



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ – ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ

Έλεγχος ακρίβειας αυτόματης συνένωσης νεφών με τεχνολογία SLAM

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΝΙΚΟΛΟΥ ΛΕΩΝΙΔΑ

Επιβλέπων : Ανδρέας Γεωργόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ-ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ

Έλεγχος ακρίβειας αυτόματης συνένωσης νεφών με τεχνολογία SLAM

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΝΙΚΟΛΟΥ ΛΕΩΝΙΔΑ

Επιβλέπων : Ανδρέας Γεωργόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2022

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ την εταιρία Metrica ΑΕ, που μπόρεσε να μου παρέχει τον απαιτούμενο εξοπλισμό για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και την υποστήριξη και βοήθεια που μου προσέφερε για την κατανόηση της λειτουργίας του λογισμικού και διαδικασιών αυτού. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου , κύριο Γεωργόπουλο Ανδρέα αλλά και όλα τα παιδιά του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας της ΣΑΤΜ-ΜΓ για όλη τη βοήθεια που μου προσέφεραν σε όλους τους τομείς της διπλωματικής.

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια έχει εισέλθει και στους επίγειους σαρωτές laser μια νέα τεχνολογία με το ακρωνύμιο SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). Με την τεχνολογία αυτή ο σαρωτής έχει τη δυνατότητα χαρτογράφησης του περιβάλλοντα χώρου και προσδιορισμού της θέσης του μέσα σε αυτόν, με τη χρήση κάποιων αισθητήρων. Έτσι έχοντας καλές αρχικές τιμές της θέσης του σαρωτή, είναι δυνατή η εφαρμογή του αλγορίθμου ICP (Iterative Closest Point) και τελικά η αυτόματη συνένωση επικαλυπτόμενων σαρώσεων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζονται οι ακρίβειες των αυτόματα συνενωμένων σαρώσεων που προκύπτουν από τον σαρωτή της Leica RTC360 με τη χρήση του συστήματος VIS (Visual Inertial System) και την τεχνολογία VSLAM (Visual SLAM). Η περιοχή μελέτης αφορά στο κτήριο Λαμπαδαρίου της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Πραγματοποιήθηκαν σαρώσεις στο εξωτερικό του κτηρίου αλλά και σε ένα μέρος του εσωτερικού αυτού. Ιδρύθηκε κλειστή όδευση περιμετρικά της σχολής χρησιμοποιώντας ορισμένες στάσεις από το προϋπάρχον δίκτυο της σχολής για την απόδοση συντεταγμένων σε στόχους που τοποθετήθηκαν στο κτήριο. Όλες οι συντεταγμένες είναι ενταγμένες στο ΕΓΣΑ 87.

Αφού δημιουργήθηκε το αυτόματα συνενωμένο νέφος σημείων, δημιουργήθηκε ένα νέφος του οποίου οι σαρώσεις συνενώθηκαν χειροκίνητα είτε με target to target (με στόχους) συνένωση, όπου ήταν αυτό δυνατό, είτε με visual alignment (οπτικός προσανατολισμός) και στη συνέχεια εφαρμογή του ICP αλγορίθμου. Στα δύο αυτά νέφη σημείων χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιοι 4 στόχοι στα άκρα τους για την γεωαναφορά στο ΕΓΣΑ 87.

Έχοντας τα δύο διαφορετικά συνενωμένα νέφη σημείων πραγματοποιήθηκαν οι εξής έλεγχοι. Σε πρώτη φάση συγκρίθηκαν οι συντεταγμένες των στόχων από τα νέφη σε σχέση με τους μετρημένους με total station στο πεδίο. Τέλος, τα δύο νέφη χωρίστηκαν σε 5 αυστηρά ίδιες υποπεριοχές, λόγω του πολύ μεγάλου όγκου δεδομένων, και χρησιμοποιήθηκαν στο λογισμικό CloudCompare για την εξαγωγή στατιστικών δεδομένων σχετικά με τις διαφορές τους.

Abstract

Over the past few years, a new technology has been introduced to Terrestrial Laser scanning with the acronym SLAM which stands for Simultaneous Localization and Mapping. This technology allows the scanner to create a map of the surrounding space and locate its position within it using a number of sensors. Thus, by having good initial values of the scanner's position, it is possible to apply the ICP (Iterative Closest Point) algorithm and finally to automatically combine and register overlapping neighbouring scans.

In this Diploma Thesis, the accuracies of automatically combined scans obtained from the Leica RTC360 scanner using VIS (Visual Inertial System) and VSLAM (Visual SLAM) technology are examined. The area of study is the Lambadario building of the School of Rural, Surveying and Geomatics Engineering of the National Technical University of Athens. Scans were conducted for the exterior of the building and a part of its interior. A closed traverse was established around the perimeter of the building using some of the preexisting traverse stations of the School's network, to assign coordinates to targets placed on the building. All coordinates were referenced to GGRS 87 using the coordinates of the preexisting stations of the School's network.

After the automatically combined point cloud was created, another cloud was created whose individual scans were manually combined either by target-to-target registration or by visual alignment and then applying the ICP algorithm. In both clouds the same 4 targets were used to reference them to GGRS 87.

Having the two differently merged point clouds, the following checks were performed. Firstly, the coordinates of the targets from the clouds were compared to those measured with total station in the field. Afterwards, the two clouds were divided into 5 strictly identical sub-regions, due to the very large amount of data, and compared in the CloudCompare software to extract statistical data about their differences.

Πίνακας περιεχομένων

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

1	Εισαγωγή	1
1.1	Ιστορική αναδρομή και εξέλιξη.....	1
1.2	Στόχος διπλωματικής εργασίας.....	2
1.3	Δομή διπλωματικής εργασίας.....	3
2	Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	5
3	Η τεχνολογία VIS του Leica RTC360.....	14
3.1	Περιγραφή και αρχές λειτουργίας του RTC360	14
3.1.1	Συλλογή δεδομένων HDR	15
3.1.2	VIS.....	18
3.1.3	Λογισμικά σειράς CYCLONE.....	19
3.2	SLAM	22
3.2.1	VSLAM	22
3.2.1.1	KALMAN FILTER-EKF SLAM	23
3.3	Μονάδα αδρανειακών μετρήσεων (IMU).....	24
3.4	Συνένωση νεφών σημείων	25
3.4.1	Άμεση μέθοδος συνένωσης	25
3.4.2	Έμμεση μέθοδος συνένωσης	26
3.4.2.1	Συνένωση με στόχους (target to target)	26
3.4.2.2	Συνένωση με τη μέθοδο cloud to cloud.....	27
4	Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων	30
4.1	Περιοχή μελέτης	30
4.2	Εξοπλισμός και συλλογή παρατηρήσεων	31
4.2.1	Επίλυση οδεύσεων.....	33
4.3	Επεξεργασία σαρώσεων στο λογισμικό Cyclone Register 360	35
4.4	Επεξεργασία δεδομένων στο λογισμικό CloudCompare.....	38
4.4.1	Η εφαρμογή M3C2 distance	38
4.5	Παρατηρήσεις.....	39

5	Αποτελέσματα-Συμπεράσματα	42
5.1	Αποτελέσματα σύγκρισης συντεταγμένων φωτοσταθερών.....	42
5.2	Αποτελέσματα συγκρίσεων στο πεδίο ελέγχου	44
5.3	Αποτελέσματα συγκρίσεων στο CloudCompare	46
5.4	Συμπεράσματα	65

