



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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ
ΣΥΝΕΝΩΣΗΣ ΝΕΦΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ

Κωνσταντίνος Βέργος

Επιβλέπων: Ανδρέας Γεωργόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Ιούλιος 2015

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στην εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας, η οποία συντάχτηκε στο πλαίσιο των προπτυχιακών σπουδών μου στη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, είχα τη βοήθεια και τη συμπαράσταση ορισμένων ανθρώπων, τους οποίους θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθένα ξεχωριστά.

Αρχικά 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. Ευχαριστώ για την ελευθερία που μου έδωσε σε επιλογές για την τελική διαμόρφωση του αντικειμένου.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένειά μου για την μοναδική υποστήριξή της καθ' όλη την μέχρι τώρα πορεία μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάγκη συλλογής και μοντελοποίησης της τρισδιάστατης πληροφορίας αντικειμένων του χώρου τις τελευταίες δεκαετίες ακολουθεί αυξητική τάση. Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει τους ερευνητές σε μεγάλο αριθμό διαφορετικών μεθόδων και προσεγγίσεων. Οι παραπάνω μέθοδοι καλούνται να υλοποιηθούν σε διαφορετικά καθημερινά τυπικά προβλήματα, εφαρμογές και εργασίες του σύγχρονου Αγρονόμου και Τοπογράφου Μηχανικού, όπως γεωδαιτικές, φωτογραμμετρικές εφαρμογές και εφαρμογές τηλεπισκόπησης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται όπως ομολογεί και ο τίτλος της στην διερεύνηση και αξιολόγηση συγκεκριμένων μεθοδολογιών στο στάδιο της συνένωσης τρισδιάστατων νεφών σημείων. Η ανάγκη συνένωσης απορρέει από την ύπαρξη πολλαπλών νεφών σημείων για το ίδιο αντικείμενο, με σκοπό κυρίως την πληρότητα της αποτύπωσης και την αποφυγή αποκρύψεων. Τα νέφη σημείων προς συνένωση κάλλιστα μπορεί να προέρχονται από διαφορετικές πηγές και μεθόδους παραγωγής. Για την εκτέλεση του πειραματικού μέρους της συγκεκριμένης εργασίας τα χρησιμοποιούμενα νέφη σημείων προς συνένωση προέρχονται από σύστημα τρισδιάστατου σαρωτή τεχνολογίας laser. Η συγκεκριμένη μέθοδος παραγωγής νεφών σημείων επιλέχθηκε διότι τα συστήματα αυτά επιτρέπουν την συλλογή υψηλής πυκνότητας νεφών σημείων με μεγάλη ταχύτητα και ακρίβεια. Οι σύγχρονοι σαρωτές μπορούν να συλλέξουν τρισδιάστατη πληροφορία για αντικείμενα του χώρου όπως κτίρια κ.α. με ακρίβεια μερικών χιλιοστών, γεγονός που δίνει πλεονέκτημα χρήσης τους σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών.

Στην παρούσα εργασία βρίσκονται υπό διερεύνηση και αξιολόγηση οι δύο πιο διαδεδομένες μεθοδολογίες συνένωσης νεφών σημείων. Η πρώτη μεθοδολογία υπολογισμού της συνένωσης είναι αυτή του Επαναληπτικά Εγγύτερου Σημείου και η δεύτερη μέθοδος είναι αυτή της Ελαχιστοτετραγωνικής Επίλυσης. Βασικός στόχος της εργασίας είναι η σύγκριση των δύο μεθόδων σε πραγματικές συνθήκες και η αξιολόγηση της ποιότητας του τελικού προϊόντος σε σχέση με την ορθότητα του.

Λέξεις Κλειδιά: Συνένωση, Νέφος Σημείων, Αλγόριθμος Επαναληπτικά Εγγύτερου Σημείου, Ελαχιστοτετραγωνική Επίλυση, Σαρωτής Τεχνολογίας laser, Μετασχηματισμός Στερεού Σώματος, Structure from Motion

INVESTIGATION AND EVALUATION OF POINT CLOUD REGISTRATION METHODOLOGIES

ABSTRACT

The necessity for collection and modeling of the three dimension data of the space objects follows an increasing tendency over the last decades. This fact has led the researchers to a great number of methodologies and approaches. The above methodologies are in challenge to be materialized in different typical problems, applications and projects of modern Rural and Surveying Engineer like geodetic, photogrammetric and remote sensing applications.

The present thesis focuses as its title suggests on investigation and evaluation of certain methods in the level of 3-D point clouds registration. The necessity for registration springs from the existence of multiple point clouds for the same object, with the purpose mainly the completeness of mapping and the avoidance of hiding. The point clouds to registration process may come from different sources and production methods. For the performance of the project's experimental part the used point clouds come from a laser scanning system. The specific production method was chosen because these systems allow the high density point clouds acquisition with a great speed and precision. Modern scanners are able to acquire 3-D data for space objects as buildings etc. with high precision of some millimeters, leading to the usage advantage in large scale of applications.

In this project the most widespread point clouds registration methodologies are under investigation and evaluation. The first one is the Iterative Closest Point – ICP and the second one is the Least Square Solution method. The main purpose is the two methods comparison in real circumstances and the evaluation of the final product's quality relating to its accuracy.

Key Words: Registration, Point Clouds, ICP, Least Square Solution, laser Scanner, Rigid Body Transformation, Structure from Motion

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iii
ABSTRACT.....	iv
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.1 Σκοπός και Στόχοι της Εργασίας	11
1.2 Δομή της Εργασίας.....	11
2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΝΕΦΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ.....	12
2.1 Αρχές Μέτρησης με τη Χρήση Φωτός.....	12
2.1.1 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και το φως.....	12
2.1.2 Περιγραφή Τεχνολογίας laser.....	14
2.1.3 Μέθοδοι και τεχνικές μέτρησης αποστάσεων με τη χρήση φωτός.....	15
2.1.4 Μέθοδοι εκτροπής της ακτίνας.....	23
2.1.5 Σάρωση με laser.....	24
2.1.6 Επίγειοι Σαρωτές Laser	25
2.1.7 Εφαρμογές επίγειων σαρωτών τεχνολογίας laser	26
2.1.8 Ακρίβεια σάρωσης	27
2.1.9 Παρουσίαση εμπορικών συστημάτων σαρωτών	28
2.2 Structure from Motion - (SfM)	30
2.2.1 Βασικές αρχές της μεθόδου	31
2.2.2 Πορεία λειτουργίας της μεθόδου	32
2.2.3 Συμπεράσματα μεθόδου SfM	34
3 ΣΥΝΕΝΩΣΗ ΝΕΦΩΝ ΣΑΡΩΣΕΩΝ	35
3.1 Συνένωση Νεφών Επίγειων Σαρώσεων	36
3.1.1 Άμεση Μέθοδος.....	36
3.1.2 Έμμεση Μέθοδος.....	37
3.1.3 Σύστημα συντεταγμένων επίγειου σαρωτή	40
3.2 Συνένωση Νεφών Εναέριων Σαρώσεων	41
3.3 Μετασχηματισμοί Συντεταγμένων.....	42
3.3.1 Βασικές Μαθηματικές Αρχές	42
3.3.2 Τρισδιάστατος Μετασχηματισμός Στερεού Σώματος.....	44
3.3.3 Τρισδιάστατος Μετασχηματισμός Ομοιότητας.....	46
4 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΣΥΝΕΝΩΣΗΣ ΝΕΦΩΝ ΕΠΙΓΕΙΩΝ ΣΑΡΩΣΕΩΝ	48
4.1 Ο Αλγόριθμος του Επαναληπτικά Εγγύτερου Σημείου	48

4.1.1	Βασικά στοιχεία	48
4.1.2	Παρουσίαση αλγορίθμου.....	49
4.1.3	Βελτιώσεις αλγορίθμου	51
4.2	Ελαχιστοτετραγωνική Μέθοδος Συνένωσης	52
4.2.1	Robust estimation.....	54
4.3	Διαδεδομένα Εμπορικά Λογισμικά Συνένωσης Νεφών.....	55
4.3.1	Scene – FARO’s 3D Documentation Software	56
4.3.2	RiSCAN PRO - RIEGL's Software.....	56
4.3.3	Optech – ILRIS SCAN.....	57
4.3.4	Leica – Cyclone	57
4.3.5	3DVEM – Register.....	57
5	ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	62
5.1	Εξοπλισμός	62
5.1.1	Τοπογραφικός Εξοπλισμός.....	62
5.1.2	Επίγειος Σαρωτής laser	63
5.2	Λογισμικό	64
5.3	Πορεία Εργασιών Συλλογής Δεδομένων.....	65
5.3.1	Συλλογή γεωδαιτικών μετρήσεων.....	66
5.3.2	Συλλογή δεδομένων σάρωσης	67
5.3.3	Πεδίο Ελέγχου	69
6	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	71
6.1	Επεξεργασία Γεωδαιτικών Μετρήσεων	71
6.1.1	Υπολογισμός Γεωδαιτικών Συντεταγμένων.....	71
6.1.2	Υπολογισμός παραμέτρων μετασχηματισμού.....	72
6.1.3	Μετασχηματισμός Συντεταγμένων	73
6.2	Επεξεργασία νεφών σημείων.....	73
6.2.1	Εξαγωγή - εισαγωγή αρχείων ανεξάρτητων νεφών	73
6.2.2	Μορφές Αρχείων.....	74
6.2.3	Συνένωση νεφών.....	75
6.2.4	Γεωαναφορά νεφών.....	80
6.3	Αξιολόγηση Συνενωμένων Νεφών Σημείων	82
6.4	Αξιολόγηση Γεωαναφερμένων Νεφών Σημείων	83
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	90

7.1	Συγκριτική Αξιολόγηση του Συνόλου των Μεθόδων Συνένωσης.....	90
7.2	Συμπεράσματα	91
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	93
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 3DVEM- REGISTER.....	96
A.1	Περιγραφή Εγκατάστασης.....	96
A.2	Χρήση USB - Κλειδιού και Δικτυακής Άδειας	97
A.2.1	Τοπική χρήση άδειας.....	97
A.2.2	Δικτυακή χρήση πολλαπλών αδειών	97
A.2.3	Χρήση VPN.....	99
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΒΗΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ 3DVEM REGISTER.....	100
B.1	Εισαγωγή Αρχείων	100
B.2	Ρυθμίσεις – Παραμετροποίηση	100
B.3	Συνένωση Νεφών.....	101
B.4	Αναφορά Συνένωσης.....	101
B.5	Εξαγωγή Αρχείων	101
B.5	Αποθήκευση Project.....	101

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1 Πρισματική Ανάλυση του Φωτός.....	13
Εικόνα 2.2 Το Φάσμα της Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας	13
Εικόνα 2.3 Αρχή Λειτουργίας του laser	15
Εικόνα 2.4 Βασική Τριγωνομετρία	17
Εικόνα 2.5 Μέθοδος Τριγωνισμού.....	17
Εικόνα 2.6 Διαφορετικοί Τρόποι Κάλυψης του Αντικειμένου.....	18
Εικόνα 2.7 Το Πρότυπο Moiré	19
Εικόνα 2.8 Τρόπος Λειτουργίας Μεθόδου	20
Εικόνα 2.9 Τρόπος Υπολογισμού	20
Εικόνα 2.10 Τρόπος Υπολογισμού	21
Εικόνα 2.11 Τρόπος Υπολογισμού	23
Εικόνα 2.12 Μέθοδοι Εκτροπής Ακτίνας.....	24
Εικόνα 2.13 Laser scanner Scanstation C10.....	29
Εικόνα 2.14 Η Απαιτήση για Πολλαπλές Εικόνες.....	30
Εικόνα 3.1 Δύο Διαφορετικά Τρισδιάστατα Συστήματα Συντεταγμένων	35
Εικόνα 3.2 Συνένωση μεταξύ Δύο Θέσεων Σάρωσης	36
Εικόνα 3.3 Τεχνητοί Στόχοι και Σφαίρα	38
Εικόνα 4.1 Κεντρικό Παράθυρο Περιβάλλοντος 3DVEM - Register	59
Εικόνα 5.1 Ολοκληρωμένος Εικονογεωδαιτικός Σταθμός TOPCON GPT – 7003i ..	63
Εικόνα 5.2 Laser scanner Scanstation 2	64
Εικόνα 5.3 Αυτοσχέδιο Σκαρίφημα Πεδίου (κροκί) Στόχων και Στάσεων.....	66
Εικόνα 5.4 Ειδικοί Τεχνητοί Στόχοι.....	67
Εικόνα 5.5 Τμήμα του Ειδικού Χώρου προς Αποτύπωση	68
Εικόνα 5.6 Απεικόνιση Νεφών Σάρωσης ανά Στάση (S1-S4)	69
Εικόνα 5.7 Πεδίο Ελέγχου.....	70
Εικόνα 6.1 Εισαγωγή Νεφών προς Συνένωση (Cyclone)	76
Εικόνα 6.2 Υπολειπόμενα Σφάλματα Στόχων (Cyclone).....	77
Εικόνα 6.3 Υπολειπόμενα Σφάλματα Στόχων (3DVEM)	79
Εικόνα 6.4 Εισαγωγή Νεφών προς Γεωαναφορά (Cyclone).....	81
Εικόνα 6.5 Υπολειπόμενα Σφάλματα Στόχων Γεωαναφοράς (Cyclone).....	81
Εικόνα 6.6 Αποτέλεσμα Σύγκρισης CloudCompare.....	83
Εικόνα 6.7 Σκόπευση Σημείου Νο. 32 νέφος Cyclone – 3DVEM αντίστοιχα.....	87
Εικόνα 6.8 Σκόπευση Σημείου Νο. 19 νέφος Cyclone – 3DVEM αντίστοιχα.....	88
Εικόνα 6.9 Σκόπευση Σημείου Νο. 81 νέφος Cyclone – 3DVEM αντίστοιχα.....	89
Εικόνα A.1 Στάδια εγκατάστασης του 3DVEM- Register.....	96
Εικόνα A.2 Απουσία USB κλειδιού.....	97
Εικόνα A.3 Παράθυρο Εγκατάστασης Unikey	97
Εικόνα A.4 Κονσόλα του Unikey	98
Εικόνα A.5 Service Manage Menu	98
Εικόνα A.6 Διαμόρφωση αρχείου NetUniKey.ini	99
Εικόνα A.7 Περιβάλλον Λογισμικού	99
Εικόνα B.1 Ύπαρξη ομόλογων σημείων.....	100

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 Κύρια Χαρακτηριστικά Μοντέλων Σαρωτών laser.....	30
Πίνακας 5.1 Κατηγοριοποίηση Λογισμικών με Βάση την Λειτουργία τους.....	65
Πίνακας 6.1 Τοπικές Συντεταγμένες Στόχων – Σημείων Πεδίου Ελέγχου	71
Πίνακας 6.2 Αποτελέσματα Ελαχιστοτετραγωνικής Επίλυσης.....	72
Πίνακας 6.3 Υπολογισμένες Γεωδαιτικές Συντεταγμένες Στόχων – Σημείων Πεδίου Ελέγχου.....	73
Πίνακας 6.4 Έλεγχος Σχήματος.....	73
Πίνακας 6.5 Συμβατές Μορφές Αρχείων	74
Πίνακας 6.6 Υπολογισμός Παραμέτρων Μετασχηματισμού (Cyclone).....	78
Πίνακας 6.7 Υπολογισμός Παραμέτρων Μετασχηματισμού (3DVEM)	79
Πίνακας 6.8 Υπολογισμός Διαφοράς Παραμέτρων Μετασχηματισμού (Cyclone - 3DVEM).....	80
Πίνακας 6.9 Συντεταγμένες Σημείων Ελέγχου - Διαφορές (Cyclone).....	84
Πίνακας 6.10 Συντεταγμένες Σημείων Ελέγχου - Διαφορές (3DVEM)	85
Πίνακας 6.11 Συντεταγμένες Σημείων Ελέγχου (Γεωδαιτικές Μετρήσεις).....	85

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα σύγχρονα τεχνολογικά επιτεύγματα έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη αυτοματοποιημένων μεθόδων συλλογής λεπτομέρειας και πληροφορίας, σχετικά με τις διαστάσεις και τη γεωμετρία αντικείμενων χωρίς άμεση επαφή. Η σάρωση με τη χρήση σαρωτών τεχνολογίας laser, αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη μέθοδο για λεπτομερείς τοπογραφικές αποτυπώσεις με πολλές εφαρμογές ήδη να βρίσκονται στο στάδιο της έρευνας, της παραγωγής και της βιομηχανίας, καθώς δίνει την δυνατότητα συλλογής σε πραγματικό χρόνο πυκνών τρισδιάστατων νεφών σημείων επιφανειών αντικείμενων του χώρου. Οι τρισδιάστατοι σαρωτές τεχνολογίας laser, είναι σύνθετα συστήματα τα οποία ουσιαστικά μετρούν πολικές συντεταγμένες σημείων. Οι μετρήσεις που συλλέγει ο σαρωτής σε κάθε θέση – στάση σάρωσης παράγει ένα νέφος τρισδιάστατων σημείων, οι θέσεις των οποίων υπολογίζονται στο σύστημα αναφοράς του σαρωτή κάθε φορά. Για κάθε διαφορετική στάση του συστήματος του σαρωτή, το κάθε παραγόμενο νέφος ανήκει σε ένα διαφορετικό τοπικό σύστημα συντεταγμένων. Η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας των αντικείμενων αλλά και το μέγεθός τους απαιτούν τις περισσότερες φορές πολλαπλές σαρώσεις προκειμένου να δημιουργηθεί ένα πλήρες και χωρίς αποκρύψεις, τρισδιάστατο μοντέλο. Έτσι, η ανάγκη για συνένωση τουλάχιστον δύο ή περισσότερων νεφών σημείων, τα οποία παράχθηκαν από διαφορετικές θέσεις παρατήρησης για το ίδιο αντικείμενο, σε ένα ενιαίο σύστημα αναφοράς είναι αναπόφευκτη σχεδόν σε κάθε περίπτωση. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή βιβλιογραφικά ως **Συνένωση Νεφών Σημείων** (Point Clouds Registration). Η διαδικασία που αφορά τον μετασχηματισμό των παρατηρήσεων από το τοπικό σύστημα συντεταγμένων του σαρωτή, στο απόλυτο σύστημα συντεταγμένων του αντικείμενου, που δύναται να είναι και γεωδαιτικό σύστημα είναι βιβλιογραφικά γνωστή ως **γεωαναφορά**. Η συνένωση και η γεωαναφορά μπορούν να επιτευχθούν έμμεσα με τη βοήθεια ειδικών στόχων που αναγνωρίζει ο σαρωτής. Οι στόχοι έχουν συντεταγμένες σε κάποιο σύστημα αναφοράς. Οι συντεταγμένες αυτές στην περίπτωση της γεωαναφοράς συνήθως προσδιορίζονται με χρήση κατάλληλων γεωδαιτικών μεθόδων σε ένα απόλυτο σύστημα αναφοράς. Στη συνέχεια υπολογίζεται και κατόπιν πραγματοποιείται ο κατάλληλος γεωμετρικός μετασχηματισμός μεταξύ των νεφών σημείων. Το τελικό γεωαναφερμένο ή συνενωμένο νέφος σημείων αποκτά το σύστημα αναφοράς που έχουν οι ειδικοί στόχοι ή το νέφος αναφοράς αντίστοιχα.

Αρκετές μέθοδοι και προσεγγίσεις έχουν προταθεί για την αντιμετώπιση του προβλήματος του υπολογισμού των παραμέτρων που περιγράφουν τον γεωμετρικό μετασχηματισμό στερεού σώματος ώστε να επιτευχθεί η συνένωση και η γεωαναφορά των νεφών. Οι δημοφιλέστερες και συνάμα πιο διαδεδομένες μέθοδοι είναι αυτή του **Επαναληπτικά Εγγύτερου Σημείου** (ICP) και αυτή της **Ελαχιστοτετραγωνικής Επίλυσης**. Οι παραπάνω μέθοδοι αποτελούν το κεντρικό ερευνητικό αντικείμενο και προβληματισμό της παρούσας εργασίας.

1.1 Σκοπός και Στόχοι της Εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση και αξιολόγηση υπαρχόντων μεθοδολογιών συνένωσης νεφών σημείων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση με την χρήση νεφών σημείων που παράχθηκαν από ένα επίγειο σύστημα σαρωτή τεχνολογίας laser. Οι μέθοδοι που διερευνήθηκαν και αξιολογήθηκαν πειραματικά είναι αυτή του **Επαναληπτικά Εγγύτερου Σημείου** και αυτή της **Ελαχιστοτετραγωνικής Επίλυσης**. Η αξιολόγηση των δύο μεθόδων γίνεται αρχικά μεταξύ των συνενώσεων τους και στη συνέχεια σε σχέση με την ποιότητα της γεωαναφοράς που προσφέρουν. Για την επίτευξη του παραπάνω σκοπού τίθενται οι εξής επιμέρους στόχοι:

- Βιβλιογραφική αναζήτηση
- Εφαρμογή κατάλληλης μεθόδου παραγωγής νεφών σημείων
- Χρήση αντίστοιχων λογισμικών συνένωσης και γεωαναφοράς νεφών σημείων
- Σύγκριση μεθόδων συνένωσης νεφών σημείων
- Αξιολόγηση ποιότητας της γεωαναφοράς
- Εξαγωγή συμπερασμάτων

1.2 Δομή της Εργασίας

Στα κεφάλαια που ακολουθούν παρουσιάζεται αρχικά το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο γύρω από το θέμα της εργασίας και στη συνέχεια αναλύεται το πειραματικό στάδιο καθώς και κάθε μία διαδικασία που ακολουθήθηκε και τα αποτελέσματα αυτών. Αναλυτικότερα στο πρώτο μέρος αυτό του θεωρητικού υπόβαθρου, το **Κεφάλαιο 2** αφορά την ανάλυση των κυριότερων μεθόδων παραγωγής νεφών σημείων. Συγκεκριμένα αναλύεται η παραγωγή νεφών σημείων με την χρήση σαρωτών τεχνολογίας laser και με την χρήση της εικονιστικής μεθόδου που εφαρμόζει τον αλγόριθμο Structure from Motion. Το **Κεφάλαιο 3** αφορά την συνένωση των νεφών. Συγκεκριμένα αναλύεται η συνένωση επίγειων αλλά και εναέριων σαρώσεων. Τέλος περιγράφεται όλο το απαραίτητο μαθηματικό υπόβαθρο των τρισδιάστατων γεωμετρικών μετασχηματισμών της συνένωσης των νεφών σημείων. Στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφονται οι αλγόριθμοι υπολογισμού της συνένωσης νεφών σημείων επίγειων σαρώσεων. Συγκεκριμένα αναλύεται η μέθοδος του Επαναληπτικά Εγγύτερου Σημείου και στη συνέχεια αυτή της Ελαχιστοτετραγωνικής Επίλυσης. Στο δεύτερο μέρος αυτό του πειραματικού μέρους, των μετρήσεων και των αποτελεσμάτων, το **Κεφάλαιο 5** αφορά την συλλογή των δεδομένων και την πορεία εργασιών. Το **Κεφάλαιο 6** αφορά την επεξεργασία των δεδομένων και την εφαρμογή των μεθόδων προς σύγκριση. Ακόμα καταγράφονται τα αποτελέσματα των συγκρίσεων και των αξιολογήσεων. Το **Κεφάλαιο 7** αφορά την εξαγωγή των συμπερασμάτων και την γενικότερη αξιολόγηση του συνόλου των μεθόδων συνένωσης. Τέλος ακολουθούν δύο παραρτήματα μετά το κύριο μέρος της εργασίας. Το **Παράρτημα Α** περιέχει έναν γρήγορο και απλό οδηγό εγκατάστασης του λογισμικού 3DVEM – Register και χρήσης τυχών πολλαπλών δικτυακών αδειών. Το **Παράρτημα Β** περιέχει έναν σύντομο οδηγό χρήσης του λογισμικού 3DVEM – Register για νέους χρήστες με την μορφή βημάτων.

2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΝΕΦΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ

Η ανακατασκευή τρισδιάστατων μοντέλων επιφανειών αντικειμένων ενδιαφέροντος είναι πλέον εφικτή, κατά τρόπο γρήγορο και αξιόπιστο μέσω της χρήσης των νέων τεχνολογιών και των δυνατοτήτων που αυτές σήμερα προσφέρουν. Η ανάγκη ανακατασκευής τρισδιάστατων μοντέλων αυξάνει από μέρα σε μέρα, ενώ οι μέθοδοι παραγωγής γίνονται πιο εύκολες, γρήγορες, αποτελεσματικές αλλά και οικονομικές. Η τρισδιάστατη ανακατασκευή επιφανειών όπως και άλλες εφαρμογές της φωτογραμμετρίας αλλά και άλλων επιστημονικών χώρων όπως για παράδειγμα της ρομποτικής και της υπολογιστικής όρασης μπορούν να επιτευχθούν μέσα από τη παραγωγή πυκνών νεφών σημείων σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα ικανών ακόμα και να περιγράψουν την πιο σύνθετη γεωμετρικά επιφάνεια. Στη σύγχρονη βιβλιογραφία διεθνώς αναφέρονται αρκετές μέθοδοι και τεχνικές παραγωγής νεφών σημείων. Κυρίως αυτές χωρίζονται σε τεχνικές με βάση την εικόνα δηλαδή την κλασική μέθοδο απόκτησης τρισδιάστατης πληροφορίας που ακολουθεί η Φωτογραμμετρία, σε τεχνικές που έχουν ως βάση τους την μέτρηση της απόστασης δηλαδή τη χρήση κυρίως συστημάτων σαρωτών και τέλος σε τεχνικές που ουσιαστικά είναι συνδυασμός των δύο μεθόδων. Παρακάτω θα περιγραφούν ομαδοποιημένα οι κυριότεροι και πιο διαδεδομένοι τρόποι που χρησιμοποιούνται σήμερα ευρέως από τους ερευνητές και επαγγελματίες του χώρου για τη παραγωγή νεφών σημείων. Οι τεχνικές που αναφέρονται αναλυτικότερα στη συνέχεια βασίζονται πρώτα στις αρχές μέτρησης με τη χρήση φωτός και μετά σε τεχνικές και μεθόδους της αυτοματοποιημένης πλέον ψηφιακής φωτογραμμετρίας με τη χρήση εικόνων.

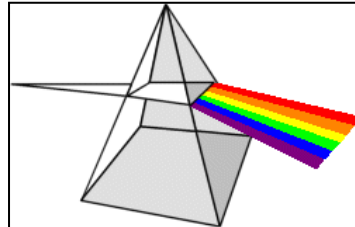
2.1 Αρχές Μέτρησης με τη Χρήση Φωτός

Αρχικά θα γίνει παρουσίαση των μεθόδων που χρησιμοποιούν το ορατό φως ως μέσο μέτρησης, έτσι ώστε μέσω ειδικών συστημάτων σαρωτών να προχωρήσει η παραγωγή των επιθυμητών τρισδιάστατων νεφών σημείων. Στη παρούσα εργασία το πρακτικό της κομμάτι εκμεταλλεύτηκε κυρίως την παρούσα τεχνική για τη τελική παραγωγή των νεφών σημείων, τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων της εργασίας.

2.1.1 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και το φως

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα είναι κάτι πολύ συνηθισμένο για την καθημερινή ζωή ενός μέσου σύγχρονου ανθρώπου, καθώς μέρος του χρησιμοποιείται από απλές και καθημερινές οικιακές και μη συσκευές, όπως ο φούρνος μικροκυμάτων ή το κινητό τηλέφωνο. Το ορατό μέρος του φάσματος είναι το γνωστό σε όλους ορατό φως, σε συνδυασμό με την ιδιότητα των αντικειμένων να εκπέμπουν, να αντανακλούν ή να μεταδίδουν το ορατό φως δίνεται η δυνατότητα θέασης και παρατήρησής τους. Το ορατό φως αποτελείται από χρώματα, με κάθε χρώμα να ανταποκρίνεται σε ένα

διαφορετικό μήκος κύματος του ορατού φωτός. Η διαφορά στο μήκος κύματος καθώς και τα διαφορετικά χρώματα μπορούν εύκολα να παρατηρηθούν με τη χρήση ενός γυάλινου πρίσματος, όπου προσπίπτει λευκό φως. Παρατηρώντας κανείς το αποτέλεσμα γίνεται αντιληπτό πως το μωβ χρώμα διαθλάται περισσότερο από το κόκκινο χρώμα, καθώς έχει μικρότερο μήκος κύματος, και γίνεται δυνατή η παρατήρηση του ουράνιου τόξου των χρωμάτων.



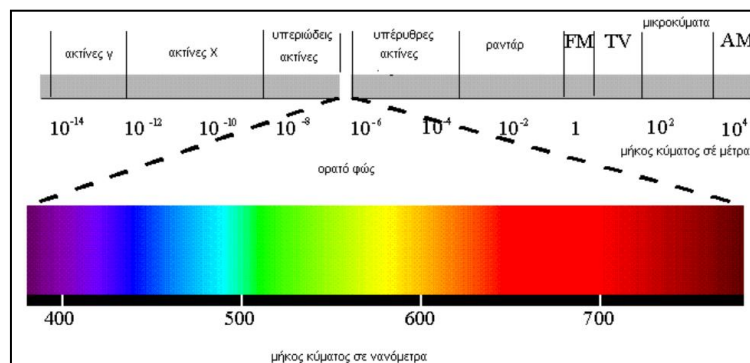
Εικόνα 2.1 Πρισματική Ανάλυση του Φωτός
Πηγή: www.jansimons.nl, 2015

Τα μήκη κύματος στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα μπορούν να διαφέρουν κατά πολύ σε διάσταση, ξεκινώντας από το μήκος των ραδιοκυμάτων κοντά στο μέγεθος κτιρίων φτάνοντας μέχρι τις ακτίνες-γ με μήκος κοντά στο μέγεθος του πυρήνα ενός ατόμου. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα μπορεί να εκφραστεί με όρους ενέργειας, μήκους κύματος ή και συχνότητας. Οι σχέσεις που συνδέουν τα παραπάνω είναι οι εξής:

$$\text{Ταχύτητα διάδοσης (c)} = \text{συχνότητα (f)} \cdot \text{μήκος κύματος (\lambda)} \quad \text{Εξίσωση 2.1.}$$

$$\text{Ενέργεια (E)} = \text{h} \cdot \text{συχνότητα (f)} \quad \text{Εξίσωση 2.2.}$$

όπου $c = 299,792,458 \text{ m/s}$ η ταχύτητα του φωτός και $h = 6.626069 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ η σταθερά του Planck. (Santana Quintero et al., 2008)



Εικόνα 2.2 Το Φάσμα της Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας
Πηγή: Γεωργόπουλος και Χλιβερού, 2013

2.1.2 Περιγραφή Τεχνολογίας laser

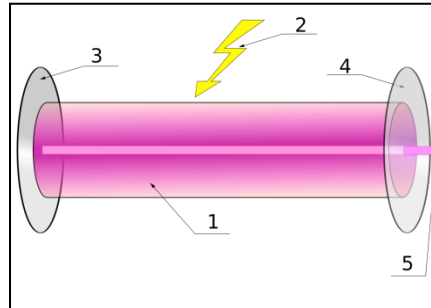
Τα τελευταία χρόνια μια ειδική πηγή φωτός πολλά υποσχόμενη έχει ξεχωρίσει και αναδειχθεί και δεν είναι άλλη από το laser. Μια συσκευή laser δύναται να παράγει κύμα φωτός χρησιμοποιώντας μόνο ένα πολύ μικρό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Μία τυπική πηγή laser εκπέμπει φως ως μία στενή, μικρής απόκλισης δέσμη με καλά προκαθορισμένο μήκος κύματος σχεδόν μίας συχνότητας (δηλαδή μονοχρωματική δέσμη), το οποίο δυνητικά αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο χρώμα αν φυσικά το λέιζερ χρησιμοποιεί τμήμα του ορατού φάσματος, πράγμα που δεν επιτυγχάνεται με καμία άλλη πηγή φωτός. Η παραπάνω περιγραφή κάνει εμφανείς τις διαφορές από μία κλασσική πηγή φωτός όπως για παράδειγμα ο γνωστός σε όλους λαμπτήρας πυρακτώσεως, ο οποίος ακτινοβολεί σε μεγάλο εύρος γωνίας και απόκλισης, σε μεγάλο τμήμα του ορατού ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Οι παραπάνω ιδιότητες μπορούν να συνοψιστούν και με τον όρο συνοχή. Οι περισσότερες φωτεινές πηγές εκπέμπουν το φως ανεξάρτητα από διαφορετικά άτομα, σε αντίθεση τα άτομα ενός laser εκπέμπουν σε συνεργασία και συμφωνία, όπως αναφέρθηκε το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι μια πολύ λεπτή δέσμη ακτινοβολίας με μεγάλη ένταση.

Η λειτουργία των συσκευών laser μοιάζει πολύ με αυτή των τρανζίστορ και εύκολα μπορεί να παραλληλιστεί, δηλαδή τα laser δημιουργούν ή ενισχύουν φως όπως τα τρανζίστορ δημιουργούν ή ενισχύουν ηλεκτρονικά σήματα σε ήχο κ.α. Καθημερινά ο καθένας χρησιμοποιεί συνεχώς συσκευές laser, ειδικά όταν πρόκειται για οπτικές συσκευές αποθήκευσης όπως το DVD – player, όπου το laser χρησιμοποιείται για να αποθηκεύσει («κάψει») ή ανακτήσει την υπάρχουσα πληροφορία σαρώνοντας την επιφάνεια του δίσκου. Άλλες πολύ συνηθισμένες χρήσης του laser είναι στην ανάγνωση ραβδοκώδικα όπως και στους δείκτες λέιζερ. Τέλος η συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιείται στη βιομηχανία στη κοπή μετάλλων όπως του χάλυβα, ακόμα και στην ιατρική (μικροχειρουργική) αλλά και σε στρατιωτικές εφαρμογές.

Η λέξη laser πρόκειται ουσιαστικά για αρκτικόλεξο (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation - Ενίσχυση Φωτός από Εξαναγκασμένη Εκπομπή Ακτινοβολίας) και αποτελεί εξέλιξη της λέξης maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation - Ενίσχυση Μικροκυμάτων με Εξαναγκασμένη Εκπομπή Ακτινοβολίας). Σήμερα με τον όρο φως (light) δεν γίνεται αναφορά μόνο στο ορατό φως αλλά γενικότερα σε κάθε συχνότητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, η οποία μπορεί να κατατάσσεται στο υπέρυθρο κοντινό ή μακρινό, υπεριώδες, στις ακτίνες X και ούτω καθεξής. Το πρώτο λειτουργικό laser παρουσιάστηκε από τον Theodore Maiman το 1960 στο Hughes Research Laboratories. (Santana Quintero et al., 2008).

Για τη παραγωγή της δέσμης του laser είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός ταλαντωτή ο οποίος περιέχει μια θετική ανάδραση, το λεγόμενο ως ενεργό υλικό. Το ενεργό υλικό έχει τη δυνατότητα να μετατρέπει την εξωτερική ενέργεια σε δέσμη φωτός, μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής που περιγράφεται ως μια κβαντομηχανική διαδικασία. Σύμφωνα με την μικροκυματική, για να επιτευχθεί το παραπάνω πρέπει το ενεργό

υλικό να τοποθετηθεί σε μια συντονιστική - οπτική κοιλότητα με συγκεκριμένα φυσικά χαρακτηριστικά ώστε να μπορεί να συντονίζεται στην επιθυμητή συχνότητα (f). Συγκεκριμένα, στη περίπτωση του laser το ενεργό υλικό τοποθετείται ανάμεσα σε δύο κάτοπτρα, τα οποία χαρακτηρίζονται από την μεγάλη ανακλαστικότητα τους. Εφόσον ένα επίπεδο ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδοθεί σε διεύθυνση κάθετη ως προς τα κάτοπτρα, αυτό θα διέρχεται επαναληπτικά από το ενεργό υλικό ενισχυόμενο ανά διέλευση. Στην περίπτωση που κάποιο κάτοπτρο γίνει μερικά διαπερατό τότε μπορεί και εξέρχεται η δέσμη laser (εικόνα 2.3). (Van Pelt et. al., 1970, Αποστολόπουλος, 2010).



Εικόνα 2.3 Αρχή Λειτουργίας του laser

1. Ενεργό υλικό, 2. Προσφερόμενη Ενέργεια, 3. Κάτοπτρο, 4. Διάταξη εξόδου laser
5. Δέσμη laser

Πηγή: www.tau.ac.il, 2015

Παρά όλες τις σημαντικές ιδιότητες του laser που αναφέρθηκαν παραπάνω υπάρχει ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη ο οποίος είναι η βλάβη και οι τραυματισμοί που τα laser μπορούν να προκαλέσουν σε έμβιους οργανισμούς, όπως ο άνθρωπος. Λαμβάνοντας υπόψη την ευρωπαϊκή ομαδοποίηση για την ασφάλεια των laser η οποία βασίζεται στην δυνατότητα δημιουργίας βλάβης στα μάτια και στο δέρμα, τα laser μπορούν να ομαδοποιηθούν σε επτά κατηγορίες, χρησιμοποιώντας τους αριθμούς 1-4 μαζί με γράμματα. Οι κατηγορίες είναι οι εξής: 1, 1M, 2, 2M, 3R, 3B και 4. Οι περισσότεροι επίγειοι σαρωτές βρίσκονται στη κλάση 3R, το οποίο σημαίνει ασφαλές εφόσον γίνεται προσεκτικός χειρισμός. Η ασφάλεια εξαρτάται από τη μέγιστη ισχύ που εξέρχεται, την αρχή του laser και το μήκος κύματος του. Το όριο της ισχύος για σαρωτές που λειτουργούν στο ορατό φως δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 5mW. (Papalampros, 2013).

2.1.3 Μέθοδοι και τεχνικές μέτρησης αποστάσεων με τη χρήση φωτός

Η πρόσφατη εξέλιξη της υπολογιστικής όρασης και της τεχνολογίας των αισθητήρων έχει προσφέρει αρκετούς τρόπους μέτρησης αντικειμένων με τη χρήση φωτός. Αυτές οι μέθοδοι - τεχνικές μπορούν να διακριθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις παθητικές και τις ενεργητικές μεθόδους - τεχνικές.

Παθητικές Μέθοδοι

Οι παθητικοί αισθητήρες δεν εκπέμπουν κάποια ακτινοβολία αλλά λειτουργούν με βάση τον εντοπισμό ανακλώμενης από το περιβάλλον ακτινοβολίας που προέρχεται από κάποια άλλη πηγή. Οι περισσότεροι παθητικοί αισθητήρες εντοπίζουν το ορατό φως, διότι είναι συνεχώς εύκολα διαθέσιμο. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες μορφές ακτινοβολίας όπως το υπέρυθρο. Το κόστος τέτοιων μεθόδων περιορίζεται πάρα πολύ χαμηλά διότι το μόνο αναγκαίο εξάρτημα- μέρος είναι ένας αισθητήρας ο οποίος συνήθως είναι μία ψηφιακή φωτογραφική μηχανή. Το κύριο πρόβλημα που προκύπτει σε αυτές τις μεθόδους είναι πως εξαρτώνται από την εύρεση αντίστοιχων στοιχείων μεταξύ δισδιάστατων εικόνων, το οποίο δεν οδηγεί σε μοναδική λύση πάντα. Για παράδειγμα, επαναλαμβανόμενα πρότυπα τείνουν να μπερδεύουν τις συγκεκριμένες μεθόδους και να τις οδηγούν σε λανθασμένα αποτελέσματα ή μέχρι και σε αδυναμία επίλυσης. Τέλος, η ακρίβεια αυτών των συστημάτων εξαρτάται άμεσα από την ανάλυση του εικονιστικού συστήματος και την πυκνότητα και τη γεωμετρική διάταξη των αναγνωρίσιμων χαρακτηριστικών στην εικόνα.

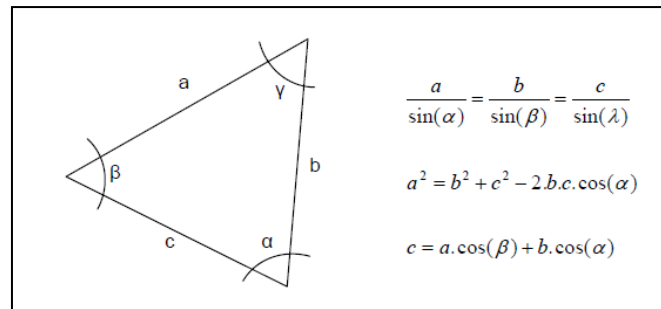
Ενεργητικές Μέθοδοι

Στην παρούσα εργασία θα γίνει ιδιαίτερη μνεία σχετικά με τους ενεργητικούς αισθητήρες και τις μεθόδους που αυτοί χρησιμοποιούν. Τα συστήματα αυτά εκπέμπουν μία δέσμη φωτός και εντοπίζουν την αντανάκλασή της έτσι ώστε να εξετάσουν ένα αντικείμενο ή ένα περιβάλλον. Πιθανοί τύποι ακτινοβολίας είναι το ορατό φως, οι υπέρηχοι ή οι ακτίνες Χ. Από τα παραπάνω γίνεται φανερό πως από τη στιγμή που για την λειτουργία συγκεκριμένων σαρωτών είναι απαραίτητη η ύπαρξη συσκευής εκπομπής και λήψης φωτός, τα συγκεκριμένα συστήματα είναι κατασκευαστικά συνθετότερα και ισοδύναμα κοστίζουν περισσότερο από τους απλούς παθητικούς αισθητήρες και τα συστήματα αυτών. Τα κυριότερα προτερήματα των ενεργητικών συστημάτων είναι αρχικά πως δεν απαιτούν την ύπαρξη εξωτερικής πηγής φωτός διότι διαθέτουν δική τους πηγή, προσφέρουν υψηλής πυκνότητας μετρήσεις με πολύ αυτοματοποιημένο τρόπο, μπορεί να φανούν ιδιαίτερα χρήσιμοι σε επιφάνειες χωρίς χαρακτηριστικά και τέλος έχουν μεγάλες ταχύτητες λήψης μετρήσεων, από 1000 έως και πάνω από 1.000.000 σημεία ανά δευτερόλεπτο. Η διαφοροποίηση μεταξύ των διάφορων ενεργητικών μεθόδων που χρησιμοποιούν ορατό φως έγκειται κυρίως στο τρόπο υπολογισμού της απόστασης. Η λειτουργία των ενεργητικών συστημάτων δηλαδή της δεύτερης κατηγορίας βασικά γίνεται με τρεις τρόπους. Αρχικά αναλύεται η μέθοδος του τριγωνισμού, μετά η μέθοδος της μέτρησης της διαφοράς χρόνου (time-of-flight) και τέλος αναλύεται η συμβολομετρία.

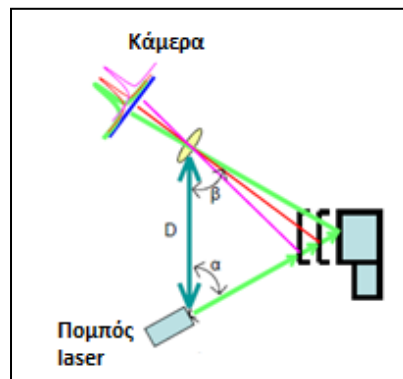
- Τριγωνισμός – Triangulation Based Measurement

Τα τρίγωνα αποτελούν τη βάση πολλών τεχνικών μέτρησης τόσο στην κλασική τοπογραφία αλλά και στα πλέον σύγχρονα ψηφιακά συστήματα. Η τριγωνομετρία χρησιμοποιείται ήδη από την αρχαιότητα για θεμελιώδη γεωδαιτικά και γεωμετρικά προβλήματα και φτάνει μέχρι σήμερα στα σύγχρονα συστήματα που περιλαμβάνουν

τρισδιάστατες κάμερες βασισμένες στη τεχνολογία laser. Η τριγωνομετρία του αρχαίου Έλληνα φιλόσοφου Θαλή αποτελεί τη βάση της συγκεκριμένης μεθόδου που παρουσιάζεται. Ο υπολογισμός των τρισδιάστατων συντεταγμένων στη παρούσα τεχνική γίνεται με την ίδια γεωμετρική μέθοδο του τριγωνισμού. Από το σύστημα εκπέμπεται ένα πρότυπο ακτίνας laser στο αντικείμενο και γίνεται εκμετάλλευση μιας κάμερας η οποία ψάχνει και εντοπίζει τη θέση της προβολής του προτύπου της ακτίνας laser πάνω στο αντικείμενο ενδιαφέροντος.



