



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ

**ΣΥΝΕΝΩΣΗ ΝΕΦΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΑΠΟ ΟΜΟΛΟΓΙΕΣ
ΕΙΚΟΝΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΒΑΛΙΑ ΚΥΠΑΡΙΣΣΗ

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2011

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Ανδρέα Γεωργόπουλο, για τη βοήθεια και τις συμβουλές του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, μα πάνω από όλα, για την ενθάρρυνση και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάληψη του συγκεκριμένου θέματος. Επίσης, οφείλω ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στην υποψήφια διδάκτορα της ΣΑΤΜ, Βαλάνη Άρτεμη, για το χρόνο που μου αφιέρωσε και την πολύτιμη βοήθειά της σε όλα τα στάδια της διπλωματικής, που με μεγάλη προθυμία μου προσέφερε από την πρώτη στιγμή.

Περίληψη

Η εμφάνιση της Ψηφιακής Φωτογραμμετρίας, ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του 80-90, άνοιξε το δρόμο για την εισαγωγή αυτοματισμών στις περισσότερες από τις συνήθεις φωτογραμμετρικές διαδικασίες. Από τότε μέχρι σήμερα, παρατηρείται μία ολοένα αυξανόμενη τάση που αποσκοπεί στον πλήρη αυτοματισμό των διαδικασιών αυτών. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο γεννήθηκε η ιδέα για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η οποία αφορά στην πλήρη αυτοματοποίηση της διαδικασίας συνένωσης τρισδιάστατων νεφών σημείων. Πιο συγκεκριμένα, προτείνεται μία διαφορετική μέθοδος συνένωσης δύο νεφών, η οποία χρησιμοποιεί ομόλογα σημεία που εντοπίζονται αυτόματα πάνω σε επικαλυπτόμενες εικόνες του αντικειμένου. Η υλοποίηση της μεθόδου γίνεται μέσα από λογισμικό που συντάχθηκε στο περιβάλλον του Matlab. Απαραίτητα δεδομένα για την εκτέλεση της διαδικασίας είναι τα προϊόντα δύο σαρώσεων ενός αντικειμένου από σαρωτή δομημένου φωτός (Structured Light Scanner), δηλαδή δύο νέφη σημείων συνοδευόμενα από την απεικόνιση υφής (texture map) του αντικειμένου και δύο εικόνες, μία από κάθε θέση σάρωσης. Το λογισμικό εντοπίζει ομόλογα σημεία στις δύο εικόνες εφαρμόζοντας αλγορίθμους αυτόματης συνταύτισης χαρακτηριστικών (Feature Based Matching). Οι ομολογίες των σημείων παρεμβάλλονται στην απεικόνιση υφής (texture map) του αντικειμένου, μέσω της οποίας γίνεται τελικώς η μετάβαση σε ομόλογα σημεία του τρισδιάστατου νέφους, τους κόμβους. Στη συνέχεια το λογισμικό υπολογίζει τον τρισδιάστατο μετασχηματισμό στερεού σώματος (3D Rigid Body Transformation) μεταξύ των ομόλογων κόμβων, ο οποίος τελικώς εφαρμόζεται στο τρισδιάστατο νέφος σημείων, ώστε αυτό να μετασχηματιστεί από το σύστημα αναφοράς της μίας σάρωσης σε αυτό της άλλης.

3D Point Cloud Registration based on image correspondences

Valia Kiparissi

Diploma thesis

February 2011

Abstract

Since the early '80s, when Digital Photogrammetry made its initial appearance, important progress has been made in the area of automations using the most common photogrammetric procedures. Nowadays, increasing interest in the full automation of such procedures has been observed. It is these observations that have given rise to the diploma thesis at hand, concerning full automation of 3D Point Cloud Registration process. In particular, an alternative registration method based on corresponding points, which are detected on overlapping images, is being proposed. The method is implemented via an algorithm developed in Matlab. Application of the proposed method is carried out using two different scanning products acquired from a structure light scanner i.e. two point clouds along with their texture map and two images, one from each scanning position. The algorithm detects corresponding points between overlapping images applying techniques from the field of Feature Based Matching. Point correspondences are then interpolated directly to any given texture map, which is attached to 3D points, the vertices. Subsequently, the software computes a 3D Rigid Body transformation, which is finally applied to the 3D point clouds, in order to transform one scanning reference system to another.

Περιεχόμενα

Περίληψη	iii
Abstract	iv
1 Εισαγωγή	1
2 Γεωμετρία Στερεοζεύγους	5
2.1. Επιπολική Γεωμετρία	5
2.2. Σχετικός Προσανατολισμός	7
2.3. Επιπολικός Πίνακας.....	11
2.3.1 Γραμμική επίλυση	13
2.3.2 Μη γραμμική επίλυση.....	14
2.3.3 Κανονικοποιημένος αλγόριθμος των 8 σημείων	15
3 Ψηφιακή Συνταύτιση	18
3.1. Ορισμός του Προβλήματος.....	18
3.2. Επιφανειακή Συνταύτιση	20
3.2.1 Μέθοδος συντελεστή συσχέτισης	23
3.2.2 Ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση	26
3.2.3 Συνταύτιση πολλαπλών εικόνων	29
3.3. Συνταύτιση Χαρακτηριστικών	30
3.3.1 Σημειακοί τελεστές.....	34
3.3.1.1 Τελεστής <i>Moravec</i>	34
3.3.1.2 Τελεστής <i>Förstner</i>	36
3.3.1.3 Τελεστής <i>Harris</i>	37
3.3.2 Ο αλγόριθμος SIFT	40
3.3.2.1 Εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων	41
3.3.2.2 Υπολογισμός κλίμακας και προσανατολισμού των σημείων	43
3.3.2.3 Δημιουργία περιγραφικών χαρακτηριστικών	44
3.3.2.4 Εύρεση ομολογιών.....	45
4 Συνένωση Νεφών	47
4.1. Αλγόριθμος Επαναληπτικά Κοντινότερου Σημείου	49
4.2. Ελαχιστοτετραγωνική Μέθοδος Συνένωσης	52
4.3. Συνένωση Νεφών από Εικόνες.....	55
5 Παρουσίαση του Αλγορίθμου.....	62
5.1. Είσοδος των Δεδομένων.....	65
5.2. Εύρεση Ομόλογων Σημείων.....	65
5.3 Έλεγχος Ομολογιών.....	69
5.4 Εύρεση Ομόλογων Κόμβων	73
5.5 Υπολογισμός Μετασχηματισμού Στερεού Σώματος	75
5.6 Έξοδος Δεδομένων	79
6 Πρακτική Εφαρμογή	81
6.1 Σαρωτές Δομημένου Φωτός	81
6.2 Δεδομένα	82
6.3 Παρουσίαση των Αποτελεσμάτων	84
6.3.1 Αγγείο 1	84
6.3.1.1 Σαρώσεις <i>V01</i> και <i>V02</i>	84
6.3.1.2 Σαρώσεις <i>V03</i> και <i>V04</i>	86
6.3.1.3 Σαρώσεις <i>V06</i> και <i>V07</i>	88
6.3.1.4 Σαρώσεις <i>B</i> και <i>B02</i>	90
6.3.2 Αγγείο 2	92
6.3.2.1 Σαρώσεις <i>12</i> και <i>13</i>	92
6.3.2.2 Σαρώσεις <i>13</i> και <i>14</i>	94
6.3.2.3 Σαρώσεις <i>12</i> και <i>14</i>	96
7 Συμπεράσματα	100

Συνένωση Νεφών Σημείων από Ομολογίες Εικόνων

7.1 Συγκριτική Αξιολόγηση της Μεθόδου	100
7.2 Αξιολόγηση των Αποτελεσμάτων.....	102
7.3 Προτάσεις για το Μέλλον.....	110
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	111

1

Εισαγωγή

Οι απαρχές της μετάβασης από την Αναλυτική στην Ψηφιακή Φωτογραμμετρία εντοπίζονται στις αρχές της δεκαετίας του 80-90. Κινητήριος δύναμη στην κατεύθυνση αυτή ήταν η εμφάνιση των ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών, που έδωσαν τη δυνατότητα για απευθείας απόκτηση ψηφιακών εικόνων, απαλλαγμένων από τα σφάλματα της διαδικασίας της σάρωσης. Παράλληλα, η ταχύτερη εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών είχε ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του χρόνου επεξεργασίας των δεδομένων, αλλά και τη δυνατότητα ανάπτυξης και εκτέλεσης ολοένα και πολυπλοκότερων αλγορίθμων. Τα δύο αυτά τεχνολογικά επιτεύγματα άνοιξαν το δρόμο για την αυτοματοποίηση πολλών φωτογραμμετρικών διαδικασιών προκειμένου να μειωθούν οι απαιτούμενοι χρόνοι, να περιοριστεί η ανάγκη εξειδικευμένων χρηστών αλλά και η παρέμβαση του χρήστη γενικότερα, αυξάνοντας την αντικειμενικότητα των αποτελεσμάτων.

Σημαντικά παραδείγματα εφαρμογής αυτοματισμών αποτέλεσαν η δημιουργία ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου, η παραγωγή ψηφιακής ορθοφωτογραφίας καθώς και η διαδικασία του αεροτριγωνισμού. Η προσπάθεια αυτοματοποίησης των παραπάνω, αλλά και πολλών άλλων φωτογραμμετρικών διαδικασιών, ανέδειξε την ψηφιακή συνταύτιση εικόνας (Image Matching), δηλαδή την ανάπτυξη μεθόδων για τον αυτόματο εντοπισμό ομόλογων σημείων σε δύο ή και περισσότερες εικόνες, σε επιστημονικό αντικείμενο μείζονος σημασίας. Είναι προφανές ότι η εύρεση ομολογιών μεταξύ επικαλυπτόμενων εικόνων αποτελεί μία απλή, αν και χρονοβόρα, διαδικασία για τον άνθρωπο, κάτι το οποίο δεν ισχύει στην περίπτωση των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Η ίδια η φύση της διαδικασίας, σε συνδυασμό με τις αποκρύψεις και τις γεωμετρικές παραμορφώσεις μεταξύ των εικόνων, καθιστούν την συνταύτιση ένα εξαιρετικά δύσκολο αντικείμενο. Ειδικότερα, η δυσκολία αυτή αφορά κυρίως στην τυποποίηση της διαδικασίας και στην ύπαρξη ενός αλγορίθμου με καθολική εφαρμογή. Αντιθέτως, τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί αρκετοί αλγόριθμοι συνταύτισης, με ποικίλες δυνατότητες, τα αποτελέσματα των οποίων εξαρτώνται σε σημαντικό βαθμό από το θεωρητικό υπόβαθρο του κάθε ενός, αλλά και από τα

δεδομένα στα οποία εφαρμόζονται. Σημαντική συνεισφορά στη διαδικασία της συνταύτισης αποτελεί η αξιοποίηση της επιπολικής γεωμετρίας προκειμένου το πρόβλημα της αναζήτησης του ομόλογου ενός σημείου στην άλλη εικόνα να μεταπέσει από τον δισδιάστατο χώρο της εικόνας, στον μονοδιάστατο, δηλαδή κατά μήκος της επιπολικής γραμμής.

Παράλληλα, το ζήτημα της συνταύτισης εικόνας, πέρα από τον επιστημονικό κλάδο της φωτογραμμετρίας, απασχόλησε τις δύο τελευταίες δεκαετίες και αυτόν της Όρασης Υπολογιστών (Computer Vision). Αποτέλεσμα αυτής της ενασχόλησης ήταν η ανάπτυξη ενός σημαντικού αριθμού αλγορίθμων για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι αφετηρία για την ανάπτυξη των αλγορίθμων αυτών ήταν η ψηφιακή εικόνα στη γενική της μορφή, χωρίς δηλαδή να πληροί τις προϋποθέσεις μιας τυπικής φωτογραμμετρικής λήψης. Το παραπάνω είχε ως απόρροια, οι αλγόριθμοι συνταύτισης, από το πεδίο της Όρασης Υπολογιστών, να παρουσιάζουν καλύτερα αποτελέσματα σε δυσμενέστερες περιπτώσεις εικόνων, όπως για παράδειγμα μικρές επικαλύψεις μεταξύ των εικόνων, μεγάλες γωνίες στροφής, συγκλίνοντες άξονες λήψης κ.ά.

Πέρα από τις εφαρμογές της Ψηφιακής Φωτογραμμετρίας που αναφέρθηκαν παραπάνω, μία ακόμη, εξίσου σημαντική είναι η δημιουργία τρισδιάστατων ψηφιακών μοντέλων αντικειμένων. Την τελευταία δεκαετία στη δημιουργία τέτοιων μοντέλων έρχεται να προστεθεί μία εναλλακτική λύση, αυτή που απορρέει από την ανάπτυξη της τεχνολογίας των σαρωτών Laser. Η διαδικασία της σάρωσης δίνει τη δυνατότητα για γρήγορη και ακριβή καταγραφή της τρισδιάστατης πληροφορίας, μέσω της δημιουργίας πυκνών νεφών σημείων που αναπαριστούν την επιφάνεια των αντικειμένων. Η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας των αντικειμένων αλλά και το μέγεθός τους απαιτούν τις περισσότερες φορές πολλαπλές σαρώσεις προκειμένου να δημιουργηθεί ένα πλήρες και χωρίς αποκρύψεις, τρισδιάστατο μοντέλο. Συνεπώς, γεννιέται η ανάγκη για το μετασχηματισμό των δεδομένων κάθε μίας σάρωσης σε ένα ενιαίο σύστημα αναφοράς. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή στη βιβλιογραφία ως Συνένωση Νεφών Σημείων (Point Cloud Registration). Αρκετές μέθοδοι έχουν προταθεί για την αντιμετώπιση του προβλήματος της συνένωσης νεφών, με δημοφιλέστερη αυτή του Επαναληπτικά Κοντινότερου Σημείου (Iterative Closest Point algorithm – ICP). Ο αλγόριθμος αυτός αποτελεί μία σημαντική προσπάθεια για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας της συνένωσης περιορίζοντας την ανθρώπινη παρέμβαση χωρίς όμως να απαλλάσσεται τελείως από αυτήν.

Από την άλλη πλευρά, τα τελευταία χρόνια, η εμφάνιση των σαρωτών δομημένου φωτός (Structure Light Scanners) έρχεται να συμπληρώσει τη χρήση των σαρωτών Laser προσφέροντας ακόμη μεγαλύτερες ταχύτητες στην καταγραφή της τρισδιάστατης πληροφορίας αλλά και μεγαλύτερη ευελιξία όσον αφορά τον όγκο και το βάρος των συσκευών. Η νέα αυτή τεχνολογία που βασίζεται στην προβολή ενός μοτίβου (pattern)

πάνω στο αντικείμενο, δίνει τη δυνατότητα καταγραφής του τρισδιάστατου σχήματος με απεικόνιση υφής (texture map), πληροφορία η οποία εξάγεται από τη λήψη εικόνων του αντικειμένου κατά τη διάρκεια της σάρωσης. Η νέα τεχνολογία σαρωτών, ανοίγει το δρόμο για μία διαφορετική προσέγγιση του προβλήματος της συνένωσης η οποία αξιοποιεί την υφή του αντικειμένου που προκύπτει από τις εικόνες (Image Based Registration / Texture Based Registration).

Η ανάπτυξη μίας τέτοιας μεθόδου, πλήρως αυτοματοποιημένης, αποτελεί το στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, σχεδιάστηκε ένας αλγόριθμος στο περιβάλλον του Matlab ο οποίος λαμβάνοντας ως δεδομένα τα προϊόντα δύο ανεξάρτητων σαρώσεων ενός αντικειμένου από σαρωτή δομημένου φωτός, πετυχαίνει τη συνένωση των νεφών σημείων χωρίς καμία παρέμβαση του χρήστη. Συνοπτικά η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής: Αρχικά γίνεται ο εντοπισμός ομόλογων σημείων στις δύο εικόνες εφαρμόζοντας μεθόδους συνταύτισης χαρακτηριστικών (Feature Based Matching). Στη συνέχεια γίνεται έλεγχος για την ύπαρξη εσφαλμένων ομολογιών εφαρμόζοντας τη μέθοδο RANSAC (RANdom SAMple Consensus) στο μοντέλο της επιπολικής γεωμετρίας, μέσω του υπολογισμού του επιπολικού πίνακα (Fundamental Matrix). Ακολούθως, για κάθε μία ορθή ομολογία γίνεται παρεμβολή στην απεικόνιση υφής (texture map) της αντίστοιχης σάρωσης και από το εικονοστοιχείο που επιλέγεται γίνεται μετάβαση στο σημείο του νέφους που αυτό αντιστοιχεί. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η μετάβαση από ζεύγη ομόλογων σημείων πάνω στις εικόνες, σε ζεύγη ομόλογων κόμβων στα δύο νέφη. Από τα σημεία αυτά υπολογίζονται οι παράμετροι του τρισδιάστατου μετασχηματισμού στερεού σώματος (3D Rigid Body Transformation) με εφαρμογή μεθόδων γραμμικής άλγεβρας. Ο υπολογισμός ακολουθεί μία επαναληπτική διαδικασία προκειμένου να απορριφθούν επιπλέον λανθασμένες ομολογίες κόμβων και να υπολογιστεί το βέλτιστο μοντέλο του μετασχηματισμού που προσαρμόζεται στα δεδομένα. Τέλος, ο μετασχηματισμός εφαρμόζεται στο ένα νέφος σημείων ώστε να μετασχηματιστεί στο σύστημα αναφοράς του άλλου.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν παρουσιάζεται αρχικά το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την ανάπτυξη του αλγορίθμου και στη συνέχεια αναλύεται κάθε μία διαδικασία που αυτός εκτελεί. Αναλυτικότερα, το **Κεφάλαιο 2** αφορά στη γεωμετρία του στερεοζεύγους. Αρχικά αναλύεται το μοντέλο της επιπολικής γεωμετρίας των εικόνων και η αξιοποίησή του στη διαδικασία της ψηφιακής συνταύτισης, ενώ στη συνέχεια περιγράφεται η έννοια του σχετικού προσανατολισμού μέσω της εφαρμογής της εξίσωσης της συνεπιπεδότητας για εικόνες από βαθμονομημένες μηχανές. Τέλος, εισάγεται το μοντέλο του επιπολικού πίνακα (Fundamental Matrix) για την αποκατάσταση της επιπολικής γεωμετρίας σε εικόνες από μη βαθμονομημένες μηχανές και παρουσιάζονται οι σημαντικότεροι αλγόριθμοι που έχουν αναπτυχθεί για τον υπολογισμό του στον κλάδο της Όρασης Υπολογιστών. Το **Κεφάλαιο 3** αφορά στην ψηφιακή συνταύτιση εικόνας και περιγράφει τις

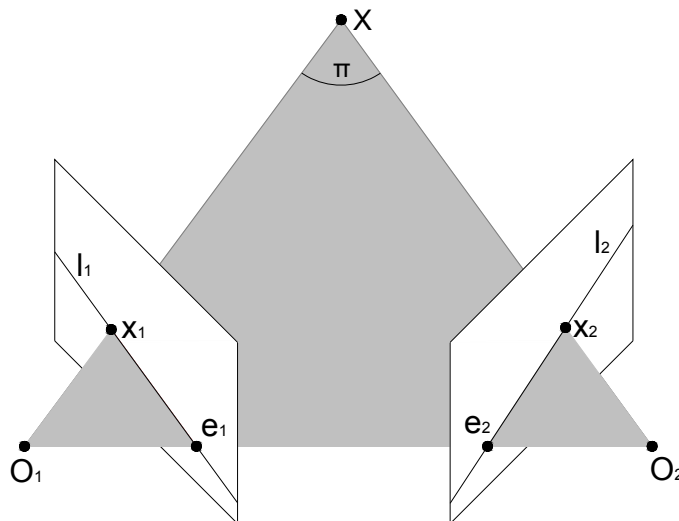
σημαντικότερες μεθόδους και αλγορίθμους που έχουν αναπτυχθεί τις τελευταίες δεκαετίες στο πεδίο της έρευνας, τόσο της επιστήμης της Φωτογραμμετρίας όσο και της Όρασης Υπολογιστών. Στο **Κεφάλαιο 4** ορίζεται αρχικά το πρόβλημα της συνένωσης τρισδιάστατων νεφών σημείων και στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικότερες τεχνικές για την αντιμετώπισή του. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις τεχνικές εκείνες που χρησιμοποιούν εικόνες του αντικειμένου για την συνένωση των νεφών και αποτέλεσαν το εφαλτήριο για την παρούσα διπλωματική εργασία. Στο **Κεφάλαιο 5** διατυπώνεται η εναλλακτική μέθοδος συνένωσης που προτείνεται στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας και παρουσιάζεται αναλυτικά το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου που συντάχθηκε για την υλοποίησή της. Το **Κεφάλαιο 6** περιλαμβάνει την πρακτική εφαρμογή του συνταχθέντος λογισμικού σε δύο αντικείμενα καθώς και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Τέλος, στο **Κεφάλαιο 7** γίνεται η αξιολόγηση της μεθόδου με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν, διατυπώνονται συμπεράσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της και προτείνονται δυνατότητες βελτίωσης και επέκτασης της μεθόδου στο μέλλον.

2

Γεωμετρία Στερεοζεύγους

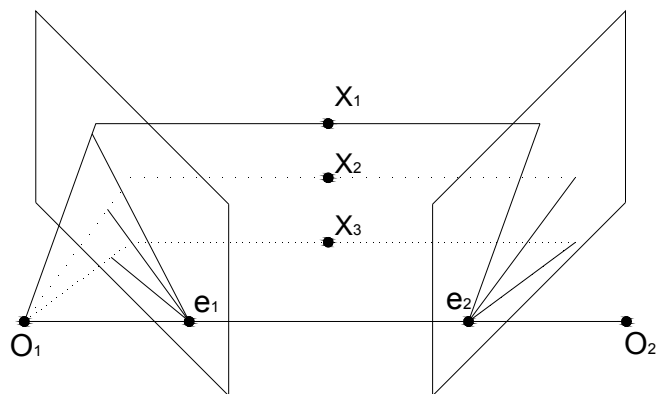
2.1. Επιπολική Γεωμετρία

Η έννοια της επιπολικής γεωμετρίας περιγράφει την προβολική γεωμετρική σχέση που ενυπάρχει μεταξύ δύο εικόνων (Hartley & Zisserman, 2000). Προκειμένου να γίνει κατανοητό το μοντέλο της επιπολικής γεωμετρίας ας θεωρηθούν δύο εικόνες με σημεία λήψης τα O_1 και O_2 αντίστοιχα (Σχήμα 2.1.) Για κάθε σημείο X στον χώρο που απεικονίζεται στις δύο εικόνες, ορίζονται δύο ομόλογες ακτίνες, οι O_1X και O_2X , που τέμνουν τα επίπεδα των εικόνων στα x_1 και x_2 αντίστοιχα. Το επίπεδο π , που ορίζεται από τις δύο ομόλογες ακτίνες και τη βάση B (O_1O_2) του στερεοζεύγους, ονομάζεται επιπολικό επίπεδο. Αντίστοιχα, τα ίχνη των επιπολικών επιπέδων πάνω στις εικόνες ονομάζονται επιπολικές γραμμές. Η βάση B του στερεοζεύγους τέμνει τα επίπεδα των εικόνων στους πόλους, e_1 και e_2 αντίστοιχα.



Σχήμα 2.1. Η επιπολική γεωμετρία

Με βάση τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι τα σημεία του χώρου που απεικονίζονται στις δύο εικόνες, ορίζουν μία δέσμη επιπολικών επιπέδων, αξονική ως προς τη βάση B του στερεοζεύγους (Σχήμα 2.2.). Η δέσμη αυτή με τη σειρά της ορίζει στις δύο εικόνες, δύο ομόλογες επίπεδες δέσμες επιπολικών ευθειών με κορυφές τους πόλους, οι οποίες είναι μεταξύ τους προβολικές (Καλησπεράκης, 2010).



Σχήμα 2.2. Οι δέσμες των επιπολικών επιπέδων και των επιπολικών γραμμών

Η επιπολική γεωμετρία είναι η βασική δέσμευση που απορρέει από την ύπαρξη δύο διαφορετικών σημείων λήψης. Η δέσμευση αυτή διατυπώνεται ως εξής: για κάθε σημείο x_1 στην πρώτη εικόνα που βρίσκεται πάνω στην επιπολική γραμμή l_1 , το ομόλογό του, x_2 , βρίσκεται πάνω στην επιπολική γραμμή l_2 στο επίπεδο της δεύτερης εικόνας. Η δέσμευση αυτή είναι πρωταρχικής σημασίας για τη διαδικασία της ψηφιακής συνταύτισης (Κεφάλαιο 3), αφού περιγράφει τη σχέση μεταξύ δύο ομόλογων σημείων. Αναλυτικότερα, τα ομόλογα σημεία x_1 και x_2 , το σημείο X στο χώρο και τα σημεία λήψης O_1 και O_2 ανήκουν στο ίδιο επιπολικό επίπεδο π . Έχοντας ως δεδομένο το x_1 και αναζητώντας το ομόλογό του, ορίζεται το επίπεδο π από την οπτική ακτίνα του x_1 και τη βάση B του στερεοζεύγους. Με βάση την επιπολική γεωμετρία, είναι γνωστό ότι η οπτική ακτίνα του x_2 ανήκει στο επίπεδο αυτό κι επομένως το x_2 αναμένεται να βρίσκεται πάνω στο ίχνος της τομής του π με την δεύτερη εικόνα, που δεν είναι άλλο από την l_2 . Συνεπώς, η αναζήτηση του x_2 περιορίζεται κατά μήκος της επιπολικής γραμμής και όχι σε όλο το επίπεδο της εικόνας.

Ο ορισμός των πόλων και των επιπολικών ευθειών, και συνεπώς η αξιοποίηση της επιπολικής γεωμετρίας, μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους, ανάλογα με την ύπαρξη ή μη πληροφορίας για τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού. Έτσι, στην περίπτωση εικόνων από βαθμονομημένες μηχανές λήψης, όπου έχει προηγηθεί η αποκατάσταση του εσωτερικού προσανατολισμού, ο ορισμός των πόλων και των επιπολικών ευθειών επιτυγχάνεται μέσω της αποκατάστασης του σχετικού προσανατολισμού. Αντίθετα, στην περίπτωση εικόνων από

μηχανές άγνωστης εσωτερικής γεωμετρίας, η επιπολική γεωμετρία προκύπτει μετά τον υπολογισμό του επιπολικού πίνακα F (Fundamental Matrix). Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι η απόδοση της αγγλικής ορολογίας για τον πίνακα F στα ελληνικά, που υιοθετείται εδώ, προτείνεται στη διδακτορική διατριβή του Καλησπεράκη (2010).

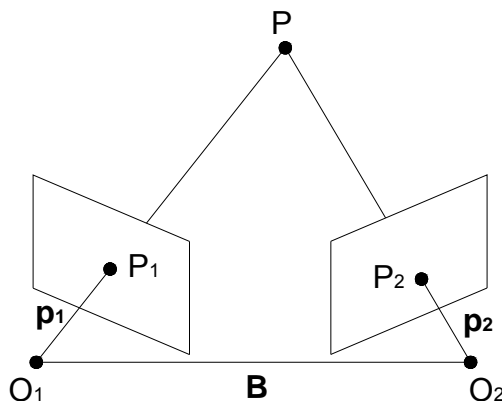
2.2. Σχετικός Προσανατολισμός

Βασικός στόχος της επιστήμης της Φωτογραμμετρίας είναι η εξαγωγή τρισδιάστατης πληροφορίας από δύο εικόνες. Το παραπάνω μεταφράζεται στη δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου αντικειμένου που απεικονίζεται στο επικαλυπτόμενο τμήμα ενός στερεοζεύγους. Η δημιουργία αυτού του μοντέλου βασίζεται στο γεγονός ότι κάθε σημείο του αντικειμένου ορίζει δυο οπτικές ακτίνες με τα δύο σημεία λήψης, οι οποίες οφείλουν να τέμνονται. Η εξασφάλιση της αλληλοτομίας των ομόλογων ακτίνων ή εναλλακτικά η άρση της ασυμβατότητας αυτών, αποτελεί το αντικείμενο του σχετικού προσανατολισμού. Συνεπώς, ο σχετικός προσανατολισμός ορίζεται ως το φωτογραμμετρικό πρόβλημα προσδιορισμού της σχετικής θέσης και των σχετικών στροφών δύο επικαλυπτόμενων δεσμών από ομολογίες εικόνων (Πατιάς, 1991, Καλησπεράκης, 2010). Από τον παραπάνω ορισμό είναι προφανές, ότι ο σχετικός προσανατολισμός αφορά σε τρισδιάστατες δέσμες ακτίνων και επομένως πριν την αποκατάστασή του, θα πρέπει να έχει εξασφαλιστεί η ανάπλαση του σχήματος της δέσμης των ακτίνων, δηλαδή η αποκατάσταση του εσωτερικού προσανατολισμού. Επίσης, προκύπτει ότι ο βαθμός ελευθερίας του είναι ίσος με 5, δηλαδή τρεις στροφές και δύο μεταθέσεις της μιας δέσμης στο χώρο, έτσι ώστε να προσδιοριστεί η διεύθυνση του διανύσματος της βάσης. Επομένως, το μοντέλο που προκύπτει είναι σε αυθαίρετη θέση στο χώρο και χωρίς κλίμακα. Ισοδύναμα, ο σχετικός προσανατολισμός μπορεί να οριστεί ως η διαδικασία εξάλειψης της y -παράλλαξης, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η δυνατότητα στερεοσκοπικής παρατήρησης ή ακόμα και ως η διαδικασία δημιουργίας τουλάχιστον πέντε επιπολικών επιπέδων. Το τελευταίο γίνεται πιο κατανοητό μέσω της εφαρμογής της εξίσωσης συνεπιπεδότητας που παρουσιάζεται στη συνέχεια του κεφαλαίου.

Όπως προαναφέρθηκε, η αποκατάσταση του σχετικού προσανατολισμού απαιτεί μετρήσεις σημείων πάνω στις εικόνες, όχι απαραίτητα φωτοσταθερών. Αυτό συνεπάγεται ότι η ακρίβειά του εξαρτάται αποκλειστικά από την «εσωτερική» ακρίβεια των εικόνων, ενώ παράλληλα η ανεξαρτησία του από μετρήσεις φωτοσταθερών, δίνει τη δυνατότητα να υπάρχει σημαντικό πλεόνασμα παρατηρήσεων στην αναλυτική λύση του προβλήματος κι άρα να εξασφαλίζονται ισχυρές λύσεις (Πέτσα, 2000).

Το πρόβλημα του σχετικού προσανατολισμού επιλύεται αναλυτικά με την εφαρμογή της συνθήκης της συνεπιπεδότητας. Η τελευταία δεν είναι τίποτα παραπάνω από τη μαθηματική έκφραση της δέσμευσης που

απορρέει από την επιπολική γεωμετρία. Με άλλα λόγια, η συνθήκη συνεπιπεδότητας εξασφαλίζει ότι για κάθε ζεύγος ομόλογων σημείων, τα διανύσματα των ομόλογων οπτικών ακτίνων θα πρέπει να είναι συνεπίπεδα με το διάνυσμα της βάσης (Σχήμα 2.3.).



Σχήμα 2.3. Εξίσωση Συνεπιπεδότητας

Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζονται δύο ομόλογα σημεία, τα $P_1(x_1, y_1)$ και $P_2(x_2, y_2)$, καθώς και τα αντίστοιχα ομόλογα διανύσματα των οπτικών ακτίνων, $\mathbf{p}_1 = \mathbf{O}_1 P_1$ και $\mathbf{p}_2 = \mathbf{O}_2 P_2$. Προκειμένου τα διανύσματα \mathbf{p}_1 , \mathbf{p}_2 και \mathbf{B} να ανήκουν στο ίδιο επίπεδο, η συνθήκη συνεπιπεδότητας γράφεται ως εξής:

$$\vec{B}[(\vec{p}_1 \times \vec{p}_2)] = 0 \quad (\text{Εξ. 2.1})$$

Το εξωτερικό γινόμενο των \mathbf{p}_1 , \mathbf{p}_2 ορίζει ένα διάνυσμα \mathbf{d} το οποίο είναι κάθετο στο επίπεδο που ορίζουν αυτά, δηλαδή στο επιπολικό επίπεδο. Η βάση \mathbf{B} ανήκει επίσης στο επιπολικό επίπεδο και άρα είναι κάθετη στο διάνυσμα \mathbf{d} . Επομένως, το εσωτερικό τους γινόμενο μηδενίζεται αφού το συνημίτονο της γωνίας 90° ισούται με 0. Χρησιμοποιώντας τις συνιστώσες των διανυσμάτων,

$$\vec{B} = \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix}, \quad \vec{p}_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ -c \end{bmatrix}, \quad \vec{p}_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ -c \end{bmatrix} \quad (\text{Εξ. 2.2})$$

η εξίσωση 2.1 ισοδυναμεί με το μηδενισμό της οριζουσας (Πέτσα, 2000):

$$\begin{vmatrix} B_x & B_y & B_z \\ x_1 & y_1 & -c \\ x_2 & y_2 & -c \end{vmatrix} = 0 \quad (\text{Εξ. 2.3})$$

Στο σημείο αυτό, επισημαίνεται ότι τα διανύσματα των ομολογων ακτίνων θεωρούνται απαλλαγμένα από τα σφάλματα του εσωτερικού προσανατολισμού κι επομένως οι εικονοσυντεταγμένες των ομολογων σημείων, που εμφανίζονται στην εξίσωση 2.3, είναι ανηγμένες στα πρωτεύοντα σημεία των εικόνων.

Αν, τώρα, θεωρηθούν οι λόγοι

$$b_y = \frac{B_y}{B_x} \quad , \quad b_z = \frac{B_z}{B_x} \quad (\text{Εξ. 2.4})$$

τότε η εξίσωση 2.3 γράφεται:

$$B_x \cdot \begin{vmatrix} 1 & b_y & b_z \\ x_1 & y_1 & -c \\ x_2 & y_2 & -c \end{vmatrix} = 0 \Rightarrow \begin{vmatrix} 1 & b_y & b_z \\ x_1 & y_1 & -c \\ x_2 & y_2 & -c \end{vmatrix} = 0 \quad (\text{Εξ. 2.5})$$

Από την παραπάνω εξίσωση είναι προφανές, ότι η τιμή της συνιστώσας της βάσης B_x , άπαξ και μηδενιστεί η ορίζουσα, δεν επηρεάζει την επαλήθευση της ισότητας. Αυτός είναι και ο λόγος που ο σχετικός προσανατολισμός αποκαθιστά μόνο το σχήμα του τρισδιάστατου μοντέλου, χωρίς να υπολογίζει την κλίμακά του.

Στην εξίσωση 2.5 εμφανίζονται μόνο οι δύο εκ των πέντε αγνώστων του σχετικού προσανατολισμού, αυτοί που ορίζουν τη διεύθυνση της βάσης του στερεοζεύγους. Οι άλλοι τρεις άγνωστοι, οι σχετικές στροφές μεταξύ των δύο δεσμών, εμπεριέχονται στις εικονοσυντεταγμένες των ομολογων σημείων και ο ορισμός τους εξαρτάται από την επιλογή του συστήματος αναφοράς. Έτσι, για την περίπτωση του εξαρτημένου σχετικού προσανατολισμού στο σύστημα της αριστερής εικόνας, η οποία αποτελεί και τη συνήθη πρακτική στη φωτογραμμετρία για την αποκατάσταση του σχετικού προσανατολισμού, οι συνιστώσες του διανύσματος \mathbf{p}_2 γράφονται ως εξής:

$$\vec{p}_2 = R^T \cdot \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ -c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ -c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11}x_2 + r_{21}y_2 - r_{31}c \\ r_{12}x_2 + r_{22}y_2 - r_{32}c \\ r_{13}x_2 + r_{23}y_2 - r_{33}c \end{bmatrix} \quad (\text{Εξ. 2.6})$$

όπου, R ο πίνακας στροφής της δεξιάς εικόνας στο σύστημα αναφοράς της αριστερής. Εισάγοντας τις συνιστώσες του \mathbf{p}_2 , όπως προέκυψαν από την εξίσωση 2.6, στην εξίσωση 2.5, η ορίζουσα αναπτύσσεται ως προς τα στοιχεία της πρώτης γραμμής ως εξής:

$$\begin{aligned}
 & y_1 \cdot (r_{13}x_2 + r_{23}y_2 - r_{33}c) + c \cdot (r_{12}x_2 + r_{22}y_2 - r_{32}c) - \\
 & -b_y \cdot [x_1 \cdot (r_{13}x_2 + r_{23}y_2 - r_{33}c) + c \cdot (r_{11}x_2 + r_{21}y_2 - r_{31}c)] + \quad (\text{Εξ. 2.7}) \\
 & +b_z \cdot [x_1 \cdot (r_{12}x_2 + r_{22}y_2 - r_{32}c) - y_1 \cdot (r_{11}x_2 + r_{21}y_2 - r_{31}c)] = 0
 \end{aligned}$$

Με βάση την τελική μορφή της εξίσωσης συνεπιπεδότητας (Εξ. 2.7) είναι δυνατός ο υπολογισμός των πέντε παραμέτρων του σχετικού προσανατολισμού, δηλαδή οι συνιστώσες b_y , b_z της βάσης και οι τρεις σχετικές γωνίες στροφής ω , φ , κ της δεξιάς εικόνας ως προς την αριστερή. Από την εξίσωση 2.7 γίνεται σαφές ότι οι μοναδικές παρατηρούμενες ποσότητες είναι οι εικονοσυντεταγμένες των ομόλογων σημείων κι επομένως επαληθεύεται η ανεξαρτησία του σχετικού προσανατολισμού από μετρήσεις φωτοσταθερών που διατυπώθηκε παραπάνω. Αυτό συνεπάγεται πλεόνασμα παρατηρήσεων κι επομένως επίλυση του προβλήματος του σχετικού προσανατολισμού, μέσω συνόρθωσης με τη Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων (M.E.T.), χρησιμοποιώντας ως εξίσωση παρατήρησης τη συνθήκη συνεπιπεδότητας. Η τελευταία, παρατηρείται ότι είναι μη γραμμική τόσο ως προς τους αγνώστους όσο και ως προς τις παρατηρούμενες ποσότητες. Για το λόγο αυτό η επίλυση γίνεται εφαρμόζοντας τη γενική μέθοδο συνόρθωσης, για την οποία η μορφή του συστήματος των εξισώσεων είναι:

$$A\hat{x} + Bu = w \quad (\text{Εξ. 2.8})$$

όπου, A : ο πίνακας των συντελεστών των αγνώστων
 B : ο πίνακας των συντελεστών των μετρήσεων
 u : το διάνυσμα των υπολοίπων των μετρήσεων
 w : το διάνυσμα των σφαλμάτων κλεισίματος της εξίσωσης
 \hat{x} : το διάνυσμα των καλύτερων τιμών των αγνώστων

Για τον υπολογισμό των στοιχείων του A , δεδομένου ότι οι εξισώσεις δεν είναι γραμμικές, απαιτείται η εκτίμηση αρχικών τιμών για τους αγνώστους. Μολονότι, στην περίπτωση των αεροφωτογραφιών η εκτίμηση αρχικών τιμών είναι μία απλή υπόθεση, κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει και στην περίπτωση των επίγειων λήψεων, όπου η γεωμετρία είναι τυχαία και δεν υπακούει πάντοτε στην τυπική διάταξη λήψης. Έτσι, προκειμένου να ξεπεραστεί αυτό το εμπόδιο, διατυπώθηκαν αρκετοί αλγόριθμοι, τόσο από το χώρο της Φωτογραμμετρίας όσο και από αυτόν της Όρασης Υπολογιστών, οι οποίοι αντιμετωπίζουν το ζήτημα του σχετικού προσανατολισμού γραμμικά. Ο δημοφιλέστερος εξ αυτών είναι ο αλγόριθμος του Longuet – Higgins (1981) που εισάγει την έννοια του δεσμευμένου επιπολικού πίνακα \mathbf{E} (Essential Matrix) (Καλησπεράκης, 2010). Η αναλυτική περιγραφή τέτοιων αλγορίθμων ξεφεύγει από το θεωρητικό πλαίσιο και το σκοπό της παρούσας διπλωματικής, παρόλα αυτά για λόγους πληρότητας αναφέρεται παρακάτω η βασική ιδέα στην οποία στηρίζεται ο τελευταίος.

Έτσι, σύμφωνα με τον Longuet – Higgins, ο πίνακας \mathbf{E} προκύπτει αν εκφραστεί το εξωτερικό γινόμενο της εξίσωσης συνεπιπεδότητας συναρτήσει του αντισυμμετρικού πίνακα εξωτερικού γινομένου, δηλαδή:

$$p_1^T (b \times R \cdot p_2) = 0 \Rightarrow p_1^T [b]_x R p_2 = 0 \Leftrightarrow p_1^T E p_2 = 0 \quad (\text{Εξ. 2.9})$$

$$\text{όπου } [b]_x = \begin{bmatrix} 0 & -b_z & b_y \\ b_z & 0 & -1 \\ -b_y & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Ο $[b]_x$ είναι ένας αντισυμμετρικός πίνακας, δηλαδή έχει την ιδιότητα ο ανάστροφός του να ισούται με τον αντίθετό του. Συνεπώς, ο δεσμευμένος επιπολικός πίνακας είναι το γινόμενο ενός αντισυμμετρικού πίνακα, του $[b]_x$, με έναν ορθογώνιο, τον R (Luong et al, 1993). Ο \mathbf{E} είναι ένας πίνακας 3×3 , τα στοιχεία του οποίου αποτελούν συναρτήσεις των πέντε αγνώστων του σχετικού προσανατολισμού κι άρα είναι μεταξύ τους εξαρτημένα. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος, βασίζεται στην γραμμική επίλυση της εξίσωσης 2.9 ως προς τα στοιχεία του \mathbf{E} και στη συνέχεια στον προσδιορισμό των ανεξάρτητων παραμέτρων του σχετικού προσανατολισμού.

2.3. Επιπολικός Πίνακας

Η αποκατάσταση του σχετικού προσανατολισμού, για την οποία έγινε λόγος παραπάνω, επιτρέπει τον ορισμό των πόλων και των επιπολικών ευθειών μέσω του υπολογισμού των επιπολικών επιπέδων, αφού η δέσμευση που εφαρμόζεται είναι αυτή της συνεπιπεδότητας ομολογων οπτικών ακτίνων και της βάσης B . Συνεπώς, ο ορισμός των δύο αυτών στοιχείων προϋποθέτει γνωστό εσωτερικό προσανατολισμό των εικόνων. Ο περιορισμός αυτός δεν αποτέλεσε πρόβλημα για την επιστήμη της φωτογραμμετρίας όπου η χρήση εικόνων από βαθμονομημένες μηχανές λήψης και η αποκατάσταση του εσωτερικού προσανατολισμού, αποτελούν συνήθεις πρακτικές. Αντίθετα, στον κλάδο της Όρασης υπολογιστών έγιναν προσπάθειες για να αντιμετωπιστεί το ζήτημα του ορισμού των πόλων και των επιπολικών ευθειών στη γενική του περίπτωση, δηλαδή σε εικόνες που έχουν προκύψει από μηχανές λήψης άγνωστης εσωτερικής γεωμετρίας. Η αδυναμία ανάπλασης του σχήματος της δέσμης των οπτικών ακτίνων σημαίνει ότι το πρόβλημα θα πρέπει να αντιμετωπιστεί ακολουθώντας διαφορετική προσέγγιση, δηλαδή όχι μέσω των επιπολικών επιπέδων όπως πριν, αλλά απευθείας από το επίπεδο της μίας εικόνας σε αυτό της άλλης. Έτσι, εισάγεται η έννοια της δισδιάστατης – 2D επιπολικής γεωμετρίας, μέσω της οποίας ο ορισμός των επιπολικών ευθειών αντιμετωπίζεται ως πρόβλημα ορισμένο στον δισδιάστατο προβολικό χώρο (Καλησπεράκης, 2010).

Ο ορισμός των πόλων και των επιπολικών ευθειών, στο πλαίσιο της προσέγγισης που περιγράφηκε παραπάνω, αντιμετωπίζεται αν αντί της δέσμευσης της τρισδιάστατης συνεπιπεδότητας, εφαρμοστεί η δέσμευση της επιπολικότητας (epipolar constraint). Η τελευταία, μεταφράζεται ως εξής: τα ομόλογα σημεία σε εικόνες, οφείλουν να βρίσκονται επί ομόλογων επιπολικών ευθειών. Αναζητείται λοιπόν, η μαθηματική έκφραση που περιγράφει την σχέση μεταξύ ομόλογων σημείων και ομόλογων ευθειών. Είναι προφανές, ότι μία τέτοια σχέση αποτελεί μία μη αντιστρέψιμη ετερογραφία (singular correlation). Αναλυτικότερα, η σχέση χαρακτηρίζεται ως ετερογραφία επειδή συνδέει μη ομοειδή στοιχεία (σημεία με ευθείες) και ως μη αντιστρέψιμη επειδή σε σημείο της μίας εικόνας αντιστοιχίζεται μία δεδομένη επιπολική ευθεία της δεύτερης, αλλά σε επιπολική ευθεία της δεύτερης δεν αντιστοιχεί ένα μόνο σημείο της πρώτης, αλλά ολόκληρη ευθεία.

Στο σημείο αυτό, εισάγεται η έννοια του επιπολικού πίνακα \mathbf{F} (Fundamental Matrix), ο οποίος είναι η αλγεβρική αναπαράσταση της επιπολικής γεωμετρίας στην περίπτωση εικόνων από μηχανές λήψης άγνωστης εσωτερικής γεωμετρίας (Hartley & Zisserman, 2000). Επομένως, ο επιπολικός πίνακας αποτελεί το «κλειδί» για την τρισδιάστατη ανακατασκευή αντικειμένων από τέτοιες εικόνες. Ο υπολογισμός λοιπόν του \mathbf{F} ισοδυναμεί με την εφαρμογή της δέσμευσης της επιπολικότητας κι άρα με την εύρεση της ετερογραφίας που περιγράφηκε παραπάνω. Το μαθηματικό μοντέλο της τελευταίας ορίζεται από την εξίσωση (Καλησπεράκης, 2010, Hartley & Zisserman, 2000, Luong, Deriche, Faugeras & Papadopoulos, 1993):

$$\ell' = F \cdot x \quad , \quad \ell = F^T \cdot x' \quad (\text{Εξ. 2.10})$$

όπου, ℓ', ℓ : ομόλογες επιπολικές ευθείες
 x', x : ομόλογα σημεία

Από τις εξισώσεις 2.10 αποδεικνύεται (Hartley & Zisserman, 2000) ότι ο \mathbf{F} οφείλει να ικανοποιεί την ακόλουθη εξίσωση:

$$x'^T \cdot F \cdot x = 0 \quad (\text{Εξ. 2.11})$$

Από την εξίσωση 2.11 είναι προφανές, ότι ο \mathbf{F} είναι δυνατόν να υπολογιστεί μόνο από ομολογίες σημείων. Για τον υπολογισμό αυτού, έχουν διατυπωθεί στη βιβλιογραφία αρκετοί αλγόριθμοι που παρουσιάζουν από απλές μέχρι και αρκετά σύνθετες επιλύσεις. Οι βασικότεροι από αυτούς τους αλγόριθμους παρουσιάζονται στις παραγράφους που ακολουθούν. Πριν όμως από την παρουσίαση αυτών κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν οι βασικές ιδιότητες του πίνακα \mathbf{F} , οι οποίες παίζουν σημαντικό ρόλο για την επίλυση της εξίσωσης 2.11.

Ο επιπολικός πίνακας, είναι ένας πίνακας 3×3 , ο οποίος αποδεικνύεται ότι έχει βαθμό 2 αφού όπως προαναφέρθηκε είναι μη αντιστρέψιμος κι άρα οφείλει να έχει μηδενική ορίζουσα. Από τη θεωρία της γραμμικής άλγεβρας προκύπτει ότι ο υπολογισμός του έχει 7 βαθμούς ελευθερίας, αφού το ομογενές σύστημα της εξίσωσης 2.11 έχει λύση με 9 μείον 2 παραμέτρους (όπου 9 είναι τα άγνωστα στοιχεία του \mathbf{F} και 2 ο βαθμός του). Συνεπώς, αρκούν 7 ομόλογα σημεία για τον υπολογισμό των στοιχείων του. Τέλος, οι πόλοι των εικόνων υπολογίζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\mathbf{F} \cdot \mathbf{e} = 0 \quad , \quad \mathbf{F}^T \cdot \mathbf{e}' = 0 \quad (\text{Εξ. 2.12})$$

Στις παραγράφους που ακολουθούν, περιγράφονται οι βασικές επιλύσεις της εξίσωσης 2.11, που έχουν προταθεί για τον υπολογισμό των στοιχείων του \mathbf{F} . Αναλυτικότερα, παρουσιάζονται η γραμμική, η μη γραμμική και η βελτιωμένη γραμμική επίλυση της εξίσωσης για περίσσεια ομόλογων σημείων, οι οποίες διαφοροποιούνται ως προς την ποσότητα που ελαχιστοποιείται κατά τη συνόρθωση αλλά και τον τρόπο που επιβάλλεται στη λύση η δέσμευση της μηδενικής ορίζουσας που οφείλει να ικανοποιεί ο επιπολικός πίνακας.

