
- Frey W.H., Field D.A., 1991. Mesh relaxation: a new technique for improving triangulations. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 31, pp. 1121-1133.
- Frobin W., Hierholzer E., 1981. Rasterstereography: a photogrammetric method for measurement of body surfaces. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 47(12), pp. 1717-1724.
- Frobin W., Hierholzer E., 1983. Automatic measurement of body surfaces using rasterstereography. Part I: Image scan and control point measurement. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49(3), pp. 377-384. Part II: Analysis of the rasterstereographic line surface reconstruction. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49(10), pp. 1443-1452.
- Frobin W., Hierholzer E., 1991. Video rasterstereography: a method for on-line measurement of body surfaces. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57(10), pp. 1341-1345.
- Furukawa R., Kawasaki H., 2003. Interactive shape acquisition using marker attached laser projector. *Proc. 4th International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*, pp. 491-498.
- Furukawa Y., Ponce J., 2010. Accurate, dense, and robust multiview stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(8), pp. 1362-1376.
- Ganci G., Hanley H., 1998. Automation in videogrammetry. *International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing*, XXXII(B5), pp. 53-58.

- Gargallo P., Prados E., Sturm P., 2007. Minimizing the reprojection error in surface reconstruction from images. *11th IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 1-8.
- Georgopoulos A., Ioannidis Ch., Valanis A., 2010. Assessing the performance of a structured light scanner. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII(B5), pp. 250-255
- Geronès C.M., 2007. *3D Hand-Held Sensor for Large Surface Registration*. Ph.D. Thesis, Dept. of Electronics, Computer Science and Automatic Control, University of Girona, Spain.
- Goodman J. W., 1975. Statistical properties of laser speckle patterns. In: *Laser Speckle and Related Phenomena*, Springer-Verlag, New York.
- Grün A., 1985. Adaptive least squares correlation: A powerful image matching technique. *South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography*, 3(14), pp. 175-187.
- Grün A., Baltsavias, E. P., 1989: Automatic 3-D measurement of human faces with CCD-cameras. *Biostereometrics '88, Proc. SPIE*, vol. 1030, pp. 106 - 116.
- Gühring J., 2001. Dense 3-D surface acquisition by structured light using off-the-shelf components. *Videometrics and Optical Methods for 3D Shape Measurement, Proc. SPIE*, vol. 4309, pp. 220-231.
- Harris C., Stephens M., 1988. A combined corner and edge detector. *Proc. 4th Alvey Vision Conference*, Manchester, UK, pp. 147-151.
- Hartley R. I., 1992. Estimation of Relative Camera Positions for Uncalibrated Cameras. *Proc. European Conference on Computer Vision (ECCV)*, pp. 579-587.
- Hartley R., Zisserman A., 2000. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press.
- Heikkilä J., Silvén O., 1997. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1106-1112.
- Helmli F.S., Scherer S., 2001. Adaptive shape from focus with an error estimation in light microscopy. *Proc. 2nd International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis*, pp. 188-193.
- Hernández Esteban C., 2004. *Stereo and Silhouette Fusion for 3D Object Modeling from Uncalibrated Images under Circular Motion*. Ph.D. thesis, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Spécialité: Signal et Images, Paris
- Hieu L.C., Sloten J.V., Hung L.T., Khanh L., Soe S., Zlatov N., Phuoc L.T., Trung P.D., 2010.