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 1.1 : Το πρώτο Reality Capture System	2
Εικόνα 2.1 : Τα στοιχεία που αποτελούν το σύστημα VIS του σαρωτή	6
Εικόνα 2.2 : Σχεδιάγραμμα με τις θέσεις στόχων και σαρωτών.....	8
Εικόνα 2.3 : Φόρμα αποτελεσμάτων 1	11
Εικόνα 2.4 : Φόρμα αποτελεσμάτων 2	12
Εικόνα 3.1 : Η ροή εργασιών του Leica RTC 360	15
Εικόνα 3.2 : Το εσωτερικό του σαρωτή Leica RTC360.....	16
Εικόνα 3.3 : Πανοραμική εικόνα των επικαλυπτόμενων HDR φωτογραφιών του RTC360	16
Εικόνα 3.4 : Σύγκριση μεταξύ νέφους σημείων του σαρωτή ScanstationP40 και RTC360	18
Εικόνα 3.5 : Εξαγωγή χαρακτηριστικών σημείων από τις εικόνες με χρήση VIS	19
Εικόνα 3.6 : Διάγραμμα σχέσης δεδομένων και πλατφόρμας επεξεργασίας.....	20
Εικόνα 3.7 : Οπτικός προσανατολισμός δύο νεφών σημείων στο λογισμικό Cyclone Field 360	20
Εικόνα 3.8 : Τοποθέτηση ετικετών στο λογισμικό Cyclone Field 360	21
Εικόνα 3.9 : Προεπισκόπηση της σάρωσης στο Cyclone Register 360 πριν την εισαγωγή.... των δεδομένων.....	21
Εικόνα 3.10 : Αφαίρεση κινούμενων εμποδίων στο λογισμικό Cyclone Register 360	22
Εικόνα 3.11 : Τεχνητοί στόχοι και σφαίρες.....	27
Εικόνα 4.1 : Δημήτριος Λαμπαδάριος 1887-1950.....	30
Εικόνα 4.2 : Κτήριο Λαμπαδαρίου της ΣΑΤΜ-ΜΓ ΕΜΠ	31
Εικόνα 4.3 : Η μορφή στόχου που χρησιμοποιήθηκε διαστάσεων 20x20 cm.....	31
Εικόνα 4.4 : Οι θέσεις των στάσεων γύρω από το κτήριο του Λαμπαδαρίου	32
Εικόνα 4.5 : Total station Topcon gpr 6002(αριστερά),LeicaRTC360(δεξιά)	32
Εικόνα 4.6 : Τοποθέτηση στόχων στο νέφος σημείων και σωστή ονομασία αυτών	35
Εικόνα 4.7 : Visual alignment - οπτικός προσανατολισμός	36
Εικόνα 4.8 : Το γεωαναφερμένο νέφος σημείων και οι 4 στόχοι που χρησιμοποιήθηκαν..... μαζί με τις συντεταγμένες τους.....	37
Εικόνα 4.9 : Οι αρχές λειτουργίας του M3C2.	39
Εικόνα 5.1 : Σκαρίφημα στόχων πεδίου ελέγχου (πάνω κάτοψη, κάτω 3D ορθή προβολή	45
Εικόνα 5.2 : Παράμετροι εφαρμογής M3C2 distance	46
Εικόνα 5.3 : Διαφορές νεφών σημείων μαζί με τα κανονικά διανύσματα σε κάτοψη	47
περιοχή 1η.	47
Εικόνα 5.4 : Διαφορές νεφών σημείων σε κάτοψη, περιοχή 1η.	48
Εικόνα 5.5 : Διαφορές νεφών σημείων σε 3D ορθή προβολή περιοχή 1η	48
Εικόνα 5.6 : Τραχύτητα αυτόματα συνενωμένου νέφους, κάτοψη περιοχή 1η	49

Εικόνα 5.7 : Τραχύτητα χειροκίνητα συνενωμένου νέφους, κάτοψη περιοχή 1η	49
Εικόνα 5.8 : Τραχύτητα των δύο νεφών σημείων σε 3D ορθή προβολή περιοχή 1η	50
Εικόνα 5.9 : Διαφορές νεφών σημείων μαζί με τα κανονικά διανύσματα σε κάτοψη περιοχή 2η.	51
Εικόνα 5.10 : Διαφορές νεφών σημείων σε κάτοψη, περιοχή 2η.	51
Εικόνα 5.11 : Διαφορές νεφών σημείων σε 3D ορθή προβολή περιοχή 2η	52
Εικόνα 5.12 : Τραχύτητα αυτόματα συνενωμένου νέφους, κάτοψη περιοχή 2η	52
Εικόνα 5.13 : Τραχύτητα χειροκίνητα συνενωμένου νέφους, κάτοψη περιοχή 2η	53
Εικόνα 5.14 : Τραχύτητα των δύο νεφών σημείων σε 3D ορθή προβολή περιοχή 2η	53
Εικόνα 5.15 : Διαφορές νεφών σημείων μαζί με τα κανονικά διανύσματα σε κάτοψη..... περιοχή 3η.	54
Εικόνα 5.16 : Διαφορές νεφών σημείων σε κάτοψη, περιοχή 3η.	55
Εικόνα 5.17 : Διαφορές νεφών σημείων σε 3D ορθή προβολή, περιοχή 3η.	56
Εικόνα 5.18 : Τραχύτητα αυτόματα συνενωμένου νέφους, κάτοψη περιοχή 3η	56
Εικόνα 5.19 : Τραχύτητα χειροκίνητα συνενωμένου νέφους, κάτοψη περιοχή 3η	57
Εικόνα 5.20 : Τραχύτητα των δύο νεφών σημείων σε 3D ορθή προβολή περιοχή 3η	57
Εικόνα 5.21 : Διαφορές νεφών σημείων μαζί με τα κανονικά διανύσματα σε κάτοψη..... περιοχή 4η.	58
Εικόνα 5.22 : Διαφορές νεφών σημείων σε κάτοψη, περιοχή 4η.	59
Εικόνα 5.23 : Διαφορές νεφών σημείων σε 3D ορθή προβολή, περιοχή 4η.	60
Εικόνα 5.24 : Τραχύτητα αυτόματα συνενωμένου νέφους, κάτοψη περιοχή 4η	60
Εικόνα 5.25 : Τραχύτητα χειροκίνητα συνενωμένου νέφους, κάτοψη περιοχή 4η	61
Εικόνα 5.26 : Τραχύτητα των δύο νεφών σημείων σε 3D ορθή προβολή περιοχή 4η	61
Εικόνα 5.27 : Διαφορές νεφών σημείων μαζί με τα κανονικά διανύσματα σε κάτοψη..... περιοχή 5η.	62
Εικόνα 5.28 : Διαφορές νεφών σημείων σε κάτοψη, περιοχή 5η.	63
Εικόνα 5.29 : Διαφορές νεφών σημείων σε 3D ορθή προβολή, περιοχή 5η.	63
Εικόνα 5.30 : Η σειρά συνενώσεων των σαρώσεων στην 5 ^η περιοχή.....	64
Εικόνα 5.31 : Τραχύτητα αυτόματα συνενωμένου νέφους, κάτοψη περιοχή 5η	64
Εικόνα 5.32 : Τραχύτητα χειροκίνητα συνενωμένου νέφους, κάτοψη περιοχή 5η.....	65
Εικόνα 5.33 : Τραχύτητα των δύο νεφών σημείων σε 3D ορθή προβολή περιοχή 5η	65

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 2.1 : Πίνακας σύγκρισης αποστάσεων	7
Πίνακας 2.2 : Αποτελέσματα μετρήσεων ZFIMAGER και RTC360.....	9
Πίνακας 4.1 : Τεχνικά χαρακτηριστικά Topcon Gpt 6002.....	33
Πίνακας 4.2 : Τεχνικά χαρακτηριστικά Leica RTC360	33
Πίνακας 4.3 : Συντεταγμένες στάσεων.....	34
Πίνακας 4.4 : Συντεταγμένες στόχων.....	34

Πίνακας 5.1 : Οι διαφορές των συντεταγμένων των στόχων στα δύο νέφη σημείων σε σχέση με του total station	43
Πίνακας 5.2 : Αποτελέσματα συγκρίσεων αποστάσεων στο πεδίο ελέγχου	45