Εικόνα 2.4 Βασική Τριγωνομετρία
Πηγή: Santana Quintero et al., 2008



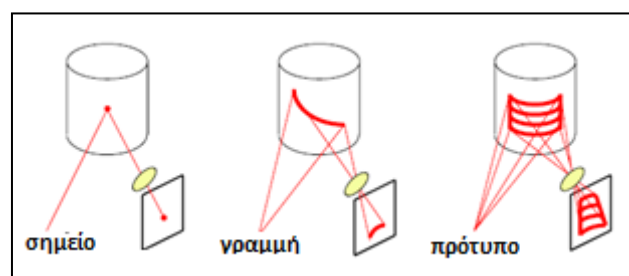
Εικόνα 2.5 Μέθοδος Τριγωνισμού
Πηγή: Santana Quintero et al., 2008

Συγκεκριμένα ο πομπός της ακτίνας laser (laser emitter) και ο δέκτης του σαρωτή βρίσκονται σε γνωστή απόσταση μεταξύ τους (D). Η εκπεμπόμενη ακτίνα laser έχει γνωστή σταθερή γωνία (α) και, μόλις προσπίπτει στο αντικείμενο η εικόνα της, εντοπίζεται από τον αισθητήρα θέσης (Position Sensitive Detector – PSD), έτσι μπορεί να γίνει γνωστή και η δεύτερη γωνία (β) μέσω της παρατήρησης της ακτίνας laser στο πεδίο όρασης της κάμερας, με αυτό τον τρόπο σχηματίζεται ένα τρίγωνο στο χώρο (σε τυχαίο επίπεδο) το οποίο μπορεί και επιλύεται, με αποτέλεσμα την απόσταση του σημείου ενδιαφέροντος από το σύστημα. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διαπίστωση πως τα σφάλματα της μεθόδου μειώνονται όταν αυξάνεται η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη (D), δηλαδή η βάση του τριγωνισμού. Βέβαια, η βάση αυτή δεν μπορεί να γίνει πολύ μεγάλη διότι μετά ο πομπός του laser και η κάμερα θα έχουν μειωμένο κοινό πεδίο επικάλυψης (FOV – Field of View), με αποτέλεσμα η προβολή του laser να μην μπορεί να ανιχνευτεί από την κάμερα. Από τις παραπάνω δεσμεύσεις χρήσης μιας ευρύτερης βάσης και του περιορισμένου

πεδίου όρασης, οι συγκεκριμένοι σαρωτές χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές για σάρωση μικρών αντικειμένων σε αποστάσεις περί τα 10 μέτρα, όπου η παρούσα μέθοδος υπερτερεί έναντι άλλων. Περιληπτικά οι πιθανοί τρόποι να μειωθεί η αβεβαιότητα στην κατεύθυνση του βάθους δηλαδή στον προσδιορισμό της απόστασης του σημείου από το σύστημα είναι οι εξής:

1. Η μείωση της απόστασης μεταξύ σαρωτή και αντικειμένου, το οποίο όμως αυξάνει το φαινόμενο των σκιών
2. Η αύξηση της βάσης τριγωνισμού, το οποίο επίσης αυξάνει το φαινόμενο των σκιών
3. Η αύξηση της εστιακής απόστασης των φακών, το οποίο όμως μειώνει το οπτικό πεδίο
4. Η μείωση της μετρητικής αβεβαιότητας η οποία επιτυγχάνεται μέσω της αύξησης της ανάλυσης της κάμερας

Τις περισσότερες φορές χρησιμοποιείται μία γραμμή laser παρά ένα σημειακό laser, η οποία προβάλλεται και σαρώνει το αντικείμενο με σκοπό την συλλογή τρισδιάστατης πληροφορίας για όλο το αντικείμενο, αυτό σημαίνει επίσης πως η γωνία του πομπού laser αλλάζει καθώς το laser σαρώνει ολόκληρο το αντικείμενο. Στη πράξη η ενεργητική μέθοδος τριγωνισμού δημιουργήθηκε για να λύσει το περιβόητο και κυριότερο πρόβλημα αντιστοίχισης στοιχείων, το οποίο αναφέρθηκε και υπάρχει στις παθητικές μεθόδους μέτρησης. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να περιγραφεί ως εξής: Σε δύο εικόνες έστω Εικ.1 και Εικ.2 από δύο διαφορετικά σημεία λήψης του ίδιου αντικειμένου, όπου δίνονται ο σχετικός προσανατολισμός των καμερών και ένα ζευγάρι ομόλογων σημείων μεταξύ των δύο εικόνων, μπορούν να υπολογιστούν τρισδιάστατα σημεία χρησιμοποιώντας την αρχή του τριγωνισμού. Επομένως, το πρόβλημα συντηρείται από τη δυσκολία εύρεσης των ομόλογων σημείων μεταξύ διαφορετικών εικόνων. Η ενεργητική μέθοδος χρήσης laser λύνει αυτό το πρόβλημα επισημαίνοντας το σημείο τρισδιάστατα στο αντικείμενο με το χρώμα της ακτίνας του laser, έτσι ώστε να εντοπιστεί άμεσα και εύκολα από τον αισθητήρα.



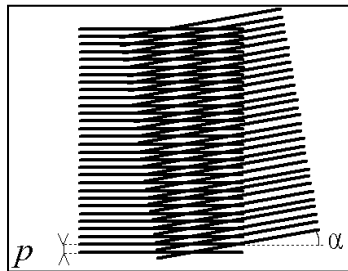
Εικόνα 2.6 Διαφορετικοί Τρόποι Κάλυψης του Αντικειμένου

Πηγή: *Santana Quintero et al., 2008*

Κάποιες καινοτόμες τροποποιήσεις έχουν προταθεί και εν συνεχεία εισαχθεί για την αποφυγή χρήσης μηχανικών εξαρτημάτων, οι οποίες αντί να κινούν ή να περιστρέφουν τον πομπό για τη κάλυψη ολόκληρου του αντικειμένου, προβάλουν πρότυπα σημείων ή γραμμών που καλύπτουν ευθύς εξαρχής ολόκληρο το αντικείμενο. Τα διαφορετικά πρότυπα που χρησιμοποιούνται κυμαίνονται από

μεμονωμένα γραμμικά πρότυπα μέχρι και χωρικά κωδικοποιημένα πρότυπα τα οποία μπορούν να διαμορφώσουν την συχνότητα ή τη φάση τους εγκαίρως παρέχοντας μεγαλύτερη ακρίβεια. Τα συγκεκριμένα χωρικά κωδικοποιημένα πρότυπα πρέπει να επισημανθεί πως απαιτούν το αντικείμενο να παραμένει σταθερό κατά τη διάρκεια της σάρωσης.

Σήμερα χρησιμοποιούνται ακόμα πιο σύνθετα πρότυπα τα οποία είναι βασισμένα στο φαινόμενο Moiré και οδηγούν στην αύξηση της ακρίβεια και τη σταθερότητα των αποτελεσμάτων των συγκεκριμένων συστημάτων. Το φαινόμενο Moiré μπορεί απλά να περιγραφεί ως το αποτέλεσμα της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης δύο διαμορφωμένων κατά πλάτος χωρικών σημάτων, για παράδειγμα το ίδιο φαινόμενο μπορεί συχνά να παρατηρηθεί στη τηλεόραση όταν τα απεικονιζόμενα άτομα φορούν ριγωτά ρούχα. Ο σαρωτής αυτού του είδους προβάλλει ένα κανονικό πρότυπο στο αντικείμενο προς σάρωση ενώ παράλληλα η κάμερα καταγράφει τη σκηνή, η οποία έχει επίσης πάνω της ενσωματωμένο ένα κανονικό πρότυπο. Η παρεμβολή αυτών των δύο προτύπων που υπερτίθεται το ένα του άλλου έχουν ως αποτέλεσμα το φαινόμενο Moiré από το οποίο μπορεί να καθοριστεί με ακρίβεια η όποια μεταβολή του βάθους.



Εικόνα 2.7 Το Πρότυπο Moiré

(σχηματιζόμενο από δύο σύνολα παρ/λων γραμμών στραμμένα μεταξύ τους υπό γωνία α)

Πηγή: graphicdesign.stackexchange.com, 2015

Τέλος, τα συστήματα που βασίζονται στη μέθοδο του τριγωνισμού και συγκεκριμένα αυτά που χρησιμοποιούν κωδικοποιημένες γραμμικές προβολές καλούνται να αντιμετωπίσουν ένα ακόμα πρόβλημα. Το πρόβλημα του διαχωρισμού των διαφορετικών κατευθύνσεων προβολής σε αντικείμενα με ξαφνικές μεταβολές στο βάθος και μεγάλο εύρος διαφορετικών υφών σε ολόκληρη την επιφάνεια τους.

- Μέτρηση διαφοράς χρόνου – Time-based measurement

Τα συστήματα αυτής της κατηγορίας είναι ενεργοί σαρωτές που μετρούν το χρόνο μεταξύ της εκπομπής και της λήψης ενός παλμού. Υπάρχουν δύο βασικές αρχές μέτρησης με παλμό η τεχνική γνωστή ως time of flight και αυτή της σύγκρισης φάσης.

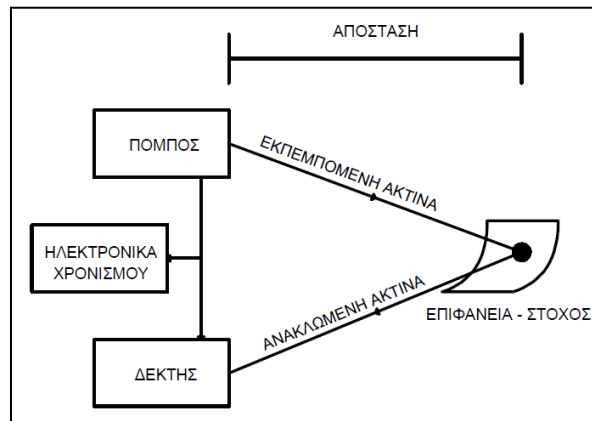
1. Παλμική Μέθοδος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί τα κύματα του φωτός ταξιδεύουν με πεπερασμένη, γνωστή και σταθερή ταχύτητα σε συγκεκριμένο μέσο. Τη βάση της συγκεκριμένης διαδικασίας αποτελεί η μέτρηση του χρόνου (t) που μεσολαβεί από την εκπομπή ενός

σήματος προς το αντικείμενο μέχρι τη λήψη του ανακλώμενου σήματος, γνωρίζοντας την ταχύτητα διάδοσής του (c : ταχύτητα του φωτός = 299,792,458 m/s στο κενό) φυσικά μπορεί και γίνεται ο υπολογισμός της απόστασης από τη παρακάτω βασική σχέση:

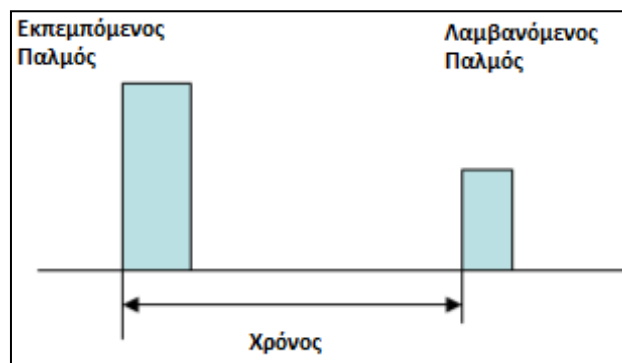
$$d = ct / 2$$

Εξίσωση 2.3.



Εικόνα 2.8 Τρόπος Λειτουργίας Μεθόδου
Πηγή: Santana Quintero et al., 2008

Ο τρόπος υπολογισμού του χρόνου διαφοράς (t) που μεσολαβεί μεταξύ εκπεμπόμενου και λαμβανόμενου σήματος συνήθως γίνεται με δύο μεθόδους, είτε με τη μέθοδο της μετάδοσης παλμού είτε με τη διαμόρφωση του φέροντος κύματος. Το όργανο διαθέτει το κατάλληλο λογισμικό υπολογισμού και επεξεργασίας έτσι ώστε τελικά να μπορεί υπολογιστεί η θέση του σημείου στο χώρο δηλαδή οι τρισδιάστατες συντεταγμένες του με την βοήθεια πολικών συντεταγμένων. Ακόμα οι σαρωτές δίνουν την δυνατότητα καταγραφής και της ανακλώμενης έντασης της ακτίνας για την παροχή περισσότερων ποσοτικών πληροφοριών. Τέτοιου είδους σαρωτές συνήθως μπορούν να μετρήσουν πάνω από 2.000 με 50.000 σημεία ανά δευτερόλεπτο.



Εικόνα 2.9 Τρόπος Υπολογισμού
Πηγή: Santana Quintero et al., 2008

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια τέτοιας λειτουργίας συστημάτων είναι βασικά τρεις. Πρώτα είναι η ικανότητα επιλογής της ίδιας σχετικής θέσης στο εκπεμπόμενο και λαμβανόμενο παλμό για τη μέτρηση του ενδιάμεσου χρόνου. Αυτό περιορίζεται από το θόρυβο, τη μη κανονικότητα του χρόνου, τη ισχύ του σήματος

Από τις τέσσερις μετρήσεις $c(\tau_0)$, $c(\tau_1)$, $c(\tau_2)$ και $c(\tau_3)$ η διαφορά φάσης $\Delta\Phi$, το αντιστάθμισμα (offset) B και το πλάτος μπορούν να υπολογιστούν ως εξής:

$$B = (c(\tau_0) + c(\tau_1) + c(\tau_3)) / 4 \quad \text{Εξίσωση 2.4.}$$

$$A = \sqrt{((c(\tau_0) - c(\tau_2))^2 + (c(\tau_1) - c(\tau_3))^2) / 2} \quad \text{Εξίσωση 2.5.}$$

$$\Delta\phi = \arctan((c(\tau_0) - c(\tau_2)) / (c(\tau_1) - c(\tau_3))) \quad \text{Εξίσωση 2.6.}$$

Αυτή η διαφορά φάσης μπορεί να συσχετιστεί με μία χρονική καθυστέρηση όμοια με αυτή της προηγούμενης μεθόδου.

Η σχέση μεταξύ διαφοράς φάσης διαμορφωμένης συχνότητας και χρονικής καθυστέρησης είναι:

$$T = D\phi / 2\pi f \quad \text{Εξίσωση 2.7.}$$

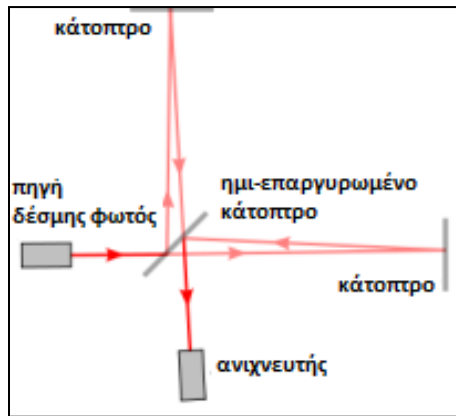
Σύμφωνα με τη εξίσωση μέτρησης απόστασης, η απόσταση του σημείου στόχου δίνεται από τη σχέση:

$$D = c \cdot t / 2 \quad \text{Εξίσωση 2.8.}$$

Η ακρίβεια της μεθόδου περιορίζεται από την συχνότητα του σήματος ή τη διαμόρφωσή του, την ακρίβεια της επανάληψης της μέτρησης της φάσης, το οποίο εξαρτάται από τη δύναμη του σήματος τον θόρυβο κ.ά., την σταθερότητα του ταλαντωτή διαμόρφωσης, τις διάφορες ταραχές στον αέρα μέσω του οποίου γίνονται οι μετρήσεις και τέλος στην ποικιλία σε σχέση με το δείκτη διάθλασης της ατμόσφαιρας.

- Συμβολομετρία (Interferometry)

Στη συγκεκριμένη μέθοδο χρησιμοποιείται η παρεμβολή διαφορετικών κυμάτων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας για τη καταγραφή τρισδιάστατων θέσεων στο χώρο. Η οπτική μέθοδος της συμβολομετρίας χρησιμοποιείται ήδη από τον 19 αιώνα. Λόγο των περιορισμών στην ένταση και συνάφεια των τυπικών πηγών φωτός οι μετρήσεις ήταν περιορισμένες σε αποστάσεις μόλις μερικών εκατοστών. Με την ανακάλυψη της τεχνολογίας του laser αυτά τα εμπόδια ξεπεράστηκαν, και καθιστά σήμερα αυτή τη μέθοδο μία μέθοδο υψηλής ακρίβειας και πιστότητας για τη μέτρηση μεγαλύτερων αποστάσεων. Οι μετρήσεις της μπορούν να είναι πολύ μεγάλης ακρίβειας. Προσφέρουν σαφώς μεγαλύτερη ακρίβεια από τη μέτρηση με παλμό ή με διαμόρφωση του φέροντος κύματος. Παρόλα αυτά ενδείκνυται για μετρήσεις που γίνονται σε ελεγχόμενες συνθήκες ατμόσφαιρας (δηλαδή εσωτερικά) για αποστάσεις όχι μεγαλύτερες από μερικές δεκάδες μέτρα.

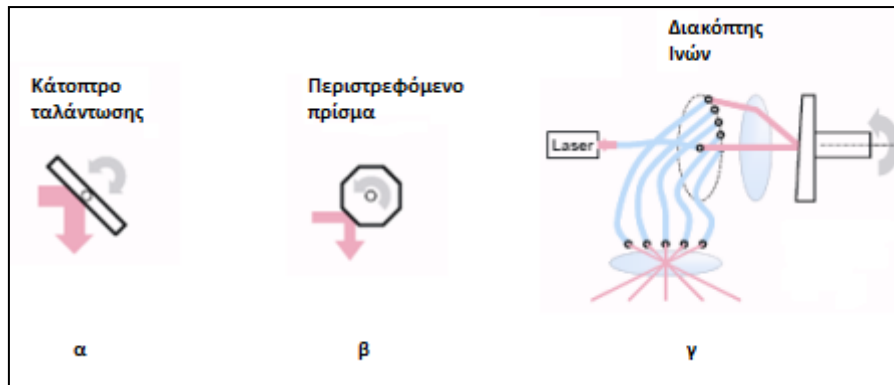


Εικόνα 2.11 Τρόπος Υπολογισμού
Πηγή: Santana Quintero et al., 2008

Σε ένα τέτοιο σύστημα η ακτίνα χωρίζεται μέσω ενός διαχωριστή ο οποίος ανακλά τη μισή ακτίνα σε μια διεύθυνση και μεταδίδει την άλλη μισή. Και τα δύο μέρη της ακτίνας περνούν από διαφορετικά μονοπάτια και μόνο όταν οι ακτίνες συνδυαστούν μαζί παράγονται κροσσοί συμβολής. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να εντοπιστούν μικρές εκτοπίσεις και επίσης να μετρηθούν μεγάλες αποστάσεις με μικρή αβεβαιότητα. Πολλά συστήματα και τεχνικές έχουν βασιστεί σε αυτή την αρχή μέτρησης για παράδειγμα η ολογραφία. (Santana Quintero et al., 2008).

2.1.4 Μέθοδοι εκτροπής της ακτίνας

Για να γίνει δυνατή η μέτρηση πολλαπλών σημείων από το ίδιο σημείο σάρωσης, χρειάζεται να εκτραπεί η ακτίνα. Αντί για την μετακίνηση του πομπού η λύση στο πρόβλημα είναι μια μονάδα εκτροπής. Τα περισσότερα τέτοια συστήματα χρησιμοποιούν ένα καθρέφτη γιατί είναι πολύ ελαφρύς και μπορεί να στραφεί πολύ πιο γρήγορα και με μεγαλύτερη ακρίβεια. Μια σειρά μεθόδων υπάρχουν για την εκτροπή της ακτίνας σε συγκεκριμένη διεύθυνση χωρίς να χρειαστεί να μετακινηθεί το σύστημα. Γενικά τρεις μέθοδοι εφαρμόζονται για αυτό το σκοπό. Μια επιλογή είναι η χρήση ενός κατόπτρου ταλάντωσης που επιτρέπει τη κίνηση της ακτίνας σε ευθεία. Ο συνδυασμός δύο καθρεφτών επιτρέπει την εκτροπή της ακτίνας σε δύο κατευθύνσεις. Για τη μείωση της συνθετότητας και του χρόνου μετακίνησης του καθρέφτη στην επιθυμητή θέση και μετά πίσω πάλι οι επιστήμονες έχουν εισαγάγει ένα περιστρεφόμενο οπτικό ανακλαστικό πρίσμα. Η αρχή αυτή χρειάζεται μόνο μία κατεύθυνση στροφής για το λόγο αυτό είναι ταχύτερη και πιο ευέλικτη. Τελευταία η χρήση διακοπών από ίνες δίνουν νέες δυνατότητες. Το σύστημα εκτρέπει την ακτίνα σε ένα κύκλο από οπτικές ίνες μέσω ενός περιστρεφόμενου καθρέφτη, και μετά οι οπτικές ίνες μεταδίδουν την ακτίνα σε όποια κατεύθυνση επιλεγεί. (Santana Quintero et al., 2008) Τα πλεονέκτημα ενός τέτοιου συστήματος είναι πρώτα πως ο ρυθμός του παλμού laser δεν εξαρτάται από τη γωνία θέασης, είναι δυνατή η απόκτηση ενός πολύ πυκνού και κανονικού πρότυπου σάρωσης, η βαθμονόμηση μετά την εργοστασιακή ρύθμιση δεν είναι απαραίτητη και τέλος είναι δυνατή η εμπρόσθια και πλευρική θέαση από τη βάση του laser.



Εικόνα 2.12 Μέθοδοι Εκτροπής Ακτίνας
Πηγή: Santana Quintero et al., 2008

2.1.5 Σάρωση με laser

Η σάρωση με τη χρήση laser περιγράφει τη μέθοδο όπου μια επιφάνεια σαρώνεται μερικώς ή ολικώς με χρήση της τεχνολογίας laser. Η τεχνική μέσω της συλλογής δεδομένων για το σχήμα και την εμφάνιση (χρώμα) αναλύει το περιβάλλον του πραγματικού κόσμου ή το αντικείμενο ενδιαφέροντος. Οι πληροφορίες που έχει συλλεχτεί μπορεί να υποστεί επεξεργασία και να ανακατασκευαστούν ψηφιακά σχέδια σε δύο ή τρεις διαστάσεις με το αποτέλεσμα να αποτελεί ένα χρήσιμο προϊόν για πολλές εφαρμογές σε πολλά επιστημονικά πεδία και αντικείμενα. Η λειτουργία του θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως μια εικόνα με βάθος πληροφορίας. Χωρίς αμφιβολία μια από τις πιο πετυχημένες μεθόδους σήμερα είναι η τεχνολογία της τεχνικής με το όνομα “LiDAR” το οποίο είναι αρκτικόλεξο του Light Detection and Ranging ή για άλλους Laser Imaging Detection and Ranging. Η τωρινή τεχνολογία σαρωτών laser μπορεί να χωριστεί σε δύο μεγάλες κατηγορίες τους στατικούς και τους δυναμικούς σαρωτές. (Papalampros, 2013).

Στατικοί Σαρωτές

Η πρώτη κατηγορία αναφέρεται στους στατικούς σαρωτές οι οποίοι παραμένουν σταθεροί κατά τη διαδικασία της σάρωσης. Τα πλεονεκτήματα αυτής της κατηγορίας περιλαμβάνουν μεγάλη ακρίβεια και σχετικά μεγάλη πυκνότητα λήψης σημείων. Οι στατικοί σαρωτές είναι γενικά οι επίγειοι σαρωτές χωρίς όμως να σημαίνει πως δεν υπάρχουν επίγειοι σαρωτές που να ανήκουν στην επόμενη κατηγορία αυτή των δυναμικών σαρωτών.

Δυναμικοί Σαρωτές

Τώρα στη περίπτωση των δυναμικών σαρωτών αυτοί συνήθως εδράζονται σε μία κινητή πλατφόρμα. Τα συστήματα αυτά συνήθως χρειάζονται πιο πολύπλοκα επιπρόσθετα συστήματα εντοπισμού θέσης όπως δέκτες GPS και αδρανειακά συστήματα INS, τα οποία βεβαίως αυξάνουν και το κόστος απόκτησης. Παραδείγματα δυναμικών σαρωτών είναι οι αερομεταφερόμενοι σαρωτές (airborne laser scanners), σαρωτές ενταγμένοι σε ένα κινούμενο όχημα (mobile laser scanners) ή σε ένα μη επανδρωμένο όχημα που ίπταται (UAV). (Santana Quintero et al., 2008).

2.1.6 Επίγειοι Σαρωτές Laser

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται κυρίως σε στατικούς επίγειους σαρωτές τεχνολογίας laser. Αρχικά οι σαρωτές laser ήταν μικρής εμβέλειας και χρησιμοποιούνταν κυρίως στην αυτοκινητοβιομηχανία και στη διαδικασία του βιομηχανικού σχεδιασμού για την υποστήριξη διαδικασιών σχεδίασης με τη χρήση Η/Υ και συστημάτων CAD. Η παραπάνω χρήση συνέβαλε στη μαζική παραγωγή καταναλωτικών αγαθών. Όμως η τεχνολογία προχωρά φέρνοντας νέες δυνατότητες που χρήζουν διερεύνησης. Οι σαρωτές μέσης εμβέλειας αρχικά αναπτύχθηκαν για τις πετροχημικές βιομηχανίες, λόγω της πολυπλοκότητας των μονάδων τους που μέχρι τότε απεικονίζονταν μόνο σε δισδιάστατα σχέδια, δόθηκε λοιπόν η δυνατότητα πλήρους τρισδιάστατης απεικόνισης και διαχείρισης τέτοιων τοποθεσιών.

Πλεονεκτήματα Επίγειων Σαρωτών Laser

Στα πλεονεκτήματα του επίγειου σαρωτή laser σε σχέση με άλλες μεθόδους αποτύπωσης είναι αρχικά η ταχύτητα, η αξιοπιστία, η διαφοροποίηση του προϊόντος στη βάση της ακρίβειας, η ευκολία στη προεπεξεργασία, ο συνδυασμός των ιδιαίτερος χρήσιμων χαρακτηριστικών της Γεωδαισίας όσον αφορά στην μεγάλη ακρίβεια και της Φωτογραμμετρίας όσον αφορά στη συνέχεια και την πληρότητα της αποτύπωσης. Ακόμα, δίνεται η δυνατότητα μεταβολής της ανάλυσης αποτύπωσης έτσι ώστε να ανταποκρίνεται στις πραγματικές ανάγκες και προδιαγραφές της εν προκειμένω εφαρμογής κάθε φορά (fit for purpose) για εξοικονόμηση χρόνου και όγκου δεδομένων, με την δυνατότητα της συνολικής τρισδιάστατης αποτύπωσης αντικειμένων χωρίς επιπρόσθετο χρόνο και κόστος.

Μειονεκτήματα Σαρωτών Laser

Από την άλλη μεριά τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα αποτελούν το μεγάλο κόστος απόκτησης ενός τέτοιου σαρωτή laser καθώς και ο μεγάλος χρόνος που απαιτείται για την επεξεργασία των νεφών, το οποίο αντισταθμίζεται από την μικρή απαίτηση σε χρόνο συνεργείων στο ύπαιθρο και την κατασκευή των τρισδιάστατων μοντέλων. Για το κόστος βέβαια υπάρχουν εναλλακτικές λύσεις όπως αυτή της ενοικίασης του εξοπλισμού για συγκεκριμένη εργασία εάν κριθεί απαραίτητο από τον υπεύθυνο κάθε εφαρμογής. Πέρα από τον σαρωτή η χρήση του προϋποθέτει και κάποια παρελκόμενα όπως τρίποδο, μπαταρία και στόχους. Στην αγορά υπάρχουν αρκετές εταιρείες που διαθέτουν σαρωτές με διάφορα χαρακτηριστικά και σημαντικές διαφορές.

Η χρήση στόχων εκτός του πεδίου της Φωτογραμμετρίας βρίσκει εφαρμογή και στη χρήση και λειτουργία των σαρωτών. Οι στόχοι στη Φωτογραμμετρία παίζουν ένα πολύ συγκεκριμένο ρόλο στη συνένωση των εικόνων που χρησιμοποιούνται, και στην εξαγωγή των τρισδιάστατων συντεταγμένων σημείων για την πιθανή παραγωγή του τρισδιάστατου μοντέλου. Οι σαρωτές laser λοιπόν χρησιμοποιούν τους στόχους για την λεγόμενη συνένωση νεφών της κάθε σάρωσης και την τελική ένταξη των μετρήσεων- νεφών σε συγκεκριμένο ενιαίο σύστημα αναφοράς. Η μορφή των στόχων ποικίλλει μπορεί να είναι είτε σφαιρικοί, ημισφαιρικοί είτε και επίπεδοι, σε κάθε περίπτωση αναγνωρίζονται από τους αντίστοιχους σαρωτές της κάθε κατασκευάστριας εταιρίας. (Arayici, 2007, Χριστοδούλου, 2014).

2.1.7 Εφαρμογές επίγειων σαρωτών τεχνολογίας laser

Οι επίγειοι σαρωτές laser χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σε πολλά επίπεδα και επιστημονικά αντικείμενα που κυμαίνεται από την εξαιρετικά εξειδικευμένη σάρωση για μικροσκοπικές εφαρμογές σε επιστημονικά εργαστήρια ως την τρισδιάστατη σάρωση μεγάλων τεχνικών έργων και αντικειμένων μεγάλης ιστορικής και πολιτισμικής αξίας που δεν μπορούν να μελετηθούν λόγω του κινδύνου πιθανής φθοράς ή και καταστροφής τους αλλά και της μεγάλης λεπτομέρειας που απαιτούν για την απεικόνισή τους. Έτσι πλέον οι σαρωτές laser με τη βοήθεια και των ηλεκτρονικών υπολογιστικών συστημάτων καθώς και των λογισμικών επεξεργασίας, βρίσκουν σημαντικό πεδίο εφαρμογών σε προβλήματα αποτύπωσης και γεωμετρικής τεκμηρίωσης, τα οποία μέχρι τώρα τεχνολογικά ήταν πολύ δύσκολο να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά. Ενδεικτικά κάποιοι τομείς εφαρμογής επίγειων σαρωτών laser βρίσκονται στις αποτυπώσεις γεωμετρικά πολύπλοκων αντικειμένων, αρχαιολογικών χώρων και μνημείων, σπηλαίων, μεταλλείων – ορυχείων, σπηλαίων, ακόμα στην οδοποιία, πολεοδομία, γεωλογία, στη βιομηχανία (as build 3d drawings), στην εγκληματολογία, τεκμηρίωση θέσεων ατυχημάτων και καταστροφών, κινηματογραφικά οπτικά εφέ, εικονική πραγματικότητα, και στη αποτύπωση πλοίων καθώς και σε πληθώρα άλλων εφαρμογών. Πιο συγκεκριμένα σε μελέτες οδοποιίας ή συγκοινωνιακών εφαρμογών, μια απαιτούμενη τυπική αποτύπωση ενός οδικού δικτύου, μπορεί να γίνει ταχύτερα σε ποσοστό της τάξης του 20 – 30% με χρήση σαρωτή laser σε σχέση με συμβατικές μεθόδους και με μικρότερο συνεργείο αποτύπωσης. Ακόμα ένα μεγάλο πλεονέκτημα είναι πως δεν υπάρχει ανάγκη για διακοπή της κυκλοφορίας στις οδούς για εφαρμογές. Άλλες παραπλήσιες εφαρμογές είναι η μέτρηση διασταυρώσεων, μετρήσεις σε σήραγγες, υπολογισμός όγκου χωματισμών, υπολογισμός κλίσης και σταθερότητας πρανών. Ένα μεγάλο κεφάλαιο εφαρμογής των σαρωτών είναι σε τοπογραφικές εφαρμογές. Ειδικές εφαρμογές τοπογραφικών αποτυπώσεων, όπως είναι η αποτύπωση σπηλαίων (έντονο ανάγλυφο και ακαθόριστο σχήμα) ή η αποτύπωση ενός αεροδρομίου που ήδη βρίσκεται σε χρήση και δεν είναι δυνατή η διακοπή της λειτουργίας του, μπορούν εύκολα να αντιμετωπιστούν με τη χρήση σαρωτών laser. Στις αποτυπώσεις μνημείων (κτηρίων, περιοχών, ακόμα και αντικειμένων), όπου παρουσιάζονται προβλήματα πρόσβασης, εγγύτητας και πολυπλοκότητας καθώς και στις αρχαιολογικές ανασκαφές, αρχίζει να παγιώνεται η αποτύπωση με επίγεια σάρωση ως μια τεχνολογία η οποία, εκτός της ανάγκης για γεωμετρική τεκμηρίωση σε διάφορες χρονικές στιγμές, παρέχει και τη δυνατότητα εικονικών μουσείων και εικονικής πραγματικότητας για την ανάδειξη των μνημείων της πολιτιστικής κληρονομιάς. Οι σαρωτές Laser προσφέρουν τη δυνατότητα σάρωσης εκατομμυρίων σημείων με πολύ μεγάλη ακρίβεια σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα. Ακόμα δίνει τη δυνατότητα σάρωσης αντικειμένων ανεξαρτήτου μεγέθους με τον όγκο των μετρήσεων να μην αποτελεί πρόβλημα. Το αποτέλεσμα της σάρωσης είναι ένα νέφος σημείων. (Lichti et. al., 2002, Santana Quintero et al., 2008, Κατωγιάννης, 2013).

2.1.8 Ακρίβεια σάρωσης

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία που θα πρέπει να ληφθεί πολύ σοβαρά υπόψη είναι η ακρίβεια με την οποία γίνονται οι μετρήσεις της σάρωσης δηλαδή η ακρίβεια του νέφους των σημείων. Η ακρίβεια της αποτύπωσης έχει άμεση συνέπεια στην ολική ποιότητα του τελικού προϊόντος και κατά συνέπεια αποτελεί μέτρο χρησιμότητας και της δυνατότητας εφαρμογής της σάρωσης laser στις διαφορετικές περιπτώσεις των εφαρμογών που προκύπτουν. Γενικά, η ακρίβεια των μετρήσεων, εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη γωνία πρόσπτωσης μεταξύ της ακτίνας laser και της επιφάνειας του αντικειμένου. Σε γενικές γραμμές, μικρότερη απόσταση και πιο μικρή γωνία πρόσπτωσης επιφέρουν πιο ακριβή αποτελέσματα μετρήσεων. Βέβαια η ακρίβεια ως μέγεθος επηρεάζεται από πολλούς διαφορετικούς παράγοντες σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό, οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια είναι αρχικά η μέθοδος και η ταχύτητα της σάρωσης, η απόσταση μεταξύ σαρωτή και αντικειμένου, η ανακλαστικότητα των επιφανειών, το μέγεθος της κουκίδας του laser, το υλικό της επιφάνειας που μετράται και στην οποία προσπίπτουν οι ακτίνες, η πυκνότητα σάρωσης, ο θόρυβος σάρωσης, η θερμοκρασία που επικρατεί και τέλος οι συνθήκες της ατμόσφαιρας.

Μια πολύ σημαντική παράμετρος για τη συνολική διαδικασία είναι η πυκνότητα της σάρωσης. Κατά τη διαδικασία της σάρωσης απαραίτητη προϋπόθεση είναι ο καθορισμός του βήματος σάρωσης, δηλαδή της απόστασης μεταξύ των γειτονικών σημείων που θα αποτυπώσει ο σαρωτής. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Αρχικά, δίνεται η απόσταση από το αντικείμενο σάρωσης ή η μέση απόσταση καθώς είναι δύσκολο να υπάρξει μόνο μία τιμή της απόστασης. Στη συνέχεια δίνεται το βήμα σάρωσης το οποίο κυμαίνεται από λίγα χιλιοστά και μπορεί να φτάσει έως και μερικά μέτρα. Αυτό εξαρτάται από τις δυνατότητες του οργάνου με το οποίο θα γίνει η σάρωση, το αντικείμενο αποτύπωσης αλλά και τις απαιτήσεις ακριβείας του τελικού προϊόντος. Αξιοσημείωτο είναι όμως ότι το βήμα σάρωσης είναι προσεγγιστικό και αφορά μόνο στα αντικείμενα τα οποία βρίσκονται κάθετα στην πορεία της ακτίνας laser. Οι πλάγιες σαρώσεις δίνουν μικρότερη πυκνότητα από αυτήν που έχει υπολογιστεί άρα σε αυτές τις περιπτώσεις συνήθως δίνετε υψηλότερη πυκνότητα από αυτήν που αρχικά σχεδιάστηκε. Αμέσως μετά σημαντική παράμετρος είναι ο θόρυβος της σάρωσης. Είναι γεγονός ότι κατά τη διαδικασία της σάρωσης, αποτυπώνεται και άχρηστη πληροφορία. Αυτό συμβαίνει συχνότερα στις σαρώσεις που γίνονται σε εξωτερικούς χώρους. Ο θόρυβος της σάρωσης αποτελείται από περιττά σημεία τα οποία επιλέγονται να αποτυπωθούν για να αποφευχθούν κενά στο τελικό αποτέλεσμα της αποτύπωσης. Τέτοια σημεία μπορεί να είναι δέντρα, φυτά ή τεχνητά εμπόδια που βρίσκονται μπροστά από το αντικείμενο και εμποδίζουν την αποτύπωση του. Στη συνέχεια, το μέγεθος του ίχνους της δέσμης του laser παίζει σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια αποτύπωσης. Γενικά το μέγεθος του ίχνους της δέσμης του laser εξαρτάται από το πόσο αποκλίνει η δέσμη σε σχέση με την απόσταση σαρωτή- αντικειμένου. Όλοι οι σαρωτές εγγυώνται ίχνος μικρότερο από την ακρίβεια τους σαρωτή μέχρι κάποια απόσταση. Σχετικά με την ανακλαστικότητα της επιφάνειας, είναι γνωστό, ότι οι άσπρες επιφάνειες ανακλούν την ακτινοβολία σε πολύ μεγάλο βαθμό, ενώ οι μαύρες την απορροφούν σχεδόν ολοκληρωτικά. Ένας τρόπος για τη διερεύνηση των σφαλμάτων που προκύπτουν από τη μεταβολή της ανακλαστικότητας, είναι η χρήση ενός άσπρου επίπεδου στόχου, του οποίου το

κέντρο θα έχει επικαλυφθεί με ανακλαστικό υλικό. Οι διαφορές που θα προκύψουν στον προσδιορισμό της απόστασης μεταξύ του κέντρου και του υπόλοιπου στόχου, θα δώσουν μια σαφή εικόνα των αποκλίσεων που πρέπει να αναμένονται. Ρόλο παίζει και η θερμοκρασία στην οποία γίνονται οι σαρώσεις, κάθε σαρωτής λειτουργεί κανονικά μόνο όταν χρησιμοποιείται σε ένα συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασίας (συνήθως 0°-50° C). Ακόμα και μέσα σε αυτό το εύρος μπορεί να παρατηρηθούν αποκλίσεις ειδικά στο μέγεθος της μετρημένης απόστασης. Τέλος αναφορικά με την ατμόσφαιρα εκτός της θερμοκρασίας, η πίεση της ατμόσφαιρας μπορεί να επηρεάσει την ταχύτητα διάδοσης του φωτός μέσα σε αυτή. Από τη στιγμή όμως που μετρώνται μικρές αποστάσεις, η αλλαγή στη ταχύτητα του φωτός λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών και μεταβολών στην πίεση δεν επηρεάζει ουσιαστικά και πρακτικά τα αποτελέσματα των σαρώσεων. (Boehler et. al., 2003, Σκουρή, 2010, Κατωγιάννης, 2013).

2.1.9 Παρουσίαση εμπορικών συστημάτων σαρωτών

Τα κυριότερα εμπορικά συστήματα επίγειων σαρωτών κατασκευάζονται και προέρχονται από τις εταιρείες Callidus (D) (www.callidus.de), Leica (USA, CH) (www.leica.com), MDL (UK) (www.mdl.co.uk), Mensi (F) (www.mensi.com), Ortech (CAN) (www.optech.on.ca), Riegl (A) (www.riegl.com), I-Site (www.isite3d.com) και Zoller & Frohlich (D) (www.zofre.de). Το μοντέλο σαρωτή που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι ο σαρωτής τεχνολογίας laser ScanStation 2 της εταιρείας Leica και παρουσιάζεται αναλυτικά στο πειραματικό μέρος της εργασίας. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το νεότερο αντίστοιχο μοντέλο σαρωτή laser Scanstation C10. Το μοντέλο αυτό εμφανίζει βελτιωμένα χαρακτηριστικά και νέες δυνατότητες, έτσι ώστε να γίνει αντιληπτή μέσω της σύγκρισης η τεχνολογική πρόοδος και οι διαφορές των σαρωτών με το πέρασμα του χρόνου, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις διάφορες εφαρμογές που προκύπτουν. Μετά παρουσιάζονται μερικά ακόμα μοντέλα σε σύγκριση μεταξύ τους.

Laser Scanner Scanstation C10 - Leica Geosystems AG





Το σύστημα του σαρωτή Scanstation C10 της Leica Geosystems AG περιλαμβάνει πέρα από την κεφαλή του και παρελκόμενα όπως τρίποδας, μπαταρίες με τροφοδοτικό, καλώδια επικοινωνίας και τροφοδοσίας, στόχους και τρικόχλιο. Ο συγκεκριμένος σαρωτής δίνει τη δυνατότητα χειρισμού χωρίς τη χρήση φορητού Η/Υ. Η λειτουργία βασίζεται σε παλλόμενο laser, δηλαδή τη μέθοδο time-of-flight, με laser κλάσης 3R και χρώματος πράσινου. Το οπτικό πεδίο του είναι 360° οριζόντια και 270° κατακόρυφα αντίστοιχα, ακόμα διαθέτει αναπόσπαστο σερβομηχανισμό για την περιστροφή του και κάλυψη του οπτικού πεδίου χωρίς την ανάγκη για χρήση άλλης βάσης, ο οποίος μηχανισμός δεν χρήζει βαθμονόμησης. Η μέγιστη ανάλυση της σάρωσης κατά οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα μέχρι και 1mm/100m. Ακόμα ο σαρωτής περιλαμβάνει ψηφιακή κάμερα 4 megapixels έγχρωμη, auto-adjusting, όπου το κέντρο της με αυτό της εκπομπής laser ταυτίζονται. Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω ο σαρωτής μπορεί να αποδώσει στο νέφος σημείων και χρωματική υφή από φωτογραφίες της κάμερας. Ο ενσωματωμένος σκληρός δίσκος καταγραφής των

μετρήσεων είναι χωρητικότητας 80 GB και η μεταφορά τους σε Η/Υ μπορεί να γίνει μέσω της θύρας USB. Το μέγεθος του ίχνους της ακτίνας laser στα 50 μέτρα είναι 4,5 mm με ρυθμό σάρωσης 50.000 σημεία ανά δευτερόλεπτο. Επίσης μπορεί να πραγματοποιηθεί όδευση χωρίς τη χρήση waypoints με την ελάχιστη απόσταση εστίασης το 1 μέτρο και την μέγιστη εμβέλεια τα 300 μέτρα. Ακόμα ο σαρωτής μπορεί να συνεργαστεί με GPS και άλλα συμβατικά τοπογραφικά όργανα. Τέλος έχει τη δυνατότητα αυτόματης αναγνώρισης και σάρωσης στόχων με υψηλή ανάλυση.



Εικόνα 2.13 Laser scanner Scanstation C10
Πηγή: Leica Geosystems AG, 2015

Παρακάτω ακολουθεί ένας συγκριτικός πίνακας με τα πλέον σύγχρονα μοντέλα σαρωτών των πιο διαδεδομένων και αξιόλογων εταιρειών κατασκευής και διάθεσης σαρωτών τεχνολογίας laser, για την ανάδειξη των διαφορών σε χαρακτηριστικά και δυνατότητες.

	Μοντέλα			
Εικόνες				
Χαρακτηριστικά	Leica ScanStation P40	Faro Focus3D X 330	Trimble TX8	RIEGL VZ-6000
Εύρος Απόστασης Σάρωσης (m)	0,4 - 270	0,6 - 330	0,6 - 340	5 - 600
Ταχύτητα Σάρωσης (pts/sec)	≤ 1000000	≤ 976000	≤ 1000000	≤ 22000
Γωνιακή Ανάλυση	8"	-*	16,5"	1,8"
Ακρίβεια Απόστασης	± 1,2 + 10 ppm	± 2mm	± 2mm	± 15 mm / 150 m
Ανάλυση Φωτ. Μηχανής	4 MP	4 MP	Εξωτερική	5 MP
Βάρος (kg)	12,25	5,2	10,6	14,5
Διαστάσεις	238 × 358 × 395mm	240 x 200 x 100 mm	335 x 386 x 242 mm	248 x 226 x 450 mm
Χειρισμός - Επικοινωνία	Οθόνη αφής, WLAN, USB, Ethernet	Οθόνη αφής, WLAN	Η/Υ	Οθόνη αφής

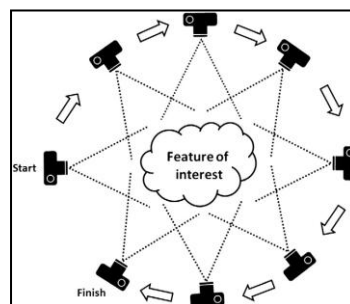
Μέσα Αποθήκευσης	256 GB SSD, εξωτερικό μέσο	32 GB SD Card	εξωτερικό μέσο	80 GB SSD, εξωτερικό μέσο
Μέθοδος Σάρωσης	time-of-flight	time-of-flight	time-of-flight	time-of-flight
Οπτικό Πεδίο (°)	360 x 270	300 x 360	360 x 317	60 x 360

Πίνακας 2.1 Κύρια Χαρακτηριστικά Μοντέλων Σαρωτών Laser

(-*: Το συγκεκριμένο Χαρακτηριστικό δεν αναγράφεται στα τεχνικά χαρακτηριστικά του μοντέλου που δίνονται από την εταιρεία παραγωγής.)