- Medical reverse engineering applications and methods. *International Conference on Innovations, Recent Trends and Challenges in Mechatronics, Mechanical Engineering and New High-Tech Products Development (MECAHITECH '10)*, vol. 2, pp. 186-196.
- Horn B.K.P., 1989. Obtaining shape from shading information. In: *Shape from Shading*, The MIT Press, pp. 121–171.
- Huang P.S., Zhang C., Chiang F.P., 2003. High-speed 3-D shape measurement based on digital fringe projection. *Optical Engineering*, 42(1), pp. 163-168.
- Θεοφάνους Α., 2004. *Ανάπτυξη Προγράμματος για την Επιπολική Επανασύσταση Στερεοζεύ-γους*. Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Τοπογραφίας, ΤΕΙ Αθήνας.
- Irish S.B., Renner W.D., 1977. Monoscopic quantitative photogrammetry. *Proc. ASP-ACSM Convention*, Washington D.C.
- Isgrò F., Odone F., Verri A., 2005. An open system for 3D data acquisition from multiple sensors. *Proc. 7th International Workshop on Computer Architectures for Machine Perception (CAMP 2005)*, 4-6 July, Palermo, Italy, pp. 52-57.
- Joel H.C., 1974. The Corpograph – a simple photographic approach to three-dimensional measurements. *Biostereometrics '74, Proc. Symposium of Commission V of the International Society for Photogrammetry*, pp. 622-633.
- Johnson A.E., Hebert M., 1997. Surface registration by matching oriented points. *Proc. 1st International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging & Modeling (3DIM '97)*, pp. 121-128.
- Jones T.R., Durand F., Desbrun M., 2003. Non-iterative, feature-preserving mesh smoothing. *ACM Transactions on Graphics*, 22(3), pp. 943-949.
- Jongeling R., Asp M., Thall D., Jakobsson P., Olofsson T., 2007. *Visualization in Design and Construction*. Technical Report, Division of Structural Engineering, Department of Civil, Mining and Environmental Engineering, Luleå University of Technology, Sweden.
- Jordan J.R., 1981. Interpolating digital data processing apparatus for correlation type flow measurement. *US Patent 4254470* (<http://www.freepatentsonline.com/4254470.pdf>).
- Καλησπεράκης Η., 2010. *Η Επιπολική Γεωμετρία στον Προβολικό και τον Ευκλείδειο Χώρο*. Διδακτορική Διατριβή, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.
- Kalisperakis I., Karras G., Petsa E., 2005. Estimation of camera parameters from stereo pairs with no external control information. *XX CIPA International Symposium*, Torino, pp. 390-394.
- Kalisperakis I., Grammatikopoulos L., Petsa E., Karras G., 2011. A structured-light approach

for the reconstruction of complex objects. *XIII CIPA Symposium*, Prague, 12-16 September.

Καλούση Γ., 2006. *Σχετικός Προσανατολισμός Ζεύγους και Μερική Βαθμονόμηση Μηχανής με Δεσμεύσεις επί του Αντικειμένου*. Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.

Kang Z., Zlatanova S., Gorte B., 2007. Automatic registration of terrestrial scanning data based on registered imagery. *Proc. 2007 FIG Working Week*, Hong Kong, 13-17 May.

Kang Z., Zlatanova S., 2007. A new point matching algorithm for panoramic reflectance images. *Proc. 5th International Symposium on Multispectral Image Processing and Pattern Recognition (MIPPR07)*, Wuhan, China, 15-17 November, pp. 67882F-1-10.

Kang Z., Li J., Zhang L., Zhao Q., Zlatanova S., 2009. Automatic registration of terrestrial laser scanning point clouds using panoramic reflectance images. *Sensors*, 9, pp. 2621-2646.

Καρράς Γ., 1992. *Η Τοπογραφία Moiré ως Μέθοδος της Φωτογραμμετρίας Μικρών Αποστάσεων στη Βιοστερεομετρία*. Διδακτορική Διατριβή, ΤΑΤΜ ΕΜΠ.

Καρράς Γ. & Πέτσα Ε., 1992. Η χρήση της προοπτικής σε μη μετρικές φωτογραφικές άγνωστου προσανατολισμού για την τεκμηρίωση προσόψεων ιστορικών κτιρίων χωρίς φωτοσταθερά. *Επίγεια Φωτογραμμετρία και Συστήματα Πληροφοριών Χώρου για την Τεκμηρίωση του Μνημειακού Πλούτου της Χώρας, Ζήτη*, Θεσσαλονίκη, σσ. 199-212.

Karras G., Mountrakis G., Patias P., Petsa E., 1998. Modeling distortion of super-wide-angle lenses for architectural and archaeological applications. *International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing*, 32(5), pp. 570-573.

Kawasaki H., Furukawa R., 2007. Dense 3D reconstruction method using coplanarities and metric constraints for line laser scanning. *Proc. 6th IEEE International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling (3DIM '07)*, pp. 149-158.