Ευρετήριο διαγραμμάτων

Διάγραμμα 2.1 : Γραφική παρουσίαση αποτελεσμάτων σύγκρισης αποστάσεων	7
Διάγραμμα 2.2 : Γραφική παρουσίαση αποτελεσμάτων σύγκρισης των δύο σαρωτών..... A/M στόχοι	7
Διάγραμμα 2.3 : Γραφική παρουσίαση αποτελεσμάτων σύγκρισης των δύο σαρωτών..... σφαιρικοί στόχοι.....	8
Διάγραμμα 2.4 : Σύγκριση σφαλμάτων επιπεδότητας για τους δύο σαρωτές	8
Διάγραμμα 3.1 : Δείγμα των εκπεμπόμενων δεσμών στους δύο διαφορετικής έντασης παλμούς	17
Διάγραμμα 3.2 : Αδρανειακό σύστημα δύο αισθητήρων	25
Διάγραμμα 3.3 : Αδρανειακό σύστημα τριών αισθητήρων.....	25
Διάγραμμα 5.1 : Διάγραμμα κατανομής Gauss των διαφορών των δύο νεφών (περιοχή 1η).....	47
Διάγραμμα 5.2 : Διάγραμμα κατανομής Gauss των διαφορών των δύο νεφών (περιοχή 2η).....	50
Διάγραμμα 5.3 : Διάγραμμα κατανομής Gauss των διαφορών των δύο νεφών (περιοχή 3η).....	54
Διάγραμμα 5.4 : Διάγραμμα κατανομής Gauss των διαφορών των δύο νεφών (περιοχή 4η).....	58
Διάγραμμα 5.5 : Διάγραμμα κατανομής Gauss των διαφορών των δύο νεφών (περιοχή 5η).....	62

Κεφάλαιο 1^ο

Εισαγωγή

1.1 Ιστορική αναδρομή και εξέλιξη

Η τεχνολογία των 3D σαρωτών laser εξελίχθηκε κατά το δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα στην προσπάθεια να ανακατασκευαστούν επιφάνειες διαφόρων αντικειμένων και περιοχών. Η πρώτη εμφάνιση της 3D σάρωσης γίνεται το 1960, όπου το σύστημα του 3D σαρωτή αποτελούνταν από φώτα, κάμερες και προβολείς. Ως διαδικασία ήταν αρκετά χρονοβόρα αλλά η τεχνολογία εξελίχτηκε με αρκετά γρήγορους ρυθμούς. Το 1985, οι σαρωτές χρησιμοποιούν πλέον λευκό φως, laser και σκιάσεις για να αναπαραγάγουν μια επιφάνεια.

Επίγειοι σαρωτές που μοιάζουν πλέον πιο πολύ με την εικόνα που υπάρχει σήμερα για αυτούς, εμφανίστηκαν στα μέσα της δεκαετίας του 90. Το 1994, διάφορες εταιρίες ανά τον κόσμο παρουσίασαν τα δικά τους μοντέλα επίγειων σαρωτών τα οποία ήταν πια ικανά να αποτυπώσουν με μεγάλη ακρίβεια αντικείμενα με μεγάλη λεπτομέρεια και περιπλοκότητα. Μεγάλη εξέλιξη παρουσιάστηκε στην τεχνολογία σάρωσης με “λωρίδα” laser (laser stripe scanning), και ακόμα κάποιες εταιρίες κατάφεραν, κατά την αποτύπωση, να συλλέγουν και το χρώμα του αντικειμένου.

Μέχρι τις αρχές του 1990, η τεχνολογία της 3D σάρωσης δεν ικανοποιούσε απόλυτα στόχους όπως η ακρίβεια, η ταχύτητα, η συλλογή χρώματος του αντικειμένου αλλά και ένα ρεαλιστικό κόστος για τον εξοπλισμό. Το 1996 όμως εμφανίστηκε το πρώτο Reality Capture System, ένα σύστημα το οποίο αποτελούνταν από ένα χειροκίνητο βραχίονα και έναν σαρωτή λωρίδας laser τα οποία ήταν συνδεδεμένα με έναν Η/Υ και το λογισμικό ModelMaker, και καθιστούσε τη διαδικασία πολύ απλή και απίστευτα γρήγορη. Μπορούσε να ανακατασκευάσει περίπλοκες επιφάνειες και να δώσει υφή και χρώμα (Edl, Mizerak, Trojan et al. 2018).



Εικόνα 1.1: Το πρώτο Reality Capture System (Edl,Mizerak,Trojan et al. 2018)

Οι 3D σαρωτές laser παρουσιάζουν ποικιλία εφαρμογών, όπως στη βιομηχανία του θεάματος, σε animation ή με προσομοιώσεις σε σκηνές δράσης στον κινηματογράφο όπου μπορούν να αποφευχθούν τυχόν ατυχήματα με επαγγελματίες κασκαντέρ. Άλλη εφαρμογή μπορεί να είναι στα συγκοινωνιακά, όπου σε τοποθεσίες ατυχήματος συνήθως αποτυπώνεται η περιοχή για να γίνει μια προσομοίωση του πραγματικού ατυχήματος και να αναλυθούν πιθανά σενάρια. Ακόμα οι σαρωτές έχουν μεγάλη εφαρμογή στην κατασκευαστική βιομηχανία, στην αντίστροφη μηχανολογία (reverse engineering), σε ιατρικές εφαρμογές όπου χρησιμοποιούνται για να ανακατασκευάσουν προσθετικά μέλη, γενικότερα σε αποτυπώσεις εδαφολογικών χαρακτηριστικών, σε ελέγχους αντικειμένων και προϊόντων και τεκμηρίωση, σε αποτυπώσεις πολιτιστικών αντικειμένων κ.ά.

Σήμερα πια, οι σαρωτές έχουν τη δυνατότητα συλλογής εκατομμυρίων σημείων το δευτερόλεπτο, με μεγάλη ακρίβεια και ταχύτητα. Ο όγκος των σαρωτών είναι τέτοιος που μπορεί κανείς να τους έχει σε μια τσάντα πλάτης και να τους μεταφέρει με μεγάλη ευκολία. Μια από τις τελευταίες εξελίξεις στον τομέα αυτόν, είναι η ανάπτυξη συστημάτων και αλγορίθμων οι οποίοι, χρησιμοποιώντας δεδομένα από κάποιον αισθητήρα (στην παρούσα διπλωματική φωτογραφικές μηχανές), μπορούν να χαρτογραφήσουν το περιβάλλον της περιοχής μελέτης και να προσδιορίσουν τη θέση του σαρωτή σε κάθε σάρωση, πράγμα το οποίο, όπως θα παρουσιαστεί στην συνέχεια, βοηθάει πάρα πολύ στην αυτόματη συνένωση των νεφών σημείων από διαφορετικές θέσεις σαρώσεων. Η τεχνολογία αυτή χαρτογράφησης και προσδιορισμού θέσης του σαρωτή παρουσιάζεται ευρύτερα με το ακρωνύμιο SLAM (Simultaneous Localization And Mapping), και είναι το πεδίο στο οποίο αναφέρεται η παρούσα διπλωματική εργασία. (Edl,Mizerak,Trojan et al. 2018).

1.2 Στόχος της διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο έλεγχος του επίγειου σαρωτή της Leica RTC360 και ειδικότερα της τεχνολογίας αυτόματης συνένωσης νεφών σημείων στο πεδίο που βασίζεται στη χρήση SLAM και της τεχνολογίας VIS (Visual Inertial System).

Ο σαρωτής αυτός, μέσω του SLAM έχει τη δυνατότητα να χαρτογραφεί την άγνωστη περιοχή γύρω του και να τοποθετείται αυτομάτως στη σωστή θέση μέσα σε αυτή. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να αναγνωρίσει ανά πάσα στιγμή τη θέση στην οποία βρίσκεται σε σχέση με την προηγούμενη τοποθεσία σάρωσης. Έτσι έχει κάποιες πολύ καλές αρχικές τιμές για τις θέσεις σάρωσης οι οποίες στη συνέχεια εισέρχονται στο κατάλληλο αλγόριθμο συνένωσης και πραγματοποιείται αυτομάτως η ‘‘ορθή’’ συνένωση των επί μέρους νεφών σημείων.