2.3.1 Γραμμική επίλυση

Η γραμμική επίλυση της εξίσωσης 2.11 από πλεόνασμα ομόλογων σημείων (8 ή περισσότερα) αποτελεί τον απλούστερο τρόπο υπολογισμού των στοιχείων του επιπολικού πίνακα, δεδομένου ότι δεν απαιτεί επαναλήψεις κι εκτίμηση αρχικών τιμών για τους αγνώστους. Η λύση αυτή είναι γνωστή στη βιβλιογραφία ως «αλγόριθμος των 8 σημείων» (8-point algorithm).

Η εξίσωση 2.11 γράφεται ισοδύναμα ως ένα γραμμικό ομογενές σύστημα εξισώσεων της μορφής:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{f} = 0 \quad (\text{Εξ. 2.13})$$

όπου \mathbf{f} : ένα διάνυσμα με τα στοιχεία του επιπολικού πίνακα

$$\mathbf{f} = [F_{11} \quad F_{12} \quad F_{13} \quad F_{21} \quad F_{22} \quad F_{23} \quad F_{31} \quad F_{32} \quad F_{33}]^T \quad (\text{Εξ. 2.14})$$

και \mathbf{A} : ο πίνακας σχεδιασμού της συνόρθωσης με διαστάσεις $(n \times 9)$ για n πλήθος ομόλογων σημείων

$$\mathbf{A} = [x_1 x_2 \quad y_1 x_2 \quad x_2 \quad x_1 y_2 \quad y_1 y_2 \quad y_2 \quad x_1 \quad y_1 \quad 1]^T \quad (\text{Εξ. 2.15})$$

αν θεωρηθούν οι συντεταγμένες των ομόλογων σημείων στις δύο εικόνες ως:

$$p_1 = [x_1 \quad y_1 \quad 1]^T, \quad p_2 = [x_2 \quad y_2 \quad 1]^T \quad (\text{Εξ. 2.16})$$

Κάθε ομογενές σύστημα, εκτός από την προφανή λύση $f=0$, έχει άπειρες λύσεις της μορφής $lf=0$. Στη βιβλιογραφία προτείνονται δύο τρόποι για την άρση της απειρίας των λύσεων του συστήματος. Ο πρώτος, προτείνει τη δέσμευση της τιμής ενός στοιχείου του f αυθαίρετα ώστε να ισούται με τη μονάδα και στη συνέχεια την ελαχιστοτετραγωνική λύση του προβλήματος. Ο δεύτερος, προτείνει την επιβολή της δέσμευσης μοναδιαίας νόρμας του διανύσματος f , δηλαδή η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των στοιχείων του να ισούται με τη μονάδα. Η δέσμευση αυτή αποδεικνύεται πλεονεκτικότερη έναντι της προηγούμενης, αφού δεν ενέχει τον κίνδυνο να οριστεί ίσο με 1 ένα στοιχείο του f που μπορεί στην πραγματικότητα να είναι μηδενικό. Αποδεικνύεται τέλος (Golub & Van Loan, 1989, Καλησπεράκης, 2010), ότι αν εφαρμοστεί η ανάλυση ιδιαζουσών τιμών (Singular Value Decomposition, SVD) του πίνακα A ,

$$A = UDV^T \quad (\text{Εξ. 2.17})$$

τότε, η τελευταία στήλη του πίνακα V αποτελεί την ελαχιστοτετραγωνική λύση του προβλήματος ικανοποιώντας την παραπάνω δέσμευση.

Ο αλγόριθμος των 8 σημείων, μολονότι έχει το πλεονέκτημα της απλής εφαρμογής, αποδεικνύεται (Luong et al, 1993) ότι έχει αρκετά μειονεκτήματα όσον αφορά την ακρίβεια και την αξιοπιστία της λύσης. Αναλυτικότερα, όπως προαναφέρθηκε, ο επιπολικός πίνακας είναι μη αντιστρέψιμος κι επομένως οφείλει να έχει μηδενική ορίζουσα, δέσμευση η οποία στην περίπτωση της γραμμικής επίλυσης αγνοείται. Ο Luong επισημαίνει ότι η γραμμική λύση καταλήγει σε πίνακα \mathbf{F} με $\det(\mathbf{F}) \neq 0$ κι επομένως η εξίσωση 2.12 δεν ικανοποιείται αφού $F_e \neq 0$, γεγονός που δημιουργεί ασυνέπεια με το μοντέλο της επιπολικής γεωμετρίας και μάλιστα η ασυνέπεια αυτή μεγαλώνει πλησιάζοντας στον πόλο. Επίσης, ο Luong αποδεικνύει ότι ο υπολογιζόμενος επιπολικός πίνακας διαφοροποιείται αν αλλάξει το σύστημα αναφοράς των συντεταγμένων των ομόλογων σημείων και ότι η λύση παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία στο θόρυβο των μετρήσεων. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση μη κανονικοποιημένων συντεταγμένων για τα ομόλογα σημεία, οδηγεί σε σφάλματα στην θέση των πόλων, οι οποίοι τείνουν στο κέντρο της εικόνας.

2.3.2 Μη γραμμική επίλυση

Τα προβλήματα της γραμμικής επίλυσης που διατυπώθηκαν παραπάνω οδήγησαν στη διατύπωση μη γραμμικών επιλύσεων για τον υπολογισμό του επιπολικού πίνακα, οι οποίες διαφοροποιούνται ως προς την ποσότητα που ελαχιστοποιείται στη συνόρθωση. Η δημοφιλέστερη μη

γραμμική επίλυση είναι εκείνη που βασίζεται στην ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των αποστάσεων σημείων από τις αντίστοιχες επιπολικές γραμμές. Το παραπάνω, μη γραμμικό κριτήριο, εκφράζεται μαθηματικά ως εξής:

$$\min\left(\sum d^2(p', Fp)\right) \quad (\text{Εξ. 2.18})$$

όπου, p, p' : ομόλογα σημεία στις δύο εικόνες

Ο Luong επισημαίνει ότι το παραπάνω κριτήριο ορίζει τις επιπολικές ευθείες της δεύτερης εικόνας και δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για τον ορισμό του πόλου της πρώτης. Έτσι, προκειμένου να μην τίθεται ζήτημα ασυμφωνίας μεταξύ της επιπολικής γεωμετρίας των δύο εικόνων, προτείνεται η ελαχιστοποίηση της απόστασης σημείων από ευθείες ταυτόχρονα και στις δύο εικόνες, εφαρμόζοντας το ακόλουθο κριτήριο:

$$\min\left[\sum\left(d^2(p', Fp) + d^2(p, F^T p')\right)\right] \quad (\text{Εξ. 2.19})$$

Τέλος, αναφέρεται ότι αρχικές τιμές για τους αγνώστους στη μη γραμμική επίλυση, μπορούν να υπολογίζονται από τον αλγόριθμο των 8-σημείων.

2.3.3 Κανονικοποιημένος αλγόριθμος των 8 σημείων

Ο Hartley (1997) λαμβάνοντας υπόψη όλες τις αδυναμίες της γραμμικής επίλυσης που προαναφέρθηκαν αλλά αναγνωρίζοντας το πλεονέκτημα της απλής – μη επαναληπτικής λύσης, επιχειρεί να την υπερασπιστεί προτείνοντας ορισμένες βελτιώσεις. Οι βελτιώσεις αυτές επικεντρώνονται στο ζήτημα του συστήματος αναφοράς των συντεταγμένων των ομόλογων σημείων αλλά και στην επιβολή της δέσμευσης της μηδενικής ορίζουσας του επιπολικού πίνακα.

Πιο συγκεκριμένα, με στόχο την ανεξαρτητοποίηση του υπολογισμού του επιπολικού πίνακα από το σύστημα αναφοράς των συντεταγμένων των ομόλογων σημείων, ο Hartley προτείνει την κανονικοποίηση των συντεταγμένων με την εφαρμογή ενός γραμμικού μετασχηματισμού, μία μετάθεση και μία κλίμακα. Η μετάθεση που εφαρμόζεται στα δεδομένα είναι τέτοια ώστε η αρχή του συστήματος να ταυτιστεί με το κέντρο βάρους των σημείων και η κλίμακα ώστε η μέση απόσταση των δεδομένων από αυτήν την αρχή να είναι ίση με $\sqrt{2}$:

$$p_{1normal} = T_1 \cdot p_1 \quad , \quad p_{2normal} = T_2 \cdot p_2 \quad (\text{Εξ. 2.20})$$

$$T_i = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{d_i} & 0 & -\frac{\sqrt{2}}{d_i} \cdot x_{ci} \\ 0 & \frac{\sqrt{2}}{d_i} & -\frac{\sqrt{2}}{d_i} \cdot y_{ci} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad i=1,2 \quad (\text{Εξ. 2.21})$$

όπου, $(x_{ci}, y_{ci}, 1)$ οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους των σημείων και d_i η μέση απόσταση του συνόλου των σημείων από το κέντρο βάρους. Όπως είναι φανερό, ο μετασχηματισμός υπολογίζεται και εφαρμόζεται σε κάθε εικόνα ξεχωριστά.

Από την άλλη πλευρά το ζήτημα της δέσμευσης της μηδενικής οριζουσας αντιμετωπίζεται μέσω της ανάλυσης ιδιαζουσών τιμών (SVD). Πιο συγκεκριμένα, σε πρώτο στάδιο ο επιπολικός πίνακας F_{normal} υπολογίζεται από τις κανονικοποιημένες συντεταγμένες των σημείων εφαρμόζοντας τη γραμμική μέθοδο που περιγράφηκε παραπάνω. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται ο αντίστροφος μετασχηματισμός κι ο επιπολικός πίνακας ισούται με:

$$F = T_2 \cdot F_{normal} \cdot T_1 \quad (\text{Εξ. 2.22})$$

Έτσι, η δέσμευση της μηδενικής οριζουσας επιβάλλεται ακολούθως, μηδενίζοντας την τελευταία ιδιοτιμή του επιπολικού πίνακα ή ισοδύναμα, μηδενίζοντας το τελευταίο στοιχείο του διαγώνιου πίνακα D , δηλαδή:

$$[U \quad D \quad V] = svd(F) \Rightarrow F = UDV^T \quad (\text{Εξ. 2.23})$$

$$F = U \text{diag}(\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad 0) V^T \quad (\text{Εξ. 2.24})$$

Ο κανονικοποιημένος αλγόριθμος των 8-σημείων (Normalized 8-point algorithm) που προτείνει ο Hartley συγκρινόμενος με τις πιο σύνθετες, μη γραμμικές επιλύσεις προσφέρει αποτελέσματα αντίστοιχης ακρίβειας (Καλησπεράκης, 2010).

Στο σημείο αυτό, ολοκληρώνεται η παρουσίαση των βασικότερων αλγορίθμων υπολογισμού του επιπολικού πίνακα, ο οποίος με βάση όσα προαναφέρθηκαν, αποτελεί εργαλείο «κλειδί» σε εφαρμογές που χρησιμοποιούνται εικόνες από μη βαθμονομημένες μηχανές λήψης. Τα στοιχεία του επιπολικού πίνακα περιγράφουν το μοντέλο της επιπολικής γεωμετρίας, το οποίο εκφράζει τη βασική γεωμετρική δέσμευση που

απορρέει από την ύπαρξη δύο διαφορετικών σημείων λήψης. Η δέσμευση της επιπολικότητας χρησιμοποιείται ευρέως στη διαδικασία της ψηφιακής συνταύτισης εικόνας, προκειμένου να περιοριστούν οι ασάφειες του προβλήματος που καλείται να αντιμετωπίσει η τελευταία. Η σημασία της επιπολικής γεωμετρίας στη διαδικασία της συνταύτισης αλλά και ο τρόπος με τον οποίο αυτή αξιοποιείται, περιγράφονται αναλυτικά στο κεφάλαιο που ακολουθεί. Τέλος, το μοντέλο της επιπολικής γεωμετρίας, που περιγράφεται μέσω του επιπολικού πίνακα, χρησιμεύει στον έλεγχο της ορθότητας ομόλογων σημείων, που έχουν εξαχθεί αυτόματα, στο επικαλυπτόμενο τμήμα εικόνων. Το παραπάνω χρησιμοποιείται και από την προτεινόμενη μέθοδο, η οποία εφαρμόζει αλγορίθμους ανίχνευσης χονδροειδών σφαλμάτων στις ομολογίες σημείων, προσαρμοσμένους στο μοντέλο του επιπολικού πίνακα (Κεφάλαιο 5).

3

Ψηφιακή Συνταύτιση

3.1. Ορισμός του Προβλήματος

Η Ψηφιακή Συνταύτιση Εικόνων (Digital Image Matching) ορίζεται ως η διαδικασία αυτόματου εντοπισμού ομολογών οντοτήτων μεταξύ δύο ή περισσότερων επικαλυπτόμενων εικόνων, η οποία εκτελείται με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Συνηθέστερα, με τον όρο οντότητες νοούνται περιοχές με συγκεκριμένους γκριζούς τόνους ή χαρακτηριστικά σημεία και γραμμές πάνω στις εικόνες. Η εύρεση τέτοιων αντιστοιχιών για τον ανθρώπινο εγκέφαλο αποτελεί μία απλή, πλην χρονοβόρα, διαδικασία. Αντίθετα, η ίδια διαδικασία για τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές δεν είναι καθόλου εύκολη, δεδομένου ότι οι τελευταίοι αντιλαμβάνονται τις ψηφιακές εικόνες ως πίνακες με τιμές τόνων του γκρι. Η αυτοματοποίηση της διαδικασίας αποτέλεσε αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας πολλών επιστημονικών κλάδων πέρα της φωτογραμμετρίας, όπως αυτοί της όρασης υπολογιστών (computer vision), της τεχνητής νοημοσύνης (artificial intelligence), της αναγνώρισης προτύπων (pattern recognition) και της μηχανικής όρασης (machine vision).

Το πρόβλημα της ψηφιακής συνταύτισης αναφέρεται στη βιβλιογραφία (Heipke, 1992, Σκαρλάτος, 2006, Καρφής, 2009) ως ένα ελλιπώς ορισμένο πρόβλημα (ill posed problem) υπό την έννοια ότι έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Είναι δυνατόν να μην έχει λύση (αδυναμία λύσης)
- Είναι δυνατόν να μην έχει μοναδική λύση (πολλαπλές λύσεις)
- Είναι δυνατόν να μην έχει ισχυρή λύση (εξάρτηση από τα δεδομένα)

Αναλυτικότερα, η αδυναμία λύσης αναφέρεται στην περίπτωση που η οντότητα της οποίας αναζητείται η ομολογη, δεν εμφανίζεται και στις δύο εικόνες. Το παραπάνω είναι πολύ πιθανό να συμβεί λόγω των «σκοτεινών περιοχών» (occlusions) στις εικόνες. Η περίπτωση των πολλαπλών λύσεων απαντάται σε εικόνες με επαναλαμβανόμενα μοτίβα. Η εμφάνιση τέτοιων μοτίβων συνεπάγεται την ύπαρξη, περισσότερων από μία, οντοτήτων στην δεύτερη εικόνα που να αντιστοιχούν στην οντότητα της πρώτης. Τέλος, η

λύση του προβλήματος μπορεί να παρουσιάζει ασάθεια εξ αιτίας χαμηλής υφής (texture) ή παρουσίας θορύβου στην εικόνα.

Από τα παραπάνω, γίνεται σαφές, ότι η αντιμετώπιση του προβλήματος της συνταύτισης εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τα εκάστοτε δεδομένα στα οποία εφαρμόζεται η διαδικασία. Το περιεχόμενο των εικόνων αυτό καθ' αυτό, η ποιότητα καταγραφής του ψηφιακού σήματος καθώς κι οι συνθήκες φωτισμού κατά τη λήψη, αποτελούν παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά το αποτέλεσμα της διαδικασίας της συνταύτισης. Επιπρόσθετα, κρίσιμο ρόλο διαδραματίζει η γεωμετρία της λήψης των εικόνων. Πιο συγκεκριμένα, η ύπαρξη διαφορών κλίμακας μεταξύ των δύο εικόνων, είτε λόγω μεταβολής της απόστασης λήψης, είτε λόγω του αναγλύφου του απεικονιζόμενου αντικειμένου, δημιουργούν προβλήματα στη διαδικασία της συνταύτισης. Πρακτικά, μολονότι μία οντότητα μπορεί να απεικονίζεται και στις δύο εικόνες, η διαφορά κλίμακας συνεπάγεται διαφορετικές διαστάσεις των εικόνων της κι άρα αδυναμία στην συνταύτιση. Παράλληλα, οι διαφορετικές γωνίες στροφής μεταξύ των δύο εικόνων, δημιουργούν διαφορετικές προοπτικές παραμορφώσεις κι άρα μεταβολή του σχήματος κάθε οντότητας από τη μία εικόνα στην άλλη.

Όλοι οι παράγοντες, για τους οποίους έγινε λόγος στα προηγούμενα, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η επίλυση του προβλήματος της συνταύτισης αποτελεί ένα δύσκολο αντικείμενο και απαιτεί την ανάπτυξη μεθόδων και αλγορίθμων, που θα λαμβάνουν υπόψη μία σειρά από παραμέτρους ώστε να καταλήγουν σε αξιόπιστα αποτελέσματα. Επισημαίνεται μάλιστα, ότι η αξιοπιστία τέτοιων αλγορίθμων συνήθως μειώνεται σημαντικά σε περιπτώσεις επίγειων λήψεων, όπου οι γεωμετρικές παραμορφώσεις, λόγω κλίμακας και στροφών, είναι εντονότερες (Σκαρλάτος, 2006). Έτσι, παρά το γεγονός ότι η συνταύτιση αποτέλεσε ερευνητικό αντικείμενο από την δεκαετία του 50-60, σημειώνοντας σημαντικά βήματα προόδου ιδιαίτερα τη δεκαετία του 80-90, εξακολουθούν να τίθενται ορισμένοι περιορισμοί στην επίλυση του προβλήματος. Χαρακτηριστικά, αναφέρεται ότι μέχρι σήμερα, δεν υπάρχει μία μέθοδος συνταύτισης πλήρως αυτοματοποιημένη, ακριβής και αξιόπιστη, ικανή να εφαρμοστεί σε εικόνες με διαφορετικό περιεχόμενο (Baltsavias, 1991).

Η μελέτη μεθόδων και τεχνικών συνταύτισης που έχουν αναπτυχθεί όλα αυτά τα χρόνια, απαιτεί πρώτα απ' όλα, την ταξινόμησή τους σε κατηγορίες, στη βάση ορισμένων κριτηρίων. Η ταξινόμηση αυτή αποτελεί από μόνη της ένα δύσκολο αντικείμενο (Baltsavias, 1991) κι αυτό γιατί τις τελευταίες δεκαετίες έχουν διατυπωθεί πλήθος κριτηρίων και διαφορετικών οπτικών για την αντιμετώπιση του προβλήματος από τους διάφορους ερευνητές. Ενδεικτικά, έχουν προταθεί ταξινομήσεις με κριτήρια την εκάστοτε εφαρμογή στην οποία χρησιμεύει η συνταύτιση, το είδος της οντότητας που επιχειρείται να ταυτιστεί, το μέτρο ομοιότητας που υπολογίζεται, την ύπαρξη ή μη εξωτερικής πληροφορίας για την επιβολή δεσμεύσεων κ.ά.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, κρίνεται επαρκής η υιοθέτηση μίας σχετικά απλής ταξινόμησης, η οποία απαντάται συχνά στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, προκειμένου να αναπτυχθούν οι βασικές έννοιες και τεχνικές της ψηφιακής συνταύτισης. Το κριτήριο που χρησιμοποιείται είναι το είδος της οντότητας που επιχειρείται να συνταυτιστεί και στη βάση αυτού διακρίνονται οι εξής κατηγορίες:

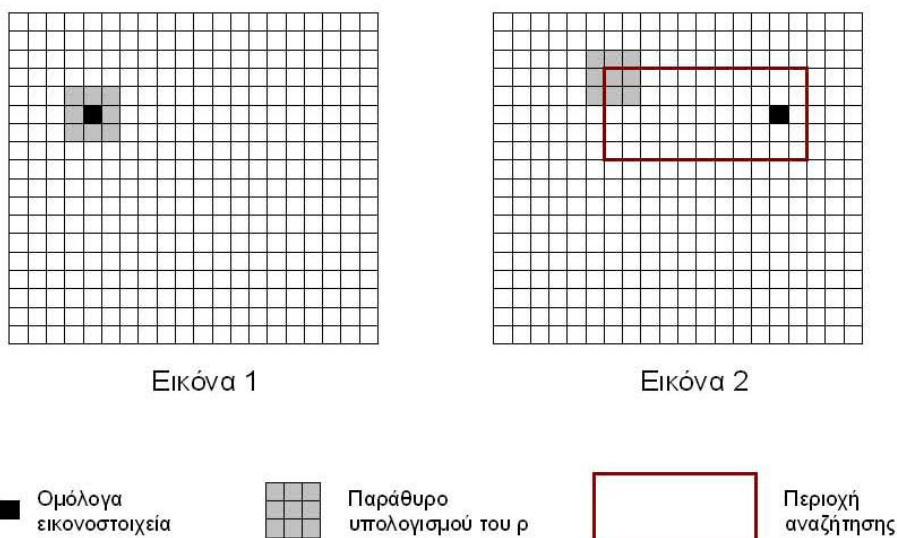
- Επιφανειακή συνταύτιση (Area based / Signal based matching)
- Συνταύτιση χαρακτηριστικών (Feature based matching)

Στην πρώτη περίπτωση οντότητα συνταύτισης είναι οι τιμές των γκριζών τόνων των εικονοστοιχείων των εικόνων ενώ στη δεύτερη είναι χαρακτηριστικά που έχουν εξαχθεί από αυτές. Τέτοια χαρακτηριστικά μπορεί να είναι σημεία, γραμμές και κλειστά πολύγωνα.

3.2. Επιφανειακή Συνταύτιση

Στην επιφανειακή συνταύτιση συγκρινόμενες οντότητες είναι οι ψηφιακές τιμές των εικόνων. Η σύγκριση των τόνων δεν γίνεται μεταξύ μεμονωμένων εικονοστοιχείων για δύο λόγους: αφενός γιατί μέσα σε μία εικόνα είναι προφανές ότι θα υπάρχουν περισσότερες από μία εικονοψηφίδες με την ίδια ψηφιακή τιμή κι αφετέρου γιατί είναι πιθανόν ομόλογες εικονοψηφίδες να μην έχουν την ίδια ψηφιακή τιμή και στις δύο εικόνες λόγω διαφορετικών συνθηκών φωτισμού κατά τη λήψη. Επομένως, τίθεται η ανάγκη ορισμού μιας ευρύτερης περιοχής γύρω από κάθε μεμονωμένη εικονοψηφίδα (της οποίας αναζητείται η ομόλογη) έτσι ώστε η οντότητα να περιέχει τελικώς επαρκή πληροφορία και να είναι δυνατή κι αξιόπιστη η συνταύτιση. Το σύνολο των εικονοψηφίδων της πρώτης εικόνας, που περιλαμβάνονται σε αυτή την περιοχή, ονομάζεται παράθυρο αναφοράς ή πρότυπο (template window) ενώ το αντίστοιχο παράθυρο στη δεύτερη εικόνα ονομάζεται παράθυρο σύγκρισης ή παράθυρο αναζήτησης (matching window) (Σχήμα 3.1).

Συνοπτικά, η διαδικασία της επιφανειακής συνταύτισης έχει ως εξής: αρχικά επιλέγεται το παράθυρο αναφοράς στην πρώτη εικόνα και στη συνέχεια ορίζεται μία περιοχή, η περιοχή αναζήτησης, στη δεύτερη εικόνα μέσα στην οποία θα αναζητηθεί το παράθυρο σύγκρισης. Σε κάθε θέση μέσα στην περιοχή αναζήτησης υπολογίζεται ένα μέτρο ομοιότητας μεταξύ των δύο παραθύρων, προκειμένου να βρεθεί εκείνο που μοιάζει περισσότερο με το πρότυπο.



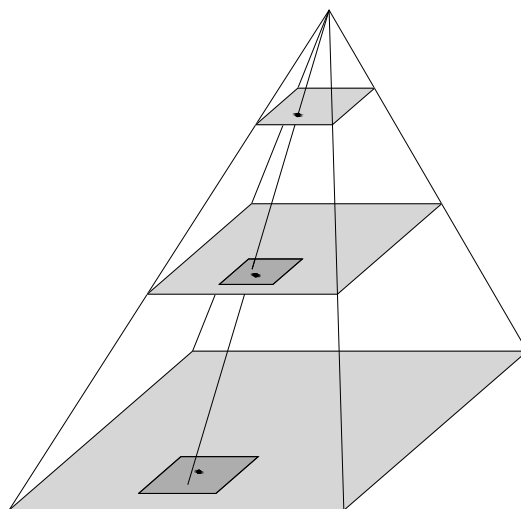
Σχήμα 3.1. Επιφανειακή Συνταύτιση

Από την περιγραφή της διαδικασίας που προηγήθηκε δημιουργούνται ορισμένοι προβληματισμοί. Καταρχάς, ποιες θα είναι οι διαστάσεις του παραθύρου αναφοράς, ώστε να εξασφαλίζεται με αξιοπιστία η εύρεση της ομόλογης κεντρικής εικονοψηφίδας στο παράθυρο σύγκρισης; Πόσο μεγάλη θα πρέπει να είναι η περιοχή αναζήτησης αλλά και πώς θα επιλέγεται η θέση της στη δεύτερη εικόνα; Πώς θα εξασφαλίζεται ότι το εκάστοτε παράθυρο αναφοράς είναι κατάλληλο για τη διαδικασία της συνταύτισης; Τέλος, ποιο είναι το καταλληλότερο μέτρο ομοιότητας, δηλαδή ποιος υπολογισμός θα γίνεται σε κάθε θέση του παραθύρου σύγκρισης, μεταξύ των τιμών των τόνων, ώστε να αποφασίζεται αν είναι το ομόλογο παράθυρο ή όχι; Τα παραπάνω ερωτήματα αποτελούν κρίσιμα σημεία της επιφανειακής συνταύτισης.

Οι διαστάσεις του παραθύρου αναφοράς θα πρέπει να είναι τέτοιες, ώστε να περιγράφεται με σαφήνεια η περιοχή γύρω από την εικονοψηφίδα ενδιαφέροντος. Παράλληλα, δεν θα πρέπει να είναι τόσο μεγάλες που να εισάγουν θόρυβο ή προοπτικές παραμορφώσεις (Καρράς, 2008, Σκαρλάτος, 2006). Επίσης, όσο μεγαλύτερο είναι το παράθυρο τόσο μεγαλύτερος είναι ο υπολογιστικός φόρτος κι άρα και ο χρόνος εκτέλεσης της διαδικασίας.

Το μέγεθος και η θέση της περιοχής αναζήτησης εξαρτώνται από την εκ των προτέρων (*a priori*) γνώση που είναι διαθέσιμη για την σχετική θέση των δύο εικόνων. Έτσι, αν είναι γνωστός ο σχετικός προσανατολισμός των εικόνων τότε μπορεί να γίνει αξιοποίηση της επιπολικής γεωμετρίας κι επομένως η περιοχή αναζήτησης μπορεί να περιοριστεί σε μία «λωρίδα» εκατέρωθεν της ομόλογης επιπολικής γραμμής. Επίσης, αν υπάρχει διαθέσιμη πληροφορία σχετικά με τις αναμενόμενες διαφορές του αναγλύφου του αντικειμένου που απεικονίζεται στις εικόνες, τίθεται ένα όριο και για την *x*-παράλλαξη. Συνεπώς, η περιοχή αναζήτησης

περιορίζεται ακόμα περισσότερο και παίρνει τη μορφή ενός παραλληλογράμμου κατά μήκος της επιπολικής γραμμής (Σκαρλάτος, 2006). Σε περίπτωση που τίποτα από τα παραπάνω δεν είναι γνωστό, θεωρητικά, η περιοχή αναζήτησης είναι ολόκληρη η εικόνα (Καρράς, 2008). Η αναζήτηση του ομόλογου παραθύρου σε όλη την έκταση της εικόνας απαιτεί μεγάλους υπολογιστικούς χρόνους. Στη μείωση των χρόνων αυτών, σημαντική είναι η συνεισφορά της τεχνικής δημιουργίας μίας ιεραρχικής δομής, των «πυραμίδων εικόνας» (Σχήμα 3.2). Οι πυραμίδες εικόνας αποτελούν επίπεδα, πολλαπλών αναλύσεων της ίδιας εικόνας, όπου κάθε ανώτερο (υψηλότερη ανάλυση) επίπεδο προκύπτει από επαναδειγματοληψία του προηγούμενου (χαμηλότερη ανάλυση). Δημιουργείται με αυτόν τον τρόπο μία ιεραρχία από το αδρό στο λεπτομερές. Η τεχνική των πυραμίδων είναι ένας απλός τρόπος για τον προσδιορισμό αρχικών τιμών για τη θέση του παραθύρου αναζήτησης και γενικότερα για τον ταχύτερο προσδιορισμό ομόλογων σημείων (Γεωργόπουλος, 1998). Πρακτικά, η θέση του ζητούμενου ομόλογου εικονοστοιχείου προσεγγίζεται αρχικά στην εικόνα με τη μικρότερη ανάλυση και στη συνέχεια γίνεται μεταφορά στα επόμενα επίπεδα της πυραμίδας. Αποτέλεσμα είναι η σημαντική εξοικονόμηση χρόνου, αφού όπως είναι φανερό η αναζήτηση του σημείου περιορίζεται στο τμήμα κάθε επιπέδου που αντιστοιχεί σε ένα εικονοστοιχείο του προηγούμενου.



Σχήμα 3.2. Πυραμίδες εικόνας

Η επιλογή του παραθύρου αναφοράς θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να εξασφαλίζει πρώτα από όλα την ύπαρξη υψής. Με άλλα λόγια, είναι σχεδόν αδύνατον να βρεθεί το ομόλογο ενός παραθύρου με ομοιόμορφους τόνους (Καρράς, 2008). Επίσης, θα πρέπει το επιλεγμένο παράθυρο να μην αναπαριστά κάποιο από τα επαναλαμβανόμενα μοτίβα, που πιθανώς να απεικονίζονται στις εικόνες. Ακόμα, θα πρέπει να διασφαλίζεται ότι το παράθυρο υπάρχει και στη δεύτερη εικόνα (να μη βρίσκεται σε περιοχές αποκρύψεων) ώστε να μην προκύψει η περίπτωση της αδυναμίας λύσης του προβλήματος. Τέλος, θα πρέπει το παράθυρο

να έχει μεγάλο λόγο ψηφιακού σήματος ως προς το θόρυβο της εικόνας (Signal to Noise Ratio – SNR) αφού όπως αποδεικνύεται, η ακρίβεια της συνταύτισης εξαρτάται σημαντικά από αυτόν (Förstner, 1982).

Το μέτρο ομοιότητας που χρησιμοποιείται προκειμένου να ταυτιστούν τα δύο παράθυρα είναι στην ουσία ένα στατιστικό μέγεθος του οποίου υπολογίζεται η μέγιστη ή η ελάχιστη τιμή. Τέτοια στατιστικά μεγέθη για τις τιμές των τόνων των εικονοστοιχείων μεταξύ των δύο παραθύρων μπορεί να είναι (Γεωργόπουλος 1998, Σκαρλάτος 2006) :

- Το άθροισμα των απόλυτων διαφορών
- Το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών
- Το άθροισμα των γινομένων
- Το άθροισμα των γινομένων ανηγμένων στο μέσο όρο
- Ο συντελεστής συσχέτισης (Cross Correlation)

Τέλος, όπως προαναφέρθηκε, οι συνθήκες φωτισμού κατά τη λήψη των εικόνων επηρεάζουν σημαντικά τη διαδικασία της συνταύτισης. Είναι προφανές, ότι η ραδιομετρία των εικόνων είναι παράγοντας πρωταρχικής σημασίας, ειδικά στην επιφανειακή συνταύτιση όπου οι συγκρινόμενες οντότητες είναι οι τόνοι του γκρι. Αναλυτικότερα, ραδιομετρικές διαφορές μεταξύ των εικόνων, ακόμα και σε κοινές συνθήκες φωτισμού, μπορεί να οφείλονται:

- σε σκιές που δημιουργούνται λόγω των γωνιών στροφής
- σε σκιές που δημιουργούνται λόγω της γεωμετρίας του αντικειμένου
- σε θόρυβο
- σε αποκρύψεις

Έτσι, πριν από την εφαρμογή οποιασδήποτε μεθόδου επιφανειακής συνταύτισης, θα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι οι εικόνες έχουν «κοντινή» ραδιομετρία. Το παραπάνω επιτυγχάνεται μέσω διορθώσεων που εφαρμόζονται στις εικόνες, είτε πριν είτε κατά τη διάρκεια της συνταύτισης (Σκαρλάτος, 2006). Οι διορθώσεις αυτές αφορούν τεχνικές ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνας (Image processing / Image analysis) και συνοψίζονται σε τεχνικές επεξεργασίας ιστογράμματος των εικόνων (ισοστάθμιση, επέκταση ιστογράμματος κ.α.) κι εφαρμογή φίλτρων εξομάλυνσης για την αφαίρεση του θορύβου.

3.2.1 Μέθοδος συντελεστή συσχέτισης

Η μέθοδος του συντελεστή συσχέτισης (Cross correlation) αποτελεί μία από τις συνηθέστερες τεχνικές επιφανειακής συνταύτισης. Το μέτρο ομοιότητας που χρησιμοποιείται είναι ο κανονικοποιημένος συντελεστής συσχέτισης. Αφού επιλεγεί το παράθυρο αναφοράς στην πρώτη εικόνα, υπολογίζεται για κάθε θέση του παραθύρου σύγκρισης, μέσα στην περιοχή αναζήτησης, η συσχέτιση μεταξύ των δύο. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζεται η τιμή της ακόλουθης παράστασης:

$$\rho = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_1 \cdot \sigma_2} = \frac{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I ((g_1(j,i) - \mu_1)(g_2(j,i) - \mu_2))}{\sqrt{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (g_1(j,i) - \mu_1)^2 \cdot \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (g_2(j,i) - \mu_2)^2}} \quad (\text{Εξ. 3.1})$$

όπου:

σ_{12} : η συσχετιστικότητα των δύο παραθύρων

σ_1 : η μεταβλητότητα του παραθύρου αναφοράς

σ_2 : η μεταβλητότητα του παραθύρου σύγκρισης

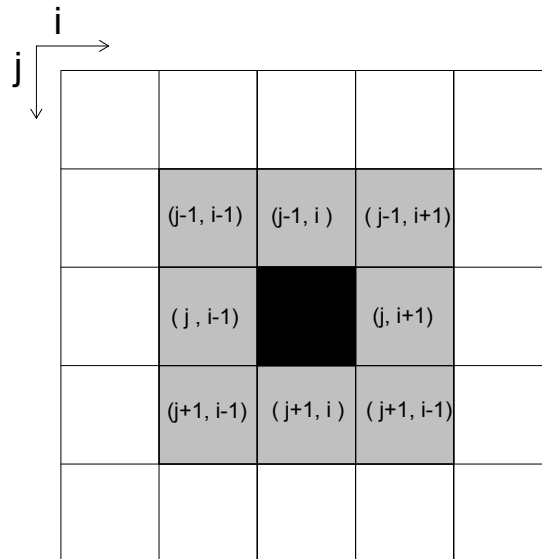
$g_1(j,i)$: η τιμή του τόνου στη θέση (j, i) του παραθύρου αναφοράς

$g_2(j,i)$: η τιμή του τόνου στη θέση (j, i) του παραθύρου σύγκρισης

μ_1 : η μέση τιμή των τόνων στο παράθυρο αναφοράς

μ_2 : η μέση τιμή των τόνων στο παράθυρο σύγκρισης

J, I : οι διαστάσεις των δύο παραθύρων



Σχήμα 3.3. Παράδειγμα τυπικής διάστασης παραθύρου αναφοράς – σύγκρισης

Το πεδίο τιμών της συνάρτησης υπολογισμού του συντελεστή συσχέτισης είναι το διάστημα $[-1,1]$, όπου 1 και -1 σημαίνει ότι τα δύο παράθυρα είναι απόλυτα συσχετισμένα και 0 ότι τα παράθυρα είναι ασυσχέτιστα. Συνεπώς, η επιτυχής εύρεση του ομολογού σημείου σημαίνει θεωρητικά συντελεστή συσχέτισης ίσο με 1. Κάτι τέτοιο, πρακτικά, δεν είναι σύνηθες αφού όπως προαναφέρθηκε, ακόμα και ομολογα παράθυρα εμφανίζουν ραδιομετρικές και γεωμετρικές διαφορές μεταξύ τους. Έτσι στην πράξη, επιλέγεται το παράθυρο σύγκρισης στη θέση του οποίου, μεγιστοποιείται η τιμή του ρ . Προς αποφυγή χονδροειδών σφαλμάτων, κρίνεται αναγκαίος ο ορισμός ενός κατωφλίου που ορίζει ποια είναι η

ελάχιστη αποδεκτή τιμή του συντελεστή συσχέτισης, ώστε να υποδηλώνεται ομολογία μεταξύ των κεντρικών εικονοστοιχείων των δύο παραθύρων. Στην βιβλιογραφία, δεν αναφέρεται μία κοινώς αποδεκτή τιμή για το κατώφλι, αλλά αυτό συνηθίζεται να ορίζεται μεγαλύτερο ή ίσο από 0.7 (αν και αναφέρονται περιπτώσεις όπου υιοθετούνται τιμές για το κατώφλι ίσες με 0.65 ή ακόμα και 0.5). Συγκεκριμένα, αναφέρεται ότι δεν υπάρχει κοινή άποψη μεταξύ των ερευνητών για το πόσο μεγάλος θα πρέπει να είναι ο συντελεστής συσχέτισης, ώστε να υπάρχει αποδεκτή αντιστοιχία, αφού ο καθένας φαίνεται να εφαρμόζει δικά του κριτήρια, ανάλογα με τα δεδομένα που χρησιμοποιεί (Förstner, 1982). Παρατηρείται, ότι όσο πιο περιορισμένη είναι η περιοχή αναζήτησης λόγω ισχυρών γεωμετρικών δεσμεύσεων (π.χ. επιπολική γεωμετρία), τόσο μικρότερη τιμή μπορεί να πάρει το κατώφλι (Καρφής, 2009). Συνοψίζοντας, η εξάρτηση της τιμής του κατωφλίου από τα εκάστοτε δεδομένα αποτελεί ένα από τα μειονεκτήματα της μεθόδου του συντελεστή συσχέτισης αφού περιορίζεται η αντικειμενικότητα των αποτελεσμάτων.

Εξ ορισμού η ακρίβεια της μεθόδου του συντελεστή συσχέτισης είναι της τάξεως της μιας εικονοψηφίδας, αφού ανεξάρτητα με το ποια θα είναι η μέγιστη τιμή του ρ , εκείνο που επιλέγεται τελικώς ως ομόλογο σημείο είναι το κεντρικό εικονοστοιχείο του παραθύρου σύγκρισης. Όμως, σε πολλές εφαρμογές, κυρίως φωτογραμμετρικές, τίθεται η ανάγκη για υποψηφιδική ακρίβεια, αφού σπάνια το ζητούμενο ομόλογο σημείο συμπίπτει με το κέντρο του εικονοστοιχείου. Έτσι, προτείνεται η παρεμβολή μιας μαθηματικής επιφάνειας στις τιμές του συντελεστή συσχέτισης, που υπολογίζονται σε κάθε θέση του παραθύρου σύγκρισης. Το παραπάνω γίνεται κατανοητό, αν οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης που υπολογίζονται για κάθε θέση του παραθύρου σύγκρισης, θεωρηθούν «ύψη» στις κορυφές ενός κανάβου. Παρεμβάλλοντας μία συνεχή επιφάνεια σε αυτές τις τιμές, είναι δυνατός ο προσδιορισμός της μέγιστης τιμής της επιφάνειας, η οποία δεν εμφανίζεται απαραίτητα σε κορυφή του κανάβου. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατόν να προκύψουν δεκαδικές τιμές για τις συντεταγμένες του ομόλογου σημείου, εκτιμώντας το μέγιστο της συνάρτησης της μαθηματικής επιφάνειας. Σημειώνεται, ότι το παραπάνω μεταπίπτει σε μονοδιάστατο πρόβλημα, αν η συνταύτιση λαμβάνει χώρα κατά μήκος μιας επιπολικής γραμμής, οπότε για την υποψηφιδική ακρίβεια αρκεί η παρεμβολή μιας καμπύλης (συνηθίζεται η παρεμβολή μιας παραβολικής καμπύλης) στις τιμές του ρ . Σε κάθε περίπτωση όμως, η εκτίμηση του μέγιστου της συνάρτησης (της επιφάνειας ή της παραβολής) απαιτεί πρώτα τον υπολογισμό των παραμέτρων της. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται μέσω συνόρθωσης των τιμών του συντελεστή συσχέτισης στις διάφορες θέσεις. Η χρήση των ελαχίστων τετραγώνων αναιρεί το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου, που είναι η γρήγορη εφαρμογή. Έτσι, ο συντελεστής συσχέτισης χρησιμοποιείται συνήθως σε εφαρμογές, όπου η ακρίβεια της τάξεως του ενός εικονοστοιχείου είναι επαρκής (Σκαρλάτος, 2006).

Συμπερασματικά, η μέθοδος του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης εμφανίζεται πλεονεκτική ως προς την ταχύτητα και την απλότητα της εφαρμογής της, αφού εκτελείται σε ένα βήμα μέσω ενός απλού υπολογισμού. Το παραπάνω επιτρέπει να ελέγχονται διαδοχικά όλες οι θέσεις μέσα στην περιοχή αναζήτησης κι η επιλογή αρχικών τιμών είναι σαφώς πιο ελαστική. Επίσης, η μέθοδος δίνει καλά αποτελέσματα σε περιπτώσεις εικόνων με ενιαία μεταβολή της φωτεινότητας, αφού όλες οι παράμετροι της συνάρτησης υπολογισμού του ρ είναι ανηγμένες στον μέσο όρο. Από την άλλη πλευρά, ως μειονεκτήματα της μεθόδου αναφέρονται οι πολλαπλές λύσεις (τοπικά μέγιστα της συνάρτησης του ρ) σε περιπτώσεις επαναλαμβανόμενων μοτίβων καθώς και η ευαισθησία της σε θόρυβο και χαμηλή υφή. Επίσης, η μέθοδος αδυνατεί να διαχειριστεί εικόνες με σημαντικές γεωμετρικές παραμορφώσεις (μεγάλες στροφές, μεταβολές στην κλίμακα) και ραδιομετρικές αλλαγές. Αυτό συνιστά τη βασικότερη αδυναμία της, αφού η επίτευξη ακρίβειας στη συνταύτιση απαιτεί την εφαρμογή τεχνικών που μπορούν να λάβουν υπόψη τις παραπάνω διαφορές (Ackerman, 1984). Τέλος, ο Förstner (1982) επισημαίνει ότι η μέθοδος του συντελεστή συσχέτισης, δεν παρέχει κάποιο μέτρο για την αξιολόγηση της «γεωμετρικής» ακρίβειας, δηλαδή την τυπική απόκλιση της θέσης που εντοπίζεται η μέγιστη τιμή του ρ , αφού η επιτυχία της συνταύτισης αξιολογείται μόνο από την τιμή του συντελεστή αυτή κάθε αυτή.

3.2.2 Ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης που προαναφέρθηκαν, ήταν αιτία για περαιτέρω διερεύνηση του προβλήματος της ψηφιακής συνταύτισης, με στόχο την ανάπτυξη αποτελεσματικότερων μεθόδων. Έτσι, στις αρχές της δεκαετίας του 80-90, εμφανίζεται μία νέα μέθοδος που ονομάζεται ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση (Least squares matching) (Förstner, 1982, Ackermann, 1984, Grün, 1985). Η ελαχιστοτετραγωνική μέθοδος είναι εξ ορισμού μία επαναληπτική μέθοδος και το μέτρο ομοιότητας που χρησιμοποιείται είναι το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών των τόνων, το οποίο και πρέπει να ελαχιστοποιηθεί. Επομένως, οντότητα της ψηφιακής συνταύτισης είναι και πάλι οι τιμές των γκριζων τόνων ενώ βασική διαφορά με τη μέθοδο του συντελεστή συσχέτισης είναι ότι τώρα επιβάλλονται γεωμετρικές διορθώσεις στο παράθυρο σύγκρισης. Αναλυτικότερα, το τελευταίο δεν αλλάζει απλώς θέση μέσα στην περιοχή αναζήτησης, αλλά έχει τη δυνατότητα να αλλάζει και σχήμα. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να λαμβάνονται υπόψη οι γεωμετρικές διαφορές μεταξύ των δύο εικόνων που οφείλονται σε προοπτικές παραμορφώσεις.

Αναλυτικότερα, το τετράγωνο παράθυρο αναφοράς στην πρώτη εικόνα, θα απεικονίζεται ως ένα τετράπλευρο στη δεύτερη. Αν θεωρηθεί ότι το ανάγλυφο του αντικειμένου που απεικονίζεται στην εικόνα, αποτελείται

από πολλές μικρές επίπεδες έδρες, τότε το παράθυρο αναφοράς θα απεικονίζει μία τέτοια επίπεδη επιφάνεια (Grün, 1985). Πιο απλά, ακόμα κι αν το αντικείμενο, που απεικονίζεται στην εικόνα, δεν είναι επίπεδο, εξασφαλίζεται ότι το παράθυρο αναφοράς απεικονίζει τμήμα του αντικειμένου που είναι επίπεδο, αφού οι διαστάσεις του προτύπου είναι πολύ μικρότερες από αυτές της εικόνας. Η σχέση μεταξύ των δύο επιπέδων παραθύρων περιγράφεται μέσω ενός προβολικού μετασχηματισμού (8 παράμετροι). Επίσης, η μικρή διάσταση του προτύπου σε σχέση με τη διάσταση της εικόνας, επιτρέπει να θεωρηθεί ότι οι ακτίνες που περιγράφουν αυτήν την μικρή επιφάνεια είναι παράλληλες (αφού η δέσμη των ακτίνων είναι πολύ «στενή») (Grün, 1985). Επομένως, η γεωμετρική σχέση μεταξύ των δύο παραθύρων μπορεί να περιγραφεί απλούστερα και από έναν αφινικό μετασχηματισμό (6 παράμετροι).

Επιπλέον, η ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση επιβάλλει και ραδιομετρικές διορθώσεις μεταξύ των δύο παραθύρων. Ειδικότερα, επιβάλλεται μία ραδιομετρική μετάθεση, δηλαδή ενιαία αλλαγή στη φωτεινότητα της εικόνας και μία κλίμακα, δηλαδή αλλαγή στην αντίθεση της εικόνας.