Knyaz K.L., 2010. Multi-media projector – single camera photogrammetric system for fast 3D reconstruction. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII(B5), pp. 343-348.

Koidis P., Patias P., Tsioukas V., 2004. 3D Visualization of Dental Data for Virtual Treatment Planning. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXV, Part 5, pp. 996-1001.

Kolmogorov V., Zabih R., 2002. Multi-camera scene reconstruction via graph cuts. *Proc. 7th European Conference on Computer Vision (ECCV)*, vol. III, pp. 82-96.

Koninckx T.P., Griesser A., van Gool L., 2003. Real-time range scanning of deformable surfaces by adaptively coded structured light. *Proc. 4th International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM)*, pp. 293-300.

- Kraus K., 2003. *Φωτογραμμετρία*. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα.
- Krotkov E., 1987. Focusing. *International Journal of Computer Vision*, 1(3), pp. 223-237.
- Κυπαρίσση Β., 2011. *Συνένωση Νεφών Σημείων Από Ομολογίες Εικόνων*. Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ.
- Kurazume R., Nishino K., Zhang Z., Ikeuchi K., 2002. Simultaneous 2D images and 3D geometric model registration for texture mapping utilizing reflectance attribute. *Proc. 5th Asian Conference on Computer Vision*, pp. 99-106.
- Kutulakos K., Seitz S., 2000. A theory of shape by space carving. *International Journal of Computer Vision*, 38(3), pp. 197-216.
- Lange R., Seitz P., 2001. Solid-state time-of-flight range camera. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 37(3), pp. 390-397.
- Lange C., Polthier K., 2005. Anisotropic smoothing of point sets. *Computer Aided Geometric Design*, 22(7), pp. 680-692.
- Leberl F., 2003. Models and visualizations in a virtual habitat. *Proc. 19th Spring Conference on Computer Graphics (SCCG '03)*.
- Leica: <http://www.leica.com> (τελευταία πρόσβαση: 16.02.11)
- Leotta M.J., Vandergon A., Taubin G., 2007. Interactive 3D scanning without tracking. *Proc. of the XX Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing (SIBGRAPI)*, October 7-10, 2007, Belo Horizonte.
- Leotta M.J., Vandergon A., Taubin G., 2008. 3D slit scanning with planar constraints. *Computer Graphics Forum*, 27(8), 2066-2080.
- Levoy M., 1999. The digital Michelangelo project. *EUROGRAPHICS '99*, 19(3).
- Lo S.H., 1985. A new mesh generation scheme for arbitrary planar domains. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 21, pp. 1403-1426.
- Lovesey E.J., 1966. *A Method for Determining Facial Contours by Shadow Projection*. Royal Aircraft Establishment Technical Report No. 66192.
- Lowe D.G., 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2), pp. 91-110.
- Marcon M., Sarti A., Tubaro S., 2009. Geometric and radiometric modeling of 3D scenes. *IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME '09)*, pp. 1604-1607.
- Marzan G.T., Karara H.M., 1976. *Rational Design for Close-range Photogrammetry*. Civil Engineering Studies, Photogrammetric Series No. 43, University of Illinois.