Στη διπλωματική αυτή, θα εξεταστεί η ακρίβεια που επιτυγχάνει η αυτόματη συνένωση των νεφών σημείων με τη χρήση SLAM και VIS. Για τον έλεγχο αυτό, κατά τις σαρώσεις της περιοχής μελέτης, τοποθετήθηκαν ασπρόμαυροι στόχοι σε διάφορα σημεία ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί μεταξύ των σαρώσεων και χειροκίνητη συνένωση με τουλάχιστον 3 γνωστά σημεία στα οποία έχουν αποδοθεί συντεταγμένες στο ΕΓΣΑ87. Το αποτέλεσμα των παραπάνω διαδικασιών θα είναι δύο διαφορετικά νέφη σημείων όπου στο ένα η συνένωση θα έχει πραγματοποιηθεί εξ ολοκλήρου με τη χρήση SLAM με αυτοματοποιημένες διαδικασίες και στο δεύτερο η συνένωση θα έχει πραγματοποιηθεί χειροκίνητα με τη χρήση στόχων, όπου αυτό είναι δυνατό. Και τα δύο νέφη σημείων θα γεωαναφερθούν με 3 ίδιους στόχους που θα βρίσκονται στα άκρα της περιοχής σάρωσης ώστε να έχουν κοινό σύστημα αναφοράς. Στη συνέχεια θα υπολογισθούν τυχόν αποκλίσεις που θα παρουσιασθούν μεταξύ των ‘‘πραγματικών’’ συντεταγμένων των στόχων (όπως μετρήθηκαν με το total station) και των συντεταγμένων των στόχων, όπως αυτές προέκυψαν από τη συνένωση των νεφών. Ακόμα, τα νέφη σημείων θα εισαχθούν στο λογισμικό CloudCompare για περαιτέρω σύγκριση και εξαγωγή στατιστικών δεδομένων σχετικά με τις αποκλίσεις που ενδεχομένως θα παρουσιάζουν.

1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία χωρίζεται σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος αφορά κυρίως στο θεωρητικό υπόβαθρο, το οποίο είναι απαραίτητο για την κατανόηση ορισμένων εννοιών σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας του σαρωτή αλλά και τους διάφορους τρόπους ελέγχου. Στο **κεφάλαιο 2** της διπλωματικής εργασίας, αναφέρονται και αναλύονται ορισμένα επιστημονικά άρθρα που αφορούν στον έλεγχο επίγειων σαρωτών laser και παρουσιάζονται διάφορες μεθοδολογίες ελέγχου. Στη συνέχεια στο **κεφάλαιο 3** περιέχεται το θεωρητικό υπόβαθρο της διπλωματικής εργασίας, όπου περιγράφονται και αναλύονται οι αρχές λειτουργίας του Leica RTC360, μαζί με όλα τα επιμέρους τμήματα που χρήζουν ανάλυσης.

Το δεύτερο τμήμα της διπλωματικής εργασίας αφορά κυρίως στο πρακτικό κομμάτι, και αποτελείται από το **κεφάλαιο 4** όπου παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης, ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε, ο τρόπος συλλογής των δεδομένων των οδεύσεων, αλλά και των σαρώσεων και η επεξεργασία αυτών στο γραφείο. Ακόμα παρουσιάζεται ο τρόπος ελέγχου της ακρίβειας της συνένωσης των νεφών με SLAM, και στο **κεφάλαιο 5** πλέον, καταρτίζονται και σχολιάζονται πίνακες με όλα τα αποτελέσματα από τις συγκρίσεις.

Κεφάλαιο 2^ο

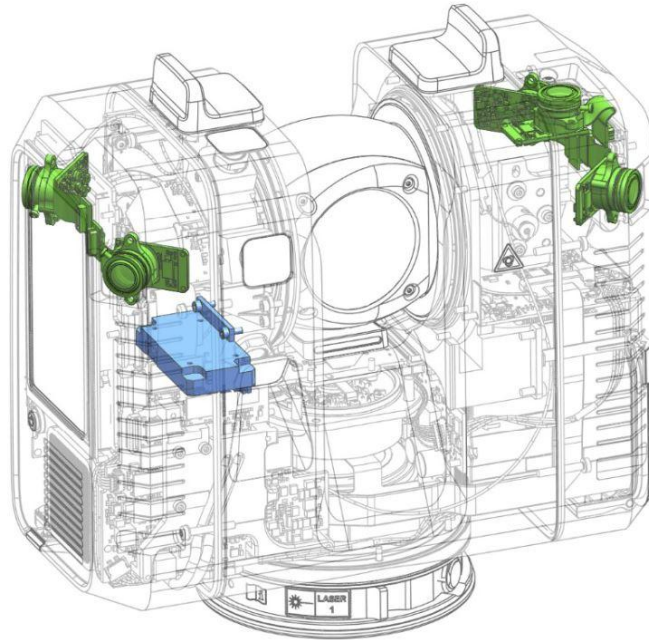
Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Από τα παλιά χρόνια υπήρχε η ανάγκη για λεπτομερή αναπαράσταση της **ΦΓΕ** (Φυσικής Γήινης Επιφάνειας). Ανά τα χρόνια, η ανάγκη αυτή επέφερε εξέλιξη στον τομέα των αποτυπώσεων, είτε επίγειων είτε εναέριων. Ένας από τους τομείς που έχει απασχολήσει μηχανικούς ανά τον κόσμο είναι ο τομέας της αυτοματοποίησης περίπλοκων και χρονοβόρων διαδικασιών έτσι ώστε να απαιτείται η μικρότερη δυνατή συνεισφορά του ανθρώπου σε τέτοιες διαδικασίες.

Τέτοιοι αυτοματισμοί εμφανίζονται και στον τομέα των επίγειων σαρωτών laser όπου η καινοτομία των τελευταίων ετών είναι η τεχνολογία SLAM. Με την τεχνολογία αυτή ο σαρωτής μπορεί να χαρτογραφήσει την περιοχή γύρω του και να προσδιορίσει τη θέση του μέσα σε αυτή πράγμα το οποίο βοηθάει σε διαδικασίες όπως η αυτόματη συνένωση επικαλυπτόμενων σαρώσεων όπου απαιτούνται καλές αρχικές τιμές των συντεταγμένων των θέσεων του σαρωτή σε κάθε σάρωση.

Οι διαδικασίες αυτές αναλύονται σε επόμενο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας όπου και θα εξεταστεί η ακρίβειά τους συγκριτικά με τις αντίστοιχες χειροκίνητες διαδικασίες. Σχετικά με τη μελέτη του αντικειμένου, η διεθνής και ελληνική βιβλιογραφία δεν είναι πολύ πλούσια . Ωστόσο υπάρχουν δημοσιευμένες εργασίες που συγκρίνουν την ποιότητα των σαρώσεων ενός ή περισσότερων σαρωτών. Παρατίθενται ενδεικτικά κάποιες ερευνητικές εργασίες που αφορούν στους ελέγχους των επίγειων σαρωτών με διάφορες μεθόδους.

Στο **πρώτο άρθρο**, οι *Biasion, et al. (2019)* αναφέρονται στον τρόπο λειτουργίας του επίγειου σαρωτή της Leica, RTC360 καθώς και τις καινοτομίες που έχει παρουσιάσει η κατασκευάστρια εταιρεία μέσω αυτού. Αναφέρονται στις βασικές αρχές λειτουργίας του σαρωτή, αλλά επικεντρώνονται σε μια διαδικασία αυτοματοποίησης που μειώνει αισθητά τον χρόνο εργασίας στο πεδίο αλλά και στη συνέχεια το χρόνο επεξεργασίας στο γραφείο. Πρόκειται για την τεχνολογία SLAM (Simultaneous Location and Mapping). Ουσιαστικά με την τεχνολογία αυτή ο χρήστης του σαρωτή μπορεί να έχει στην κατοχή του ακόμα και στο πεδίο προσανατολισμένα τα νέφη σημείων από σαρώσεις διαφορετικών θέσεων. Αυτό πραγματοποιείται μέσω του VIS (Visual Inertial System), δηλαδή ένα σύστημα που αποτελείται από 5 κάμερες και ένα αδρανειακό σύστημα (IMU) τα οποία βρίσκονται στο εσωτερικό του σαρωτή όπως φαίνεται παρακάτω, και μπορούν να εκτιμήσουν την σχετική θέση και προσανατολισμό μεταξύ δύο διαδοχικών σαρώσεων.



*Εικόνα 2.1: Τα στοιχεία που αποτελούν το σύστημα VIS του σαρωτή
[Biaison, et al. 2019]*

Οι βασικές αρχές λειτουργίας του σαρωτή θα αναφερθούν αναλυτικότερα στο *Κεφάλαιο 3* της παρούσας διπλωματικής.