Έτσι, αν θεωρηθεί ότι:

$f(x, y)$: η συνάρτηση των τόνων του παραθύρου αναφοράς

$g(x, y)$: η συνάρτηση των τόνων του παραθύρου σύγκρισης

$e(x, y)$: η συνάρτηση του θορύβου

τότε το ζητούμενο της συνταύτισης είναι ο υπολογισμός της θέσης (x, y) για την οποία επαληθεύεται η ισότητα:

$$f(x, y) = g(x, y) + e(x, y) \quad (\text{Εξ. 3.2})$$

Το μοντέλο της ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης περιγράφεται από έναν αφινικό T_A κι ένα ραδιομετρικό T_R μετασχηματισμό ως εξής:

$$f(x, y) = g[T_A(x, y)] \Rightarrow \quad (\text{Εξ. 3.3})$$

$$\begin{bmatrix} x_g \\ y_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} x_g = a_{11} \cdot x_f + a_{12} \cdot y_f + a_1 \\ y_g = a_{21} \cdot x_f + a_{22} \cdot y_f + a_2 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} f(x, y) &= g[T_R(x, y)] \Rightarrow \\ f(x, y) &= b + c \cdot g(x, y) \end{aligned} \quad (\text{Εξ. 3.4})$$

Συνεπώς, συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις, η εξίσωση παρατήρησης της συνόρθωσης που εκτελείται κατά την ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση είναι η ακόλουθη:

$$f(x, y) - e(x, y) = b + c \cdot g(a_{11} \cdot x + a_{12} \cdot y + a_1, a_{21} \cdot x + a_{22} \cdot y + a_2) \quad (\text{Εξ.3.5})$$

Επομένως, αρκεί να υπολογιστούν οι παράμετροι των δύο μετασχηματισμών έτσι ώστε να ικανοποιείται η ισότητα της εξίσωσης 3.2. Η εξίσωση 3.5 δεν είναι γραμμική ως προς τους αγνώστους και συνεπώς απαιτείται η ανάπτυξη της κατά Taylor περί τις προσωρινές τιμές. Τελικώς, η γραμμικοποιημένη εξίσωση θα είναι η ακόλουθη:

$$\begin{aligned} f(x, y) - e(x, y) = & g^o(x, y) + \partial b + g^o(x, y) \cdot \partial c + \\ & + g_x(x, y) \cdot \partial a_1 + x^o \cdot g_x(x, y) \cdot \partial a_{11} + y^o \cdot g_x(x, y) \cdot \partial a_{12} + \\ & + g_y(x, y) \cdot \partial a_2 + x^o \cdot g_y(x, y) \cdot \partial a_{21} + y^o \cdot g_y(x, y) \cdot \partial a_{22} \end{aligned} \quad (\text{Εξ.3.6})$$

όπου:

$g_x(x, y) = \frac{\partial g(x, y)}{\partial x} \approx \frac{1}{2}(g(x+1, y) - g(x-1, y))$: η κλίση της εικόνας κατά τη διεύθυνση x και,

$g_y(x, y) = \frac{\partial g(x, y)}{\partial y} \approx \frac{1}{2}(g(x, y+1) - g(x, y-1))$: η κλίση της εικόνας κατά τη διεύθυνση y.

Αρχικές τιμές για τους αγνώστους ορίζονται ως εξής:

$$(b, c)^o = (0, 1)$$

$$(a_1, a_{12}, a_2, a_{21})^o = 0$$

$$(a_{11}, a_{22})^o = 1$$

ενώ η αρχική προσέγγιση της ομολογής θέσης είναι δυνατόν να προσδιοριστεί με τη μέθοδο του συντελεστή συσχέτισης.

Σε κάθε επανάληψη υπολογίζονται διορθώσεις για τις παραμέτρους των μετασχηματισμών και στη συνέχεια προκύπτουν οι νέες συντεταγμένες για τις κορυφές του παραθύρου σύγκρισης. Είναι προφανές ότι οι συντεταγμένες αυτές είναι δεκαδικής μορφής κι άρα η εφαρμογή της μεθόδου της ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης καταλήγει στον προσδιορισμό της θέσης του ομολογού σημείου με υποψηφιακή ακρίβεια. Βέβαια ο προσδιορισμός της απαιτεί τη σύγκλιση του συστήματος η οποία είναι ταχύτατη εφόσον υπάρχει αρκετό σήμα, καλές

αρχικές τιμές και δεν παρουσιάζονται τοπικά ελάχιστα (Σκαρλάτος, 2006).

3.2.3 Συνταύτιση πολλαπλών εικόνων

Μολονότι στην αρχή του κεφαλαίου, η ψηφιακή συνταύτιση ορίστηκε ως διαδικασία που εφαρμόζεται σε δύο ή περισσότερες επικαλυπτόμενες εικόνες, μέχρι το σημείο αυτό, οι μέθοδοι που περιγράφηκαν αφορούσαν ζεύγη εικόνων. Η έννοια της συνταύτισης, ως διαδικασία που εφαρμόζεται μεταξύ πολλαπλών εικόνων (Multiphoto matching / correlation), εισάγεται από τον Grün το 1985 και αναλύεται σε βάθος λίγα χρόνια αργότερα (Baltsavias, 1991). Η μέθοδος που προτείνεται αναφέρεται ως συνταύτιση πολλαπλών εικόνων με την επιβολή γεωμετρικών δεσμεύσεων (Multiphoto geometrically constrained matching, MPGC) και δίνει τη δυνατότητα για ισχυρότερες λύσεις του προβλήματος της συνταύτισης, αυξάνοντας την ακρίβεια και την αξιοπιστία. Αποτελεί μία επέκταση της ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης και συνεπώς πρόκειται για μία ακόμα επιφανειακή μέθοδο. Η MPGC βελτιώνει την τελευταία εισάγοντας δύο νέα στοιχεία. Τα νέα στοιχεία της μεθόδου είναι η χρήση περισσότερων από δύο εικόνων και η αξιοποίηση εξωτερικής γεωμετρικής πληροφορίας ώστε να δεσμευτεί η λύση. Επισημαίνεται ότι η μέθοδος μπορεί να διαχειριστεί τις εικόνες διαδοχικά, ως ζευγάρια ή ταυτόχρονα, στο πλαίσιο μιας ενιαίας επίλυσης. Η δεύτερη περίπτωση αποδεικνύεται πλεονεκτικότερη αφού μπορεί να υποστηριχτεί από την επιβολή εξωτερικών δεσμεύσεων (Grün, 1985).

Αναλυτικότερα, το μαθηματικό μοντέλο της μεθόδου συνιστά μία συνδυαστική επίλυση των ελαχίστων τετραγώνων. Οι εξισώσεις παρατήρησης που χρησιμοποιούνται είναι αυτές που απορρέουν από την συνταύτιση όμοιων τόνων του γκρι και αυτές που εκφράζουν τις γεωμετρικές δεσμεύσεις. Οι δύο ομάδες των εξισώσεων παρατήρησης συνδέονται μεταξύ τους μέσω κοινών αγνώστων, των εικονοσυντεταγμένων των ομολογών σημείων. Η γεωμετρική δέσμευση που επιβάλλεται στην επίλυση είναι αυτή που εκφράζεται μαθηματικά μέσω της συνθήκης της συγγραμμικότητας. Η τελευταία επεκτείνεται με την χρήση πρόσθετων παραμέτρων για την μοντελοποίηση συστηματικών σφαλμάτων. Είναι προφανές ότι η χρήση της συνθήκης συγγραμμικότητας επιβάλλει να είναι γνωστοί οι προσανατολισμοί των εικόνων, εσωτερικός και εξωτερικός. Επίσης, η μέθοδος χρησιμοποιεί μετρήσεις εικονοσυντεταγμένων και τρισδιάστατων συντεταγμένων, συνδυάζοντας το χώρο της εικόνας με αυτόν του αντικειμένου. Επομένως, είναι δυνατός ο ταυτόχρονος προσδιορισμός των καλύτερων τιμών και των δύο μετά τη συνόρθωση κι άρα η μέθοδος χρησιμοποιείται και για την εξαγωγή τρισδιάστατης πληροφορίας.

Η μέθοδος βελτιώνει θεαματικά τα αποτελέσματα της συνταύτισης σε περιπτώσεις όπου εντοπίζονται «σκοτεινές περιοχές» σε μία ή περισσότερες εικόνες (Σκαρλάτος, 2006). Αυτό οφείλεται στο ότι εικόνες

με περισσότερη πληροφορία υποστηρίζουν άλλες με χαμηλότερη ποιότητα. Έτσι υπολογίζονται ισχυρότερες λύσεις αφού περιορίζεται ο κίνδυνος μη σύγκλισης του αλγορίθμου ή σύγκλισης σε λάθος σημείο λόγω αποκρύψεων. Επίσης, ακόμα και στις περιπτώσεις που δεν υπάρχουν αποκρύψεις, είναι σαφές ότι η δυνατότητα μέτρησης περισσότερων εικονοσυντεταγμένων (μετρήσεις σε πολλές εικόνες) συμβάλλει θετικά στην ακρίβεια του τελικού προσδιορισμού της θέσης του ομόλογου σημείου.

Τέλος, ο αλγόριθμος φαίνεται να έχει εφαρμογή κυρίως σε περιπτώσεις επίγειων λήψεων για δύο λόγους: αφενός στις περιπτώσεις αυτές είναι ευκολότερη και οικονομικότερη η λήψη πολλών εικόνων σε σχέση με τις περιπτώσεις αεροφωτογράφισης κι αφετέρου η φύση των αντικειμένων κι η γεωμετρία των ίδιων των λήψεων οδηγούν σε μεγαλύτερες αποκρύψεις και εικόνες χαμηλής υφής.

3.3. Συνταύτιση Χαρακτηριστικών

Αντικείμενο της παραγράφου αυτής είναι η περιγραφή των βασικών στοιχείων και μεθόδων της συνταύτισης χαρακτηριστικών (Feature based matching, FBM). Ειδοποιός διαφορά μεταξύ αυτής και της επιφανειακής συνταύτισης, είναι το είδος της πληροφορίας που διαχειρίζεται η κάθε μία. Έτσι, η συνταύτιση χαρακτηριστικών αφορά οντότητες (σημεία, γραμμές, επιφάνειες) που οφείλουν να πληρούν ορισμένες προδιαγραφές σε σχέση με το γειτονικό τους περιβάλλον ενώ η επιφανειακή συνταύτιση βασίζεται αποκλειστικά και μόνο στους τόνους της εικόνας. Συνεπεία αυτού, η συνταύτιση χαρακτηριστικών, κατά κάποιο τρόπο, λαμβάνει υπόψη την πληροφορία της δομής του χώρου με αποτέλεσμα να είναι πιο αξιόπιστη.

Η συνταύτιση χαρακτηριστικών εμφανίζεται πλεονεκτικότερη έναντι της επιφανειακής ως προς το πλήθος των εφαρμογών στις οποίες μπορεί να λάβει μέρος (object recognition, pattern recognition) ενώ παράλληλα είναι λιγότερο ευαίσθητη στις ραδιομετρικές και γεωμετρικές διαφορές των εικόνων. Επιπρόσθετα, η συνταύτιση χαρακτηριστικών υπερτερεί της ελαχιστοτετραγωνικής λόγω των υψηλών απαιτήσεων της τελευταίας για καλές αρχικές τιμές.

Η συνταύτιση χαρακτηριστικών εκτελείται σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο αφορά την εξαγωγή των χαρακτηριστικών σε κάθε μία εικόνα ξεχωριστά. Τα χαρακτηριστικά που εξάγονται, συνοδεύονται από ορισμένες περιγραφικές ιδιότητες (attributes). Οι ιδιότητες αυτές μπορεί να είναι ο προσανατολισμός ή η καμπυλότητα για γραμμικά στοιχεία, η κλίση της συνάρτησης έντασης του τόνου γύρω από σημεία και η μέση φωτεινότητα ή το μέγεθος για επιφάνειες (Καρράς, 2008). Σε κάθε περίπτωση όμως, τόσο τα χαρακτηριστικά όσο κι οι ιδιότητές τους, θα πρέπει να πληρούν ορισμένες προϋποθέσεις ώστε να γίνουν αποδεκτά, οι

οποίες θα αναφερθούν στη συνέχεια. Στο δεύτερο στάδιο, γίνεται συνταύτιση των χαρακτηριστικών υπολογίζοντας ένα μέτρο ομοιότητας μεταξύ των ιδιοτήτων τους. Το τελευταίο συνιστά ένα ακόμα πλεονέκτημα της συνταύτισης χαρακτηριστικών, αφού η αναζήτηση ομολογιών περιορίζεται σε δύο λίστες περιγραφικών χαρακτηριστικών και δεν γίνεται σε όλη την εικόνα. Αυτό συνεπάγεται μεγάλη μείωση της πληροφορίας που διαχειρίζεται ο εκάστοτε αλγόριθμος κι άρα μείωση του απαιτούμενου χρόνου (Förstner, 1986). Τα δύο στάδια σχετίζονται άμεσα μεταξύ τους υπό την έννοια ότι η επιλογή των χαρακτηριστικών και των ιδιοτήτων τους, θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε στη συνέχεια, η εύρεση των ομολογιών να είναι εύκολη, γρήγορη και ακριβής. Συγκεκριμένα, όσα περισσότερα περιγραφικά χαρακτηριστικά υπολογίζονται, υπό τον όρο ότι είναι ασυσχέτιστα μεταξύ τους, τόσο ευκολότερη είναι η διεξαγωγή του δεύτερου σταδίου (Baltsavias, 1991).

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι συχνά το δεύτερο στάδιο της συνταύτισης φαίνεται να διαχωρίζεται σε δύο επιμέρους φάσεις. Έτσι, αφού έχουν εξαχθεί τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητές τους, γίνεται μία προκαταρκτική αντιστοίχιση μεταξύ τους στη βάση ενός μέτρου ομοιότητας. Αυτή η διαδικασία συνεπάγεται περαιτέρω μείωση της πληροφορίας αφού μετά την ολοκλήρωσή της, το κάθε χαρακτηριστικό συνοδεύεται μόνο από τη θέση του και το βάρος της αντιστοίχισής του με ένα άλλο χαρακτηριστικό (αντί της πλήρους λίστας των ιδιοτήτων του). Στη δεύτερη φάση οι ομολογίες των χαρακτηριστικών αξιολογούνται ως προς την συνέπειά τους (consistency) σε ένα μοντέλο (τριδιάστατο μοντέλο αντικειμένου ή μοντέλο που περιγράφει τη σχέση μεταξύ των δύο εικόνων).

Τα χαρακτηριστικά και οι περιγραφικές τους ιδιότητες θα πρέπει να πληρούν τις ακόλουθες προϋποθέσεις (Förstner, 1986, Baltsavias, 1991, Remondino, 2006):

- Ευκρίνεια (Distinctness): να είναι σαφώς ορισμένα και να διαχωρίζονται από τα γειτονικά τους.
- Σπανιότητα (Seldomness): να είναι να είναι μοναδικά ή σπάνια σε σχέση με όλη την εικόνα. Η προϋπόθεση αυτή διαφοροποιείται από την προηγούμενη διότι εξασφαλίζει σαφή ορισμό των χαρακτηριστικών στο σύνολο της εικόνας κι όχι μόνο στην «γειτονιά» του καθενός. Αποκτά δε, μεγάλη σημασία σε περιπτώσεις εικόνων με επαναλαμβανόμενα πρότυπα.
- Σταθερότητα (Stability): να είναι όσο το δυνατό λιγότερο ευαίσθητα απέναντι στο θόρυβο και να αναμένεται να εμφανίζονται σε όσο το δυνατό περισσότερες εικόνες.
- Ανεξαρτησία (Invariance): να διατηρούνται αναλλοίωτα σε γεωμετρικές και ραδιομετρικές μεταβολές.
- Ερμηνεία (Interpretability): να επιδέχονται φυσική ερμηνεία π.χ. ένα σημείο που προκύπτει ως μέγιστο στη συνάρτηση έντασης της εικόνας δεν είναι απαραίτητο να αποτελεί και φυσικό σημείο αλλά μπορεί να είναι θόρυβος. Η ιδιότητα αυτή αποκτά μεγάλη

σημασία σε εφαρμογές ανάλυσης εικόνας (image analysis) και αναγνώρισης αντικειμένων (object recognition).

- Πυκνότητα (Density): να είναι τέτοιο το πλήθος τους και η κατανομή τους ώστε να είναι δυνατή η εύρεση ομολογιών στο δεύτερο στάδιο.
- Ακρίβεια (Precision): να είναι προσδιορισμένη με ακρίβεια η θέση τους πάνω στην εικόνα.
- Ταχύτητα (Speed): να είναι γρήγορη η εξαγωγή τους.

Στη διεθνή βιβλιογραφία μπορεί κανείς να βρει πλήθος αλγορίθμων για την εξαγωγή και την συνταύτιση σημειακών, γραμμικών και επιφανειακών οντοτήτων. Ο Baltasvias (1991) κάνει μία εκτενή αναφορά στις μεθόδους συνταύτισης χαρακτηριστικών που έχουν προταθεί κατά καιρούς. Στις φωτογραμμετρικές εφαρμογές ζητείται συνήθως η εύρεση ομολογιών σημείων μεταξύ διαφορετικών εικόνων. Έτσι, στο πλαίσιο αυτής της εργασίας και δεδομένων των πρακτικών αναγκών του αλγορίθμου που σχεδιάστηκε, όσα ακολουθούν σχετικά με τη συνταύτιση χαρακτηριστικών, αναφέρονται σε σημειακές οντότητες.

Για να είναι δυνατή η κατανόηση αλγορίθμων που αφορούν τη συνταύτιση σημειακών χαρακτηριστικών μεταξύ των εικόνων, θα πρέπει πρώτα να διευκρινιστεί η έννοια του «σημείου». Δεδομένου του ορισμού του σημείου από τη γεωμετρία, στο χώρο της ψηφιακής εικόνας ως σημείο μπορεί να θεωρηθεί κάθε ένα εικονοστοιχείο, παρά το γεγονός ότι έχει διαστάσεις, αφού αυτό είναι η μικρότερη διακριτή οντότητα. Όμως, η παραπάνω θεώρηση δημιουργεί προβλήματα στη διαδικασία της συνταύτισης αφού, όπως προαναφέρθηκε, είναι πρακτικά αδύνατον να εντοπιστούν ομολογίες μεταξύ μεμονωμένων εικονοστοιχείων. Έτσι, για να είναι δυνατή η συνταύτιση θα πρέπει ως σημείο να μην λαμβάνεται ένα μόνο εικονοστοιχείο αλλά μία ευρύτερη περιοχή γύρω από αυτό (ένα παράθυρο) ώστε να είναι διαθέσιμη περισσότερη πληροφορία και να πληρούνται οι προϋποθέσεις που τέθηκαν παραπάνω.

Τα σημειακά χαρακτηριστικά αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως σημεία ενδιαφέροντος (interest points, corners). Τα σημεία ενδιαφέροντος εξάγονται από την κάθε εικόνα στο πρώτο στάδιο της συνταύτισης χαρακτηριστικών, με την εφαρμογή σημειακών τελεστών ανίχνευσης (local / interest operators). Στη βιβλιογραφία αναφέρεται πλήθος σημειακών τελεστών οι οποίοι διαφέρουν ως προς τις μαθηματικές ποσότητες που υπολογίζουν προκειμένου να εντοπίσουν ένα σημείο. Ο Σκαρλάτος (2006) αναφέρει ως κυριότερους τελεστές τους Moravec (1977), Förstner (1986) Harris (1988), η λειτουργία των οποίων παρουσιάζεται αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο. Η ύπαρξη πολλών διαφορετικών τελεστών οδήγησε στην ανάγκη σύγκρισης και αξιολόγησης των αποτελεσμάτων τους. Εκτενείς αναφορές στην ύπαρξη σημειακών τελεστών και συγκρίσεις των δυνατοτήτων τους, έχουν γίνει από αρκετούς ερευνητές (Schmid, Mohr & Bauckhage, 2000, Remondino, 2006). Οι πρώτοι εστιάζουν στην επαναληπτικότητα (repeatability) και την ποιότητα του περιεχομένου των σημείων που εξάγονται, ενώ ο δεύτερος στην

ακρίβεια της θέσης και στην πυκνότητα των σημείων, ελέγχοντας την συνέπεια των τελικών ομολογιών στο μοντέλο του σχετικού προσανατολισμού. Τα χαρακτηριστικά σημεία συνοδεύονται από το διάνυσμα των περιγραφικών ιδιοτήτων τους. Οι ιδιότητες αυτές υπολογίζονται μέσα σε μια ορθογώνια ή κυκλική περιοχή που προσαρμόζεται γύρω από τα σημεία, λαμβάνοντας υπόψη επιλεγμένες ή και όλες τις διευθύνσεις (Baltsavias, 1991).

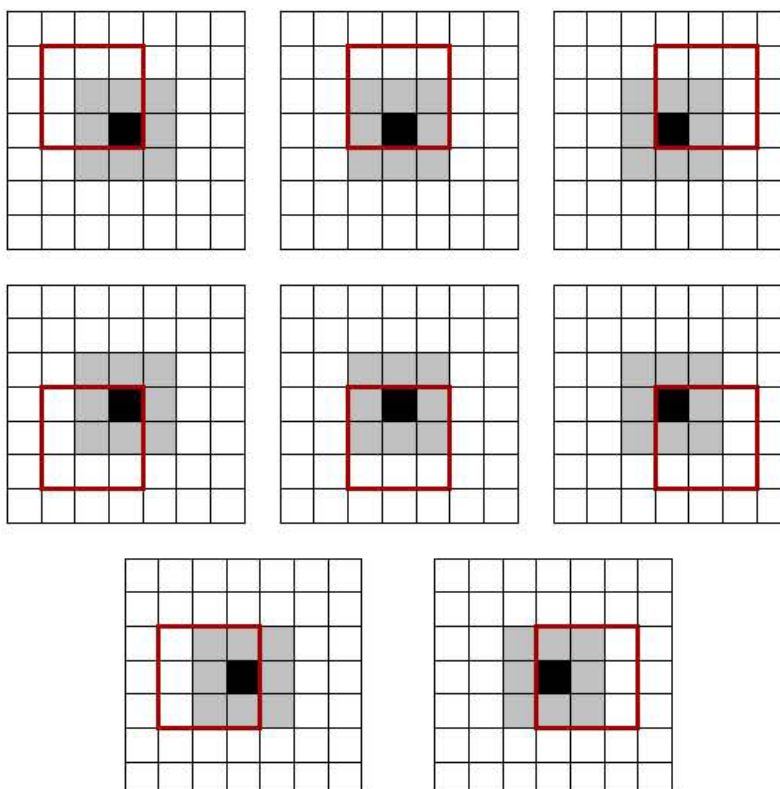
Το ολοένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για την εξαγωγή χαρακτηριστικών με την ιδιότητα να παραμένουν αμετάβλητα σε γεωμετρικές και ραδιομετρικές παραμορφώσεις, οδήγησε στην ανάπτυξη μεθόδων που στοχεύουν στην εξαγωγή περιοχών της εικόνας που διατηρούνται αναλλοίωτες υπό την επίδραση μετασχηματισμών (affine invariant – scale invariant regions). Η λογική των μεθόδων αυτών είναι η ακόλουθη: αρχικά εξάγονται σημεία με εφαρμογή κάποιου τελεστή και στη συνέχεια προσαρμόζεται γύρω από αυτά μία ελλειπτική, συνήθως, περιοχή που φέρει τις παραπάνω ιδιότητες. Ο Lowe (2004) πετυχαίνει την εξαγωγή περιοχών της εικόνας που διατηρούνται αναλλοίωτες σε μεταβολές κλίμακας εφαρμόζοντας φίλτρα εξομάλυνσης Gauss, με διαφορετική τυπική απόκλιση, και στη συνέχεια αφαιρώντας τα διαφορετικά επίπεδα της εικόνας μεταξύ τους. Αντίστοιχα, οι Tuytelaars και Van Gool (2004) προτείνουν δύο μεθόδους προκειμένου να εξαχθούν περιοχές της εικόνας που διατηρούνται αναλλοίωτες σε γεωμετρικές και ραδιομετρικές μεταβολές. Η πρώτη μέθοδος χαρακτηρίζεται γεωμετρική (Geometry – based method) και βασίζεται στον εντοπισμό σημείων με τη χρήση του τελεστή Harris και γραμμών (ευθείες ή καμπύλες) που διέρχονται από αυτά, μέσω ενός τελεστή ανίχνευσης ακμών (Canny edge detector). Η δεύτερη μέθοδος (Intensity – based method) εντοπίζει σημεία ως ακρότατα της συνάρτησης έντασης της εικόνας. Στη συνέχεια ορίζει μία ελλειπτική περιοχή γύρω από αυτά και μελετά τη συνάρτηση έντασης κατά μήκος ακτίνων που ξεκινούν από τα σημεία και βρίσκονται μέσα στην περιοχή.

Η συνταύτιση μεταξύ των χαρακτηριστικών, γίνεται με τον υπολογισμό της ομοιότητας μεταξύ των ιδιοτήτων τους. Μέτρα ομοιότητας που έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως είναι η ευκλείδεια απόσταση (Lowe, 2004) ή η απόσταση Mahalanobis (Tuytelaars & Van Gool, 2004), καθώς και ο συντελεστής συσχέτισης (Förstner, 1986). Τελικώς, οι ομολογίες των χαρακτηριστικών, συχνά, ελέγχονται ως προς τη συνέπειά τους στο μοντέλο της επιπολικής γεωμετρίας (Shragai et al., 2004, Läbe & Förstner, 2006) εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο ανίχνευσης χονδροειδών σφαλμάτων RANSAC (Fischler & Bolles, 1981). Εναλλακτικά, έχει προταθεί ο έλεγχος συνέπειας χαρακτηριστικών περιοχών στο μοντέλο του αφινικού μετασχηματισμού (Tuytelaars & Van Gool, 2004), δεδομένου ότι οι περιοχές που εξάγονται είναι πολύ μικρών διαστάσεων κι άρα μπορούν να θεωρηθούν επίπεδες.

3.3.1 Σημειακοί τελεστές

3.3.1.1 Τελεστής Moravec

Ο Moravec (1977, 1979) εισάγει για πρώτη φορά την έννοια των σημείων ενδιαφέροντος (interest points). Παρουσιάζει ένα σημειακό τελεστή που υπολογίζει τις μεταβολές της έντασης των τόνων στις τέσσερις κύριες διευθύνσεις που ορίζονται γύρω από μία εικονοψηφίδα, ώστε να διαπιστώσει αν πρόκειται για σημειακό χαρακτηριστικό ή όχι. Αναλυτικότερα, η λειτουργία του τελεστή βασίζεται στον ορισμό ενός παραθύρου γύρω από την εικονοψηφίδα που εξετάζεται, για το αν αποτελεί σημείο ενδιαφέροντος ή όχι. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι μεταβολές της έντασης του τόνου σε κάθε μία διεύθυνση μετατοπίζοντας το παράθυρο διαδοχικά. Στο σχήμα 3.4 φαίνεται η εικονοψηφίδα που εξετάζεται από τον τελεστή (μαύρο χρώμα) και η γειτονιά των εικονοστοιχείων που ορίζουν το πρότυπο που την περιβάλλει (παραθύρο με γκρι χρώμα). Με κόκκινο περίγραμμα απεικονίζονται οι θέσεις του παραθύρου μετά από διαδοχικές μεταθέσεις, μία μετάθεση προς κάθε μία φορά που ορίζουν οι τέσσερις κύριες διευθύνσεις. Έτσι, ο υπολογισμός της μεταβολής της έντασης γίνεται σε οκτώ διαφορετικές θέσεις.



Σχήμα 3.4. Η λειτουργία του τελεστή Moravec

Για κάθε μία φορά υπολογίζεται η μεταβολή της έντασης ως εξής:

$$E_k = \sum_{i=1}^n (w_i - I_i)^2 \quad (\text{Εξ. 3.7})$$

όπου,

$$k = 1 \div 8$$

i : το πλήθος των εικονοστοιχείων του παραθύρου

w_i : η τιμή της έντασης κάθε εικονοστοιχείου του προτύπου

I_i : η τιμή της έντασης κάθε εικονοστοιχείου του μετατεθειμένου παραθύρου

Από την παραπάνω σχέση είναι προφανές ότι για κάθε ένα σημείο, υπολογίζονται οκτώ διαφορετικές ποσότητες. Οι ποσότητες αυτές μάλιστα, δεν είναι απαραίτητο να έχουν ίδιες ή παρόμοιες τιμές, αφού η ένταση του τόνου μπορεί να μη μεταβάλλεται με τον ίδιο ρυθμό προς όλες τις διευθύνσεις. Έτσι, τίθεται το ζήτημα ορισμού ενός μέτρου από τις οκτώ αυτές ποσότητες, που θα καθορίζει αν ένα εικονοστοιχείο είναι σημείο ή όχι. Ο αλγόριθμος του Moravec επιλέγει ως μέτρο την ελάχιστη μεταβολή έντασης που υπολογίστηκε, δηλαδή το $\min(E_k)$. Το μέτρο αυτό ονομάζεται γωνιακότητα C της εικονοψηφίδας (Καρφής, 2009). Κάθε εικονοστοιχείο χαρακτηρίζεται από την τιμή αυτή κι έτσι δημιουργείται ένας χάρτης γωνιακότητας της εικόνας με τιμές:

$$C(x, y) = \min(E_k(x, y)) \quad (\text{Εξ. 3.8})$$

Επόμενο βήμα είναι ο έλεγχος της τιμής του C, ώστε να διαπιστωθεί αν η μεταβολή της έντασης είναι αρκετή για να χαρακτηριστεί το εικονοστοιχείο ως σημείο ενδιαφέροντος. Για το σκοπό αυτό εφαρμόζεται η τεχνική της κατωφλίωσης στο χάρτη γωνιακότητας, ορίζοντας ένα κατώφλι. Έτσι, όσα εικονοστοιχεία έχουν τιμή γωνιακότητας μεγαλύτερη του κατωφλίου χαρακτηρίζονται ως σημεία. Όμως, για να είναι μια εικονοψηφίδα πραγματικό σημείο ενδιαφέροντος (κι όχι θόρυβος της εικόνας) δεν αρκεί να αρκεί να εμφανίζει υψηλή τιμή γωνιακότητας αλλά θα πρέπει να συμβαίνει το ίδιο και στα γειτονικά του σημεία. Το παραπάνω οφείλεται στο ότι οι ψηφιακές εικόνες αναπαριστούν σε διακριτές θέσεις το συνεχές χώρο των τόνων του αντικειμένου (Καρφής, 2009). Για να αντιμετωπιστεί το παραπάνω κι άρα να εξαχθούν τελικώς μόνο τα πραγματικά σημεία από την εικόνα, εφαρμόζεται μία τεχνική αφαίρεσης των μη πραγματικών μεγίστων από το χάρτη γωνιακότητας (non maximal suppression). Αναλυτικότερα, εντοπίζονται οι περιοχές του χάρτη που εμφανίζουν μη μηδενικές τιμές και σε αυτές θεωρείται ότι υπάρχει σημείο ενδιαφέροντος. Ο προσδιορισμός της θέσης του σημείου γίνεται επιλέγοντας την εικονοψηφίδα που έχει τη μέγιστη τιμή του C μεταξύ των γειτονικών. Αντίστοιχα, μεμονωμένες εικονοψηφίδες με μη μηδενικές τιμές του C (isolated pixels), απορρίπτονται και δεν εξαγονται ως σημεία.

Η λειτουργία του τελεστή Moravec έχει ορισμένα μειονεκτήματα. Καταρχάς, ο χάρτης γωνιακότητας της εικόνας εξαρτάται από το σύστημα αναφοράς των συντεταγμένων της. Αυτό συμβαίνει γιατί οι μεταβολές της έντασης υπολογίζονται σε οκτώ συγκεκριμένες διευθύνσεις κι όχι σε όλες. Επομένως, αν η εικόνα στραφεί τότε θα υπολογιστούν διαφορετικές τιμές μεταβολής της έντασης κι άρα τα εξαγόμενα σημεία δεν θα είναι τα ίδια. Το παραπάνω δημιουργεί σημαντικό πρόβλημα στη διαδικασία της συνταύτισης, όπου τα ζεύγη των εικόνων έχουν σχετικές στροφές μεταξύ τους κι άρα η εφαρμογή του τελεστή σε κάθε μία εικόνα ξεχωριστά θα οδηγήσει στην εξαγωγή διαφορετικών σημείων. Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα είναι η συμπεριφορά του τελεστή σε εικόνες με θόρυβο. Παρά την τεχνική αφαίρεσης των μεμονωμένων μεγίστων από το χάρτη της εικόνας που περιγράφηκε παραπάνω, η εφαρμογή του τελεστή Moravec μπορεί να οδηγήσει στην εξαγωγή σημείων που αντιστοιχούν σε θόρυβο κι άρα σε προβλήματα στη διαδικασία της συνταύτισης. Τέλος, ο τελεστής παρουσιάζει ευαισθησία σε περιπτώσεις ακμών. Η μεταβολή της έντασης του τόνου είναι μεγάλη στην διεύθυνση που είναι κάθετη σε αυτή της ακμής ενώ είναι μικρή κατά μήκος της. Έτσι, υπάρχει περίπτωση για δεδομένο σύστημα αναφοράς της εικόνας και για ορισμένους προσανατολισμούς των ακμών, να εξαχθούν ως χαρακτηριστικά σημεία, σημεία κατά μήκος ακμών.

3.3.1.2 Τελεστής Förstner

Ο τελεστής Förstner (1986) αναπτύχθηκε με στόχο την εξαγωγή σημείων κατάλληλων για αυτόματη συνταύτιση μέσω του συντελεστή συσχέτισης ή της ελαχιστοτετραγωνικής μεθόδου. Γενικά, κατάλληλα θεωρούνται τα σημεία που έχουν κυκλικό σχήμα και παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές έντασης από τα γειτονικά τους. Για το λόγο αυτό, η λειτουργία του τελεστή βασίζεται στον υπολογισμό των μεταβολών της έντασης σε ορισμένες διευθύνσεις περί του σημείου και στην ανάπτυξη ενός κριτηρίου κυκλικότητας προκρινόμενου να αξιολογηθεί η ποιότητα του σημείου. Αναλυτικότερα, σε κάθε εξεταζόμενη θέση, ορίζεται ένα παράθυρο και υπολογίζονται οι μεταβολές της έντασης στις δύο κύριες διευθύνσεις x και y . Οι μεταβολές αυτές εκφράζονται ως εξής:

$$N = \begin{bmatrix} \sum g_x^2 & \sum g_x g_y \\ \sum g_x g_y & \sum g_y^2 \end{bmatrix} \quad (\text{Εξ. 3.9})$$

$$Q = N^{-1} = \frac{1}{\det(N)} \begin{bmatrix} \sum g_y^2 & -\sum g_x g_y \\ -\sum g_x g_y & \sum g_x^2 \end{bmatrix} \quad (\text{Εξ. 3.10})$$

όπου g_x, g_y : οι κλίσεις της εικόνας κατά x και y αντίστοιχα

Οι ιδιοτιμές του πίνακα Q εκφράζουν τα τετράγωνα των ημιάξονων της έλλειψης σφάλματος του παραθύρου γύρω από την αρχική θέση. Η θέση αποτελεί σημείο αν έχει κυκλικό σχήμα κι άρα θα πρέπει οι ημιάξονες της έλλειψης σφάλματος να είναι κατά το δυνατόν ίσοι. Το παραπάνω εκφράζεται με ένα κριτήριο κυκλικότητας ως εξής:

$$q = \frac{4 \det(N)}{tr^2(N)} = 1 - \left(\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \right)^2 \quad (\text{Εξ. 3.11})$$

όπου,

λ_1, λ_2 : οι ιδιοτιμές του πίνακα Q

$tr(N)$: το ίχνος του πίνακα Q

$\det(N)$: η ορίζουσα του πίνακα Q

Με βάση το παραπάνω κριτήριο, μία θέση αποτελεί σημείο όταν το q ισούται με τη μονάδα. Πρακτικά, σημεία θεωρούνται θέσεις με $q > 0.75$ (Förstner, 1987). Επίσης, πέρα από την κυκλικότητα του σχήματος, μία θέση για να είναι σημείο θα πρέπει να εμφανίζει έντονες μεταβολές της έντασης του τόνου γύρω της. Αυτό ισοδυναμεί με τη ελαχιστοποίηση του ίχνους του πίνακα Q . Έτσι, ορίζεται ένα κριτήριο ακρίβειας:

$$w = \frac{1}{tr(Q)} \quad (\text{Εξ. 3.12})$$

Με βάση την παραπάνω σχέση, μία θέση χαρακτηρίζεται ως σημείο όταν το w παίρνει μέγιστες τιμές. Ο έλεγχος της τιμής του κριτηρίου αυτού γίνεται με τον ορισμό ενός κατωφλίου w_{limit} . Ο Yan (1988) προτείνει:

$$w_{\text{lim}} = \begin{cases} f \cdot w_{\text{mean}} & f = 0.5 \div 1.5 \\ c \cdot w_{\text{median}} & c = 5 \end{cases} \quad (\text{Εξ. 3.13})$$

Για τον υπολογισμό του w_{limit} θα πρέπει πρώτα να υπολογιστούν οι τιμές του w για όλες τις θέσεις πάνω στην εικόνα ώστε να προκύψει η μέση τιμή και η ενδιάμεση τιμή.

3.3.1.3 Τελεστής Harris

Οι Harris και Stephens (1988) μελέτησαν τη λειτουργία του τελεστή Moravec και επισήμαναν έναν αριθμό προβλημάτων κατά την εφαρμογή του. Αποτέλεσμα της προσπάθειας αντιμετώπισης των αδυναμιών του ήταν η δημιουργία ενός νέου τελεστή, του ανιχνευτή (ή τελεστή) Harris (Harris detector). Η λογική στην οποία στηρίζεται η λειτουργία του τελεστή Harris είναι παρόμοια με αυτή του Moravec, έχοντας όμως ορισμένες βελτιώσεις. Επιπρόσθετα, ο τελεστής Harris πετυχαίνει την εξαγωγή σημείων (corners) και ακμών (edges) εφαρμόζοντας μία συνδυαστική μέθοδο. Συνοπτικά, η λειτουργία του βασίζεται στη μέτρηση

της μεταβολής της έντασης σε όλες τις διευθύνσεις γύρω από ένα σημείο κι όχι σε επιλεγμένες. Το παραπάνω στοχεύει στην αντιμετώπιση του προβλήματος της περιστροφικής αστάθειας που αντιμετωπίζει ο τελεστής Moravec.

Αναλυτικότερα, οι Harris και Stephens εξέφρασαν τις κλίσεις της εικόνας μέσω της πράξης της συνέλιξης. Για την εκτέλεση της τελευταίας ορίζεται ένα παράθυρο με τις τιμές φωτεινότητας της εικόνας και άλλα δύο, ένα για την κάθε κύρια διεύθυνση, τα οποία ονομάζονται μάσκες. Η πράξη της συνέλιξης για κάθε μία διεύθυνση είναι η ακόλουθη:

$$X = I * [-1 \ 0 \ 1] \approx \frac{\partial I}{\partial x} \quad (\text{Εξ. 3.14})$$

$$Y = I * [-1 \ 0 \ 1]^T \approx \frac{\partial I}{\partial y} \quad (\text{Εξ. 3.15})$$

όπου I : η ένταση του τόνου του παραθύρου της εικόνας

Όμοια με τον τελεστή Moravec, η μεταβολή της έντασης περί το κεντρικό εικονοστοιχείο του παραθύρου της εικόνας θα ισούται με:

$$E_{u,v}(x, y) = \sum \left(u \frac{\partial I}{\partial x} + v \frac{\partial I}{\partial y} \right)^2 \quad (\text{Εξ. 3.16})$$

όπου u, v : τυχαίες διευθύνσεις γύρω από την κεντρική εικονοσηφίδα

Το πλεονέκτημα της εξίσωσης 3.16 είναι ότι η μεταβολή της έντασης του τόνου μετράται σε όλες τις διευθύνσεις u, v κι όχι μόνο σε ορισμένες. Επιπρόσθετα, προτείνεται η εφαρμογή ενός γκαουσιανού φίλτρου εξομάλυνσης w (Gaussian kernel) στην εικόνα, προκειμένου να μειωθεί ο θόρυβος και να περιοριστεί ο κίνδυνος εντοπισμού μεμονωμένων εικονοσηφίδων ως σημεία ενδιαφέροντος. Επομένως, η εξίσωση μέτρησης της μεταβολής της έντασης διαμορφώνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} E_{u,v}(x, y) &= \sum e^{-\frac{u^2+v^2}{2\sigma^2}} \cdot \left(u \frac{\partial I}{\partial x} + v \frac{\partial I}{\partial y} \right)^2 = \sum w \cdot \left(u \frac{\partial I}{\partial x} + v \frac{\partial I}{\partial y} \right)^2 = \\ &= \sum w \cdot \left(u^2 \frac{\partial I^2}{\partial x} + 2uv \frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial I}{\partial y} + v^2 \frac{\partial I^2}{\partial y} \right) = Au^2 + 2Cuv + Bv^2 \end{aligned} \quad (\text{Εξ. 3.17})$$

όπου,

$$A = \left(\frac{\partial I}{\partial x} \right)^2 * w, \quad B = \left(\frac{\partial I}{\partial y} \right)^2 * w, \quad C = \left(\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial I}{\partial y} \right) * w$$

Η εξίσωση 3.17 γράφεται ως εξής:

$$E(x, y) = (x, y)M(x, y)^T \quad (\text{Εξ. 3.18})$$

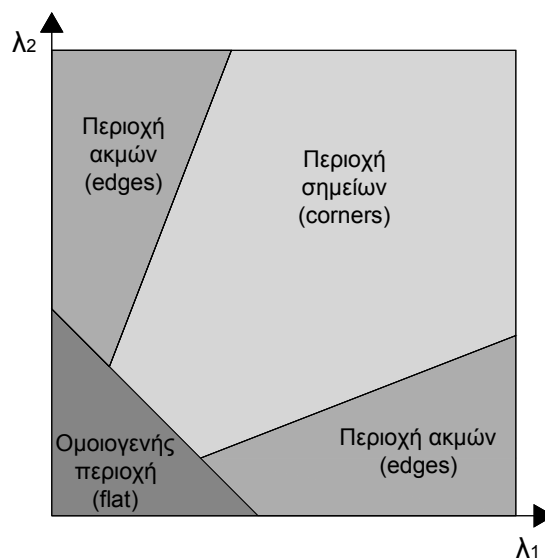
όπου,

$$M = \begin{bmatrix} A & C \\ C & B \end{bmatrix}$$

Ο πίνακας M είναι ένας συμμετρικός πίνακας 2×2 και περιγράφει τη μορφή της συνάρτησης μεταβολής της έντασης του παραθύρου της εικόνας. Οι ιδιοτιμές λ_1, λ_2 αντιστοιχούν στη μέγιστη και ελάχιστη τιμή της καμπυλότητας της συνάρτησης μεταβολής της έντασης. Συνεπώς, με βάση τις τιμές των ιδιοτιμών διακρίνονται τρεις περιπτώσεις:

- Αν λ_1, λ_2 έχουν παρόμοια και μικρή τιμή (ιδανικά μηδενική), τότε η μεταβολή της έντασης γύρω από την κεντρική εικονοψηφίδα του παραθύρου είναι μικρή κι άρα η περιοχή χαρακτηρίζεται ως ομοιογενές πρότυπο (flat).
- Αν λ_1 είναι κατά πολύ μεγαλύτερη της λ_2 (ή αντιστρόφως), τότε η συνάρτηση μεταβολής της έντασης εμφανίζει μέγιστο κι ελάχιστο. Επομένως, η μεταβολή της έντασης κατά τη μία διεύθυνση είναι μεγάλη και κατά την άλλη είναι μικρή. Αυτό σημαίνει ότι το εξεταζόμενο σημείο βρίσκεται κατά μήκος μίας ακμής (edge).
- Αν λ_1, λ_2 έχουν εξίσου μεγάλες τιμές, τότε παρουσιάζεται μεγάλη μεταβολή της έντασης γύρω από την κεντρική εικονοψηφίδα του παραθύρου προς όλες τις διευθύνσεις κι άρα η τελευταία αποτελεί σημείο (corner).

Οι παραπάνω περιπτώσεις απεικονίζονται διαγραμματικά στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 3.5. Διάγραμμα ιδιοτιμών του πίνακα M

Συνεπώς, ο τελεστής Harris επιτρέπει τον διαχωρισμό σημείων – γωνιών (corners) από σημεία ακμών (edges). Για τον διαχωρισμό αυτό, ορίζεται ένα μέτρο γωνιακότητας R :

$$R = \det(M) - k \cdot \text{tr}^2(M) = \lambda_1 \lambda_2 - k \cdot (\lambda_1 + \lambda_2) \quad (\text{Εξ. 3.19})$$

όπου k : σταθερά

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει ότι αρνητικές τιμές του μέτρου R αντιστοιχούν σε ακμές, θετικές τιμές σε σημεία και μικρές τιμές σε θέσεις μέσα σε ομοιογενείς περιοχές. Επομένως, θα πρέπει να οριστεί ένα κατώφλι της τιμής του R ώστε να διαχωρίζονται οι περιπτώσεις γωνιών από τις ομοιογενείς περιοχές.

Ο τελεστής Harris δεν εξαρτάται από το σύστημα αναφοράς της εικόνας κι άρα δεν παρουσιάζει ευαισθησία σε στροφή (rotation invariance) (Remondino, 2006). Επεκτάσεις του αλγορίθμου παρουσιάστηκαν από τους Mikolajczyk & Schmid (2001) και τον Brown (2005) προκειμένου η λειτουργία του τελεστή να μην επηρεάζεται από μεταβολές της κλίμακας (scale invariance).

3.3.2 Ο αλγόριθμος SIFT

Ο αλγόριθμος SIFT (Scale – Invariant Feature Transform) αναπτύχθηκε από τον Lowe (1999) και αφορά την εξαγωγή σημειακών χαρακτηριστικών από εικόνες. Τα χαρακτηριστικά αυτά συνοδεύονται από ένα διάνυσμα περιγραφικών ιδιοτήτων, προκειμένου να είναι δυνατή η συνταύτιση σε επόμενο στάδιο. Σε αντίθεση με τους τελεστές που περιγράφηκαν παραπάνω, ο Lowe προτείνει μία ολοκληρωμένη μέθοδο έτσι ώστε τα χαρακτηριστικά που εντοπίζονται, να διατηρούνται αναλλοίωτα σε μεταβολές κλίμακας (scale invariance) και στροφές της εικόνας (rotation invariance). Παράλληλα, δεν παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία σε αφινικούς μετασχηματισμούς, μεταβολές της φωτεινότητας και στην ύπαρξη θορύβου στην εικόνα. Η λειτουργία του αλγορίθμου συνοψίζεται στα ακόλουθα βήματα:

- Δημιουργείται μία πυραμίδα εικόνων διαφορετικής κλίμακας (scale - space). Σε κάθε επίπεδο της πυραμίδας έχουν εφαρμοστεί γκαουσιανά φίλτρα εξομάλυνσης διαφορετικής τυπικής απόκλισης. Τα σημεία ενδιαφέροντος εντοπίζονται ως μέγιστα ή ελάχιστα της συνάρτησης διαφοράς διαδοχικών εξομαλυμένων εικόνων (Difference of Gaussian - DoG).
- Η θέση των σημείων ενδιαφέροντος προσδιορίζεται με υποψηφιακή ακρίβεια παρεμβάλλοντας πολυώνυμα δευτέρου βαθμού στη συνάρτηση διαφοράς των εικόνων.
- Για κάθε ένα σημείο, υπολογίζεται ο προσανατολισμός και το μέτρο των τοπικών κλίσεων της εικόνας, στην κλίμακα του επιπέδου της πυραμίδας που αυτό εντοπίστηκε. Έτσι, προκύπτει

ένα διάνυσμα $n \times 4$ (όπου n : το πλήθος των εξαγόμενων σημείων) με τις συντεταγμένες της θέσης, την κλίμακα και τον προσανατολισμό του κάθε σημείου.

- Υπολογίζονται τα περιγραφικά χαρακτηριστικά καθενός σημείου, ορίζοντας ένα παράθυρο περί αυτό, στραμμένο βάσει του προσανατολισμού του. Μέσα σε αυτό το παράθυρο υπολογίζονται τα μέτρα και οι διευθύνσεις των τοπικών κλίσεων της εικόνας.
- Το μέτρο ομοιότητας μεταξύ των χαρακτηριστικών, που χρησιμοποιείται για την συνταύτιση, είναι ο υπολογισμός της ευκλείδειας απόστασης των διανυσμάτων των ιδιοτήτων τους. Οι αντιστοιχίες μεταξύ των χαρακτηριστικών προκύπτουν τελικά εφαρμόζοντας της μέθοδο του εγγύτερου γείτονα.

Η παραπάνω μέθοδος αποδεικνύεται ικανή να εντοπίσει μεγάλο πλήθος χαρακτηριστικών που διατηρούνται αναλλοίωτα σε γεωμετρικές και ραδιομετρικές παραμορφώσεις. Τα αποτελέσματα της συνταύτισης είναι ικανοποιητικά ακόμα και σε περιπτώσεις εικόνων με σημαντικές διαφορές μεταξύ τους. Ο αλγόριθμος έχει χρησιμοποιηθεί σε πλήθος φωτογραμμετρικών εφαρμογών κι εφαρμογών του πεδίου της όρασης υπολογιστών (image registration, object recognition, panoramic image stitching) και τα αποτελέσματά του έχουν αξιολογηθεί στη βάση πολλών κριτηρίων (αξιοπιστία, ακρίβεια θέσης, ταχύτητα εφαρμογής κ.α.) (Remondino, 2006).