- Mavromati D., Petsa E., Karras G.E., 2003. Experiences in photogrammetric archaeological recording. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.*, XXXIV(5/C15), pp. 666-669.
- May S., Droschel D., Holz D., Stefan F., Malis E., Nüchter A., Hertzberg J., 2009. Three-dimensional mapping with time-of-flight cameras. *Journal of Field Robotics - Three-Dimensional Mapping, Part 2*, 26(11-12), pp.934-965.
- Maybank S.J., Faugeras O.D., 1992. A theory of self-calibration of a moving camera. *International Journal of Computer Vision*, 8(2), pp. 123-151.
- McKeon R., Flynn P., 2008. Three-dimensional facial imaging using a static light screen and a dynamic subject. *Proc. International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission (3DPVT'08)*, June 18 - 20, Atlanta, USA.
- Mederos B., Velho L., de Figueiredo L.H., 2003. Robust smoothing of noisy point clouds. *Proc. SIAM Conference on Geometric Design and Computing*, Seattle, Nashboro Press.
- Mercier B., Meneveaux D., 2005. Shape from silhouette: image pixels for marching cubes. *Journal of WSCG*, Vol. 13, pp. 112-118.
- Mian A., Bennamoun M., Owens R., 2004. Tensors for automatic correspondence and registration. *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, Lecture Notes in Computer Science, Springer, vol. 3022, pp. 495-505.
- Mikhail E., 1976. *Observations and Least Squares*. IEP, New York.
- Mikhail E.M., Bethel J.S., McGlone J.C., 2001. *Introduction to Modern Photogrammetry*. John Wiley & Sons, New York.
- Moss J.P., Linney A.D., Grindrod S.R., Mosse C.A., 1989. A laser scanning system for the measurement of facial surface morphology. *Optics and Lasers in Engineering*, 10(3-4), pp. 179-190
- Μπουτσικάκης Δ., 2003. *Προγραμματισμός και Έλεγχος Γραμμικού Αλγορίθμου Σχετικού Προσανατολισμού (RLT) με Εφαρμογή του στην Αυτόματη Εύρεση Προσεγγιστικών Τιμών σε Πολυεικονικές Συνορθώσεις*. Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.
- National Research Council Canada: <http://www.nrc-cnrc.gc.ca> (τελευταία πρόσβαση: 16.02.11)
- Nayar S.K., Nakagawa Y., 1989. *Shape from Focus*. Technical Report, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University.
- Niederöst M., Niederöst J., Skucka J., 2003. *Shape from focus. Fully automated 3D reconstruction and visualization of microscopic objects*. ETH Zürich, Institute of Geodesy and Photogrammetry.

- Ντούσκος Β., 2006. *Αυτόματη Βαθμονόμηση Ψηφιακών Μηχανών από Εικόνες Επίπεδου Κανάβου – Σύνταξη Προγράμματος και Εφαρμογές*. Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.
- Okutomi M., Kanade T., 1993. A multiple-baseline stereo. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 15(4), pp. 353-363.
- Otto G.P., Chau T.K.W., 1989. A “region-growing” algorithm for matching of terrain images. *Image and Vision Computing*, 7(2), pp. 83-94.
- Ouyang C., Wang G., Zhang Q., Kang W., Ding H., 2005. Evaluating Harris method in camera calibration. *Proc. 27th IEEE Engineering in Medicine & Biology Annual Conference*, Shanghai, September 1-4, pp. 6383-6386.
- Pajdla T., 1995. *BCRF – Binary-Coded Illumination Range Finder Reimplementation*. Technical Report KUL/ESAT/MI2/9502, Katholieke Universiteit Leuven.
- Park S.Y., Subbarao M., 2003. A point-to-tangent plane technique for multi-view registration. *Proc. 3DIM, Banff*, pp.276-283.
- Parthasarathy V., Kodiyalam S., 1991. A constrained optimization approach to finite element mesh smoothing. *Finite Elements in Analysis and Design*, 9, pp. 309-320.
- Πατιάς Π., 1991. *Εισαγωγή στη Φωτογραμμετρία*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Πατιάς Π. & Καρράς Γ., 1995. *Σύγχρονες Φωτογραμμετρικές Πρακτικές σε Εφαρμογές Αρχιτεκτονικής και Αρχαιολογίας*, Θεσσαλονίκη.
- Peacock A.J., Morgan M.D., Gourlay S., Turton C., Denison D.M., 1984. Optical mapping of the thoracoabdominal wall. *Thorax*, 39(2), pp. 93-100.
- Πέτσα Ε., 1981. *Κροσσοί Moiré (Μέθοδος της Σκιάς): Μονοεικονικός Προσδιορισμός του Αναγλύφου Μικρών Αντικειμένων*. Διπλωματική Εργασία, ΤΑΤΜ ΕΜΠ, σσ. 178.
- Pierson W.R., 1961. Monophotogrammetric determination of body volume. *Ergonomics*. 4(3), pp. 213-218.
- Polhemus: <http://www.polhemus.com> (τελευταία πρόσβαση: 16.02.11)
- Pollefeys M., Koch R., van Gool L., 1999. A simple and efficient rectification method for general motion. *Proc. International Conference on Computer Vision*, pp. 496-501.
- Posdamer J. L., Altschuler M. D., 1982. Surface measurement by space-encoded projected beam systems. *Computer Graphics and Image Processing*, 18(1), pp. 1-17.
- Pradeep K.S., Rajagopalan A.N., 2007. Improving shape from focus using defocus cue. *IEEE Transactions on Image Processing*, 16(7), pp. 1920-1925.
- Prados E., Faugeras O., 2003. Perspective shape from shading and viscosity solutions. *Proc.*