Στο δεύτερο άρθρο, οι *Kersten, et al. (2020)* μελέτησαν τις δυνατότητες και σύγκριναν την γεωμετρική ακρίβεια των σαρωτών της Leica RTC360 και του Z+F IMAGER 5016. Πρόκειται για μια μελέτη που διεξήχθη από το πανεπιστήμιο Hafencity του Αμβούργου και παρουσιάζει μια σφαιρική εικόνα σχετικά με τις δυνατότητες που έχει κάθε σαρωτής. Οι έλεγχοι πραγματοποιήθηκαν κάτω από τις ίδιες συνθήκες και για τους δύο σαρωτές, τόσο σε ελεγχόμενο περιβάλλον σε εργαστήριο αλλά τόσο και στο πεδίο υπό συνθήκες εργασίας.

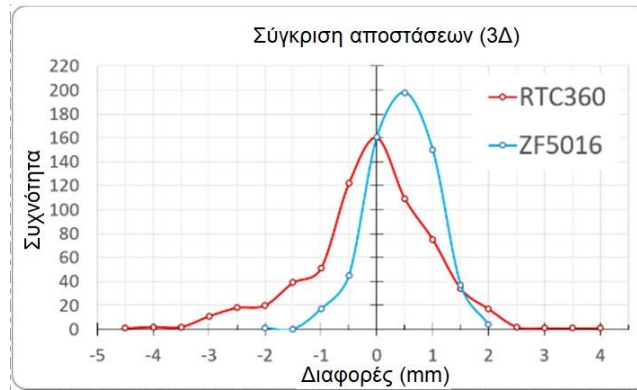
Πραγματοποιώντας διαφορετικούς τρόπους ελέγχου, υπολόγισαν τις ακρίβειες που μπορούν να επιτύχουν οι παραπάνω σαρωτές γωνιακά, ακρίβειες στην απόσταση αλλά και τον θόρυβο που παρουσιάζουν τα μετρημένα σημεία κατά την αποτύπωση μιας επίπεδης επιφάνειας. Στη συνέχεια εξέτασαν κατά πόσο οι τιμές αυτές πληρούν τις ακρίβειες του εκάστοτε κατασκευαστή.

Οι τιμές των αποτελεσμάτων έδειξαν πως επιτεύχθηκαν υψηλές ακρίβειες και από τους δύο σαρωτές οι οποίες πληρούν τα όρια των κατασκευαστών. Ακόμα, κατά τη διάρκεια των ελέγχων διαπίστωσαν και ορισμένα κρίσιμα θέματα. Πρώτον, ότι δεν ήταν δυνατή η εξαγωγή των καθορισμένων συντεταγμένων των στόχων μέσω του Leica Cyclone Register αλλά μόνο μέσω του Z+F LaserControl, του λογισμικού δηλαδή της Z+F. Και δεύτερον, διαπιστώθηκε πολύ μεγάλη διαφορά στον όγκο των δεδομένων των δύο σαρωτών. Τα δεδομένα του Leica RTC360 ήταν 100 φορές μεγαλύτερα σε όγκο από τα δεδομένα του Z+F Imager 5016. Συγκεκριμένα τα δεδομένα του Imager 5016 ήταν 1.3GB και τα δεδομένα του RTC360 ήταν 137.3GB .

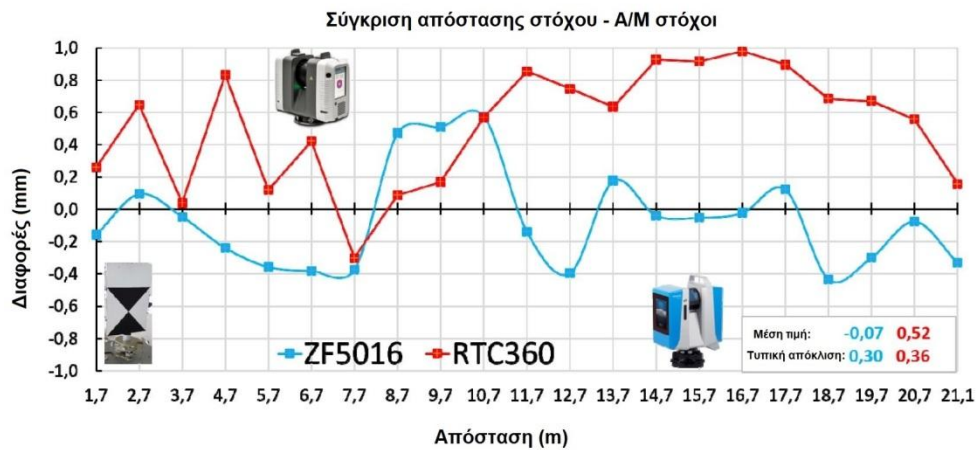
Ακολουθούν ενδεικτικά κάποιοι πίνακες και διαγράμματα με τα αποτελέσματα των ελέγχων που πραγματοποιήθηκαν για τους δύο σαρωτές.

Σύγκριση αποστάσεων (3Δ)	ZF5016	RTC360
Αριθμός αποστάσεων	613	666
Ελάχιστο (mm)	-2.1	-4.5
Μέγιστο (mm)	1.8	3.5
Εύρος τιμών (mm)	3.9	8.0
Μέση τιμή (mm)	0.2	-0.3
Τυπική απόκλιση μέσης τιμής (mm)	0.4	0.8
S ^{3d} από -1...+1mm (%)	93.1	77.6

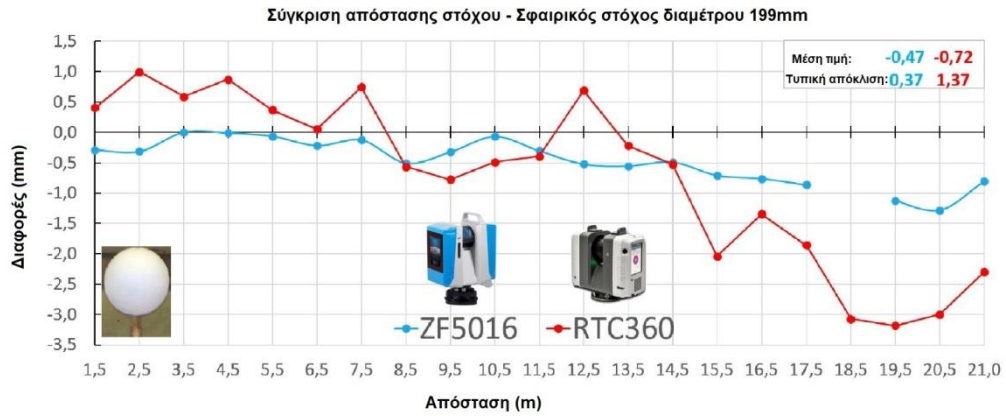
Πίνακας 2.1: Πίνακας σύγκρισης αποστάσεων [Kersten, et al. 2020]



Διάγραμμα 2.1 : Γραφική παρουσίαση αποτελεσμάτων σύγκρισης αποστάσεων [Kersten, et al. 2020]



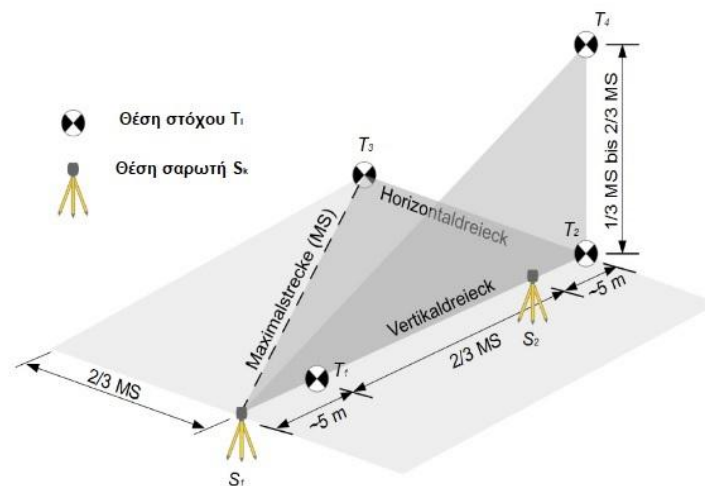
Διάγραμμα 2.2 : Γραφική παρουσίαση αποτελεσμάτων σύγκρισης των δύο σαρωτών - Α/Μ στόχοι [Kersten, et al. 2020]



Διάγραμμα 2.3 : Γραφική παρουσίαση αποτελεσμάτων σύγκρισης των δύο σαρωτών - σφαιρικοί στόχοι [Kersten, et al. 2020]