3.3.2.1 Εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων

Ο εντοπισμός των χαρακτηριστικών σημείων (keypoints) στις εικόνες γίνεται, ακολουθώντας μία ιεραρχική προσέγγιση (από το αδρό στο λεπτομερές) που στοχεύει στην μείωση των χρόνων εκτέλεσης του αλγορίθμου. Αναλυτικότερα, το πρώτο στάδιο του SIFT είναι ο εντοπισμός σημείων που διατηρούνται αναλλοίωτα σε μεταβολές της κλίμακας. Για να είναι εφικτό αυτό, η αναζήτηση των χαρακτηριστικών γίνεται σε όλες τις πιθανές κλίμακες της εικόνας, εφαρμόζοντας στην τελευταία μία συνεχή συνάρτηση μεταβολής κλίμακας (scale space). Αποδεικνύεται (Lowe, 2004) ότι ο βέλτιστος τρόπος δημιουργίας εικόνων διαφορετικής κλίμακας είναι η εφαρμογή γκαουσιανών φίλτρων διαφορετικής τυπικής απόκλισης. Έτσι, το σύνολο των νέων εικόνων L , προκύπτει ως αποτέλεσμα της συνέλιξης της αρχικής εικόνας I , με το εκάστοτε φίλτρο G . Το τελευταίο διατυπώνεται μαθηματικά ως εξής:

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) \quad (\text{Εξ. 3.20})$$

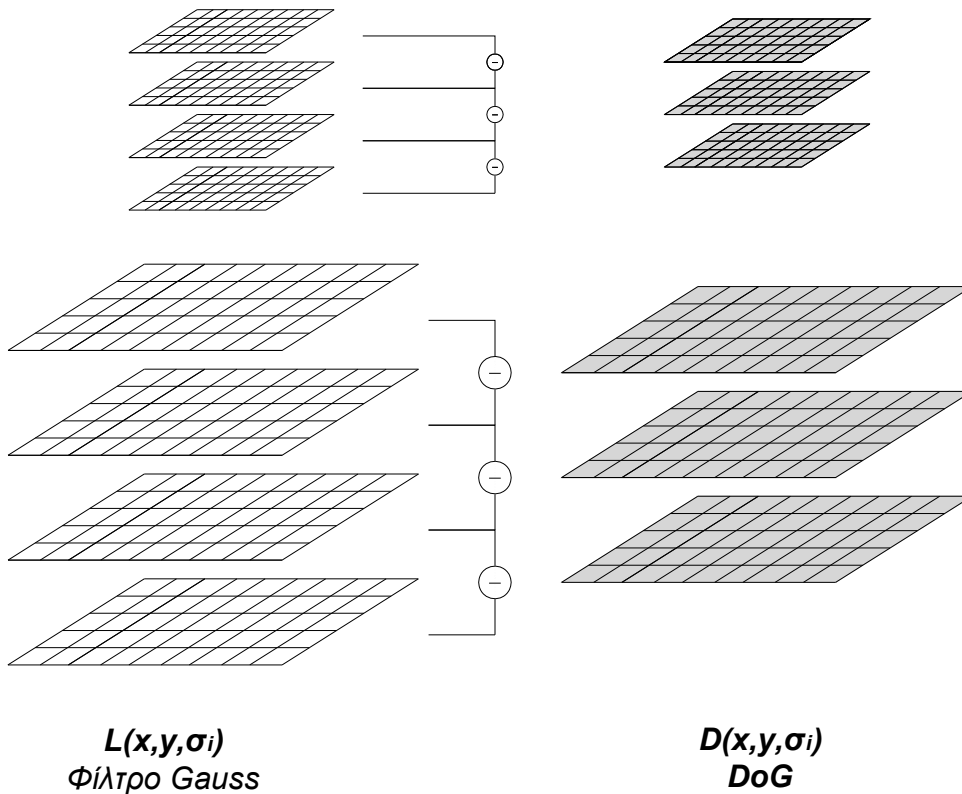
όπου,
$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}}$$

Οι θέσεις των σημείων (keypoints) προκύπτουν ως ακρότατα της συνάρτησης διαφοράς διαδοχικών κλιμάκων:

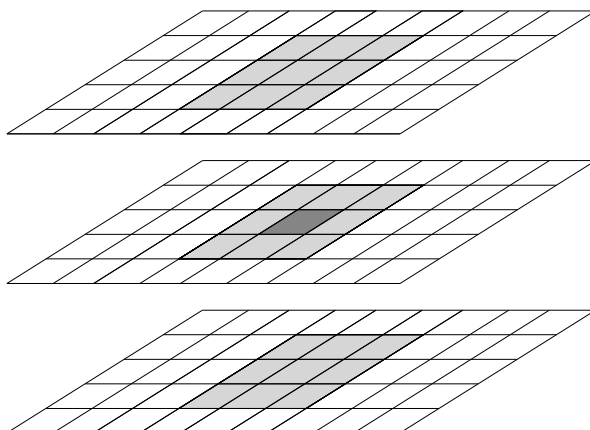
$$D(x, y, \sigma) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \quad (\text{Εξ. 3.21})$$

όπου k : συντελεστής μεταβολής της κλίμακας

Πρακτικά αν θεωρηθεί A , η αρχική εικόνα, τότε μέσω της συνέλιξης αυτής με το φίλτρο Gauss, προκύπτει εικόνα B . Ο Lowe προτείνει την εφαρμογή φίλτρου τυπικής απόκλισης $\sigma = \sqrt{2}$. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται φίλτρο ίδιας τυπικής απόκλισης στην εικόνα B και προκύπτει εικόνα Γ κ.ο.κ. Συνιστάται η δημιουργία τριών εικόνων διαφορετικής κλίμακας (Lowe, 2004). Αφού δημιουργηθεί η τριάδα των εικόνων διαφορετικής κλίμακας, ακολουθεί η επανασύσταση της εικόνας, υποδιπλασιάζοντας την ανάλυσή της. Έτσι, δημιουργείται τελικώς μία πυραμίδα εικόνων διαφορετικής ανάλυσης, όπου κάθε επίπεδο περιλαμβάνει μία τετράδα εικόνων διαφορετικής κλίμακας (τρεις νέες κλίμακες, συν την αρχική), οι οποίες αφαιρούνται μεταξύ τους (DoG) (Σχήμα 3.6). Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται μία νέα πυραμίδα διαφορών των εικόνων, η πυραμίδα DoG. Οι τιμές των εικονοστοιχείων κάθε επιπέδου, συγκρίνονται με τις 8 γειτονικές τους εικονοψηφίδες αλλά και με τις 9 γειτονικές τους στο ανώτερο και κατώτερο επίπεδο της πυραμίδας (Σχήμα 3.7). Τελικά, ως σημεία ενδιαφέροντος επιλέγονται εκείνα που διαφέρουν σημαντικά από το σύνολο των 26 γειτονικών τους εικονοστοιχείων.



Σχήμα 3.6: Πυραμίδες εικόνας (Gaussian & DoG)



Σχήμα 3.7: Σύγκριση εικονοστοιχείου με 26 γειτονικά

Η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω εφαρμόζεται αρχικά στις εικόνες μειωμένης ανάλυσης, προχωρώντας σταδιακά στα επόμενα επίπεδα της πυραμίδας, με αποτέλεσμα τη σημαντική εξοικονόμηση χρόνου κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου.

Μετά τον εντοπισμό των εικονοστοιχείων που αποτελούν χαρακτηριστικά σημεία, οι συντεταγμένες της θέσης προσδιορίζονται με υποψηφιακή ακρίβεια, μέσω της παρεμβολής πολυωνύμων στα ακρότατα της συνάρτησης $D(x,y,\sigma)$ (Lowe & Brown, 2002). Κατά τον υπολογισμό αυτό, εφαρμόζεται ένα κριτήριο για την απόρριψη σημείων που βρίσκονται σε περιοχές χαμηλής αντίθεσης της εικόνας. Το κριτήριο αυτό αφορά το μέγεθος της μεταβολής της θέσης του σημείου. Έτσι, σημεία που οι τελικές συντεταγμένες τους σε δεκαδική μορφή, διαφέρουν σημαντικά από τις αρχικές, απορρίπτονται. Τέλος, γίνεται έλεγχος για σημεία που βρίσκονται κατά μήκος ακμών, με τρόπο αντίστοιχο με αυτό του τελεστή Harris.

3.3.2.2 Υπολογισμός κλίμακας και προσανατολισμού των σημείων

Μετά τον εντοπισμό των σημείων στην εικόνα, ακολουθεί ο υπολογισμός της κλίμακας και του προσανατολισμού για κάθε ένα από αυτά. Σε κάθε σημείο αποδίδεται η κλίμακα του επιπέδου της πυραμίδας Gauss στην οποία εντοπίστηκε. Έπεται ο υπολογισμός του προσανατολισμού του σημείου στην κλίμακα αυτή. Συνέπεια αυτού είναι οι υπολογισμοί που ακολουθούν να είναι ανεξάρτητοι της κλίμακας της εικόνας (scale invariant). Αναλυτικότερα, για κάθε σημείο $L(x,y)$, δεδομένου επιπέδου σ της πυραμίδας, υπολογίζονται οι γωνίες θ των προσανατολισμών και το μέγεθος m της μεταβολής της έντασης του τόνου, μέσω των διαφορών των τιμών της έντασης γειτονικών εικονοστοιχείων. Έτσι:

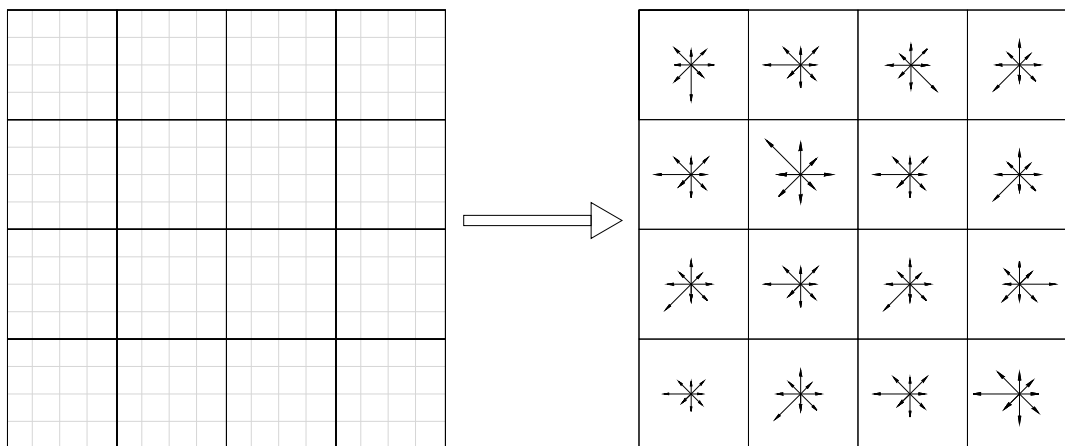
$$m(x, y) = \sqrt{(L(x+1, y) - L(x-1, y))^2 + (L(x, y+1) - L(x, y-1))^2} \quad (\text{Εξ. 3.22})$$

$$\theta(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{L(x, y+1) - L(x, y-1)}{L(x+1, y) - L(x-1, y)} \right) \quad (\text{Εξ. 3.23})$$

Τελικώς, δημιουργείται ένα ιστόγραμμα προσανατολισμών από τους προσανατολισμούς των κλίσεων της εικόνας μέσα σε μια περιοχή γύρω από το σημείο. Το ιστόγραμμα αναπαριστά το μέγεθος m της μεταβολής του τόνου σε 36 προσανατολισμούς. Συνεπώς, υπολογίζονται οι κλίσεις της εικόνας γύρω από το σημείο ανά 10° . Η θέση του μεγίστου του ιστογράμματος δίνει τον προσανατολισμό του σημείου. Ο Lowe επισημαίνει ότι σε περίπτωση που το ιστόγραμμα εμφανίζει περισσότερες από μία κορυφές, τότε ορίζονται περισσότερα σημεία με κοινή θέση και διαφορετικό προσανατολισμό. Αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας είναι η δημιουργία ενός διανύσματος $n \times 4$, όπου n το πλήθος των χαρακτηριστικών. Κάθε εξαγόμενο σημείο συνοδεύεται από τις συντεταγμένες της θέσης του σε δεκαδική μορφή, την κλίμακα και τον προσανατολισμό του.

3.3.2.3 Δημιουργία περιγραφικών χαρακτηριστικών

Μέχρι το σημείο αυτό, έχει εξασφαλιστεί η ανεξαρτησία των χαρακτηριστικών από τις μεταβολές της κλίμακας. Επόμενο στάδιο είναι η δημιουργία του διανύσματος των περιγραφικών χαρακτηριστικών (descriptor), η οποία γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται ο αναλλοίωτος χαρακτήρας των σημείων ενδιαφέροντος και σε μεταβολές προσανατολισμού και ραδιομετρίας των εικόνων. Για τον ορισμό των περιγραφικών χαρακτηριστικών, ορίζεται μία περιοχή γύρω από το σημείο, στο επίπεδο της κλίμακας που εντοπίστηκε. Το παράθυρο που δημιουργείται, στρέφεται βάσει του προσανατολισμού της επικρατούσας κλίσης που ορίστηκε παραπάνω μέσω του ιστογράμματος. Αυτό εξασφαλίζει ότι τα περιγραφικά χαρακτηριστικά θα προσδιοριστούν κατά τρόπο ανεξάρτητο από τον προσανατολισμό της κάθε εικόνας. Αναλυτικότερα, το παράθυρο διαιρείται σε 16 υποπεριοχές (4×4). Στις περιοχές αυτές υπολογίζονται το μέτρο m και η διεύθυνση θ των κλίσεων της εικόνας, σε 8 επιλεγμένους προσανατολισμούς (Εξισώσεις 3.22, 3.23). Στον υπολογισμό του μέτρου m σε κάθε υποπεριοχή, αποδίδονται βάρη ανάλογα με την απόστασή από το κέντρο του παραθύρου. Έτσι, για κάθε ένα σημείο υπολογίζονται 16 ιστογράμματα προσανατολισμού (ένα για κάθε υποπεριοχή) με 8 προσανατολισμούς το καθένα. Τελικώς, το διάνυσμα των περιγραφικών χαρακτηριστικών αποτελείται από 128 τιμές που εκφράζουν τις κλίσεις της εικόνας γύρω από το σημείο. Στο σχήμα 3.8 φαίνεται το παράθυρο γύρω από ένα σημείο και η διαίρεσή του σε 16 υποπεριοχές. Τα διανύσματα αναπαριστούν το μέτρο της μεταβολής του τόνου στις 8 επιλεγμένες διευθύνσεις.



Σχήμα 3.8: Υπολογισμός των περιγραφικών χαρακτηριστικών

Τέλος, οι τιμές των ιδιοτήτων κανονικοποιούνται στο διάστημα $[0,1]$ έτσι ώστε να είναι ανεξάρτητες από ενιαίες μεταβολές της ραδιομετρίας της εικόνας.

3.3.2.4 Εύρεση ομολογιών

Στο στάδιο αυτό γίνεται η αντιστοίχιση των χαρακτηριστικών χρησιμοποιώντας ως μέτρο ομοιότητας, την ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των διανυσμάτων των περιγραφικών χαρακτηριστικών. Για την εύρεση των ομολογιών, εφαρμόζεται η μέθοδος του εγγύτερου γείτονα, δηλαδή αντιστοιχίζονται χαρακτηριστικά που η απόσταση μεταξύ των διανυσμάτων τους, είναι η ελάχιστη. Δεδομένου ότι η διάσταση του διανύσματος των ιδιοτήτων είναι 128×1 και το πλήθος των εξαγόμενων, από κάθε εικόνα, χαρακτηριστικών είναι μεγάλο, η διαδικασία είναι υπολογιστικά απαιτητική. Για το λόγο αυτό, ο αλγόριθμος SIFT εφαρμόζει μία μέθοδο αναζήτησης που βασίζεται στη δημιουργία «δενδροειδών» δομών δεδομένων (k-d tree data structure) και ονομάζεται Best – Bin First (BBF) (Beis & Lowe, 1997). Τέλος, σημειώνεται ότι η μέθοδος του εγγύτερου γείτονα απαιτεί τον ορισμό ενός κατώφλιου για την ελάχιστη τιμή της υπολογιζόμενης απόστασης, πάνω από την οποία τα δύο χαρακτηριστικά δεν θα θεωρούνται ομόλογα. Επίσης, ελέγχεται η διαφορά των αποστάσεων του διανύσματος κάθε χαρακτηριστικού της μιας εικόνας, από τους δύο κοντινότερους γείτονες στην άλλη εικόνα. Αν η διαφορά αυτή είναι μεγαλύτερη από ένα κατώφλι τότε η ομολογία θεωρείται σωστή, αφού ικανοποιούνται τα κριτήρια της σπανιότητας και της ευκρίνειας (§ 3.3).

Ο Lowe (2004), στο πλαίσιο εφαρμογής του αλγορίθμου SIFT για την αναγνώριση αντικειμένου, προχωρά στον έλεγχο των ομολογιών ως προς τη συνέπειά τους σε δύο μοντέλα. Αρχικά, προσδιορίζονται ομάδες χαρακτηριστικών (clusters) μέσω ενός μετασχηματισμού Hough (Hough, 1962) που συνηγορούν στην ίδια θέση στο χώρο για το αντικείμενο. Η

λογική που ακολουθείται είναι ότι όσες περισσότερες ομολογίες χαρακτηριστικών είναι συνεπείς ως προς μία θέση του αντικειμένου, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα οι ομολογίες αυτές να είναι σωστές. Τέλος, οι ομολογίες ελέγχονται ως προς τη συνέπειά τους στο μοντέλο του αφινικού μετασχηματισμού.

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, στο παρόν κεφάλαιο έγινε αναφορά στις βασικές κατηγορίες της ψηφιακής συνταύτισης, καθώς επίσης στις μεθόδους και τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται σε κάθε μία από αυτές. Θα πρέπει να γίνει σαφές ότι σε καμία περίπτωση δεν επιχειρήθηκε να καλυφθεί όλο το εύρος του επιστημονικού πεδίου της ψηφιακής συνταύτισης, κάτι που άλλωστε δεν θα ήταν δυνατόν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής. Στόχος ήταν να διατυπωθούν οι βασικές αρχές του προβλήματος της συνταύτισης και να αναπτυχθούν οι κυριότερες μέθοδοι και τεχνικές, ώστε να είναι κατανοητό το αντίστοιχο στάδιο της προτεινόμενης μεθόδου. Συγκεκριμένα, η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόζει τον αλγόριθμο SIFT, προκειμένου να εντοπίσει ομόλογα σημεία στο επικαλυπτόμενο τμήμα των εικόνων. Η επιλογή του συγκεκριμένου αλγορίθμου αιτιολογείται στο Κεφάλαιο 5, καθώς επίσης παρουσιάζονται αναλυτικά τα ακολουθούμενα βήματα και οι επιλογές που έγιναν.

4

Συνένωση Νεφών

Η δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων αντικειμένων είναι εφικτή, κατά τρόπο γρήγορο και αξιόπιστο, μέσω της χρήσης της τεχνολογίας των σαρωτών. Οι τρισδιάστατοι σαρωτές παράγουν πυκνά νέφη σημείων (point cloud), σε μικρό χρόνο, ικανά να περιγράψουν με ακρίβεια ακόμα και πολύπλοκες γεωμετρικές επιφάνειες. Συνήθως, η δημιουργία ολοκληρωμένων τρισδιάστατων μοντέλων επιβάλλει τη σάρωση του αντικειμένου από περισσότερες, της μιας, θέσεις. Έτσι, δημιουργούνται ανεξάρτητα νέφη σημείων, κάθε ένα από τα οποία βρίσκεται στο σύστημα αναφοράς του σαρωτή. Η συνένωση τρισδιάστατων νεφών σημείων (3D surface matching, 3D registration) ορίζεται ως η διαδικασία ένταξης των ανεξάρτητων σαρώσεων σε κοινό σύστημα αναφοράς. Η συνένωση νεφών περιγράφεται μαθηματικά μέσω του μοντέλου του τρισδιάστατου μετασχηματισμού στερεού σώματος (3D Rigid body transformation). Ως στερεό σώμα ορίζεται γεωμετρικά κάθε τρισδιάστατο σημειοσύνολο XYZ, δηλαδή κάθε νέφος, το οποίο μετασχηματιζόμενο, δεν μεταβάλλεται κατά σχήμα και μέγεθος (Καρράς, 2008). Έτσι, το πρόβλημα της συνένωσης έχει 6 μόνο βαθμούς ελευθερίας που εκφράζονται από τις παραμέτρους του μετασχηματισμού:

- 3 μεταθέσεις ΔX , ΔY , ΔZ , κατά τους 3 άξονες του συστήματος
- 3 στροφές ω , φ , κ , περί τους 3 άξονες του συστήματος

$$x' = Rx + t \Rightarrow \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (\text{Εξ.4.1})$$

Επισημαίνεται ότι το μέγεθος των αντικειμένων διατηρείται σταθερό αφού τα δεδομένα της σάρωσης είναι σε πραγματική κλίμακα. Αυτός είναι ο λόγος που χρησιμοποιείται το μοντέλο του μετασχηματισμού στερεού σώματος, αντί αυτού του τρισδιάστατου μετασχηματισμού ομοιότητας, που αποτελεί και την γενική περίπτωση, με 7 βαθμούς ελευθερίας. Επίσης, είναι προφανές ότι κάθε ένα γνωστό σημείο και στα δύο συστήματα, δίνει 3 εξισώσεις, μία για κάθε συνιστώσα της θέσης του. Όμως, δεν αρκούν δύο γνωστά σημεία για τη δέσμευση των έξι βαθμών ελευθερίας του μοντέλου. Συγκεκριμένα, η χρήση 2 σημείων αφήνει

αδέσμευτη τη στροφή του στερεού σώματος περί την ευθεία που τα ενώνει. Έτσι, ο υπολογισμός των παραμέτρων του μετασχηματισμού απαιτεί τουλάχιστον τρία σημεία γνωστά.

Για περίσσεια ομόλογων σημείων μεταξύ των δύο νεφών, ο υπολογισμός των καλύτερων τιμών των παραμέτρων του μετασχηματισμού, εκφράζεται μέσω της ελαχιστοποίησης του αθροίσματος των τετραγώνων των υπολοίπων της εξίσωσης 4.1 ως εξής:

$$\min [u_i u_i] \quad \text{όπου,} \quad [u_i u_i] = \sum_{i=1}^n (x_i' - \hat{R}x_i - \hat{t})^2 \quad (\text{Εξ. 4.2})$$

Η εξίσωση 4.1 δεν είναι γραμμική ως προς τα στοιχεία του πίνακα στροφής R κι επομένως, η επίλυση του συστήματος με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων απαιτεί εκτίμηση αρχικών τιμών για τους αγνώστους και γραμμικοποίηση των εξισώσεων παρατήρησης. Συνεπώς, τίθεται το ζήτημα εκτίμησης καλών αρχικών τιμών έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύγκλιση του αλγορίθμου. Παράλληλα, οι αρχικές τιμές θα πρέπει να είναι τέτοιες ώστε ο αλγόριθμος να συγκλίνει στο γενικό ελάχιστο της συνάρτησης σφάλματος (Εξ. 4.2), χωρίς να «παγιδεύεται» η λύση σε τοπικά ελάχιστα. Η εξάρτηση από την εκτίμηση των αρχικών τιμών των αγνώστων, αναφέρεται ως ένα από τα βασικά μειονεκτήματα των επαναληπτικών λύσεων (Eggert et al., 1997). Στη βιβλιογραφία προτείνονται άμεσες μέθοδοι επίλυσης (closed form solutions) του προβλήματος, που ικανοποιούν το κριτήριο της εξίσωσης 4.2. Ειδικότερα, μεγάλο ενδιαφέρον σημειώνεται σε δύο άμεσες μεθόδους εκτίμησης των παραμέτρων του μετασχηματισμού στερεού σώματος: η πρώτη (Arun et al., 1987) βασίζεται στην ανάλυση ιδιαζουσών τιμών (Singular value decomposition, SVD) ενώ η δεύτερη (Horn, 1988) κάνει χρήση του τετραδικού συστήματος Hamilton (unit quaternion).

Από την εμφάνιση των τρισδιάστατων σαρωτών μέχρι σήμερα, έχουν προταθεί αρκετές μέθοδοι για την αντιμετώπιση του προβλήματος της συνένωσης νεφών. Κάθε μία από αυτές διαφέρει ως προς τη μαθηματική μέθοδο που χρησιμοποιεί για τον υπολογισμό των καλύτερων τιμών των παραμέτρων του μετασχηματισμού, τον βαθμό πολυπλοκότητας της γεωμετρίας των αντικειμένων που μπορεί να διαχειριστεί, τον χρόνο εκτέλεσης, την αξιοπιστία και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Οι Besl (1992), Grün & Akca (2005) κάνουν μία σύντομη αναφορά στις μεθόδους που έχουν προταθεί κατά καιρούς και στα χαρακτηριστικά τους. Μεταξύ αυτών, πιο δημοφιλείς εμφανίζονται η ελαχιστοτετραγωνική μέθοδος συνένωσης (Least squares 3D surface and curve matching, (Grün & Akca, 2005) και ο αλγόριθμος του επαναληπτικά κοντινότερου σημείου (Iterative closest point algorithm – ICP, Besl & McKay, 1992), οι οποίες και αναπτύσσονται στις παραγράφους που ακολουθούν. Επίσης, τα τελευταία χρόνια έκαναν την εμφάνισή τους μέθοδοι συνένωσης νεφών που αξιοποιούν πληροφορία από εικόνες του αντικειμένου που έχει σαρωθεί (Image based registration). Οι μέθοδοι

αυτές σχετίζονται άμεσα με το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής και αναλύονται στο τέλος του κεφαλαίου.

4.1. Αλγόριθμος Επαναληπτικά Κοντινότερου Σημείου

Ο αλγόριθμος του επαναληπτικά κοντινότερου σημείου (ICP) παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τους Besl και McKay (1992) ενώ αρκετές βελτιώσεις στη λειτουργία του προτάθηκαν από τους Zhang (1992, 1994) και Chen & Medioni (1992). Ο ICP αποτέλεσε και συνεχίζει να αποτελεί τη δημοφιλέστερη μέθοδο συνένωσης νεφών. Ο Besl αναφέρει ότι ο ICP έχει την ιδιότητα να συγκλίνει πάντα στο ελάχιστο της συνάρτησης του σφάλματος και μάλιστα γρήγορα, μετά από λίγες επαναλήψεις. Βασικό πλεονέκτημά του είναι ο βαθμός αυτοματοποίησης της διαδικασίας, αφού ο ICP δεν περιορίζεται μόνο στην εκτίμηση των παραμέτρων του μετασχηματισμού στερεού σώματος από δεδομένες ομολογίες στα νέφη (όπως η ελαχιστοτετραγωνική μέθοδος), αλλά δίνει και την δυνατότητα επιλογής των ομολογιών. Βέβαια, δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως μία πλήρως αυτόματη μέθοδος, λόγω του ότι η εφαρμογή του βασίζεται σε δύο προϋποθέσεις. Πιο συγκεκριμένα, ο ICP θεωρεί ότι το ένα νέφος είναι υποσύνολο του άλλου (Grün & Akca, 2005, Manasir & Frasel, 2006) κι αυτό συνεπάγεται μεγάλες επικαλύψεις κατά τη σάρωση του αντικειμένου. Όταν το παραπάνω δεν ισχύει, τότε υπάρχει κίνδυνος να εκτιμηθούν εσφαλμένες ομολογίες οι οποίες θα εμποδίσουν τη σύγκλιση του αλγορίθμου. Επίσης, η εφαρμογή του ICP προϋποθέτει ότι η σχετική θέση των δύο νεφών είναι «μερικώς» αποκατεστημένη, δηλαδή θεωρεί δεδομένη την ύπαρξη αρχικής εκτίμησης για τις παραμέτρους του μετασχηματισμού.

Ο ICP μπορεί να εφαρμοστεί σε προβλήματα συνένωσης μεταξύ διαφόρων γεωμετρικών οντοτήτων, όπως σημειοσύνολα, ευθείες, καμπύλες, πλέγματα τριγώνων, επιφάνειες. Σε κάθε περίπτωση όμως, απαιτείται η μετάβαση από τις παραπάνω οντότητες σε σημεία π.χ. τα τρίγωνα αναπαρίστανται από τρεις κόμβους, οι γραμμές από τους κόμβους αρχής και τέλους κ.ο.κ.

Η λειτουργία του αλγορίθμου συνοψίζεται σε τέσσερα βήματα. Αν θεωρηθεί \mathbf{P} , το πρώτο σημειοσύνολο με πλήθος N_p και \mathbf{X} , το δεύτερο με πλήθος N_x , στο σύστημα του οποίου πρόκειται να μετασχηματιστεί το \mathbf{P} , τότε:

- Αρχικά αναζητούνται οι ομολογίες μεταξύ των δύο σημειοσυνόλων, θεωρώντας ως ομόλογα τα κοντινότερα σημεία.
- Από τις ομολογίες που προσδιορίζονται, υπολογίζεται ο μετασχηματισμός στερεού σώματος χρησιμοποιώντας το τετραδικό σύστημα του Hamilton.
- Μετασχηματίζονται τα σημεία \mathbf{P} στο σύστημα αναφοράς του \mathbf{X} , εφαρμόζοντας το μετασχηματισμό.

- Επαναλαμβάνονται τα προηγούμενα βήματα μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο σύγκλισης που έχει τεθεί.

Το πρώτο στάδιο της διαδικασίας είναι το απαιτητικότερο από άποψη υπολογιστικού κόστους. Το μέτρο ομοιότητας για την εύρεση του εγγύτερου γείτονα κάθε σημείου του \mathbf{P} , στο σημειοσύνολο \mathbf{X} , είναι η ευκλείδεια απόσταση. Έτσι, σε κάθε σημείο του \mathbf{P} αντιστοιχίζεται το σημείο του \mathbf{X} που ικανοποιεί το παρακάτω κριτήριο:

$$d(\bar{p}_i, X) = \min(\|\bar{x}_i - \bar{p}_i\|) = \min\left(\sqrt{(x_{xi} - x_{pi})^2 + (y_{xi} - y_{pi})^2 + (z_{xi} - z_{pi})^2}\right) \quad (\text{Εξ.4.3})$$

όπου,

$$\bar{p}_i = (x_{pi}, y_{pi}, z_{pi}) : \text{κάθε ένα σημείο του } P \text{ με } i = 1 \div N_p$$

$$\bar{x}_i = (x_{xi}, y_{xi}, z_{xi}) : \text{κάθε ένα σημείο του } X \text{ με } i = 1 \div N_x$$

Έστω \mathbf{Y} το σύνολο των σημείων που αντιστοιχούν στους εγγύτερους γείτονες του \mathbf{P} , δηλαδή:

$$Y = C(P, X) \quad (\text{Εξ.4.4})$$

Το κόστος υπολογισμού της συνάρτησης C , στη δυσμενέστερη περίπτωση, ισούται με $O(N_p N_x)$. Είναι προφανές ότι ο υπολογισμός των ευκλείδειων αποστάσεων που αντιστοιχούν σε όλους τους δυνατούς συνδυασμούς ζευγών σημείων είναι εξαιρετικά απαιτητικός. Για το λόγο αυτό εφαρμόζεται μία μέθοδος αναζήτησης που βασίζεται στη δημιουργία δένδρων δομών δεδομένων, συγκεκριμένης διάστασης (k-D tree). Η δημιουργία τέτοιων δομών βασίζεται στη διαίρεση μιας διάστασης σε k αριθμό διαστάσεων. Στην προκειμένη περίπτωση επιλέγεται $k=3$ και συνεπώς δημιουργείται μία τρισδιάστατη δομή δεδομένων ως εξής: δημιουργούνται διαδοχικά, επίπεδα παράλληλα στα βασικά επίπεδα του συστήματος (xy , yz , zx), τα οποία διέρχονται από σημεία του \mathbf{P} . Με τον τρόπο αυτό ο τρισδιάστατος χώρος διαιρείται σε επιμέρους παραλληλεπίπεδα (Zhang, 1992). Η διαδικασία τερματίζεται όταν δημιουργηθεί παραλληλεπίπεδο μέσα στο οποίο δεν υπάρχει κανένα σημείο. Με τον τρόπο αυτό περιορίζεται ο χώρος της αναζήτησης των εγγύτερων γειτόνων των σημείων.

Ο αλγόριθμος ICP σε επόμενο βήμα, υπολογίζει τον μετασχηματισμό στερεού σώματος εφαρμόζοντας τη μέθοδο του τετραδικού συστήματος Hamilton (Horn, 1988). Με βάση τη μέθοδο του Horn, ο πίνακας στροφής \mathbf{R} παραμετροποιείται μέσω μιας τετράδας στοιχείων ενός διανύσματος $\mathbf{q}_R = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T$. Αντίστοιχα, το διάνυσμα της μετάθεσης \mathbf{t} ορίζεται ως $\mathbf{q}_T = [q_4, q_5, q_6]^T$. Τελικώς, οι παράμετροι του μετασχηματισμού συμβολίζονται ως $\mathbf{q} = [\mathbf{q}_R | \mathbf{q}_T]^T$. Με βάση τα στοιχεία του τετραδικού συστήματος, η συνάρτηση του αθροίσματος των

τετραγώνων των υπολοίπων που θα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί γράφεται ως εξής:

$$f(\vec{q}) = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \|\vec{x}_i - R(\vec{q}_R) \cdot \vec{p}_i - \vec{q}_T\|^2 \quad (\text{Εξ.4.5})$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται το κέντρο βάρους για κάθε ένα από τα σημειοσύνολα \mathbf{P} , \mathbf{X} .

$$\vec{\mu}_P = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \vec{p}_i \quad \text{και} \quad \vec{\mu}_X = \frac{1}{N_x} \sum_{i=1}^{N_x} \vec{x}_i \quad (\text{Εξ.4.6})$$

Ο πίνακας μεταβλητότητας – συμμεταβλητότητας Σ_{PX} των δύο σημειοσυνόλων θα ισούται με:

$$\Sigma_{PX} = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} (\vec{p}_i - \vec{\mu}_P)(\vec{x}_i - \vec{\mu}_X)^T \quad (\text{Εξ.4.6})$$

Στη συνέχεια ορίζεται ένας αντισυμμετρικός πίνακας A , τα μη μηδενικά στοιχεία του οποίου σχηματίζουν το διάνυσμα Δ , ως εξής:

$$A_{ij} = (\Sigma_{PX} - \Sigma_{PX}^T)_{ij} \quad (\text{Εξ.4.7})$$

$$\Delta = [A_{23} \quad A_{31} \quad A_{12}] \quad (\text{Εξ.4.8})$$

Τελικά, σχηματίζεται ο συμμετρικός πίνακας Q , διαστάσεων 4×4 :

$$Q = \begin{bmatrix} tr(\Sigma_{PX}) & & & \Delta^T \\ \Delta & \Sigma_{PX} + \Sigma_{PX}^T - tr(\Sigma_{PX})I & & \end{bmatrix} \quad \text{όπου} \quad I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Εξ.4.9})$$

Τα στοιχεία του ιδιοδιανύσματος $\mathbf{q}_R = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T$, που αντιστοιχεί στη μέγιστη ιδιοτιμή του πίνακα Q , αποδεικνύεται ότι εκφράζουν τη βέλτιστη τιμή του πίνακα στροφής:

$$R = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 + q_2^2 - q_1^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 + q_3^2 - q_1^2 - q_2^2 \end{bmatrix} \quad (\text{Εξ.4.10})$$

Η βέλτιστη τιμή του διανύσματος της μετάθεσης υπολογίζεται ως εξής:

$$\vec{q}_T = \vec{\mu}_X - R(\vec{q}_R) \vec{\mu}_P \quad (\text{Εξ. 4.11})$$

Αφού υπολογιστούν οι παράμετροι του μετασχηματισμού, το νέφος σημείων **P** μετασχηματίζεται στο σύστημα αναφοράς του **X** κι επαναλαμβάνεται η διαδικασία έως ότου συγκλίνει ο αλγόριθμος. Ο Besl (1992) ως κριτήριο σύγκλισης χρησιμοποιεί ένα κατώφλι για το μέγεθος της μεταβολής του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων. Εναλλακτικά, ο Zhang (1992) προτείνει τον έλεγχο της ποσοστιαίας μεταβολής των καλύτερων τιμών των αγνώστων μεταξύ διαδοχικών επαναλήψεων. Συγκεκριμένα, αναφέρει ότι οι επαναλήψεις σταματούν όταν η ποσοστιαία μεταβολή των τιμών των αγνώστων είναι μικρότερη από 1%.

Οι Chen & Medioni (1994) προτείνουν μία σημαντική βελτίωση στη λειτουργία του ICP με στόχο την αποφυγή χονδροειδών σφαλμάτων στο στάδιο της επιλογής των ομολογών σημείων. Το κριτήριο της ελάχιστης απόστασης μεταξύ των σημείων, μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένες ομολογίες, αφού εξαρτάται από τις αρχικές σχετικές στροφές των δύο νεφών. Έτσι, αν τα δύο συστήματα αναφοράς έχουν μεγάλες στροφές μεταξύ τους, τότε το πλησιέστερο σημείο ενός νέφους σε σημείο του άλλου, μπορεί να μην είναι το ομόλογο. Για το λόγο αυτό προτείνεται ο ορισμός εφαπτομενικού επιπέδου σε κάθε ένα σημείο του **X**. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι αποστάσεις κάθε ενός σημείου του **P** από τα επίπεδα αυτά. Έτσι, οι ομολογίες των σημείων προκύπτουν ελαχιστοποιώντας την απόσταση σημείου από επίπεδο (point-to-tangent plane) αντί σημείου από σημείο. Τέλος, ο Zhang (1992) προτείνει να τίθεται ένα όριο D για τη μέγιστη αποδεκτή απόσταση που υπολογίζεται ώστε να θεωρούνται δύο σημεία ομόλογα.

4.2. Ελαχιστοτετραγωνική Μέθοδος Συνένωσης

Η λειτουργία της ελαχιστοτετραγωνικής μεθόδου συνένωσης (Least squares 3D surface and curve matching, LS3D, Grün & Akca, 2005) βασίζεται στη λογική της ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης ψηφιακών εικόνων και αναφέρεται ως συνταύτιση επιφανειών (surface matching). Οι τρισδιάστατες επιφάνειες δημιουργούνται από νέφη σημείων που έχουν προκύψει από σάρωση, φωτογραμμετρικές μεθόδους ή άλλες τεχνικές μέτρησης επιφανειών. Η προτεινόμενη μέθοδος υπολογίζει τις παραμέτρους του μετασχηματισμού μεταξύ των συστημάτων αναφοράς των τρισδιάστατων επιφανειών, εφαρμόζοντας τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Η ποσότητα που ελαχιστοποιείται κατά τη συνόρθωση είναι το άθροισμα των τετραγώνων των αποστάσεων μεταξύ των τρισδιάστατων επιφανειών. Μπορεί να υποστηριχτεί ότι η ελαχιστοτετραγωνική μέθοδος αντιμετωπίζει το πρόβλημα της συνένωσης στην γενική του περίπτωση για δύο λόγους. Καταρχήν, ο μετασχηματισμός, του οποίου οι παράμετροι υπολογίζονται, είναι η γενική περίπτωση τρισδιάστατου μετασχηματισμού ομοιότητας με 7 βαθμούς ελευθερίας. Ο ένας επιπλέον βαθμός ελευθερίας αφορά την μεταβολή της κλίμακας. Επομένως, η εφαρμογή της μεθόδου δεν περιορίζεται σε δεδομένα

σάρωσης, όπου η καταγραφή γίνεται σε πραγματική κλίμακα. Επίσης, η μέθοδος δεν περιορίζεται στο μετασχηματισμό ενός νέφους σημείων στο σύστημα αναφοράς ενός άλλου. Αντίθετα, μπορεί να μετασχηματίσει τρισδιάστατα δεδομένα οποιασδήποτε μορφής (ευθείες, καμπύλες, επιφάνειες) χωρίς να απαιτείται η μετάβαση σε σημειακά δεδομένα, όπως στην περίπτωση του ICP. Τέλος και πριν από την αναλυτική περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου της ελαχιστοτετραγωνικής συνένωσης, θα πρέπει να επισημανθεί ότι πρόκειται για μία επαναληπτική μέθοδο, με ό,τι αυτό συνεπάγεται για την ακτίνα σύγκλισης σε σχέση με την εκτίμηση αρχικών τιμών για τις άγνωστες παραμέτρους.

Θεωρώντας $f(x, y, z)$ και $g(x, y, z)$ δύο ομόλογες επιφάνειες ενός αντικειμένου σε δύο διαφορετικά συστήματα αναφοράς και $e(x, y, z)$ το διάνυσμα του θορύβου, τότε θα ισχύει:

$$f(x, y, z) - e(x, y, z) = g(x, y, z) \quad (\text{Εξ.4.12})$$

Η παραπάνω εξίσωση ικανοποιείται ελαχιστοποιώντας, κατά τη συνόρθωση, το άθροισμα των τετραγώνων των αποστάσεων μεταξύ των δύο επιφανειών:

$$\sum \|d\|^2 = \min \Rightarrow [dd] = \min \quad (\text{Εξ.4.13})$$

Η γεωμετρική σχέση μεταξύ των δύο επιφανειών, περιγράφεται μέσω ενός τρισδιάστατου μετασχηματισμού ομοιότητας (3D similarity transform) με 7 παραμέτρους (Εξ. 4.14). Ο Grün επισημαίνει ότι είναι δυνατή η χρήση οποιουδήποτε μετασχηματισμού ανάλογα με τις παραμορφώσεις που αναμένονται μεταξύ των δύο επιφανειών.

$$x' = mRx + t \Rightarrow \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = m \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} \quad (\text{Εξ.4.14})$$

Στην απλούστερη περίπτωση, όπου η ελαχιστοτετραγωνική μέθοδος εφαρμόζεται μεταξύ δύο νεφών σημείων, οι εξισώσεις παρατήρησης θα είναι οι εξισώσεις κατά τις τρεις συνιστώσες, του παραπάνω μετασχηματισμού. Αυτές δεν είναι γραμμικές ως προς τις άγνωστες παραμέτρους του μετασχηματισμού κι επομένως απαιτείται η γραμμικοποίησή τους κατά Taylor:

$$\begin{aligned} dx &= dt_x + a_{10}dm + a_{11}d\omega + a_{12}d\phi + a_{13}dk \\ dy &= dt_y + a_{20}dm + a_{21}d\omega + a_{22}d\phi + a_{23}dk \\ dz &= dt_z + a_{30}dm + a_{31}d\omega + a_{32}d\phi + a_{33}dk \end{aligned} \quad (\text{Εξ.4.15})$$

Αντίθετα, στην πιο σύνθετη περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου, μεταξύ επιφανειών, αναπτύσσεται η εξίσωση 4.12 κατά Taylor, διατηρώντας του όρους πρώτης τάξης:

$$f(x, y, z) - e(x, y, z) = g^o(x, y, z) + \frac{\partial g^o(x, y, z)}{\partial x} dx + \frac{\partial g^o(x, y, z)}{\partial y} dy + \frac{\partial g^o(x, y, z)}{\partial z} dz \quad (\text{Εξ.4.16})$$

Χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο συμβολισμό,

$$g_x = \frac{\partial g^o(x, y, z)}{\partial x}, \quad g_y = \frac{\partial g^o(x, y, z)}{\partial y}, \quad g_z = \frac{\partial g^o(x, y, z)}{\partial z} \quad (\text{Εξ.4.17})$$

και συνδυάζοντας τις εξισώσεις 4.15 και 4.16, προκύπτει τελικώς η γραμμικοποιημένη εξίσωση παρατήρησης:

$$\begin{aligned} -e(x, y, z) = & g_x dt_x + g_y dt_y + g_z dt_z + (g_x a_{10} + g_y a_{20} + g_z a_{30}) dm + \\ & + (g_x a_{11} + g_y a_{21} + g_z a_{31}) d\omega + (g_x a_{12} + g_y a_{22} + g_z a_{32}) d\varphi + \\ & + (g_x a_{13} + g_y a_{23} + g_z a_{33}) d\kappa - (f(x, y, z) - g^o(x, y, z)) \end{aligned} \quad (\text{Εξ.4.18})$$

Ο υπολογισμός των παραμέτρων του μετασχηματισμού, προκύπτει από τη λύση του συστήματος:

$$A dx = dl - u \quad (\text{Εξ.4.19})$$

όπου,

$$dx = [dt_x \quad dt_y \quad dt_z \quad dm \quad d\omega \quad d\varphi \quad d\kappa]^T$$

$$dl = f(x, y, z) - g^o(x, y, z)$$

Επόμενο βήμα της ελαχιστοτετραγωνικής μεθόδου συνένωσης είναι η απόδοση βαρών στις άγνωστες παραμέτρους του μετασχηματισμού. Αυτή η επέκταση δίνει το πλεονέκτημα ελέγχου των τιμών των αγνώστων που υπολογίζονται κατά τη συνόρθωση (Grün, 1986). Πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται ότι σε περιπτώσεις που οι αρχικές τιμές και η κατανομή των δεδομένων δεν είναι καλές, υπάρχει κίνδυνος η λύση να συγκλίνει σε λάθος σημείο. Το πρόβλημα αυτό αφορά κυρίως την παράμετρο της κλίμακας m , η τιμή της οποίας μπορεί να υπολογιστεί λάθος ακόμα και σε περιπτώσεις δεδομένων με ίδια κλίμακα. Η απόδοση βαρών στους αγνώστους γίνεται με βάση την διαθέσιμη a priori γνώση για το μοντέλο και στοχεύει στην δέσμευση των τιμών τους. Έτσι, όταν τίθεται άπειρο βάρος σε μία παράμετρο τότε η τιμή της δεσμεύεται απόλυτα και ο υπολογισμός της εξαιρείται από τη συνόρθωση αφού λαμβάνεται ως σταθερή. Αντίθετα, όταν τίθεται μηδενικό βάρος, τότε η τιμή της

παραμέτρου ποικίλει χωρίς καμία δέσμευση. Με βάση τα παραπάνω, σχηματίζεται το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων παρατήρησης:

$$Idx = dl_b - u_b \quad (\text{Εξ.4.20})$$

όπου,

dl_b : το «φανταστικό» διάνυσμα των μετρήσεων των αγνώστων παραμέτρων

I : μοναδιαίος πίνακας

Η ελαχιστοτετραγωνική λύση του συστήματος που προκύπτει από το συνδυασμό των εξισώσεων 4.19 και 4.20, υπολογίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$dx = (A^T P A + P_b)^{-1} (A^T P dl + P_b dl_b) \quad (\text{Εξ.4.21})$$

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{u^T P u + u_b^T P_b u_b}{r}$$

Η σύγκλιση της λύσης στο γενικό ελάχιστο της εξίσωσης 4.13 εξασφαλίζεται μόνο με την επιλογή προσεγγιστικών τιμών των αγνώστων παραμέτρων, στην πρώτη επανάληψη, που είναι κοντά στις πραγματικές τιμές. Ο τερματισμός των επαναλήψεων γίνεται όταν το διάνυσμα των διορθώσεων των αγνώστων dx υπολογίζεται μικρότερο από ένα κατώφλι.

Από όλα τα παραπάνω, φαίνεται ότι η ελαχιστοτετραγωνική μέθοδος υπερέχει του αλγορίθμου ICP, ως προς τον αριθμό των απαιτούμενων επαναλήψεων κι άρα ως προς το χρόνο εκτέλεσης. Από την άλλη πλευρά, ο ICP έχει σαφώς μικρότερες απαιτήσεις για καλές αρχικές τιμές.

4.3. Συνένωση Νεφών από Εικόνες

Τα τελευταία χρόνια, παρατηρείται ολοένα αυξανόμενη ζήτηση για φωτορεαλιστικά μοντέλα, δηλαδή για τρισδιάστατα μοντέλα αντικειμένων με απεικόνιση πραγματικής υφής. Η απόκτηση τέτοιων μοντέλων είναι δυνατή μέσω συστημάτων τρισδιάστατων σαρωτών laser με προσαρμοσμένες φωτογραφικές μηχανές υψηλής ανάλυσης ή σαρωτών δομημένου φωτός (structure light scanners). Τα παραπάνω συστήματα, εκτός από τη σάρωση του αντικειμένου, έχουν τη δυνατότητα ταυτόχρονης λήψης φωτογραφιών, με αποτέλεσμα κάθε ένα σημείο του νέφους να αντιστοιχίζεται με ένα εικονοστοιχείο της εικόνας. Οι τεχνολογίες αυτές άνοιξαν το δρόμο για την ανάπτυξη μεθόδων συνένωσης νεφών που βασίζονται στην πληροφορία των εικόνων. Οι «εικονιστικές» μέθοδοι έχουν στόχο την πλήρη αυτοματοποίηση της διαδικασίας της συνένωσης, αφού οι περισσότερες δεν απαιτούν αρχικές τιμές για τη σχετική θέση των νεφών, όπως ο αλγόριθμος ICP.