2.2 Structure from Motion - (SfM)

Τα τελευταία χρόνια από την εισαγωγή της αυτοματοποιημένης εναέριας ή της εγγύς ψηφιακής φωτογραμμετρίας ο παραπάνω αλγόριθμος έχει γίνει ένα ισχυρό και διαδεδομένο εργαλείο για τη τρισδιάστατη μοντελοποίηση αντικειμένων. Η ανάπτυξη και η παράλληλη μείωση του κόστους και βελτίωση της ποιότητας των φωτογραφικών μηχανών τόσο compact όσο και SLR όπως και των μεθόδων και τεχνικών για τη βαθμονόμηση των μη μετρητικών καμερών έδωσε την ευκαιρία ευκολότερης πρόσβασης στη φωτογραμμετρία και ενθάρρυνε την χρήση τους σε μεγαλύτερο εύρος αντικειμένων και εφαρμογών από διαφορετικές ειδικότητες επιστημόνων. Παρακάτω παρουσιάζεται μια ανερχόμενη οικονομική αυτοματοποιημένη ψηφιακή φωτογραμμετρική μέθοδος για υψηλής ακρίβειας ανακατασκευές, ιδανική για χαμηλού κόστους έρευνες και εφαρμογές ακόμα και σε απομακρυσμένες και δυσπρόσιτες περιοχές. Ο αλγόριθμος SfM λειτουργεί με τις ίδιες αρχές όπως η στερεοσκοπική φωτογραμμετρία, δηλαδή η τρισδιάστατη μορφή μπορεί να προκύψει από μια σειρά επικαλυπτόμενων εικόνων. Παρόλα αυτά διαφέρει κατά πολύ από την τυπική - κλασική φωτογραμμετρία, στο γεγονός πως η γεωμετρία της σκηνης, οι θέσεις της κάμερας και ο προσανατολισμός επιλύονται αυτόματα χωρίς την ανάγκη a priori προσδιορισμού ενός δικτύου στόχων με γνωστές θέσεις στο χώρο. Η συγκεκριμένη επίλυση που αναφέρθηκε επιτυγχάνεται μέσα από δεδομένα στοιχείων τα οποία έχουν αυτόματα εξαχθεί από ένα σετ πολλαπλών επικαλυπτόμενων εικόνων και ακολουθεί μια διαδικασία επαναληπτικής προσαρμογής της δέσμης – αεροτριγωνισμού με υψηλό βαθμό πλεονασμού σε παρατηρήσεις. Η προσέγγιση είναι πιο σωστή για σετ εικόνων με μεγάλο βαθμό επικάλυψης που εμπεριέχουν την πλήρη τρισδιάστατη δομή της λήψης που φαίνεται από μεγάλο εύρος θέσεων, ή όπως το όνομα της υπαγορεύει εικόνες που λαμβάνονται από έναν κινούμενο αισθητήρα.



Εικόνα 2.14 Η Απαιτήση για Πολλαπλές Εικόνες
Πηγή: Westoby et al., 2012

Η τεχνική αναπτύχθηκε περί το 1990, έχει τις ρίζες της στην υπολογιστική όραση και στην ανάπτυξη αλγορίθμων συνταύτισης στοιχείων προηγούμενης δεκαετίας. Η προσέγγιση έγινε διάσημη μέσα από ένα εύρος μηχανών επεξεργασίας νεφών σημείων, με ποιο γνωστή τη Microsoft® Photosynth™ (Microsoft®, 2010), η οποία χρησιμοποιεί προσεγγίσεις της τεχνικής όπως περιγράφονται από τους Snavely (2008) και Snavely et al. (2008). Αυτά τα εργαλεία μπορούν απευθείας να χρησιμοποιήσουν εικόνες του χρήστη ή σύνολο εικόνων μιας crowd-sourcing διαδικασίας για τη δημιουργία των απαραίτητων επικαλύψεων του αντικειμένου, που μπορεί αυτόματα να παράγει πυκνό τρισδιάστατο νέφος σημείων από αυτό το σετ των εικόνων. Οι δυνατότητες της μεθόδου μπορεί να φαίνονται απεριόριστες αλλά βέβαια ακόμα υπάρχουν ερωτήματα σχετικά με την ποιότητα των προϊόντων από αυτή τη μέθοδο. (Westoby et al., 2012)

2.2.1 Βασικές αρχές της μεθόδου

Για το προσδιορισμό της τρισδιάστατης θέσης σημείων σε μια λήψη η παραδοσιακή φωτογραμμετρία απαιτεί να είναι γνωστή η τρισδιάστατη θέση και στάση της κάμερας ή η τρισδιάστατη θέση από μια σειρά σημείων ελέγχου. Χρησιμοποιώντας το πρώτο με την απουσία τοποθετημένου GPS στη κάμερα και ηλεκτρονικής πυξίδας, ο τριγωνισμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανακατασκευή της γεωμετρίας της λήψης, ενώ στη δεύτερη περίπτωση τα σημεία ελέγχου αναγνωρίζονται χειροκίνητα στις εισηγμένες φωτογραφίες και χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της θέσης. Σε αντίθεση η μέθοδος SfM δεν απαιτεί τίποτα από τα παραπάνω δηλαδή από πριν γνωστά σημεία για την τρισδιάστατη ανακατασκευή της σκηνής. Η στάση της κάμερας και η γεωμετρίας της σκηνής ανακατασκευάζονται στιγμιαία μέσω της αυτόματης συνταύτισης στοιχείων στις πολλαπλές εικόνες. Αυτά τα στοιχεία εντοπίζονται από εικόνα σε εικόνα, δίνοντας τη δυνατότητα αρχικής εκτίμησης της θέσης της κάμερας και τις συντεταγμένες του αντικειμένου, που στη συνέχεια επαναυπολογίζονται επαναληπτικά με τη χρήση μη γραμμικής ελαχιστοτετραγωνικής τεχνικής. Αντίθετα με την παραδοσιακή φωτογραμμετρία οι θέσεις των καμερών που προέρχονται από τη μέθοδο υπολείπονται κλίμακας και προσανατολισμού τα οποία παρέχονται από τα σημεία ελέγχου στο έδαφος. Συμπερασματικά τα τρισδιάστατα νέφη σημείων που εξάγονται βρίσκονται σε ένα σχετικό σύστημα αναφοράς, το οποίο πρέπει να ευθυγραμμιστεί με τον πραγματικό κόσμο δηλ. το απόλυτο σύστημα συντεταγμένων. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο μετασχηματισμός των συντεταγμένων στο απόλυτο σύστημα επιτυγχάνεται με το τρισδιάστατο μετασχηματισμό ομοιότητας με ένα αριθμό γνωστών σημείων ελέγχου. Τα σημεία αυτά μπορούν να αποκτηθούν και μετά αρκεί να είναι εμφανή και στα νέφη αλλά και στο πεδίο. Η λήψη των συντεταγμένων μπορεί να γίνει με συνήθεις τοπογραφικές μεθόδους. Στη πράξη είναι ευκολότερο να χρησιμοποιούνται φυσικοί στόχοι με εμφανή και ευδιάκριτα κεντροειδή στο πεδίο πριν τη λήψη των εικόνων. Η προσέγγιση αυτή απλοποιεί τη σαφήνεια της σχετικής θέσης του χώρου της εικόνας και του αντικειμένου και δίνουν αξιοπιστία με καλή κατανομή του δικτύου στο χώρο, διευκολύνοντας την εύρεση των τελικών σφαλμάτων στην ανακατασκευή του αντικειμένου. Είναι χρήσιμο επίσης να υπάρχει και ένας βαθμός πλεονασμού παρατηρήσεων στο δίκτυο σημείων έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη η περίπτωση ελλιπών δεδομένων στη περιοχή των στόχων. (Westoby et al., 2012).

2.2.2 Πορεία λειτουργίας της μεθόδου

Παρακάτω θα αναλυθούν τα βασικά μέρη και βήματα που ακολουθεί η συγκεκριμένη μέθοδος έτσι ώστε να παραγάγει το τελικό αποτέλεσμα που ενδιαφέρει, δηλαδή τα νέφη σημείων, που ουσιαστικά ανακατασκευάζουν το απεικονιζόμενο αντικείμενο.

Συλλογή Εικόνων και Εξαγωγή Σημείων Ενδιαφέροντος

Το κεντρικό πρόβλημα που καλείται να λύσει η αυτόματη αυτή μέθοδος είναι ο καθορισμός της τρισδιάστατης θέσης των στοιχείων προς συνταύτιση σε πολλαπλές εικόνες, ληφθείσες από διαφορετικές γωνίες. Το πρωταρχικό βήμα επεξεργασίας στη λύση του προβλήματος είναι η ταυτοποίηση των στοιχείων στις επιμέρους εικόνες. Μία ευρέως αποδεκτή λύση σε αυτό είναι ο αλγόριθμος εντοπισμού αντικειμένων SIFT – Scale Invariant Feature Transform. Το σύστημα ταυτοποιεί τα στοιχεία σε κάθε εικόνα τα οποία είναι αμετάβλητα στην αλλαγή κλίμακας και στροφής της εικόνας και μερικώς αμετάβλητα σε αλλαγές στις φωτιστικές συνθήκες και στο τρισδιάστατο σημείο θέασης της μηχανής. Τα σημεία ενδιαφέροντος ή σημεία κλειδιά, εντοπίζονται αυτόματα σε όλες τις κλίμακες και θέσεις σε κάθε εικόνα, ακολουθούμενα από ένα δημιουργημένο στοιχείο περιγραφής, το οποίο υπολογίζεται μέσω του μετασχηματισμού των τοπικών κλίσεων της εικόνας σε μια αναπαράσταση που σε μεγάλο βαθμό επηρεάζεται από διακυμάνσεις στο φωτισμό και προσανατολισμό. Αυτοί οι περιγραφείς είναι αρκετά μοναδικοί για να επιτρέψουν στο στοιχείο να συνταυτιστεί σε μεγάλα σετ δεδομένων. Το πλήθος των σημείων ενδιαφέροντος σε μια εικόνα εξαρτάται αρχικά από την υφή και ανάλυση της εικόνας. Η πυκνότητα, η οξύτητα και η ανάλυση του σετ των εικόνων σε συνδυασμό με το εύρος της υφής της φυσικής σκηνής σε πρώτη φάση μπορεί να καθορίσει τη ποιότητα του νέφους σημείων που θα εξαχθεί. Ομοίως μειώνοντας την απόσταση μεταξύ κάμερας και αντικειμένου ενδιαφέροντος, δηλαδή αυξάνοντας τη χωρική ανάλυση της εικόνας, θα βελτιωθεί η χωρική πυκνότητα και ανάλυση του τελικού νέφους σημείων. Εναλλαγές στη συνθετότητα, στο φωτισμό και στα υλικά της κάθε σκηνής επηρεάζουν την υφή της εικόνας έτσι είναι αδύνατο να δοθεί από πριν κάποια συμβουλή – υπόδειξη για τον αριθμό των ελάχιστων εικόνων που χρειάζονται για την επιτυχή ανακατασκευή της σκηνής λήψης. Η ελάχιστες απαιτήσεις είναι για τα ομόλογα στοιχεία να είναι εμφανή από τουλάχιστον τρεις εικόνες, παρ' όλα αυτά συνιστάται η απόκτηση όσων περισσότερων εικόνων είναι δυνατόν για εισαγωγή στη μέθοδο, δεδομένου των υλικοτεχνικών περιορισμών, καθώς αυτό βελτιστοποιεί τον τελικό αριθμό σημείων κλειδιών που ταυτίζονται και στο πλεονασμό παρατηρήσεων του συστήματος. Ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δοθεί επίσης στη επιλογή της πλατφόρμας συλλογής των εικόνων. Για παράδειγμα σκηνές μικρής κλίμακας με απότομες κλίσεις γωνιών είναι πιθανότερο να ταιριάζει μια προσέγγιση αποκλειστικά επίγεια, όπου χαμηλού ύψους εναέριες εικόνες μπορεί να προσφέρουν καλύτερη κάλυψη πάνω από μεγαλύτερα αντικείμενα με πιο ήπια γεωμετρία - τοπογραφία. Βέβαια εικόνες συνδυασμένες από πολλαπλές πλατφόρμες μπορεί να αποδειχθούν ιδανικές προσφέροντας διαφορετικά επίπεδα λεπτομέρειας σε διαφορετικές περιοχές της σκηνής. Όταν γίνεται η λήψη των εικόνων, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί ώστε η επικάλυψη να μεγιστοποιηθεί μέσω της υιοθέτησης μικρών βάσεων λήψης και απόκτηση με ομοιόμορφη κάλυψη των στοιχείων ή του τοπίου ενδιαφέροντος στα

πλαίσια του δυνατού. Μια μεγάλη ποικιλία σε αισθητήρες εικόνων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέθοδο SfM από καρέ βίντεο μέχρι χαμηλής ποιότητας εικόνες από ψηφιακές μηχανές compact. Οι βασικές απαιτήσεις είναι καλά εκτεθειμένες εικόνες των στοιχείων ενδιαφέροντος. Οι ‘μεγάλες’ εικόνες δεν είναι απαραίτητα ‘καλύτερες’. Όπου η ποιότητα και ανάλυση των εικόνων βελτιώνονται μέσω της χρήσης αυξανόμενου κόστους SLR μηχανών, οι εικόνες που λαμβάνονται στις μέγιστες αναλύσεις, θα πρέπει τελικά να αλλάξουν σε μέγεθος με συνέπεια την απώλεια λεπτομέρειας για την αποφυγή πολύωρων επεξεργασιών. Αν η εργασία γίνεται στο πεδίο προσοχή πρέπει να δοθεί στην αντοχή και διάρκεια της μπαταρίας, καθώς και στις μεθόδους φόρτισης και επιδόσεις σε ακραίες θερμοκρασίες.

Τρισδιάστατη Ανακατασκευή Λήψης

Μετά τη ταυτοποίηση των σημείων κλειδιών και την τοποθέτηση του περιγραφέα η αραιή προσαρμογή της δέσμης με το σύστημα - λογισμικό Bundler το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της στάσης της κάμερας και να εξάγει ένα πρώτο αραιό νέφος σημείων. Τα σημεία κλειδιά σε πολλαπλές εικόνες ταυτίζονται χρησιμοποιώντας τη προσέγγιση του εγγύτερου γείτονα και τον αλγόριθμο RANSAC - Random Sample Consensus των Fischler and Bolles, 1987 και καταγράφει συνδέοντας συγκεκριμένα σημεία κλειδιά σε ένα σεντ εικόνων. Τα ίχνη περιλαμβάνουν κατ’ ελάχιστο δύο σημεία κλειδιά και χρησιμοποιούνται τρεις εικόνες για την ανακατασκευή των νεφών σημείων, με όποια αποτύχουν να εκπληρώσουν συγκεκριμένα κριτήρια αυτομάτως να απορρίπτονται, χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο κινούμενα στοιχεία όπως άνθρωποι που κινούνται μέσα στη σκηνή αυτόματα απομακρύνονται από το σεντ των δεδομένων πριν την αρχή της ανακατασκευής. Αυτό ακόμα εφαρμόζεται και σε μη στατικά αντικείμενα που ακούσια έχουν τραβηχτεί στη σκηνή όπως αντικείμενα στον αισθητήρα κ.λπ. Σε αυτές τις περιπτώσεις παρόλο που δημιουργούνται σημεία κλειδιά, δεν είναι κατάλληλα για χρήση στην ανακατασκευή της σκηνής καθώς η σχετική θέση τους ως προς τα άλλα σημεία αλλάζει συνεχώς, αυτά αυτόματα φιλτράρονται και μέσω περιορισμών της θέασης και κανονικοποίησης εκλείπουν. Τα ομόλογα σημεία κλειδιά θέτουν περιορισμούς σχετικά με τον προσανατολισμό της στάσης της μηχανής, ο οποίος ανακατασκευάζεται μέσω του μετασχηματισμού ομοιότητας. Η ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων του μετασχηματισμού επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης μη γραμμικής ελαχιστοτετραγωνικής επίλυσης. Τελικά ο τριγωνισμός χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των θέσεων των σημείων και σταδιακά ανακατασκευάζει τη γεωμετρία της λήψης, σε ένα σχετικό σύστημα συντεταγμένων. Η πλήρης αυτοματοποίηση της όλης διαδικασίας από την εξαγωγή των σημείων κλειδιών στην ακριβή ανακατασκευή της γεωμετρίας της λήψης είναι ένα ξεκάθαρο πλεονέκτημα της μεθόδου σε σχέση με τη παραδοσιακή προσέγγιση της ψηφιακής φωτογραμμετρίας. Το πακέτο προσαρμογής της δέσμης που χρησιμοποιείται παράγει ένα αραιό νέφος σημείων. Μια βελτιωμένη πυκνότητα νεφών μπορεί να γίνει με την εφαρμογή των αλγορίθμων Clustering View for Multi-view Stereo (CMVS) και των Patch-based Multi-view Stereo (PMVS2). Εδώ μπορούν οι θέσεις της κάμερα που δίνονται από το Bundler να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εισαγωγή. Ο CMVS στη συνέχεια αποσυνθέτει την επικάλυψη

των εισαχθέντων εικόνων σε υποσύνολα ή συμπλέγματα διαχειρίσιμου πλέον μεγέθους, ενώ ο PMVS2 χρησιμοποιείται ανεξάρτητα για την ανακατασκευή της τρισδιάστατης πληροφορίας από τα ανεξάρτητα αυτά συμπλέγματα. Το αποτέλεσμα αυτής της επιπρόσθετης επεξεργασίας δίνει μεγάλη αύξηση στη πυκνότητα των νεφών σημείων.

Μετά-Επεξεργασία και Δημιουργία Μοντέλου

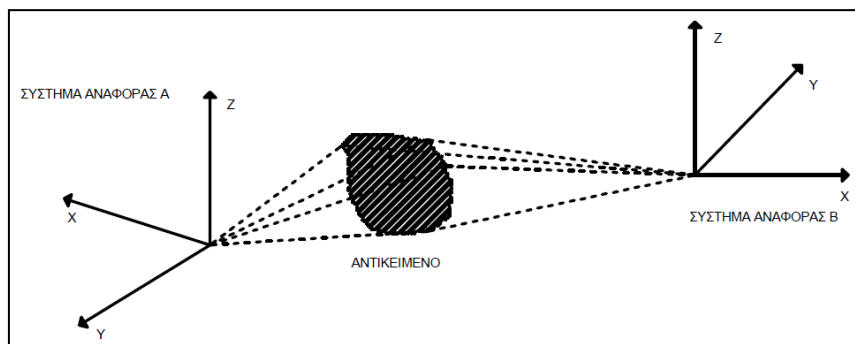
Ο μετασχηματισμός από ένα σχετικό σε ένα απόλυτο σύστημα συντεταγμένων επιτυγχάνεται μέσω χειροκίνητης ταυτοποίησης των σημείων ελέγχου στο έδαφος που βρίσκονται στο νέφος σημείων. Εδώ χρησιμοποιείται ο μετασχηματισμός ομοιότητας αναλυόμενος σε ένα πίνακα στροφής, ένα πίνακα μεταθέσεων και ένα συντελεστή κλίμακας. Μία λύση για τους επτά αγνώστους απαιτεί τουλάχιστον τρεις συνταυτισμένες εικόνες και συντεταγμένες στο χώρο του αντικειμένου. Οι στόχοι τοποθετούνται έτσι ώστε να προσφέρουν μέγιστη ορατότητα και βρίσκονται σε αντίθεση όσο το δυνατόν περισσότερο με τον περίγυρο για να ενισχύσουν τη θέση τους στο τελικό νέφος σημείων πριν μετασχηματιστούν τα δεδομένα. Σημαντικές ακραίες τιμές και είδωλα, δηλαδή εσφαλμένες κορυφές και κοιλότητες που προέρχεται από τις αναντιστοιχίες του περιγραφέα για τα σημεία κλειδιά και κάθε άσκοπη ανακατασκευή γύρω τοπογραφία αφαιρούνται με το χέρι σε αυτό το στάδιο. Τα τρισδιάστατα νέφη σημείων που δημιουργούνται με τη χρήση του SfM μπορεί, εξαρτώμενα από το σετ των εικόνων, να είναι υπερβολικά πυκνά, πιθανά ενσωματώνοντας πάνω από 103 σημεία ανά τετραγωνικό μέτρο. Παρ' όλα αυτά σε εξάρτηση με την τελική εφαρμογή μείωση της πληροφορίας μπορεί να μην είναι απαραίτητη και επιθυμητή, βέβαια τα συμβατικά λογισμικά GIS δεν προσφέρονται για τη διαχείριση της απεικόνισης και αποθήκευσης πυκνών σημειακών δεδομένων, τα οποία μπορεί να προεκτείνονται σε δεκάδες ή εκατοντάδες χιλιάδες παρατηρήσεις. (Westoby et al., 2012).

2.2.3 Συμπεράσματα μεθόδου SfM

Παρουσιάστηκε παραπάνω μία ελπιδοφόρα χαμηλού κόστους προσέγγιση για την απόκτηση υψηλής ακρίβειας χωρικών δεδομένων κατάλληλων για τη δημιουργία μοντέλων. Η φύση της μεθόδου αποκλείει την ανάγκη για χειροκίνητη συνταύτιση. Αντί αυτού εφαρμόζει αυτόματες μεθόδους εκτίμησης για την εύρεση της τρισδιάστατης θέσης της μηχανής και τη γεωμετρία της σκηνής. Αυτό είναι ένα εξαιρετικό πλεονέκτημα της τεχνικής έναντι της τυπικής ψηφιακής φωτογραμμετρίας. Βέβαια όσο το πρώτο προϊόν της τεχνικής είναι σε σχετικό σύστημα συντεταγμένων πρέπει να δαπανάται χρόνος και προσοχή για την ίδρυση δικτύου σημείων στο έδαφος για την επίτευξη του μετασχηματισμού στο απόλυτο σύστημα αναφοράς και την εξαγωγή μετρητικής πληροφορίας.

3 ΣΥΝΕΝΩΣΗ ΝΕΦΩΝ ΣΑΡΩΣΕΩΝ

Η συνένωση των νεφών είναι ένα αναπόφευκτο στάδιο κατά τη διαδικασία της τρισδιάστατης ανακατασκευής. Η κάθε θέση σάρωσης παράγει ένα νέφος σημείων στο ανεξάρτητο σύστημα αναφοράς του σαρωτή κάθε φορά, το οποίο πρέπει να μετασχηματιστεί σε ένα ενιαίο σύστημα αναφοράς μέσω της συνένωσης νεφών. Ο καθορισμός αυτός της σχέσης μεταξύ δύο διαφορετικών τρισδιάστατων συστημάτων συντεταγμένων μέσω της χρήσης αντίστοιχων στοιχείων, τα οποία προέρχονται από μετρήσεις, αποτελεί το λεγόμενο ως απόλυτο πρόβλημα προσανατολισμού. Οι εφαρμογές όπου εντοπίζεται το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι ποικίλες και αφορούν διαφορετικούς τομείς της επιστήμης. Οι εφαρμογές αυτές εντοπίζονται κυρίως στη περιοχή της Φωτογραμμετρίας όπου και θεωρείται ως δομικό εργαλείο. Ακόμα εφαρμόζει στη περιοχή της Ρομποτικής και συγκεκριμένα στη δημιουργία πραγματικών μοντέλων (world models), στην ανάλυση της κίνησης αντικειμένων, στην συσχέτιση ενός συστήματος συντεταγμένων μιας κάμερας με άλλα (the hand-eye transform) και τέλος στην εκτίμηση της θέσης και προσανατολισμού ενός αναγνωρισμένου αντικειμένου (pose estimation) (Eggert et. al., 1997).

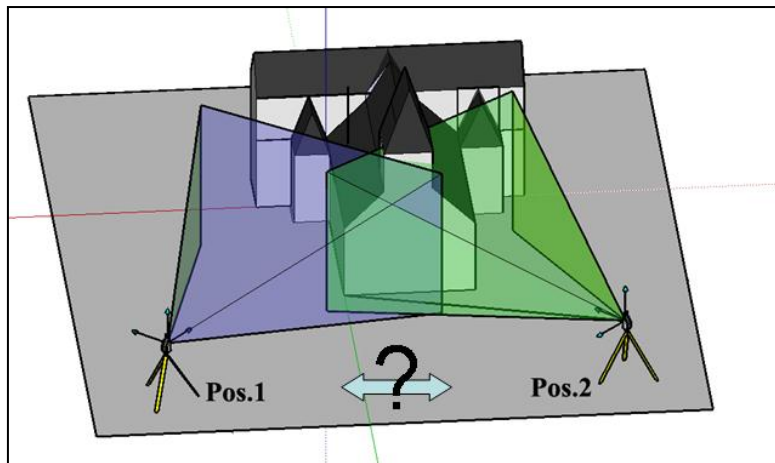


Εικόνα 3.1 Δύο Διαφορετικά Τρισδιάστατα Συστήματα Συντεταγμένων

Μια έρευνα των Sabata και Aggarwal (1991) σχετικά με τις διάφορες μεθόδους υπολογισμού του τρισδιάστατου μετασχηματισμού του στερεού σώματος μεταξύ δύο σετ αντιστοίχων στοιχείων έδωσε μια λίστα με αρκετές διαφορετικές προσεγγίσεις. Οι μέθοδοι χωρίζονται με βάση τον τύπο του στοιχείου δηλαδή την γεωμετρία του (επιφάνεια, γραμμή ή σημείο) και τον τύπο της γενικής επίλυσης δηλαδή αν αναφέρεται σε επαναληπτικό (iterative) ή closed form. Τα πλέον κοινά και περισσότερο διαδομένα σε χρήση στοιχεία είναι τα σημειακά. Ο δεύτερος τύπος επίλυσης θεωρείται γενικά καλύτερος από τον πρώτο επαναληπτικό τύπο, σε σχέση με την αποτελεσματικότητα και την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι απλό διότι η επαναληπτική μορφή λύσης του προβλήματος έχει να αντιμετωπίσει περιπτώσεις μη σύγκλισης της λύσης, μένοντας παγιδευμένος σε τοπικά ελάχιστα λάθους συνάρτησης και απαιτώντας καλές αρχικές τιμές. (Moussa, 2014).

3.1 Συνένωση Νεφών Επίγειων Σαρώσεων

Η τεχνολογία των επίγειων σαρωτών laser παρέχει τη δυνατότητα μέτρησης και καταγραφής απευθείας τρισδιάστατων συντεταγμένων μεγάλου πλήθους σημείων (νέφος σημείων) σε σχετικά μικρό χρονικά διάστημα με σκοπό τη παραγωγή τρισδιάστατων μοντέλων αντικειμένων. Το αντικείμενο της σάρωσης συνήθως δεν μπορεί να σαρωθεί ολόκληρο από μια θέση. Για τον λόγο αυτό απαιτείται η σάρωση του από πολλαπλές θέσεις για τη συνολική του τελική ανακατασκευή και την αποφυγή περιοχών με αποκρύψεις.



Εικόνα 3.2 Συνένωση μεταξύ Δύο Θέσεων Σάρωσης
Πηγή: Santana Quintero et al., 2008

Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται ανεξάρτητα νέφη σημείων ευρισκόμενα κάθε φορά στο αυθαίρετο σύστημα αναφοράς του σαρωτή κατά τη σάρωση στην αντίστοιχη θέση. Για την ορθή αναπαράσταση του συνόλου των νεφών όλα αυτά τα τοπικά νέφη σημείων πρέπει να μετασχηματιστούν σε ένα ενιαίο σύστημα συντεταγμένων. Η διαδικασία αυτή αναφέρεται συνήθως ως συνένωση (registration, alignment). Η συνένωση νεφών σημείων του χώρου δηλαδή τρισδιάστατων νεφών (3D point cloud registration, 3D surface matching) αποτελεί τη συνολική διαδικασία και σειρά ενεργειών που ακολουθείται ώστε οι ανεξάρτητες σαρώσεις να ενταχθούν σε ένα ενιαίο – κοινό σύστημα αναφοράς. Το πρόβλημα αυτό, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, αντιμετωπίζεται και σε άλλους τομείς όπως στη Φωτογραμμετρία και δεν αποτελεί μόνο πρόβλημα των σαρώσεων νεφών σημείων. Οι μέθοδοι της συνένωσης χωρίζονται σε άμεσες και έμμεσες, το οποίο εξαρτάται από τον τρόπο επίλυσης που θα επιλεγεί. (Toldo et. al., 2010, Κυπαρίσση, 2011).

3.1.1 Άμεση Μέθοδος

Άμεση συνένωση σημαίνει πως η θέση και ο προσανατολισμός του σαρωτή, και κατά συνέπεια και του παραγόμενου νέφους, υπολογίζεται άμεσα. Η άμεση μέθοδος μπορεί να ονομαστεί αλλιώς και γεωαναφορά, όπου η θέση της στάσης και ο προσανατολισμός του οργάνου είναι γνωστά, γεγονός το οποίο επιτρέπει στο χρήστη να πραγματοποιήσει μετρήσεις κατευθείαν γεωαναφερμένες. Ο τρόπος απόκτησης της πληροφορίας για την γεωαναφορά ποικίλλει σε σχέση με τον εξοπλισμό και τις

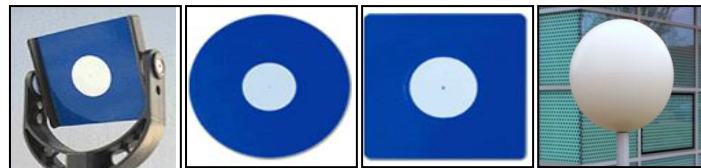
δυνατότητές του. Στην περίπτωση που ο σαρωτής είναι προσεκτικά κατακορυφωμένος καθώς το σύστημα είναι τρισδιάστατο, ο προσανατολισμός μπορεί να καθοριστεί με σάρωση μόνο ενός στόχου στην επόμενη στάση σάρωσης που θα βρεθεί ο σαρωτής. Οι σαρωτές ακόμα μπορεί να έχουν την δυνατότητα ακριβούς οριζοντίωσης (και κατά συνέπεια κατακορύφωσης) και μάλιστα με αυτόματη κατακορύφωση (dual axis compensation) όπως και πολλοί ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί έτσι ώστε να υπαγορεύει και τρίτο περιορισμό κατά την επίλυση στον προσανατολισμό της σάρωσης. Μερικές φορές ένας ειδικός ανακλαστήρας μπορεί και τοποθετείται στη κορυφή του σαρωτή στον κατακόρυφο άξονα περιστροφής του. Η ακριβής θέση του ανακλαστήρα σε σχέση με το κεντροειδές του πομπού του laser μπορεί να καθοριστεί μέσω μιας τυπικής διαδικασίας βαθμονόμησης. Αν η σχετική θέση αυτή γίνει γνωστή, ο ανακλαστήρας μπορεί να μετρηθεί με ένα γεωδαιτικό σταθμό όπως θα γινόταν κατά την ίδρυση και μέτρηση μιας ανοιχτής ή κλειστής όδευσης. Άλλοι τρόποι καθορισμού της θέσης του σαρωτή είναι με την τοποθέτηση ενός δέκτη GPS στον σαρωτή. Αυτή η μέθοδος μειώνει τον αριθμό των στόχων που τοποθετούνται και έτσι αποφεύγεται και η απαιτητική διαδικασία παραμετροποίησης των στόχων κατά τη διάρκεια της εργασίας. Η ακρίβεια όμως με την οποία δίνεται η θέση του σαρωτή από τον δέκτη GPS μέσω παρατηρήσεων με τη μέθοδο RTK (Real Time Kinematic) είναι της τάξης του 1 cm και στις τρεις διαστάσεις. Επίσης η θέση του όπισθεν στόχου μπορεί να καθοριστεί μέσω μετά-επεξεργασίας παρατηρήσεων από τον δέκτη GPS με τη στατική μέθοδο (static) με ακρίβεια επίσης της τάξης του 1 cm για τις τρεις διαστάσεις (Reshetyuk, 2009). Οι σαρώσεις σε αυτήν την περίπτωση δεν χρειάζονται αλληλοεπικάλυψη. Λαμβάνοντας όλα αυτά υπόψη η μέθοδος αυτή είναι συχνά πιο γρήγορη σε σχέση με τη χρήση της έμμεσης συνένωσης. Όταν απαιτείται γεωαναφορά η μετρημένη θέση του ανακλαστήρα μπορεί να μετασχηματιστεί σε συγκεκριμένο γνωστό σύστημα συντεταγμένων με χρήση κλασικών γενικών γεωδαιτικών τεχνικών. (Santana Quintero et al., 2008)

3.1.2 Έμμεση Μέθοδος

Η έμμεση μέθοδος απαιτεί την ύπαρξη και αναγνώριση στοιχείων συνταύτισης στα διαφορετικά τοπικά συστήματα συντεταγμένων. Η σχέση μεταξύ δύο συστημάτων σάρωσης δίνεται με ένα σύνολο έξι παραμέτρων προσανατολισμού, επομένως χρειάζονται τουλάχιστον 3 σημεία -ομόλογα στοιχεία- για μία επίλυση ή έστω 2 για προσεκτικά οριζοντιωμένα όργανα, γεγονός το οποίο βέβαια θα μπορούσε να δεσμεύσει αργότερ τις στροφές Ω και Φ . Σε κάθε περίπτωση θεωρείται απαραίτητο να υπάρχουν περισσότερες από τις ελάχιστες παρατηρήσεις για τον εντοπισμό σφαλμάτων του μετασχηματισμού. Εάν στις έμμεσες μεθόδους χρειάζεται γεωαναφορά τότε για να γίνει αυτό πρέπει οι στόχοι ή τα σημεία που θα χρησιμοποιηθούν για τη συνένωση να έχουν γνωστές συντεταγμένες στο επιθυμητό απόλυτο σύστημα γεωαναφοράς. Οι συντεταγμένες των παραπάνω στόχων ή των σημείων μπορούν εύκολα να γίνουν γνωστές με χρήση ενός γεωδαιτικού σταθμού.

Συνένωση “target-to-target”

Στις περισσότερες περιπτώσεις, και αν η πρόσβαση το επιτρέπει, έμμεση μέθοδος συνένωσης γίνεται με τη χρήση στόχων, σφαιρών ή τεχνητών προτύπων που αναγνωρίζονται από το όργανο σάρωσης και αποδίδουν υψηλής ακρίβειας μετρήσεις σε αυτά. Κάποια λογισμικά αυτού του είδους τη συνένωση την ονομάζουν “target-to-target” απλώς γιατί ταυτίζονται οι στόχοι ή την ονομάζουν “point-to-point” όταν ταυτίζουν φυσικά σημεία της σκηνής σάρωσης που βρίσκονται στο κάθε νέφος. Σε κάθε περίπτωση οι στόχοι, οι σφαίρες ή τα σημεία χρησιμοποιούνται για να υλοποιούν στο χώρο την αναγκαία πληροφορία που θα υποστηρίξει τον τρισδιάστατο μετασχηματισμό.



Εικόνα 3.3 Τεχνητοί Στόχοι και Σφαίρα
Πηγή: www.leica-geosystems.com, 2015

Τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται πρώτα με σφαίρες μετά με στόχους και τέλος με τυπωμένα πρότυπα ιδανικά καταναμημένα στο τρισδιάστατο χώρο, όπου αυτές οι γεωμετρίες αναγνωρίζονται και εξάγονται από τα ειδικά λογισμικά των συστημάτων σάρωσης (G.I.F.L.E., 2015). Η πιο συχνή πρακτική είναι η χρήση των στόχων του προμηθευτή του οργάνου και τη σάρωση αυτών με τον σαρωτή, ο οποίος εντοπίζει αυτόματα τα κεντροειδή τους και δίνει τις συντεταγμένες τους στο τελικό αρχείο εργασίας.

Συνένωση “cloud-to-cloud”

Ένας άλλος τρόπος συνένωσης δύο νεφών σημείων είναι με τη χρήση της επικάλυψης των νεφών. Αν τα δύο νέφη έχουν αρκετή επικάλυψη της τάξης του 30-40 % τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος ICP για τη συνένωση των σετ των δεδομένων (Santana Quintero et al., 2008). Η τεχνική αυτή απαιτεί από το χρήστη να επιλέξει χειροκίνητα τουλάχιστον τρία ομόλογα σημεία στα προς συνένωση νέφη σημείων. Εφόσον τα σημεία αυτά ποτέ δεν θα είναι ακριβώς τα ίδια ο αλγόριθμος επαναληπτικά ελέγχει την απόσταση μεταξύ όλων των σημείων των νεφών και εκτιμά τον μετασχηματισμό έτσι ώστε να συνενώσει τα σύνολα των δεδομένων με το μικρότερο σφάλμα. Οι κανόνες που περιγράφηκαν παραπάνω για την έμμεση μέθοδο ισχύουν και για τη χρήση της επικάλυψης των νεφών. Η χρήση της μεθόδου χρειάζεται προσοχή καθώς όταν σαρώνονται γραμμικές κατασκευές μεγάλου μήκους και χρειάζονται πολλές στάσεις τα μικρά σφάλματα σε κάθε ζεύγος συνένωσης μπορεί να οδηγήσουν σε μεγάλα καθολικά σφάλματα.

Συνένωση “surface-to-surface”

Ακόμα υπάρχουν οι τρόποι συνένωσης “surface-to-surface” όπου το 2006 ο Gruen δημοσίευσε τη νέα αυτή τεχνική συνένωσης νεφών μέσω της συνταύτισης των γεωμετρικών επιφανειών των δύο σαρώσεων. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος εκτιμά τις Ευκλείδειες αποστάσεις μεταξύ παραθύρων (patches) των επιφανειών με τη χρήση

ελαχίστων τετραγώνων και προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει την απόσταση επαναληπτικά με νέες αρχικές τιμές κάθε φορά. Η μέθοδος αυτή προσφέρει μεγάλη ευελιξία για οποιαδήποτε τρισδιάστατη συνταύτιση μιας επιφάνειας με άλλη, όπως και στατιστικά εργαλεία για την ανάλυση της ποιότητας του τελικού προϊόντος. Η συνένωση επιφανειών είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν οι σαρώσεις εμπεριέχουν σημαντικές ποσότητες θορύβου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι καλύτερο πρώτα οι ξεχωριστές σαρώσεις να καθαριστούν και να εναρμονιστούν έτσι ώστε να γίνει η κατάλληλη επεξεργασία με τις απαραίτητες ρυθμίσεις. Όταν όλες οι σαρώσεις μετασχηματιστούν σε επιφάνειες μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος. (Santana Quintero et al., 2008, Moussa, 2014)

Συνένωση με Χρήση Εικόνων

Πρόσφατες ερευνητικές προσπάθειες δείχνουν πως διακριτά ομόλογα στοιχεία μεταξύ των σαρώσεων μπορούν επίσης να εξαχθούν αυτόματα από τα δεδομένα σάρωσης με τη χρήση εικόνων που παρέχονται ταυτόχρονα με το νέφος σημείων από μηχανή πάνω στο σαρωτή ή χρήση εικόνων που παράγονται από την ένταση της αντανάκλασης της ακτινοβολίας των τρισδιάστατων δεδομένων (εικόνες έντασης). Η μέθοδος αυτή συνδυάζει την τρισδιάστατη πληροφορία των δεδομένων σάρωσης με την δισδιάστατη εικόνα χωρίς την απαίτηση για αρχικές τιμές της σχετικής θέσης των νεφών προς συνένωση. Τα αντίστοιχα στοιχεία μπορούν και εντοπίζονται με αρκετούς διαφορετικούς τρόπους.

Οι κυριότεροι τρόποι περιγραφικά είναι οι ακόλουθοι ξεκινώντας από τη τεχνική του Roth (1999), η οποία αποτελεί μια πλήρως αυτοματοποιημένη μέθοδος. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί τις εικόνες έντασης και ενδείκνυται για την διαχείριση συμμετρικών αντικειμένων. Οι εικόνες έντασης διαφέρουν από τις κλασικές εικόνες αφού στην ουσία αναπαριστούν την ένταση της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας laser και καταγράφονται στις συχνότητες του σαρωτή, συνεπώς δεν απαιτείται η χρήση φωτογραφικής μηχανής κατά τη σάρωση. Στη συνέχεια, ακολουθεί μία ακόμα εικονιστική αυτοματοποιημένη μέθοδο. Σε αυτή τη μέθοδο γίνεται συνένωση τμημάτων του αντικειμένου που έχουν προκύψει από σαρωτή δομημένου φωτός με απόδοση της πραγματικής υφής του (textured model). Ουσιαστικά πρόκειται για μια μέθοδο, η οποία βασίζεται στην εύρεση ομόλογων επιφανειών πάνω στις εικόνες (Van Gool et. al., 2002, Κυπαρίσση, 2011). Μετά παρουσιάζεται μία μέθοδος που βασίζεται στη δημιουργία εικόνων spin με πραγματική υφή (texture spin images, TSI). Στο συγκεκριμένο σημείο κρίθηκε σκόπιμη η αναφορά του ορισμού των εικόνων spin για καλύτερη κατανόηση της μεθόδου. Η δημιουργία αυτών των εικόνων γίνεται βάσει του ορισμού προσανατολισμένων σημείων (oriented points) πάνω στην επιφάνεια ή το αντικείμενο. Τα προσανατολισμένα αυτά σημεία προσδιορίζονται από τη θέση τους \mathbf{p} στην επιφάνεια και από το κάθετο στην επιφάνεια διάνυσμα \mathbf{n} στη συγκεκριμένη θέση. Με αυτό τον τρόπο κάθε προσανατολισμένο σημείο ορίζει ένα τοπικό σύστημα αναφοράς μέσω του κάθετου επιπέδου στο διάνυσμα \mathbf{n} που δημιουργείται και εφάπτεται στην επιφάνεια. Έτσι, κάθε σημείο του νέφους \mathbf{x}_i μπορεί να περιγραφεί από τις συντεταγμένες του στο τοπικό σύστημα αναφοράς που αναφέρθηκε. Συγκεκριμένα ορίζονται δύο συντεταγμένες (\mathbf{a} , $\mathbf{\beta}$) όπου \mathbf{a} , είναι η

κάθετη απόσταση του σημείου \mathbf{x}_i από το διάνυσμα \mathbf{n} και β η κάθετη απόσταση του \mathbf{x}_i από το εφαπτόμενο επίπεδο. Παράλληλα σε κάθε σημείο του νέφους αντιστοιχεί και μία τιμή χρώματος $I(x_i)$ από την εικόνα (texture map). Για τη δημιουργία των εικόνων TSI, η συνάρτηση χρώματος διαιρείται σε ίσα διαστήματα τόνων του γκρι l_j , $j=1,2,\dots,L$. Άρα τελικά κάθε ένα σημείο περιγράφεται από μία τριάδα συντεταγμένων (α, β, l_j) , όπως φαίνεται και παρακάτω:

$$TSI(x) \Rightarrow (\alpha, \beta, l_j) = (\sqrt{\|x - p\|^2 - (n(x - p))^2}, n(x - p), l_j) \quad \text{Εξίσωση 3.1.}$$

Οι εικόνες TSI συνιστούν ένα μετασχηματισμό από 3-D σε 2-D, ο οποίος καταφέρνει και περιγράφει το σχήμα και το χρώμα τρισδιάστατων επιφανειών ως εικόνες δύο διαστάσεων. Οι παραπάνω εικόνες δημιουργούνται από τα συνολικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας χωρίς να εξαρτάται από τη θέση και της στροφή αυτής στο χώρο. Επομένως, οι εικόνες TSI έχουν την ιδιότητα να μην επιδέχονται μεταβολές στην εφαρμογή μετασχηματισμών στερεού σώματος με αποτέλεσμα τα ομόλογα σημεία στα δύο νέφη να έχουν, αν όχι ταυτόσημες, αλλά σίγουρα παρόμοιες εικόνες TSI. Συνεπώς, η διαδικασία της συνένωσης βασίζεται στην εύρεση ομόλογων σημείων, αναζητώντας τις πιο όμοιες εικόνες TSI στα δύο νέφη (Johnson, 1997, Κυπαρίσση, 2011). 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 αλγόριθμου του ICP. Ο Sagawa (2007) παρουσίασε μία εναλλακτική μέθοδο συνένωσης νεφών, τα οποία νέφη έχουν αποκτηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να συνοδεύονται από ένα χάρτη της αντίστοιχης απεικόνισης υφής (texture map). Η μέθοδος αυτή βασίζεται ουσιαστικά στον υπολογισμό χαρακτηριστικών σχήματος και χρώματος για κάθε ένα σημείο του τρισδιάστατου νέφους και κατόπιν στον εντοπισμό ομόλογων σημείων με βάση τα παραπάνω χαρακτηριστικά, έτσι ώστε να υπολογιστούν οι παράμετροι του γεωμετρικού μετασχηματισμού. Τέλος, μία ακόμα εικονιστική μέθοδος συνένωσης βασίστηκε στην εξαγωγή χαρακτηριστικών περιοχών στις εικόνες, που διατηρούνται αναλλοίωτες σε μεταβολές του σημείου λήψης. Οι χαρακτηριστικές αυτές περιοχές ονομάζονται V.I.P. (Viewpoint Invariant Patches) και η πληροφορία που περιέχει το διάνυσμα των ιδιοτήτων τους δίνει την δυνατότητα για τον υπολογισμό του τρισδιάστατου μετασχηματισμού από μία και μόνο ομολογία. Η εφαρμογή κι αυτής της μεθόδου απαιτεί νέφη σημείων στα οποία έχει αποδοθεί υφή από εικόνες (textured models) όπως και στις πηγούμενες τεχνικές. (Wu et al., 2008, Κυπαρίσση, 2011). Παρόλο που η παραπάνω περιγραφή ήταν αρκετά συνοπτική, εύκολα αντιλαμβάνεται κανείς πως οι μέθοδοι με χρήση εικόνων παρουσιάζουν αρκετές διαφοροποιήσεις μεταξύ τους και δεν λειτουργούν βάσει μίας κοινής μεθοδολογικής προσέγγισης. Αιτία αποτελεί το γεγονός πως αυτές οι μέθοδοι εμφανίστηκαν τα τελευταία χρόνια με αποτέλεσμα να αποτελούν ενεργό ερευνητικό αντικείμενο με πολλές ευκαιρίες ανάπτυξης και βελτίωσης των ήδη υπάρχουσών τεχνικών. (Κυπαρίσση, 2011, Moussa, 2014).