Διάγραμμα 2.4: Σύγκριση σφαλμάτων επιπεδότητας για τους δύο σαρωτές [Kersten, et al. 2020]



Εικόνα 2.2 : Σχεδιάγραμμα με τις θέσεις των στόχων και τις θέσεις των σαρωτών, (maximalstreck-μέγιστη απόσταση, horizontaldreieck-οριζόντιο τρίγωνο, vertikaldreieck-κατακόρυφο τρίγωνο) [Neitzel, et al. 2014]

Διαφορές αποστάσεων Δ_i (mm)	Στόχος T_1	Στόχος T_2	Στόχος T_3
Στόχος T_2	-1,7		
Στόχος T_3	0,1	-6,2	
Στόχος T_4	-0,2	2,1	-2,2

Διαφορές αποστάσεων Δ_i (mm)	Στόχος T_1	Στόχος T_2	Στόχος T_3
Στόχος T_2	6,0		
Στόχος T_3	5,2	0,8	
Στόχος T_4	3,0	3,8	0,2

Πίνακας 2.2 : Τα αποτελέσματα των μετρήσεων, ZFIMAGER (επάνω), RTC360 (κάτω)
[Kersten, et al. 2020]

Στο **τρίτο άρθρο** παρουσιάζεται από τους Neitzel, et al.(2014) μια τυποποιημένη διαδικασία ελέγχου επίγειων σαρωτών. Ουσιαστικά ελέγχεται αν οι ακρίβειες του επίγειου σαρωτή πληρούν τις ακρίβειες του κατασκευαστή. Μερικοί από τους σαρωτές της αγοράς πλέον περιέχουν στα λογισμικά τους τρόπους υπολογισμού των αποκλίσεων του σαρωτή ως ένα κομμάτι ελέγχου της ακρίβειας αυτών.

Η μεθοδολογία που ακολουθείται αφορά στις συστηματικές αποκλίσεις που μπορεί να παρουσιάσει ένας σαρωτής και όχι, για παράδειγμα, στον θόρυβο που μπορεί να έχει η γεωμετρική ακρίβεια του σαρωτή.

Ο έλεγχος του σαρωτή προτείνεται σε περιπτώσεις όπως, μετά από μεγάλη διάρκεια μη χρήσης του, μετά από εκτενείς μετρήσεις και πριν από μετρήσεις όπου απαιτούνται υψηλές ακρίβειες. Ο έλεγχος είναι σύντομος και θα πρέπει να πραγματοποιείται με τον πρότυπο εξοπλισμό και λογισμικό.

Εφόσον μετά τον έλεγχο τα αποτελέσματα δεν πληρούν αυτά του κατασκευαστή, ο σαρωτής χρειάζεται βαθμονόμηση ή προσαρμογή.

Η διαδικασία ελέγχου του σαρωτή έχει τη δυνατότητα να αντλήσει τις αποκλίσεις των μετρήσεων χωρίς την χρήση κάποιου στόχου ή κάποιων τιμών αναφοράς, οι οποίες αποκλίσεις στη συνέχεια θα συγκριθούν με τις ακρίβειες του κατασκευαστή, και θα αποφασιστεί αν χρειάζεται ο σαρωτής βαθμονόμηση ή μπορεί να συνεχίσει τις μετρήσεις με ασφάλεια.

Η εγκατάσταση που προτείνεται για τις μετρήσεις αποτελείται από 4 στόχους οι οποίοι δημιουργούν ένα οριζόντιο και ένα κατακόρυφο τρίγωνο. Τα δύο τρίγωνα έχουν την μια πλευρά κοινή. Οι δύο θέσεις σάρωσης (S_1, S_2) βρίσκονται στην ευθεία της κοινής πλευράς του τριγώνου μαζί με τους 2 από τους 4 στόχους (T_1, T_2). Οι διαστάσεις των τριγώνων και οι αποστάσεις μεταξύ των δύο θέσεων σάρωσης έχουν να κάνουν με το εύρος μέτρησης του επίγειου σαρωτή και με τη μέγιστη συνιστώμενη απόσταση που ορίζει ο κατασκευαστής.

Αφού υπολογιστούν οι αποστάσεις και οι διαφορές των αποστάσεων που προτείνονται, υπολογίζονται κάποιες αβεβαιότητες οι οποίες φαίνονται παρακάτω. Στην συγκεκριμένη έρευνα έχει δημιουργηθεί και μια φόρμα υπολογισμού των συστηματικών σφαλμάτων η οποία δέχεται ως δεδομένα εισαγωγής τα παρακάτω:

- Την αβεβαιότητα u_T των κέντρων των στόχων
- Τις καρτεσιανές συντεταγμένες των κέντρων όλων των στόχων (T_1-T_4) υπολογισμένες από τη θέση S_1 , όπου θα πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον μια τριπλή μέτρηση.
- Τις καρτεσιανές συντεταγμένες των κέντρων όλων των στόχων (T_1-T_4) υπολογισμένες από τη θέση S_2 , όπου θα πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον μια τριπλή μέτρηση.

Στη φόρμα υπολογισμού, υπολογίζονται με βάση τα παραπάνω, οι αποστάσεις, οι διαφορές των αποστάσεων και οποιαδήποτε απόκλιση μεταξύ των αποστάσεων. Ακολουθούν κάποια παραδείγματα για να φανεί η δομή των αποτελεσμάτων της φόρμας υπολογισμού.

Στο πρώτο παράδειγμα με τη διαφορά της απόστασης Δ_{12} , παρατηρείται μια συστηματική απόκλιση όπως φαίνεται παρακάτω, ενώ στο δεύτερο παράδειγμα, εξετάζοντας τις διαφορές των αποστάσεων Δ_{14} και Δ_{34} παρουσιάζονται κάποιες συστηματικές γωνιακές αποκλίσεις. Ακολουθούν οι εικόνες 2.3 και 2.4 οι οποίες αφορούν τα τεστ του άρθρου μεταφρασμένα σε ορισμένα βασικά σημεία για την καλύτερη κατανόηση της φόρμας.



DVW - Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V.

Berechnungsformular zum DVW-Merkblatt "Verfahren zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern"

Datum der Messung: 01. Mrz 14
 Bemerkungen: Beispieldaten einer TLS-Überprüfung mit Aufdeckung einer Abweichung in der Additionskonstanten von 5 mm.

Beobachter: M. Mustermann
 Instrument: Laserscanner xy
 Zielzeichen-Typ: Schachbrett
 Auswertesoftware: Software xy

I. Ορισμός του μεγέθους του ελέγχου

Αβεβαιότητα μέτρησης των κέντρων των στόχων (απο τον κατασκευαστή)

u_1 : 1.0 mm

→ Συγκριτικό μέγεθος 4.0 mm

II. Συντεταγμένες των στόχων

Θέση σάρωσης S1	Στόχος T ₁			Στόχος T ₂			Στόχος T ₃			Στόχος T ₄		
	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]
	0.9628	4.9011	-0.0992	8.6170	43.8799	0.0547	-30.6282	51.5898	0.1001	8.6147	43.8775	19.9997
	0.9627	4.9017	-0.0999	8.6183	43.8776	0.0522	-30.6278	51.5872	0.0924	8.6138	43.8798	19.9959
	0.9628	4.9030	-0.0998	8.6187	43.8780	0.0532	-30.6293	51.5896	0.0988	8.6145	43.8769	19.9993
Μέσος όρος συντεταγμένων	0.9628	4.9019	-0.0996	8.6180	43.8785	0.0534	-30.6284	51.5889	0.0971	8.6143	43.8781	19.9983

Θέση σάρωσης S2	Στόχος T ₁			Στόχος T ₂			Στόχος T ₃			Στόχος T ₄		
	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]
	17.8850	29.7548	-0.0350	-2.5737	-4.2808	0.0978	31.7015	-24.8923	0.1275	-2.5718	-4.2989	20.0443
	17.8869	29.7561	-0.0323	-2.5733	-4.2807	0.0978	31.7044	-24.8887	0.1296	-2.5706	-4.2968	20.0436
	17.8851	29.7554	-0.0351	-2.5732	-4.2807	0.0981	31.7044	-24.8887	0.1274	-2.5718	-4.2985	20.0439
Μέσος όρος συντεταγμένων	17.8857	29.7554	-0.0341	-2.5734	-4.2807	0.0979	31.7034	-24.8899	0.1282	-2.5714	-4.2981	20.0439