Παράλληλα, φαίνεται να έχουν καλύτερα αποτελέσματα από τις κλασικές μεθόδους, στη συνένωση νεφών σημείων με μικρά ποσοστά επικάλυψης. Πιο συγκεκριμένα, έχουν παρουσιαστεί μέθοδοι ικανές να διαχειριστούν σαρώσεις με επικαλύψεις της τάξεως του 20% με 30% (Roth, 1999) ενώ υπενθυμίζεται ότι η λειτουργία του ICP θεωρεί τη μία σάρωση υποσύνολο της άλλης. Σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης των εικόνων του νέφους (texture map) είναι ότι αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της συμμετρίας του σχήματος ορισμένων αντικειμένων (σφαίρες, κύβοι κλπ.). Η εφαρμογή των κλασικών μεθόδων σε συμμετρικά αντικείμενα δημιουργεί ασάφειες που δυσχεραίνουν ή ακόμα και εμποδίζουν τη συνένωση. Παρακάτω, παρουσιάζονται οι αρχές λειτουργίας εικονιστικών μεθόδων συνένωσης που έχουν παρουσιαστεί την τελευταία δεκαετία. Η κατανόηση της προσέγγισης που υιοθετεί η κάθε μία είναι σημαντική, αφού η ανάπτυξη μιας τέτοιας εικονιστικής μεθόδου αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής.

Ο Roth (1999) παρουσιάζει μία πλήρως αυτοματοποιημένη μέθοδο συνένωσης νεφών σημείων, ικανή να διαχειριστεί συμμετρικά αντικείμενα και χωρίς καμία απαίτηση για αρχικές τιμές. Απαραίτητα δεδομένα για την εφαρμογή της, εκτός από τα δύο νέφη σημείων, είναι δύο «εικόνες έντασης» (intensity images), μία για κάθε σάρωση. Οι εικόνες έντασης, οι οποίες στα επόμενα θα αναφέρονται απλά ως εικόνες, διαφέρουν από τις κλασικές εικόνες αφού στην ουσία αναπαριστούν την ένταση της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας laser και καταγράφονται στις συχνότητες του σαρωτή. Συνεπώς, η μέθοδος του Roth δεν απαιτεί την χρήση φωτογραφικής μηχανής προσαρμοσμένης στο σαρωτή. Το πρώτο στάδιο της μεθόδου αφορά τον εντοπισμό ομόλογων σημείων πάνω στις εικόνες και η αυτοματοποίησή του επιτυγχάνεται με την εφαρμογή μεθόδων ψηφιακής συνταύτισης χαρακτηριστικών. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται ένας τελεστής ανίχνευσης γωνιών (corner detector), ο οποίος εντοπίζει τις θέσεις τοπικών μεγίστων της συνάρτησης έντασης της ακτινοβολίας. Ο Roth επισημαίνει ότι ο εντοπισμός ικανού αριθμού σημείων για τη συνέχιση της διαδικασίας, εξαρτάται σημαντικά από την ύπαρξη υψής στο εκάστοτε αντικείμενο. Τα σημεία ενδιαφέροντος, που εξάγονται από την κάθε μία εικόνα ξεχωριστά, συνδέονται μονοσήμαντα με τρισδιάστατα σημεία του αντίστοιχου νέφους. Η σχέση αυτή προκύπτει άμεσα αφού η πληροφορία, τόσο της εικόνας όσο και του νέφους, καταγράφεται ταυτόχρονα από το ίδιο σημείο, το δέκτη του σαρωτή. Κάθε τριάδα σημείων του νέφους ορίζει ένα τρίγωνο στο χώρο κι έτσι είναι δυνατός ο υπολογισμός ενός τρισδιάστατου μετασχηματισμού από μία ομολογία τέτοιων τριγώνων. Η θεώρηση όλων των δυνατών ομολογιών τριγώνων και ο υπολογισμός των αντίστοιχων μετασχηματισμών, είναι εξαιρετικά απαιτητική διαδικασία από πλευράς υπολογιστικού κόστους. Έτσι, εφαρμόζεται τριγωνισμός Delaunay στα σημεία του νέφους και στη συνέχεια λαμβάνονται υπόψη οι επιφάνειες των τριγώνων ως πιθανές ομολογίες. Η διαδικασία του τριγωνισμού περιορίζει το χώρο αναζήτησης των ομολογιών, αφού τα δημιουργούμενα τρίγωνα είναι στην ουσία ένα τμήμα του συνόλου των τριγώνων που μπορούν να δημιουργηθούν από όλα τα ομόλογα σημεία του νέφους.

Τελικώς, η εύρεση των ομολογιών των τριγώνων γίνεται με εφαρμογή της δέσμευσης της «στερεότητας» (rigidity constraint), η οποία εκφράζει τη διατήρηση του μήκους των ακμών των τριγώνων μετά την εφαρμογή του μετασχηματισμού στερεού σώματος. Έτσι, για κάθε ένα τρίγωνο δημιουργείται ένα διάνυσμα με τα μήκη των πλευρών του σε φθίνουσα σειρά. Η σύγκριση των διανυσμάτων αυτών έχει ως αποτέλεσμα την εύρεση των ομολογιών μεταξύ των δύο σαρώσεων, ως τρίγωνα με ίσες πλευρές. Κάθε μία ομολογία τριγώνων δίνει 3 ομολογίες σημείων, οι οποίες ελέγχονται ακολούθως ως προς τη συμβατότητά τους στο μοντέλο του μετασχηματισμού. Ο πρώτος έλεγχος προϋποθέτει τον υπολογισμό των κάθετων διανυσμάτων (surface normals) στην επιφάνεια γύρω από κάθε σημείο. Οι συνολικές γωνιακές διαφορές των κάθετων διανυσμάτων των κόμβων ομολογών τριγώνων θα πρέπει να είναι ίσες. Έτσι, αν κάποιο από τα τρία ζεύγη σημείων δεν ικανοποιεί το παραπάνω, τότε η ομολογία των τριγώνων θεωρείται εσφαλμένη και απορρίπτεται. Ο δεύτερος έλεγχος βασίζεται στον υπολογισμό των αποστάσεων κάθε ενός σημείου των νεφών από τα υπόλοιπα. Έτσι, για κάθε σημείο δημιουργείται ένα διάνυσμα με τις αποστάσεις αυτές σε φθίνουσα σειρά. Δύο ομολογα σημεία οφείλουν να έχουν ίδια διανύσματα κι επομένως όσες ομολογίες δεν ικανοποιούν το παραπάνω, απορρίπτονται. Μετά την εκτέλεση αυτών των ελέγχων απομένουν μόνο ορθές ομολογίες σημείων, οι οποίες ανά τρεις δίνουν μία ομολογία τριγώνων. Για κάθε μία ομολογία τριγώνων υπολογίζεται ο μετασχηματισμός στερεού σώματος, ο οποίος μετά εφαρμόζεται στο πρώτο νέφος σημείων ώστε να μετασχηματιστεί στο σύστημα αναφοράς του δεύτερου. Έπειτα, μετράται το πλήθος των σημείων του δεύτερου νέφους που αντιστοιχούν σε σημεία του πρώτου. Τελικώς, επιλέγεται ο μετασχηματισμός εκείνος, που η εφαρμογή του οδηγεί σε περισσότερες αντιστοιχίες σημείων. Η παραπάνω διαδικασία ακολουθεί τη λογική της μεθόδου RANSAC (Fischler & Bolles, 1981) με στόχο των εντοπισμό χονδροειδών σφαλμάτων στις ομολογίες.

Μία δεύτερη εικονιστική μέθοδος (Van Gool et al., 2002) αφορά στη συνένωση τμημάτων αντικειμένου με απόδοση πραγματικής υφής, (textured model) που έχουν προκύψει από σαρωτή δομημένου φωτός. Πρόκειται για ακόμη μία αυτοματοποιημένη μέθοδο, η οποία βασίζεται στην εύρεση ομολογών επιφανειών πάνω στις εικόνες. Αναλυτικότερα, στο πρώτο στάδιο εξάγονται από τις εικόνες επιφανειακά χαρακτηριστικά που διατηρούνται αναλλοίωτα σε αφινικές παραμορφώσεις. Τα χαρακτηριστικά είναι στην ουσία μικρές γειτονιές σημείων (viewpoint invariant neighborhoods) και κάθε ένα χαρακτηριστικό συνοδεύεται από ένα διάνυσμα ιδιοτήτων, ώστε να είναι δυνατή η συνταύτιση. Ο Van Gool επισημαίνει ότι η χρήση επιφανειακών χαρακτηριστικών έχει καλύτερα αποτελέσματα στη συνένωση νεφών σημείων με μικρές επικαλύψεις. Αφού πραγματοποιηθεί η συνταύτιση των χαρακτηριστικών, επιλέγεται ένα σημείο κάθε γειτονιάς, π.χ. το κεντρικό εικονοστοιχείο. Έτσι γίνεται η μετάβαση από ομολογίες επιφανειών σε ομολογίες σημείων στις εικόνες και έπειτα στα νέφη. Οι παράμετροι του μετασχηματισμού στερεού σώματος υπολογίζονται ελαχιστοποιώντας το άθροισμα των

αποστάσεων των ομολογών σημείων, εφαρμόζοντας τη μέθοδο του τετραδικού συστήματος του Hamilton (Horn, 1987).

Λίγα χρόνια αργότερα παρουσιάζεται μία μέθοδος που βασίζεται στη δημιουργία εικόνων spin με πραγματική υφή (texture spin images, TSI) (Brusco et al., 2005) και πετυχαίνει την αυτοματοποίηση του πρώτου σταδίου αλγορίθμων, όπως ο ICP. Με άλλα λόγια, η μέθοδος αυτή δεν αυτοματοποιεί ολόκληρη τη διαδικασία της συνένωσης αλλά τα αποτελέσματά της, τα οποία εξάγονται αυτόματα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αρχικές τιμές στην εφαρμογή του ICP. Η κατανόηση της μεθόδου απαιτεί πρώτα απ' όλα τον ορισμό των εικόνων spin. Η δημιουργία τους βασίζεται στον ορισμό προσανατολισμένων σημείων (oriented points) πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου. Τέτοια σημεία προσδιορίζονται από τη θέση τους στην επιφάνεια, \mathbf{p} και από το διάνυσμα \mathbf{n} , που είναι κάθετο στην επιφάνεια στη θέση αυτή. Έτσι, κάθε προσανατολισμένο σημείο ορίζει ένα τοπικό σύστημα αναφοράς μέσω του επιπέδου που εφάπτεται στην επιφάνεια κι είναι κάθετο στο διάνυσμα \mathbf{n} . Κάθε σημείο του νέφους x , μπορεί να προσδιοριστεί από τις συντεταγμένες του στο τοπικό σύστημα αναφοράς που περιγράφηκε. Ορίζονται δύο συντεταγμένες όπου α , είναι η κάθετη απόσταση του σημείου x από το διάνυσμα \mathbf{n} και β , η κάθετη απόσταση του x από το εφαπτόμενο επίπεδο. Παράλληλα σε κάθε σημείο του νέφους αντιστοιχεί και μία τιμή χρώματος $I(x)$ από την εικόνα (texture map). Για τη δημιουργία των εικόνων TSI, η συνάρτηση χρώματος διαιρείται σε ίσα διαστήματα τόνων του γκρι l_i , $i=1,2,\dots,L$. Άρα κάθε ένα σημείο περιγράφεται από μία τριάδα συντεταγμένων (α, β, l_i) :

$$TSI(x) \rightarrow (\alpha, \beta, l_i) = \left(\sqrt{\|x - p\|^2 - (n \cdot (x - p))^2}, n \cdot (x - p), l_i \right) \quad (\text{Εξ. 4.22})$$

Οι εικόνες TSI συνιστούν ένα μετασχηματισμό 3D σε 2D, ο οποίος περιγράφει το σχήμα και το χρώμα τρισδιάστατων επιφανειών ως εικόνες δύο διαστάσεων. Οι παραπάνω εικόνες δημιουργούνται από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας, ανεξάρτητα από τη θέση και της στροφή αυτής στο χώρο. Επομένως, οι εικόνες TSI έχουν την ιδιότητα να παραμένουν αμετάβλητες στην εφαρμογή μετασχηματισμών στερεού σώματος κι έτσι ομολογα σημεία στα δύο νέφη θα έχουν, αν όχι ίδιες, παρόμοιες εικόνες TSI. Συνεπώς, η συνένωση βασίζεται στην εύρεση ομολογών σημείων, αναζητώντας τις πιο «κοντινές» εικόνες TSI στα δύο νέφη.

Ο Sagawa (2007) παρουσίασε μία διαφορετική μέθοδο συνένωσης νεφών, που έχουν αποκτηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να συνοδεύονται από την αντίστοιχη απεικόνιση υφής (texture map). Η μέθοδος βασίζεται στον υπολογισμό χαρακτηριστικών υφής και σχήματος για κάθε ένα σημείο του τρισδιάστατου νέφους (Sagawa et al., 2007) και στην εύρεση ομολογών σημείων με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά ώστε να υπολογιστούν οι παράμετροι του μετασχηματισμού. Ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών απαιτεί πρώτα τον ορισμό τριών ομόκεντρων σφαιρών,

διαφορετικής ακτίνας, γύρω από κάθε κόμβο. Η χρήση σφαίρας για την περιγραφή των χαρακτηριστικών του σημείου, αποδεικνύεται πλεονεκτικότερη από την χρήση του κάθετου διανύσματος (normal), γιατί παρουσιάζει μικρότερη ευαισθησία στην ύπαρξη θορύβου στο νέφος. Οι διαφορές των τριών σφαιρών, ορίζουν τρία θεματικά επίπεδα (layers), στα οποία γίνεται ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών για κάθε ένα κόμβο. Αναλυτικότερα, τα χαρακτηριστικά της υψής κάθε ενός κόμβου προκύπτουν από την εικόνα ως εξής: εντοπίζεται πάνω στην εικόνα η περιοχή που αντιστοιχεί σε κάθε ένα από τα τρία θεματικά επίπεδα και υπολογίζεται το ιστόγραμμα χρώματος αυτής. Οι τιμές του ιστογράμματος προκύπτουν από το χρωματικό μοντέλο CIE. Έτσι, σε κάθε θέση του ιστογράμματος αντιστοιχεί μία τιμή $p=(L, a, b)$ όπου L, a, b είναι συναρτήσεις των τριών βασικών χρωμάτων (RGB) αντίστοιχα. Οι τιμές του ιστογράμματος κάθε θεματικού επιπέδου προκύπτουν από τον αριθμό των εικονοστοιχείων μέσα στην περιοχή της εικόνας, που αντιστοιχούν σε κάθε θέση p_i . Στη συνέχεια, το ιστόγραμμα μετατρέπεται σε ζεύγη (p_i, w_i) τα οποία καλούνται φασματική υπογραφή του θεματικού επιπέδου (color signature). Επομένως, μετά την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας, κάθε ένα σημείο του νέφους συνοδεύεται από μία πλήρη περιγραφή της υψής της περιοχής που εντοπίζεται στην εικόνα. Επόμενο βήμα είναι η επιλογή των κόμβων που έχουν «ισχυρά χαρακτηριστικά» κι άρα έχουν επαρκή πληροφορία για την εύρεση του ομολόγου τους στο άλλο νέφος. Ισχυροί θεωρούνται οι κόμβοι που οι φασματικές υπογραφές των τριών θεματικών επιπέδων τους, παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους. Τελικώς, η εύρεση των ομολογιών γίνεται υπολογίζοντας την απόσταση των διανυσμάτων των χαρακτηριστικών μεταξύ των ισχυρών κόμβων και ως ομόλογα επιλέγονται τα κοντινότερα. Από τις ομολογίες των σημείων είναι δυνατός ο υπολογισμός των παραμέτρων του μετασχηματισμού, ο οποίος γίνεται επαναληπτικά ακολουθώντας τη λογική του αλγορίθμου ICP, ώστε να επιλεγεί η βέλτιστη λύση.

Μία ακόμα μέθοδος συνένωσης βασίστηκε στην εξαγωγή χαρακτηριστικών περιοχών στις εικόνες, που διατηρούνται αναλλοίωτες σε μεταβολές του σημείου λήψης (Wu et al., 2008). Οι περιοχές αυτές ονομάστηκαν VIP (Viewpoint Invariant Patches) και η πληροφορία του διανύσματος των ιδιοτήτων τους επιτρέπει τον υπολογισμό του τρισδιάστατου μετασχηματισμού από μία μόνο ομολογία. Επομένως, η φύση των VIP επιτρέπει τον προσδιορισμό του τρισδιάστατου μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ δύο νεφών που έχουν προκύψει από πολύ διαφορετικές θέσεις σάρωσης. Είναι προφανές ότι η εφαρμογή κι αυτής της μεθόδου απαιτεί νέφη σημείων στα οποία έχει αποδοθεί υφή από εικόνες (textured models). Αρχικά προσδιορίζονται τα επαπτόμενα επίπεδα στην επιφάνεια του μοντέλου στη θέση κάθε κόμβου και τα κάθετα διανύσματα (normals) στα επίπεδα αυτά. Στη συνέχεια, το τμήμα της εικόνας (texture map) που αντιστοιχεί σε κάθε κόμβο, προβάλλεται ορθά μέσω του κάθετου διανύσματος. Οι ορθές προβολές περιοχών της εικόνας (ortho texture patches) χρησιμοποιούνται για να αποφασιστεί αν ο εκάστοτε κόμβος αντιστοιχεί

σε χαρακτηριστικό σημείο του νέφους ή όχι. Το παραπάνω γίνεται εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο SIFT (Lowe, 1999, 2004) στις ορθές προβολές της εικόνας. Μετά την εφαρμογή του SIFT προκύπτουν ομολογες περιοχές VIP της εικόνας και ομολογοί κόμβοι στα νέφη. Κάθε μία περιοχή συνοδεύεται από το διάνυσμα των ιδιοτήτων της που είναι της μορφής (x, σ, n, d, s) όπου:

- x είναι η θέση του κόμβου
- σ το μέγεθος της περιοχής (που προκύπτει από την εφαρμογή του SIFT)
- n το κάθετο διάνυσμα του εφαπτόμενου επιπέδου
- d το διάνυσμα του προσανατολισμού της περιοχής VIP
- s το διάνυσμα των ιδιοτήτων που δημιουργείται κατά την εφαρμογή του SIFT

Κάθε περιοχή VIP περιγράφεται αναλυτικά από τα παραπάνω στοιχεία του διανύσματος των ιδιοτήτων κι επομένως από κάθε μία ομολογία είναι δυνατός ο υπολογισμός ενός τρισδιάστατου μετασχηματισμού ομοιότητας. Έστω μία ομολογία περιοχών VIP $(x_1, \sigma_1, n_1, d_1, s_1)$ και $(x_2, \sigma_2, n_2, d_2, s_2)$, η σχέση κλίμακας μεταξύ τους δίνεται από:

$$\sigma_s = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \quad (\text{Εξ. 4.23})$$

Η σχετική στροφή R_s και η μετάθεση T_s θα πρέπει να ικανοποιούν τις παρακάτω εξισώσεις:

$$(n_1, d_1, d_1 \times n_1) R_s = (n_2, d_2, d_2 \times n_2) \quad (\text{Εξ. 4.24})$$

$$T_s = x_1 - \sigma_s R_s x_2 \quad (\text{Εξ. 4.25})$$

Επομένως, κάθε ομολογία περιοχών VIP και κατ' επέκταση κάθε ομολογία τρισδιάστατων σημείων, προσδιορίζουν ένα μετασχηματισμό ομοιότητας με παραμέτρους (σ_s, R_s, T_s) . Ο προσδιορισμός του βέλτιστου μετασχηματισμού μεταξύ των δύο νεφών γίνεται εφαρμόζοντας τη μέθοδο RANSAC (Fischler & Bolles, 1980). Αναλυτικότερα, για κάθε μία ομολογία υπολογίζεται ένας μετασχηματισμός και στη συνέχεια μετριέται το πλήθος των ομολογιών που συμφωνούν με το υπολογισμένο μοντέλο. Τελικά, εντοπίζεται ο μετασχηματισμός με τον οποίο συμφωνεί το μεγαλύτερο πλήθος ομολογιών και στη συνέχεια επαναυπολογίζονται οι παράμετροί του από το σύνολο των ομολογιών αυτών.

Όλες οι μέθοδοι που περιγράφηκαν παραπάνω, απαιτούν την σάρωση των αντικειμένων και την ταυτόχρονη λήψη εικόνων για τη δημιουργία νεφών με πραγματική υφή (textured models). Η συνένωση των νεφών βασίζεται στην εύρεση ομολογών σημείων πάνω στις εικόνες με τεχνικές αυτόματης συνταύτισης. Στη βιβλιογραφία παρουσιάζεται μία διαφορετική προσέγγιση του προβλήματος της συνένωσης βασισμένη σε εικόνες (Image Based Registration, IBR) (Manasir & Fraser, 2006). Η

μέθοδος χρησιμοποιεί τα δεδομένα από ένα σύστημα σαρωτή laser, στην κορυφή του οποίου είναι στερεωμένη μία φωτογραφική μηχανή. Επομένως, χρησιμοποιούνται και πάλι δύο νέφη σημείων και δύο εικόνες αλλά με διαφορετικό τρόπο από πριν. Αρχικά, βαθμονομείται η φωτογραφική μηχανή και αποκαθίσταται ο εσωτερικός προσανατολισμός των εικόνων. Το επόμενο στάδιο αφορά τον προσδιορισμό της σχέσης των συστημάτων αναφοράς του σαρωτή (X,Y,Z) και της μηχανής (x,y,z). Αυτό γίνεται υπολογίζοντας τους εξωτερικούς προσανατολισμούς των εικόνων στο σύστημα αναφοράς του σαρωτή, μέσω της συνθήκης συγγραμμικότητας. Το στάδιο αυτό εκτελείται αυτόματα αν έχουν τοποθετηθεί στο αντικείμενο ειδικοί στόχοι υψηλής ανακλαστικότητας, οι οποίοι εντοπίζονται αυτόματα τόσο στο νέφος όσο και στις εικόνες. Εναλλακτικά, επιλέγονται χειροκίνητα σημεία της εικόνας και του νέφους για την αποκατάσταση του εξωτερικού προσανατολισμού. Στη συνέχεια γίνεται η αποκατάσταση του σχετικού προσανατολισμού των εικόνων μέσω της εξίσωσης συνεπιπεδότητας. Το στάδιο του σχετικού προσανατολισμού μπορεί να αυτοματοποιηθεί αν εφαρμοστούν τεχνικές συνταύτισης εικόνας. Το παραπάνω προτείνεται από τους δημιουργούς της μεθόδου, χωρίς όμως οι ίδιοι να το έχουν συμπεριλάβει στη διαδικασία. Τέλος, ο μετασχηματισμός στερεού σώματος μεταξύ των δύο νεφών προκύπτει από τον συνδυασμό του σχετικού προσανατολισμού των εικόνων και της σχετικής θέσης των συστημάτων αναφοράς του σαρωτή και της μηχανής. Η παραπάνω διαδικασία αποτελεί μία διαφορετική πρόταση συνένωσης νεφών σημείων, η οποία όμως είναι σαφώς λιγότερο αυτοματοποιημένη απ' ό,τι οι προηγούμενες. Επίσης, στην εφαρμογή της μεθόδου τίθενται περισσότεροι περιορισμοί όσον αφορά τις επικαλύψεις των εικόνων και τη γεωμετρία της λήψης τους, ώστε να είναι δυνατή η αποκατάσταση του σχετικού προσανατολισμού. Από την άλλη πλευρά, η ανάγκη για μεγάλες επικαλύψεις δεν ισχύει για τα δύο νέφη, όπως συμβαίνει στην εφαρμογή του αλγορίθμου του ICP.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, οι βασικές μέθοδοι συνένωσης νεφών σημείων είναι ο αλγόριθμος του επαναληπτικά κοντινότερου σημείου και η ελαχιστοτετραγωνική μέθοδος. Το βασικότερο μειονέκτημά τους είναι η απαίτηση που θέτουν για εκτίμηση αρχικών τιμών, η οποία επιβάλλει την παρέμβαση του χρήστη και εμποδίζει την πλήρη αυτοματοποίηση της διαδικασίας. Αυτό, σε συνδυασμό με την ανάγκη αντιμετώπισης του προβλήματος της συμμετρίας, είναι ο βασικός λόγος ανάπτυξης των «εικονιστικών» μεθόδων. Μολονότι η περιγραφή των τελευταίων ήταν αρκετά συνοπτική, είναι φανερό ότι οι «εικονιστικές» μέθοδοι παρουσιάζουν αρκετές διαφορές μεταξύ τους και δεν λειτουργούν βάση μίας κοινής προσέγγισης. Η αιτία είναι ότι αυτές οι μέθοδοι εμφανίστηκαν τα τελευταία χρόνια κι άρα αποτελούν ενεργό ερευνητικό αντικείμενο, με πολλά περιθώρια βελτίωσης και δυνατότητες εξέλιξης. Αυτά τα δύο στοιχεία αποτελούν το λόγο εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η σύγκριση της προτεινομένης μεθόδου με τις προαναφερθείσες γίνεται στο τελευταίο κεφάλαιο, προκειμένου να επισημανθούν οι βελτιώσεις που εισάγονται.

5

Παρουσίαση του Αλγορίθμου

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αυτοματοποίηση της διαδικασίας της συνένωσης νεφών σημείων. Για το σκοπό αυτό, σχεδιάστηκε ένας αλγόριθμος, ο οποίος εκτελεί μία εναλλακτική μέθοδο συνένωσης νεφών σημείων, η οποία δεν απαιτεί καμία παρέμβαση του χρήστη. Η προτεινόμενη μέθοδος ανήκει στην κατηγορία των «εικονιστικών» μεθόδων, που αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, αφού κάνει χρήση εικόνων του αντικειμένου που έχει σαρωθεί. Επομένως, η εφαρμογή της μεθόδου απαιτεί τη χρήση συστημάτων με δυνατότητα σάρωσης και ταυτόχρονης λήψης εικόνων του εκάστοτε αντικειμένου. Η απόκτηση τόσο των νεφών σημείων όσο και των εικόνων, από το ίδιο σύστημα, έχει ως αποτέλεσμα τα δύο παραπάνω να είναι συσχετισμένα μεταξύ τους, χωρίς να χρειάζεται επιπλέον επεξεργασία. Η συσχέτιση αυτή σημαίνει ότι κάθε ένα σημείο του νέφους αντιστοιχεί σε δεδομένο τμήμα της εικόνας. Οι σαρωτές δομημένου φωτός (structured light scanners) και οι σαρωτές laser με κατάλληλα προσαρμοσμένες φωτογραφικές μηχανές, δίνουν τη δυνατότητα απόκτησης «χρωματισμένων» νεφών σημείων, δηλαδή σαρώσεων του αντικειμένου με απόδοση πραγματικής υψής (textured model). Στη δεύτερη περίπτωση, αυτή των σαρωτών laser, απαιτείται η γνώση της σχετικής θέσης της φωτογραφικής μηχανής και του σαρωτή.

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για την υλοποίηση της μεθόδου, σχεδιάστηκε στο περιβάλλον του Matlab. Η επιλογή του συγκεκριμένου μαθηματικού πακέτου αποτελεί συνήθη πρακτική στην εκτέλεση αντίστοιχων εφαρμογών. Το Matlab φαίνεται να υστερεί σε θέματα ταχύτητας διαχείρισης μεγάλου όγκου δεδομένων έναντι άλλων γλωσσών προγραμματισμού. Από την άλλη πλευρά, το Matlab είναι εύκολο στη χρήση και παρέχει μεγάλο αριθμό μαθηματικών συναρτήσεων, με αποτέλεσμα να είναι ένα περιβάλλον φιλικό ακόμα και σε χρήστες που δεν είναι εξειδικευμένοι στον προγραμματισμό.

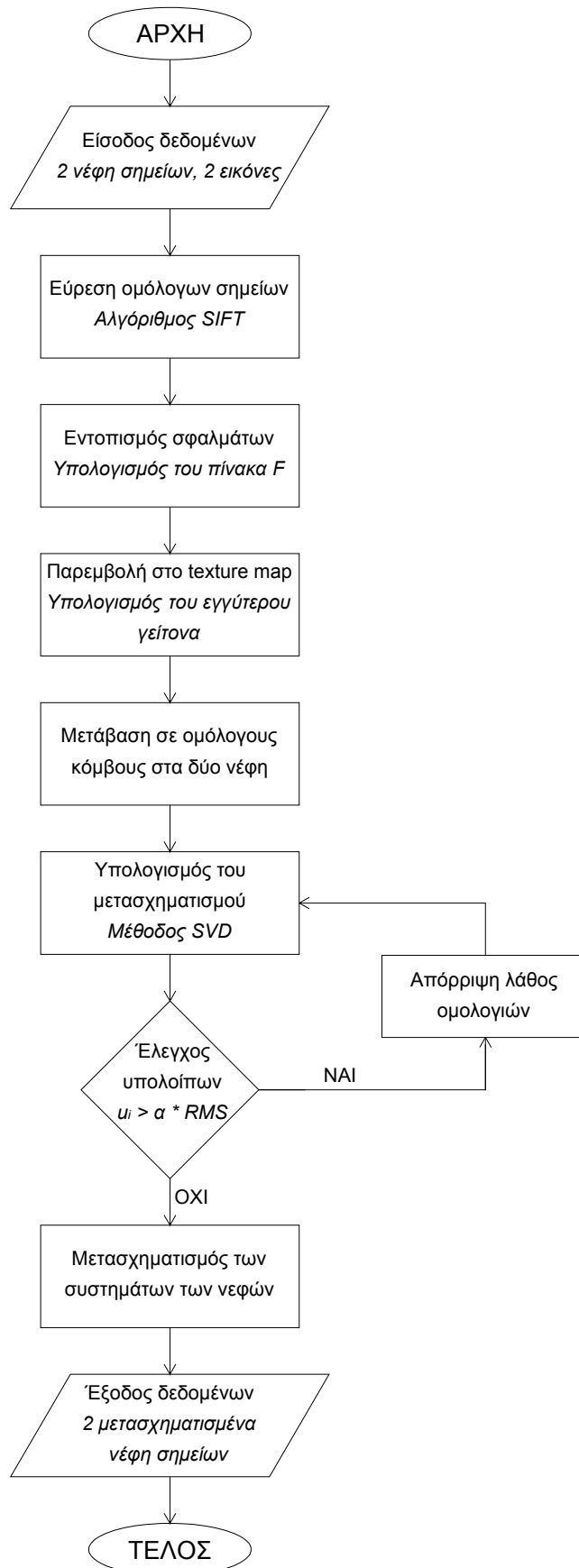
Το πρώτο στάδιο της προτεινόμενης μεθόδου αφορά στον εντοπισμό ομολογών σημείων πάνω στις εικόνες του αντικειμένου. Η απαίτηση για πλήρη αυτοματοποίηση της διαδικασίας της συνένωσης, που τέθηκε εξαρχής, απαιτεί σε αυτό το στάδιο την εφαρμογή μεθόδων ψηφιακής

συνταύτισης εικόνας. Μετά την εύρεση των ομολογων σημείων, ελέγχεται η συνέπεια των ομολογιών στο μοντέλο της επιπολικής γεωμετρίας, προκειμένου να εντοπιστούν και να απορριφθούν τυχόν χονδροειδή σφάλματα. Το μοντέλο της επιπολικής γεωμετρίας αναπαρίσταται από τον επιπολικό πίνακα F (Fundamental matrix) κι ο έλεγχος χονδροειδών σφαλμάτων γίνεται μέσω της εφαρμογής της μεθόδου RANSAC (Fischler & Bolles, 1981). Στη συνέχεια, κάθε ένα ομολογο σημείο αντιστοιχίζεται με το πλησιέστερο εικονοστοιχείο της εικόνας υψής (texture map) του αντικειμένου. Έτσι, αφού υπολογιστούν τα ομολογα εικονοστοιχεία μεταξύ των δύο εικόνων υψής, γίνεται η μετάβαση στους κόμβους του τρισδιάστατου νέφους. Από τις ομολογίες των κόμβων είναι δυνατός ο υπολογισμός των παραμέτρων του τρισδιάστατου μετασχηματισμού στερεού σώματος, που περιγράφει τη σχετική θέση των συστημάτων αναφοράς κάθε νέφους σημείων. Ο υπολογισμός των παραμέτρων του μετασχηματισμού ακολουθεί μία επαναληπτική διαδικασία, κατά την οποία απορρίπτονται ομολογίες κόμβων που δεν συμφωνούν με το μοντέλο του μετασχηματισμού που υπολογίζεται, έτσι ώστε να προκύψει η βέλτιστη λύση. Τέλος, κάθε ένα νέφος σημείων μετασχηματίζεται στο σύστημα αναφοράς του άλλου ώστε να ολοκληρωθεί η διαδικασία.

Στο σημείο αυτό, με αφορμή το παραπάνω, θα πρέπει να επισημανθεί μία λεπτομέρεια σχετικά με τον ορισμό και την έννοια της διαδικασίας της συνένωσης. Με βάση τον ορισμό που δόθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, έχει επικρατήσει ως συνένωση νεφών σημείων να νοείται η διαδικασία ένταξης ανεξάρτητων σαρώσεων σε κοινό σύστημα αναφοράς. Παρόλα αυτά, κυρίως στην ξένη βιβλιογραφία, αναφέρονται περισσότεροι του ενός όροι, που περιγράφουν την παραπάνω διαδικασία. Οι όροι αυτοί (registration, merging, aligning) διαφοροποιούνται ως προς το σύστημα αναφοράς στο οποίο μετασχηματίζονται τελικώς οι ανεξάρτητες σαρώσεις. Η προτεινόμενη μέθοδος διαχειρίζεται δεδομένα δύο σαρώσεων, μετασχηματίζοντας κάθε μία σάρωση στο σύστημα της άλλης, κι όχι σε ένα τοπικό ή άλλο σύστημα αναφοράς. Υπό αυτήν την έννοια, η μέθοδος δεν πραγματοποιεί τη γεωαναφορά των νεφών σημείων αλλά την «ευθυγράμμιση» τους (aligning). Μολονότι ο όρος αυτός εμφανίζεται στην ελληνική βιβλιογραφία, στην παρούσα διπλωματική υιοθετείται ο γενικότερος όρος της συνένωσης, ο οποίος κι έχει επικρατήσει.

Στις παραγράφους που ακολουθούν, περιγράφονται αναλυτικά όλες οι διαδικασίες που πραγματοποιούνται για την υλοποίηση της προτεινόμενης μεθόδου. Αναπτύσσονται μία προς μία, οι συναρτήσεις που καλούνται κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου και αιτιολογούνται όλες οι επιλογές που έγιναν σχετικά με τις μεθόδους παρεμβολής, τις τιμές κατωφλίων και τα κριτήρια σύγκλισης. Τα διαδοχικά στάδια, που εκτελούνται στο πλαίσιο της προτεινόμενης μεθόδου, αναπαρίστανται σχηματικά στο διάγραμμα ροής του αλγορίθμου, που ακολουθεί.

Συνένωση Νεφών Σημείων από Ομολογίες Εικόνων



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα ροής του προτεινόμενου αλγορίθμου

5.1. Είσοδος των Δεδομένων

Στο πρώτο στάδιο του αλγορίθμου γίνεται η εισαγωγή των δεδομένων, η οποία εκτελείται μέσω της κλήσης της συνάρτησης *load_obj.m* από το κύριο σώμα του κώδικα (main code, *code.m*). Η παραπάνω συνάρτηση, δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει τα αρχεία των σαρώσεων του αντικειμένου (σε μορφή ASCII), από δύο διαφορετικές θέσεις, και τις δύο εικόνες που αντιστοιχούν στις θέσεις αυτές. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μεταβλητές που δημιουργούνται μετά την κλήση της συνάρτησης.

Συνάρτηση load_obj.m ($i = 1, 2$ για κάθε μία σάρωση)	
V_i	Πίνακας με τις τρισδιάστατες συντεταγμένες [X Y Z] των σημείων του νέφους
Vt_i	Πίνακας με τις συντεταγμένες [x y] της απεικόνισης υφής (texture map) της σάρωσης. Οι συντεταγμένες αυτές περιγράφουν το πώς απεικονίζεται η εικόνα πάνω στο νέφος. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της αντιστοίχισης κάθε θέσης (x, y) της εικόνας σε ένα κόμβο του νέφους.
F_i	Πίνακας με τις κορυφές τριγώνων του νέφους. Για κάθε ένα τρίγωνο που σχηματίζεται στο νέφος σημείων, δίνονται οι τρεις κορυφές του (κόμβοι) και το τμήμα της εικόνας που απεικονίζεται σε κάθε μία από αυτές.

Πίνακας 5.1. Δεδομένα εισόδου του αλγορίθμου

5.2. Εύρεση Ομόλογων Σημείων

Το επόμενο στάδιο του αλγορίθμου αφορά τον εντοπισμό ομόλογων σημείων πάνω στις εικόνες και υλοποιείται με την εφαρμογή μεθόδων ψηφιακής συνταύτισης. Η επιλογή συγκεκριμένης μεθόδου για την υλοποίηση αυτού του σταδίου, αποτέλεσε ιδιαίτερα κρίσιμο σημείο, αφού από αυτήν εξαρτάται το τελικό αποτέλεσμα της διαδικασίας. Πιο συγκεκριμένα, αφού η συνένωση των νεφών με την προτεινόμενη μέθοδο βασίζεται αποκλειστικά σε ομολογίες σημείων πάνω στις εικόνες, είναι προφανές ότι η ακρίβεια και η αξιοπιστία του προσδιορισμού τους αλλά και το πλήθος τους, επηρεάζουν άμεσα το τελικό αποτέλεσμα.

Συνήθως καταβάλλεται προσπάθεια, ώστε οι διαδοχικές σαρώσεις ενός αντικειμένου από διαφορετικές θέσεις, που στοχεύουν στη δημιουργία ολοκληρωμένου τρισδιάστατου μοντέλου, να είναι όσο το δυνατό λιγότερες. Προϊόν κάθε μίας σάρωσης είναι ένα πυκνό νέφος σημείων, με αποτέλεσμα όσο αυξάνεται ο αριθμός των σαρώσεων, να αυξάνεται ο όγκος των δεδομένων κι άρα οι χρόνοι επεξεργασίας. Η σχετική θέση

των διαδοχικών σαρώσεων είναι προφανές ότι συνδέεται άμεσα με τη γεωμετρία της λήψης των αντίστοιχων εικόνων. Έτσι λοιπόν, αφενός η προσπάθεια για όσο το δυνατόν μικρότερες επικαλύψεις μεταξύ των σαρώσεων (που να μην είναι βέβαια απαγορευτικές για τη συνένωση) κι αφετέρου οι διαστάσεις κι η γεωμετρία των αντικειμένων που σαρώνονται, οδηγούν σε εικόνες με μεγάλες σχετικές στροφές και σε ζεύγη εικόνων με μεγάλες βάσεις λήψης. Με βάση τα προηγούμενα, προκύπτει ότι οι γεωμετρικές παραμορφώσεις λόγω κλίμακας και στροφών, που έτσι κι αλλιώς χαρακτηρίζουν τις επίγειες λήψεις, γίνονται εντονότερες στις εικόνες που λαμβάνονται από τις θέσεις σάρωσης. Συνεπώς, απαιτείται η επιλογή μεθόδων συνταύτισης εικόνας, ικανών να διαχειριστούν τις παραπάνω παραμορφώσεις. Οι μέθοδοι της επιφανειακής συνταύτισης, για τις οποίες έγινε λόγος στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία σε ραδιομετρικές και αφινικές παραμορφώσεις. Έτσι, η αναζήτηση της κατάλληλης μεθόδου στρέφεται στο πεδίο της συνταύτισης χαρακτηριστικών κι ειδικότερα σε αλγόριθμους που προέρχονται από το επιστημονικό πεδίο της όρασης υπολογιστών. Οι τελευταίοι έχουν σχεδιαστεί για τη γενική περίπτωση εικόνων, δηλαδή που δεν πληρούν απαραίτητα τα κριτήρια μιας τυπικής φωτογραμμετρικής λήψης. Στην υπάρχουσα βιβλιογραφία ξεχωρίζουν οι αλγόριθμοι των Lowe (SIFT, 1999, 2004) και Tuytelaars, Van Gool (Wide baseline, 2004). Οι παραπάνω αλγόριθμοι βασίζονται στην εξαγωγή χαρακτηριστικών περιοχών στις εικόνες, οι οποίες έχουν την ιδιότητα να διατηρούνται αναλλοίωτες σε γεωμετρικές παραμορφώσεις. Ειδικότερα, ο αλγόριθμος SIFT έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά το πλήθος των ομόλογων σημείων που εντοπίζονται στις εικόνες (Remondino, 2006) ενώ παράλληλα οι δυνατότητές του και η ποιότητα των αποτελεσμάτων του έχουν αξιολογηθεί από αρκετούς ερευνητές, αφού έχει χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο εύρος εφαρμογών και δεδομένων (Shragai et al., 2005, Läbe & Förstner, 2006, Remondino, 2006, Changchang et al., 2008, Καλησπεράκης, 2010). Η προτεινόμενη μέθοδος αποφασίστηκε να χρησιμοποιήσει την έκδοση του αλγόριθμου SIFT, που έχει αναπτυχθεί στο περιβάλλον του Matlab και διανέμεται ελεύθερα στο διαδίκτυο (<http://www.cs.ubc.ca/~lowe/keypoints>).

Η λειτουργία του αλγόριθμου SIFT περιγράφηκε αναλυτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο (§ 3.3.3). Για τον λόγο αυτό, εδώ περιγράφεται συνοπτικά η λειτουργία των συναρτήσεων που εκτελούνται, μέσω των αντίστοιχων διαγραμμάτων ροής, που παρουσιάζονται παρακάτω. Πιο συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος που σχεδιάστηκε, εντοπίζει ομόλογα σημεία μεταξύ των δύο εικόνων καλώντας δύο συναρτήσεις (*sift.m*, *match.m*). Η πρώτη συνάρτηση εκτελείται δύο φορές, μία για κάθε εικόνα ξεχωριστά και καταλήγει στην εξαγωγή χαρακτηριστικών σημείων σε αυτές. Κάθε ένα σημείο που εντοπίζεται, συνοδεύεται, εκτός από τις συντεταγμένες της θέσης του με υποψηφιακή ακρίβεια, από την κλίμακα στην οποία εντοπίστηκε και τον προσανατολισμό του. Επίσης, υπολογίζεται το διάνυσμα (1x128) με τα περιγραφικά χαρακτηριστικά για κάθε ένα σημείο.

Συνάρτηση sift.m ($i = 1, 2$ για κάθε μία εικόνα)	
r_i, c_i	Διαστάσεις της εικόνας (πλήθος γραμμών και στηλών).
im_i	Πίνακας με τις τιμές των τόνων του γκριζου της εικόνας.
des_i	Πίνακας ($n \times 128$, όπου n : το πλήθος των χαρακτηριστικών σημείων) περιγραφικών χαρακτηριστικών. Περιλαμβάνει τις τιμές του ιστογράμματος προσανατολισμού σε 16 υποπεριοχές γύρω από κάθε σημείο.
loc_i	Πίνακας ($n \times 4$, όπου n : το πλήθος των χαρακτηριστικών σημείων) με τις συντεταγμένες της θέσης κάθε σημείου, την κλίμακα και τον προσανατολισμό του.

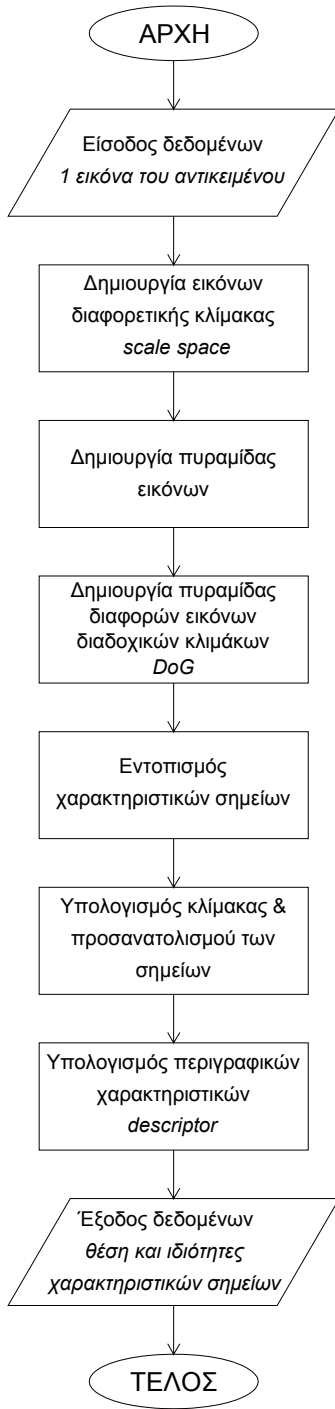
Πίνακας 5.2. Εξαγωγή χαρακτηριστικών σημείων

Μετά την εξαγωγή των χαρακτηριστικών σημείων από τις δύο εικόνες, ακολουθεί η εύρεση των ομολογιών, η οποία εκτελείται με την κλήση της συνάρτησης *match.m*. Η συνάρτηση αυτή υπολογίζει για κάθε ένα χαρακτηριστικό σημείο της πρώτης εικόνας τον εγγύτερο γείτονα στη δεύτερη, με βάση τις τιμές των διανυσμάτων των ιδιοτήτων. Μία ομολογία θεωρείται αποδεκτή αν ο λόγος της διαφοράς των ιδιοτήτων ενός σημείου με τον εγγύτερο γείτονα, προς την διαφορά των ιδιοτήτων του σημείου με τον αμέσως επόμενο γείτονα είναι μεγαλύτερη από ένα κατώφλι. Η τιμή του κατωφλίου για το λόγο αυτό ορίζεται ίση με 0.6.

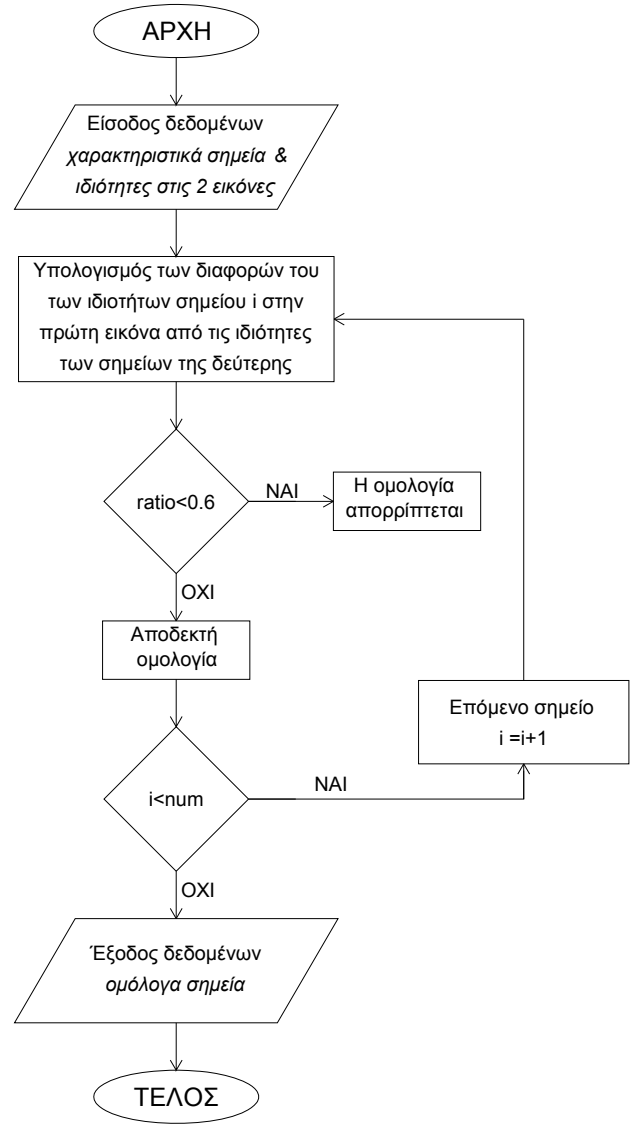
Συνάρτηση match.m ($i = 1, 2$ για κάθε μία εικόνα)	
<i>num</i>	Πλήθος των ομολογιών που εντοπίστηκαν.
<i>points</i>	Πίνακας ($5 \times \text{num}$) με τον κωδικό και τις συντεταγμένες κάθε ομολογίας στις δύο εικόνες
<i>matched_points</i>	Αρχείο σε μορφή ASCII, στο οποίο αποθηκεύονται οι τιμές του πίνακα <i>points</i> .