3.1.3 Σύστημα συντεταγμένων επίγειου σαρωτή

Οι τρισδιάστατοι σαρωτές είναι όργανα των οποίων η λειτουργία μέτρησης στηρίζεται στις πολικές συντεταγμένες. Ο σαρωτής σε κάθε στάση οργάνου μέσω των μετρήσεών του παράγει ένα νέφος σημείων. Τα σημεία του νέφους όμως βρίσκονται στο σύστημα αναφοράς του σαρωτή, το οποίο έχει ως αρχή το σημείο που παράγεται

η ακτίνα laser του σαρωτή. Οι βασικές παρατηρήσεις της παραπάνω διαδικασίας, δηλαδή της σάρωσης, είναι οι καρτεσιανές συντεταγμένες (x, y, z) που προκύπτουν ως αποτέλεσμα της επεξεργασίας των πρωτογενών παρατηρήσεων από το λογισμικό του σαρωτή. Η επεξεργασία αυτή διευκολύνει το μαθηματικό μέρος που απαιτεί ο μετασχηματισμός των επιμέρους νεφών σε ενιαίο σύστημα είτε τοπικό είτε απόλυτο (γεωαναφορά). (Τσακίρη, 2005, Σκουρή, 2010).

3.2 Συνένωση Νεφών Εναέριων Σαρώσεων

Τα συστήματα LiDAR προσφέρουν τρισδιάστατα σημεία νεφών με αυξανόμενη ακρίβεια και πιστότητα όπως αναφέρθηκε. Όταν μια περιοχή ενδιαφέροντος σαρώνεται δύο ή περισσότερες φορές ανάλογα με την εφαρμογή προκύπτει το πρόβλημα της συνένωσης. Για τις αερομεταφερόμενες ή κινητές πλατφόρμες, η χρήση ενός υβριδικού συστήματος INS και GNSS συστήματος γεωαναφοράς είναι η λύση. Πιο συγκεκριμένα ο κινητός σαρωτής LiDAR αποτελείται από αρκετά δευτερεύοντα υποσυστήματα, τα οποία βρίσκονται μαζί με το σαρωτή στην πλατφόρμα σαρώσεων είτε είναι αεροσκάφος, είτε ελικόπτερο είτε UAV κ.ά. Τα υποσυστήματα αυτά έχουν πολύ σημαντικές λειτουργίες για την τελική παραγωγή του ενιαίου νέφους σημείων από τις διαδοχικές μετρήσεις της διαδικασίας της σάρωσης. Η συγκεκριμένη διασύνδεση και η γενικότερη ιδέα της έλαβε μεγάλες διαστάσεις από τη δεκαετία του '90, όταν και άρχισαν να παρέχονται οι νέες για την εποχή και μεγάλες δυνατότητες προσδιορισμού της θέσης κινούμενων πλατφορμών με τη χρήση του GPS. Το σύστημα GPS γενικότερα αποτελείται από μια μονάδα δορυφορικού προσδιορισμού θέσης (Global Navigation Satellite System ή GNSS) και τον αντίστοιχο σταθμό εδάφους, με τη βοήθεια των οποίων υπολογίζεται με διαφορεική επίλυση η θέση του σαρωτή ως προς το εκάστοτε χρησιμοποιούμενο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς του συστήματος. Παραπάνω αναφέρθηκε και η ύπαρξη ενός αδρανειακού συστήματος πλοήγησης (Inertial Navigation System ή INS) με το οποίο υπολογίζονται οι στροφές του σαρωτή ως προς τις τρεις διευθύνσεις κατά την πτήση. Το INS μαζί με το σύστημα GNSS αναφέρονται ως σύστημα θέσης και προσανατολισμού (POS) του κινούμενου συστήματος. Ο σαρωτής LiDAR ουσιαστικά μέσω της διαδικασίας της σάρωσης συγκεντρώνει μετρήσεις αποστάσεων που πραγματοποιούνται υπό συγκεκριμένη γωνία κάθε χρονική στιγμή. Τα πρωτογενή αυτά δεδομένα αποτελούν ζεύγη πολικών συντεταγμένων δηλαδή μία γωνία και μία απόσταση για κάθε σημείο, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια προκειμένου να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες των μετρούμενων σημείων που ενδιαφέρουν, αναφερόμενα σε κάποιο σύστημα αναφοράς. Για να γίνει αυτό εφικτό τελικά, απαιτείται η πραγματοποίηση μιας μαθηματικής επίλυσης, η οποία προϋποθέτει όμως την γνώση της τρισδιάστατης θέσης (X_0, Y_0, Z_0) του σαρωτή ως προς το επιλεγμένο προς χρήση σύστημα αναφοράς κάθε φορά, κατά την χρονική στιγμή της κάθε μέτρησης των σημείων που πρόκειται να υπολογιστούν, καθώς και του αντίστοιχου προσανατολισμού του, δηλαδή τις στροφές Ω , Φ , K που παρουσιάζει ως προς τους άξονες X , Y , Z του συστήματος αντίστοιχα. (Gressin et. al. 2012, Φράγκος, 2013).

3.3 Μετασχηματισμοί Συντεταγμένων

Ο μετασχηματισμός συντεταγμένων είναι μια μαθηματική διαδικασία, η οποία μετασχηματίζει τις συντεταγμένες ενός σημείου από ένα σύστημα συντεταγμένων στις συντεταγμένες του ίδιου σημείου σε ένα δεύτερο σύστημα συντεταγμένων. Οι μετασχηματισμοί συντεταγμένων από ένα δισδιάστατο (2D) ή τρισδιάστατο (3D) σύστημα σε ένα άλλο δισδιάστατο (2D) ή τρισδιάστατο (3D) σύστημα συντεταγμένων αντίστοιχα είναι μια διαδικασία ιδιαίτερα χρήσιμη στο πεδίο της Φωτογραμμετρίας καθώς είναι ένα σημαντικό μέρος της θεωρίας και της πρακτικής της, αλλά και γενικότερα στις περισσότερες εργασίες του Τοπογράφου Μηχανικού, όπου συναντάται τέτοιου είδους ανάγκη όπως στη Γεωδαισία και τη Τοπογραφία. Οι μετασχηματισμοί μπορούν να χαρακτηριστούν ως δομικά εργαλεία της Φωτογραμμετρίας και γενικότερα του επιστημονικού αντικείμενου του Τοπογράφου Μηχανικού, είναι επομένως βασικοί για όλες τις διαδικασίες τόσο τις αναλυτικές και όσο και τις πλέον σύγχρονες ψηφιακές. Σε γενικές γραμμές, το αποτέλεσμα ενός μετασχηματισμού σε δισδιάστατο (2D) ή τρισδιάστατο (3D) αντικείμενο μπορεί να ποικίλλει από μια απλή αλλαγή της θέσης και του προσανατολισμού, χωρίς αλλαγή στο σχήμα ή το μέγεθος, μέχρι ένα συντελεστή ενιαίας κλίμακας (δεν υπάρχει αλλαγή στο σχήμα), ή μέχρι και σε αλλαγές στο σχήμα και το μέγεθος. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αρχικά οι απλές μαθηματικές αρχές των μετασχηματισμών στον τρισδιάστατο χώρο, έπειτα η γενικότερη μορφή του τρισδιάστατου μετασχηματισμού ομοιότητας και τέλος η ειδική περίπτωση του, αυτή του τρισδιάστατου μετασχηματισμού στερεού σώματος που ενδιαφέρει ιδιαίτερος την παρούσα εργασία, καθώς αποτελεί τη μαθηματική περιγραφή του μοντέλου της συνένωσης των νεφών σημείων. (Πατιάς, 1991; Καρράς, 1998).

3.3.1 Βασικές Μαθηματικές Αρχές

Πρόκειται να αναφερθούν σε πρώτη φάση οι απλές μαθηματικές αρχές που συνθέτουν τους μετασχηματισμούς στον τρισδιάστατο χώρο που ενδιαφέρουν την παρούσα εργασία, συγκεκριμένα ακολουθούν η μετάθεση, η στροφή και τέλος η αλλαγή της κλίμακας.

Μετάθεση

Όταν οι συντεταγμένες της αρχής του ενός τρισσορθογώνιου συστήματος ως προς τις αντίστοιχες συντεταγμένες αρχής ενός δεύτερου τρισσορθογώνιου συστήματος είναι μετατοπισμένες κατά X_0 , Y_0 , Z_0 , τότε ένα τυχαίο σημείο A με συντεταγμένες (x_1, y_1, z_1) στο πρώτο σύστημα θα έχει στο δεύτερο σύστημα συντεταγμένες που προκύπτουν από τις παρακάτω σχέσεις:

$$x_2 = x_1 + X_0 \quad \text{Εξίσωση 3.2.}$$

$$y_2 = y_1 + Y_0 \quad \text{Εξίσωση 3.3.}$$

$$z_2 = z_1 + Z_0 \quad \text{Εξίσωση 3.4.}$$

Στροφή - Πίνακας \mathbf{R}

Δύο τυπικά τρισσορθογώνια συστήματα στο χώρο συνδέονται συνήθως μεταξύ τους με τρεις στροφές και τρεις μεταθέσεις. Οι στροφές στο πεδίο της Φωτογραμμετρίας συνήθως ονομάζονται $\mathbf{\Omega}$, $\mathbf{\Phi}$, \mathbf{K} , και αναφέρονται σε στροφές περί τους άξονες \mathbf{X} , \mathbf{Y} , \mathbf{Z} αντίστοιχα. Ο πίνακας στροφής \mathbf{R} που θα παρουσιαστεί ουσιαστικά συνδέει τα δύο συστήματα περιγράφοντας τη σχέση μεταξύ τους, δηλαδή τις στροφές που πρέπει να υποστεί το δεύτερο σύστημα έτσι ώστε να γίνει παράλληλο με το πρώτο. Ο πίνακας $\mathbf{R}_{\Omega\Phi K}$ μπορεί να αναλυθεί σε τρεις υποπίνακες, τους \mathbf{R}_{Ω} , \mathbf{R}_{Φ} , \mathbf{R}_K . Ακόμα, καθώς ο πίνακας στροφής \mathbf{R} είναι ορθογώνιος πίνακας, δηλαδή ένας τετραγωνικός πίνακας με πραγματικά στοιχεία του οποίου οι στήλες και οι σειρές είναι μοναδιαία ορθογώνια διανύσματα (δηλ., ορθοκανονικά διανύσματα), ισχύει:

$$\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{R}^T = \mathbf{R}_{(-\Omega)}\mathbf{R}_{(-\Phi)}\mathbf{R}_{(-K)} \quad \text{Εξίσωση 3.5.}$$

Οι παραπάνω πίνακες δεν έχουν αντιμεταθετική ιδιότητα με αποτέλεσμα ο πίνακας \mathbf{R} να προκύπτει με πολλαπλασιασμό των επιμέρους πινάκων με συγκεκριμένη σειρά, η οποία κατά την συνηθέστερη φωτογραμμετρική σύμβαση είναι:

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

$$= \begin{bmatrix} \cos \Phi \cos K & \cos \Omega \sin K + \sin \Omega \sin \Phi \cos K & \sin \Omega \sin K - \cos \Omega \sin \Phi \cos K \\ -\cos \Phi \sin K & \cos \Omega \cos K - \sin \Omega \sin \Phi \sin K & \sin \Omega \cos K + \cos \Omega \sin \Phi \sin K \\ \sin \Phi & -\sin \Omega \cos \Phi & \cos \Omega \cos \Phi \end{bmatrix}$$

Εξίσωση 3.6.

Αλλαγή Κλίμακας

Έστω δύο σημεία \mathbf{A} και \mathbf{B} που έχουν γνωστές συντεταγμένες στα δύο συστήματα. Όταν ισχύει για τις αποστάσεις $S_{AB1} = S_{AB2}$ τότε τα δύο συστήματα έχουν την ίδια κλίμακα, όταν όμως τα παραπάνω δεν είναι ίσα τότε τα συστήματα δεν έχουν την ίδια κλίμακα και πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας συντελεστής κλίμακας \mathbf{m} (κλίμακα μεγέθυνσης/σμίκρυνσης) που ορίζεται από τον λόγο ενός μήκους στο δεύτερο σύστημα προς το αντίστοιχο στο πρώτο σύστημα, δηλαδή:

$$\mathbf{m} = \frac{S_{AB2}}{S_{AB1}} \quad \text{Εξίσωση 3.7.}$$

Οπότε προκύπτει αντίστοιχα όπως παραπάνω για τις συντεταγμένες του δεύτερου συστήματος:

$$x_2 = \mathbf{m}x_1 \quad \text{Εξίσωση 3.8.}$$

$$y_2 = \mathbf{m}y_1 \quad \text{Εξίσωση 3.9.}$$

$$z_2 = \mathbf{m}z_1 \quad \text{Εξίσωση 3.10.}$$

3.3.2 Τρισδιάστατος Μετασχηματισμός Στερεού Σώματος

Ο προσδιορισμός της σχετικής θέσης δύο νεφών σημείων περιγράφεται μέσω του μαθηματικού μοντέλου του τρισδιάστατου μετασχηματισμού στερεού σώματος (3D rigid body transformation). Από την σύρωση του αντικειμένου σε δύο διαφορετικές θέσεις προκύπτουν δύο νέφη σημείων, κάθε ένα από τα οποία θεωρείται ως στερεό σώμα, δεδομένου ότι μετά τον μετασχηματισμό αυτά δεν μεταβάλλονται κατά σχήμα και μέγεθος. (Κυπαρίσση, 2011). Οι μετασχηματισμοί που ενδιαφέρουν την παρούσα εργασία αναφέρονται αποκλειστικά σε σχέσεις μεταξύ σημείων. Έτσι μπορεί να ειπωθεί πως οι συντεταγμένες των σημείων του ενός συστήματος μπορούν να εκφραστούν στο άλλο σύστημα μέσω γραμμικών συναρτήσεων με τους κατάλληλους συντελεστές, μέσω των οποίων περιγράφεται η σχέση γεωμετρική – αλγεβρική μεταξύ των δύο συστημάτων. Οι ευθείες γραμμές μετά το μετασχηματισμό τους συνεχίζουν να είναι ευθείες γεγονός που δηλώνει την γραμμική υπόσταση των μετασχηματισμών. Το αποτέλεσμα που προκύπτει κάθε φορά εξαρτάται άμεσα από το είδος του μετασχηματισμού και για αυτό το λόγο μπορεί να διαφέρει, ενδεχομένως το αποτέλεσμα μπορεί να είναι μεταβολή του προσανατολισμού ή/και της θέσης των στοιχείων που έχουν προέλθει από μετρήσεις. Στη συγκεκριμένη εργασία γίνεται ιδιαίτερη αναφορά σε σημεία και συγκεκριμένα σημειοσύνολα στα οποία δεν γίνεται κάποιος μετασχηματισμός με αποτέλεσμα την μεταβολή σχήματος ή μεγέθους. Το αποτέλεσμα ενός μετασχηματισμού μπορεί όπως αναφέρθηκε να διαφοροποιηθεί όπως και να υπάρξει ενιαία ή και διαφορετική σε κάθε άξονα μεταβολή του μεγέθους του αντικειμένου (μεταβολή κλίμακας χωρίς αλλοίωση των γωνιών τομής μεταξύ των μετασχηματισμένων ευθειών ή ακόμα και μεταβολή πλήρως του σχήματος του αντικειμένου με τη δυνατότητα διατήρησης ή μη των παραλληλίων μεταξύ ευθειών. (Κυπαρίσση, 2011; Καρράς, 1998). Γεωμετρικά το “στερεό σώμα” ορίζεται ως ένα τρισδιάστατο σημειοσύνολο \mathbf{XYZ} , το οποίο μετασχηματιζόμενο, δεν μεταβάλλεται κατά σχήμα και μέγεθος. (Καρράς, 1998). Υπό τον παραπάνω ορισμό το πρόβλημα της συνένωσης νεφών σημείων μπορεί να περιγραφεί με το μαθηματικό μοντέλο του τρισδιάστατου μετασχηματισμού στερεού σώματος. Έχοντας ένα τρισσορθογώνιο σύστημα με τους τρεις άξονες \mathbf{XYZ} , ο μετασχηματισμός προκύπτει πως διαθέτει έξι (6) βαθμούς ελευθερίας εκφραζόμενους από έξι (6) παραμέτρους, πιο συγκεκριμένα: τρεις συνιστώσες $\mathbf{X}_0, \mathbf{Y}_0, \mathbf{Z}_0$ του διανύσματος της μετάθεσης (\mathbf{t}) κατά τους τρεις (3) άξονες $\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}$ αντίστοιχα, τρεις (3) στροφές κατά τις γωνίες $\mathbf{\Omega}, \mathbf{\Phi}, \mathbf{K}$ περί τους ίδιους άξονες $\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}$ αντίστοιχα που στη συνέχεια συντελούν στη δημιουργία του πίνακα στροφής (\mathbf{R}). Θεωρητικά εάν $\overline{\mathbf{x}}_1$ το διάνυσμα ενός τυχαίου σημείου στο χώρο στο πρώτο σύστημα συντεταγμένων (1): $\mathbf{X}_1\mathbf{Y}_1\mathbf{Z}_1$ και $\overline{\mathbf{x}}_2$ το διάνυσμα του ίδιου σημείου στο χώρο όμως τώρα σε δεύτερο σύστημα συντεταγμένων (2): $\mathbf{X}_2\mathbf{Y}_2\mathbf{Z}_2$ με τα δύο συστήματα (1),(2) να διαφέρουν κατά στροφή και μετάθεση, ο παραπάνω μετασχηματισμός εκφράζεται τελικά με την παρακάτω εξίσωση:

$$\overline{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{R}(\overline{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{t}_1) \quad \text{ή} \quad \overline{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{R} \overline{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{t}_2 \quad \text{Εξίσωση 3.11.}$$

Στην πρώτη μορφή της παραπάνω εξίσωσης θεωρείται πως προηγείται η μετάθεση (\mathbf{t}_1) στο σύστημα (1): $\mathbf{X}_1\mathbf{Y}_1\mathbf{Z}_1$ και έπεται η στροφή για να ολοκληρωθεί ο

μετασχηματισμός, στη δεύτερη μορφή προηγείται η στροφή οπότε η μετάθεση (\mathbf{t}_2) γίνεται στη συνέχεια. Στα παραπάνω ισχύει προφανώς πως: $\mathbf{t}_2 = \mathbf{B} \mathbf{t}_1 \neq \mathbf{t}_1$, με αποτέλεσμα οι τρεις συνιστώσες της μετάθεσης (\mathbf{t}): $\mathbf{X}_0, \mathbf{Y}_0, \mathbf{Z}_0$ να μεταβάλλονται σε σχέση με την επιλογή της μορφής, ενώ σε αντίθεση ο πίνακας στροφής (\mathbf{R}) σε κάθε περίπτωση παραμένει αμετάβλητος. Τώρα σχετικά με τη μορφή του πίνακα στροφής, ο οποίος είναι ένας τετραγωνικός πίνακας καθώς αποτελείται από τον ίδιο αριθμό στηλών όσο και γραμμών δηλαδή είναι ένας 3×3 πίνακας, μεταβάλλεται σε σχέση με τη σειρά θεώρησης των τριών στροφών που πραγματοποιούνται. Συνηθέστερη παραδοχή όπως προαναφέρθηκε είναι η σειρά πρώτα η στροφή $\mathbf{\Omega}$, μετά η στροφή $\mathbf{\Phi}$ και τέλος η στροφή \mathbf{K} , δηλαδή $\mathbf{\Omega} - \mathbf{\Phi} - \mathbf{K}$. Το οποίο μπορεί να εκφραστεί και ως εξής:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_{(\mathbf{K})}\mathbf{R}_{(\mathbf{\Phi})}\mathbf{R}_{(\mathbf{\Omega})} \quad \text{Εξίσωση 3.12.}$$

Να σημειωθεί πως μεταξύ των δύο συστημάτων συντεταγμένων υπάρχει τέτοια αντιστοιχία ώστε σε κάθε σημείο του ενός συστήματος να αντιστοιχεί σε ένα και μόνο σημείο του άλλου συστήματος συντεταγμένων και αντίστροφα, δίνοντας το χαρακτηριστικό του αμφιμονοσήμαντου μετασχηματισμού (Καρράς, 1998). Σύμφωνα με τα παραπάνω και τις ιδιότητες του πίνακα στροφής η αντίστροφη σχέση μεταξύ των δύο συστημάτων μπορεί εύκολα να γραφεί ως:

$$\vec{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{R}^T \vec{\mathbf{x}}_2 - \mathbf{t}_1 \quad \text{ή} \quad \vec{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{R}^T (\vec{\mathbf{x}}_2 - \mathbf{t}_2) \quad \text{Εξίσωση 3.13.}$$

Ανεπτυγμένη η εξίσωση 3.12. θεωρώντας τα εννιά ($\mathbf{9}$) στοιχεία του πίνακα στροφής $r_{i,j}$ ($i,j= 1$ έως 3) ο μετασχηματισμός σε ισοδύναμες τριάδες εξισώσεων είναι της μορφής:

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 + X_{01} \\ Y_1 + Y_{01} \\ Z_1 + Z_{01} \end{bmatrix} \quad \text{ή} \quad \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{02} \\ Y_{02} \\ Z_{02} \end{bmatrix}$$

Εξίσωση 3.14.

Από την παραπάνω μορφή γίνεται αντιληπτό πως κάθε γνωστό σημείο και στα δυο συστήματα προσφέρει τρεις εξισώσεις, με αποτέλεσμα να χρειάζονται τουλάχιστον δύο σημεία για τον υπολογισμό των έξι συντελεστών του μετασχηματισμού που απαιτούνται. Παρ' όλ' αυτά δεν επαρκούν δύο σημεία για τον περαιτέρω υπολογισμό αλλά τρία σημεία κατ' ελάχιστο. Ο λόγος είναι πως με τη συμμετοχή στην επίλυση μόνο δύο σημείων παραμένει η στροφή περί την ευθεία που ορίζουν τα δύο σημεία που χρησιμοποιούνται, παραμένει δηλαδή ένας βαθμός ελευθερίας χωρίς δέσμευση (Κυπαρίσση, 2011). Οι εξισώσεις που σχηματίζονται κάθε φορά δεν είναι γραμμικές ως προς τις ζητούμενες παραμέτρους και πρέπει να γραμμικοποιηθούν και να ορισθούν για αυτές προσεγγιστικές τιμές.

Η γενική μορφή των τρισδιάστατων μετασχηματισμών είναι:

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{Εξίσωση 3.15.}$$

Στις παραμέτρους που προκύπτουν ενυπάρχουν και έξι (6) δεσμεύσεις οι οποίες αφήνουν τους έξι (6) βαθμούς ελευθερίας. Οι συνθήκες δέσμευσης προκύπτουν από την ίδια ιδιότητα της ορθογωνικότητας του ίδιου του πίνακα στροφής **B** και συγκεκριμένα ως εξής:

$$b_{11}^2 + b_{21}^2 + b_{31}^2 = 1 \quad b_{11}b_{12} + b_{21}b_{22} + b_{31}b_{32} = 0 \quad \text{Εξισώσεις 3.16.}$$

$$b_{12}^2 + b_{22}^2 + b_{32}^2 = 1 \quad b_{11}b_{13} + b_{21}b_{23} + b_{31}b_{33} = 0 \quad \text{Εξισώσεις 3.17.}$$

$$b_{13}^2 + b_{23}^2 + b_{33}^2 = 1 \quad b_{12}b_{12} + b_{22}b_{22} + b_{32}b_{32} = 0 \quad \text{Εξισώσεις 3.18.}$$

3.3.3 Τρισδιάστατος Μετασχηματισμός Ομοιότητας

Σε αυτό το σημείο θεωρείται σημαντικό να σημειωθεί πως τα δεδομένα της κάθε σάρωσης βρίσκονται σε πραγματική κλίμακα (1:1) με αποτέλεσμα το μέγεθος των αντικειμένων να διατηρείται σταθερό σε όλα τα νέφη. Η παραπάνω σημείωση δικαιολογεί απολύτως την επιλογή του μοντέλου του τρισδιάστατου μετασχηματισμού στερεού σώματος σε σχέση με την γενικότερη περίπτωση μαθηματικής περιγραφής του μοντέλου του τρισδιάστατου μετασχηματισμού ομοιότητας, που αναλύθηκε προηγουμένα. Στον παρακάτω μετασχηματισμό εμπεριέχεται και η ενιαία μεταβολή (μεγέθυνση ή σμίκρυνση) του μεγέθους του αντικειμένου και στις τρεις διαστάσεις πέρα από τις μεταθέσεις και τις στροφές ως προς του τρεις άξονες του συστήματος. Άρα και σε αυτόν τον μετασχηματισμό όπως και στο προηγούμενο διατηρείται το σχήμα των αντικειμένων (σύμμορφος). Ο μετασχηματισμός ομοιότητας εμπλέκει προφανώς 7 βαθμούς ελευθερίας, που εκφράζονται με τις εξής 7 παραμέτρους: 3 συνιστώσες **X₀**, **Y₀**, **Z₀** της μετάθεσης (**t**) κατά τους τρεις (3) άξονες **X**, **Y**, **Z** αντίστοιχα, τρεις (3) στροφές κατά τις γωνίες **Ω**, **Φ**, **K** περί τους ίδιους άξονες **X**, **Y**, **Z** αντίστοιχα που στη συνέχεια συντελούν στη δημιουργία του πίνακα στροφής (**R**), αλλά και τον συντελεστή ενιαίας κλίμακας (**m**). Η γενική μορφή της εξίσωσης του μετασχηματισμού προκύπτει:

$$\overline{\mathbf{x}}_2 = m\mathbf{R}\overline{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{t}_2 \quad \text{Εξίσωση 3.19.}$$

Σε ανεπτυγμένη μορφή είναι:

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = m \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{02} \\ Y_{02} \\ Z_{02} \end{bmatrix} \quad \text{Εξίσωση 3.20.}$$

Όπου οι όροι \mathbf{r}_{ij} είναι συναρτήσεις των τριών γωνιών στροφής και μπορούν να θεωρηθούν ως τα στοιχεία ενός πίνακα στροφής $\mathbf{R}(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\varphi}, \boldsymbol{\kappa})$. Το παραπάνω σύστημα είναι μη –γραμμικό ως προς τις άγνωστες παραμέτρους και για την επίλυση του πρέπει να γραμμικοποιηθεί κατά τα γνωστά με σειρά **Taylor**. Για την συνόρθωση των παρατηρήσεων με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων γίνεται με τον πίνακα σχεδιασμού \mathbf{A} κατά τον γνωστό τρόπο εμπεριέχοντας τις μερικές παραγώγους των σχέσεων ως προς τους αγνώστους $(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\varphi}, \boldsymbol{\kappa}, \mathbf{m}, \mathbf{X}_{02}, \mathbf{Y}_{02}, \mathbf{Z}_{02})$. Γενικά ο παρών μετασχηματισμός χρησιμοποιείται στη Φωτογραμμετρία στη επίλυση μπλοκ με την μέθοδο των ανεξάρτητων μοντέλων (Καρράς, 1998).

4 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΣΥΝΕΝΩΣΗΣ ΝΕΦΩΝ ΕΠΙΓΕΙΩΝ ΣΑΡΩΣΕΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά οι δύο κυριότεροι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται σήμερα. Στόχος είναι να αξιολογηθούν και να εκτιμηθούν οι καλύτερες τιμές των παραμέτρων του τρισδιάστατου μετασχηματισμού στερεού σώματος, ώστε να μετασχηματιστούν και να συνενωθούν τα δεδομένα των σαρώσεων σε ένα ενιαίο σύστημα συντεταγμένων με τα βέλτιστα αποτελέσματα. Αρχικά, παρουσιάζεται ο επαναληπτικός αλγόριθμος ICP, ο οποίος αναμφίβολα είναι και ο πιο διαδεδομένος, και στη συνέχεια έπεται η ελαχιστοτετραγωνική επίλυση. Οι αλγόριθμοι αυτοί αποτελούν και το κεντρικό αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας με στόχο την σύγκριση μεταξύ τους.

4.1 Ο Αλγόριθμος του Επαναληπτικά Εγγύτερου Σημείου

Ο αλγόριθμος του επαναληπτικά εγγύτερου σημείου χρησιμοποιείται για την εύρεση και εξαγωγή των παραμέτρων του μετασχηματισμού μεταξύ δύο συνόλων σημείων. Αυτά είναι το σημειοσύνολο αναφοράς και το δεύτερο προς μετασχηματισμό σημειοσύνολο. Δηλαδή ο αλγόριθμος χρησιμοποιείται για τη συνένωση δισδιάστατων (2D) ή τρισδιάστατων (3D) σχημάτων (Wild, 2010). Το έτος 1992, ο αλγόριθμος παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τους Besl και McKay, ενώ αρκετές βελτιώσεις στη λειτουργία του έχουν προταθεί από τους Zhang (1992, 1994) και Chen & Medioni (1992). Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος ήταν και παραμένει ο πιο διαδεδομένος αλγόριθμος για την λύση του προβλήματος προσδιορισμού της συνένωσης νεφών και από την παρουσίασή του έως σήμερα οι σχετικές με αυτόν εφαρμογές, τροποποιήσεις και δημοσιεύσεις ακολουθούν αύξουσα πορεία. Σύμφωνα με το γεγονός αυτό μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως ο συγκεκριμένος αλγόριθμος φαίνεται να αποτελεί την βέλτιστη λύση για την επίλυση του προβλήματος της συνένωσης.

4.1.1 Βασικά στοιχεία

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος χρειάζεται ως απαραίτητα δεδομένα εισόδου το σημειοσύνολο αναφοράς καθώς και το δεύτερο νέφος σημείων που θα μετασχηματιστεί. Ως δεδομένα εξόδου ο αλγόριθμος δίνει τις παραμέτρους του μετασχηματισμού μεταξύ του νέφους αναφοράς και του δεύτερου νέφους σημείων, συγκεκριμένα με τρεις βαθμούς ελευθερίας στη δισδιάστατη περίπτωση και με έξι βαθμούς ελευθερίας στην αντίστοιχη τρισδιάστατη. (Wild, 2010) Από τον Besl γίνεται αναφορά στην ικανότητα της μεθόδου να συγκλίνει πάντα στο ελάχιστο της συνάρτησης του σφάλματος και μάλιστα σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα, δηλαδή μετά από μόλις μερικές επαναλήψεις. Η διαδικασία χαρακτηρίζεται επίσης και από τον μεγάλο βαθμό αυτοματοποίησής της σε σχέση με την ελαχιστοτετραγωνική μέθοδο, η οποία εν αντιθέσει υπολογίζει τις καλύτερες τιμές

των παραμέτρων του μετασχηματισμού του στερεού σώματος από δεδομένες ομολογίες στα νέφη. Παράλληλα δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα επιλογής των ομόλογων σημείων. (Κυπαρίσση, 2011) Βέβαια η παρούσα μέθοδος έχει δύο αδυναμίες που την καθιστούν μερικώς αυτόματη μέθοδο. Συγκεκριμένα η μέθοδος θεωρεί πως το ένα νέφος είναι υποσύνολο του άλλου σύμφωνα με τους Grün & Akca (2005) και Manasir & Frasel (2006), το οποίο με τη σειρά του σημαίνει πως κατά τη σάρωση του αντικείμενου υπάρχει ανάγκη για μεγάλες επικαλύψεις μεταξύ των νεφών. Εάν δεν ισχύει η παραπάνω προϋπόθεση τότε υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να εκτιμηθούν από τη μέθοδο λανθασμένες ομολογίες με αποτέλεσμα να εμποδιστεί η σύγκλιση του αλγορίθμου. Η δεύτερη προϋπόθεση για την ομαλή λειτουργία της μεθόδου αφορά στη σχετική θέση των δύο νεφών η οποία οφείλει να είναι μερικώς αποκατεστημένη, με άλλα λόγια ο αλγόριθμος θεωρεί δεδομένη την ύπαρξη αρχικών τιμών μιας καλής εκτίμησης των παραμέτρων του μετασχηματισμού. Ο ICP μπορεί να καλύψει και να εφαρμοστεί σε προβλήματα συνένωσης που αφορούν διάφορες γεωμετρικές οντότητες, όπως σημειοσύνολα, ευθείες, καμπύλες, πλέγματα τριγώνων και επιφάνειες. Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις για τη λειτουργία του απαιτείται αρχικά η απλοποίηση των διάφορων γεωμετρικών οντοτήτων και περιγραφή τους σε σημεία, για παράδειγμα οι ευθείες από δύο κόμβους αυτούς της αρχής και του τέλους, τα τρίγωνα από τους κόμβους των κορυφών τους κ.ο.κ.

4.1.2 Παρουσίαση αλγορίθμου

Περίληπτικά ο αλγόριθμος εντοπίζει αντιστοιχίες σημείων και στα δύο νέφη, υπολογίζει το μετασχηματισμό ελαχιστοποιώντας το σφάλμα, μετασχηματίζει τα σημεία του δεύτερου νέφους ως προς αυτό της αναφοράς και κάνει επαναλήψεις μέχρι να επιτύχει το επιθυμητό κατώφλι σφάλματος που του έχει δοθεί από το χρήστη. Τέσσερα βήματα περιγράφουν τον αλγόριθμο. Έστω \mathbf{P} το πρώτο σημειοσύνολο με πλήθος σημείων N_p και \mathbf{X} το δεύτερο με πλήθος σημείων N_x και το \mathbf{P} να μετασχηματιστεί στο σύστημα του \mathbf{X} , τότε:

- Πρώτα γίνεται αναζήτηση των ομόλογων σημείων μεταξύ των δύο νεφών, θεωρώντας αρχικά ομόλογα τα κοντινότερα σημεία
- Μετά, εφόσον έχουν προσδιοριστεί οι ομολογίες, γίνεται υπολογισμός του μετασχηματισμού χρησιμοποιώντας το τετραδικό σύστημα του Hamilton
- Στη συνέχεια μετασχηματίζονται όλα τα σημεία του \mathbf{P} στο σύστημα αναφοράς εν προκειμένου στο σύστημα του συνόλου \mathbf{X} με την εφαρμογή του μετασχηματισμού
- Τέλος συνεχίζονται οι επαναλήψεις ώστε να ικανοποιηθεί το κριτήριο της σύγκλισης που έχει τεθεί παραπάνω

Για το πρώτο βήμα η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την εύρεση του κοντινότερου γείτονα κάθε σημείου του \mathbf{P} στο σύνολο \mathbf{X} γίνεται με την ευκλείδεια απόσταση.

Έτσι σε κάθε σημείο \mathbf{P} αντιστοιχίζεται το σημείο του \mathbf{X} που ικανοποιεί το κριτήριο:

$$d(\vec{p}_i, \mathbf{X}) = \min (\| \vec{x}_i - \vec{p}_i \|) = \min (\sqrt{(x_{xi} - x_{pi})^2 + (y_{xi} - y_{pi})^2 + (z_{xi} - z_{pi})^2})$$

Εξίσωση 4.1.

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

$$\mathbf{Y} = \mathbf{C}(\mathbf{P}, \mathbf{X}) \quad \text{Εξίσωση 4.2.}$$

Ο μετασχηματισμός που υπολογίζεται σε επόμενο βήμα εφαρμόζει την τετραδική μέθοδο του Hamilton. Η τετραδική μορφή μπορεί να θεωρηθεί ως ένα διάνυσμα με τέσσερα στοιχεία, δηλαδή ως μία σύνθεση ενός βαθμωτού και ενός κανονικού διανύσματος ή ως ένας μιγαδικός αριθμός με τρία διαφορετικά φανταστικά μέρη (Horn, 1988). Ένας μετασχηματισμός στερεού σώματος δεν μπορεί να εκφραστεί με ένα μόνο τετραδικό στοιχείο, διότι όπως αναφέρθηκε χρειάζονται έξι παράμετροι για την περιγραφή του, για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται δύο τετραδικά στοιχεία (Sariyildiz et. al., 2011). Με βάση αυτή τη μέθοδο ο πίνακας στροφής \mathbf{R} παραμετροποιείται με μια τετράδα στοιχείων ενός διανύσματος $\mathbf{q}_R = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T$, όπου το $q_0 \geq 0$ και $q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1$. Αντίστοιχα το διάνυσμα μετάθεσης t ορίζεται ως $\mathbf{q}_T = [q_4, q_5, q_6]^T$. Τελικά όλοι οι παράμετροι του μετασχηματισμού μπορούν και συμβολίζονται ως $\mathbf{q} = [\mathbf{q}_R \mid \mathbf{q}_T]$.

Η συνάρτηση του αθροίσματος των τετραγώνων των υπολοίπων θα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί και γράφεται ως:

$$f(\vec{q}) = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \| \vec{x}_i - \mathbf{R}(\vec{q}_R) \cdot \vec{p}_i - \vec{q}_T \|^2 \quad \text{Εξίσωση 4.3.}$$

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

$$\vec{\mu}_P = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \vec{p}_i \quad \text{και} \quad \vec{\mu}_X = \frac{1}{N_x} \sum_{i=1}^{N_x} \vec{x}_i \quad \text{Εξίσωση 4.4.}$$

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

$$\vec{\Sigma}_{PX} = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} (\vec{p}_i - \vec{\mu}_P)(\vec{x}_i - \vec{\mu}_X)^T \quad \text{Εξίσωση 4.5.}$$

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

$$\mathbf{A}_{ij} = (\Sigma_{PX} - \Sigma_{PX}^T)_{ij} \quad \text{Εξίσωση 4.6.}$$

$$\Delta = [\mathbf{A}_{23} \ \mathbf{A}_{31} \ \mathbf{A}_{12}] \quad \text{Εξίσωση 4.7.}$$

Τελικά σχηματίζεται ο συμμετρικός πίνακας Q , διαστάσεων 4×4

$$Q = \begin{bmatrix} tr(\Sigma_{PX}) & \Delta^T \\ \Delta & \Sigma_{PX} + \Sigma_{PX}^T - tr(\Sigma_{PX})I \end{bmatrix} \quad \text{Εξίσωση 4.8.}$$

$$\text{όπου } I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

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

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

Εξίσωση 4.9.

Η βέλτιστη τιμή του διανύσματος μετάθεσης υπολογίζεται ως εξής:

$$\overrightarrow{q_T} = \overrightarrow{\mu_X} - R(\overrightarrow{q_R})\overrightarrow{\mu_P} \quad \text{Εξίσωση 4.10.}$$

Μετά τον υπολογισμό των παραμέτρων το νέφος των σημείων P μετασχηματίζεται στο X . Ο Besl (1992) ως κριτήριο σύγκλισης προτείνει 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 των διαδοχικών επαναλήψεων να είναι μικρότερη από 1 %.

4.1.3 Βελτιώσεις αλγορίθμου

Το υπολογιστικό κόστος της συνάρτησης C (Εξίσωση 4.2.), στη χειρότερη περίπτωση ισούται με $O(N_p * N_x)$. Έτσι προκύπτει προφανώς πως ο υπολογισμός όλων των δυνατών συνδυασμών της ευκλείδειας απόστασης είναι πολύ απαιτητικός. Για τη λύση αυτού του προβλήματος εφαρμόζεται μια μέθοδος αναζήτησης στη βάση της δημιουργίας δενδροειδών δομών δεδομένων, καθορισμένης διάστασης (k -D tree).

Τέτοιες δομές βασίζονται στη διαίρεση μιας διάστασης σε κ αριθμό διαστάσεων. Συγκεκριμένα εδώ επιλέγεται το $\kappa = 3$ για να δημιουργηθεί μια τρισδιάστατη δομή δεδομένων. Δημιουργούνται διαδοχικά επίπεδα παράλληλα στα βασικά επίπεδα του συστήματος (xy, yz, zx) τα οποία διέρχονται από τα σημεία του συνόλου P . Ο Zhang (1992) αναφέρει πως έτσι ο τρισδιάστατος χώρος διαιρείται επιμέρους σε παραλληλεπίπεδα. Η διαδικασία σταματά όταν δημιουργηθεί παραλληλεπίπεδο στο οποίο δεν υπάρχει κάποιο σημείο. Έτσι περιορίζεται ο χώρος αναζήτησης εγγύτερων γειτόνων για τα σημεία. (Κυπαρίσση, 2011).

Τέλος οι Chen & Medioni 1992 προτείνουν μια βελτίωση για την αποφυγή χονδροειδών λαθών. Η εξάρτηση από τις αρχικές σχετικές στροφές των δύο νεφών για τις ομολογίες μπορεί να οδηγήσει σε σφάλμα. Έτσι μπορεί κάποιο σημείο με ένα άλλο να είναι τα εγγύτερα, αλλά στη πραγματικότητα να μην είναι ομόλογα. Για το λόγο αυτό προτείνεται ο ορισμός εφαπτομενικού επιπέδου σε κάθε σημείο του X. μετά υπολογίζεται η απόσταση κάθε σημείου του P από τα επίπεδα αυτά. Οπότε οι ομολογίες προκύπτουν ελαχιστοποιώντας απόσταση σημείου από επίπεδο. Τέλος προτείνει ακόμα ένα όριο D για τη μέγιστη αποδεκτή απόσταση που υπολογίζεται για τη θεώρηση δύο ομόλογων σημείων. Συμπερασματικά ο ICP ουσιαστικά είναι ένας επαναληπτικός αλγόριθμος, ο οποίος εκτιμά συνενώσεις και ελαχιστοποιεί το σφάλμα. (Κυπαρίσση, 2011).