III. Αποστάσεις μεταξύ των στόχων

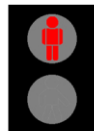
Θέση σάρωσης S1	Απόσταση από...έως [m]	Στόχος T ₁	Στόχος T ₂	Στόχος T ₃
	Στόχος T ₂		39.7215	
Στόχος T ₃		56.3712	39.9967	
Στόχος T ₄		44.5153	19.9449	44.6711

Θέση σάρωσης S2	Απόσταση από...έως [m]	Στόχος T ₁	Στόχος T ₂	Στόχος T ₃
	Στόχος T ₂		39.7121	
Στόχος T ₃		56.3655	39.9955	
Στόχος T ₄		44.5114	19.9460	44.6702

IV. Διαφορές αποστάσεων

Διαφορά απόστασης Δ _{ij} [mm]	Στόχος T ₁	Στόχος T ₂	Στόχος T ₃
Στόχος T ₂	9.4		
Στόχος T ₃	5.7	1.2	
Στόχος T ₄	3.9	-1.1	0.9

V. Αποτέλεσμα



Σταθερή συστηματική απόκλιση : 4.7 mm

Σημαντική απόκλιση στις μετρήσεις αποστάσεων
 Καμία περαιτέρω ανάλυση των γωνιακών αποκλίσεων

Εικόνα 2.3: Φόρμα αποτελεσμάτων I



DVW - Gesellschaft für
Geodäsie,
Geoinformation und
Landmanagement e. V.

Berechnungsformular zum DVW-Merkblatt "Verfahren zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern"

Datum der Messung: 01. Mrz 14
Bemerkungen: Beispieldaten einer TLS-Überprüfung mit
Aufdeckung einer Abweichung in Ziel- u.
Kippachse von jeweils 30 mgon.

Beobachter: M. Mustermann
Instrument: Laserscanner xy
Zielzeichen-Typ: Schachbrett
Auswertesoftware: Software xy

I. Ορισμός του μεγέθους του ελέγχου

Αβεβαιότητα μέτρησης των κέντρων των στόχων (απο τον κατασκευαστή)

u_1 : 1.0 mm

→ Συγκριτικό μέγεθος U_{Δ} : 4.0 mm

II. Συντεταγμένες των στόχων

Θέση σάρωσης S1	Στόχος T ₁			Στόχος T ₂			Στόχος T ₃			Στόχος T ₄		
	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]
	0.9615	4.9065	-0.1001	8.5989	43.8860	0.0519	-30.6552	51.5766	0.0937	8.5705	43.8910	40.0010
	0.9611	4.9057	-0.1000	8.5989	43.8850	0.0496	-30.6550	51.5794	0.0941	8.5695	43.8896	40.0024
	0.9614	4.9058	-0.0997	8.5958	43.8879	0.0522	-30.6566	51.5755	0.0994	8.5691	43.8917	40.0003
Μέσος όρος συντεταγμένων	0.9613	4.9060	-0.0999	8.5979	43.8863	0.0512	-30.6556	51.5772	0.0957	8.5697	43.8908	40.0012

Θέση σάρωσης S2	Στόχος T ₁			Στόχος T ₂			Στόχος T ₃			Στόχος T ₄		
	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]
	17.8730	29.7671	-0.0336	-2.5748	-4.2876	0.0979	31.7187	-24.8803	0.1267	-2.5341	-4.3297	40.0465
	17.8727	29.7671	-0.0346	-2.5734	-4.2865	0.0977	31.7184	-24.8775	0.1255	-2.5347	-4.3306	40.0475
	17.8747	29.7649	-0.0311	-2.5736	-4.2861	0.0979	31.7153	-24.8801	0.1262	-2.5346	-4.3314	40.0476
Μέσος όρος συντεταγμένων	17.8735	29.7664	-0.0331	-2.5739	-4.2867	0.0978	31.7175	-24.8793	0.1261	-2.5345	-4.3306	40.0472

III. Αποστάσεις μεταξύ των στόχων

Θέση σάρωσης S1	Απόσταση από...έως [m]	Στόχος T ₁	Στόχος T ₂	Στόχος T ₃
		Στόχος T ₂	39.7216	
	Στόχος T ₃	56.3726	39.9998	
	Στόχος T ₄	56.4429	39.9500	56.4814

Θέση σάρωσης S2	Απόσταση από...έως [m]	Στόχος T ₁	Στόχος T ₂	Στόχος T ₃
		Στόχος T ₂	39.7206	
	Στόχος T ₃	56.3723	39.9994	
	Στόχος T ₄	56.4404	39.9494	56.4724

IV. Διαφορές αποστάσεων

Διαφορά απόστασης Δ_{ij} [mm]	Στόχος T ₁	Στόχος T ₂	Στόχος T ₃
Στόχος T ₂	1.0		
Στόχος T ₃	0.3	0.4	
Στόχος T ₄	2.5	0.6	9.0

V. Αποτέλεσμα



Σταθερή συστηματική απόκλιση : 0.5 mm

Σημαντική γωνιακή απόκλιση

Εικόνα 2.4: Φόρμα αποτελεσμάτων 2

Κεφάλαιο 3^ο

Η τεχνολογία VIS του Leica RTC360

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν κυρίως ο τρόπος λειτουργίας του επίγειου σαρωτή της Leica RTC360, καθώς και τα επιμέρους τμήματα του συστήματος που χρησιμοποιεί ο σαρωτής, κατά τη διαδικασία του αυτόματου προσανατολισμού των σαρώσεων και της συνένωσης των νεφών σημείων. Θα αναφερθούν ειδικά τα τμήματα που απαρτίζουν το VIS (Visual Inertial System), μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί ο σαρωτής αυτός για να πραγματοποιήσει τους παραπάνω αυτοματισμούς.

Το VIS του σαρωτή, εν συντομία αποτελείται από έξι στο σύνολο αισθητήρες, πέντε φωτογραφικές μηχανές και μια αδρανειακή μονάδα μέτρησης. Η λειτουργικότητα του VIS βασίζεται στις αρχές του SLAM (Simultaneous Localization And Mapping), και σκοπός του είναι να υπολογιστεί η σχετική θέση και προσανατολισμός στο χώρο, μεταξύ δύο διαδοχικών σαρώσεων του σαρωτή. Ακολουθεί, αναλυτική αναφορά στα επιμέρους τμήματα του συστήματος αυτού.

Το σύστημα του σαρωτή απαρτίζεται από ορισμένα αντικείμενα, πέραν του ίδιου του σαρωτή. Ολόκληρο το σύστημα χωράει σε μια τσάντα πλάτης που προσφέρεται από τον κατασκευαστή. Σε αυτή την τσάντα βρίσκεται ο σαρωτής, το τρίποδο του σαρωτή, μπαταρίες και φορτιστές αυτών, καθώς και ένα τάμπλετ, το οποίο είναι προαιρετικό, με το οποίο ο χειριστής μπορεί να δουλέψει στο πεδίο με τον σαρωτή. Ο σαρωτής έχει τη δυνατότητα σάρωσης και χωρίς το τάμπλετ, απλώς μέσω αυτού μπορούν να πραγματοποιηθούν πολλοί έλεγχοι στο πεδίο καθώς και να παρακολουθήσει ο χειριστής την εξέλιξη των σαρώσεων και να πραγματοποιήσει τυχόν αλλαγές, διορθώσεις και άλλες διαδικασίες. Ο κατασκευαστής προσφέρει δύο εκδόσεις του επίσημου λογισμικού του σαρωτή για την επεξεργασία των δεδομένων. Η βασική και κύρια έκδοση ονομάζεται Cyclone Register 360 ενώ υπάρχει και μια δεύτερη πιο "ελαφριά" έκδοση η οποία χρησιμοποιείται στο τάμπλετ για εργασίες στο πεδίο και ονομάζεται Cyclone Field 360. Τα λογισμικά αυτά θα αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο.