Πίνακας 5.3. Εύρεση ομόλογων σημείων

Συνένωση Νεφών Σημείων από Ομολογίες Εικόνων



Σχήμα 5.2 Διάγραμμα ροής της συνάρτησης *sift.m*



Σχήμα 5.3: Διάγραμμα ροής της συνάρτησης *match.m*

5.3 Έλεγχος Ομολογιών

Απαραίτητη προϋπόθεση για να καταλήξει η προτεινόμενη μέθοδος συνένωσης σε αξιόπιστα αποτελέσματα, είναι η ορθότητα των ομολογιών που έχουν εντοπιστεί. Δεδομένου ότι οι ομολογίες των σημείων προκύπτουν με αυτόματο τρόπο, υπάρχει κίνδυνος να προκύψουν χονδροειδή σφάλματα (της τάξεως αρκετών εικονοψηφίδων) στις μετρήσεις. Για το λόγο αυτό, πριν τη συνέχιση της διαδικασίας, επιβάλλεται να γίνει έλεγχος, ώστε να εντοπιστούν τυχόν χονδροειδή σφάλματα στις ομολογίες και να εξαιρεθούν από τη διαδικασία. Ο έλεγχος γίνεται χρησιμοποιώντας το μοντέλο της επιπολικής γεωμετρίας, με το οποίο οι ομολογίες των σημείων οφείλουν να είναι σε συμφωνία. Πιο συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος εφαρμόζει τη μέθοδο εντοπισμού χονδροειδών σφαλμάτων, RANSAC, προσαρμοσμένη στον υπολογισμό του επιπολικού πίνακα F.

Η φιλοσοφία της μεθόδου RANSAC (Fischler & Bolles, 1981) είναι αντίθετη από αυτήν της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων: αντί να χρησιμοποιεί όσο το δυνατόν περισσότερες μετρήσεις ώστε να προσδιορίσει αρχική λύση και στη συνέχεια να απορρίψει τις εσφαλμένες με βάση τα υπόλοιπά τους στο υπολογισμένο μοντέλο, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί τον ελάχιστο αριθμό μετρήσεων, ώστε να υπάρξει λύση στο μοντέλο, και στη συνέχεια αυξάνει τον αριθμό τους με βάση τη συνέπεια σημείων στο μοντέλο, που δεν πήραν μέρος στον υπολογισμό του. Συγκεκριμένα, η εφαρμογή της μεθόδου στο μοντέλο της επιπολικής γεωμετρίας, μέσω του υπολογισμού του επιπολικού πίνακα, συνίσταται στα παρακάτω βήματα (Καλησπεράκης, 2010):

- Από το σύνολο των ομολογιών που έχουν εντοπιστεί στις δύο εικόνες, επιλέγεται τυχαία ένα υποσύνολο, τέτοιο ώστε το πλήθος των σημείων να ισούται με το ελάχιστο που απαιτείται για τον υπολογισμό του επιπολικού πίνακα F με τον εκάστοτε αλγόριθμο (§ 2.3).
- Από το υποσύνολο που επιλέχθηκε, υπολογίζεται η τιμή του επιπολικού πίνακα.
- Για κάθε μία ομολογία σημείων που δεν ανήκει στο παραπάνω υποσύνολο κι άρα δεν έλαβε μέρος στον υπολογισμό του F, υπολογίζεται η απόκλιση της από το μοντέλο. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται για κάθε σημείο η απόστασή του από την αντίστοιχη επιπολική γραμμή. Σημεία που η απόστασή τους από τις επιπολικές γραμμές υπερβαίνει την τιμή ενός κατωφλίου, θεωρούνται εσφαλμένα για τη συγκεκριμένη λύση.
- Τα παραπάνω βήματα επαναλαμβάνονται k φορές, με αποτελέσματα να προκύπτουν τελικά k διαφορετικές λύσεις για τον επιπολικό πίνακα. Κάθε μία λύση συνοδεύεται από το πλήθος των εσφαλμένων ομολογιών που προέκυψαν.
- Επιλέγεται η λύση που οδηγεί στο μικρότερο αριθμό εσφαλμένων ομολογιών και αφού αυτές αφαιρεθούν από το σύνολο, ο πίνακας F υπολογίζεται ξανά από όλες τις υπόλοιπες ομολογίες σημείων.

Από τα βήματα της μεθόδου που διατυπώθηκαν παραπάνω προκύπτουν δύο ζητήματα. Το πρώτο αφορά τον ορισμό της τιμής του κατωφλίου, πάνω από την οποία μία ομολογία θα θεωρείται εσφαλμένη και το δεύτερο αφορά τον αριθμό των επαναλήψεων που θα γίνουν. Η τιμή του κατωφλίου ορίζεται ίση με ένα ποσοστό της διάστασης της εικονοψηφίδας. Ο αριθμός των επαναλήψεων που θα γίνουν, θα πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να δίνεται η δυνατότητα να υπολογιστεί τελικά ένα «καλό» υποσύνολο ομολογιών. Ο ορισμός της τιμής του k έχει να κάνει με την πιθανότητα που αναμένεται κάθε ομολογία σημείων να είναι σωστή. Οι Fischler & Bolles αποδεικνύουν ότι ο υπολογισμός του k μπορεί να γίνει μέσω του τύπου που ακολουθεί:

$$k = \frac{\log(1-z)}{\log(1-b)} \quad \text{όπου,} \quad b = w^n \quad (\text{Εξ.5.1})$$

όπου,

n : το ελάχιστο πλήθος των σημείων που απαιτούνται ώστε να έχει λύση το μοντέλο

w : η εκτίμηση του ποσοστού των εσφαλμένων ομολογιών

z : η πιθανότητα με την οποία ο αριθμός των επαναλήψεων είναι βέβαιο ότι θα καταλήξει σε τουλάχιστον ένα υποσύνολο που θα περιλαμβάνει μόνο σωστές ομολογίες σημείων.

Η παραπάνω διαδικασία, που εκτελείται στο πλαίσιο της προτεινόμενης μεθόδου, με βάση την υπάρχουσα βιβλιογραφία, φαίνεται να αποτελεί μία συνήθη πρακτική για τον εντοπισμό κονδροειδών σφαλμάτων στις ομολογίες σημείων (Shragai et al., 2005, Καλησπεράκης, 2010). Οι Fischler & Bolles υποστηρίζουν ότι η χρήση της μεθόδου RANSAC ενδείκνυται σε εφαρμογές που βασίζονται στην αυτόματη εξαγωγή χαρακτηριστικών, η οποία ενέχει κίνδυνο ύπαρξης κονδροειδών σφαλμάτων. Επίσης, ο αλγόριθμος RANSAC έχει χρησιμοποιηθεί προσαρμοσμένος στο μαθηματικό μοντέλο της εξίσωσης συνεπιπεδότητας, για την ανίχνευση σφαλμάτων σε ομολογίες σημείων, στο πλαίσιο εφαρμογής που στοχεύει στον αυτόματο σχετικό προσανατολισμό ζευγών εικόνων (Läbe & Förstner, 2006). Η προτεινόμενη μέθοδος, υιοθετεί το μοντέλο του επιπολικού πίνακα αντί αυτού της εξίσωσης συνεπιπεδότητας για δύο λόγους: αφενός ο υπολογισμός του επιπολικού πίνακα δεν απαιτεί εικόνες από βαθμονομημένες μηχανές λήψης κι αφετέρου υπάρχει κίνδυνος μη σύγκλισης του μοντέλου της εξίσωσης συνεπιπεδότητας λόγω της γεωμετρίας των εικόνων, που περιγράφηκε παραπάνω.

Η προτεινόμενη μέθοδος, για τον υπολογισμό του επιπολικού πίνακα, χρησιμοποιεί τον κανονικοποιημένο αλγόριθμο των 8 σημείων (normalized 8-point algorithm) (§ 2.3.1). Ο αλγόριθμος αυτός επιλέχθηκε γιατί είναι απλούστερος όσον αφορά τη σύνταξη του κώδικα,

σε σύγκριση με τις μη γραμμικές επιλύσεις, και γιατί εκτελείται περίπου 20 φορές ταχύτερα από αυτές (Hartley, 1997). Το τελευταίο είναι εξαιρετικά σημαντικό αφού, όπως προαναφέρθηκε, το Matlab υστερεί σε θέματα ταχύτητας εκτέλεσης σε σχέση με άλλες γλώσσες προγραμματισμού. Η επιλογή του κανονικοποιημένου αλγορίθμου ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις ακρίβειας προσδιορισμού του επιπολικού πίνακα. Συγκεκριμένα, ενώ η απλή γραμμική επίλυση μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα της τάξεως αρκετών εικονοψηφίδων, ο αλγόριθμος του Hartley αποδεικνύεται ότι προσφέρει αποτελέσματα αντίστοιχης ακρίβειας με αυτά που προκύπτουν από τις μη γραμμικές επιλύσεις.

Η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω, εκτελείται από τον αλγόριθμο που σχεδιάστηκε μέσω της κλήσης των συναρτήσεων *Fundamental.m* και *ransac_F.m*. Η πρώτη συνάρτηση υπολογίζει τον επιπολικό πίνακα εφαρμόζοντας τον κανονικοποιημένο αλγόριθμο των 8 σημείων ενώ η δεύτερη εκτελεί τη μέθοδο RANSAC προσαρμοσμένη στο μοντέλο του επιπολικού πίνακα. Η μέθοδος RANSAC απαιτεί τον ορισμό του αριθμού των επαναλήψεων k και της τιμής του κατωφλίου για τις εσφαλμένες ομολογίες, καθώς και την επιλογή του μεγέθους που θα υπολογίζεται ώστε να αξιολογηθούν οι ομολογίες ως προς την ορθότητά τους. Συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό του αριθμού των επαναλήψεων χρησιμοποιείται η εξίσωση 5.1 στην οποία τίθενται:

- $z=0.95$, δηλαδή θεωρείται ότι μετά την εκτέλεση των επαναλήψεων είναι βέβαιο, με πιθανότητα 95%, ότι τουλάχιστον ένα υποσύνολο θα περιλαμβάνει μόνο σωστές ομολογίες κι άρα θα οδηγήσει σε σωστό εντοπισμό κονδροειδών σφαλμάτων.
- $w=0.5$, δηλαδή λαμβάνεται η δυσμενής περίπτωση που υποθέτει ότι το 50% των ομολογιών είναι λανθασμένες. Η παραπάνω τιμή προτείνεται σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει εκ των προτέρων ένδειξη για το ποσοστό των ορθών ομολογιών κι επομένως προτιμάται η διενέργεια επαρκή αριθμού επαναλήψεων για τον εντοπισμό σφαλμάτων (Torr & Murray, 1997).

Κάθε ομολογία αξιολογείται ως προς την ορθότητά της μέσα από τον υπολογισμό της απόστασης κάθε σημείου από την αντίστοιχη επιπολική γραμμή (Hartley, 1997). Συγκεκριμένα, για κάθε ομολογία (p, p') υπολογίζεται η απόσταση του p' από την επιπολική γραμμή της δεύτερης εικόνας που προκύπτει από τον υπολογισμένο F και το σημείο p της πρώτης εικόνας (Εξ. 5.2). Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για τον υπολογισμό των αποστάσεων των σημείων p της πρώτης εικόνας από τις αντίστοιχες επιπολικές γραμμές (Εξ. 5.3).

$$d_1(p', l') = \frac{p'^T F p}{\sqrt{((F_{11} + F_{21} + F_{31})x)^2 + ((F_{12} + F_{22} + F_{32})y)^2}} \quad (\text{Εξ. 5.2})$$

$$d_2(p,l) = \frac{p^T F p}{\sqrt{((F_{11} + F_{12} + F_{13})x')^2 + ((F_{21} + F_{22} + F_{23})y')^2}} \quad (\text{Εξ.5.3})$$

Τέλος, η τιμή του κατωφλίου για τις εσφαλμένες ομολογίες ορίζεται ίση με το 20% της διάστασης της εικονοψηφίδας. Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι μεταβλητές που δημιουργούνται μετά την εκτέλεση των παραπάνω συναρτήσεων.

Συνάρτηση Fundamental.m	
F	Ο επιπολικός πίνακας (3x3).
RMS	Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα υπολογισμού του επιπολικού πίνακα.
$d1, d2$	Τα διανύσματα των αποστάσεων των ομόλογων σημείων στις δύο εικόνες από τις αντίστοιχες επιπολικές γραμμές.

Πίνακας 5.4. Υπολογισμός του επιπολικού πίνακα F

Συνάρτηση ransac_F.m	
v	Το ελάχιστο πλήθος των κονδροειδών σφαλμάτων που εντοπίζονται σε μία από τις λύσεις.
p	Ο αριθμός της επανάληψης που αντιστοιχεί στη λύση με τα λιγότερα κονδροειδή σφάλματα.
$points$	Πίνακας με τους κωδικούς και τις συντεταγμένες των ορθών ομολογιών και στις δύο εικόνες.

Πίνακας 5.5. Εφαρμογή της μεθόδου RANSAC

5.4 Εύρεση Ομόλογων Κόμβων

Μετά την αφαίρεση των εσφαλμένων ομολογιών, ακολουθεί η αντιστοίχιση των σημείων των εικόνων με τρισδιάστατα σημεία των νεφών. Με άλλα λόγια, πραγματοποιείται μετάβαση από ομολογίες σημείων στις εικόνες, σε ομολογίες κόμβων στα τρισδιάστατα νέφη σημείων του αντικειμένου. Η μετάβαση αυτή εκτελείται μέσω της κλήσης της συνάρτησης *nearest_vertex.m*. Η διαδικασία που εκτελεί η παραπάνω συνάρτηση συνοψίζεται στα ακόλουθα βήματα:

- Για κάθε μία ομολογία, υπολογίζονται οι αποστάσεις του ζεύγους των σημείων από τα εικονοστοιχεία της αντίστοιχης απεικόνισης υφής του αντικειμένου.
- Από τις αποστάσεις που υπολογίζονται, επιλέγεται το εικονοστοιχείο που αντιστοιχεί στην ελάχιστη απόσταση. Επομένως, για κάθε ομολογία σημείων, που εντοπίστηκε από την εφαρμογή του αλγορίθμου SIFT, προκύπτει ένα ζεύγος εικονοστοιχείων πάνω στις εικόνες υφής (texture map).
- Κάθε ένα ζεύγος εικονοστοιχείων αντιστοιχίζεται με ένα ζεύγος κόμβων στις δύο σάρωσεις του αντικειμένου. Η εύρεση αυτής της αντιστοιχίας είναι εφικτή, αξιοποιώντας την πληροφορία των τριγώνων των δύο νεφών. Συγκεκριμένα, όπως προαναφέρθηκε, μετά τη σάρωση του αντικειμένου, δημιουργείται πλέγμα τριγώνων με κορυφές τα σημεία του νέφους. Έτσι, κάθε ένα τρίγωνο ορίζεται από τις τρεις κορυφές του ενώ παράλληλα φέρει πληροφορία για το τμήμα της εικόνας που απεικονίζεται στην επιφάνειά του. Συνεπώς, μέσω των τριγώνων, συνδέονται μονοσήμαντα οι κόμβοι του νέφους με τα εικονοστοιχεία της αντίστοιχης εικόνας.

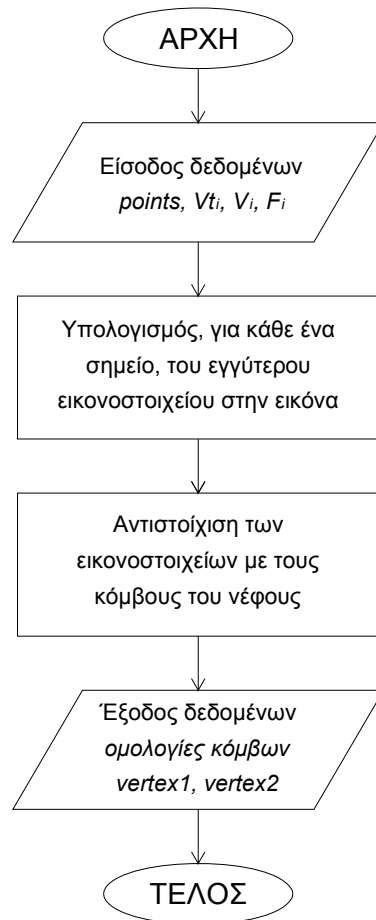
```
mtllib v_01.mtl
v -99.013527 173.722046 -1829.170776
v -98.359856 173.803955 -1830.033203
v -97.650322 173.787613 -1829.861206
:
:
vt 0.194301 0.994163
vt 0.195596 0.994163
vt 0.196891 0.994163
:
:
usemtl texturemap
f 258439/258439 258264/258264 258438/258438
f 258264/258264 258263/258263 258438/258438
f 258440/258440 258265/258265 258439/258439
:
:
```

Σχήμα 5.4: Απόσπασμα αρχείου σάρωσης

Στο παραπάνω σχήμα, φαίνεται η δομή του ψηφιακού αρχείου που δημιουργείται κατά τη σάρωση ενός αντικειμένου. Το πρώτο κομμάτι αφορά τους κόμβους (v) του τρισδιάστατου νέφους σημείων. Κάθε ένας κόμβος χαρακτηρίζεται από τις συντεταγμένες του X, Y, Z . Το δεύτερο κομμάτι αφορά την εικόνα του αντικειμένου. Συγκεκριμένα, δίνονται οι κανονικοποιημένες, στο διάστημα $[0, 1]$, συντεταγμένες της εικόνας (vt). Οι συντεταγμένες αυτές, στην ουσία, δεν δίνουν καμία πληροφορία από μόνες τους, αλλά θα πρέπει να συνδυαστούν με την πληροφορία των τριγώνων του νέφους. Η πληροφορία αυτή, περιλαμβάνεται στο τρίτο και τελευταίο κομμάτι του αρχείου, όπου κάθε κόμβος (v) συνδέεται με μία θέση στην εικόνα (vt). Έτσι, μέσω των τριγώνων ($f \quad v_i/vt_i \quad v_j/vt_j \quad v_k/vt_k$) δίνεται η πληροφορία για το πώς απεικονίζεται η εικόνα πάνω στο νέφος σημείων.

Η παραπάνω διαδικασία βασίζεται σε μία παρεμβολή, με τη μέθοδο του εγγύτερου γείτονα, στις εικόνες του αντικειμένου. Όπως συμβαίνει σε όλες τις περιπτώσεις παρεμβολών, έτσι κι εδώ, υπάρχει κίνδυνος για την δημιουργία σφαλμάτων στο τελικό αποτέλεσμα. Στην προκειμένη περίπτωση παρεμβολής, τα σφάλματα δημιουργούνται κατά την αντιστοίχιση των ομολογών σημείων με τα εικονοστοιχεία της εικόνας (texture map). Οι συντεταγμένες των ομολογών σημείων προκύπτουν σε δεκαδική μορφή, αφού ο αλγόριθμος SIFT είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε να δίνει αποτελέσματα υποψηφιακής ακρίβειας. Συνεπώς, στη δυσμενέστερη περίπτωση, το σφάλμα της διαδικασίας θα είναι ίσο με το μισό της διάστασης της εικονοψηφίδας των εικόνων. Το παραπάνω σφάλμα, δεδομένου του τελικού στόχου της προτεινόμενης μεθόδου, θα πρέπει να μεταφραστεί σε μονάδες πάνω στο αντικείμενο. Έτσι, η εύρεση των ομολογών κόμβων μπορεί να έχει σφάλμα ίσο με το μισό της διάστασης της πλευράς των τρισδιάστατων τριγώνων. Είναι προφανές ότι το σφάλμα της μεθόδου συνδέεται άμεσα με την πυκνότητα σάρωσης του αντικειμένου, αφού από αυτήν εξαρτάται η διάσταση των δημιουργούμενων τριγώνων.

Η παραπάνω συνάρτηση εκτελείται δύο φορές, μία για κάθε εικόνα ξεχωριστά, κι έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία δύο πινάκων ($vertex1, vertex2$) με τις συντεταγμένες ομολογών κόμβων μεταξύ των δύο σαρώσεων. Στο σχήμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της συνάρτησης.



Σχήμα 5.5 Διάγραμμα ροής της συνάρτησης *nearest_vertex.m*

5.5 Υπολογισμός Μετασχηματισμού Στερεού Σώματος

Η σχετική θέση των δύο νεφών σημείων, ο προσδιορισμός της οποίας αποτελεί το τελικό ζητούμενο της προτεινόμενης μεθόδου, περιγράφεται μέσω ενός τρισδιάστατου μετασχηματισμού στερεού σώματος (3D rigid body transformation). Τα δύο νέφη σημείων, που προκύπτουν από τη σάρωση του αντικειμένου από δύο διαφορετικές θέσεις, νοούνται ως στερεό σώμα αφού μετασχηματιζόμενα δεν μεταβάλλονται κατά σχήμα και μέγεθος.

Σ' αυτό το στάδιο της διαδικασίας, ζητούμενο είναι ο υπολογισμός των παραμέτρων (3 στροφές και 3 μεταθέσεις) του παραπάνω μετασχηματισμού. Στην υπάρχουσα βιβλιογραφία αναφέρονται διαφορετικές μέθοδοι επίλυσης της εξίσωσης 4.2, που καταλήγουν στον προσδιορισμό των αγνώστων παραμέτρων. Ο αλγόριθμος που σχεδιάστηκε, εφαρμόζει τη μέθοδο ανάλυσης ιδιζουσών τιμών (singular value decomposition, SVD), η λειτουργία της οποίας περιγράφεται συνοπτικά από τον Eggert (1997). Η επιλογή μιας άμεσης λύσης (closed form solution) υπερτερεί

έναντι των κλασικών επαναληπτικών λύσεων αφού δεν απαιτεί εκτίμηση αρχικών τιμών για τους αγνώστους, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει κίνδυνος να «παγιδευτεί» η λύση σε τοπικά ελάχιστα της συνάρτησης του σφάλματος.

Ο υπολογισμός των παραμέτρων του μετασχηματισμού γίνεται μέσω της κλήσης της συνάρτησης *Rigid_body_svd.m*. Η συνάρτηση αυτή εφαρμόζει τη μέθοδο SVD και καταλήγει στον υπολογισμό του πίνακα στροφής R και του διανύσματος της μετάθεσης T , μεταξύ των δύο συστημάτων αναφοράς. Η ελαχιστοποίηση της εξίσωσης 4.2 συνεπάγεται την ταύτιση των κέντρων βάρους των δύο νεφών σημείων, $\{d_i\}$ και $\{m_i\}$ (Eggert et al., 1997). Οι συντεταγμένες των σημείων κάθε νέφους εκφράζονται ως προς το κέντρο βάρους τους, ως εξής:

$$\bar{d} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i \quad , \quad d_{ci} = d_i - \bar{d} \quad (\text{Εξ. 5.4})$$

$$\bar{m} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i \quad , \quad m_{ci} = m_i - \bar{m} \quad (\text{Εξ. 5.5})$$

Μέσω των παραπάνω συντεταγμένων, η εξίσωση 4.2 γράφεται ως εξής:

$$\begin{aligned} [u_i u_i] &= \sum_{i=1}^N (d_i - \hat{R}m_i - \hat{t})^2 \Rightarrow \\ [u_i u_i] &= \sum_{i=1}^N (d_{ci} - \hat{R}m_{ci})^2 \Rightarrow \\ [u_i u_i] &= \sum_{i=1}^N (d_{ci}^T d_{ci} + m_{ci}^T m_{ci} - 2d_{ci}^T \hat{R}m_{ci}) \end{aligned} \quad (\text{Εξ. 5.6})$$

Η παραπάνω εξίσωση ελαχιστοποιείται όταν ο τελευταίος όρος λάβει μέγιστη τιμή. Η μεγιστοποίηση του όρου αυτού ισοδυναμεί με τη μεγιστοποίηση του ίχνους του πίνακα, που προκύπτει από το γινόμενο των R και H , όπου ο H ισούται με:

$$H = m_{ci} \cdot d_{ci}^T \quad (\text{Εξ. 5.7})$$

Η ανάλυση ιδιαζουσών τιμών του πίνακα H δίνει:

$$[U \quad D \quad V] = \text{svd}(H) \Rightarrow H = U \cdot D \cdot V^T \quad (\text{Εξ. 5.8})$$

Αποδεικνύεται ότι η βέλτιστη τιμή του πίνακα στροφής μεταξύ των δύο συστημάτων αναφοράς, θα ισούται με:

$$\hat{R} = V \cdot U^T \quad (\text{Εξ. 5.9})$$

Στη συνέχεια, η βέλτιστη τιμή για το διάνυσμα της μετάθεσης υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\hat{T} = \bar{d} - \hat{R} \cdot \bar{m} \quad (\text{Εξ. 5.10})$$

Η παραπάνω μέθοδος, συγκρινόμενη με άλλες άμεσες μεθόδους, παρουσιάζει πολύ καλά αποτελέσματα ως προς την ακρίβειά της και την αποτελεσματικότητα εκτέλεσης του αλγορίθμου (Eggert et al., 1997).

Συνάρτηση <i>Rigid_body_svd</i>	
<i>R</i>	Ο πίνακας της σχετικής στροφής των δύο συστημάτων αναφοράς.
<i>T</i>	Το διάνυσμα της μετάθεσης μεταξύ των δύο συστημάτων αναφοράς.
<i>RMS</i>	Διάνυσμα (N×1) με τις τετραγωνικές ρίζες των αθροισμάτων των τετραγώνων των συνιστωσών (κατά x, y, z) των υπολοίπων των μετρήσεων, δηλαδή: $RMS_i = \sqrt{u_{ix}^2 + u_{iy}^2 + u_{iz}^2}$
<i>RMS_m</i>	Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα.

Πίνακας 5.6: Υπολογισμός των παραμέτρων του μετασχηματισμού στερεού σώματος

Στην παράγραφο 5.3 περιγράφηκε η διαδικασία ανίχνευσης χονδροειδών σφαλμάτων στις ομολογίες μεταξύ των εικόνων, με την εφαρμογή της μεθόδου RANSAC. Παρά την απομάκρυνση των χονδροειδών σφαλμάτων από τις μετρήσεις, στο προηγούμενο στάδιο, η διαδικασία της παρεμβολής (§ 5.4) μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα στις ομολογίες των τρισδιάστατων κόμβων. Για το λόγο αυτό, ο υπολογισμός των παραμέτρων του τρισδιάστατου μετασχηματισμού, ακολουθεί μία επαναληπτική διαδικασία προκειμένου να απομακρυνθούν τυχόν εναπομένοντα σφάλματα στις μετρήσεις και να προσδιοριστεί η βέλτιστη λύση. Η επαναληπτική διαδικασία εκτελείται ενσωματώνοντας τη συνάρτηση *Rigid_body_svd.m*, που περιγράφηκε παραπάνω, σε μία άλλη συνάρτηση, την *rigid_iteration.m*.

Η λειτουργία της τελευταίας συνοψίζεται στα ακόλουθα βήματα:

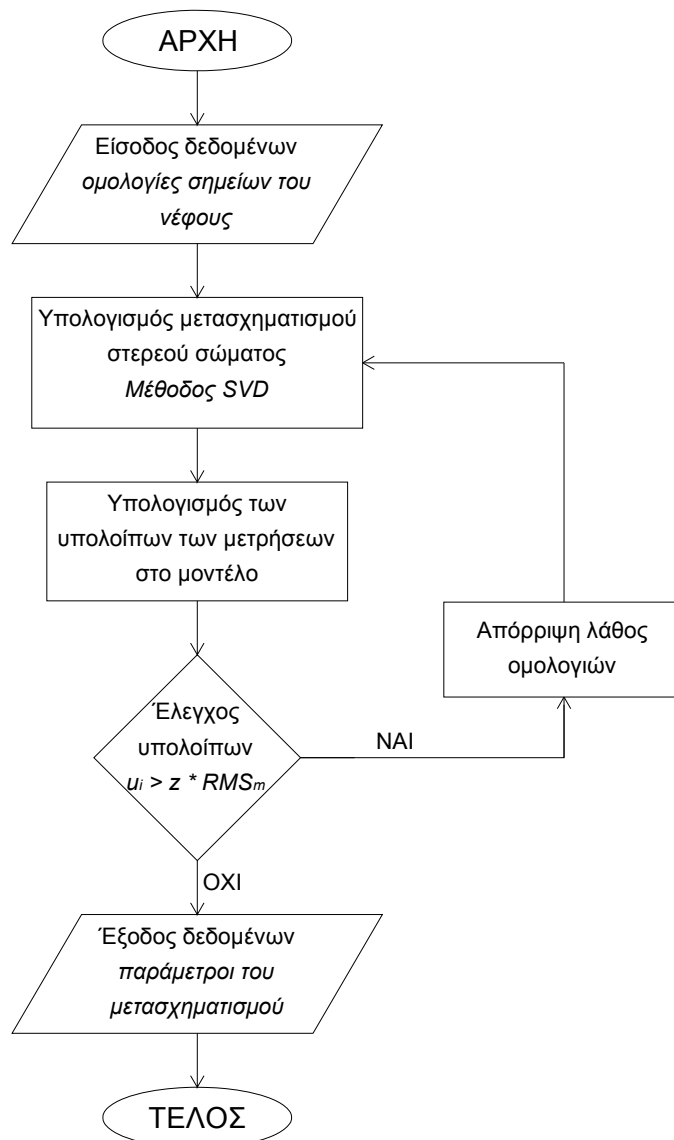
- Υπολογίζονται οι παράμετροι του μετασχηματισμού στερεού σώματος και τα υπόλοιπα των μετρήσεων.
- Ελέγχονται τα υπόλοιπα για ένα δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης:

$$RMS \leq z \cdot RMS_m \quad (\text{Εξ. 5.11})$$

- Τα σημεία που δεν «περνούν» τον παραπάνω έλεγχο εξαιρούνται από τις μετρήσεις και στη συνέχεια επαναυπολογίζεται ο μετασχηματισμός.

Από την παραπάνω διαδικασία προκύπτουν δύο ζητήματα. Το πρώτο αφορά στην επιλογή του επιπέδου εμπιστοσύνης, που θα χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο και το δεύτερο την επιλογή του κριτηρίου σύγκλισης της διαδικασίας. Ο αλγόριθμος επιλέχθηκε να διεξάγει τον έλεγχο για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Η επιλογή αυτή γίνεται γιατί το παραπάνω επίπεδο εμπιστοσύνης οδηγεί στη μείωση της πιθανότητας για λάθη τύπου α και β . Αυτό σημαίνει ότι μειώνονται οι πιθανότητες να θεωρηθεί μία ορθή ομολογία ως εσφαλμένη και να απορριφθεί αλλά και οι πιθανότητες να συμπεριληφθεί στο τελικό δείγμα μία εσφαλμένη ομολογία. Το επίπεδο εμπιστοσύνης 95% αντιστοιχεί σε τιμή για την κανονική μεταβλητή, $z = 1.96$. Ως κριτήριο σύγκλισης για την επαναληπτική διαδικασία επιλέχθηκε το πλήθος των σημείων που απορρίπτονται μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων. Έτσι, οι επαναλήψεις τερματίζουν όταν ο αριθμός των ομολογιών μεταξύ δύο διαδοχικών λύσεων είναι ίσος κι άρα δεν απορρίπτονται άλλα σημεία.

Η παραπάνω τεχνική είναι σαφές ότι δεν έχει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου RANSAC, όσον αφορά στον εντοπισμό κονδροειδών σφαλμάτων. Αυτό συμβαίνει γιατί οι ομολογίες ελέγχονται με βάση τα υπόλοιπά τους στο μοντέλο του μετασχηματισμού, στον υπολογισμό των παραμέτρων του οποίου έχουν πάρει μέρος. Συνεπώς, η ύπαρξη κονδροειδών σφαλμάτων στο δείγμα θα οδηγούσε στον υπολογισμό λάθος μετασχηματισμού κι άρα στην αποτυχία της μεθόδου. Οι Fischler και Bolles (1981) αναφέρουν ότι η λειτουργία παρόμοιων τεχνικών βασίζεται στην υπόθεση ότι υπάρχουν αρκετά σωστά σημεία έτσι ώστε να προσδιοριστεί το σωστό μοντέλο του μετασχηματισμού και να απορριφθούν οι εσφαλμένες ομολογίες. Η παραπάνω υπόθεση ισχύει στην περίπτωση της προτεινόμενης μεθόδου, αφού αφενός έχουν αφαιρεθεί τυχόν κονδροειδή σφάλματα στις ομολογίες με την εφαρμογή του RANSAC στον υπολογισμό του επιπολικού πίνακα κι αφετέρου ο αλγόριθμος SIFT οδηγεί στον εντοπισμό μεγάλου πλήθους ομολογιών σημείων, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλη περίσσεια μετρήσεων σε αυτό το στάδιο.



Σχήμα 5.6 Διάγραμμα ροής της συνάρτησης *rigid_iteration.m*

5.6 Έξοδος Δεδομένων

Τα δεδομένα εξόδου της προτεινόμενης μεθόδου είναι δύο μετασχηματισμένα νέφη σημείων, έτσι ώστε να ολοκληρωθεί η διαδικασία της συνένωσης. Οι παράμετροι του μετασχηματισμού στερεού σώματος που υπολογίστηκαν στο προηγούμενο στάδιο, εφαρμόζονται κατάλληλα στα αρχικά δεδομένα. Συγκεκριμένα, το πρώτο νέφος σημείων μετασχηματίζεται στο σύστημα αναφοράς του δεύτερου κι αντιστρόφως. Ο μετασχηματισμός των νεφών σημείων γίνεται μέσω της κλήσης των συναρτήσεων *forward.m* και *inverse.m*. Η πρώτη συνάρτηση

μετασχηματίζει το νέφος σημείων από το σύστημα αναφοράς της πρώτης σάρωσης σε αυτό της δεύτερης:

$$\Sigma A_1 \rightarrow \Sigma A_2 \Rightarrow V_{1new} = R \cdot V_1 + T \quad (\text{Εξ. 5.12})$$

όπου,

R : ο πίνακας των σχετικών στροφών μεταξύ των δύο συστημάτων αναφοράς

T : το διάνυσμα της μετάθεσης μεταξύ των δύο συστημάτων αναφοράς

V_1 : το νέφος σημείων από την πρώτη θέση σάρωσης

Η δεύτερη συνάρτηση εκτελεί την αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή μετασχηματίζει το δεύτερο νέφος σημείων στο σύστημα αναφοράς της πρώτης σάρωσης:

$$\Sigma A_2 \rightarrow \Sigma A_1 \Rightarrow V_{2new} = R^T \cdot (V_2 - T) \quad (\text{Εξ. 5.13})$$

όπου,

R : ο πίνακας των σχετικών στροφών μεταξύ των δύο συστημάτων αναφοράς

T : το διάνυσμα της μετάθεσης μεταξύ των δύο συστημάτων αναφοράς

V_2 : το νέφος σημείων από τη δεύτερη θέση σάρωσης

Τα μετασχηματισμένα νέφη σημείων, V_{1new} και V_{2new} , καταγράφονται σε δύο ψηφιακά αρχεία μέσω της συνάρτησης *new_obj.m*.

6

Πρακτική Εφαρμογή

6.1 Σαρωτές Δομημένου Φωτός

Οι σαρωτές δομημένου φωτός (Structured Light scanners) αποτελούν ένα ακόμα είδος σαρωτών, πέρα από τους κλασικούς σαρωτές Laser. Η λειτουργία τους βασίζεται στην προβολή ενός φωτεινού μοτίβου πάνω στο αντικείμενο και στη μέτρηση της παραμόρφωσής του, λόγω του αναγλύφου του αντικειμένου. Στη συνηθέστερη περίπτωση, το μοτίβο προβάλλεται μέσω ενός προβολέα LCD και μπορεί να είναι μονοδιάστατο (π.χ. γραμμή) ή δύο διαστάσεων (π.χ. κάναβος). Με τη χρήση μίας φωτογραφικής μηχανής, καταγράφεται το σχήμα του προβαλλόμενου μοτίβου. Στη συνέχεια, από την εικόνα που λαμβάνεται, είναι δυνατή η ανάκτηση του αναγλύφου του αντικειμένου. Βασίζονται στην αρχή του τριγωνισμού μεταξύ του προβολέα και ενός –τουλάχιστον- φωτογραφικού δέκτη, ο οποίος καταγράφει την εν λόγω παραμόρφωση. Το μεγάλο πλεονέκτημα χρήσης αυτής της τεχνολογίας, έναντι των σαρωτών Laser, είναι η ταχύτητα, αφού καταγράφονται περισσότερα σημεία του αντικείμενου κατά μήκος μιας γραμμής ή εντός ενός οπτικού πεδίου ταυτόχρονα, αντί ένα σημείο τη φορά. Συστήματα σαρωτών δομημένου φωτός, που αντί για μία, χρησιμοποιούν δύο φωτογραφικές μηχανές, έχουν σαφές πλεονέκτημα. Αναλυτικότερα, η χρήση δύο βαθμονομημένων φωτογραφικών μηχανών οδηγεί στην απόκτηση ενός στερεοζεύγους, μέσω του οποίου είναι δυνατός ο υπολογισμός του βάθους και η δημιουργία ενός πολυγωνικού πλέγματος που περιγράφει το ανάγλυφο του αντικειμένου.

Για τις ανάγκες αξιολόγησης της προτεινόμενης μεθόδου, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα σάρωσης αντικειμένων, που προήλθαν από ένα τέτοιο σύστημα σαρωτή δομημένου φωτός. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το σύστημα SL2 της εταιρείας XYZRGB. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει:

- Ένα προβολέα DPL (Infocus IN35W), ο οποίος χρησιμοποιείται για την προβολή του μοτίβου πάνω στο εκάστοτε αντικείμενο.
- Δύο ψηφιακές μηχανές, EOS Rebel XSi της εταιρείας Canon, ανάλυσης 12.2 MP. Οι μηχανές είναι τοποθετημένες σε μία στερεή

βάση, ώστε να είναι δυνατή η απόκτηση του στερεοζεύγους εικόνων. Το μήκος της βάσης λήψης μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με τη διάσταση του αντικειμένου που πρόκειται να σαρωθεί και την απόστασή του από τον προβολέα.

- Λογισμικό πακέτο, κατάλληλο για την βαθμονόμηση του συστήματος, δηλαδή τον προσδιορισμό των στοιχείων της εσωτερικής γεωμετρίας των μηχανών αλλά και της σχετικής τους θέσης. Ακόμα, το λογισμικό υπολογίζει το τρισδιάστατο πολυγωνικό πλέγμα, που περιγράφει την επιφάνεια του αντικειμένου και προβάλλει σε αυτό την εικόνα.



Εικόνα 6.1: Το σύστημα SL2 (Georgopoulos et al., 2010)

Η χρήση του παραπάνω συστήματος επιτρέπει τη δημιουργία πυκνών (μέχρι και 150 μm) νεφών σημείων υψηλής ακρίβειας (μέχρι 50 μm) που περιγράφουν την επιφάνεια του αντικειμένου που σαρώνεται και τη λήψη εικόνων μεγάλης ανάλυσης.

6.2 Δεδομένα

Η πρακτική εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου, έγινε σε δεδομένα που προήλθαν από το σύστημα του σαρωτή δομημένου φωτός, που περιγράφηκε στα προηγούμενα. Συγκεκριμένα, τα απαραίτητα δεδομένα ήταν:

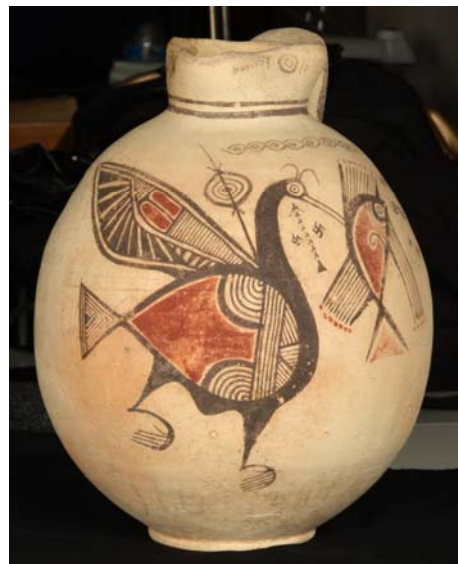
- Ένα νέφος σημείων και το αντίστοιχο πλέγμα τριγώνων, με πυκνότητα 1 mm, για κάθε μία από τις δύο σαρώσεις.
- Η απεικόνιση υφής (texture map) πάνω στην επιφάνεια του μοντέλου, από εικόνες του αντικειμένου με διάσταση εικονοστοιχείου 7 μm .

Το αρχείο κάθε μίας σάρωσης διατίθεται σε μορφή ASCII με επέκταση *.obj* και οι εικόνες των αντικειμένων που σαρώνονται σε έγχρωμη μορφή, με επέκταση αρχείου *.png*. Η προτεινόμενη μέθοδος

εφαρμόστηκε σε ζεύγη σαρώσεων δύο διαφορετικών αντικειμένων. Πρόκειται για δύο αρχαιολογικά ευρήματα ανασκαφών στην περιοχή του Δισπηλιού και στην Κύπρο. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι σαρώσεις δύο αγγείων, με αντίστοιχο βαθμό συμμετρίας του σχήματός τους και διαφορετική ποιότητα υφής. Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι δυνατότητες των συναρτήσεων εντοπισμού ομολογών σημείων (*sift.m*, *match.m*) επέβαλαν τη μείωση της ανάλυσης των αρχικών εικόνων των αντικειμένων. Συγκεκριμένα, η έκδοση του αλγορίθμου SIFT που χρησιμοποιήθηκε, δεν επέτρεπε τη χρήση των υψηλής ανάλυσης αρχικών εικόνων και επομένως η ανάλυσή τους μειώθηκε με συντελεστή 1.6. Έτσι, ενώ οι αρχικές εικόνες είχαν μέγεθος 3088x2056 εικονοστοιχεία με διάσταση 7 μm , οι εικόνες στις οποίες εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος SIFT, είχαν μέγεθος 1920x1278 εικονοστοιχεία με διάσταση 12 μm . Επίσης, οι εικόνες από έγχρωμες, μετατράπηκαν σε εικόνες των τόνων του γκρι (.pgm, Portable Graymap). Η μετατροπή αυτή καθώς και η μείωση της αρχικής ανάλυσης των εικόνων πραγματοποιήθηκαν στο λογισμικό *Irfan View*.



α.



β.

Εικόνα 6.2: α. Αγγείο από την ανασκαφή στο Δισπηλιό β. Αγγείο από την Κύπρο

Από την προηγούμενη εικόνα, είναι σαφές ότι τα δύο αντικείμενα έχουν παρόμοιο σχήμα αλλά μεγάλη διαφορά στην ποιότητα της υφής. Δεδομένου ότι η προτεινόμενη μέθοδος συνένωσης των νεφών βασίζεται στην υφή των αντικειμένων, στόχος ήταν να διερευνηθούν τυχόν διαφορές στα αποτελέσματα της μεθόδου στις δύο αυτές περιπτώσεις. Στην επόμενη παράγραφο παρατίθενται αναλυτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του αλγορίθμου, σε ζεύγη σαρώσεων των παραπάνω αντικειμένων με διαφορετικά ποσοστά επικάλυψης και διαφορετικές σχετικές στροφές.

6.3 Παρουσίαση των Αποτελεσμάτων

Στις ενότητες που ακολουθούν παρατίθενται οι εικόνες των ζευγών σαρώσεων που συνενώνονται με την προτεινόμενη μέθοδο καθώς και πίνακες με τα αριθμητικά αποτελέσματα της εφαρμογής. Αναλυτικότερα, τα στοιχεία κάθε πίνακα είναι:

- Το πλήθος των χαρακτηριστικών σημείων (*Σημεία ενδιαφέροντος 1*, *Σημεία ενδιαφέροντος 2*) που εξάγονται από κάθε μία εικόνα και ο αριθμός των ομολογών σημείων (*Ομολογίες σημείων*) που αντιστοιχίζονται τελικώς.
- Το πλήθος των σημείων (*Outliers 1*) που απορρίπτονται μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου RANSAC, προσαρμοσμένου στο μοντέλο του επιπολικού πίνακα.
- Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα ($RMS_{fundamental}$) υπολογισμού του επιπολικού πίνακα F.
- Το πλήθος των σημείων (*Outliers 2*) που απορρίπτονται κατά τη διάρκεια της επαναληπτικής διαδικασίας για τον υπολογισμό των παραμέτρων του μετασχηματισμού στερεού σώματος.
- Το τελικό πλήθος σημείων (*Points*) που συμμετέχουν στον υπολογισμό των παραμέτρων του μετασχηματισμού.
- Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS_{rigid}) υπολογισμού των παραμέτρων του μετασχηματισμού.
- Ο αριθμός των επαναλήψεων (i) που έγιναν για τον υπολογισμό του μετασχηματισμού.

Τέλος, για κάθε μία περίπτωση συνένωσης νεφών παρουσιάζονται:

- Ο επιπολικός πίνακας F.
- Ο πίνακας της σχετικής στροφής R.
- Το διάνυσμα της μετάθεσης T.