- 9th *International Conference on Computer Vision*, vol. II, pp. 826-831.
- Prasad A. K., Jensen K., 1995. Scheimpflug stereocamera for particle image velocimetry in liquid flows. *Applied Optics*, 34, pp. 7092-7099
- Proesmans M., van Gool L., Defoort F., 1998. Reading between the lines - a method for extracting dynamic 3D with texture. *Proc. IEEE 6th International Conference on Computer Vision*, pp. 1081-1086.
- Prokos A., Kalisperakis I., Karras G., 2011. Automatic point cloud generation and registration with a stereovision slit-scanner. *International Workshop on 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures (3D-ARCH '11)*, 2-5 March, Trento, Italy.
- Radi M., Selberherr S., 1998. Three-dimensional adaptive mesh relaxation. *Proc. International Conference on Simulation of Semiconductor Devices and Processes*, pp. 193-196.
- Reiss M.L.L., Tommaselli A.M.G., 2011. A low-cost 3D reconstruction system using a single-shot projection of a pattern matrix. *The Photogrammetric Record*, 26(133), pp. 91-110.
- Remondino F., El-Hakim S., 2006. Image-based 3D modelling: a review. *The Photogrammetric Record*, 21(115), pp. 269-291.
- Renner W.D., 1977. A photogrammetric technique for use in radiation therapy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 43(5), pp. 581-591.
- Richter E., 2009. Denoising point cloud data of small-structured free-form surfaces captured by a phase-based laser scanner. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII(3/W8), pp.37-42.
- Robert L., Deriche R., 1996. Dense depth map reconstruction: a minimization and regularization approach which preserves discontinuities. *Proc. 4th European Conference on Computer Vision (ECCV)*, pp. 439-451.
- Rocchini C., Cignoni P., Montani C., Pinci P., Scopigno R., 2001. A low cost 3D scanner based on structured light. *Computer Graphics Forum*, 20(3), pp. 299-308.
- Rocchini C., Cignoni P., Montani C., Scopigno R., 2002. Acquiring, stitching and blending diffuse appearance attributes on 3D models. *The Visual Computer*, 18(3), pp. 186-204.
- Roy S., Cox I., 1998. A maximum-flow formulation of the N-camera stereo correspondence problem. *Proc. 11th IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 492-499.
- RSI GmbH 3D-systems & software: <http://www.rsi-gmbh.de> (τελευταία πρόσβαση: 16.02.11)
- Ruiz A., López-de-Teruel P.E., García-Mateos G., 2002. A note on principal point estimability. *Proc. 16th IEEE International Conference on Pattern Recognition*, August 11-15, Quebec, vol. 2, pp. 304- 307.