4.2 Ελαχιστοτετραγωνική Μέθοδος Συνένωσης

Η ελαχιστοτετραγωνική μέθοδος συνένωσης λειτουργεί στην ίδια λογική με την ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση ψηφιακών εικόνων και αναφέρεται στη βιβλιογραφία ακόμα και ως συνταύτιση τρισδιάστατων επιφανειών (Grün & Akca, 2005). Η επιφάνεια δημιουργείται από νέφη σημείων τα οποία συλλέγονται με διαφορετικούς τρόπους όπως με φωτογραμμετρικές μεθόδους, διαδικασίες σάρωσης ή άλλες τεχνικές μέτρησης επιφανειών. Η παρούσα μέθοδος υπολογίζει τις παραμέτρους του μετασχηματισμού μεταξύ των τρισδιάστατων συστημάτων αναφοράς των τρισδιάστατων επιφανειών, με την εφαρμογή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων. Η ποσότητα που ελαχιστοποιείται στη συγκεκριμένη μέθοδο είναι το άθροισμα των τετραγώνων των αποστάσεων μεταξύ των δύο επιφανειών. Η μέθοδος αυτή θεωρείται πως αντιμετωπίζει το πρόβλημα στη γενική του μορφή. Αρχικά ο μετασχηματισμός του οποίου οι παράμετροι μπορούν να υπολογιστούν είναι η γενικότερη μορφή του τρισδιάστατου μετασχηματισμού ομοιότητας με επτά (7) βαθμούς ελευθερίας. Ο επιπλέον βαθμός αφορά στην κλίμακα και επομένως η εφαρμογή αυτή δεν τίθεται υπό τον περιορισμό της κλίμακας. Ακόμα η μέθοδος μπορεί να μετασχηματίσει οποιαδήποτε τρισδιάστατη οντότητα χωρίς να χρειάζεται πρώτα να εκφραστεί με σημεία. 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 μεταξύ τους. Τότε θα ισχύει:

$$f(x,y,z) - e(x,y,z) = g(x,y,z) \quad \text{Εξίσωση 4.11.}$$

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

$$\sum \|d\|^2 = \min \Rightarrow [dd] = \min \quad \text{Εξίσωση 4.12.}$$

Η γεωμετρική σχέση μεταξύ των δύο επιφανειών, περιγράφεται μέσω ενός τρισδιάστατου μετασχηματισμού ομοιότητας (3D similarity transformation) με 7 παραμέτρους (Εξ. 4.14). Ο Grün (1985) επισημαίνει ότι είναι δυνατή η χρήση οποιουδήποτε μετασχηματισμού ανάλογα με τις παραμορφώσεις που αναμένονται μεταξύ των δύο επιφανειών.

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = m \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{02} \\ Y_{02} \\ Z_{02} \end{bmatrix} \quad \text{Εξίσωση 4.13.}$$

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:

$$dx = dt_x + a_{10}dm + a_{11}d\omega + a_{12}d\phi + a_{13}dk \quad \text{Εξίσωση 4.14.}$$

$$dy = dt_y + a_{20}dm + a_{21}d\omega + a_{22}d\phi + a_{23}dk \quad \text{Εξίσωση 4.15.}$$

$$dz = dt_z + a_{30}dm + a_{31}d\omega + a_{32}d\phi + a_{33}dk \quad \text{Εξίσωση 4.16.}$$

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

$$f(x, y, z) - e(x, y, z) = g^0(x, y, z) + \frac{\partial g^0(x, y, z)}{\partial x} dx + \frac{\partial g^0(x, y, z)}{\partial y} dy + \frac{\partial g^0(x, y, z)}{\partial z} dz \quad \text{Εξίσωση 4.17.}$$

Χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο συμβολισμό,

$$g_x = \frac{\partial g^0(x, y, z)}{\partial x} dx, g_y = \frac{\partial g^0(x, y, z)}{\partial y} dy, g_z = \frac{\partial g^0(x, y, z)}{\partial z} dz \quad \text{Εξίσωση 4.18.}$$

Και συνδυάζοντας τις εξισώσεις 4.15. – 4.19. προκύπτει τελικώς η γραμμικοποιημένη εξίσωση παρατήρησης:

$$\begin{aligned} -e(x, y, z) = & g_x dt_x + g_y dt_y + g_z dt_z + (g_x a_{10} + g_y a_{20} + g_z a_{30}) dm + \\ & + (g_x a_{11} + g_y a_{21} + g_z a_{31}) d\omega + (g_x a_{12} + g_y a_{22} + g_z a_{32}) d\phi + \\ & + (g_x a_{13} + g_y a_{23} + g_z a_{33}) dk - (f(x, y, z) - g^0(x, y, z)) \end{aligned} \quad \text{Εξίσωση 4.19.}$$

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

$$Adx = dl - u \quad \text{Εξίσωση 4.20.}$$

Όπου,

$$dx = [dt_x, dt_y, dt_z, dm, d\omega, d\phi, dk]^T$$

$$dl = f(x, y, z) - g^0(x, y, z)$$

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, 1985). 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 θέση. Το πρόβλημα αυτό αφορά κυρίως στην 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 μπορεί να ποικίλλει χωρίς καμία δέσμευση. Με βάση τα παραπάνω, σχηματίζεται το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων παρατήρησης:

$$Id_x = dl_b - u_b \quad \text{Εξίσωση 4.21.}$$

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 4.21. και 4.22, υπολογίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$dx = (A^T P A + P_b)^{-1} (A^T P dl + P_b dl_b) \quad \text{Εξισώσεις 4.22.}$$

$$\sigma_0^2 = \frac{u^T P u + u_b^T P_b u_b}{r}$$

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 υπερέρχει 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. (Κυπαρίσση, 2011).

4.2.1 Robust estimation

Οι ελαχιστοτετραγωνικές μέθοδοι επίλυσης είναι γνωστό πως είναι ευαίσθητες σε χονδροειδή σφάλματα ή σε ακραίες τιμές των δεδομένων, για αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι που στηρίζονται στη στατιστική και συναντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία με τον όρο 'robust methods'. Μελετώνται διαφορετικές στατιστικές τεχνικές για την συγκεκριμένη εκτίμηση των παραμέτρων του μετασχηματισμού στερεού σώματος όταν υπάρχουν δεδομένα με ακραίες τιμές. Το πρώτο σεν τεχνικών ονομάζονται ως M-estimation και ελαχιστοποιούν τις μη κυρτές συναρτήσεις των μεμονωμένων σφαλμάτων. Το αποτέλεσμα των χονδροειδών σφαλμάτων οριοθετείται από το κορεσμό της συνάρτησης ελαχιστοποίησης. Πειραματικά οι συγκεκριμένες μέθοδοι φαίνεται να επιδέχονται αρχικές εκτιμήσεις και δεν μπορούν να διαχειριστούν μεγάλο αριθμό ακραίων τιμών με μέγιστο ποσοστό το 20%. Παρόλα αυτά υπάρχουν αποτελεσματικές υπολογιστικές μέθοδοι για την ελαχιστοποίηση των συναρτήσεων σχετικού σφάλματος. Το δεύτερο σεν τεχνικών που έχουν αναπτυχθεί είναι ικανά να λειτουργήσουν ορθά σε περιπτώσεις όπου ο αριθμός των ακραίων τιμών είναι μικρότερος από το 50% του πλήθους των σημείων. Επίσης δεν είναι τόσο ευαίσθητες στις αρχικές τιμές. Αυτές οι τεχνικές υπολογίζουν τον ελάχιστο μέσο των

τετράγωνων των υπολοίπων, με στόχο να εντοπιστούν και να απομακρυνθούν οι ακραίες τιμές μέσα από μια κανονική κατανομή. Μετά γίνεται μια ελαχιστοτετραγωνική προσαρμογή στα εναπομείναντα δεδομένα για τον προσδιορισμό τους πίνακες στροφής και μετάθεσης. Οι συγκεκριμένες τεχνικές είναι υπολογιστικά πιο αργές και απαιτούν πλεονασμό παρατηρήσεων. (Kumar and Hanson, 1994).

Danish Method

Η στρατηγική της Δανικής μεθόδου, όπως αυτή ονομάζεται, είναι η μείωση του αντίκτυπου ακραίων τιμών στην εκτίμηση των μεταβλητών. Η αρχή της μεθόδου βασίζεται στην ένδειξη των ακραίων τιμών από αντίστοιχες μεγάλες διορθώσεις. Μετά τη τυπική προσαρμογή των εκτιμήσεων των πρώτης τάξης παραμέτρων με την ελαχιστοτετραγωνική μέθοδο μέσω του μοντέλου Gauss - Markov, τα a priori βάρη των παρατηρήσεων αντικαθίσταται από τις συναρτήσεις διόρθωσης. Το επόμενο επαναληπτικό βήμα είναι η προσαρμογή των αρχικών βαρών παρατηρήσεων με βάση την παρακάτω σχέση:

$$P_{i+1} = p_i p(v), \quad i=1,2,\dots \quad \text{Εξισώσεις 4.23.}$$

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των απόλυτων τιμών των ακραίων παρατηρήσεων, ενώ ταυτόχρονα μειώνει το αντίκτυπο παραμόρφωσης στη συνολική γεωμετρία. Ο επαναληπτικός κύκλος επαναλαμβάνεται μέχρι να εμφανιστούν τα προσδοκώμενα αποτελέσματα. Για αυτή τη μέθοδο έρχονται συμπληρωματικά οι ακόλουθες συναρτήσεις και πρότυπα:

Συνάρτηση Επιρροής

$$\Psi(v) = \begin{cases} |v| & |v| < c \\ v \cdot e^{-a|v|^b} & |v| \geq c \end{cases} \quad \text{Εξισώσεις 4.24.}$$

Σήμερα χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τύποι εκθετικών συναρτήσεων για τις συναρτήσεις βαρών. Η σταθερά c επιλέγεται συνήθως μεταξύ του 2 και του 3 και εξαρτάται από το πλεονασμό των παρατηρήσεων που καθορίζεται από το μοντέλο Gauss - Markov και την ποιότητα μετρήσεων. Αν η σταθερά είναι κάτω από 2 τότε η μέθοδος χαρακτηρίζεται ως robust και αν είναι πάνω από 3 τότε γίνεται ελαχιστοτετραγωνική. (Gasincova et al., 2011).

4.3 Διαδεδομένα Εμπορικά Λογισμικά Συνένωσης Νεφών

Παρακάτω παρουσιάζονται τα πιο διαδεδομένα εμπορικά λογισμικά που χρησιμοποιούν τις παραπάνω μεθόδους για την εκτίμηση των παραμέτρων του μετασχηματισμού, ώστε να προχωρήσει η διαδικασία της συνένωσης των επίγειων νεφών σημείων από κάθε σάρωση σε ενιαίο σύστημα. Ακόμα παρουσιάζονται συνοπτικά οι δυνατότητές τους καθώς και τα κύρια χαρακτηριστικά τους.

4.3.1 Scene – FARO’s 3D Documentation Software

Το λογισμικό Scene έχει σχεδιαστεί για την επεξεργασία και διαχείριση σαρωμένων δεδομένων, με δυνατότητες αυτόματης αναγνώρισης αντικειμένων καθώς και συνένωση και γεωαναφορά σαρώσεων. Διαθέτει φιλικό περιβάλλον ως προς τον χρήστη με πολλές επιλογές και δυνατότητες, από διεξαγωγή μετρήσεων μέχρι την τρισδιάστατη απεικόνιση των συνενωμένων νεφών σημείων και εξαγωγή αυτών σε διάφορες μορφές και τύπους αρχείων. Επίσης δίνεται η δυνατότητα για απευθείας αποθήκευση ή δημοσίευση στο διαδίκτυο (web server). Η πιο πρόσφατη έκδοση του λογισμικού είναι η 5.4. Αναλυτικότερα ανάμεσα στα κυριότερα χαρακτηριστικά του λογισμικού είναι η συνένωση των σαρώσεων, η οποία πραγματοποιείται με δύο μεθόδους. Το λογισμικό χωρίς τη χρήση και ύπαρξη τεχνητών στόχων όπως σφαίρες και σκακιέρες μπορεί και προχωρά στη συνένωση των νεφών. Η πρώτη μέθοδος συνένωσης ονομάζεται από την εταιρεία ως “Top View Based”, η οποία είναι σε μεγάλο βαθμό αυτοματοποιημένη, επιτρέπει τη γεωαναφορά των σαρώσεων σε εσωτερικούς ή πυκνοδομημένους χώρους, όπου δεν ενδείκνυται η χρήση GPS. Η δεύτερη μέθοδος συνένωσης η οποία ονομάζεται από την εταιρεία ως “Cloud to Cloud”, δίνει νέες ευκαιρίες στους χρήστες σε ταχύτητα και αξιοπιστία κάτω από δύσκολες συνθήκες. Ενδείκνυται για εξωτερικούς χώρους όπου η χρήση δεκτών GPS, πυξίδα ή και αλτίμετρου είναι δυνατή.

4.3.2 RiSCAN PRO - RIEGL's Software

Το συγκεκριμένο λογισμικό δίνει τη δυνατότητα λειτουργίας σαρωτών laser και επεξεργασίας των δεδομένων που αποκτήθηκαν από αυτούς. Το λογισμικό στηρίζεται σε δομή η οποία έχει ως βάση της το “project”, όπου οργανώνονται και αποθηκεύονται όλα τα δεδομένα που προκύπτουν από μετρήσεις. Τα δεδομένα μπορεί να είναι σαρώσεις, σαρώσεις στόχων, ψηφιακές εικόνες, συντεταγμένες σημείων ελέγχου και σύνδεσης καθώς και δεδομένα από δέκτη GPS, ακόμα περιέχονται και οι απαραίτητοι πίνακες οι οποίοι χρειάζονται για τον μετασχηματισμό των πολλαπλών σαρώσεων σε ένα κοινό σύστημα αναφοράς. Το λογισμικό είναι σχεδιασμένο για τη βελτιστοποίηση της πορείας της εργασίας στο πεδίο και παρέχει εργαλεία για εικονική επιθεώρηση της συνολικής πληρότητας της κάλυψης των δεδομένων που συλλέγονται. Ακόμα εκεί μπορεί να γίνει η επεξεργασία των δεδομένων και η οπτικοποίηση του αποτελέσματος. Ο σχεδιασμός του δίνει επίσης τη δυνατότητα εξαγωγής δεδομένων σε δομές ευρείας χρήσης από άλλες εφαρμογές. Τέλος αναφέρεται από την εταιρεία πως διαθέτει και υποστηρίζει και φωτογραμμετρικά χαρακτηριστικά καθώς διαθέτει φίλτρα καλύτερης θέασης των νεφών σημείων και περισσότερες αυτοματοποιημένες επιλογές για τις εικόνες που αποκτήθηκαν.

4.3.3 Optech – ILRIS SCAN

Η συγκεκριμένη εταιρεία διαθέτει στην αγορά μια σειρά από λογισμικά σχετικά με σαρωτές laser από αερομεταφερόμενους μέχρι επίγειους. Το συγκεκριμένο λογισμικό είναι μια λύση που περιέχει όλες τις επιθυμητές λειτουργίες δηλαδή τη σάρωση, τη θέαση και τα εργαλεία επεξεργασίας των δεδομένων. Το λογισμικό υπόσχεται ένα περιβάλλον φιλικό στο χρήστη για όλη τη διαδικασία και πορεία της εργασίας από τη σάρωση, την επεξεργασία και επαλήθευση της πληροφορίας. Με το λογισμικό η όλη διαδικασία μπορεί να επιταχυνθεί και να γίνει πιο αποτελεσματική. Ακόμα κάποια αποτελέσματα μπορούν να δοθούν και την ώρα των σαρώσεων.

4.3.4 Leica – Cyclone

Το συγκεκριμένο λογισμικό της 3D σάρωσης στην πραγματικότητα περιλαμβάνει αρκετά υποπροϊόντα λογισμικού διαφόρων τύπων. Με βάση την όλη διαδικασία από τη συλλογή των δεδομένων μέχρι το τελικό προϊόν μπορεί να επιτευχθεί η ακόλουθη διάκριση. Αρχικά περιλαμβάνεται το λογισμικό για τον έλεγχο και λειτουργία του σαρωτή, μετά το λογισμικό για τη διαχείριση του νέφους σημείων (π.χ. συνένωση, γεωαναφορά, αναγνώριση ειδικών στόχων), επίσης το λογισμικό για να συμπεριληφθούν πολύπλοκα δεδομένα στο νέφος σημείων, το λογισμικό για τη δημιουργία σύνθετων μοντέλων επιφάνειας (π.χ. TIN – πραγματική μορφολογία εδάφους, σχέδια αντικειμένων), το λογισμικό για τη χαρτογράφηση και απόδοσης υψής και εικόνας, και τέλος το λογισμικό διαχείρισης δεδομένων και προβολής. Συγκεκριμένα ενδιαφέρει η εφαρμογή που χρησιμοποιείται για τη συνένωση των νεφών και την γεωαναφορά του συνενωμένου νέφους. Η συνένωση μπορεί να γίνει είτε με τη χρήση μόνο των ειδικών στόχων είτε με χρήση μόνο των ομόλογων σημείων μέσω σύγκρισης νεφών ή με ταυτόχρονη χρήση των ειδικών στόχων και των ομόλογων σημείων. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να απενεργοποιήσει δεσμεύσεις που τυχόν παρουσιάζουν μεγάλο σφάλμα ή να επιλέξει άλλα καλύτερα ομόλογα σημεία. Το λογισμικό ακόμα δίνει τη δυνατότητα γεωαναφοράς του συνενωμένου νέφους εφόσον εισαχθούν οι συντεταγμένες των στόχων ή σημείων στο απόλυτο σύστημα σημείων που έχουν σκοπευτεί στο νέφος μέσα από το λογισμικό.

4.3.5 3DVEM – Register

Το συγκεκριμένο λογισμικό μπορεί να υπολογίσει τις παραμέτρους του μετασχηματισμού και στη συνέχεια να λύσει το πρόβλημα της συνένωσης νεφών με σχετικά χαμηλό κόστος, μέσω ενός ικανού αριθμού ομόλογων στοιχείων στα νέφη προς συνένωση. Τα στοιχεία αυτά μπορεί να είναι τα κέντρα τεχνητών στόχων και σφαιρών, αλλά και φυσικά σημεία ή άλλα σημεία που έχουν εξαχθεί από ψηφιακά μοντέλα. Η επίλυση της συνένωσης μπορεί να γίνει με δύο τρόπους ανάλογα την επιλογή του χρήστη με ελάχιστα τετράγωνα ή την τεχνική Robust Estimation.

Πλεονεκτήματα

Το λογισμικό προσφέρει ευκολία στην επίλυση της συνένωσης και αρκετές δυνατότητες συνένωσης όπως συνένωση νέφους με νέφος, νέφους με επιφάνεια και τέλος επιφάνειας με επιφάνεια. Η εκτίμηση των τιμών των παραμέτρων του μετασχηματισμού μπορεί να γίνει με ελαχιστοτετραγωνική επίλυση ή robust estimation με υπό-επιλογές δύο μεθόδους τις Danish method και Minimum Sum, για τον εντοπισμό και εξαίρεση από τη διαδικασία χονδροειδών σφαλμάτων και ακραίων τιμών. Ακόμα δίνεται η δυνατότητα για εξαγωγή αναφοράς σχετικά με τη συνένωση, όπου δίνεται πλήρης λίστα σφαλμάτων και εκτιμώμενων ακριβειών των παραμέτρων του μετασχηματισμού. Το λογισμικό υποστηρίζει εισαγωγή και εξαγωγή νεφών και τρισδιάστατων μοντέλων σε πολλαπλές μορφές αρχείων (ASC, TXT, PTS, PTX, LAS, FLS, FWS, OBJ, WRL, DXF, etc.) και δίνει μεγάλη ευελιξία στη χρήση δεδομένων LiDAR με χαμηλό κόστος. Τέλος, δεν υπάρχει περιορισμός στον αριθμό των σαρώσεων προς συνένωση.

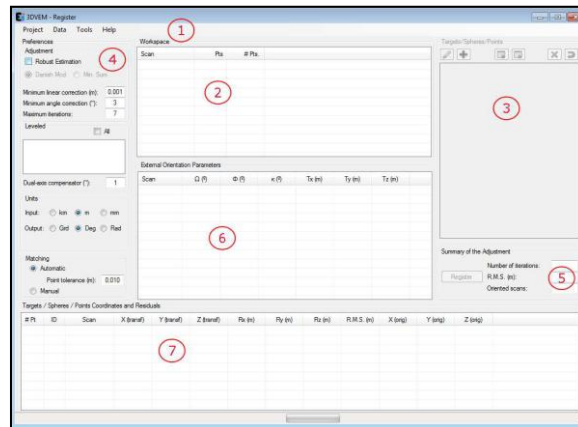
Κύρια Διαφοροποίηση

Το λογισμικό εγγυάται την καλύτερη λύση και δείχνει όλα τα στατιστικά της συνένωσης που καθορίζουν την ποιότητα της και τη ποιότητα του τελικού προϊόντος. Συγκεκριμένα υπάρχει η δυνατότητα εξαγωγής αναφοράς σε μορφή απλού κειμένου, η οποία περιλαμβάνει αρχικά τα ονόματα των αρχείων που χρησιμοποιήθηκαν και περιέχουν είτε τα νέφη σημείων είτε τις συντεταγμένες των στόχων με τις συντεταγμένες και το όνομα αυτών να ακολουθούν ανά νέφος. Μετά υπάρχει ο πίνακας συνταύτισης όπου φαίνονται το πλήθος των σημείων του κάθε νέφους, το πλήθος των στόχων και το πλήθος για τους οποίους έγινε συνταύτιση. Στη συνέχεια ακολουθεί το κύριο κομμάτι της αναφοράς σχετικά με την συνένωση των νεφών. Το τμήμα αυτό περιλαμβάνει τον αριθμό των επαναλήψεων, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, τις παραμέτρους του εξωτερικού προσανατολισμού ανά στάση σάρωσης και τη σχετική τους αβεβαιότητα. Τέλος δίνεται λίστα των στόχων που χρησιμοποιήθηκαν στη διαδικασία της συνένωσης με τα υπολειπόμενα σφάλματα τους. Η κυριότερη διαφορά όμως του λογισμικού σε σχέση με τα υπόλοιπα εμπορικά λογισμικά της αγοράς έγκειται στο γεγονός πως δεν χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο ICP αλλά την ελαχιστοτετραγωνική επίλυση. Η διαδικασία της συνένωσης βασίζεται σε στόχους, σφαίρες ή σημεία με συντεταγμένες, ο υπολογισμός των παραμέτρων του γεωμετρικού μετασχηματισμού που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας της συνένωσης επιτυγχάνεται μέσω της μεθόδου των ελάχιστων τετραγώνων ή της μεθόδου robust estimators. Η ελαχιστοτετραγωνική επίλυση γίνεται αυτόματα ως προεπιλογή αλλά ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την επιλογή Robust Estimation εάν έχει μεγάλο πλεονασμό παρατηρήσεων για βέλτιστα αποτελέσματα και αποκλεισμό τυχών ακραίων τιμών.

Περιγραφή Περιβάλλοντος Χρήστη

Το λογισμικό λειτουργεί με αρχεία γραμμένα σε γλώσσα XML, όπου ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει το project εργασίας του. Το λογισμικό έχει ένα περιβάλλον χρήστη χωρισμένο σε επτά μέρη. Αυτά είναι το μενού, ο χώρος εργασίας, το μέρος των στόχων, σφαιρών και των σημείων, το μέρος των προτιμήσεων – ρυθμίσεων, την

περίληψη της συνένωσης, τις παραμέτρους του εξωτερικού προσανατολισμού και τέλος το πάνελ των συντεταγμένων και των υπολοίπων των στόχων, σφαιρών και των σημείων.



Εικόνα 4.1 Κεντρικό Παράθυρο Περιβάλλοντος 3DVEM - Register

1. Πάνελ Μενού

Η συγκεκριμένη εργαλειοθήκη στη κορυφή του παραθύρου οργανώνεται σε τέσσερα παράθυρα.

- Το παράθυρο Project όπου περιέχονται οι εντολές για τη διαχείριση των project την αποθήκευση τη δημιουργία των αναφορών και την τρισδιάστατη απεικόνιση.
- Το παράθυρο Data περιέχει τις εντολές εισαγωγής και εξαγωγής των δεδομένων.
- Το παράθυρο Tools περιέχει τις εντολές της συνένωσης, της απαλοιφής της συνένωσης και αλλαγής της γλώσσας (Αγγλικά & Ισπανικά)
- Τέλος το παράθυρο Help περιέχει το περιεχόμενο του εγχειρίδιου του προγράμματος και παρέχει λεπτομέρειες σχετικά με την έκδοση και τα πνευματικά δικαιώματα του λογισμικού. Ακόμα εκεί δίνεται η δυνατότητα ελέγχου για τυχόν ενημερώσεις του λογισμικού.

2. Χώρος Εργασίας

Ο συγκεκριμένος χώρος περιέχει τα αρχεία με τα σαρωμένα νέφη σημείων ή των τρισδιάστατων μοντέλων τα οποία θα προσανατολιστούν όπως και επιπρόσθετες πληροφορίες αυτών. Τα αρχεία είναι αυτά που προστίθενται στο λογισμικό μετά την επιλογή τους μέσω της επιλογής της εισαγωγής αρχείων. Ο πίνακας δείχνει τα ονόματα των φορτωμένων αρχείων, όπως και το συνολικό αριθμό των σημείων κάθε σάρωσης καθώς και το πλήθος των στόχων, σφαιρών ή σημείων που περιλαμβάνονται έτσι ώστε να γίνει η συνένωση.

3. Πάνελ Στόχων, Σφαιρών ή Σημείων

Ο πίνακας παρουσιάζει τις συντεταγμένες των τεχνητών ή φυσικών σημείων που εξάγονται από το νέφος σημείων ή το ψηφιακό μοντέλο που θα καθορίσουν το σύστημα συντεταγμένων του αρχείου που θα επιλεγεί στο χώρο εργασίας. Η λίστα περιέχει τον αριθμό ταυτότητας που δίνεται στο σημείο. Αν ο αριθμός δεν περιλαμβάνεται μπορεί να δοθεί αυτόματα ή χειροκίνητα. Η δομή pts επιτρέπει στους χρήστες να συμπεριλάβουν στη λίστα τους στόχους συν τα σαρωμένα σημεία.

4. Προτιμήσεις – Ρυθμίσεις

Στο συγκεκριμένο παράθυρο μπορούν να γίνουν επιλογές σε σχέση με τη συνένωση και περιέχει τέσσερις τομείς.

- Τη συνένωση όπου καθορίζεται η μέθοδος, ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων και το κατώφλι ανοχής
- Την οριζοντίωση του σαρωτή κατά τη διάρκεια της σάρωσης και την ακρίβεια του οργάνου
- Τις μονάδες όπου ορίζονται οι μονάδες εισαγωγής και εξαγωγής
- Της συνταύτισης όπου καθορίζεται τότε η συνένωση γίνεται αυτόματα με κάποια ανοχή ή χειροκίνητα

5. Περίληψη της Συνένωσης

Στο συγκεκριμένο μέρος δίνεται η εντολή για την εκκίνηση της συνένωσης και ο έλεγχος του συνολικού αποτελέσματος της συνένωσης. Η διαδικασία επιτρέπει την επίλυση του προβλήματος μέσω της μεθόδου της έμμεσης συνένωσης. Το λογισμικό υπολογίζει όλες τις πιθανές λύσεις και επιλέγει την καλύτερη, η οποία έχει το μεγαλύτερο ποσοστό επιτυχίας στους προσανατολισμούς, δηλαδή το μέγιστο αριθμό σαρώσεων που προσανατολίστηκαν επιτυχώς και το μικρότερο μέσω τετραγωνικό σφάλμα. Επίσης δίνεται το πλήθος των επαναλήψεων, το συνολικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα για να δώσει μια πρώτη ιδέα στον χρήστη για το μέσο σφάλμα και τέλος δίνει το πλήθος των προσανατολισμένων σαρώσεων.

6. Παράμετροι Εξωτερικού Προσανατολισμού

Το συγκεκριμένο πάνελ δείχνει τα αποτελέσματα της συνένωσης που επετεύχθη για τις συγκεκριμένες σαρώσεις που βρίσκονται στο χώρο εργασίας. Οι μονάδες στροφής είναι αυτές που επιλέχθηκαν στο πάνελ των προτιμήσεων ενώ οι μονάδες της μετάθεσης συμφωνούν με αυτές του αρχείου εισαγωγής. Το λογισμικό θέτει ως σύστημα αναφοράς το πιο κατάλληλο από τις διάφορες σαρώσεις. Ως προς αυτό υπολογίζονται οι παράμετροι του μετασχηματισμού, σε περίπτωση αλλαγής του οι παραπάνω παράμετροι επαναυπολογίζονται. Εάν κάποια σάρωση δεν συνενωθεί τότε αυτή επισημαίνεται με μία παύλα. Ακόμα εφόσον έχει επιλεγεί η επιλογή της οριζοντίωσης η λύση είναι δεσμευμένη και οι στροφές Ω και Φ δεν συμμετέχουν στην επίλυση.

7. Συντεταγμένες και Υπόλοιπα Στόχων, Σφαιρών και Σημείων

Το συγκεκριμένο πάνελ δείχνει την ταυτότητα κάθε σημείου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συνένωση, το όνομα της σάρωσης όπου ανήκει τις μετασχηματισμένες συντεταγμένες του στο κοινό σύστημα, τα υπολειπόμενα σφάλματα του μετασχηματισμού, και το τελικό σφάλμα που δημιουργήθηκε στο σημείο και στις συντεταγμένες του στο αρχικό του σύστημα. Τέλος με ένα απλό πάτημα στη αρχή κάθε στήλης γίνεται ταξινόμηση με βάση τις τιμές της.

Δυνατότητες Συνένωσης

Η επιλογή της αυτόματης συνταύτισης επιτρέπει την αυτόματη αναγνώριση στοιχείων. Για αυτό δεν χρειάζεται να ακολουθηθεί κάποια σειρά στο πεδίο κατά τη μέτρηση των στόχων ή να γίνει αρίθμησή τους. Η χειροκίνητη συνταύτιση χρειάζεται προσοχή στην ορθή αντιστοίχιση της αρίθμησης των στόχων. Προτείνεται να μετρώνται τουλάχιστον τρία σημεία από κάθε στάση. Βέβαια αυτό για κάποια αργά συστήματα σαρωτών μπορεί να είναι χρονοβόρο και να καθυστερεί την πορεία συλλογής των δεδομένων. Κάποια συστήματα παρέχουν σαρώσεις μεγάλης πυκνότητας και ταχύτητας, και η όλη διαδικασία μετρήσεις πολλαπλών στοιχείων μπορεί να γίνει στο γραφείο είτε αυτόματα είτε ημιαυτόματα, εφόσον τα στοιχεία είναι μετρημένα με αρκετή ανάλυση. Η αυτόματη αναζήτηση των ομόλογων στοιχείων στα διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων από κάθε στάση μπορεί να γίνει εφόσον υπάρχουν τουλάχιστον τρία κοινά στοιχεία μέσα στο προβλεπόμενο κατώφλι ανοχής. Σε αντίθετη περίπτωση η συνταύτιση δεν θα γίνει αυτόματα από το λογισμικό. Αξίζει να σημειωθεί πως υπάρχει ανάγκη για κάλυψη εάν είναι δυνατό των ορίων του αντικειμένου για να ψηφιοποιηθεί. Γενικά πρέπει να προγραμματιστεί καλά η διαδικασία, να υλοποιηθούν και να μετρηθούν τα τρισδιάστατα στοιχεία στο χώρο εργασίας. Σε μερικές περιπτώσεις η παρουσία κάποιων σφαλμάτων κατά τη διάρκεια της συλλογή των δεδομένων στο πεδίο μπορεί να λυθεί υιοθετώντας τη ανοχή του κατωφλίου σημείου στη πραγματική του ακρίβεια, ή εισάγοντας επιπρόσθετα φυσικά σημεία μετρημένα στο νέφος σημείων ή στο τρισδιάστατο μοντέλο κατά την επεξεργασία. Μια εναλλακτική είναι η απομάκρυνση της επιρροής των μεγάλων σφαλμάτων όπου υπάρχει πλεονασμός παρατηρήσεων με την εφαρμογή της εκτίμησης Robust Estimation. Το λογισμικό προσφέρει δύο δυνατότητες τη μέθοδο Danish Modified και τη μέθοδο ελάχιστου αθροίσματος. Στη πράξη μπορεί να συμβεί να μην υπάρχουν αρκετά στοιχεία μεταξύ των στάσεων. Η συνένωση στο λογισμικό μπορεί να γίνει σε ένα μέσο εικονικό σύστημα αναφοράς που εκτός από τα σημεία του κύριου συστήματος αναφοράς περιέχει τα σημεία που βρίσκονται στις υπόλοιπες σαρώσεις προσανατολισμένες από το κύριο σύστημα. Το γεγονός αυτό επιτρέπει στους χρήστες επίλυσης της συνένωσης σε ειδικές περιπτώσεις γεωμετρίας, αλλά πολύ συχνά στη πραγματική ζωή στη πράξη των σαρωτών μπορεί να μην γίνεται αυτόματη συνένωση. (GiFLE, 2015).

5 ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Για την αξιολόγηση των δύο μεθόδων συνένωσης νεφών πραγματοποιήθηκε ένα πείραμα για να εξακριβωθεί εάν παρουσιάζουν διαφορές και πόσες στα αποτελέσματά τους. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί αναφέρονται όλα τα απαραίτητα στοιχεία σχετικά με την συλλογή των δεδομένων. Αρχικά περιγράφεται ο εξοπλισμός που επιλέχθηκε και χρησιμοποιήθηκε για την ομαλή διεξαγωγή της πειραματικής εφαρμογής της παρούσας εργασίας. Στη συνέχεια, περιγράφεται το απαραίτητο λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε και αξιοποιήθηκε τόσο κατά το στάδιο της καταγραφής και συλλογής των δεδομένων, αλλά και κατά τα επόμενα στάδια, αυτά της επεξεργασίας και της αξιολόγησης. Τέλος, γίνεται αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας και πορείας των εργασιών που έγιναν κατά τη συλλογή των δεδομένων.

5.1 Εξοπλισμός

Αρχικά οργανώθηκε επί τόπου επίσκεψη στον χώρο προς αποτύπωση, ώστε να γίνει γνωριμία με την σκηνή ενδιαφέροντος και να καταγραφούν οι συνθήκες και ανάγκες, τις οποίες θα εξυπηρετήσει τελικά η αποτύπωση. Με βάση αυτά τα στοιχεία καθορίζονται παράλληλα ο σχεδιασμός των εργασιών και το είδος του εξοπλισμού και του λογισμικού, για την απρόσκοπτη ολοκλήρωση της διαδικασίας της συλλογής της απαιτούμενης πληροφορίας. Βάσει των παραπάνω ενεργειών επιλέγεται η καταλληλότερη μεθοδολογία παραγωγής νεφών ώστε να ακολουθήσει η συνένωση τους με σκοπό την σύγκριση - αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων.

5.1.1 Τοπογραφικός Εξοπλισμός

Ο διαθέσιμος εξοπλισμός περιλαμβάνει τον ολοκληρωμένο εικονογεωδαιτικό σταθμό TOPCON GPT – 7003i του εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας, ο οποίος πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό υψηλής ακρίβειας γεωδαιτικών συντεταγμένων. Τα στοιχεία προς μέτρηση είναι οι απαραίτητοι στόχοι για τη διαδικασία της συνένωσης καθώς και απαραίτητα σημεία του πεδίου ελέγχου. Τα σημεία του πεδίου ελέγχου χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό των παραμέτρων του γεωμετρικού μετασχηματισμού για την επίτευξη της γεωαναφοράς των συνενωμένων νεφών σημείων.

Τα κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά που αφορούν τον ολοκληρωμένο εικονογεωδαιτικό σταθμό που χρησιμοποιήθηκε είναι τα εξής:

- Δύο ενσωματωμένες ψηφιακές κάμερες
- Πρισματική στόχευση με εμβέλεια πάνω από 3 χιλιόμετρα (για αποστάσεις < 25 m ακρίβεια $\pm 3\text{mm} \pm 2\text{ppm}$ και για αποστάσεις > 25 m $\pm 2\text{mm} \pm 2\text{ppm}$)
- Μη πρισματική στόχευση πάνω από 250 μέτρα (για αποστάσεις πάνω από 1.5 m ακρίβεια $\pm 5\text{mm}$)
- Γωνιομετρική ακρίβεια του οργάνου είναι τα 3''
- Βάρος 6.6 κιλά (με τη μπαταρία)



Εικόνα 5.1 Ολοκληρωμένος Εικονογεωδαιτικός Σταθμός TOPCON GPT – 7003i
Πηγή: www.topcon.com, 2015

5.1.2 Επίγειος Σαρωτής laser

Ως μέθοδος παραγωγής των νεφών σημείων επιλέχθηκε η παραγωγή με χρήση σαρωτή τεχνολογίας laser. Ο σαρωτής που χρησιμοποιήθηκε είναι ο σαρωτής που διαθέτει η σχολή δηλαδή ο τρισδιάστατος σαρωτής ScanStation 2 της Leica. Ακολουθούν τα κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά που αφορούν τον συγκεκριμένο σαρωτή.

Laser Scanner Scanstation 2 - Leica Geosystems AG

Πρόκειται για έναν επίγειο παλμικό σαρωτή που εκπέμπει επαναλαμβανόμενους παλμούς ακτίνας laser υψηλής ακρίβειας για τη καταγραφή σημείων. Ο σαρωτής παρέχει ως μέγιστη δυνατότητα καταγραφής μέχρι και 50000 σημείων ανά δευτερόλεπτο και έχει εμβέλεια σάρωσης έως και 300 μέτρα (90% λευκαύγεια ή αλμπέντο) χωρίς τη χρήση ανακλαστήρα, με δυνατότητα σάρωσης 360 μοίρες στο οριζόντιο και 270 μοίρες στο κατακόρυφο επίπεδο λόγω του τρόπου στήριξης – τοποθέτησης του οργάνου. Η ακρίβεια του σαρωτή είναι 6 mm για την θέση, με 4 mm για την μέτρηση της απόστασης και 60 μrad (12'') για τις οριζόντιες και κάθετες γωνίες, για αποστάσεις μέχρι 50 μέτρα. Ακόμα, παρέχεται η δυνατότητα διόρθωσης “dual axis compensation” για την μη απόλυτη οριζοντίωση του οργάνου, η ελάχιστη δυνατή απόσταση σάρωσης μεταξύ δύο σημείων μέχρι και κάτω από 1 mm και τέλος διάμετρος δέσμης στα 50 μέτρα 4 – 6 mm. Διαθέτει ακόμα ηλεκτρονικό σύστημα κίνησης (servo), αυτόματη αναγνώριση ειδικών ανακλαστικών στόχων και σκόπευση με τη βοήθεια ψηφιακών εικόνων και όχι τηλεσκοπίου. Επίσης δίνει και δυνατότητες ίδρυσης οδεύσεων και χάραξης σημείων πράγμα που δίνει το πλεονέκτημα χρήσης του οργάνου και ως γεωδαιτικό σταθμό. Ο χειρισμός του σαρωτή προϋποθέτει τη χρήση συνδεδεμένου Η/Υ. Διαθέτει ψηφιακή κάμερα ανάλυσης 1 megapixel η οποία χρησιμοποιείται κατά τη διαδικασία της σάρωσης για τη φωτογράφιση του προς αποτύπωση αντικειμένου μέσω της οποίας ο χρήστης επιλέγει τη περιοχή σάρωσης. Οι διαστάσεις του σαρωτή είναι 265 mm \times 370 mm \times 510 mm (βάθος \times πλάτος \times ύψος) και καθαρό βάρος 18,8 κιλά. Η λειτουργία του γίνεται είτε με τη χρήση μπαταριών βάρους 13 κιλών και αυτονομία 3 ωρών είτε με απευθείας σύνδεσή του σε πηγή ρεύματος. Τα βασικά μέρη του σαρωτή είναι ο πομπός και ο δέκτης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας τα οποία συνοδεύονται και από παρελκόμενα όπως

τρίποδας, καλώδια επικοινωνίας και τροφοδοσίας, στόχοι, τρικόγλιο και μπαταρίες όπως αναφέρθηκε.



Εικόνα 5.2 Laser scanner Scanstation 2
Πηγή: *Leica Geosystems AG, 2015*

5.2 Λογισμικό

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε μπορεί να ομαδοποιηθεί σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την λειτουργία του στη συνολική πορεία της διαδικασίας. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει το λογισμικό που κρίνεται πλήρως αναγκαίο και απαραίτητο για την συλλογή και την επεξεργασία αριθμητικών δεδομένων. Η δεύτερη κατηγορία λογισμικού που ακολουθεί αποτελείται από λογισμικά που μπορούν να εφαρμόζουν και να υλοποιούν τις διαφορετικές τεχνικές και μεθόδους που απασχολούν την παρούσα εργασία και βρίσκονται υπό σύγκριση και αξιολόγηση. Τέλος, η τρίτη κατηγορία περιλαμβάνει λογισμικά απαραίτητα στη διεξαγωγή των συγκρίσεων και εξαγωγή των αποτελεσμάτων της αξιολόγησης.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκει το λογισμικό Cyclone της εταιρείας του σαρωτή, μέσω του οποίου γίνεται δυνατή η επικοινωνία χρήστη – σαρωτή κατά τη διάρκεια της σάρωσης και στη συνέχεια δίνεται η δυνατότητα για διαχείριση των αρχείων σάρωσης (μετονομασία, προεπισκόπηση, εξαγωγή σε διάφορες μορφές κ.ά.). Το λογισμικό Cyclone επίσης προσφέρει τη δυνατότητα συνένωσης και γεωαναφοράς των σαρωμένων νεφών από τις διάφορες στάσεις του οργάνου πράγμα που το εντάσσει και στη δεύτερη κατηγορία. Το συγκεκριμένο λογισμικό περιγράφεται επαρκώς σε προηγούμενη ενότητα (4.3.4.). Στην συγκεκριμένη κατηγορία μπορεί να ενταχθεί επίσης και η σουίτα λογιστικών φύλλων που διαθέτει η Microsoft αυτή του MS Excel, όπου έγιναν οι μαθηματικοί υπολογισμοί. Οι υπολογισμοί αυτοί περιλαμβάνουν τον υπολογισμό γεωδαιτικών συντεταγμένων, εκτίμηση παραμέτρων μετασχηματισμού με ελαχιστοτετραγωνική επίλυση και τέλεση υπολογισμών κατά το στάδιο της αξιολόγησης. Το παραπάνω λογισμικό αποτελεί ένα ευρέως διαδεδομένο και παράλληλα εύχρηστο εργαλείο που βρίσκει εφαρμογή σε διαφορετικές ειδικότητες και χρήσεις.

Στη δεύτερη κατηγορία εκτός του λογισμικού Cyclone, ανήκει και το λογισμικό 3DVEM – Register, το οποίο περιγράφηκε επαρκώς σε προηγούμενο κεφάλαιο (4.3.5). Τα δύο αυτά λογισμικά εφαρμόζουν τις δύο μεθόδους συνένωσης νεφών υπό μελέτη.

Στην τρίτη κατηγορία ανήκει το λογισμικό Cloud Compare, το συγκεκριμένο λογισμικό είναι ένα ανοιχτού κώδικα (open source) λογισμικό για την επεξεργασία τρισδιάστατων νεφών. Ο κύριος λόγος χρήσης του συγκεκριμένου λογισμικού είναι ταυτόσημος με τον πρωταρχικό λόγο δημιουργίας του και το όνομα του, δηλαδή την εκτέλεση σύγκρισης μεταξύ δύο νεφών σημείων. Το λογισμικό διαθέτει μεγάλες δυνατότητες στη διαχείριση μεγάλου πλήθους σημείων δηλαδή πάνω από 10 εκατομμύρια σημεία. Σήμερα το λογισμικό έχει εξελιχθεί και διαθέτει περισσότερα εργαλεία όπως εξελιγμένους αλγορίθμους για συνένωση, υπολογισμό σύνθετων στατιστικών, διαχείριση χρωμάτων, ενίσχυση της απεικόνισης κ.α. Το λογισμικό χρησιμοποιήθηκε για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της διαδικασίας συνένωσης από τα δύο λογισμικά προς σύγκριση. Στην ίδια κατηγορία ανήκει όμως και το λογισμικό Cyclone. Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα ανάγνωσης γεωαναφερμένων νεφών σημείων και κατόπιν την στόχευση σημείων. Η σκόπευση των σημείων του πεδίου ελέγχου έχει ως αποτέλεσμα συντεταγμένες σε κοινό σύστημα με αυτό του πεδίου ελέγχου, ώστε να γίνουν οι απαραίτητες συγκρίσεις για την εξαγωγή συμπερασμάτων για την ποιότητα της γεωαναφοράς.