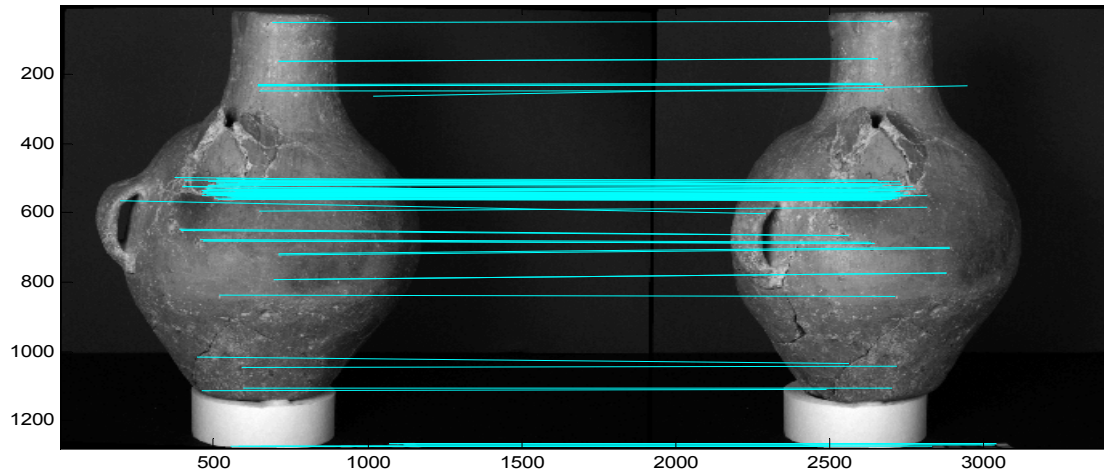
6.3.1 Αγγείο 1

6.3.1.1 Σαρώσεις V01 και V02

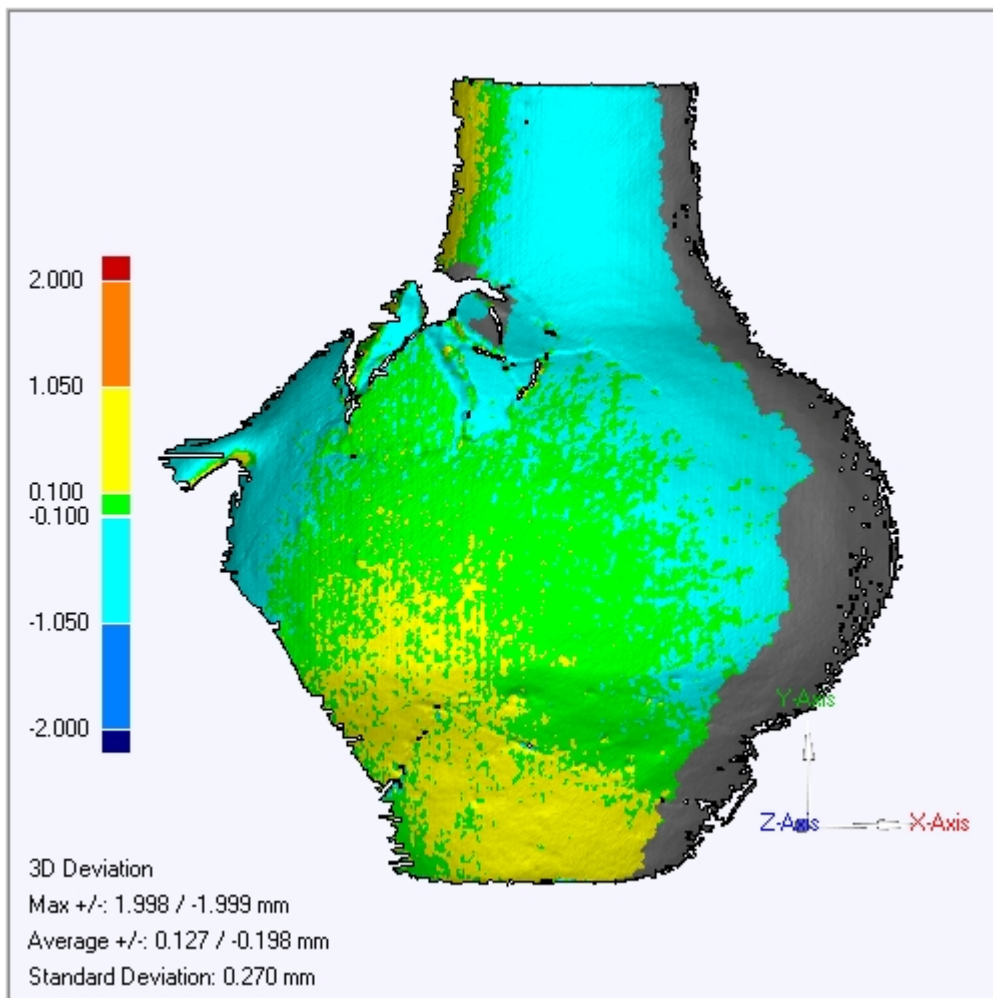


Εικόνα 6.3: Ψηφιακές εικόνες από τις δύο θέσεις σάρωσης

Συνένωση Νεφών Σημείων από Ομολογίες Εικόνων



Εικόνα 6.4: Εντοπισμός ομολογων σημείων



Εικόνα 6.5: Απόκλιση των συνενωμένων νεφών σημείων

Σημεία ενδιαφέροντος 1	1300
Σημεία ενδιαφέροντος 2	1653
Ομολογίες σημείων	96
Outliers 1	13
$RMS_{fundamental}$	0,7 μm
Outliers 2	21
Points	62
RMS_{rigid}	0,420 mm
i	5

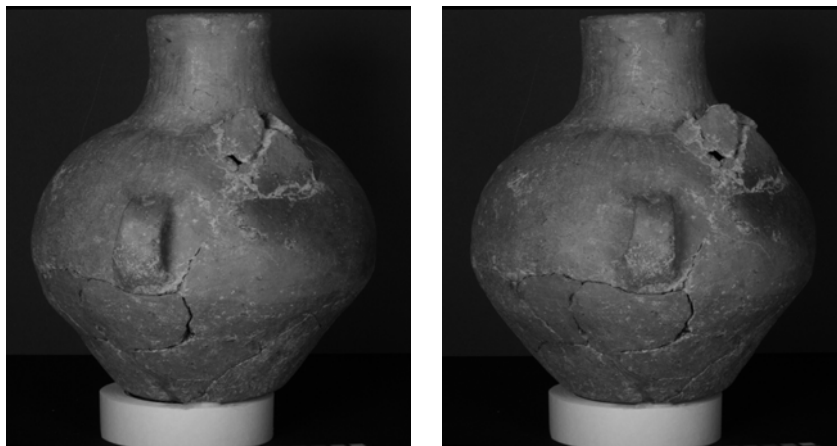
Πίνακας 6.2: Αριθμητικά αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου

$$F = \begin{bmatrix} -1.478 \cdot 10^{-7} & 1.764 \cdot 10^{-6} & -5.831 \cdot 10^{-4} \\ -1.205 \cdot 10^{-6} & -5.423 \cdot 10^{-7} & 0.0086 \\ 0.0012 & 0.0086 & -0.3302 \end{bmatrix}$$

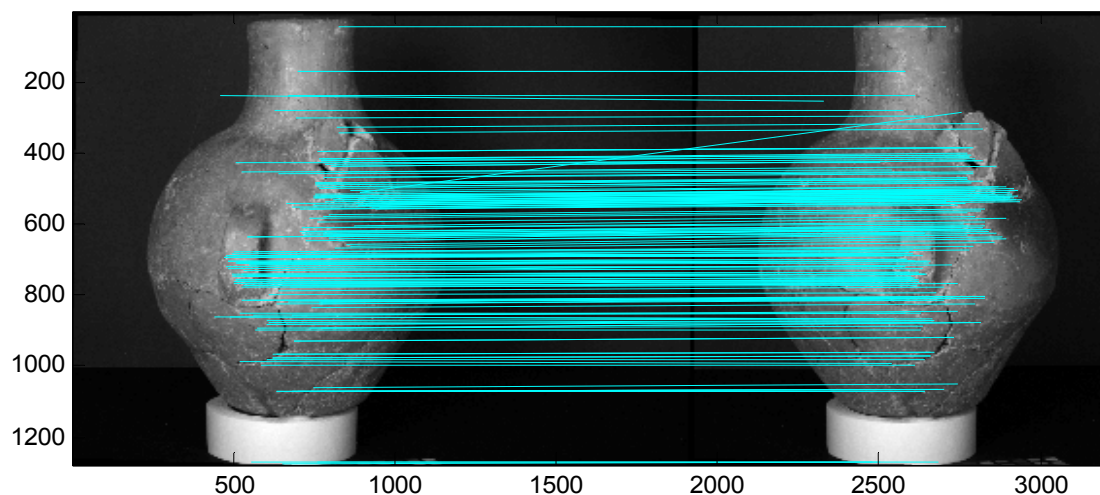
$$R = \begin{bmatrix} 0.8958 & -0.0937 & 0.4344 \\ 0.0901 & 0.9955 & 0.0290 \\ -0.4352 & 0.0132 & 0.9002 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} 688.6694 \\ 40.7717 \\ -132.7733 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

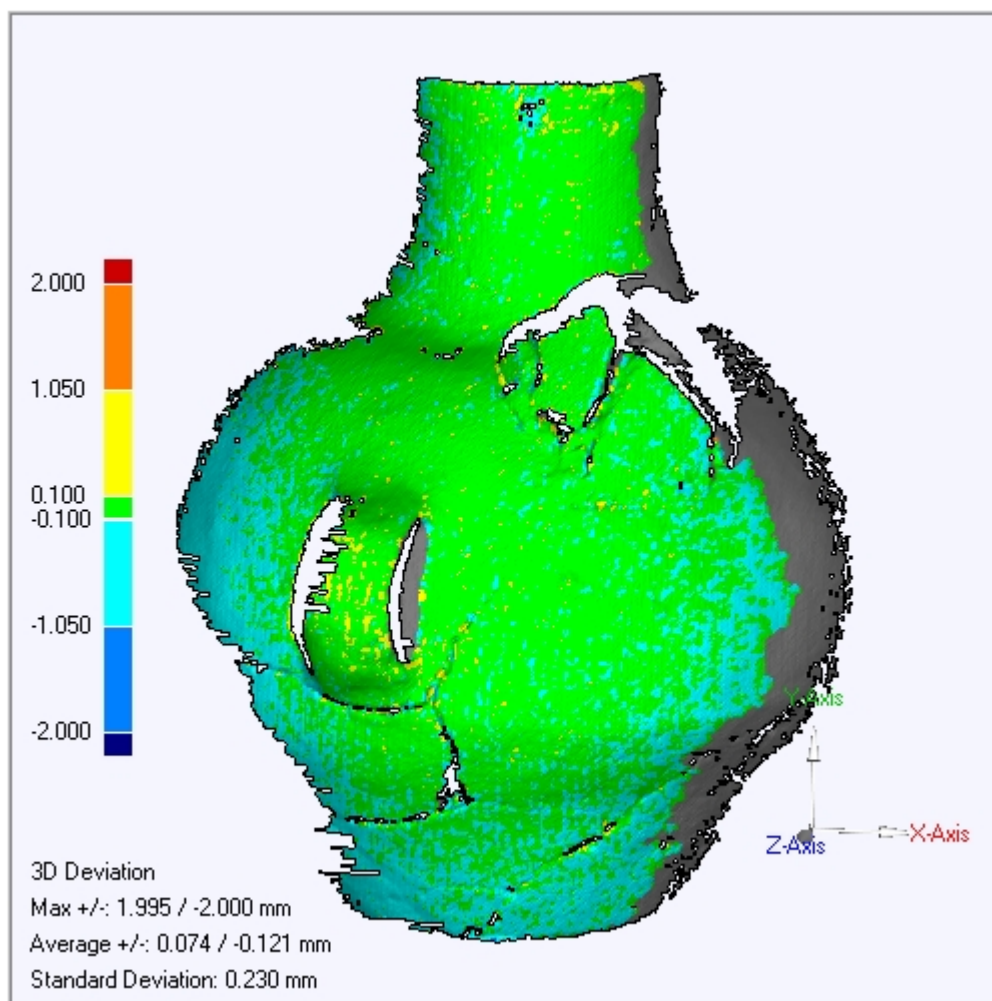
6.3.1.2 Σαρώσεις V03 και V04



Εικόνα 6.6: Ψηφιακές εικόνες από τις δύο θέσεις σάρωσης



Εικόνα 6.7: Εντοπισμός ομόλογων σημείων



Εικόνα 6.8: Απόκλιση των συνενωμένων νεφρών σημείων

Σημεία ενδιαφέροντος 1	1973
Σημεία ενδιαφέροντος 2	1961
Ομολογίες σημείων	184
Outliers 1	6
$RMS_{fundamental}$	0,7 μm
Outliers 2	16
Points	162
RMS_{rigid}	0,363 mm
i	5

Πίνακας 6.3: Αριθμητικά αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου

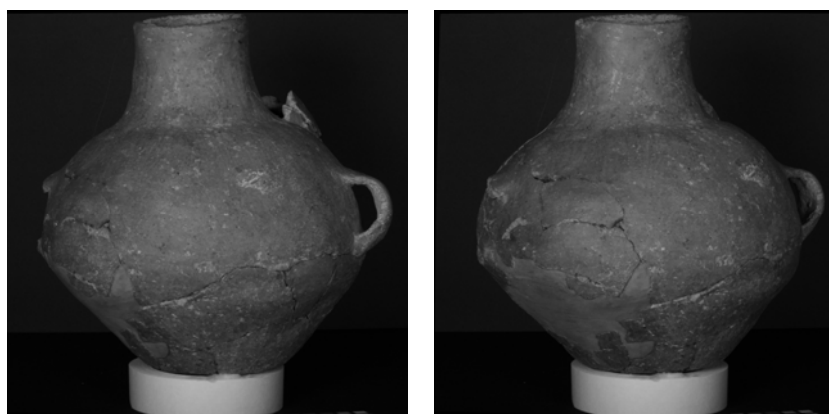
Σε αυτό το ζεύγος εικόνων, εντοπίστηκε διπλάσιος αριθμός ομολογων σημείων από ότι στο προηγούμενο, μολονότι τα δύο ζεύγη απεικονίζουν το ίδιο αντικείμενο και έχουν εξίσου μεγάλες επικαλύψεις. Το παραπάνω οφείλεται στην διαφορά υψής μεταξύ των δύο ζευγών εικόνων. Συγκεκριμένα, από τις εικόνες 6.3 και 6.6, φαίνεται ότι στη δεύτερη περίπτωση απεικονίζονται περισσότερες ρωγμές στο κατώτερο τμήμα του αμφορέα, γεγονός που επιτρέπει την εξαγωγή περισσότερων χαρακτηριστικών σημείων και την εύρεση περισσότερων ομολογιών.

$$F = \begin{bmatrix} -1.619 \cdot 10^{-8} & -1.004 \cdot 10^{-7} & -3.383 \cdot 10^{-4} \\ -1.506 \cdot 10^{-7} & 3.670 \cdot 10^{-8} & -0.0048 \\ 0.0003 & 0.0049 & 0.0559 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 0.9387 & -0.0544 & 0.3403 \\ 0.0463 & 0.9984 & 0.0319 \\ -0.3415 & -0.0142 & 0.9398 \end{bmatrix}$$

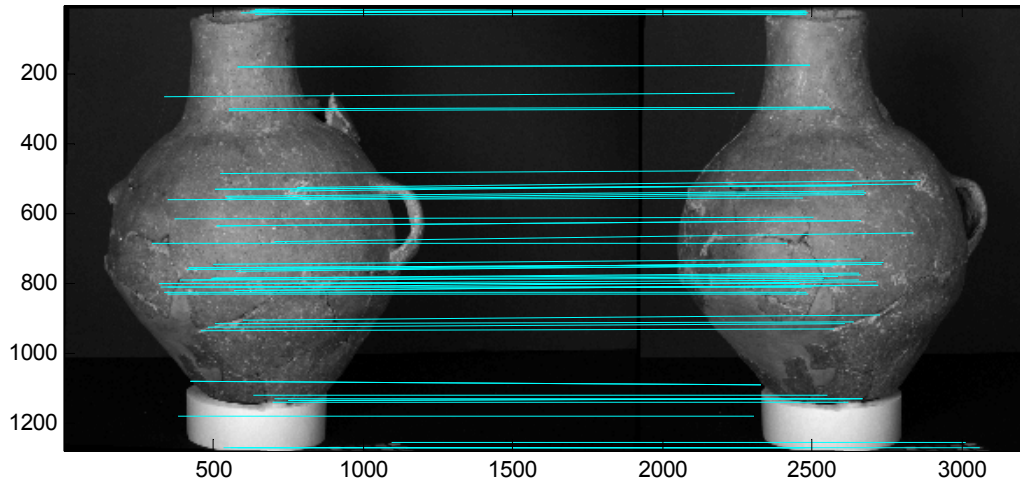
$$T = \begin{bmatrix} 525.9401 \\ 46.6040 \\ -72.3487 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

6.3.1.3 Σαρώσεις V06 και V07

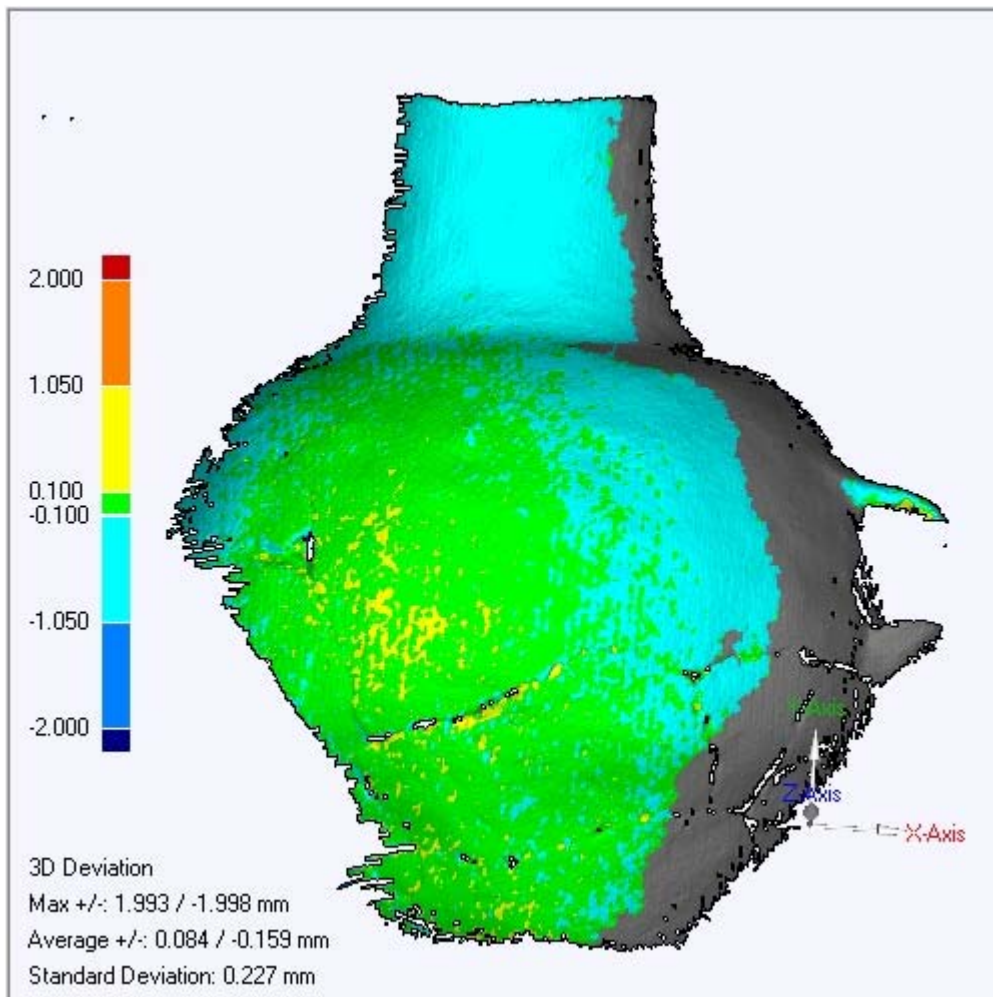


Εικόνα 6.9: Ψηφιακές εικόνες από τις δύο θέσεις σάρωσης

Συνένωση Νεφών Σημείων από Ομολογίες Εικόνων



Εικόνα 6.10: Εντοπισμός ομολογων σημείων



Εικόνα 6.11: Απόκλιση των συνενωμένων νεφών σημείων

Σημεία ενδιαφέροντος 1	1671
Σημεία ενδιαφέροντος 2	1525
Ομολογίες σημείων	61
Outliers 1	13
$RMS_{fundamental}$	6,5 μm
Outliers 2	23
Points	25
RMS_{rigid}	0,373 mm
i	9

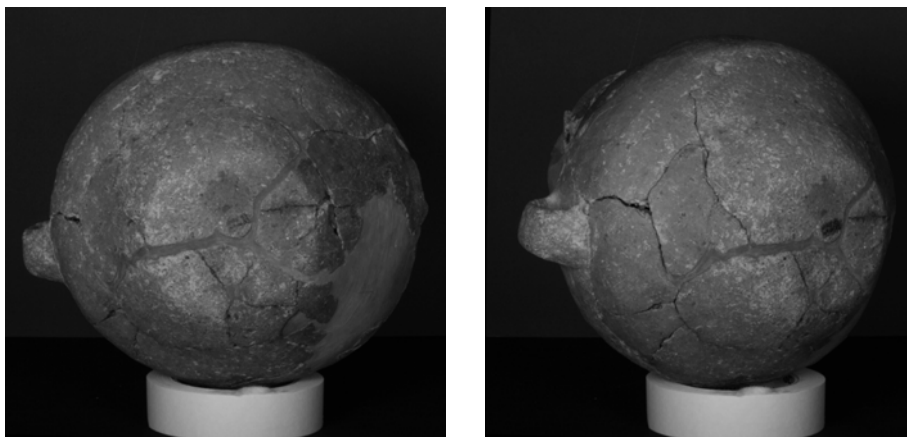
Πίνακας 6.4: Αριθμητικά αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου

$$F = \begin{bmatrix} 2.934 \cdot 10^{-10} & 2.797 \cdot 10^{-7} & 1.770 \cdot 10^{-5} \\ 1.461 \cdot 10^{-8} & -1.507 \cdot 10^{-7} & 0.0040 \\ -3.357 \cdot 10^{-6} & -0.0040 & -0.0218 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 0.8617 & -0.0554 & 0.5044 \\ 0.0408 & 0.9984 & 0.0399 \\ -0.5058 & -0.0138 & 0.8625 \end{bmatrix}$$

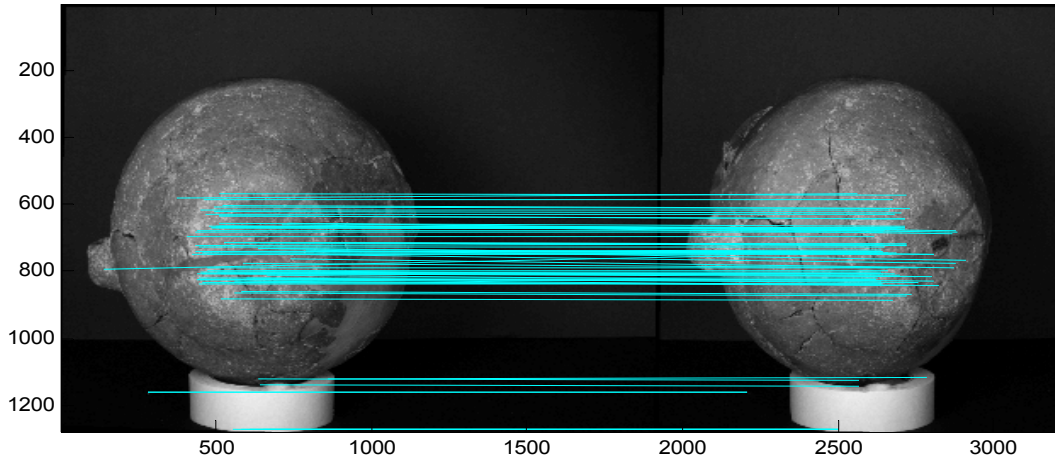
$$T = \begin{bmatrix} 782.9829 \\ 60.4824 \\ -191.4184 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

6.3.1.4 Σαρώσεις B και B02

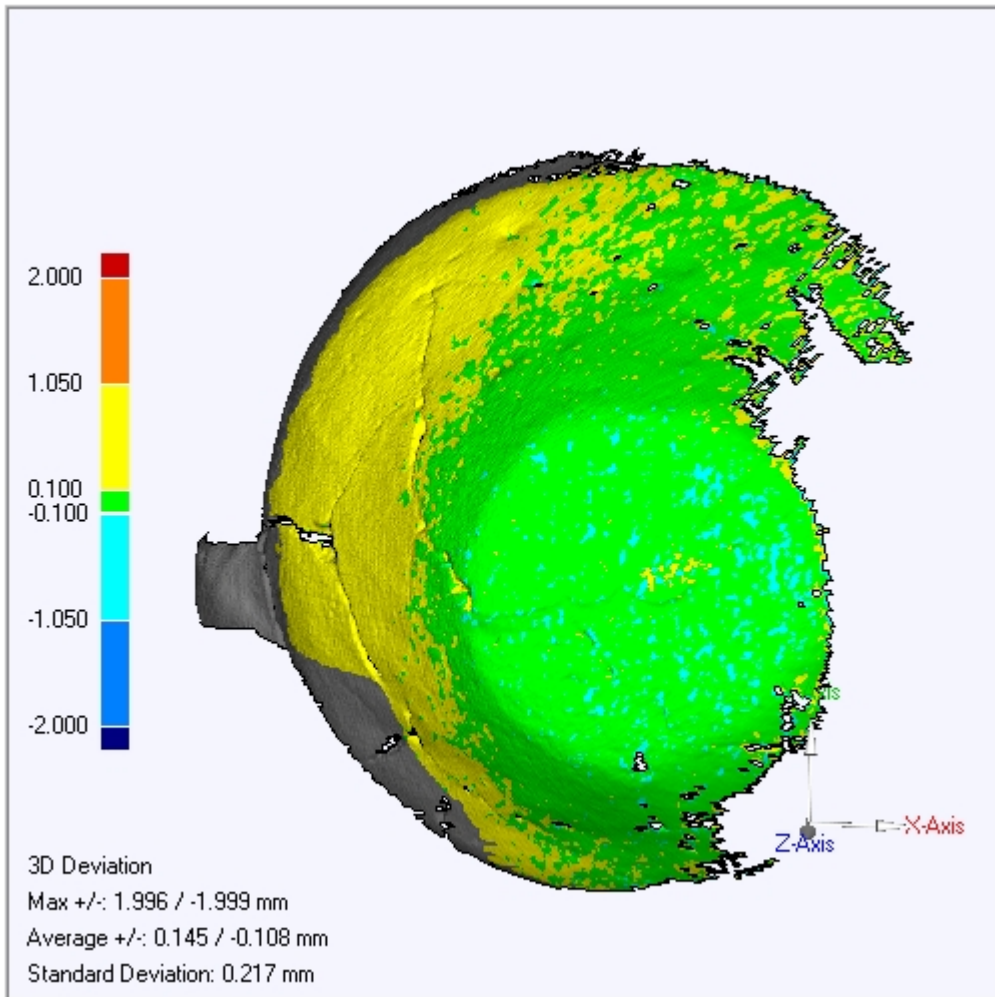


Εικόνα 6.12: Ψηφιακές εικόνες από τις δύο θέσεις σάρωσης

Συνένωση Νεφών Σημείων από Ομολογίες Εικόνων



Εικόνα 6.13: Εντοπισμός ομολογων σημείων



Εικόνα 6.14: Απόκλιση των συνενωμένων νεφών σημείων

Σημεία ενδιαφέροντος 1	2980
Σημεία ενδιαφέροντος 2	2819
Ομολογίες σημείων	75
Outliers 1	3
$RMS_{fundamental}$	0,5 μm
Outliers 2	16
Points	56
RMS_{rigid}	0,336 mm
i	8

Πίνακας 6.6: Αριθμητικά αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου

$$F = \begin{bmatrix} 3.401 \cdot 10^{-8} & -1.175 \cdot 10^{-7} & 4.840 \cdot 10^{-4} \\ -6.131 \cdot 10^{-7} & 9.478 \cdot 10^{-8} & -0.0065 \\ 6.544 \cdot 10^{-4} & 0.0068 & -0.6549 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 0.8200 & 0.1010 & 0.5634 \\ -0.0921 & 0.9948 & -0.0443 \\ -0.5649 & -0.0156 & 0.8250 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} 882.7833 \\ -65.0168 \\ -245.9923 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

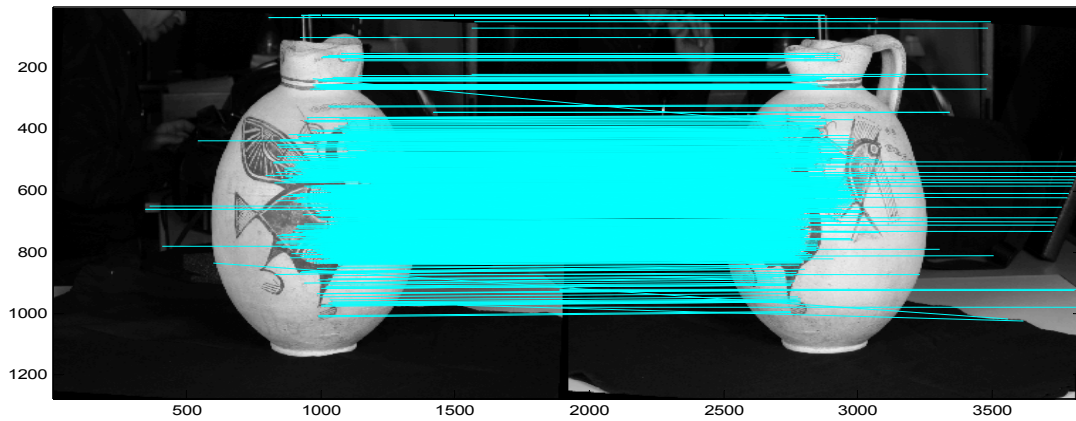
6.3.2 Αγγείο 2

6.3.2.1 Σαρώσεις 12 και 13

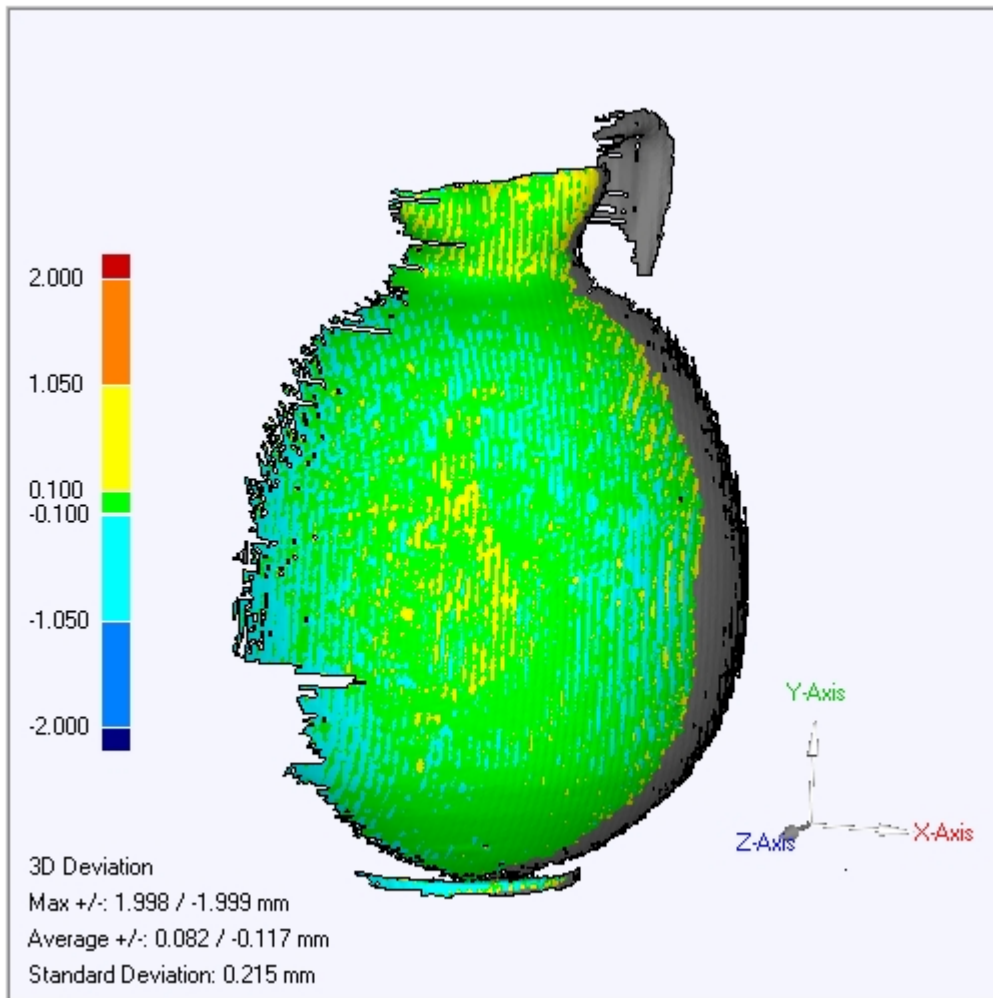


Εικόνα 6.15: Ψηφιακές εικόνες από τις δύο θέσεις σάρωσης

Συνένωση Νεφών Σημείων από Ομολογίες Εικόνων



Εικόνα 6.16: Εντοπισμός ομολογων σημείων



Εικόνα 6.17: Απόκλιση των συνενωμένων νεφών σημείων

Σημεία ενδιαφέροντος 1	4885
Σημεία ενδιαφέροντος 2	4644
Ομολογίες σημείων	1120
Outliers 1	54
$RMS_{fundamental}$	0,7 μm
Outliers 2	74
Points	992
RMS_{rigid}	0,403 mm
i	6

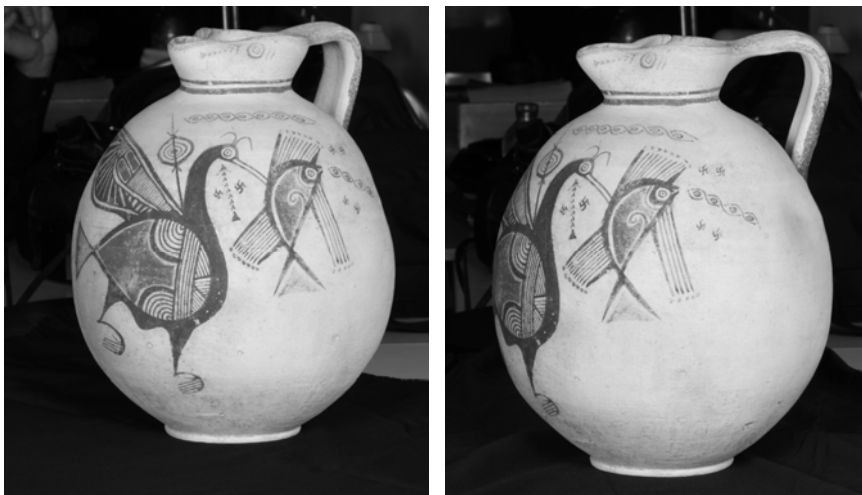
Πίνακας 6.7: Αριθμητικά αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου

$$F = \begin{bmatrix} -2.605 \cdot 10^{-9} & -3.001 \cdot 10^{-7} & 1.247 \cdot 10^{-5} \\ -2.440 \cdot 10^{-7} & -2.140 \cdot 10^{-9} & 0.0067 \\ -4.451 \cdot 10^{-5} & -0.0061 & 0.0319 \end{bmatrix}$$

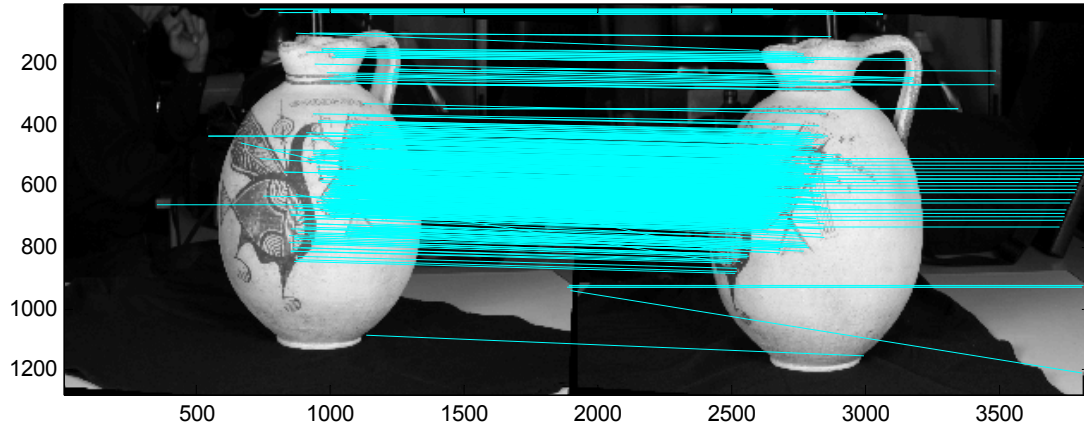
$$R = \begin{bmatrix} 0.8994 & 0.0582 & -0.4333 \\ -0.0602 & 0.9981 & 0.0091 \\ 0.4330 & 0.0178 & 0.9012 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} -698.7532 \\ 18.9025 \\ -189.0936 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

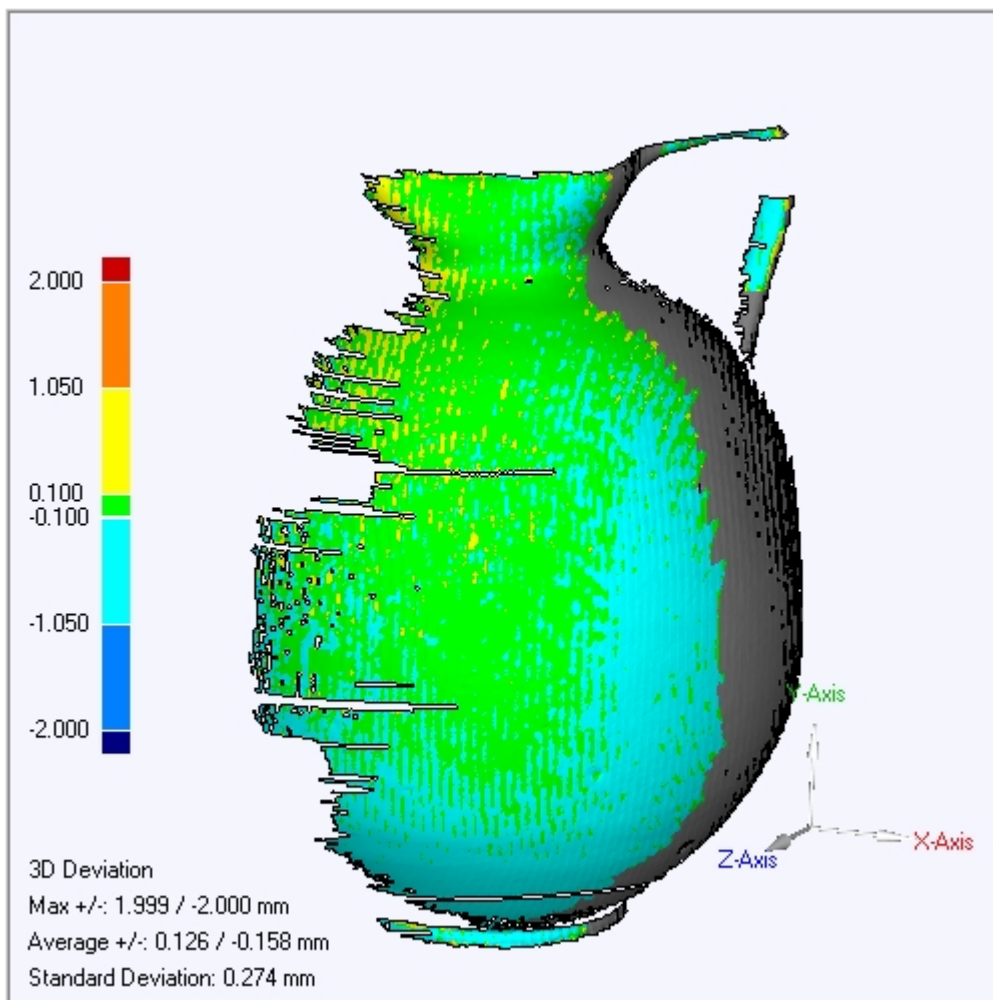
6.3.2.2 Σαρώσεις 13 και 14



Εικόνα 6.18: Ψηφιακές εικόνες από τις δύο θέσεις σάρωσης



Εικόνα 6.19: Εντοπισμός ομολογων σημείων



Εικόνα 6.20: Απόκλιση των συνενωμένων νεφών σημείων

Σημεία ενδιαφέροντος 1	4644
Σημεία ενδιαφέροντος 2	3846
Ομολογίες σημείων	706
Outliers 1	88
$RMS_{fundamental}$	0,5 μm
Outliers 2	80
Points	538
RMS_{rigid}	0,390 mm
i	5

Πίνακας 6.8: Αριθμητικά αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου

$$F = \begin{bmatrix} -1.180 \cdot 10^{-8} & -3.689 \cdot 10^{-7} & 9.430 \cdot 10^{-5} \\ -5.586 \cdot 10^{-7} & 7.586 \cdot 10^{-9} & 0.0087 \\ -1.315 \cdot 10^{-4} & -0.0084 & 0.0092 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 0.8480 & 0.0706 & -0.5252 \\ -0.0745 & 0.9971 & 0.0137 \\ 0.5247 & 0.0275 & 0.8509 \end{bmatrix}$$

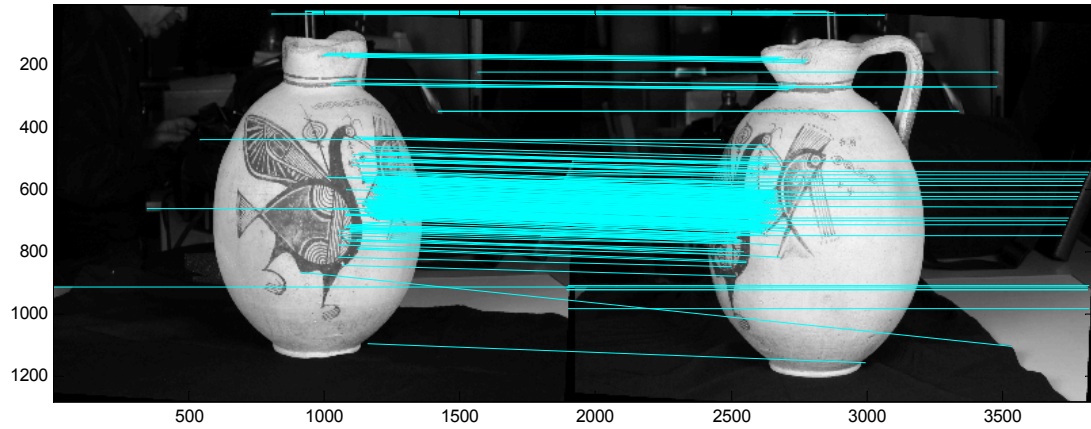
$$T = \begin{bmatrix} -869.1916 \\ 12.1951 \\ -169.6240 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

6.3.2.3 Σαρώσεις 12 και 14

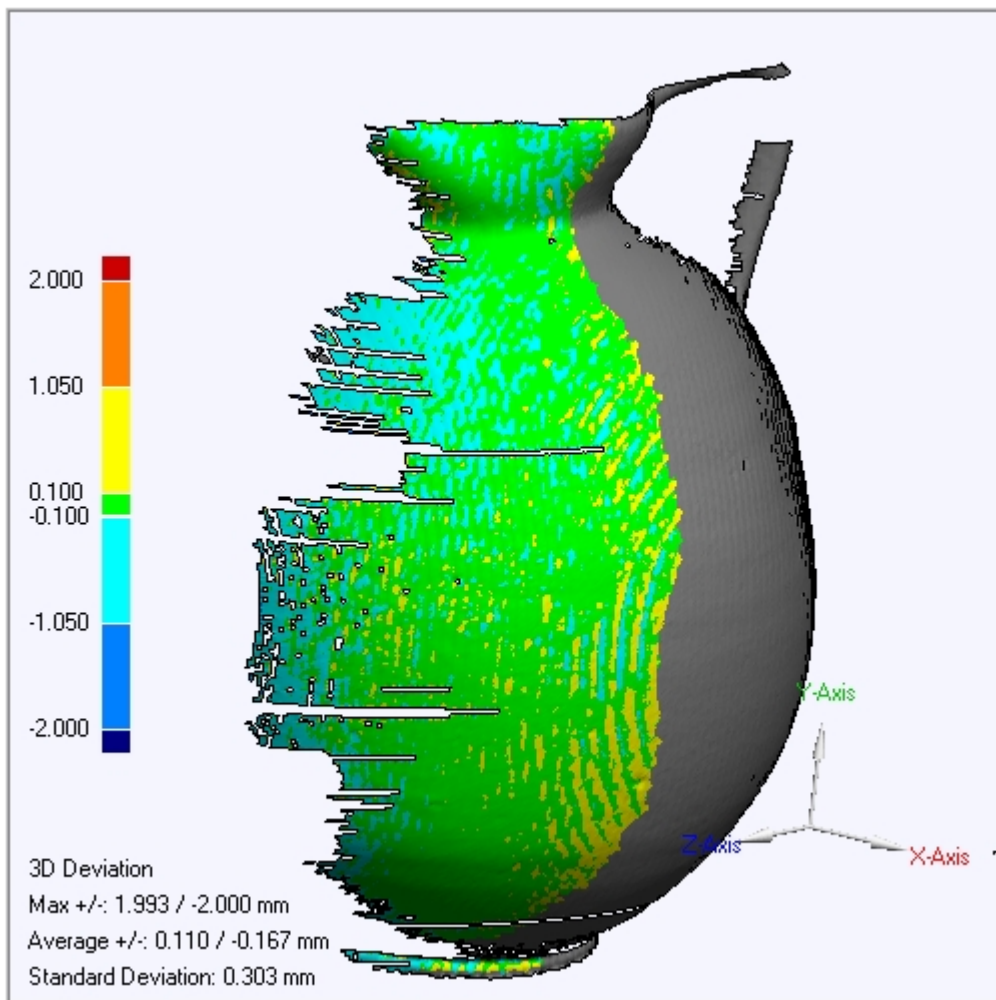


Εικόνα 6.21: Ψηφιακές εικόνες από τις δύο θέσεις σάρωσης

Συνένωση Νεφών Σημείων από Ομολογίες Εικόνων



Εικόνα 6.22: Εντοπισμός ομόλογων σημείων



Εικόνα 6.23: Απόκλιση των συνενομένων νεφών σημείων

Σημεία ενδιαφέροντος 1	4885
Σημεία ενδιαφέροντος 2	3846
Ομολογίες σημείων	271
Outliers 1	44
$RMS_{fundamental}$	0,5 μm
Outliers 2	49
Points	178
RMS_{rigid}	0,416 mm
i	7

Πίνακας 6.9: Αριθμητικά αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου

$$F = \begin{bmatrix} -1.866 \cdot 10^{-8} & -1.100 \cdot 10^{-7} & 1.992 \cdot 10^{-5} \\ -1.202 \cdot 10^{-6} & 1.270 \cdot 10^{-8} & 0.0121 \\ -1.704 \cdot 10^{-4} & -0.0105 & 0.1049 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 0.5297 & 0.1101 & -0.8410 \\ -0.1196 & 0.9913 & 0.0545 \\ 0.8397 & 0.0717 & 0.5383 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} -1362.3000 \\ 81.5291 \\ -698.8607 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Στο σημείο αυτό ολοκληρώνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου σε διαφορετικά δεδομένα. Στα επόμενα, συγκρίνονται τα αποτελέσματα εκτέλεσης του αλγορίθμου κι εξάγονται συμπεράσματα για τις δυνατότητες της προτεινόμενης μεθόδου. Για τη διευκόλυνση της σύγκρισης, στον πίνακα που ακολουθεί, παρατίθενται συνοπτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από κάθε εφαρμογή του αλγορίθμου. Συγκεκριμένα, για κάθε ένα ζεύγος σαρώσεων δίνεται το πλήθος των ομολογών σημείων που εντοπίστηκαν αρχικά πάνα στις εικόνες, μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου SIFT και το πλήθος των ομολογών κόμβων, με τους οποίους επιλύεται τελικά ο τρισδιάστατος μετασχηματισμός. Επίσης, δίνεται ο αριθμός των επαναλήψεων που έγιναν ώστε να υπολογιστούν οι παράμετροι του μετασχηματισμού στερεού σώματος, το ποσοστό της επικάλυψης κάθε ζεύγους σαρώσεων, το σφάλμα (RMS_{rigid}) επίλυσης του μετασχηματισμού και τυπική απόκλιση (STD) μεταξύ των συνενωμένων νεφών σημείων.

Σαρώσεις	Ομολογίες Σημείων	Points	Αριθμός Επαναλήψεων	Ποσοστό Επικάλυψης	RMSrigid (mm)	STD (mm)
V01 V02	96	62	5	80%	0,420	0,270
V03 V04	184	162	5	80%	0,363	0,230
V06 V07	61	25	9	80%	0,373	0,227
B B02	75	56	8	70%	0,336	0,217
12 13	1120	992	6	80%	0,403	0,215
13 14	706	538	5	70%	0,390	0,274
12 14	271	178	7	50%	0,416	0,303

Πίνακας 6.10: Συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων

Από τον παραπάνω πίνακα, με μια πρώτη ματιά, παρατηρούνται τα εξής:

- Ο αριθμός των ομολογών σημείων που εντοπίζονται στις δύο εικόνες μέσω της εφαρμογής του αλγορίθμου SIFT αλλά και ο αριθμός των ομολογών κόμβων που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό των παραμέτρων του μετασχηματισμού, είναι σημαντικά μεγαλύτερος στις τρεις τελευταίες εφαρμογές του αλγορίθμου. Οι εφαρμογές αυτές έγιναν στον δεύτερο αμφορέα (Εικόνα 6.2 β.) κι επομένως η διαφορά του αριθμού των ομολογών σημείων οφείλεται στην ύπαρξη μεγαλύτερου ποσοστού υψής σε αυτόν. Δεδομένου ότι ο υπολογισμός των παραμέτρων του μετασχηματισμού απαιτεί την ύπαρξη επαρκή αριθμού ομολογών κόμβων μεταξύ των δύο νεφών σημείων, η οποία σχετίζεται άμεσα με τον αριθμό των ομολογιών που εντοπίζονται στο ζεύγος των εικόνων, είναι προφανές ότι η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου εξαρτάται σημαντικά από την ποιότητα της υψής των τελευταίων.
- Ο αριθμός των επαναλήψεων που έγιναν για τον υπολογισμό των παραμέτρων του μετασχηματισμού, κυμαίνεται στο διάστημα 5 έως 9, χωρίς να παρουσιάζονται μεγάλες διαφοροποιήσεις.
- Τα ποσοστά των επικαλύψεων μεταξύ των διαδοχικών σαρώσεων είναι υψηλά, γεγονός που επιβάλλεται από την γεωμετρία των αντικειμένων. Παρόλα αυτά, όπως φαίνεται και από τις εικόνες που αντιστοιχούν σε κάθε μία σάρωση (Κεφάλαιο 6), οι σχετικές στροφές μεταξύ τους είναι αρκετά μεγάλες. Τέλος, σημαντικά μικρότερο ποσοστό επικάλυψης παρατηρείται στο ζεύγος 12-14, το οποίο άλλωστε δεν είναι συνίσταται από διαδοχικές σαρώσεις. Η προσπάθεια συνένωσης της πρώτης με την τρίτη σάρωση γίνεται προκειμένου να διερευνηθούν οι δυνατότητες της προτεινόμενης μεθόδου.
- Τα σφάλματα υπολογισμού των παραμέτρων του μετασχηματισμού και η τυπική απόκλιση των συνενωμένων νεφών σημείων, σε όλες τις περιπτώσεις, είναι μικρότερα του ενός χιλιοστού.