- Rusinkiewicz S., Levoy M., 2001. Efficient variants of the ICP algorithm. *Proc. International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling (3DIM)*, pp. 145–152.
- Rusinkiewicz S., Hall-Holt O., Levoy M., 2002. Real-time 3D model acquisition. *ACM Transactions on Graphics*, 21(3), pp. 438-446.
- Russ J.C., 2007. *The Image Processing Handbook*, 5th edition, Taylor & Francis, London.
- Salvi J., Armangué X., Batlle J., 2002. A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation. *Pattern Recognition*, 35, pp. 1617-1635.
- Salvi J., Fernandez S., Pribanic T., Llado X., 2010. A state-of-the-art in structured light patterns for surface profilometry. *Pattern Recognition*, 43(8), pp. 2666-2680.
- Salvi J., Pages J., Batlle J., 2004. Pattern codification strategies in structured light systems. *Pattern Recognition*, 37(4), pp. 827-849.
- Sánchez J.A., Destefanis E.A., Canali L.R., 2006. Plane-based camera calibration without direct optimization algorithms. *Proc. IV Jornadas Argentinas de Robótica*, Córdoba, 16 - 17 November.
- Savarese S., Bouguet J., Perona P., 1999. *3D Depth Recovery with Grayscale Structured Lighting*. Technical Report, Dept. of Computer Vision, California Institute of Technology.
- Scharstein D., Szeliski R., 2002. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. *International Journal of Computer Vision*, 47(1-3), pp. 7-42.
- Schenk T., 2000. *Digital Photogrammetry*. TerraScience, USA.
- Seitz S.M., Curless B., Diebel J., Scharstein D., Szeliski R., 2006. A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms. *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 1, pp. 519-528.
- Shimada K., 1993. *Physically-Based Mesh Generation: Automated Triangulation of Surfaces and Volumes via Bubble Packing*. Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
- Smith W.J., 2008. *Modern Optical Engineering. The Design of Optical Systems*. 4th edition, McGraw-Hill, New York.
- Stamos I., Allen P., 2000. 3-D model construction using range and image data. *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 537-544.
- Στρατάκος Ι. 2007. *Υπολογιστική και Πειραματική Μελέτη της Κλασματικής Συμπεριφοράς Επιφανειών Βράχου*. Διδακτορική Διατριβή, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.
- Strecha C., Fransens R., van Gool L., 2006. Combined depth and outlier estimation in multi-

- view stereo. *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 2394-2401.
- Strecha C., Tuytelaars T., Van Gool L., 2003. Dense matching of multiple wide-baseline views. *Proc. 9th International Conference on Computer Vision*, pp. 1194-1201.
- Sturm P.F., Maybank S.J., 1999. On plane-based camera calibration: a general algorithm, singularities, applications. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR'99*, Fort Collins, USA, pp. 432-37.
- Szeliski R., 1993. Rapid octree construction from image sequences. *Computer Vision and Image Understanding*, 58(1), pp. 23-32.
- Taati B., Bondy M., Jasiobedzki P., Greenspan M., 2007. Automatic registration for model building using variable dimensional local shape descriptors. *6th International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling (3DIM 2007)*, pp. 265-272.
- Tankus A., Sochen N., Yeshurun Y., 2003. A new perspective on shape from-shading. *Proc. 9th International Conference on Computer Vision, ICCV*, vol. II, pp. 862-869.
- Taubin G., 1995. A signal processing approach to fair surface design. *Proc. SIGGRAPH 95*, pp. 351-358.
- TESA: <http://www.tesabs.ch> (τελευταία πρόσβαση: 16.02.11)
- Tola E., Lepetit V., Fua P., 2008. A fast local descriptor for dense matching. *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1-8
- Treuille A., Hertzmann A., Seitz S. M., 2004. Example-based stereo with general BRDFs. *Proc. European Conference on Computer Vision (ECCV)*, pp. 457-469.
- Tsai R. Y., 1987. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 3, pp. 323-344.
- Tsioukas V., Patias P., Jacobs P., 2004. A Novel System for the 3D Reconstruction of Small Objects. *Beyond the Artifact. Digital interpretation of the past, Proc. CAA2004 Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, 2004, Prato, Italy, pp. 388-391.
- Turner-Smith A.R., Harris J.D., 1986. ISIS – an automated shape measurement and analysis system. *Surface Topography and Spinal Deformity*, Fischer Verlag, Stuttgart, pp. 31–38.
- Usamentiaga R., Molleda J., García D.F., 2012. Fast and robust laser stripe extraction for 3D reconstruction in industrial environments. *Machine Vision and Applications*, 23, pp. 179-196.
- Vaillant R., Faugeras O., 1990. *Using Occluding Contours for 3D Object Modeling*. Research

Report no. 1325, INRIA.