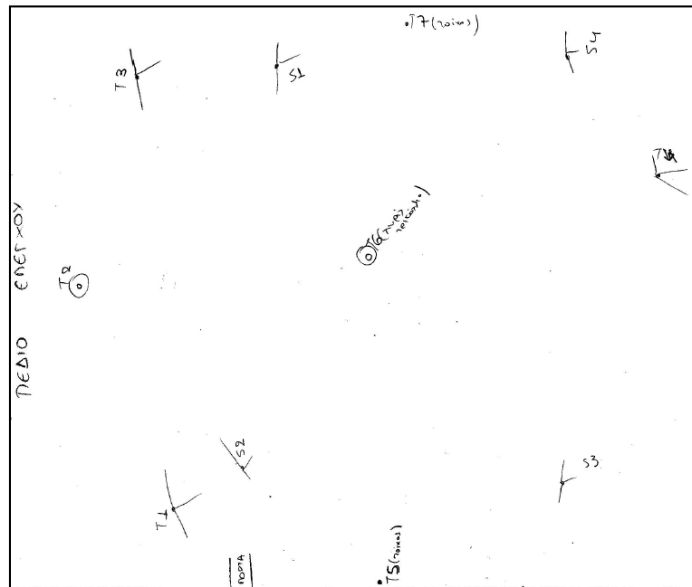
Λογισμικά	Κατηγορίες	Λειτουργία
Cyclone Leica	1 ^η , 2 ^η , 3 ^η	Σάρωση, Διαχείριση, Επεξεργασία, Συνένωση, Γεωαναφορά Μετρήσεις
3DVEM	2 ^η	Συνένωση, Γεωαναφορά
Cloud Compare	3 ^η	Σύγκριση Συνένωσης
MS Excel	1 ^η	Επεξεργασία

Πίνακας 5.1 Κατηγοριοποίηση Λογισμικών με Βάση την Λειτουργία τους

5.3 Πορεία Εργασιών Συλλογής Δεδομένων

Τα απαραίτητα δεδομένα για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας συλλέχτηκαν στην αίθουσα του κέντρου Μετρολογίας στο ισόγειο του κτιρίου Λαμπαδάριου στη Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Ε.Μ.Π. Ο χώρος χρησιμοποιείται κυρίως για τον έλεγχο μετρητικών οργάνων, μετρήσεις ακριβείας, τον προσδιορισμό σχήματος, θέσης και μεγέθους αντικειμένων, τη βαθμονόμηση οργάνων μέτρησης γωνιών, αποστάσεων και εικονοσυντεταγμένων, τη βαθμονόμηση φωτογραφικών μηχανών και τέλος για μετρήσεις ακριβείας για προσδιορισμό παραμορφώσεων, μικρομετακινήσεων και διαστάσεων πάσης φύσεως αντικειμένων. Η συλλογή των δεδομένων δηλαδή οι σαρώσεις και οι υπόλοιπες μετρήσεις έλαβαν χώρα στις 4 Μαΐου του 2015 περίπου από τις 10:00 πμ. έως και τις 17:00 μμ. Έγινε προσπάθεια να καταγραφεί όσο το δυνατόν ακριβέστερα και πληρέστερα ο χώρος της αίθουσας του κέντρου μετρολογίας με έμφαση στην πληρότητα του ήδη εγκατεστημένου πεδίου ελέγχου στην αίθουσα. Ο χώρος που καταγράφηκε αποτελεί έναν εσωτερικό και προστατευόμενο χώρο ιδανικό για υψηλής ακρίβειας σαρώσεις χωρίς εξωτερικές παρεμβολές και θόρυβο στις σαρώσεις λόγο κίνησης αντικειμένων ή ατόμων στη σκηνή της σάρωσης. Για τη διαδικασία της συλλογής των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε ο σαρωτής τεχνολογίας laser Scanstation 2 της Leica Geosystems.

Για τις ανάγκες της εφαρμογής η σάρωση έγινε από τέσσερα σημεία δηλαδή από τέσσερεις στάσεις του σαρωτή (S1, S2, S3, S4).



Εικόνα 5.3 Αυτοσχέδιο Σκαρίφημα Πεδίου (κροκί) Στόχων και Στάσεων

Ακόμα για τις ανάγκες της επερχόμενης συνένωσης χρησιμοποιήθηκαν επτά στόχοι (T1 – T7) συνολικά έτσι ώστε να υπάρχει πλεονασμός παρατηρήσεων, ώστε να μην υπάρξει ανάγκη σε τυχόν πρόβλημα η ανάγκη για επανάληψη των σαρώσεων. Τέλος για τη μέτρηση γεωδαιτικών συντεταγμένων των στόχων μεταξύ άλλων και για την ολοκλήρωση της διαδικασίας της γεωαναφοράς χρησιμοποιήθηκε ο ολοκληρωμένος εικονογεωδαιτικός σταθμός TOPCON GPT – 7003i όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

5.3.1 Συλλογή γεωδαιτικών μετρήσεων

Η αίθουσα διαθέτει σε ένα τμήμα της μια ειδικά διαμορφωμένη περιοχή που χρησιμοποιείται ως πεδίο ελέγχου. Το τμήμα αυτό διαθέτει κατανεμημένους ομοιόμορφα φωτογραφικούς στύλους, όπου επάνω τους έχουν τοποθετηθεί ειδικοί στόχοι, και έναν πίνακα - πλαίσιο με επιπρόσθετους ειδικούς στόχους ομοίως που συνιστούν ένα επίπεδο πεδίο ελέγχου. Οι παραπάνω στόχοι διαθέτουν γνωστές συντεταγμένες σε τοπικό γεωδαιτικό δίκτυο, οι οποίες σύμφωνα με τη σχετική λίστα συντεταγμένων είναι μετρημένες στις 15 Μαρτίου του 2014 με το όργανο TDM 5005 και ακρίβειες συντεταγμένων της τάξης του δέκατου του χιλιοστού. Κρίθηκε σκόπιμο λοιπόν το ενιαίο νέφος της συνένωσης να μπορεί και να γεωαναφερθεί σε αυτό το τοπικό γεωδαιτικό σύστημα για την αξιολόγηση της ποιότητας της γεωαναφοράς. Για το σκοπό αυτό οι μετρήσεις έγιναν με στάση σε τυχαίο σημείο με όνομα K1 και μηδενισμό στο στόχο T1 με ύψος οργάνου το μηδέν έτσι ώστε αρχή του συστήματος να ταυτίζεται με το κέντρο μέτρησης του οργάνου και ύψος στόχου μηδέν καθώς ενδιαφέρει η θέση του στοχευόμενου σημείου. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η στόχευση και μέτρηση όλων των στόχων (T2 – T7) και των απαραίτητων σημείων με

καλή γεωμετρία μεταξύ τους στο χώρο, ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός των παραμέτρων του μετασχηματισμού. Ο ελάχιστος αριθμός ζευγών σημείων στα δύο συστήματα που απαιτείται είναι τα τρία αλλά για λόγους που έχουν αναφερθεί χρησιμοποιούνται συνήθως περισσότερα από τέσσερα και τα υπόλοιπα για έλεγχο του μετασχηματισμού δηλαδή ως σημεία ελέγχου.

5.3.2 Συλλογή δεδομένων σάρωσης

Πριν την εκκίνηση της διαδικασίας αρχικά γίνεται εποπτεία του αντικειμένου – χώρου προς αποτύπωση και κατόπιν επιλέγονται οι κατάλληλες θέσεις - στάσεις που θα τοποθετηθεί ο σαρωτής έτσι ώστε να καλύπτει την περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς αποκρύψεις. Στη συνέχεια επιλέγονται και τοποθετούνται σε κατάλληλες θέσεις οι αντίστοιχοι στόχοι με γνώμονα τη καλή γεωμετρία στο χώρο και τη θέση τους από όλες τις στάσεις του σαρωτή. Οι στόχοι που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται και κατασκευάζονται από την ίδια εταιρεία. Ο σαρωτής αναγνωρίζει αυτόματα τους στόχους με αποτέλεσμα οι θέσεις τους να μπορούν να προσδιοριστούν με μεγάλη ακρίβεια μέσω μιας επιπλέον ειδικής σάρωσης. Οι ειδικοί τεχνητοί στόχοι T1, T3, T4 τοποθετήθηκαν σε τρίποδα, οι στόχοι T5 και T7 τοποθετήθηκαν πάνω στα τοιχώματα της αίθουσας και τέλος οι στόχοι T2 και T6 πάνω σε τριγωνομετρικά σημεία που εδράζονται σε βάρη που υπάρχουν στην αίθουσα, με τη διαφορά πως ο στόχος T6 δεν διέθετε τρικόχλιο. Εφόσον οι στόχοι τοποθετήθηκαν στις προεπιλεγμένες θέσεις τους, το επόμενο βήμα είναι να οριζοντιωθούν έτσι ώστε κατά τη περιστροφή τους προς τον σαρωτή για μεγαλύτερη ακρίβεια μέτρησης, να μην αλλάζουν θέση τα κέντρα τους μεταξύ των σαρώσεων ανά στάση σαρωτή.



Εικόνα 5.4 Ειδικοί Τεχνητοί Στόχοι

Ο σαρωτής τοποθετήθηκε στη πρώτη στάση πάνω στο ειδικό τρίποδο και οριζοντιώθηκε στη προεπιλεγμένη θέση, στη συνέχεια παραμετροποιήθηκε μέσω H/Y με το λογισμικό λειτουργίας και σάρωσης Cyclone. Το κύριο κομμάτι αυτής της παραμετροποίησης αφορά την πυκνότητα του νέφους η οποία καθορίστηκε ανά 1 cm σε απόσταση 10 m. Το λογισμικό άμεσα εμφανίζει ενδεικτικά ανάλογα βέβαια με το παράθυρο σάρωσης που επιλέγεται το πλήθος των σημείων που το αποτελούν. Ακόμα επιλέχθηκε η ακρίβεια της επιπλέον ειδικής σάρωσης των στόχων στο 1 mm. Πριν την εκκίνηση της σάρωσης λήφθηκαν φωτογραφίες της αίθουσας με το σαρωτή, έτσι

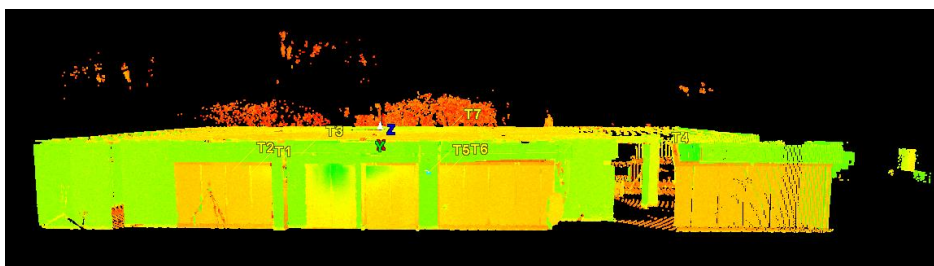
ώστε με την κατάλληλη εντολή μέσα στο περιβάλλον του λογισμικού χειρισμού του σαρωτή να επιλεγεί γραφικά το ακριβές επιθυμητό τμήμα – παράθυρο προς σάρωση. Λόγο των προεπιλογών στον φωτισμό για εξωτερικούς χώρους έπρεπε πρώτα να γίνουν κάποιες επεμβάσεις κυρίως στη φωτεινότητα για τη προσαρμογή της μηχανής σε εσωτερικό χώρο, δηλαδή στην αίθουσα προς σάρωση με σαφώς μειωμένη φωτεινότητα σε σχέση με τον εξωτερικό χώρο. Ένα ακόμα θετικό του εσωτερικού χώρου ήταν η διαθεσιμότητα σε ηλεκτρικό ρεύμα πράγμα που μετέτρεψε σε περιττή ενέργεια την χρήση μπαταριών είτε για τον ηλεκτρονικό υπολογιστή είτε για το σαρωτή. Η οριζόντια γωνία σάρωσης ορίστηκε 360° ενώ η κατακόρυφη ορίστηκε γραφικά από το παράθυρο επιλογής μετά από παρατήρηση των εικόνων που λήφθηκαν από την μηχανή του σαρωτή, με γνώμονα να περικλείει την επιθυμητή περιοχή. Πριν τη κάθε σάρωση οι στόχοι στρέφονται προς το σαρωτή για την επίτευξη των καλύτερων δυνατών ακριβειών σάρωσης, πράγμα αδύνατο για τους στόχους πάνω στα τοιχώματα. Η σάρωση από κάθε στάση διήρκησε περίπου 20 λεπτά, κάθε φορά μετά τη σάρωση ακολουθούσε ειδική σάρωση των εντοπισμένων στόχων όπου έγινε και η αρίθμηση αυτών.

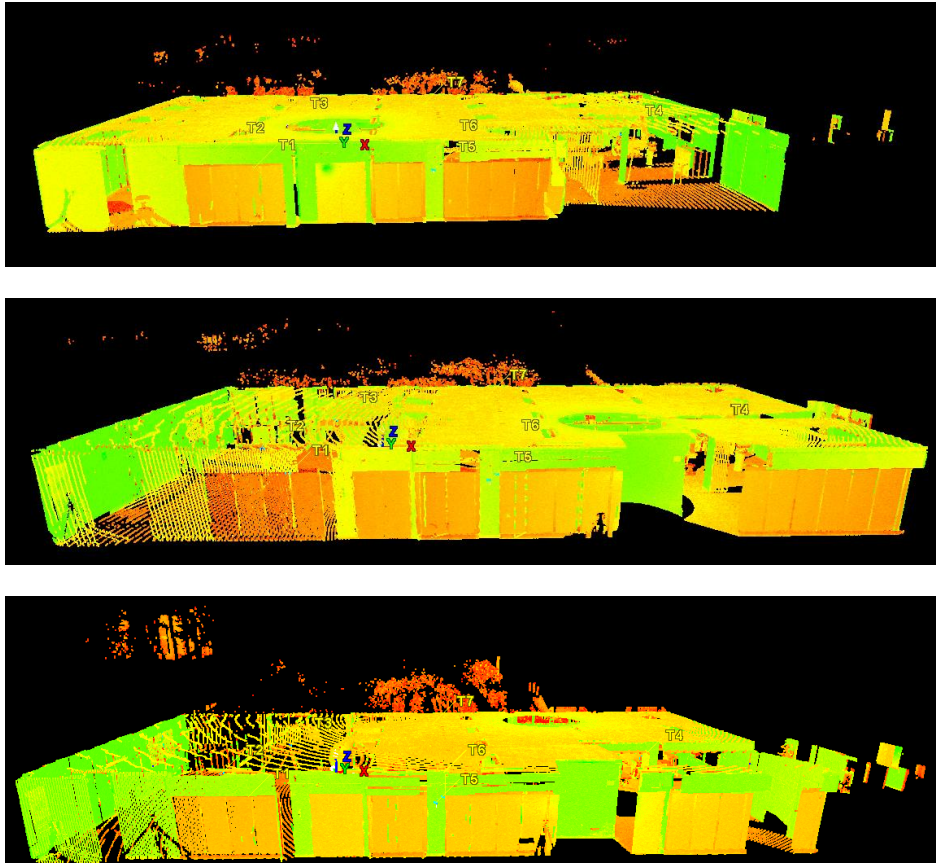


Εικόνα 5.5 Τμήμα του Ειδικού Χώρου προς Αποτύπωση

Παρουσίαση δεδομένων σάρωσης

Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των τεσσάρων τρισδιάστατων σαρώσεων όπως αυτά απεικονίζονται στο λογισμικό της εταιρίας του σαρωτή.





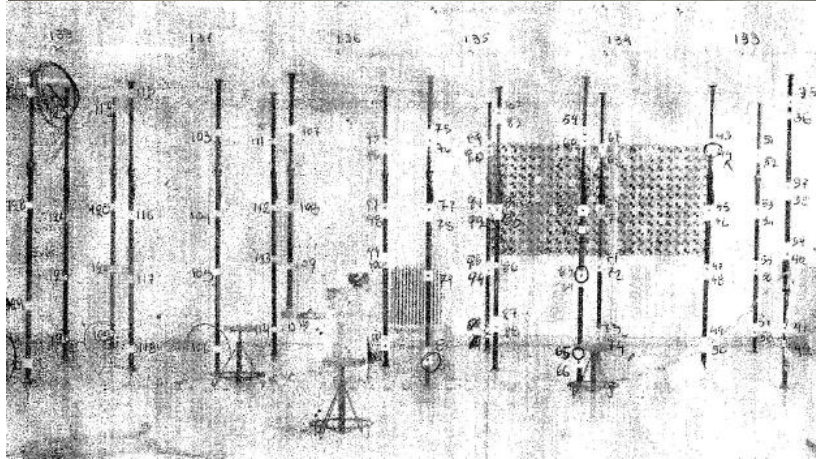
Εικόνα 5.6 Απεικόνιση Νεφών Σάρωσης ανά Στάση (S1-S4)

Μετά το πέρας της διαδικασίας της συλλογής των πρωτογενών δεδομένων ακολουθεί στην επόμενη ενότητα το κομμάτι της επεξεργασίας των παραπάνω μετρήσεων και τα αποτελέσματά τους.

5.3.3 Πεδίο Ελέγχου

Στην αίθουσα προς αποτύπωση όπως και αναφέρθηκε υπάρχει ήδη εγκατεστημένο ένα πεδίο ελέγχου. Το συγκεκριμένο πεδίο μπορεί να χωριστεί σε δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα περιέχει 16 φωτογραφικούς στύλους κατανομημένους στο χώρο όπως φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία. Πάνω στους στύλους εδράζονται ειδικοί στόχοι. Οι ειδικοί στύλοι έχουν το πλεονέκτημα στερεής τοποθέτησης με στήριξη στην οροφή και το πάτωμα καθώς και να διατηρούν την θέση τους ακόμα και μετά από ένα μικρό χτύπημα. Το δεύτερο τμήμα του πεδίου περιλαμβάνει ένα επίπεδο πάνω στον τοίχο της αίθουσας. Πάνω στο επίπεδο αυτό εδράζονται επίσης ειδικοί στόχοι. Η περιοχή του πεδίου είναι περιορισμένη σε πρόσβαση έτσι ώστε να μην υπάρχει μετακίνηση των στόχων από απροσεξία κάποιου ατόμου. Η χρησιμότητα του πεδίου ελέγχου έγκειται στο γεγονός της ύπαρξης ενός πυκνού δικτύου στόχων με σταθερή θέση στο χώρο, οι συντεταγμένες των οποίων μπορούν να αποκτηθούν. Η αίθουσα ακόμα διαθέτει τριγωνομετρικά σημεία για την ένταξη των συντεταγμένων των στόχων σε ένα απόλυτο σύστημα αναφοράς. Το πειραματικό κομμάτι της εργασίας εκμεταλλεύεται το πεδίο ελέγχου και τις συντεταγμένες των στόχων στο

απόλυτο σύστημα αναφοράς στο στάδιο της αξιολόγησης της ορθότητας των μεθοδολογιών της συνένωσης.



Εικόνα 5.7 Πεδίο Ελέγχου

6 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Μετά το στάδιο της συλλογής των δεδομένων το επόμενο στάδιο που ακολουθεί είναι αυτό της επεξεργασίας των δεδομένων ώστε να γίνουν διαχειρίσιμα και εκμεταλλεύσιμα για την τελική εξαγωγή και παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Παρακάτω παρουσιάζεται η πορεία επεξεργασίας των γεωδαιτικών μετρήσεων και των νεφών σημείων. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της σύγκρισης των δύο συνενωμένων νεφών και της αξιολόγησης της ποιότητας της γεωαναφοράς.

6.1 Επεξεργασία Γεωδαιτικών Μετρήσεων

Την μεταφορά των πρωτογενών μετρήσεων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή ακολουθεί η διαμόρφωση αυτών από το αντίστοιχο λογισμικό του οργάνου έτσι ώστε να είναι αναγνώσιμα από ένα τυπικό λογισμικό λογιστικών φύλλων (Excel). Στη συνέχεια έγιναν οι αναγκαίοι υπολογισμοί.

6.1.1 Υπολογισμός Γεωδαιτικών Συντεταγμένων

Αρχικά μέσω των μετρήσεων με θεμελιώδεις γνώσεις και σχέσεις της Γεωδαισίας προσδιορίστηκαν οι τρισδιάστατες συντεταγμένες των σημείων που μετρήθηκαν και παρουσιάζονται ακολούθως. Τα σημεία που παρουσιάζονται είναι οι 7 στόχοι καθώς και τα 6 σημεία που προσδιορίστηκαν από το πεδίο ελέγχου στο τοπικό σύστημα που αναφέρθηκε στη προηγούμενη ενότητα για τους σκοπούς του μετασχηματισμού και κατόπιν της γεωαναφοράς του συνενωμένου νέφους.

	X	Y	Z
T1	0,0000	11,7295	-0,1135
T2	5,0837	9,7933	-0,5319
T3	5,9829	5,7959	-0,1367
T4	-7,4782	-2,0622	-0,1038
T5	-5,5692	8,9579	0,1488
T6	-1,5951	3,8026	-0,5713
T7	1,9649	0,3241	0,6208
127	2,9986	11,4558	0,8886
23	8,7323	10,7135	0,4576
129	2,9798	11,4610	-0,8981
123	4,4062	13,0952	0,8541
44	7,6656	7,7504	0,4924
1	9,9351	9,3696	0,3562

Πίνακας 6.1 Τοπικές Συντεταγμένες Στόχων – Σημείων Πεδίου Ελέγχου

6.1.2 Υπολογισμός παραμέτρων μετασχηματισμού

Για να γίνει δυνατή η εξέταση της ποιότητας της γεωαναφοράς των δύο λογισμικών δηλαδή της ορθότητας των αποτελεσμάτων τους έπρεπε οι στόχοι που χρησιμοποιούνται για την γεωαναφορά να έχουν συντεταγμένες στο τοπικό γεωδαιτικό σύστημα του πεδίου ελέγχου. Τα παραπάνω αποτελέσματα των μετρήσεων βρίσκονται σε ένα τοπικό ανεξάρτητο σύστημα αναφοράς, μέσω όμως των κοινών σημείων που προσδιορίστηκαν, τα οποία είναι γνωστά και στο τοπικό γεωδαιτικό σύστημα είναι δυνατή η εφαρμογή ενός γεωμετρικού μετασχηματισμού μεταξύ των δύο συστημάτων. Το σύστημα αναφοράς είναι προφανώς το γεωδαιτικό και το μετασχηματιζόμενο το τοπικό αυθαίρετο σύστημα, ακόμα λόγω περισσειας παρατηρήσεων για την επίλυση της εκτίμησης των καλύτερων τιμών των παραμέτρων μετασχηματισμού χρησιμοποιείται η ελαχιστοτετραγωνική επίλυση και συγκεκριμένα η μέθοδος μεταβολής των συντεταγμένων (έμμεσες παρατηρήσεις). Για την χρήση και εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου έγινε η παραδοχή πως οι συντεταγμένες των κοινών σημείων του γεωδαιτικού συστήματος αναφοράς δεν έχουν σφάλμα δηλαδή είναι σταθερές και πως οι παρατηρήσεις του συστήματος είναι οι συντεταγμένες των σημείων που συμμετέχουν στην επίλυση στο τοπικό αυθαίρετο σύστημα. Επίσης ως διάνυσμα αγνώστων για την επίλυση θεωρούνται οι 6 παράμετροι (ω , ϕ , κ , Δx , Δy , Δz) του μετασχηματισμού καθώς η κλίμακα είναι κοινή και ίση με 1 μεταξύ των δύο συστημάτων. Σημειώνεται πως οι παρατηρήσεις θεωρήθηκαν ισοβαρείς και ορίστηκε ως a priori μονάδα τυπικού σφάλματος (σ_0) ίση με 1 mm για τα 5 σημεία που συμμετείχαν στη επίλυση. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα της επίλυσης. Συγκεκριμένα η διόρθωση του διανύσματος των αρχικών τιμών ($\delta \mathbf{x}$), το διάνυσμα των καλλίτερων τιμών (\mathbf{x}), ο πίνακας συμμεταβλητότητας (\mathbf{V}_x) και το a posteriori τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους (σ_0).

$\delta \mathbf{x}$	\mathbf{x}	σ_0
-0,0087	0,0001	0,0010
0,0092	-0,0005	
-0,0014	0,5572	σ_0
0,0093	18,9967	0,0014
-0,0126	18,3992	
-0,1600	10,3739	

\mathbf{V}_x	8,1345E-08	-3,3104E-08	3,8420E-09	-3,4565E-08	2,0653E-08	1,0638E-06
	-3,3104E-08	4,5763E-08	-1,3862E-09	1,8710E-08	-1,0187E-08	-6,0598E-07
	3,8420E-09	-1,3862E-09	2,2768E-08	-1,4618E-07	2,3405E-07	4,9296E-08
	-3,4565E-08	1,8710E-08	-1,4618E-07	1,1408E-06	-1,5011E-06	-4,7693E-07
	2,0653E-08	-1,0187E-08	2,3405E-07	-1,5011E-06	2,6108E-06	2,7965E-07
	1,0638E-06	-6,0598E-07	4,9296E-08	-4,7693E-07	2,7965E-07	1,5040E-05

Πίνακας 6.2 Αποτελέσματα Ελαχιστοτετραγωνικής Επίλυσης

6.1.3 Μετασχηματισμός Συντεταγμένων

Εφόσον υπολογίστηκαν παραπάνω οι καλλίτερες τιμές των άγνωστων παραμέτρων του γεωμετρικού μετασχηματισμού τότε μπορεί εύκολα με την εφαρμογή των εξισώσεων του μετασχηματισμού στερεού σώματος να υπολογιστούν οι τρισδιάστατες συντεταγμένες των στόχων και του σημείου ελέγχου. Το σημείο με όνομα **1** χρησιμεύει ως σημείο ελέγχου καθώς δεν έλαβε μέρος στην ελαχιστοτετραγωνική επίλυση, η απόκλιση του 6^{ου} σημείου ως σημείο ελέγχου μετά το μετασχηματισμό με τις δοθείσες συντεταγμένες είναι $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z) = (-0,0002, 0,0002, 0,0012)$ m. Η απόκλιση αυτή είναι πλήρως δικαιολογημένη από την αβεβαιότητα του μετασχηματισμού. Επίσης υπολογίστηκαν μερικές αποστάσεις μεταξύ των στόχων πριν και μετά τον μετασχηματισμό, ώστε να διαπιστωθεί πως δεν άλλαξε το σχήμα κατά τη διαδικασία. Ακολουθούν οι μετασχηματισμένες συντεταγμένες των στόχων στο τοπικό γεωδαιτικό σύστημα καθώς και ο έλεγχος των αποστάσεων:

ΕΣΤΙ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟ	X	Y	Z
T1	25,1995	28,3543	10,2591
T2	28,4902	24,0227	9,8385
T3	27,1395	20,1544	10,2338
T4	11,5592	20,6036	10,2737
T5	19,0073	28,9471	10,5242
T6	19,6536	22,4702	9,8029
T7	20,8361	17,6351	10,9937
1	32,3840	21,0974	10,7245

Πίνακας 6.3 Υπολογισμένες Γεωδαιτικές Συντεταγμένες Στόχων – Σημείων Πεδίου Ελέγχου

ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ	T1-T2	T2-T3	T3-T4	T4-T5	T5-T6	T6-T7	T7-1
ΤΟΠΙΚΟ	5,456	4,116	15,587	11,187	6,549	5,118	12,059
ΑΠΟΛΥΤΟ	5,456	4,116	15,587	11,187	6,549	5,118	12,059

Πίνακας 6.4 Έλεγχος Σχήματος

6.2 Επεξεργασία νεφών σημείων

Μετά τη διαδικασία της σάρωσης στον ηλεκτρονικό υπολογιστή που χρησιμοποιήθηκε για το χειρισμό του σαρωτή έχει δημιουργηθεί μια βάση δεδομένων όπου εμπεριέχονται όλα τα σαρωμένα στοιχεία ανά στάση του οργάνου οργανωμένα αυτόματα σε φακέλους και υπο-φάκελους. Παρακάτω περιγράφονται όλα τα στάδια που ακολουθήθηκαν μετά τη συλλογή των δεδομένων από το πεδίο.

6.2.1 Εξαγωγή - εισαγωγή αρχείων ανεξάρτητων νεφών

Η χρήση του λογισμικού προς σύγκριση 3DVEM προϋποθέτει την εισαγωγή σε αυτό συγκεκριμένης μορφής αρχείων των νεφών σημείων που σαρώθηκαν. Για την επίτευξη του παραπάνω πρέπει πρώτα από το λογισμικό Cyclone να γίνει εξαγωγή

των αρχείων σε συγκεκριμένη μορφή και δομή αρχείων. Η εξαγωγή έγινε σε διαφορετικές μορφές έτσι ώστε να εξεταστεί και να ελεγχθεί η βέλτιστη συμβατότητα, επικοινωνία και αποτέλεσμα κατά την εισαγωγή μεταξύ των δύο λογισμικών. Το αποτέλεσμα της εξαγωγής ήταν η ύπαρξη τεσσάρων αρχείων ανά τύπο αρχείου που περιέχουν τα τέσσερα σαρωμένα νέφη από κάθε στάση του σαρωτή. Στη συνέχεια τα αρχεία αυτά εισήχθησαν σε ένα νέο project του λογισμικού 3DVEM χωρίς κάποιο πρόβλημα για τη περαιτέρω επεξεργασία τους που περιγράφεται παρακάτω και για τα δύο λογισμικά προς σύγκριση. Τελικά οι δομές αρχείων που επιλέχθηκαν για την περαιτέρω επεξεργασία των νεφών σημείων είναι οι δομές PTS και PTX και περιγράφονται παρακάτω. Ο κύριος λόγος επιλογής τους είναι η συμβατότητα με τα διαφορετικά λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν και η πληρότητα της πληροφορίας που φέρουν.

6.2.2 Μορφές Αρχείων

Σε αυτό το σημείο κρίθηκε σκόπιμο να γίνει αναφορά στις διάφορες μορφές αρχείων που αφορούν στα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν και κυρίως αυτά που αφορούν σε ένα νέφος σημείων και κάποιες διαφορές αυτών.

Λογισμικά	Μορφές Αρχείων	
	Εισαγωγή	Εξαγωγή
Cyclone	ptg, coe, cgp, ZFC, ZFS, jpg, png, tif, bmp, las, xml, 3dd, sc2, scan, asc, msh, pts, ptx, sim, svy, txt, xyz	dxl, ptg, ptz, coe, xml, asc, msh, pts, ptx, sim, svy, txt, xyz
3DVEM	pts, asc, txt, obj, ptx, fws, fls, las, laz	Pts, asc, txt, wrl
Cloud Compare	bin, txt, xyz, pts, csv, asc, neu, las, laz, e57, ptx, ply, obj, vtk, stl, off, fbx, dxf, shp, pdms, pdmsmac, mac, out, bmp, cur, gif, ico, jpeg, jpg, pgm, pbm, png, ppm, xbm, xpm, pn, pv, soi, pov, icm, georef, sx, dp, pcd	bin, txt, xyz, pts, csv, asc, neu, las, laz, e57, ply, vtk, shp, pn, pv pov, pcd

Πίνακας 6.5 Συμβατές Μορφές Αρχείων

Δομή αρχείων PTS

Η συγκεκριμένη δομή έχει σχεδιαστεί να αποθηκεύει νέφη σημείων σε μια απλή πιο απτή μορφή από την ανθρώπινη σκοπιά. Κάθε σημείο αποθηκεύεται με μερικές τιμές σε μία γραμμή ενός τέτοιου αρχείου. Μία γραμμή εμπεριέχει τουλάχιστον τρεις τιμές, αναπαριστώντας τις θέσεις του σημείου στους 3 άξονες δηλαδή X, Y, Z του τρισσορθογώνιου συστήματος συντεταγμένων. Αν μια γραμμή έχει 6 ή περισσότερες τιμές τότε οι 3 τελευταίες τιμές αναπαριστούν τη χρωματική πληροφορία με βάθος χρώματος 8 bit στο χρωματικό χώρο RGB δηλαδή με βάθος 256 αποχρώσεων. Πρόσθετες πληροφορίες μπορούν να αποθηκευτούν μετά τις 3 πρώτες τιμές, αυτά τα πρόσθετα δεδομένα μπορεί να είναι μια τιμή της έντασης της ληφθείσας ακτινοβολίας ή μια τιμή και για τη πληροφορία της ποιότητας των σετ των χρωμάτων ή και για το εάν το χρώμα ορίστηκε ορθά. Ακολουθεί ένα παράδειγμα μερικών γραμμών τυπικής

δομής ενός τέτοιου αρχείου δηλαδή με περιεχόμενο συντεταγμένων, ακρίβειας, χρωματικής ορθότητας και χρώματος:

-101.132004	-16.285200	-1.2562656	9672.242155	1	88	69	60
-197.155545	-26.555554	-1.2565565	9854.555548	0	255	0	0

Δομή αρχείων PTX

Ένα αρχείο ptx μπορεί να εμπεριέχει ένα ή περισσότερα νέφη σημείων. Κάθε νέφος σημείων ξεκινά με μια επικεφαλίδα (header). Κάθε γραμμή που ακολουθεί περιγράφει ένα σημείο στο νέφος. Το αρχείο περιέχει 7 στήλες όταν περιέχεται και χρωματική πληροφορία ενώ 4 στήλες όταν αυτή δεν υπάρχει. Στη περίπτωση των 7 στηλών οι 3 πρώτες τιμές είναι οι συντεταγμένες X, Y, Z ακολουθεί η τιμή της έντασης και οι 3 τιμές των χρωμάτων στο σύστημα RGB αντίστοιχα. Οι τιμές των χρωμάτων κυμαίνονται από 0 - 255. Η ένταση βρίσκεται στο διάστημα [0, 1] και οι τιμές χωρίζονται με κενό. Ακολουθεί ένα παράδειγμα της δομής αρχείων ptx.

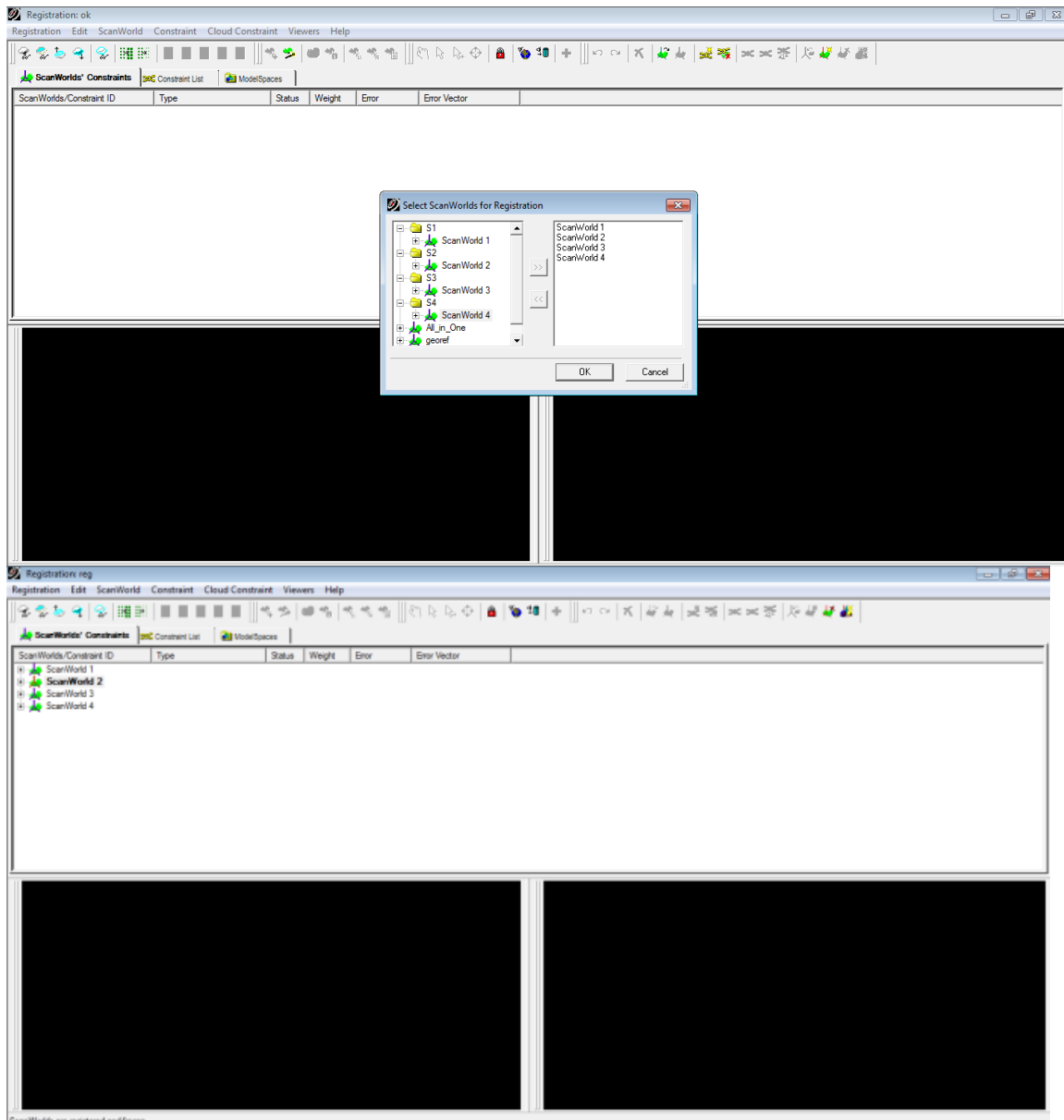
4.148210	12.076586	1.381819	0.461036	89	87	112
4.147804	12.075443	1.382720	0.458854	89	87	112

6.2.3 Συνένωση νεφών

Η επόμενη διαδικασία που ακολούθησε ήταν η συνένωση των νεφών ανεξάρτητα για τα δύο λογισμικά δηλαδή τις δύο μεθόδους που βρίσκονται υπό εξέταση στη συγκεκριμένη εργασία. Προηγήθηκε η συνένωση με το εμπορικό λογισμικό της εταιρείας του σαρωτή και μετά ακολούθησε το εμπορικό λογισμικό 3DVEM.

Cyclone

Αρχικά με το λογισμικό της εταιρείας του σαρωτή η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι πολύ απλή και εύκολη να γίνει ακόμα και από άπειρους χρήστες χωρίς την ανάγκη για ιδιαίτερες γνώσεις. Για καλύτερο έλεγχο της διαδικασίας τα αρχεία που περιέχουν τα νέφη των σαρώσεων μετονομάστηκαν και τους δόθηκε όνομα και αρίθμηση αντίστοιχη με τη στάση στην οποία ανήκουν, δηλαδή ScanWorld 1-4. Αμέσως μετά μέσα στη βάση δεδομένων της σάρωσης δημιουργήθηκε το αρχείο της συνένωσης με σχετική εντολή (create registration). Μέσα στο πλαίσιο - παράθυρο της συνένωσης, που εμφανίζει το λογισμικό, εισάγονται τα επιθυμητά νέφη προς συνένωση, κατόπιν ορίζεται το νέφος αναφοράς (set Home ScanWorld), το οποίο συγκεκριμένα ορίστηκε το σαρωμένο νέφος από τη στάση με όνομα S2 δηλαδή το ScanWorld 2. Μετά από αυτόν τον καθορισμό τα υπόλοιπα τρία νέφη θα μετασχηματιστούν ως προς το παραπάνω νέφος αναφοράς.



Εικόνα 6.1 Εισαγωγή Νεφών προς Συνένωση (Cyclone)

Το επόμενο βήμα είναι η αυτόματη εισαγωγή περιορισμών μεταξύ των νεφών με αντίστοιχη εντολή στο λογισμικό (auto-add constraints). Για τον πλήρη έλεγχο της ορθότητας αυτής της αυτόματης ενέργειας δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να κάνει επισκόπηση των αντιστοιχισμένων στοιχείων - στόχων μεταξύ των σαρώσεων αλλά και να δει εάν τα ονόματα που δόθηκαν κατά τη σάρωση στους στόχους έχουν αντιστοιχηθεί ορθά. Κατόπιν σχετικής εντολής (registration) ξεκινά η διαδικασία της συνένωσης που διαρκεί μερικά δευτερόλεπτα, το λογισμικό δίνει κάποια περιορισμένα στατιστικά και πληροφορίες για τις δεσμεύσεις σχετικά με τη διαδικασία που μόλις διενεργήθηκε και μια πιο εκτενή αναφορά σε αρχείο κειμένου κατόπιν σχετικής εντολής. Ακόμα το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα για αποθήκευση και επισκόπηση του συνενωμένου νέφους μέσα στο περιβάλλον του.

Διερεύνηση και Αξιολόγηση Μεθοδολογιών Συνένωσης Νεφών Σημείων

Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Type	Status	Weight	Err	Err Vector
TargetID: T4	ScanWorld 1	ScanWorld 2	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001 m	(0.000, 0.001, 0.000) m
TargetID: T7	ScanWorld 1	ScanWorld 2	Coincident: Vertex-Vertex	Off	1.0000	0.029 m	(0.028, -0.009, 0.001) m
TargetID: T6	ScanWorld 1	ScanWorld 3	Coincident: Vertex-Vertex	Off	1.0000	0.002 m	(0.001, 0.002, -0.001) m
TargetID: T2	ScanWorld 1	ScanWorld 3	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001 m	(0.001, 0.000, 0.000) m
TargetID: T3	ScanWorld 1	ScanWorld 3	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.000 m	(0.000, 0.000, 0.000) m
TargetID: T1	ScanWorld 1	ScanWorld 3	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.000 m	(0.000, 0.000, 0.000) m
TargetID: T5	ScanWorld 1	ScanWorld 3	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001 m	(-0.001, -0.001, 0.000) m
TargetID: T4	ScanWorld 1	ScanWorld 3	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001 m	(0.000, 0.001, 0.000) m
TargetID: T7	ScanWorld 1	ScanWorld 3	Coincident: Vertex-Vertex	Off	1.0000	0.029 m	(0.028, -0.009, 0.001) m
TargetID: T6	ScanWorld 1	ScanWorld 4	Coincident: Vertex-Vertex	Off	1.0000	0.004 m	(-0.003, 0.003, 0.000) m
TargetID: T2	ScanWorld 1	ScanWorld 4	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001 m	(0.001, 0.000, 0.000) m
TargetID: T3	ScanWorld 1	ScanWorld 4	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001 m	(0.000, -0.001, 0.000) m
TargetID: T1	ScanWorld 1	ScanWorld 4	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.000 m	(0.000, 0.000, 0.000) m
TargetID: T5	ScanWorld 1	ScanWorld 4	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.000 m	(0.000, 0.000, 0.000) m
TargetID: T4	ScanWorld 1	ScanWorld 4	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002 m	(-0.001, 0.001, 0.000) m
TargetID: T6	ScanWorld 2	ScanWorld 3	Coincident: Vertex-Vertex	Off	1.0000	0.002 m	(0.000, 0.002, 0.000) m
TargetID: T1	ScanWorld 2	ScanWorld 3	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.000 m	(0.000, 0.000, 0.000) m
TargetID: T2	ScanWorld 2	ScanWorld 3	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001 m	(0.001, -0.001, 0.000) m
TargetID: T3	ScanWorld 2	ScanWorld 3	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.000 m	(0.000, 0.000, 0.000) m
TargetID: T4	ScanWorld 2	ScanWorld 3	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001 m	(0.001, 0.000, 0.000) m
TargetID: T5	ScanWorld 2	ScanWorld 3	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001 m	(-0.001, 0.000, 0.000) m
TargetID: T7	ScanWorld 2	ScanWorld 3	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001 m	(0.000, 0.001, 0.000) m
TargetID: T6	ScanWorld 2	ScanWorld 4	Coincident: Vertex-Vertex	Off	1.0000	0.005 m	(-0.004, 0.003, 0.000) m
TargetID: T1	ScanWorld 2	ScanWorld 4	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.000 m	(0.000, 0.000, 0.000) m
TargetID: T2	ScanWorld 2	ScanWorld 4	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001 m	(0.001, 0.000, 0.000) m
TargetID: T3	ScanWorld 2	ScanWorld 4	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001 m	(0.000, -0.001, 0.000) m

Εικόνα 6.2 Υπολειπόμενα Σφάλματα Στόχων (Cyclone)

Μετά τη πρώτη συνένωση το μέγιστο σφάλμα σε στόχο ήταν στον T7 με τιμή 2,9 cm πράγμα που σημαίνει λάθος σκόπευση για αυτό το λόγο απενεργοποιήθηκε ο συγκεκριμένος περιορισμός – στόχος και επαναλήφθηκε η διαδικασία. Μετά την επανάληψη χωρίς τον στόχο T7 να επηρεάζει πια το αποτέλεσμα το μέγιστο σφάλμα 4 mm το δίνει ο στόχος T6 μεταξύ σαρώσεων των στάσεων S1 – S4 και S2 – S4. Οπότε λόγω πλεονασμού στόχων μπορεί να απενεργοποιηθεί και αυτή η δέσμευση του στόχου T6 για μικρότερη αβεβαιότητα. Τώρα το μέγιστο σφάλμα κυμαίνεται στα 2 mm. Για καλύτερη κατανόηση του αποτελέσματος εξήχθη η αναφορά της συνένωσης. Στην αναφορά αναγράφεται το μέσο απόλυτο σφάλμα στο 1mm για τους ενεργοποιημένους στόχους ενώ 1cm για το σύνολο των στόχων, ακόμα δίνεται λίστα όλων των σφαλμάτων ανά συνδυασμό σάρωσης και στόχου καθώς και τις παραμέτρους του μετασχηματισμού των νεφών στο σύστημα του νέφους αναφοράς. Φυσικά το νέφος της στάσης S2 δεν μετασχηματίζεται καθώς είναι το νέφος αναφοράς όπως φαίνεται και παρακάτω.