7

Συμπεράσματα

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάπτυξη μίας διαφορετικής μεθόδου συνένωσης νεφών σημείων, που βασίζεται σε ομολογίες σημείων από εικόνες. Στο κεφάλαιο αυτό, επιχειρείται η σύγκριση της προτεινόμενης μεθοδολογίας τόσο με τις κλασικές μεθόδους, όσο και με τις «εικονιστικές» μεθόδους που έχουν προταθεί από διάφορους ερευνητές στο παρελθόν. Στη συνέχεια, αξιολογούνται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του αλγορίθμου, που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, προκειμένου να διερευνηθούν οι δυνατότητες της μεθόδου. Τέλος, παρατίθενται ορισμένες προτάσεις με στόχο τη βελτίωση και την επέκταση της μεθόδου μελλοντικά.

7.1 Συγκριτική Αξιολόγηση της Μεθόδου

Οι κλασικές μέθοδοι συνένωσης νεφών σημείων (ελαχιστοτετραγωνική μέθοδος, αλγόριθμος του επαναληπτικά κοντινότερου σημείου) στηρίζουν τη λειτουργία τους, αποκλειστικά, σε τρισδιάστατη πληροφορία. Το παραπάνω αποτελεί την ειδοποιό διαφορά τους, με τη μέθοδο που προτείνεται στο πλαίσιο της διπλωματικής. Οι κλασικές μέθοδοι χαρακτηρίζονται από την ανάγκη εκτίμησης προσεγγιστικών τιμών για τη σχετική θέση των νεφών σημείων κι επομένως από την αδυναμία πλήρους αυτοματοποίησης της διαδικασίας (Roth, 1999). Το τελευταίο, στο πλαίσιο των αναγκών της ψηφιακής εποχής, αποκτά ιδιαίτερη σημασία. Επιπρόσθετα, οι κλασικές μέθοδοι αντιμετωπίζουν δυσκολίες σε περιπτώσεις αντικειμένων με υψηλό βαθμό συμμετρίας σχήματος ενώ εμφανίζουν απαιτήσεις για μεγαλύτερες επικαλύψεις μεταξύ των νεφών, όσο αυξάνεται η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας των αντικειμένων (Van Gool, 2002, Grün, 2005). Με βάση τα παραπάνω, η προτεινόμενη μέθοδος φαίνεται να υπερτερεί ως προς το βαθμό αυτοματοποίησης, έναντι των κλασικών μεθόδων συνένωσης, αφού δεν απαιτεί καμία παρέμβαση από το χρήστη. Παράλληλα, οι κλασικές μέθοδοι παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία ως προς την ποιότητα εκτίμησης των αρχικών τιμών, κάτι το οποίο προφανώς δεν υφίσταται στην περίπτωση της προτεινόμενης μεθόδου. Τέλος, η αξιοποίηση της υφής των

αντικειμένων, που επιτυγχάνεται μέσω της εφαρμογής της εναλλακτικής μεθόδου, επιλύει τα προβλήματα που οφείλονται στη συμμετρία του σχήματός τους.

Από την άλλη πλευρά, η προτεινόμενη μέθοδος παρουσιάζει διαφορές, συγκρινόμενη με τις «εικονιστικές» μεθόδους που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα (§ 4.3). Συγκεκριμένα, η βασική ιδέα της μεθόδου έχει πολλές ομοιότητες με εκείνη της μεθόδου του Roth (1999), αν και οι δύο μέθοδοι διαφοροποιούνται ως προς το είδος των εικόνων που χρησιμοποιούν και τις τεχνικές ανίχνευσης ομολογών σημείων που εφαρμόζονται σε αυτές. Συγκεκριμένα, η χρήση εικόνων έντασης της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας laser μειονεκτεί έναντι των κλασικών εικόνων, ως προς την ευκολία ανίχνευσης χαρακτηριστικών σημείων. Επίσης, ο αλγόριθμος SIFT έχει καλύτερα αποτελέσματα σε εικόνες που παρουσιάζουν γεωμετρικές παραμορφώσεις μεταξύ τους, έναντι των αποτελεσμάτων των γωνιακών τελεστών (corner detectors), που χρησιμοποιεί ο Roth. Η μέθοδος του Brusco (2005), η οποία χρησιμοποιεί τις εικόνες TSI, πετυχαίνει την αυτοματοποίηση του πρώτου μόνο σταδίου της συνένωσης νεφών σημείων. Έτσι, η προτεινόμενη μέθοδος υπερέρχει εκείνης του Brusco, ως προς το βαθμό αυτοματοποίησης της διαδικασίας, αφού η δεύτερη καλύπτει μόνο το αρχικό στάδιο εκτίμησης της σχετικής θέσης των νεφών που απαιτείται για την μετέπειτα εφαρμογή του αλγορίθμου ICP. Η μέθοδος του Sagawa (2007) χρησιμοποιεί έγχρωμες εικόνες έναντι των εικόνων τόνων του γκρι που χρησιμοποιεί η προτεινόμενη μέθοδος. Οι έγχρωμες εικόνες υπερτερούν έναντι των δεύτερων, αφού σε αυτές εμπεριέχεται περισσότερη πληροφορία μέσω των τριών καναλιών. Η βασική διαφορά των δύο μεθόδων έγκειται στην προσέγγιση που υιοθετεί η κάθε μία έτσι ώστε να εντοπίσει ομολογους κόμβους μεταξύ νεφών διαδοχικών σαρώσεων. Ενώ, η προτεινόμενη μέθοδος εντοπίζει πρώτα ομολογα σημεία πάνω στις εικόνες και στη συνέχεια μεταβαίνει από αυτά σε ομολογους κόμβους, η μέθοδος του Sagawa υπολογίζει από τις εικόνες τα χαρακτηριστικά της υψής για κάθε ένα κόμβο. Στη συνέχεια αναζητά ομολογίες μεταξύ κόμβων με ισχυρά χαρακτηριστικά. Είναι προφανές ότι η προσέγγιση αυτή είναι πιο απαιτητική υπολογιστικά από εκείνη της προτεινόμενης μεθόδου, αφού τα διανύσματα των χαρακτηριστικών (descriptors) υπολογίζονται για όλα τα σημεία. Τέλος, η μέθοδος του Wu (2008), που χρησιμοποιεί τις αναλλοίωτες περιοχές VIP, εφαρμόζει τον αλγόριθμο SIFT προκειμένου να εντοπιστούν ομολογες περιοχές μεταξύ των εικόνων, όπως και η προτεινόμενη μέθοδος. Ειδοποιός διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων, είναι ότι η μέθοδος του Wu υπολογίζει τις αναλλοίωτες περιοχές στις οποίες εφαρμόζεται ο αλγόριθμος SIFT, για κάθε ένα σημείο του νέφους. Επομένως, το υπολογιστικό κόστος της διαδικασίας είναι και πάλι μεγαλύτερο.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι κάθε μία «εικονιστική» μέθοδος, συμπεριλαμβανομένης και της προτεινόμενης στο πλαίσιο της διπλωματικής, εμφανίζει διαφορές και ομοιότητες με τις άλλες σε αρκετά σημεία. Η φιλοσοφία της κάθε μιας αλλά και τα δεδομένα που

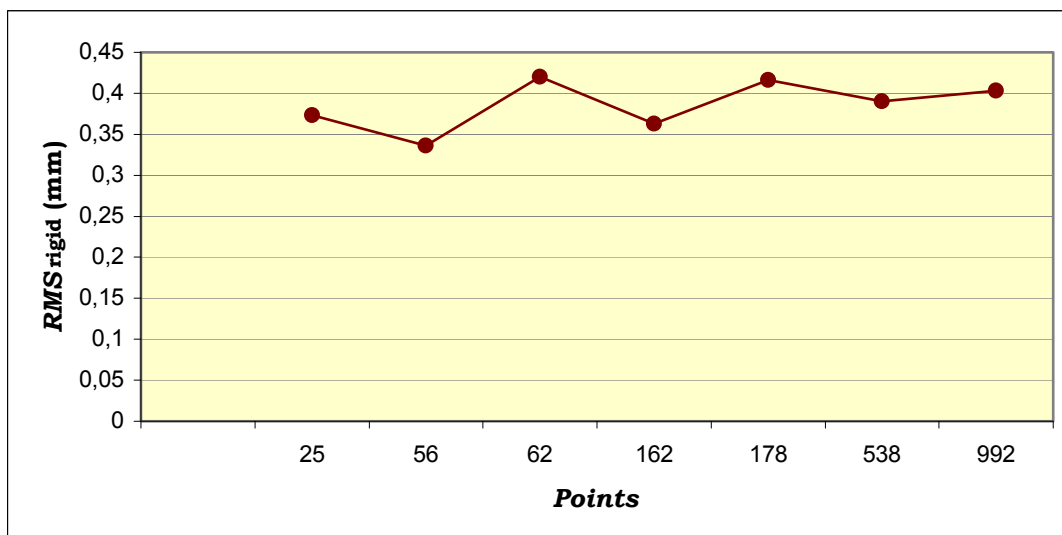
χρησιμοποιεί ποικίλλουν, στη βάση του κοινού τους στόχου, που δεν είναι άλλος από την πλήρη αυτοματοποίηση της συνένωσης νεφών σημείων. Οι διαφορές που εντοπίζονται μεταξύ τους οφείλονται στο ότι δεν υπάρχει κάποια καθιερωμένη πρακτική για την επίτευξη του στόχου τους, δεδομένου ότι η συνένωση νεφών σημείων από εικόνες αποτελεί ένα ερευνητικό αντικείμενο που εμφανίστηκε τα τελευταία χρόνια και δεν έχει εξαντληθεί ακόμη, επιδεχόμενο πολλών βελτιώσεων και προτάσεων.

7.2 Αξιολόγηση των Αποτελεσμάτων

Η προτεινόμενη μέθοδος συνένωσης νεφών σημείων, εφαρμόστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο σε μία σειρά δεδομένων, έτσι ώστε να είναι δυνατή η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς της. Από την εκτέλεση της μεθόδου προκύπτουν τα ακόλουθα:

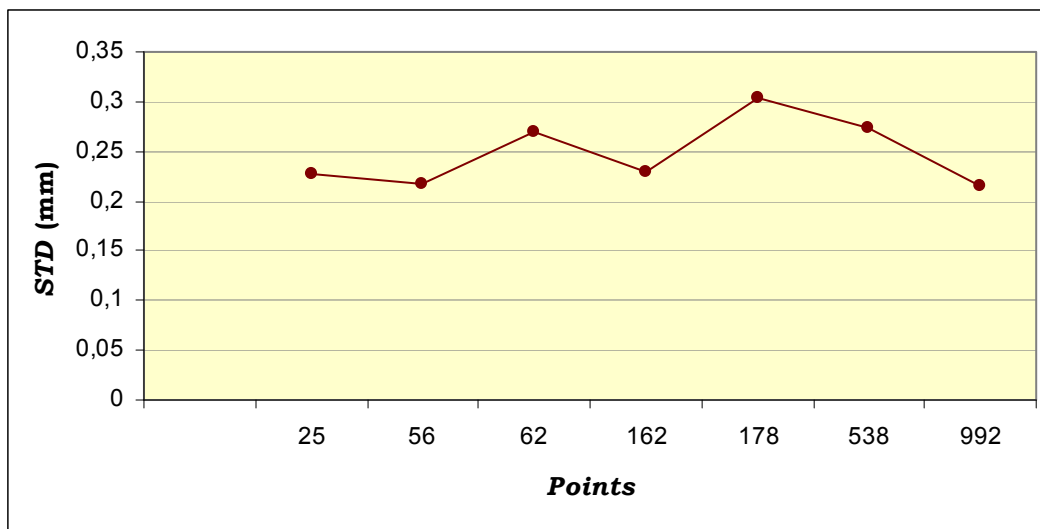
- Δεν τίθεται καμία απαίτηση για εκτίμηση αρχικών τιμών αφού η παρέμβαση του χρήστη περιορίζεται αποκλειστικά στην επιλογή των δεδομένων εισόδου του αλγορίθμου. Επομένως, επιτυγχάνεται το κύριο ζητούμενο της διαδικασίας, που τέθηκε εξαρχής, αυτό της πλήρους αυτοματοποίησης.
- Οι χρόνοι εκτέλεσης του αλγορίθμου κυμαίνονται σε ικανοποιητικά επίπεδα, παρά το μεγάλο όγκο των δεδομένων εισόδου. Συγκεκριμένα, η διαδικασία ολοκληρώνεται μέσα στο χρονικό διάστημα του 1-1.5 λεπτών. Οι διαφορές στους χρόνους που μετρήθηκαν, σχετίζονται με το πλήθος των χαρακτηριστικών σημείων που εντοπίζονται στις εικόνες κάθε ζεύγους σαρώσεων κι άρα με την εφαρμογή του αλγορίθμου SIFT.
- Η προτεινόμενη μέθοδος χρησιμοποιεί την πληροφορία της εικόνας του εκάστοτε αντικειμένου κι επομένως τα αποτελέσματά της εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό, πέρα από τις επικαλύψεις των σαρώσεων και την γεωμετρία των αντικειμένων, από το βαθμό ύπαρξης υψής στο αντικείμενο. Αυτό σημαίνει ότι η αδυναμία εντοπισμού ομολογών σημείων πάνω στο αντικείμενο, εξ αιτίας της υψής του (π.χ. ομοιόμορφη υφή, επαναλαμβανόμενα μοτίβα κλπ.), συνεπάγεται την αδυναμία εκτέλεσης της προτεινόμενης μεθόδου.
- Τέλος, η χρήση των εικόνων δίνει τη δυνατότητα αντιμετώπισης προβλημάτων που απορρέουν από τον υψηλό βαθμό συμμετρίας της γεωμετρίας των αντικειμένων. Οι κλασικές μέθοδοι συνένωσης, που χρησιμοποιούν αποκλειστικά γεωμετρική πληροφορία, αδυνατούν να διαχειριστούν συμμετρικά αντικείμενα. Αντίθετα, η προτεινόμενη μέθοδος, χρησιμοποιώντας την πληροφορία των εικόνων, μπορεί να διαχειριστεί τέτοια αντικείμενα. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις τέτοιων αντικειμένων αποτελούν αγγεία, τα οποία είναι συμμετρικά ως προς τον κατακόρυφο άξονα, ειδικά όταν δεν υπάρχουν χαρακτηριστικά τμήματα πάνω σε αυτά (π.χ. χειρολαβές).

Το πλήθος των ομολογων σημείων που εντοπίζονται στις εικόνες, όπως προαναφέρθηκε, συνδέεται άμεσα με τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου. Για το λόγο αυτό, στα διαγράμματα που ακολουθούν, παρουσιάζεται σχηματικά, η σχέση του σφάλματος του μετασχηματισμού και της τυπικής απόκλισης, με το πλήθος των ομολογων κόμβων.



Διάγραμμα 7.1: Μεταβολή του σφάλματος του μετασχηματισμού συναρτήσει του πλήθους των ομολογων κόμβων

Από το παραπάνω διάγραμμα, φαίνεται ότι οι τιμές των μέσων εναπομενοντων σφαλμάτων στους ομολογους κόμβους, που υπολογίζονται μετά τον προσδιορισμό των παραμέτρων του μετασχηματισμού, δεν παρουσιάζουν μεγάλες μεταβολές. Συγκεκριμένα κυμαίνονται στο διάστημα από 0,336 mm έως 0,420 mm. Η ελάχιστη τιμή αντιστοιχεί στο ζεύγος σαρώσεων B και B02, με επικάλυψη 80%. Το ζεύγος αυτό έχει προέλθει από τη σάρωση του πυθμένα του πρώτου αμφορέα κι άρα η καμπυλότητα του τμήματος του αντικειμένου είναι σαφώς μικρότερη από εκείνη των τμημάτων που σαρώθηκαν περιμετρικά αυτού (λόγω του επίπεδου τμήματος της βάσης του αμφορέα που καταλαμβάνει και το μεγαλύτερο τμήμα των δύο σαρώσεων). Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το πλήθος των ομολογων κόμβων δεν παίζει ρόλο στην ακρίβεια υπολογισμού των παραμέτρων του μετασχηματισμού, αφού οι μεταβολές των εναπομενοντων σφαλμάτων είναι ελάχιστες. Παρόλα αυτά, θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε όλες τις περιπτώσεις συνένωσης που παρουσιάζονται στο παραπάνω διάγραμμα, το πλήθος των ομολογων κόμβων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των παραμέτρων του μετασχηματισμού είναι σαφώς μεγαλύτερο από το πλήθος των απαιτούμενων. Επομένως, η προτεινόμενη μέθοδος παρουσιάζει σταθερότητα στα αποτελέσματά της ως προς το πλήθος των ομολογων κόμβων, με δεδομένο όμως, ότι υπάρχει ικανοποιητική περίσσεια παρατηρήσεων.



Διάγραμμα 7.2: Μεταβολή της τυπικής απόκλισης συναρτήσει του πλήθους των ομόλογων κόμβων

Παρόμοια εικόνα με προηγουμένως, φαίνεται να παρουσιάζει και η μεταβολή της τυπικής απόκλισης των συνενωμένων νεφών σημείων, που απεικονίζεται στο παραπάνω διάγραμμα. Οι ελάχιστες αποκλίσεις εντοπίζονται και πάλι στο ζεύγος σαρώσεων του πυθμένα του πρώτου αμφορέα και στις σαρώσεις 12 και 13 του δεύτερου αμφορέα, όπου εντοπίστηκε και ο μέγιστος αριθμός ομόλογων κόμβων. Η μέγιστη τιμή τυπικής απόκλισης υπολογίζεται στη συνένωση των νεφών σημείων, που προήλθαν από τις σαρώσεις 12 και 14. Το παραπάνω είναι λογικό αφού πρόκειται για ζεύγος μη διαδοχικών σαρώσεων με επικάλυψη 50%. Όμως και σε αυτή την περίπτωση, η τυπική απόκλιση είναι αρκετά μικρότερη από το 1 mm, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η προτεινόμενη μέθοδος έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα και σε μικρότερες επικαλύψεις. Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να σημειωθεί, ότι τα αποτελέσματα της μεθόδου δεν ήταν εξίσου ικανοποιητικά, στην συνένωση των νεφών των σαρώσεων V04 και V05 (Εικόνα 7.1). Πρόκειται για σαρώσεις του πρώτου αμφορέα, με επικάλυψη 50%, όπου όμως η συνένωση δεν ήταν δυνατή. Η αποτυχία της μεθόδου οφειλόταν στην αδυναμία εντοπισμού επαρκούς αριθμού ομόλογων σημείων, που οδήγησε σε μεγάλη αβεβαιότητα στη συνένωση των νεφών. Από τα παραπάνω επιβεβαιώνεται ότι οι δυνατότητες της προτεινόμενης μεθόδου, εξαρτώνται σημαντικά από την ύπαρξη και την ποιότητα της υφής του εκάστοτε αντικειμένου. Ειδικότερα, η σημασία της υφής του αντικειμένου ενισχύεται σε περιπτώσεις σαρώσεων με μικρές επικαλύψεις μεταξύ τους, όπου ο εντοπισμός ομόλογων σημείων δυσχεραίνεται και από την ύπαρξη μεγάλων σχετικών στροφών.



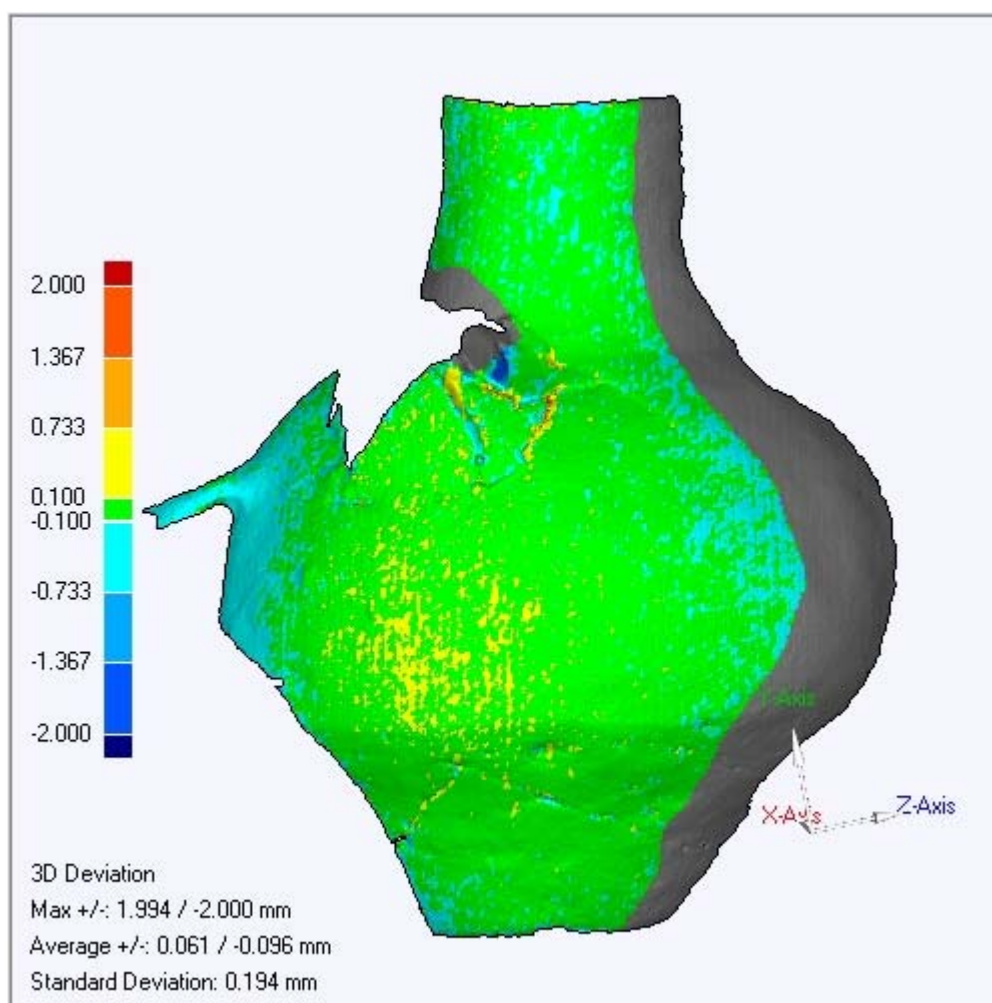
Εικόνα 7.1: Ψηφιακές εικόνες των σαρώσεων V04 και V05

Τα αποτελέσματα εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου σε διαφορετικά δεδομένα, αξιολογήθηκαν προηγουμένως ως προς την εσωτερική τους ακρίβεια αλλά και συγκριτικά μεταξύ τους. Όμως, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση της προτεινόμενης μεθόδου με τον αλγόριθμο του ICP, που αποτελεί άλλωστε και την πλέον καθιερωμένη μέθοδο συνένωσης νεφών σημείων. Για τη σύγκριση αυτή χρησιμοποιήθηκαν τα ζεύγη σαρώσεων V01, V02 και V03, V04. Τα ζεύγη αυτά επιλέχθηκαν, επειδή για αυτά ήταν διαθέσιμα τα συνενωμένα νέφη σημείων, από την εφαρμογή του ICP μέσω κατάλληλων εμπορικών πακέτων.

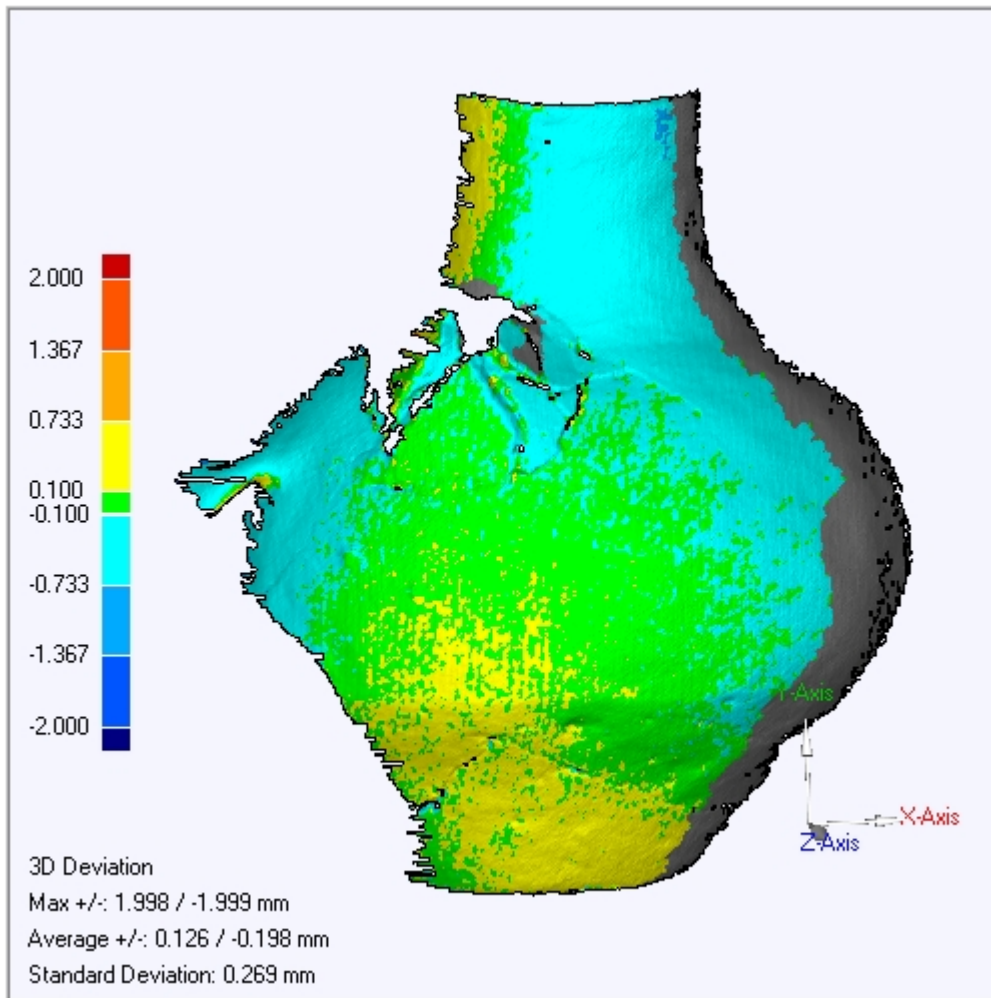
Στην εικόνα 7.2 παρουσιάζεται η απόκλιση των συνενωμένων νεφών σημείων, των σαρώσεων V01 και V02, που προήλθαν από την εφαρμογή του αλγορίθμου ICP. Αντίστοιχα, στην εικόνα 7.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου στις ίδιες σαρώσεις.

	ICP	Προτεινόμενη Μέθοδος
Μέγιστη Απόκλιση (mm)	+1.994 / - 2.000	+1.998 / -1.999
Μέση Απόκλιση (mm)	+0.061 / -0.096	+0.126 / -0.198
Τυπική Απόκλιση (mm)	0.194	0.269

Πίνακας 7.1: Σαρώσεις V01 και V02



Εικόνα 7.2: Απόκλιση συνενωμένων νεφών σημείων των σαρώσεων V01 και V02 με τον αλγόριθμο ICP



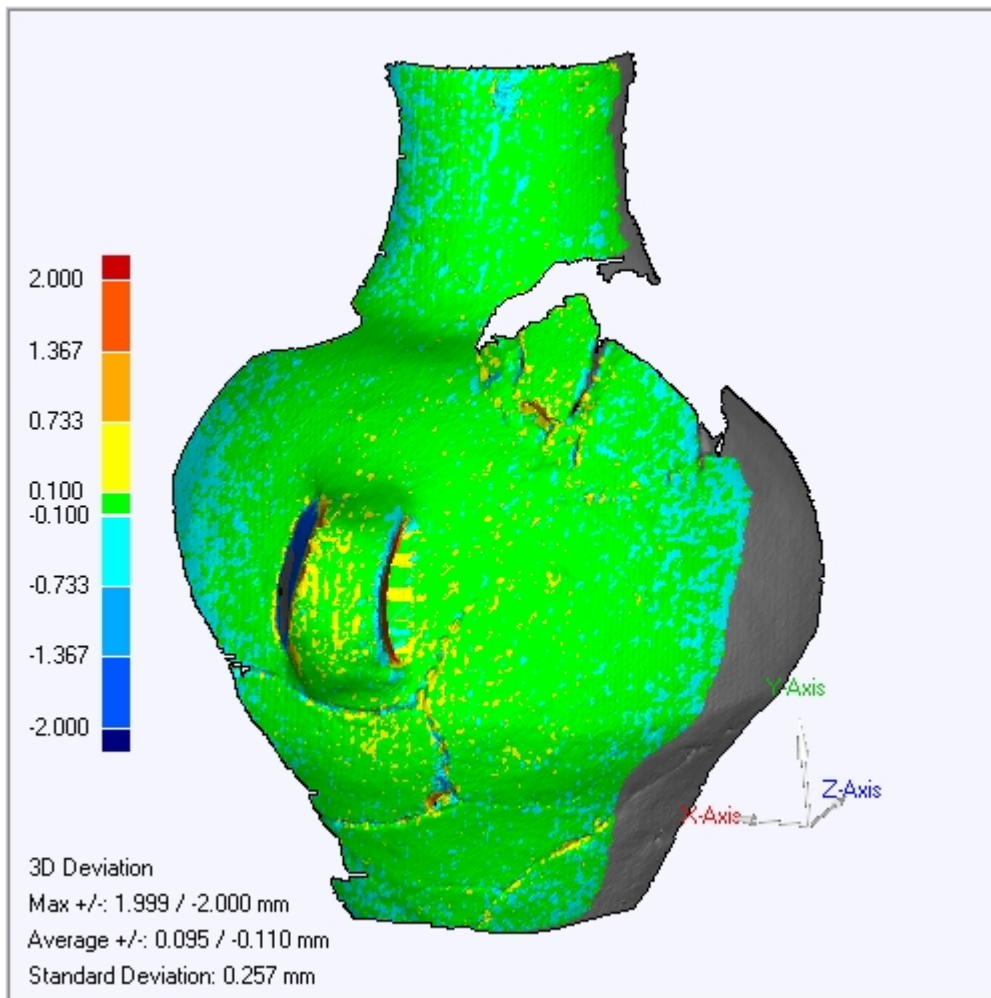
Εικόνα 7.3: Απόκλιση συνενωμένων νεφών σημείων των σαρώσεων V01 και V02 με την προτεινόμενη μέθοδο

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ο αλγόριθμος ICP οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα, σε σχέση με αυτά της προτεινόμενης μεθόδου, αν και οι διαφορές είναι μικρές. Συγκεκριμένα, η τυπική απόκλιση των συνενωμένων νεφών είναι κατά 75 μm μεγαλύτερη στην περίπτωση της προτεινόμενης μεθόδου. Η διαφορά αυτή είναι ικανοποιητική και πιθανώς αναμενόμενη, δεδομένου ότι συγκρίνονται τα αποτελέσματα μιας ημιαυτόματης και μιας πλήρους αυτοματοποιημένης μεθόδου. Τέλος, θα πρέπει να επισημανθεί, ότι το μοντέλο του αντικειμένου που προήλθε από την εφαρμογή του αλγορίθμου ICP, έχει υποστεί περαιτέρω επεξεργασία. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και από τις εικόνες παραπάνω, έχουν αφαιρεθεί λανθασμένα τρίγωνα της επιφάνειας, έχουν εξομαλυνθεί τα όρια του αντικειμένου κι έχουν γεμίσει ορισμένα κενά που είχε η επιφάνεια μετά τη σάρωση. Η παραπάνω επεξεργασία δεν έγινε στο μοντέλο που προήλθε από την προτεινόμενη μέθοδο, με αποτέλεσμα ένα μέρος της διαφοράς της τυπικής απόκλισης, που υπολογίστηκε, να οφείλεται στην ύπαρξη θορύβου στο μοντέλο της εικόνας 7.3.

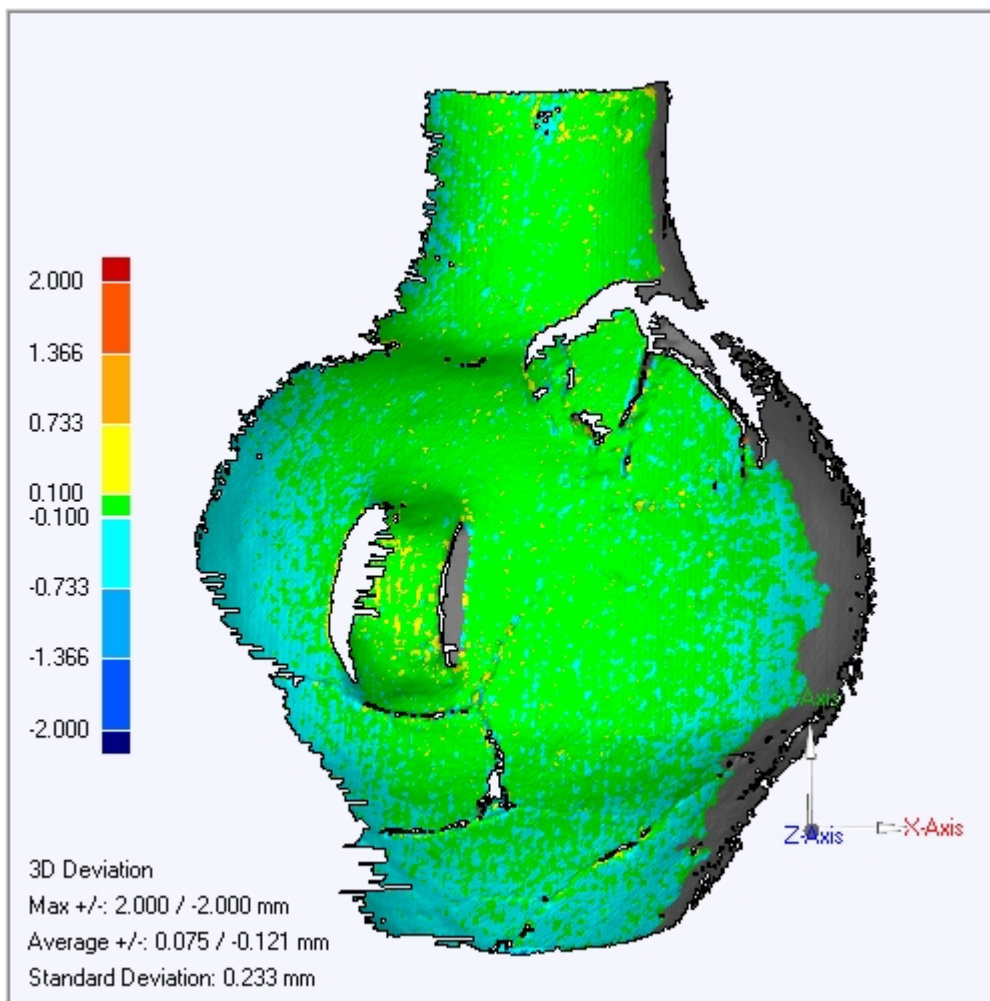
Στην εικόνα 7.4 παρουσιάζεται η απόκλιση των συνενωμένων νεφών σημείων, των σαρώσεων V03 και V04, που προήλθαν από την εφαρμογή του αλγορίθμου ICP. Αντίστοιχα, στην εικόνα 7.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου στις ίδιες σαρώσεις.

	ICP	Προτεινόμενη Μέθοδος
Μέγιστη Απόκλιση (mm)	+1.999 / - 2.000	+2.000 / -2.000
Μέση Απόκλιση (mm)	+0.095 / -0.110	+0.075 / -0.121
Τυπική Απόκλιση (mm)	0.257	0.233

Πίνακας 7.3: Σαρώσεις V03 και V04



Εικόνα 7.4: Απόκλιση συνενωμένων νεφών σημείων των σαρώσεων V03 και V04 με τον αλγόριθμο ICP



Εικόνα 7.5: Απόκλιση συνενωμένων νεφών σημείων των σαρώσεων V03 και V04 με την προτεινόμενη μέθοδο

Σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση, τα στοιχεία του πίνακα 7.3 δείχνουν ότι τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου είναι καλύτερα από αυτά του αλγορίθμου ICP. Συγκεκριμένα, η τυπική απόκλιση των νεφών σημείων, που συνενώθηκαν με την αυτόματη μέθοδο, προκύπτει κατά 24 μm μικρότερη από εκείνη των νεφών που συνενώθηκαν με τον ICP. Κι εδώ οι διαφορές είναι μικρές και πιθανώς να οφείλονται σε σφάλματα της μοντελοποίησης μετά την εφαρμογή του ICP.

Συνοψίζοντας, η προτεινόμενη μέθοδος συνένωσης νεφών σημείων, αποτελεί μία ικανοποιητική, από άποψη χρόνου και ακρίβειας, εναλλακτική λύση στο πρόβλημα της συνένωσης νεφών σημείων. Τα αποτελέσματα της μεθόδου επηρεάζονται από ορισμένους παράγοντες καθώς επίσης και από τον τρόπο που αυτοί συνδυάζονται μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, από την εφαρμογή της μεθόδου σε διαφορετικά δεδομένα, παρατηρείται ότι όσο μειώνονται οι επικαλύψεις των σαρώσεων και αυξάνονται οι σχετικές στροφές τόσο μεγαλύτερη σημασία παίζει η ποιότητα της υψής των αντικειμένων. Επίσης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή της μεθόδου έγινε σε δύο διαφορετικά αγγεία, τα οποία

αποτελούν σχετικά δυσμενή αντικείμενα. Σε περιπτώσεις διαφορετικών αντικειμένων (απλούστερη γεωμετρία, επίπεδα αντικείμενα, μικρότερες καμπυλότητες), με βάση την εμπειρία που αποκτήθηκε, η προτεινόμενη μέθοδος θα έχει εξίσου ικανοποιητικά αποτελέσματα. Μία ένδειξη για το παραπάνω δίνεται και από τα αποτελέσματα της μεθόδου στο ζεύγος σαρώσεων B και B02. Ειδικότερα, ο εντοπισμός ομολογών σημείων σε εικόνες αντικειμένων με λιγότερο πολύπλοκες γεωμετρίες, θα είναι ευκολότερος (λόγω μικρότερων μεταβολών κλίμακας και σχετικών στροφών) κι επομένως η μέθοδος θα ανταποκρίνεται και σε περιπτώσεις σαρώσεων με μικρότερες επικαλύψεις. Τέλος, με δεδομένο ότι η προτεινόμενη μέθοδος προσφέρει μία πλήρως αυτοματοποιημένη αντιμετώπιση του προβλήματος της συνένωσης, τα αποτελέσματά της είναι συγκρίσιμα και ανταγωνιστικά με αυτά του αλγορίθμου ICP.

7.3 Προτάσεις για το Μέλλον

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία, κρίνεται σκόπιμο να διατυπωθούν ορισμένες ιδέες και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα πάνω στο αντικείμενο και για βελτιώσεις της μεθόδου που αναπτύχθηκε. Στα προηγούμενα, τα αποτελέσματα της μεθόδου αξιολογήθηκαν ως προς την εσωτερική τους ακρίβεια και συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα της μεθόδου του ICP. Στο μέλλον, θα ήταν χρήσιμο να διερευνηθεί και η αξιοπιστία της μεθόδου, κάτι το οποίο δεν γίνεται στο πλαίσιο της διπλωματικής. Το παραπάνω είναι εφικτό μέσω της εφαρμογής της μεθόδου σε σαρώσεις αντικειμένων γνωστής γεωμετρίας. Τέλος, όσον αφορά την αξιολόγηση των δυνατοτήτων της μεθόδου, στο μέλλον θα ήταν χρήσιμο να πραγματοποιηθούν κι άλλοι έλεγχοι σε σαρώσεις διαφορετικών επικαλύψεων και αντικειμένων ποικίλης γεωμετρίας και υφής.

Ο αλγόριθμος που σχεδιάστηκε λαμβάνει υπόψη δύο εικόνες του αντικειμένου, μία από κάθε θέση σάρωσης. Στα προηγούμενα (§ 3.2.3) περιγράφηκαν τα οφέλη της χρήσης πολλαπλών εικόνων στην διαδικασία της ψηφιακής συνταύτισης. Στο μέλλον, θα ήταν χρήσιμη η τροποποίησή του αλγορίθμου, ώστε να λαμβάνει υπόψη το σύνολο το εικόνων του αντικειμένου, προκειμένου να ελέγχονται οι ομολογίες των σημείων.

Η προτεινόμενη μέθοδος μετασχηματίζει τα νέφη σημείων από το σύστημα αναφοράς της μιας σάρωσης σε αυτό της άλλης. Συνεπώς, ακόμα κι αν συνενωθούν ανά δύο όλες οι σαρώσεις ενός αντικειμένου, δεν θα είναι δυνατή η δημιουργία ολοκληρωμένου μοντέλου, αφού κάθε ένα ζεύγος θα είναι σε άλλο σύστημα αναφοράς. Συνεπώς, χρήσιμη επέκταση της διπλωματικής θα ήταν η ένταξη των συνενωμένων νεφών σημείων σε ένα κοινό σύστημα αναφοράς.

Τέλος, προτείνεται η δημιουργία παραθυρικού περιβάλλοντος για την εκτέλεση του αλγορίθμου, ώστε να είναι ακόμα πιο φιλική στον χρήστη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Γεωργόπουλος Α., 1998. Ψηφιακή Φωτογραμμετρία. Σπουδαστικές σημειώσεις ΣΑΤΜ ΕΜΠ.
- Καλησπεράκης Η., 2010. Η επιπολική γεωμετρία στον προβολικό και τον ευκλείδειο χώρο. Διδακτορική Διατριβή, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.
- Καρράς Γ., 1998. Γραμμικοί μετασχηματισμοί συντεταγμένων στη Φωτογραμμετρία. Σπουδαστικές σημειώσεις ΣΑΤΜ ΕΜΠ.
- Καρράς Γ., 2008. Εισαγωγή στην Συνταύτιση Εικόνων. Σπουδαστικές σημειώσεις ΣΑΤΜ ΕΜΠ.
- Καρφής Α., 2009. Διερεύνηση φωτογραμμετρικών αυτοματισμών. Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.
- Πατιάς Π., 1991. Εισαγωγή στη Φωτογραμμετρία. Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Πέτσα Ε., 2000. Θεμελιώδεις Έννοιες και Θεμελιώδη Προβλήματα της Φωτογραμμετρίας. Σπουδαστικές Σημειώσεις, Τμήμα Τοπογραφίας ΤΕΙ Αθήνας.
- Σκαρλάτος Δ., 2006. Διερεύνηση της Αυτόματης Επιλογής Παραθύρου Ελαχιστοποιητραγωνικής Συνταύτισης και του Ελέγχου Ψηφιακών Μοντέλων Αναγλύφου χωρίς Δεδομένα Αναφοράς. Διδακτορική Διατριβή, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.
- Ackermann F., 1984. Digital image correlation: Performance and potential application in photogrammetry. *Photogrammetric Record* 11 (64), pp. 429-439.
- Baltsavias E., 1991. Multiphoto geometrically constraint matching. PhD thesis, Institute of geodesy and photogrammetry, Zurich.
- Baumberg A., 2000. Reliable Feature Matching Across Widely Separated Views. *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Hilton Head, South Carolina, pp. 774-781.
- 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.
- Brown M., Szeliski R., Winder S., 2005. Multi-image matching using multi-scale oriented patches. *Computer Vision and Pattern Recognition* 1, pp. 510-517.

- Brückner M., Bajramovic F., Denzler J., 2008. Experimental Evaluation of Relative Pose Estimation Algorithms. In Proc. of the Third International Conf. on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP) 2, pp. 431–438.
- Changchang W., Clipp B., Xiaowei L., Frahm M., Pollefeys M., 2008. 3D model matching with Viewpoint-Invariant Patches (VIP). Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE Conference on.
- Chen Y., Medioni G., 1992. Object modelling by registration of multiple range images. *Image and Vision Computing*, 10 (3), pp. 145-155.
- Eggert D. W., Lorusso A., Fisher R. B., 1997. Estimating 3D Rigid Body Transformations: A Comparison of Four Major Algorithms, *Machine Vision and Applications*, 9 (5/6), pp.272-290.
- 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.
- Förstner W., 1982. On the geometric precision of digital correlation. *International Archives of Photogrammetry* 24 (3), pp. 176-189.
- Förstner W., 1986. A Feature based correspondence algorithm for image matching and least squares matching. *International Archives of Photogrammetry* 26 (3/3), pp. 150-166.
- Förstner W., Gülch E., 1987. A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and centres of circular features. *Proceedings Intercommissional conference on fast processing of photogrammetric data*, pp.281-305.
- 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*, Vol. XXXVIII, Part 5 Commission V.
- Grün A., 1985. Adaptive least squares correlation: A powerful image matching technique. *Remote Sensing and Cartography* 14 (3), pp. 175-187.
- Grün A., Akca D., 2005. Least squares 3D surface and curve matching. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 59 (3), pp. 151-174.
- Harris C., Stephens M., 1988. A Combined Corner and Edge Detector. *Proc. Fourth Alvey Vision Conference*, pp. 147-151.

- Hartley, R., 1997a. In defence of the eight-point algorithm. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 19(6), pp. 580-593.
- Hartley R., Zisserman A., 2000. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press.
- Läbe T., Förstner W., 2006. Automatic relative orientation of images. *Proceedings of the 5th Turkish-German Joint Geodetic Days*.
- Lowe, D., 1999. Object recognition from local scale-invariant features. In *International Conference on Computer Vision, Corfu, Greece*, pp. 1150-1157.
- Lowe, D., 2004. Distinctive image features from scale invariant keypoints. *The International Journal of Computer Vision*, 2(60), pp. 91-110.
- Luong Q., Deriche R., Faugeras O., Papadopoulo T., 1993. On Determining the Fundamental Matrix: Analysis of Different Methods and Experimental Results. *INRIA Technical Report RR-1894*.
- Manasir K., Fraser C., 2006. Registration of terrestrial laser scanner data using imagery. *The Photogrammetric Record* 21(115), pp. 255-268.
- Remondino F., 2006. Detectors and descriptors for photogrammetric applications. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Commission III Symposium, Germany*. In press.
- Roth G., 1999. Registering Two Overlapping Range Images. *Proceedings of the Second International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling*. pp. 191-200. NRC 43637.
- Rusinkiewicz S., Levoy M., 2001. Efficient Variants of the ICP Algorithm. *Proc. 3DIM 2001*.
- Sagawa R., Osawa N., Yagi Y., 2007. Deformable Registration of Textured Range Images by Using Texture and Shape Features. *3-D Digital Imaging and Modeling. Sixth International Conference on*.
- Schmid C., Mohr R., Bauckhage C., 2000. Evaluation of Interest Point Detectors. *International Journal of Computer Vision* 37 (2), pp. 151-172.

- Shragai Z., Barnea S., Filin S., Zalmanson G., Doytsher Y., 2005. Automatic Image Sequence Registration Based on a Linear Solution and Scale Invariant Keypoint Matching. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 36 (3/W36), pp. 5-11.
- Torr P.H.S., Murray D.W., 1997. The Development and Comparison of Robust Methods for Estimating the Fundamental Matrix. *International Journal of Computer Vision* 24 (3), pp. 271-300.
- Tuytelaars T., Van Gool L., 2000. Wide baseline stereo based on local affinity invariant regions. In *British Machine Vision Conference*, Bristol, UK, pp. 412-422.
- Tuytelaars T., Van Gool L., 2004. Matching Widely Separated Views Based on Affine Invariant Regions. *International Journal of Computer Vision* 59(1), pp. 61-85.
- Van Gool L., Tuytelaars T., Ferrari V., Strecha C., Vanden Wyngaerd J., Vergauwen M., 2002. 3D modeling and registration under wide baseline conditions, *Proc. ISPRS Commission III 34(3A)*, *Photogrammetric Computer Vision*, pp. 3-14, September 9-13, Graz.
- Zhang Z., 1992. Iterative point matching for registration of free-form curves. *INRIA Technical Report RR-1658*.
- Zhang, Z., 1994. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces. *International Journal of Computer Vision*, 13 (2), pp. 119-152.