- van Gool L., Tuytelaars T., Ferrari V., Strecha C., van den Wyngaerd J., Vergauwen M., 2002. 3D modeling and registration under wide baseline conditions. *ISPRS Symposium on Photogrammetric Computer Vision*, pp. 3-14.
- Villa-Uriol M.-C., Chaudhary G., Kuester F., Hutchinson T. C., Bagherzadeh N., 2004. Extracting 3D from 2D: selection basis for camera calibration. *Proc. IASTED Computer Graphics and Imaging*, Kauai, USA, pp. 315-321.
- Vlasic D., Peers P., Baran I., Debevec P., Popović J., Rusinkiewicz S., Matusik W., 2009. Dynamic shape capture using multi-view photometric stereo. *ACM Transactions on Graphics*, 28(5), Article 174.
- Vogiatzis G., Hernandez C., Torr P., Cipolla R., 2007. Multi-view stereo via volumetric graph-cuts and occlusion robust photo-consistency. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 29(12), pp. 2241-2246.
- Vollmer J., Mencl R., Müller H., 1999. Improved Laplacian smoothing of noisy surface meshes. *Computer Graphics Forum*, 18(3), pp. 131-138.
- Vu H.H., Keriven R., Labatut P., Pons J.-P., 2009. Towards high-resolution large-scale multi-view stereo. *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1430-1437.
- Wang Z., Brenner C., 2008. Point based registration of terrestrial laser data using intensity and geometry features. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII(B5), pp. 583-589.
- Weingarten J.W., Gruener G., Siegwart R., 2004. A state-of-the-art 3D sensor for robot navigation. *International Conference on Intelligent Robots & Systems*, vol.3, pp. 2155-2160.
- Weise T., Leibe B., van Gool L., 2007. Fast 3D scanning with automatic motion compensation. *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1-8.
- Winkelbach S., Molkenstruck S., Wahl F.M., 2006. Low-cost laser range scanner and fast surface registration approach. *Proc. DAGM '06, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 4174, Springer, pp. 718-728.
- Woodham R.J., 1980. Photometric method for determining surface orientation from multiple images. *Optical Engineering*, 19(1), pp. 139-144.
- Χατζηαυγουστίδης Γ., 2002. *Αυτόματος Προσδιορισμός του Αναγλύφου Μικρών Αντικειμένων με Κωδικοποίηση της Επιφάνειας*. Διπλωματική Εργασία, TATM, ΕΜΠ.
- Yamada A., Shimada K., Itoh T., 1996. Energy-minimizing approach to meshing curved wire-

- frame models. *Proc. 5th International Meshing Roundtable*, pp. 179-191.
- Yu Y., Ferencz A., Malik J., 2001. Extracting objects from range and radiance images. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 7(4), pp.351-364.
- Zagorchev L., Goshtasby A.A., 2006. A paint-brush laser range scanner. *Computer Vision and Image Understanding*, 101, pp. 65-86.
- Zhang L., Curless B., Seitz S.M., 2002. Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming. *International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission*, pp. 24-36.
- Zhang R., Tsai P.-S., Cryer J.E., Shah M., 1999 Shape from shading: a survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 21(8), pp. 690-706.
- Zhang S., 2005. *High-resolution, Real-time 3-D Shape Measurement*. Ph.D. Thesis, Stony Brook University.
- Zhang S., Huang P., 2004. High-resolution, real-time 3-D shape acquisition. *Computer Vision and Pattern Recognition Workshop*, pp. 28.
- Zhang Z., 1994. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces. *International Journal of Computer Vision*, 13(2), pp. 119-152.
- Zhang Z., 1998. *A Flexible New Technique for Camera Calibration*. Technical Report MSRTR-98-71, Microsoft Research.
- Zhang Z., 1999. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. *IEEE International Conference on Computer Vision*, Corfu, Greece, pp. 666-673.
- Zhang X.C., Xi J.T., Yan J.Q., 2006. A methodology for smoothing of point cloud data based on anisotropic heat conduction theory. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30(1-2), pp.70-75.
- Zhou D., Wei X., Zhang Q., Fang X., 2010. An automatic algorithm for accurately locating calibration markers on a chessboard. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 5(10(A)), pp. 3217–3226.