Cyclone	R1			deg	m	
	-0,520711	0,853732	0,001528	Ω	-0,0158 ΔX	2,781
ScanWorld 1	-0,853730	-0,520713	0,001977	Φ	-0,1423 ΔY	5,846
	0,002484	-0,000275	0,999997	K	238,6199 ΔZ	-0,004
	R2			deg	m	
	1	0	0			Ω
ScanWorld 2	0	1	0	Φ	0,0000 ΔY	0,000
	0	0	1	K	0,0000 ΔZ	0,000
	R3			deg	m	
	0,858286	0,513113	-0,007758			Ω
ScanWorld 3	-0,513147	0,858000	-0,022726	Φ	0,2867 ΔY	-2,160
	-0,005004	0,023486	0,999712	K	329,1259 ΔZ	0,004

	R4				deg		m
	-0,084317	0,996335	-0,014403	Ω	0,8047	ΔX	9,962
ScanWorld 4	-0,996427	-0,084377	-0,003644	Φ	0,2777	ΔY	3,163
	-0,004846	0,014044	0,999890	K	265,1632	ΔZ	-0,004

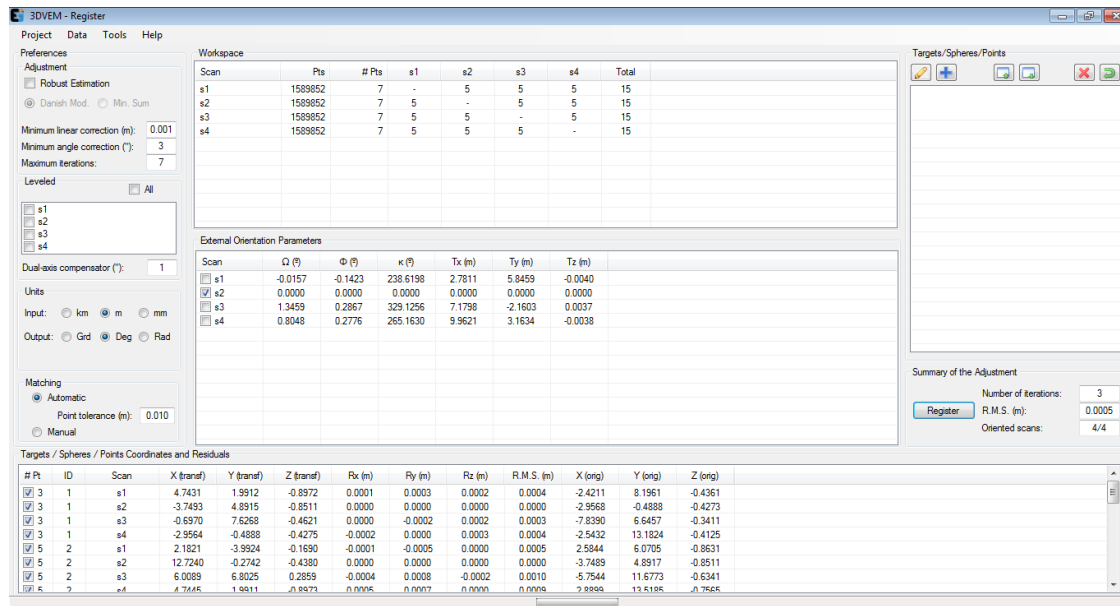
Πίνακας 6.6 Υπολογισμός Παραμέτρων Μετασχηματισμού (Cyclone)

Τέλος με την κατάλληλη επιλογή γίνεται ο μετασχηματισμός έτσι ώστε να μπορεί να γίνει προεπισκόπηση μέσα στο λογισμικό του τρισδιάστατου συνενωμένου νέφους.

3DVEM - Register

Αρχικά έγινε εξαγωγή των αρχείων των σαρώσεων από τις τέσσερις στάσεις στο λογισμικό Cyclone. Στη συνέχεια τα τέσσερα νέφη εισάγονται στο λογισμικό 3DVEM με αντίστοιχη εντολή (import files). Μόλις ολοκληρωθεί η φόρτωση των τεσσάρων νεφών το λογισμικό εμφανίζει το σύνολο των σημείων που υπάρχουν μέσα στο νέφος. Το λογισμικό χρειάζεται την εισαγωγή των συντεταγμένων των στόχων ανά σάρωση μέσω φόρτωσης αρχείου με σχετική εντολή (Import points) καθώς δεν αναγνώρισε αυτόματα τους στόχους. Οι συντεταγμένες των στόχων εξήχθησαν από το αρχείο των σαρώσεων σε μορφή txt, καθώς είχαν την ονοματολογία που τους δόθηκε κατά τη σάρωση. Στο επόμενο βήμα επιλέγεται αυτόματη συνταύτιση των στόχων με ανοχή 0,010 m. Οι θέσεις των στόχων έχουν προσδιοριστεί με ακρίβεια 1 mm από την επιπλέον ειδική σάρωση, οπότε το κατώφλι των 10 mm κρίθηκε ικανοποιητικό και λογικό για τον αυτόματο εντοπισμό και την επικύρωση των ομόλογων στοιχείων μεταξύ των σαρώσεων. Τα αρχεία συντεταγμένων των στόχων ακολουθούν συγκεκριμένη δομή (ID X Y Z). Η αντιστοίχιση ουσιαστικά γίνεται από το λογισμικό για τους στόχους που δόθηκαν. Στην ονοματολογία των στόχων δεν χρησιμοποιείται ο χαρακτήρας T διότι το λογισμικό αναγνωρίζει μόνο ψηφία. Εφόσον γίνει και αυτό το στάδιο και ελεγχθεί η ορθότητα της αντιστοίχισης τότε κατόπιν εντολής στο λογισμικό γίνεται η συνένωση. Το λογισμικό δίνει άμεσα το μέσο τετραγωνικό σφάλμα της συνένωσης και τις επαναλήψεις που χρειάστηκε καθώς και τις παραμέτρους μετασχηματισμού ανά σάρωση. Ακόμα δίνει σε λίστα το σφάλμα ανά στόχο σε κάθε σάρωση και δυνατότητα από - επιλογής κάποιας δέσμευσης. Το νέφος αναφοράς επιλέγεται αυτόματα από το λογισμικό, το νέφος που προσφέρει τη καλύτερη λύση, πράγμα που μπορεί να αλλάξει στη συνέχεια. Το νέφος αναφοράς και εδώ είναι το νέφος που προέρχεται από τη στάση S2. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας το λογισμικό δίνει το πλήθος των επαναλήψεων που είναι 3, το πλήθος των επιτυχώς μετασχηματισμένων σαρώσεων που είναι 4 στα 4 και τέλος το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (R.M.S.) ίσο με 0.0116 μέτρα με ενεργοποιημένες όλες τις δεσμεύσεις. Για κάθε δέσμευση, δηλαδή χρησιμοποιούμενο στόχο, δίνεται και το σφάλμα του με μέγιστο σφάλμα να εμφανίζει και πάλι ο στόχος T7 όπως και προηγούμενα, μετά από δοκιμές και ελέγχους η συνένωση επιλύθηκε με μέγιστο σφάλμα 1,3 mm και μέσο σφάλμα 0,5 mm, με 3 επαναλήψεις και 4 στις 4 σαρώσεις να προσανατολίζονται στο σύστημα αναφοράς.

Διερεύνηση και Αξιολόγηση Μεθοδολογιών Συνένωσης Νεφών Σημείων



Εικόνα 6.3 Υπολειπόμενα Σφάλματα Στόχων (3DVEM)

Η εξαγωγή της αναφοράς της συνένωσης σε αρχείο κειμένου περιλαμβάνει περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με την ποιότητα της συνένωσης, δίνει δηλαδή περισσότερα στοιχεία και στατιστικά από αυτά μέσα στο περιβάλλον εργασίας του λογισμικού. Τα κυριότερα στοιχεία της αναφοράς είναι οι παράμετροι του μετασχηματισμού μαζί με τις αβεβαιότητές τους.

3DVEM	R1				deg	Σφάλμα		m	Σφάλμα
	-0,520714	0,853730	0,001530	Ω	-0,0158	0,0045	ΔX	2,7811	0,0003
ScanWorld 1	-0,853727	-0,520716	0,001977	Φ	-0,1424	0,0024	ΔY	5,8459	0,0003
	0,002485	-0,000277	0,999997	K	238,6197	0,0031	ΔZ	-0,004	0,0003
	R2				deg	Σφάλμα		m	Σφάλμα
	1	0	0	Ω	0	0,0045	ΔX	0,000	0,0003
ScanWorld 2	0	1	0	Φ	0	0,0024	ΔY	0,000	0,0003
	0	0	1	K	0	0,0031	ΔZ	0,000	0,0003
	R3				deg	Σφάλμα		m	Σφάλμα
	0,858283	0,513117	-0,007760	Ω	1,3459	0,0045	ΔX	7,1800	0,0003
ScanWorld 3	-0,513152	0,857997	-0,022727	Φ	0,2867	0,0024	ΔY	-2,1600	0,0003
	-0,005004	0,023488	0,999712	K	329,1256	0,0031	ΔZ	0,0040	0,0003
	R4				deg	Σφάλμα		m	Σφάλμα
	-0,084320	0,996335	-0,014404	Ω	0,8048	0,0045	ΔX	9,9621	0,0003
ScanWorld 4	-0,996427	-0,084380	-0,003644	Φ	0,2776	0,0024	ΔY	3,1634	0,0003
	-0,004846	0,014045	0,999890	K	265,1630	0,0031	ΔZ	-0,0038	0,0003

Πίνακας 6.7 Υπολογισμός Παραμέτρων Μετασχηματισμού (3DVEM)

Σύγκριση των Υπολογισμένων Παραμέτρων Μετασχηματισμού

Εφόσον προηγήθηκε η συνένωση των τεσσάρων νεφών με τις δύο διαφορετικές τεχνικές μπορεί να γίνει σύγκριση των διαφορών στις παραμέτρους του μετασχηματισμού. Παρακάτω φαίνονται οι διαφορές όπως προέκυψαν από την

εφαρμογή της ίδιας διαδικασίας με τα ίδια στοιχεία για τον υπολογισμό των παραμέτρων που περιγράφουν τον μετασχηματισμό στερεού σώματος. Από τον παρακάτω πίνακα είναι εμφανές πως οι διαφορές είναι ιδιαίτερα μικρές καθώς εντοπίζονται στο τέταρτο δεκαδικό της μοίρας.

Cyclone - 3DVEM		ΔΙΑΦΟΡΑ			
		deg		m	
ScanWorld 1	ΔΩ	0,0000	ΔΧ	-0,0001	
	ΔΦ	0,0001	ΔΥ	0,0001	
	ΔΚ	0,0002	ΔΖ	0,0000	
		deg		m	
ScanWorld 2	ΔΩ	0	ΔΧ	0,000	
	ΔΦ	0	ΔΥ	0,000	
	ΔΚ	0	ΔΖ	0,000	
		deg		m	
ScanWorld 3	ΔΩ	-0,0001	ΔΧ	0,0000	
	ΔΦ	0,0000	ΔΥ	0,0000	
	ΔΚ	0,0003	ΔΖ	0,0000	
		deg		m	
ScanWorld 4	ΔΩ	-0,0001	ΔΧ	-0,0001	
	ΔΦ	0,0001	ΔΥ	-0,0004	
	ΔΚ	0,0002	ΔΖ	-0,0002	

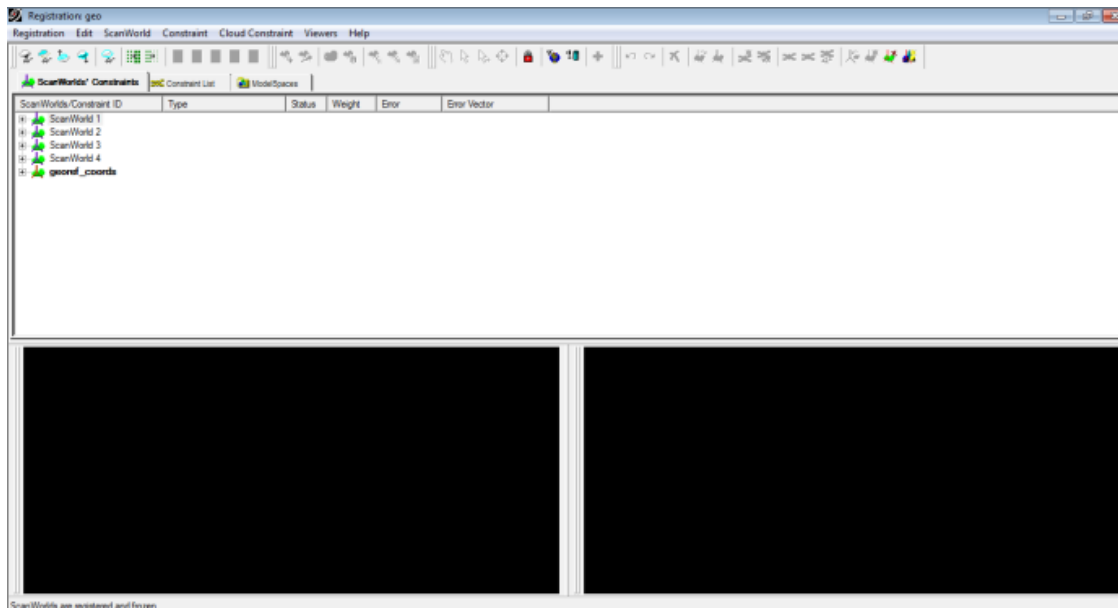
Πίνακας 6.8 Υπολογισμός Διαφοράς Παραμέτρων Μετασχηματισμού (Cyclone -3DVEM)

6.2.4 Γεωαναφορά νεφών

Στη συνέχεια κρίθηκε σκόπιμο να γίνει η γεωαναφορά των συνενωμένων νεφών σύμφωνα με τις συντεταγμένες των στόχων στο τοπικό γεωδαιτικό σύστημα όπως αυτές υπολογίστηκαν παραπάνω. Πάλι η διαδικασία έγινε ανεξάρτητα για τα δύο λογισμικά δηλαδή τις δύο μεθόδους που αυτά υλοποιούν.

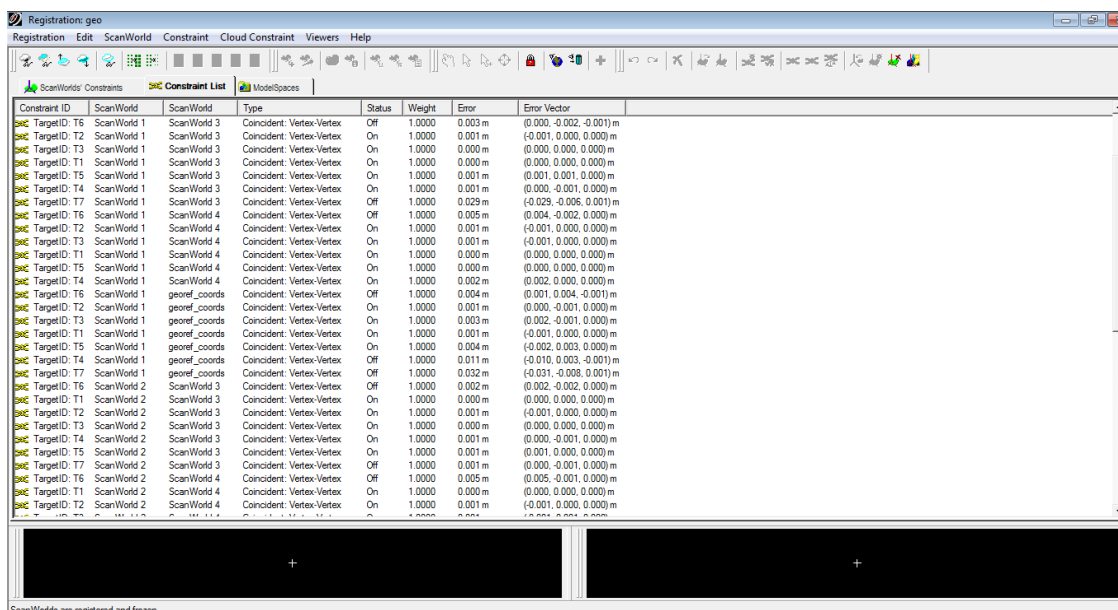
Cyclone

Πριν την έμμεση γεωαναφορά το λογισμικό απαιτεί την εισαγωγή ενός αρχείου όπου περιέχονται οι συντεταγμένες των στόχων στο γεωδαιτικό σύστημα. Οι συντεταγμένες για να εισαχθούν πρέπει να καταγραφούν σε συγκεκριμένη δομή σε ένα απλό αρχείο κειμένου, ώστε να μπορούν να διαβαστούν από το λογισμικό, η αναγνώσιμη μορφή που επιλέχθηκε είναι 4 στήλες χωρισμένες με κενό, η πρώτη στήλη έχει το όνομα του στόχου και οι επόμενες 3 τις συνιστώσες X, Y, Z της θέσης των στόχων στο σύστημα γεωαναφοράς. Η εισαγωγή των συντεταγμένων των στόχων για τη γεωαναφορά γίνεται στο φάκελο της βάσης δεδομένων των σαρώσεων μέσω του λογισμικού. Στη συνέχεια, επιλέγεται να ανοίξει άλλη μια φορά το παράθυρο της συνένωσης που αναφέρθηκε παραπάνω και εισάγεται επιπλέον ως ένα νέφος σάρωσης το αρχείο με τις συντεταγμένες γεωαναφοράς των στόχων.



Εικόνα 6.4 Εισαγωγή Νεφών προς Γεωαναφορά (Cyclone)

Ακολουθείται η ίδια διαδικασία με τη συνένωση με τη μόνη διαφορά πως το συγκεκριμένο αρχείο συντεταγμένων επιλέγεται αυτό τώρα ως το νέφος αναφοράς έτσι ώστε τα τέσσερα νέφη να μετασχηματιστούν ως προς το δικό του σύστημα αναφοράς, που είναι το τοπικό γεωδαιτικό σύστημα της επιθυμητής γεωαναφοράς.



Εικόνα 6.5 Υπολειπόμενα Σφάλματα Στόχων Γεωαναφοράς (Cyclone)

Με το πέρας της συνένωσης εμφανίζονται και πάλι κάποια στατιστικά και πληροφορίες με μέγιστο σφάλμα να παρατηρείται και πάλι στο στόχο T7 με τιμή 2,4 cm. Στη συνέχεια μετά την επανάληψη της συνένωσης μέγιστο σφάλμα παρουσιάζει ο στόχος T4 με σφάλμα 9 mm. Μετά από δοκιμές σχετικά με τους στόχους που λαμβάνονται υπόψη στην γεωαναφορά επιτυγχάνεται μέγιστο σφάλμα 3 mm και σύμφωνα με την αναφορά μέσο απόλυτο σφάλμα το 1 mm και 1,1 cm για τις απενεργοποιημένες δεσμεύσεις. Στην αναφορά ακόμα βρίσκονται οι παράμετροι μετασχηματισμού όπως και πριν αλλά τώρα οδηγούν στη γεωαναφορά του

συνενωμένου νέφους στο τοπικό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς. Για καλύτερη κατανόηση του αποτελέσματος εξήχθη η αναφορά της συνένωσης και αναφέρει ως μέσο απόλυτο σφάλμα 1mm για τους ενεργοποιημένους στόχους ενώ 0,9 cm για το σύνολο των στόχων, ακόμα δίνεται λίστα όλων των σφαλμάτων ανά συνδυασμό σάρωσης και στόχο καθώς και τις παραμέτρους του μετασχηματισμού των νεφών στο σύστημα του νέφους αναφοράς. Φυσικά το νέφος της γεωαναφοράς δεν μετασχηματίζεται.

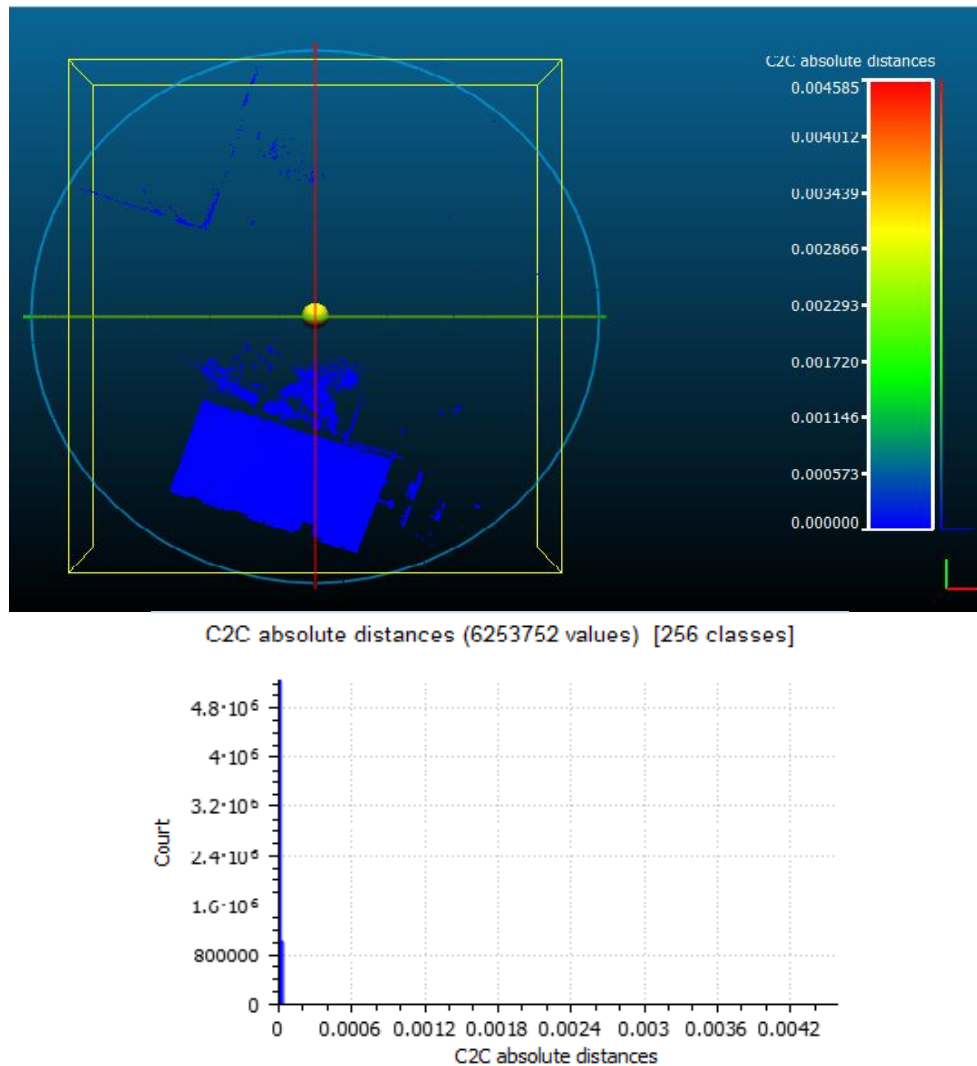
3DVEM - Register

Εφόσον προηγήθηκε το κομμάτι της εισαγωγής των αρχείων των σαρώσεων από τις τέσσερις στάσεις και του αρχείου της γεωαναφοράς, επιλέγεται αυτόματη συνταύτιση των στόχων με ανοχή 0,010 m και σε κάθε σάρωση φορτώνεται το αντίστοιχο αρχείο κειμένου που περιλαμβάνει τις συντεταγμένες στο σύστημα της κάθε σάρωσης των στόχων της. Το συγκεκριμένο αρχείο ακολουθεί συγκεκριμένη δομή όμοια με αυτή που αναφέρθηκε προηγουμένα. Εφόσον γίνει και αυτό το στάδιο και ελεγχθεί η ορθότητα της αντιστοίχισης τότε κατόπιν εντολής στο λογισμικό γίνεται η συνένωση με τελικό σύστημα αναφοράς το νέφος των γεωαναφερμένων στόχων. Το λογισμικό δίνει το μέσο τετραγωνικό σφάλμα της συνένωσης και της επαναλήψεις που χρειάστηκε καθώς και τις παραμέτρους μετασχηματισμού ανά σάρωση. Ακόμα δίνει σε λίστα το σφάλμα ανά στόχο σε κάθε σάρωση και δυνατότητα από-επιλογής κάποιας δέσμευσης. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας το λογισμικό δίνει το πλήθος των επαναλήψεων που είναι 2, το πλήθος των επιτυχώς μετασχηματισμένων σαρώσεων που είναι 5 στα 5 και τέλος το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (R.M.S.) ίσο με 0.0102 m με ενεργοποιημένες όλους τους στόχους. Για κάθε στόχο δίνεται και το σφάλμα του με μέγιστο σφάλμα να εμφανίζει και πάλι ο στόχος T7 όπως και προηγουμένα, μετά από δοκιμές και ελέγχους η συνένωση επιλύθηκε με μέγιστο σφάλμα 7,1 mm και μέσο σφάλμα 1,4 mm, με 2 επαναλήψεις και 5 στις 5 σαρώσεις να προσανατολίζονται στο σύστημα αναφοράς. Η εξαγωγή της αναφοράς της συνένωσης σε αρχείο κειμένου περικλείει περισσότερες λεπτομέρειες και σφάλματα και δίνει περισσότερα στατιστικά από αυτά μέσα στο περιβάλλον εργασίας του λογισμικού. Τα κυριότερα στοιχεία της αναφοράς είναι οι παράμετροι του μετασχηματισμού μαζί με τις αβεβαιότητες τους.

6.3 Αξιολόγηση Συνενωμένων Νεφών Σημείων

Μετά το πέρας της συνένωσης στα δύο λογισμικά με σύστημα αναφοράς αυτό του νέφους S2 τα δύο συνενωμένα πλέον νέφη ευρισκόμενα σε ενιαίο τοπικό σύστημα συντεταγμένων εξάγονται για την επίτευξη σύγκρισης μεταξύ τους. Δηλαδή γίνεται μια προσπάθεια για τον έλεγχο της μεταξύ τους εσωτερικής ακρίβειας της διαδικασίας της συνένωσης με τις δύο διαφορετικές προσεγγίσεις. Το λογισμικό που χρησιμοποιείται αναφέρθηκε προηγουμένα και είναι το Cloud Compare, όπου τα δύο αρχεία μπορούν να αναγνωστούν σε μορφή PTS. Το συγκεκριμένο λογισμικό διαθέτει τη δυνατότητα σύγκρισης νεφών, εξαγωγής και οπτικοποίησης άμεσα των αποτελεσμάτων αποχής που έχουν αυτά μεταξύ τους.

Το αποτέλεσμα της διαδικασίας ήταν το παρακάτω:



Εικόνα 6.6 Αποτέλεσμα Σύγκρισης CloudCompare

Το αποτέλεσμα δείχνει πολύ μικρές διαφορές της τάξης των μερικών μm. Η πρώτη εικόνα δείχνει με τη χρήση μιας έγχρωμης διαβάθμισης των κλάσεων που δημιούργησε το λογισμικό. Οι διαφορές βρίσκονται στη πρώτη χρωματική κλάση. Η δεύτερη εικόνα δείχνει ένα γράφημα με το πλήθος των σημείων ανά μέγεθος απόλυτης αποχής μεταξύ των νεφών.

6.4 Αξιολόγηση Γεωαναφερμένων Νεφών Σημείων

Μετά το πέρας της συνένωσης - γεωαναφοράς στα δύο λογισμικά τα δύο γεωαναφερμένα πλέον νέφη βρίσκονται σε ενιαίο τοπικό γεωδαιτικό σύστημα συντεταγμένων. Τα γεωαναφερμένα νέφη αξιολογούνται σε σχέση με την ποιότητα της γεωαναφοράς. Η αξιολόγηση επιτυγχάνεται με τη μέτρηση σημείων του πεδίου ελέγχου που εμφανίζονται και στα γεωαναφερμένα νέφη. Για την αξιολόγηση ουσιαστικά της ποιότητας γεωαναφοράς των λογισμικών και κατ' επέκταση των δύο διαφορετικών μεθόδων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Cyclone. Το γεωαναφερμένο

νέφος από το λογισμικό 3DVEM εξάχθηκε σε μορφή PTS, ώστε να υπάρχει και η πληροφορία του χρώματος. Οι μετρημένες συντεταγμένες από τα νέφη συγκρίνονται με αυτές των γεωδαιτικών μετρήσεων του πεδίου ελέγχου. Στο περιβάλλον απεικόνισης του λογισμικού εφόσον εισήχθησαν τα γεωαναφερμένα πια νέφη έγιναν οι απαραίτητες στοχεύσεις σημείων του πεδίου ελέγχους της αίθουσας όπου έγινε η σάρωση. Οι σκοπεύσεις έγιναν είτε με απεικόνιση του χρώματος από της λήψης της κάμερας του σαρωτή είτε με την απεικόνιση του χρώματος από την ένταση της ληφθείσας ακτίνας. Το πλήθος σημείων είναι 18 ανά νέφος ώστε να υπάρχει ένα επαρκές δείγμα. Επίσης κρίθηκε σκόπιμο οι μετρήσεις να αφορούν τα ίδια σημεία και στα δύο νέφη.

Παρακάτω δίνονται τα αποτελέσματα της διαφοράς των συντεταγμένων από τις σκοπεύσεις μέσα στο λογισμικό σε σχέση με τις συντεταγμένες των ιδίων σημείων στο πεδίο ελέγχου από τις γεωδαιτικές μετρήσεις.

CYCLONE	ΣΗΜΕΙΟ	X	Y	Z	\Delta X	\Delta Y	\Delta Z
1	20	32,139	22,504	10,896	0,002	0,003	0,004
2	32	32,020	23,168	10,730	0,001	0,000	0,002
3	19	32,181	22,280	10,821	0,003	0,001	0,008
4	13	32,267	21,796	9,824	0,000	0,004	0,004
5	10	32,277	21,721	10,491	0,003	0,000	0,006
6	12	32,284	21,724	10,100	0,004	0,002	0,002
7	31	32,028	23,162	10,539	0,004	0,008	0,006
8	63	28,359	21,958	9,754	0,004	0,002	0,007
9	81	28,121	23,227	9,038	0,002	0,002	0,002
10	76	28,103	23,22	10,881	0,001	0,004	0,008
11	109	27,930	24,384	9,829	0,000	0,005	0,004
12	118	28,816	26,176	8,998	0,002	0,002	0,001
13	117	28,813	26,177	9,642	0,001	0,002	0,001
14	73	30,574	22,048	9,106	0,004	0,006	0,001
15	71	30,568	22,032	9,817	0,004	0,003	0,002
16	70	30,566	22,033	10,249	0,005	0,001	0,003
17	69	30,565	22,033	10,321	0,005	0,001	0,000
18	79	28,110	23,229	10,247	0,003	0,003	0,005
				M.O.	0,003	0,003	0,004
				S	0,0004	0,0005	0,0006

Πίνακας 6.9 Συντεταγμένες Σημείων Ελέγχου - Διαφορές (Cyclone)

Διερεύνηση και Αξιολόγηση Μεθοδολογιών Συνένωσης Νεφών Σημείων

3DVEM	ΣΗΜΕΙΟ	X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ
1	20	32,136	22,502	10,898	0,001	0,005	0,002
2	32	32,017	23,165	10,732	0,004	0,003	0,000
3	19	32,177	22,278	10,821	0,001	0,003	0,008
4	13	32,268	21,797	9,825	0,001	0,005	0,003
5	10	32,278	21,722	10,488	0,002	0,001	0,009
6	12	32,287	21,720	10,101	0,007	0,002	0,004
7	31	32,026	23,165	10,538	0,002	0,005	0,005
8	63	28,360	21,960	9,753	0,003	0,004	0,008
9	81	28,120	23,227	9,038	0,001	0,002	0,002
10	76	28,102	23,220	10,881	0,000	0,004	0,008
11	109	27,929	24,383	9,830	0,001	0,006	0,005
12	118	28,817	26,175	8,998	0,001	0,001	0,001
13	117	28,814	26,178	9,640	0,000	0,001	0,001
14	73	30,575	22,047	9,106	0,005	0,006	0,001
15	71	30,568	22,030	9,817	0,004	0,005	0,002
16	70	30,567	22,034	10,248	0,006	0,002	0,005
17	69	30,566	22,033	10,321	0,006	0,001	0,000
18	79	28,111	23,228	10,247	0,004	0,002	0,005
				M.O.	0,003	0,003	0,004
				S	0,0005	0,0004	0,0007

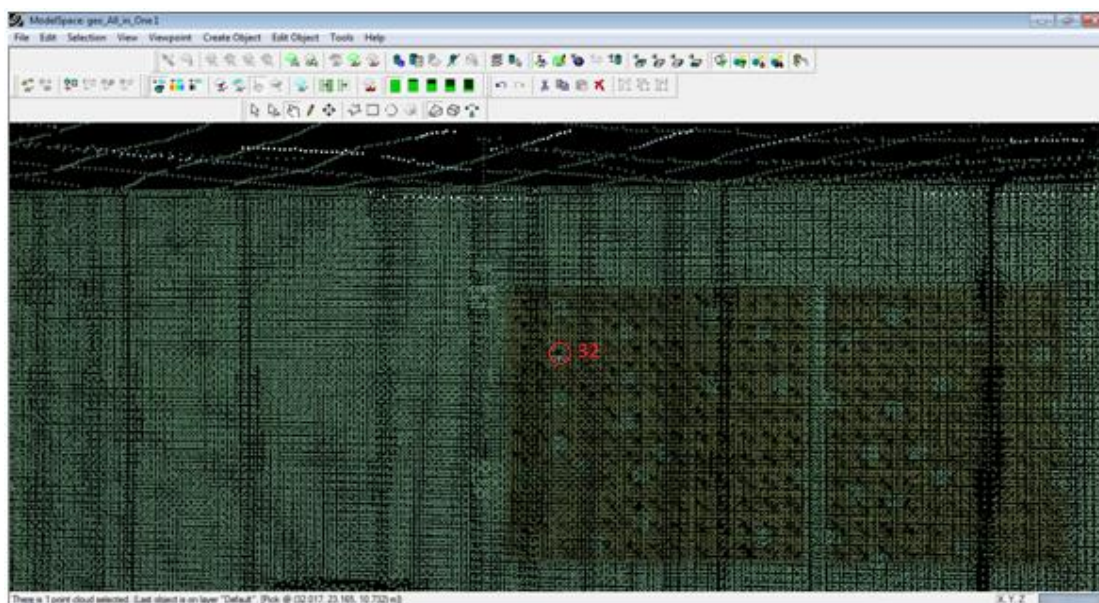
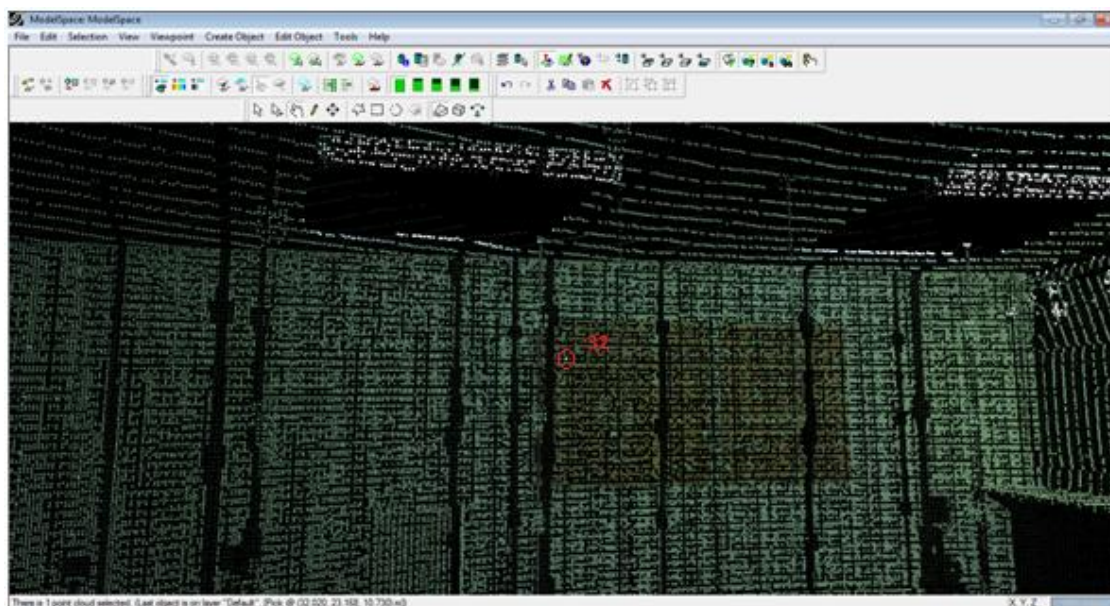
Πίνακας 6.10 Συντεταγμένες Σημείων Ελέγχου - Διαφορές (3DVEM)

ΔΕΙ	X	Y	Z
20	32,137	22,507	10,900
32	32,021	23,168	10,732
19	32,178	22,281	10,829
13	32,267	21,792	9,828
10	32,280	21,721	10,497
12	32,280	21,722	10,098
31	32,024	23,170	10,533
63	28,363	21,956	9,761
81	28,119	23,225	9,040
76	28,102	23,224	10,890
109	27,930	24,389	9,825
118	28,818	26,174	8,999
117	28,814	26,179	9,641
73	30,570	22,042	9,107
71	30,564	22,035	9,815
70	30,561	22,032	10,253
69	30,5603	22,0316	10,3214
78	28,1066	23,2257	10,2419

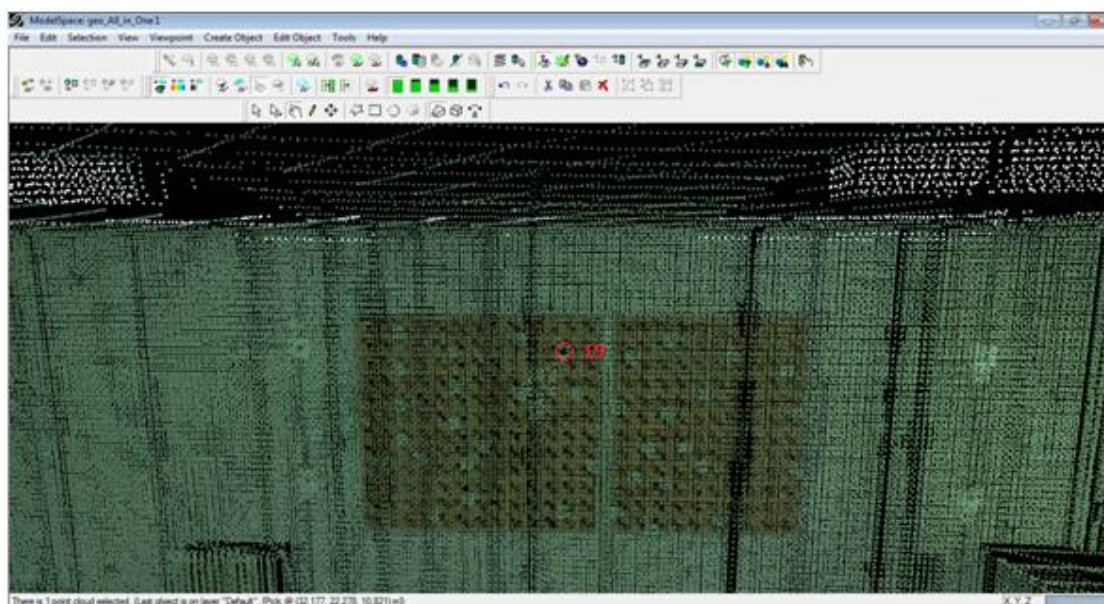
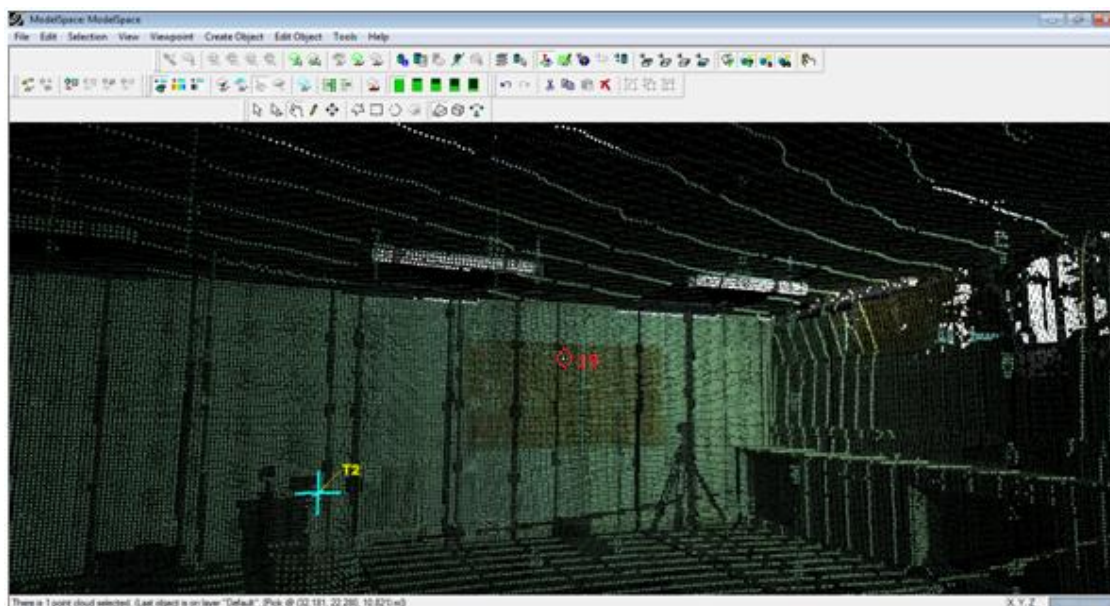
Πίνακας 6.11 Συντεταγμένες Σημείων Ελέγχου (Γεωδαιτικές Μετρήσεις)

Από τους παραπάνω πίνακες – αποτελέσματα προκύπτει πως η μέση τιμή ανά διεύθυνση είναι για το X και το Y στα 3 mm με τυπική απόκλιση 0,4 και 0,5 mm αντίστοιχα για το Cyclone και 0,5 και 0,4 mm για το 3DVEM, για τη διεύθυνση Z η μέση τιμή είναι 4 mm με τυπική απόκλιση 0,6 και 0,7 mm αντίστοιχα για το Cyclone και το 3DVEM. Η διαφορά που εμφανίζεται και στα δύο λογισμικά μπορεί να θεωρηθεί ίδια, πράγμα αναμενόμενο μετά και τη σύγκριση της συνένωσης τους που δεν έδειξε κάποια σημαντική διαφορά. Ακόμα η διαφορά είναι απόλυτα δικαιολογημένη καθώς βρίσκεται μέσα στα όρια της αβεβαιότητας των διαδικασιών που προηγήθηκαν πριν την αξιολόγηση. Συγκεκριμένα η σάρωση δίνει αβεβαιότητα της τάξης των μερικών χιλιοστών, μετά προστίθεται αβεβαιότητα με την μέτρηση των στόχων μαζί με την γεωαναφορά και τέλος με την σκόπευση μέσα στο γεωαναφερμένο νέφος.

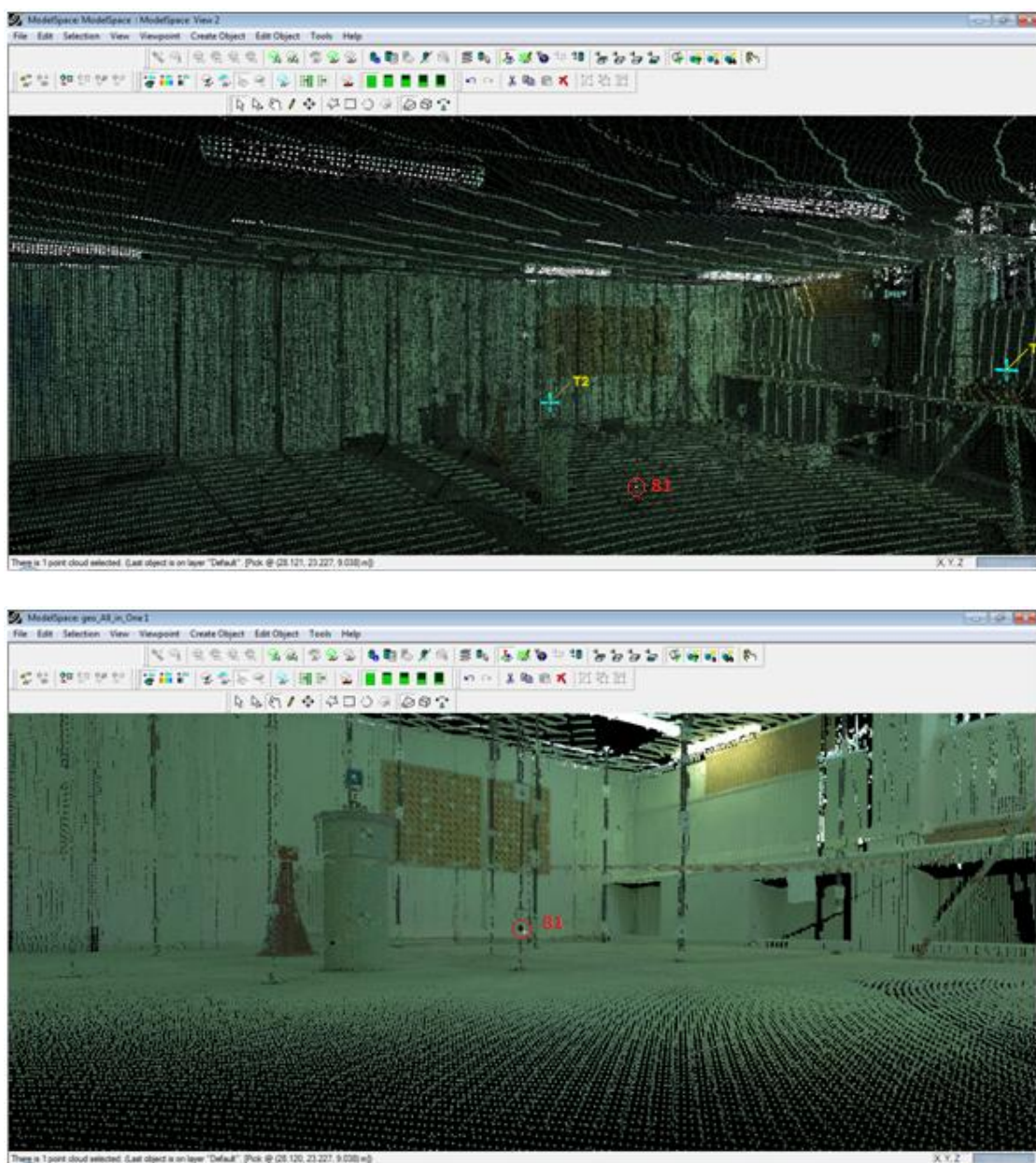
Βασική δυσκολία στη στόχευση των σημείων ήταν η δυσκολία ακριβούς προσδιορισμού του σημείου που ταυτίζεται με το κέντρο του κάθε στόχου στο πεδίο ελέγχου. Παρακάτω εμφανίζονται μερικές εικόνες από τη διαδικασία της σκόπευσης των σημείων. Στο κάτω αριστερό μέρος το λογισμικό Cyclone εμφανίζει τις συντεταγμένες του επιλεγμένου σημείου. Οι συντεταγμένες αυτές χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της ποιότητας.



Εικόνα 6.7 Σκόπηση Σημείου Νο. 32 νέφος Cyclone – 3DVIEW αντίστοιχα



Εικόνα 6.8 Σκόπευση Σημείου Νο. 19 νέφος Cyclone – 3DVEM αντίστοιχα



Εικόνα 6.9 Σκόπευση Σημείου Νο. 81 νέφος Cyclone – 3DVEM αντίστοιχα

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο της ολοκλήρωσης της παρούσης διπλωματικής εργασίας, διατυπώνονται μια σειρά από συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν από την ενασχόληση κυρίως με το αντικείμενο της συνένωσης νεφών σημείων. Τα συμπεράσματα αυτά, μορφώθηκαν μέσα από την μελέτη της βιβλιογραφίας, την πρακτική τριβή με την επεξεργασία των δεδομένων σάρωσης, αλλά και μέσα από τις δυσχέρειες και τα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν κατά την εκτέλεση των εφαρμογών. Συγκεκριμένα αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας διερεύνησης και αξιολόγησης δύο διαφορετικών μεθόδων υπολογισμού των παραμέτρων του γεωμετρικού μετασχηματισμού έτσι ώστε τελικά να επιτευχθεί η συνένωση και γεωαναφορά των νεφών σημείων. Στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται η σύγκριση των δύο μεθόδων μεταξύ τους και ανάδειξη των διαφορών τους καθώς και τον πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων που εμφανίζει η μία μέθοδος σε σχέση με την άλλη. Στη συνέχεια αναφέρονται τα συμπεράσματα της εφαρμογής του πειραματικού μέρους που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, προκειμένου να διερευνηθούν οι δυνατότητες των μεθόδων.

7.1 Συγκριτική Αξιολόγηση του Συνόλου των Μεθόδων Συνένωσης

Αρχικά κρίθηκε σκόπιμη η σύγκριση όλων των σύγχρονων μεθόδων συνένωσης νεφών που αναφέρθηκαν και στο θεωρητικό υπόβαθρο μεταξύ τους για λόγους πληρότητας.

Πρώτα γίνεται σύντομη βιβλιογραφική σύγκριση των λεγόμενων εικονιστικών μεθόδων. Η πρώτη μέθοδος που αναφέρεται η μέθοδος του Roth (1999), δηλαδή η χρήση εικόνων έντασης της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας laser μειονεκτεί έναντι των κλασικών εικόνων, ως προς την ευκολία ανίχνευσης χαρακτηριστικών σημείων. Η μέθοδος του Brusco (2005), η οποία χρησιμοποιεί τις εικόνες TSI (εικόνες spin με πραγματική υφή), πετυχαίνει την αυτοματοποίηση του πρώτου μόνο σταδίου της συνένωσης νεφών σημείων, δηλαδή 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, οι έγχρωμες εικόνες υπερτερούν αφού σε αυτές εμπεριέχεται περισσότερη πληροφορία μέσω των τριών καναλιών. Η μέθοδος του Sagawa υπολογίζει από τις εικόνες τα χαρακτηριστικά της υφής για κάθε ένα κόμβο. Στη συνέχεια αναζητά ομολογίες μεταξύ κόμβων με ισχυρά χαρακτηριστικά. Τέλος, η μέθοδος του Wu (2008) χρησιμοποιεί τις αναλλοιώτες περιοχές VIP. Η μέθοδος του Wu υπολογίζει τις αναλλοιώτες περιοχές 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, 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. Η ποικιλία και οι διαφορές αυτές που εντοπίζονται μεταξύ τους οφείλονται στην μη ύπαρξη καθιερωμένης πρακτικής για την επίτευξη του στόχου τους. Οι μέθοδοι αυτοί επιδέχονται πολλές βελτιώσεις και προτάσεις.

Από την άλλη πλευρά, οι δύο μέθοδοι που διερευνήθηκαν και πειραματικά κατατάσσονται στις κλασικές μεθόδους συνένωσης νεφών σημείων δηλαδή η ελαχιστοτετραγωνική μέθοδος και ο αλγόριθμος του επαναληπτικά κοντινότερου σημείου. Ουσιαστικά στηρίζουν αποκλειστικά τη λειτουργία τους σε τρισδιάστατη πληροφορία, χωρίς την ανάγκη για εικονιστική πληροφορία άρα και φωτογραφική μηχανή. Το παραπάνω χαρακτηριστικό αποτελεί την ειδοποιό διαφορά τους, με τις εναλλακτικές μεθόδους που περιγράφηκαν παραπάνω. Οι δύο κλασικές αλλά και πάντα επίκαιρες αυτές μέθοδοι χαρακτηρίζονται κυρίως από την ανάγκη εκτίμησης καλών προσεγγιστικών τιμών για τη παροχή πληροφορίας για τη σχετική θέση των νεφών σημείων και αποφυγή προβλημάτων εφαρμογής, με αποτέλεσμα την αδυναμία πλήρους αυτοματοποίησης της διαδικασίας (Roth, 1999). Οι κλασικές μέθοδοι ακόμα αντιμετωπίζουν αρκετές δυσκολίες σε περιπτώσεις με υψηλής συμμετρίας αντικείμενα σε σχέση με το σχήμα τους, εμφανίζουν απαιτήσεις για μεγάλες επικαλύψεις μεταξύ των νεφών, και ακόμα μεγαλύτερες όσο αυξάνεται η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας των αντικειμένων (Van Gool, 2002, Grün, 2005). Τα παραπάνω δείχνουν πως συνδυαστικές τεχνικές, δηλαδή των κλασικών με τις πιο σύγχρονες εικονιστικές, φαίνεται να υπερτερούν σε σχέση όμως μόνο με το βαθμό αυτοματοποίησης και όχι με την τελική ποιότητα του προϊόντος, έναντι των κλασικών μεθόδων συνένωσης. Βέβαια για τις κλασικές μεθόδους υπάρχουν σήμερα πολλά αξιόπιστα λογισμικά με μεγάλη ευκολία στη χρήση τους. Επίσης ο πιθανώς προγραμματισμός και διενέργεια τους γίνεται σχετικά απλά και δεν απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό κόστος.

7.2 Συμπεράσματα

Μετά το πειραματικό στάδιο της εργασίας και τα αποτελέσματα του σειρά έχει η αξιολόγηση τους και η καταγραφή των συμπερασμάτων. Αρχικά κρίνεται πως η διαδικασία της συλλογής νεφών σημείων έχει αυτοματοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό και πραγματοποιείται με μεγάλη ταχύτητα και ευκολία. Μέσα από την σύγκριση των πλέον σύγχρονων μοντέλων σαρωτών διαπιστώνει κανείς πως οι δυνατότητες των επίγειων σαρωτών laser αυξάνουν με ταχύτετους ρυθμούς λόγω της ανάλογης προόδου στα χρησιμοποιούμενα ηλεκτρονικά μέσα τα οποία ενσωματώνει το σύστημα., πράγμα που αυξάνει τη διείδυση τους στις εφαρμογές του Τοπογράφου Μηχανικού. Τα νέα συστήματα μπορούν να σαρώνουν με υψηλούς ρυθμούς έχοντας ως συνέπεια την συλλογή ιδιαίτερα περιεκτικών σε πληροφορία και λεπτομερών νεφών σημείων, κατάλληλα και για κάθε άλλη εφαρμογή. Τα διατιθέμενα μοντέλα σαρωτών στην αγορά την παρούσα χρονική στιγμή είναι αρκετά και οι κατασκευάστριες εταιρίες παρέχουν διαφορετικά ποιοτικά μοντέλα τα οποία είναι βελτιστοποιημένα τεχνολογικά για γενική χρήση και για χρήσεις ειδικού σκοπού. Το

κόστος τους βέβαια μπορεί να είναι σχετικά υψηλό ανάλογα με τα μοντέλο αγοράς. Η συνεχής εξέλιξη όμως της τεχνολογίας και ο ανταγωνισμός μεταξύ των εταιρειών, οδηγεί το κόστος των σαρωτών να εμφανίζει πτωτική τάση, ενώ παράλληλα αυξάνεται το πεδίο εφαρμογής τους, γεγονός που σε βάθος χρόνου καθιστά την προμήθεια ενός τέτοιου συστήματος οικονομικά συμφέρουσα. Στο κομμάτι των εργασιών πεδίου η παραμονή του συνεργείου κρίνεται ικανοποιητική σε σχέση με το μέγεθος της πληροφορίας που συλλέγεται. Η διαδικασία χειρισμού του οργάνου είναι σχετικά απλή όπως και η διαχείριση όλου του όγκου της πληροφορίας μέσα από το λογισμικό του σαρωτή. Οι εταιρείες παροχής σαρωτών και λογισμικών υποστήριξης νεφών σημείων προσφέρουν αναλυτικούς οδηγούς που προσφέρουν ακόμα μεγαλύτερη ευκολία χρήσης. Στο κυρίως κομμάτι των συμπερασμάτων γίνεται πρώτα αναφορά στην σύγκριση της συνένωσης των δύο λογισμικών που υιοθετούν τις δύο διαφορετικές προσεγγίσεις. Τα αριθμητικά αποτελέσματα της σύγκρισης των νεφών όπως προέκυψαν από το CloudCompare δείχνουν πως πρακτικά τα δύο λογισμικά δίνουν τα ίδια αποτελέσματα. Το αποτέλεσμα ήταν αναμενόμενο από τη στιγμή της σύγκρισης του πίνακα στροφής και των μεταθέσεων που εφαρμόσε για τον μετασχηματισμό το κάθε λογισμικό. Η σύγκριση των συνενωμένων νεφών έδωσε πολύ μικρές αποκλίσεις μεταξύ των προϊόντων των δύο λογισμικών. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στην ποιότητα της γεωαναφοράς. Ο μόνος τρόπος αξιολόγησης της πραγματικής ακρίβειας του γεωαναφερμένου νέφους σημείων μπορεί να διαπιστωθεί και να ποσοτικοποιηθεί, μόνο με τη χρήση σημείων ελέγχου, τα οποία συλλέγονται προ ή μετά την σάρωση, όπως και έγινε. Τα σημεία αυτά πρέπει να παρουσιάζουν μια καλή κατανομή, σε όλο το εύρος της περιοχής σάρωσης, προκειμένου η διαδικασία ελέγχου να παρέχει όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Τα δύο λογισμικά κατά τον έλεγχο σε σχέση με το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς εμφάνισαν πρακτικά ίδιες αποκλίσεις με μικρότερη οριακά τυπική απόκλιση να εμφανίζει το δείγμα σημείων ελέγχου του λογισμικού Cyclone. Τα αποτελέσματα σε κάθε περίπτωση κρίνονται ικανοποιητικά σε σχέση με την ορθότητα τους καθώς βρίσκονται μέσα στο όριο της a priori αβεβαιότητας του συνόλου των μετρήσεων και των διαδικασιών που μεσολαβούν.

Στη βάση των λογισμικών το 3DVEM υπερτερεί κυρίως προσφέροντας την δυνατότητα συνένωσης νεφών από διαφορετικές πηγές με μεγάλη απλότητα και ευελιξία. Το παραπάνω στοιχείο αποτελεί και την βασική διαφορά – πλεονέκτημα μεταξύ των λογισμικών. Ακόμα η μορφή και δομή των αποτελεσμάτων καθώς και ο τρόπος επίλυσης και τα στατιστικά που την συνοδεύουν συνάδουν περισσότερο με το επιστημονικό υπόβαθρο και τις ανάγκες του Τοπογράφου Μηχανικού. Από την άλλη το Cyclone προσφέρει μια πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση στο θέμα της διαχείρισης και συνένωσης νεφών καθώς περιέχει και το εικονιστικό περιβάλλον χωρίς καμία άλλη προσθήκη. Σε κάθε περίπτωση δεν εντοπίστηκε κάποια σημαντική διαφορά στα αποτελέσματα καθαυτά παρά μόνο στα στοιχεία που τα συνοδεύουν. Ως τελικό συμπέρασμα μπορεί να εξαχθεί πως όποια μέθοδος και να επιλεγεί το τελικό προϊόν δεν θα υπολείπεται ποιότητας αλλά και ευκολίας κατά τη πορεία των εργασιών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

1. Αποστολόπουλος Β., 2010. Υπολογισμός της υπερεκσκαφής στο μέτωπο σήραγγας με τη χρήση επίγειου σαρωτή laser – Εφαρμογή στην υπό διάνοιξη σήραγγα Τεμπών Τ1. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.
2. Γεωργόπουλος Α., Χλιβερού Ρ., Στοιχεία Φωτογραφικής Τεχνικής. Σπουδαστικές Σημειώσεις, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.
3. Καρράς Γ., 1998. Γραμμικοί Μετασχηματισμοί Συντεταγμένων στην Φωτογραμμετρία. Σπουδαστικές Σημειώσεις, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.
4. Κατωγιάννης Χ., 2013. Γεωμετρική τεκμηρίωση του ΒΑ αναλλήματος του θεάτρου του Διονύσου και του βόρειου τοίχου του ωδείου του Περικλέους. Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.
5. Κυπαρίσση Β., 2011. Συνένωση Νεφών Σημείων από Ομολογίες Εικόνων. Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.
6. Πατιάς Π. 1999. Εισαγωγή στη Φωτογραμμετρία. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
7. Σίσκας Β., 2012. Χρήση επίγειου σαρωτή για την αποτύπωση αρχαίου πύργου στην Αγία Μαρίνα Κέας. Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.
8. Σκουρή Ι., 2010. Χρήση Επίγειου Σαρωτή Laser σε Συνήθεις Γεωδαιτικές Εφαρμογές. Διπλωματική Εργασία ΣΑΤΜ ΕΜΠ.
9. Τσακίρη Μ., Σταθάς Δ., Μπίθας Α., Βαλάνη Α., 2005. Ανάπτυξη μεθοδολογίας ελέγχου επίγειων σαρωτών laser. Πρακτικά 1^{ου} τακτικού εθνικού συνεδρίου μετρολογίας.
10. Φράγκος Π., 2013. Αρχές λειτουργίας εναέριων σαρωτών LiDAR και εφαρμογές τους στην παραγωγή φωτογραμμετρικών προϊόντων. Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.
11. Χριστοδούλου Ο., 2014. Χρήση επίγειου σαρωτή στη ναυπηγική γεωμετρική τεκμηρίωση παραδοσιακού σκάφους. Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.

Διεθνής

1. Arayici Y., 2007. An approach for real world data modeling with the 3D terrestrial laser scanner for built environment. Automation in Construction Volume 16, Issue 16, pp. 816–829.
2. 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.
3. Boehler W., Bortas V., and Marbs A., 2003. Investigating laser scanner accuracy, XIXth CIPA Symposium, Antalya, Turkey.
4. Chen Y., Medioni G., 1992. Object modelling by registration of multiple range images. Image and Vision Computing, 10 (3), pp. 145-155.
5. Eggert D., Lorusso A., Fisher R., 1997. Estimating 3-D rigid body transformations: a comparison of four major algorithms. Machine Vision and Applications Volume 9, pp.272 -290.

6. Gasinkova S., Gasinec J., Weiss G., Labant S., 2011. Application of Robust Estimation Methods for the Analysis of Outlier Measurements. *Geoscience Engineering*, Volume LVII, No.3, p. 14-29.
7. GiFLE, 2015. 3DVEM – Register GEO. User Manual, Department of Cartographic Engineering, Geodesy and Photogrammetry, Polytechnic University of Valencia.
8. Gressin A., Mallet C., David N., 2012. Improving 3D LiDAR Point Cloud Registration Using Optimal Neighborhood Knowledge. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume I-3, XXII ISPRS Congress, Melbourne, Australia.
9. Grün A., 1985. Adaptive least squares correlation: A powerful image matching technique. *Remote Sensing and Cartography* 14 (3), pp. 175-187.
10. Grün A., Akca D., 2005. Least squares 3D surface and curve matching. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 59 (3), pp. 151-174.
11. Horn B., 1987. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 4, Issue 4, pp. 629-642
12. Johnson A., 1997. Spin-Images: A Representation for 3-D Surface Matching. Thesis. Carnegie Mellon University, USA.
13. Kumar R., Hanson A., 1994. Robust Methods for Estimating Pose and a Sensitivity Analysis. *CVGIP: Image Understanding* Vol.60, No.3, pp. 313 – 342.
14. Lichti D. Gordon S. Stewart M., 2002. Ground Based Laser Scanner: Operation, Systems and Applications, *Geomatica* Vol.56 No. I pp.21 -33.
15. Manasir K., Fraser C., 2006. Registration of terrestrial laser scanner data using imagery. *The Photogrammetric Record* 21(115), pp. 255-268.
16. Moussa W., 2014. Intergration of Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser scanning for cultural heritage data recording. *Deutsche Geodätische Kommission*, No. 725, München, Germany, ISBN 978-3-7696-5137-9.
17. Papalampros L., 2013. Evaluation of a Terrestrial Laser Scanner Methodology for the Determination of Forest Inventory Parameters. Master Thesis, Aristotle University of Thessaloniki.
18. Reshetyuk Y., 2009. Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning. Doctoral thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Sweden.
19. 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.
20. Santana Quintero M., Lerma J. L., Heine E., Van Genechten B., 2008. Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning: Training material based on practical applications. *Universidad Politecnica de Valencia Editorial*.
21. 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*.
22. Sariyildiz E., Cakiray E. and Temeltas H., 2011. A Comparative Study of Three Inverse Kinematic Methods of Serial Industrial Robot Manipulators in the Screw

- Theory Framework. International Journal of Advanced Robotic Systems Vol. 8, No. 5, pp. 9-24.
23. Toldo R., Beinat A., and Crosilla F., 2010. Global registration of multiple point clouds embedding the Generalized Procrustes Analysis into an ICP framework. 3DPVT Conference
 24. 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.
 25. Van Pelt W., Stewart H., Peterson R., Roberts A., Worst J., 1970. Laser Fundamentals and Experiments. U.S. Department of Health, Education and Welfare, pp. 1 -24.
 26. Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M., 2012. ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. Geomorphology 179, pp. 300 - 314.
 27. Wild M., 2010. Recent Development of the Iterative Closest Point (ICP) Algorithm - An Overview of the Years 2002 to 2007. Studies on Mechatronics, ETH.
 28. Wu C. Clipp, B., Xiaowei Li. Frahm, J.-M., Pollefeys, M., 2008. 3D model matching with Viewpoint-Invariant Patches (VIP), Computer Vision and Pattern Recognition, 2008. CVPR
 29. Zhang Z., 1992. Iterative point matching for registration of free form curves. INRIA Technical Report RR-1658.
 30. Zhang, Z., 1994. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces. International Journal of Computer Vision, 13 (2), pp. 119-152.

Διαδικτυακοί Τόποι

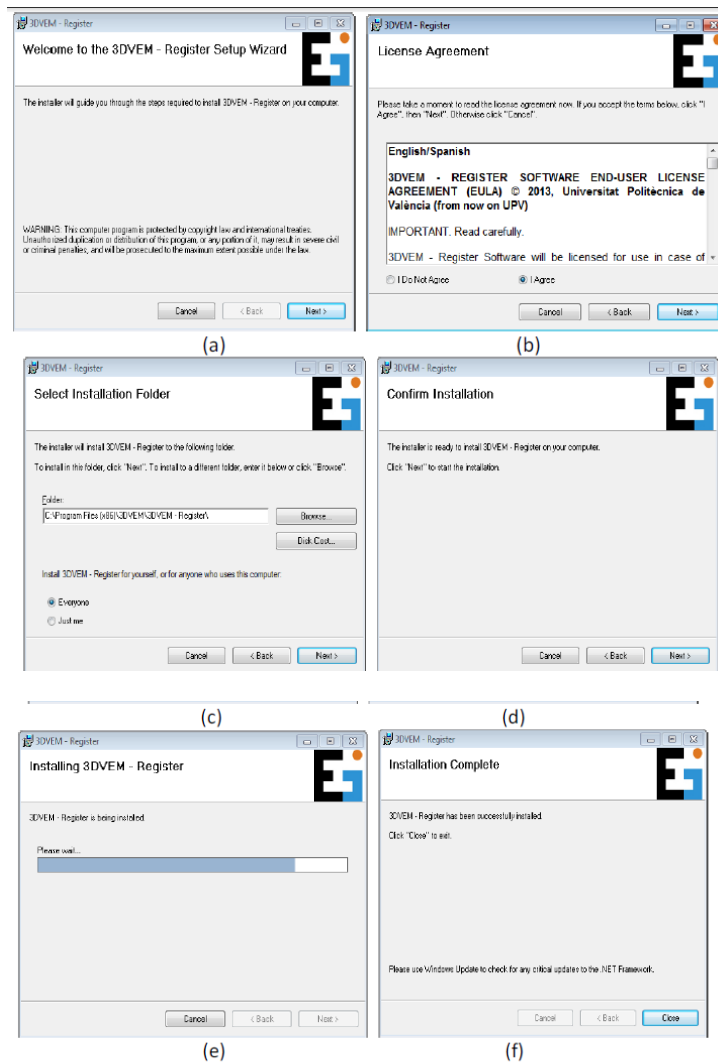
1. gifle.webs.upv.es (προσπέλαση 5/05/15)
2. www.leica-geosystems.com (προσπέλαση 15/05/15)
3. www.prnewswire.com (προσπέλαση 20/05/15)
4. www.teledyneoptech.com (προσπέλαση 20/05/15)
5. www.jansimons.nl (προσπέλαση 30/05/15)
6. www.tau.ac.il (προσπέλαση 30/05/15)
7. graphicdesign.stackexchange.com (προσπέλαση 30/05/15)
8. www.riegl.com (προσπέλαση 20/06/15)
9. www.faro.com (προσπέλαση 20/06/15)
10. www.trimble.com (προσπέλαση 20/06/15)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 3DVEM- REGISTER

Στο παρόν παράρτημα περιγράφεται η διαδικασία εγκατάστασης του λογισμικού '3DVEM- Register'. Ακόμα περιγράφεται η διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί στη περίπτωση ύπαρξης πολλαπλών αδειών χρήσης, έτσι ώστε να γίνει αξιοποίηση τους δικτυακά από πολλαπλούς χρήστες.

A.1 Περιγραφή Εγκατάστασης

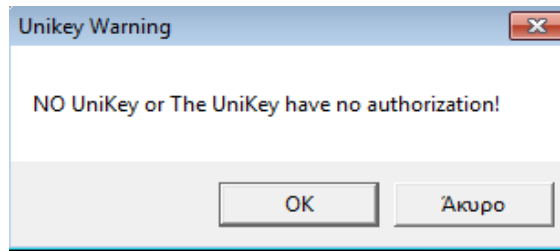
Το λογισμικό χρειάζεται λειτουργικό σύστημα 'Microsoft Windows'. Για την εκκίνηση της εγκατάστασης διπλό κλικ στο αρχείο 'setup.exe', το οποίο βρίσκεται στον φάκελο της εγκατάστασης του λογισμικού. Μετά τη παραπάνω ενέργεια ακολουθεί η παρακάτω διαδοχή παραθύρων πατώντας την επιλογή 'next' και τέλος 'close':



Εικόνα A.1 Στάδια εγκατάστασης του 3DVEM- Register

A.2 Χρήση USB - Κλειδιού και Δικτυακής Άδειας

Το λογισμικό δεν ξεκινά εάν δεν εντοπίσει την άδεια από το 'USB- κλειδί' και εμφανίζει το ακόλουθο παράθυρο- μήνυμα:



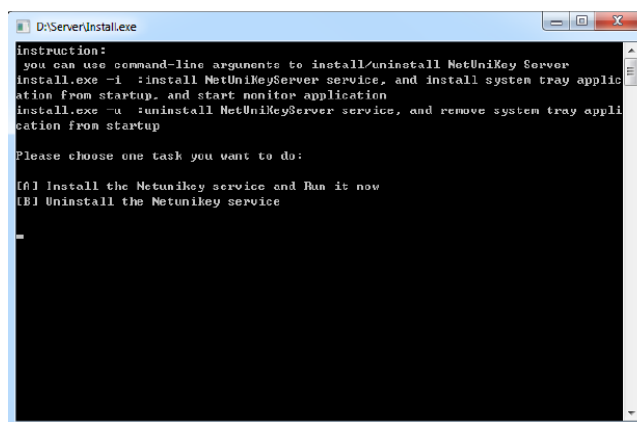
Εικόνα A.2 Απουσία USB κλειδιού

A.2.1 Τοπική χρήση άδειας

Στη περίπτωση που το 'USB – κλειδί' βρίσκεται στη κατοχή του χρήστη και επιθυμεί το λογισμικό να διατίθεται και να λειτουργεί μόνο σε συγκεκριμένο Η/Υ (εφόσον έχει εγκαταστήσει το πρόγραμμα) πρέπει να έχει τοποθετήσει σε μία αντίστοιχη θύρα το 'USB – κλειδί'. Το πρόγραμμα θα ξεκινήσει κανονικά εάν το 'USB – κλειδί' έχει τοποθετηθεί στον Η/Υ πριν την εκκίνηση του λογισμικού.

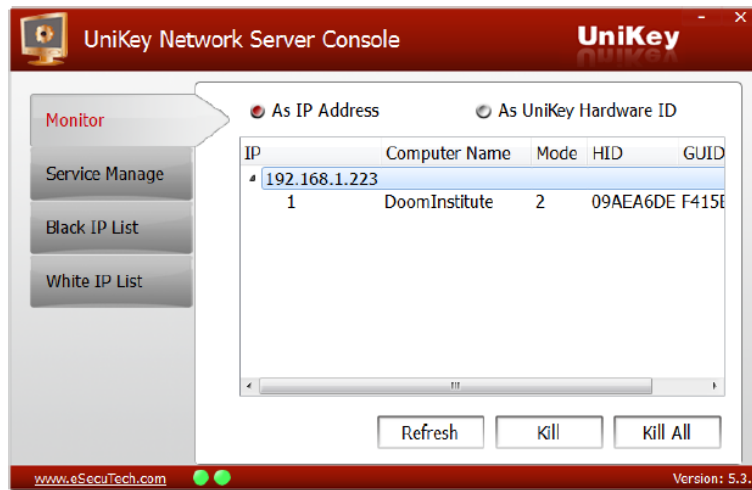
A.2.2 Δικτυακή χρήση πολλαπλών αδειών

Για την εκμετάλλευση τυχόν πολλαπλών αδειών του λογισμικού, ο ενδιαφερόμενος πρέπει αρχικά να έχει εγκατεστημένο το λογισμικό στον ή στους Η/Υ όπου θα γίνει η χρήση του. Μαζί με τον φάκελο εγκατάστασης του λογισμικού υπάρχει και ένας φάκελος εγκατάστασης της εφαρμογής 'Unikey'. Η συγκεκριμένη εφαρμογή πρέπει να εγκατασταθεί στον 'server' του δικτύου που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Αρχικά με δεξί κλικ και στη συνέχεια 'run as administrator' στο αρχείο 'setup.exe' που βρίσκεται στον παραπάνω φάκελο εγκατάστασης της εφαρμογής. Εφόσον αρχίσει η εγκατάσταση του 'Unikey' στο παράθυρο που ανοίγει πληκτρολογείτε 'A' και κατόπιν 'Enter'.



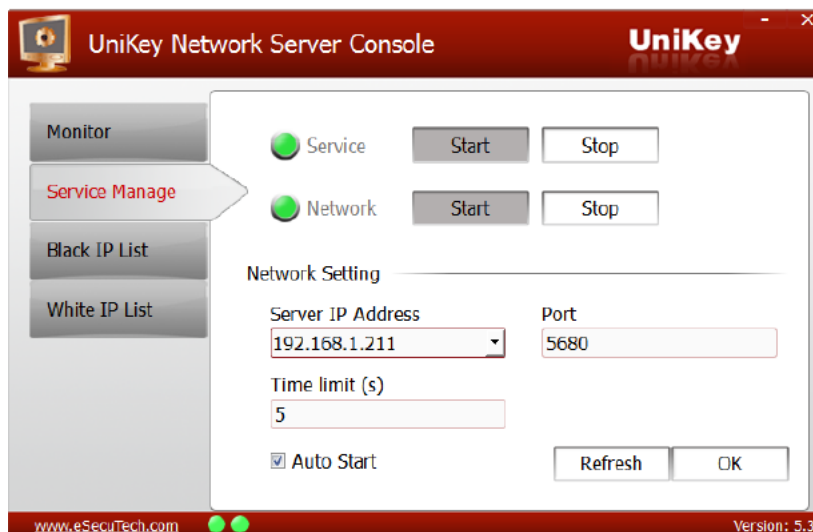
Εικόνα A.3 Παράθυρο Εγκατάστασης Unikey

Με το πέρας της εγκατάστασης θα εμφανιστεί αυτόματα η κονσόλα του Unikey, ώστε να γίνει η κατάλληλη παραμετροποίηση του server.



Εικόνα A.4 Κονσόλα του Unikey

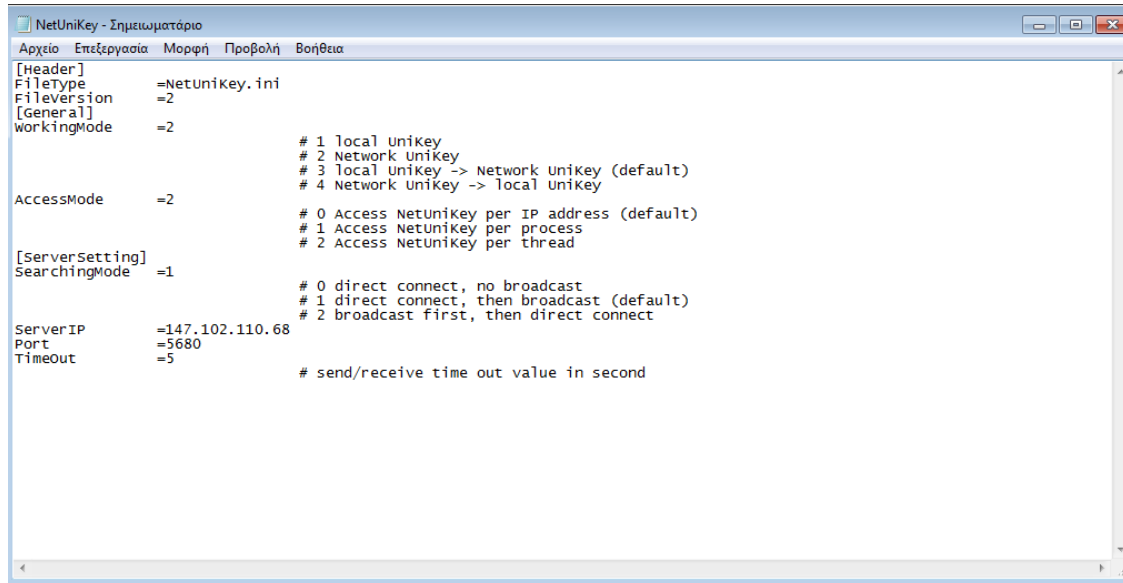
Στο μενού 'Service Manage' γίνεται η επιλογή της 'IP' του server και η θύρα (Port). Σε αυτή την διεύθυνση θα ανατρέχει το λογισμικό για την επιβεβαίωση της άδειας - κλειδιού κατά την εκκίνηση του.



Εικόνα A.5 Service Manage Menu

Επίσης στο παραπάνω μενού πρέπει ενεργοποιηθούν (πράσινο χρώμα) οι ενδείξεις 'service' και 'network', μέσω της αντίστοιχης επιλογής 'start'. Τα μενού 'Black IP List' και 'White IP List' αφορούν λίστες διευθύνσεων υπολογιστών που δεν μπορούν ή μπορούν να πάρουν άδεια - κλειδί λειτουργίας αντίστοιχα. Τέλος μετά την παραμετροποίηση της κονσόλας πρέπει το αρχείο που βρίσκεται στο φάκελο εγκατάστασης με όνομα 'NetUniKey.ini', να έχει τα ίδια στοιχεία και τις ρυθμίσεις του δικτύου, όπως αυτά ορίστηκαν στη παραπάνω κονσόλα στον server του δικτύου.

Συγκεκριμένα εισάγεται η διεύθυνση 'IP' του 'server' (ServerIP), η θύρα (Port) και το χρονικό όριο (Time out) που έχουν οριστεί, και τα υπόλοιπα όπως παρακάτω στο υπόδειγμα:

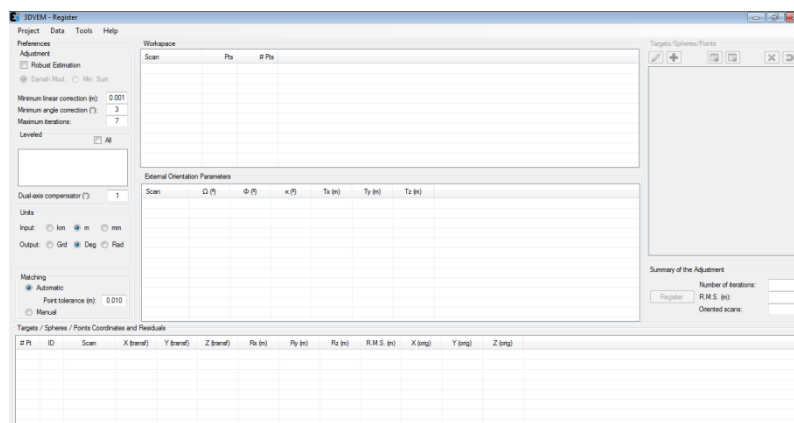


Εικόνα Α.6 Διαμόρφωση αρχείου NetUniKey.ini

Τέλος το διαμορφωμένο κατάλληλα πλέον αρχείο 'NetUniKey.ini' πρέπει να αντιγραφεί στο φάκελο που έχει γίνει η εγκατάσταση του 3DVEM στον Η/Υ (client) του χρήστη. Συνήθως δηλαδή στον τοπικό δίσκο – αρχεία εφαρμογών - 3DVEM-Register GEO. Εφόσον ο Η/Υ βρίσκεται συνδεδεμένος με το δίκτυο του server τότε με διπλό κλικ στο εικονίδιο του λογισμικού, η εφαρμογή ξεκινά κανονικά.

A.2.3 Χρήση VPN

Εάν υποστηρίζεται στο δίκτυο του 'server' η δυνατότητα σύνδεσης μέσω VPN ενός Η/Υ από άλλο δίκτυο, τότε το 3DVEM με διπλό κλικ στο εικονίδιο του λογισμικού.



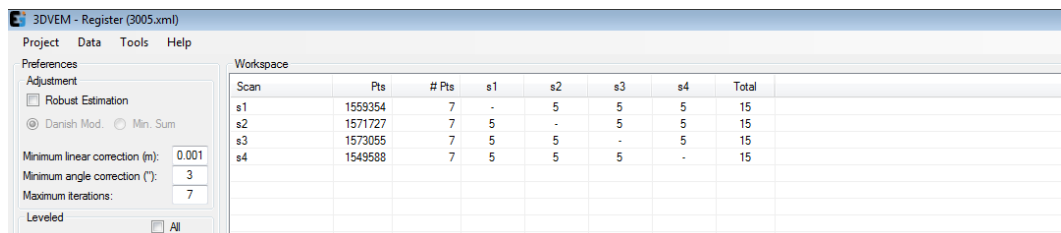
Εικόνα Α.7 Περιβάλλον Λογισμικού

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΒΗΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ 3DVEM REGISTER

Παρακάτω ακολουθεί ένα αναλυτικό εγχειρίδιο σχετικά με την χρήση και λειτουργία του λογισμικού «3DVEM- Register» και τη παρουσίαση της πορείας εργασίας έτσι ώστε ο χρήστης να φτάσει στο επιθυμητό αποτέλεσμα γρήγορα και αποτελεσματικά. Η διάρθρωση του παρακάτω παραρτήματος είναι σε βήματα – στάδια για την καλύτερη κατανόηση από το χρήστη που οδηγούν τελικά στην επιθυμητή συνένωση νεφών των σαρώσεων. Εφόσον το λογισμικό έχει εγκατασταθεί σωστά στο Η/Υ και λειτουργεί απρόσκοπτα ακολουθώντας τις επισημάνσεις και οδηγίες του προηγούμενου παραρτήματος (βλ. Παράρτημα Α) σειρά έχει η εφαρμογή και χρήση του συγκεκριμένου λογισμικού.

B.1 Εισαγωγή Αρχείων

Το πρώτο στάδιο για οποιαδήποτε εργασία και επεξεργασία στο περιβάλλον του λογισμικού είναι η εισαγωγή των αρχείων που περιέχουν τα νέφη σημείων προς συνένωση ή το τρισδιάστατο μοντέλο στις μορφές αρχείων που υποστηρίζονται από το παρών λογισμικό, δηλαδή αρχεία δομής τύπου: ASC, TXT, PTS, PTX, LAS, FLS, FWS, OBJ, WRL, DXF, κ.α. Μετά την εισαγωγή των αρχείων πρέπει να γίνει η ταυτοποίηση του πλήθους των σημείων και το πλήθος των σημείων που είναι τεχνητοί ή φυσικοί στόχοι ή σφαίρες για τη συνένωση με το πραγματικό πλήθος για την αποφυγή απώλειας πληροφορίας από τις αρχικές σαρώσεις. Αν υπάρχουν τεχνητοί στόχοι, σφαίρες ή σημεία όπως φαίνονται παρακάτω σειρά έχει το αμέσως επόμενο στάδιο, καθώς αυτοί αναγνωρίζονται από το λογισμικό, αλλιώς δεν θα φαίνεται να υπάρχουν σημεία για τη συνένωση το οποίο την κάνει αδύνατη.



Scan	Pts	# Pts	s1	s2	s3	s4	Total
s1	1559354	7	-	5	5	5	15
s2	1571727	7	5	-	5	5	15
s3	1573055	7	5	5	-	5	15
s4	1549588	7	5	5	5	-	15

Εικόνα Β.1 Ύπαρξη ομόλογων σημείων

Στη περίπτωση αυτή πρέπει να εισαχθούν είτε χειροκίνητα είτε μέσα από ένα αρχείο οι συντεταγμένες των ομόλογων σημείων στο κάθε σύστημα συντεταγμένων από το αντίστοιχο τμήμα του περιβάλλοντος του λογισμικού. Το αρχείο πρέπει να είναι δομής τύπου ASCII και τα σημεία να δίνονται με τη μορφή (ID X Y Z) ή (X Y Z), ώστε να γίνει δυνατή η αναγνώριση και εισαγωγή των συντεταγμένων των στόχων. Τέλος συγκεκριμένα μπορούν να αναγνωστούν αρχεία τύπου PTS, TXT, ASC, CSV, XLS και DXF.

B.2 Ρυθμίσεις – Παραμετροποίηση

Ως προεπιλογή υπολογισμού των άγνωστων παραμέτρων του μετασχηματισμού στο λογισμικό είναι η ελαχιστοτετραγωνική επίλυση. Στη περίπτωση που υπάρχει πλεονασμός των παρατηρήσεων και κάποιες ακραίες τιμές τότε μπορεί να γίνει χρήση της επιλογής Robust Estimation για καλύτερα αποτελέσματα. Εάν ο σαρωτής είναι οριζοντιωμένος κατά τη σάρωση τότε μπορεί να επιλεγεί η δυνατότητα να ληφθεί

υπόψη το γεγονός αυτό και ζητείται να δοθεί βάρος σε αυτό. Το λογισμικό έχει αναπτυχθεί να μην χρειάζεται αρίθμηση των στόχων και να τους εντοπίζει και να τους αριθμεί αυτόματα με την επιλογή της αυτόματης συνταύτισης με επιλογή της ανοχής. Βέβαια υπάρχει πάντα η επιλογή των αρχικών αριθμών που βρίσκονται στο αρχείο εισαγωγής με τη χειροκίνητη διαδικασία και επιλογή. Ακόμα μπορεί να γίνει αλλαγή και τον μονάδων εξαγωγής των αποτελεσμάτων με τις επιλογές να είναι km, m και mm για τις μεταθέσεις και βαθμούς, μοίρες και ακτίνια για τις στροφές.

B.3 Συνένωση Νεφών

Εφόσον οι συντεταγμένες των κοινών τεχνητών σφαιρών, στόχων ή σημείων είναι διαθέσιμες με τις ελάχιστες δεσμεύσεις σε πλήθος, η συνένωση μπορεί να εφαρμοστεί και να ξεκινήσει ο υπολογισμός των αγνώστων παραμέτρων. Με τη επιλογή της εκκίνησης της διαδικασίας από το αντίστοιχο κουμπί, εφόσον γίνει επιτυχώς ο υπολογισμός και κατόπιν η συνένωση των σαρωμένων νεφών προκύπτει η περίληψη της όπου εμφανίζεται το πλήθος των επαναλήψεων, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα και το πλήθος των προσανατολισμένων σαρώσεων για το σύνολο της διαδικασίας. Με απλή επιλογή μπορεί να αλλάξει το σύστημα στο οποίο γίνεται η συνένωση και να εμφανιστούν οι διαφορετικές παράμετροι του μετασχηματισμού για το διαφορετικό σύστημα αναφοράς δηλαδή το διαφορετικό νέφος αναφοράς. Εάν κάποιο σημείο εμφανίζει μεγάλο υπολειπόμενο σφάλμα αυτό μπορεί να απενεργοποιηθεί και να επαναληφθεί η συνένωση χωρίς εκείνο το σημείο να ληφθεί υπόψη.

B.4 Αναφορά Συνένωσης

Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα εξαγωγής και αποθήκευσης αναλυτικής αναφοράς της συνένωσης σε μορφή αρχείου κειμένου μέσω της σχετικής εντολής στο αντίστοιχο μενού επιλογών. Η πληροφορία που περιλαμβάνεται αφορά τα φορτωμένα και τα συνενωμένα δεδομένα δηλαδή νέφη σημείων όπως και τα χρησιμοποιημένα αρχεία, του πίνακες συνταύτισης, τον αριθμό των επαναλήψεων, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, τις παραμέτρους του εξωτερικού προσανατολισμού ανά θέση σάρωσης και τη σχετική αβεβαιότητα, τους χρησιμοποιημένους στόχους στη συνένωση και τα υπολειπόμενα σφάλματα.

B.5 Εξαγωγή Αρχείων

Τα συνενωμένα νέφη ή και τα τρισδιάστατα μοντέλα αυτών που μπορούν να δημιουργηθούν μπορούν να εξαχθούν σε διαφορετικές συναφείς μορφές αρχείων μεμονωμένα ή όλα μαζί για περαιτέρω ανάλυση και επεξεργασία.

B.5 Αποθήκευση Project

Ακόμα δίνεται η δυνατότητα αποθήκευσης του συγκεκριμένου Project ως αρχείο τύπου xml το οποίο την επόμενη φορά που θα χρησιμοποιηθεί το λογισμικό μπορεί να αναγνωστεί και συνεχιστεί η εργασία από το σημείο που σταμάτησε.