3.1 Περιγραφή και αρχές λειτουργίας του RTC360

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθούν οι βασικές αρχές λειτουργίας του σαρωτή RTC360, όπως έχει αναλυθεί και στο σχετικό άρθρο που προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2 (Basion et al.2019)

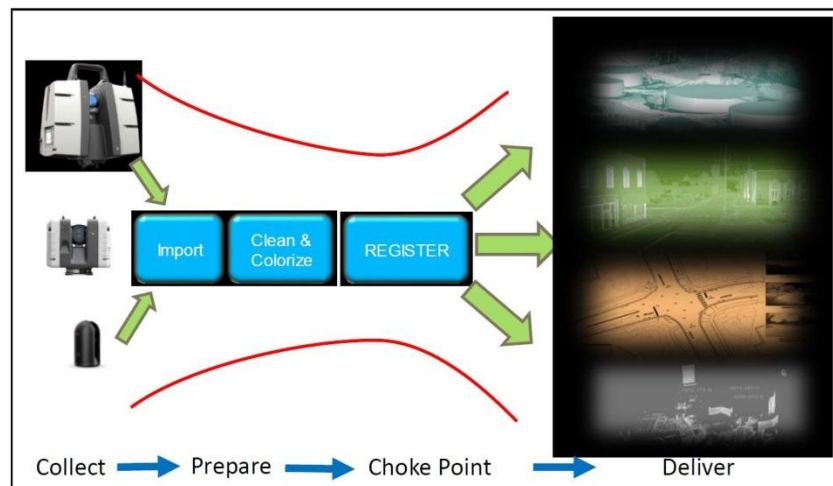
Η χρήση των επίγειων σαρωτών εμφανίζεται σήμερα σε εφαρμογές σε διάφορους τομείς. Η ροή εργασιών από την πρώτη εμφάνισή τους δεν έδινε στον χειριστή την δυνατότητα να επέμβει και να επεξεργαστεί τις μετρήσεις στο πεδίο, και απαιτούσε αρκετές ώρες εργασίας στο γραφείο για την επεξεργασία και προσανατολισμό των σαρώσεων με χειροκίνητο τρόπο. Με τον σαρωτή RTC360 η

Leica προσπάθησε να βελτιώσει αισθητά τόσο την παραγωγικότητα στο πεδίο όσο και στο γραφείο δίνοντας τη δυνατότητα πραγματοποίησης μέχρι και 12 σαρώσεων στο διάστημα μιας ώρας.

Εισάγοντας στο σαρωτή το SLAM κατά τη μετακίνηση του σαρωτή οι πέντε φωτογραφικές μηχανές και η αδρανειακή μονάδα που περιέχεται στον σαρωτή ενεργοποιούνται και έτσι υπολογίζονται οι έξι βαθμοί ελευθερίας που χρειάζονται για τον μετασχηματισμό θέσης από την πρώτη θέση σάρωσης στη δεύτερη. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν τα δύο νέφη σημείων να προσανατολιστούν και να προκύψει ένα ενιαίο νέφος σημείων συνενωμένο.

Καθ' όλη τη διάρκεια, ο χειριστής μπορεί να επέμβει στα δεδομένα μέσω του τάμπλετ που έχει μαζί το σύστημα και κατευθύνει τον σαρωτή και με τη χρήση του λογισμικού Cyclone FIELD 360 και να κάνει τυχόν αλλαγές, να διορθώσει χειροκίνητα τυχόν λανθασμένα προσανατολισμένα νέφη σημείων, να θέσει κάποια παράθυρα στις όψεις ώστε να δημιουργήσει τομές και διάφορες άλλες εφαρμογές.

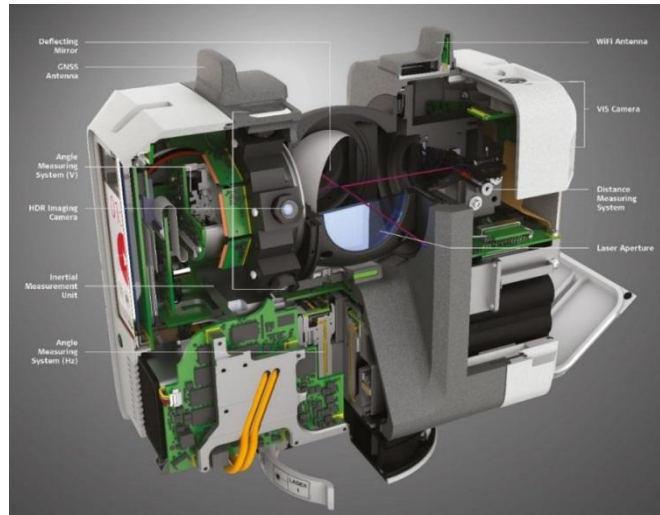
Η ροή εργασιών στο πεδίο είναι πολύ απλή και εύκολη καθώς σε μέγεθος ο σαρωτής είναι σχετικά μικρός σε όγκο και ελαφρύς και μπορεί να μετακινηθεί εύκολα με το τρίποδο χωρίς να χρειαστεί οριζόντιωση, αφού μπορεί να εκτιμηθεί εύκολα η κλίση του σαρωτή κατά τη σάρωση.



Εικόνα 3.1 : Η ροή εργασιών του Leica RTC360 [Biasion et al. 2019]

3.1.1 Συλλογή δεδομένων HDR

Ο σαρωτής RTC360 έχει τη δυνατότητα να συλλέξει απλές φωτογραφίες και φωτογραφίες υψηλού δυναμικού εύρους (High Dynamic Range – HDR) 3D του περιβάλλοντος χώρου. Οι φωτογραφίες HDR ουσιαστικά είναι σύνθεση εικόνων που έχουν ληφθεί με διαφορετικούς χρόνους έκθεσης του αισθητήρα στο φως έτσι ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή τιμή έντασης για κάθε pixel της εικόνας. Με τις φωτογραφίες HDR δεν χρειάζεται η επεξεργασία των εικόνων από τον χειριστή πράγμα που μειώνει κι άλλο τον χρόνο εργασιών και ακόμα γίνεται η διαδικασία πιο προσιτή για επαγγελματίες με λιγότερη εμπειρία στον τομέα.

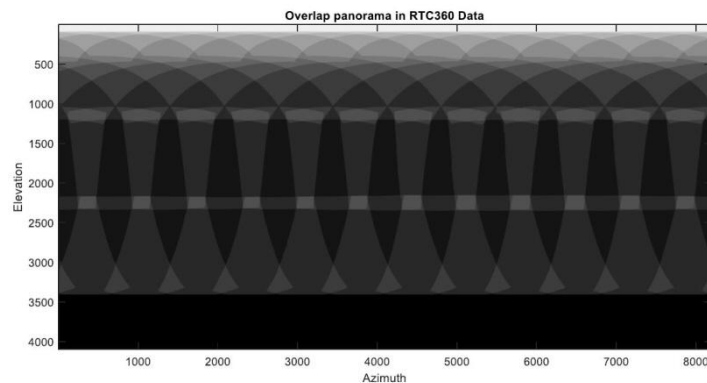


Εικόνα 3.2 : Το εσωτερικό του σαρωτή Leica RTC360 [Biasion et al. 2019]

Ο RTC360 συλλέγει φωτογραφίες σε ολόκληρο το οπτικό πεδίο (Field of View-FoV) με τη χρήση τριών φωτογραφικών μηχανών οι οποίες είναι τοποθετημένες σε ακτινική διάταξη μέσα στο πλαίσιο του σαρωτή, και είναι κάθετα προσανατολισμένες όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.2. Οι κάμερες αυτές έχουν αισθητήρα χρώματος, ανάλυσης 12 Μεγαρίxel (MP), και κατακόρυφο FoV 62° και λαμβάνουν φωτογραφίες σε πέντε διαφορετικές τιμές έκθεσης του αισθητήρα στο φως (HDR Bracketing). Οι κάμερες καλύπτουν όλο το κατακόρυφο οπτικό πεδίο, λαμβάνοντας υπόψη την απαιτούμενη επικάλυψη και το “κενό” που βρίσκεται στο ναδίρ, δηλαδή στη βάση του σαρωτή.

Στο οριζόντιο τμήμα, το οπτικό πεδίο είναι 48° έτσι ώστε η κατακόρυφη επικάλυψη που δίνεται από τις 12 θέσεις λήψης (ανά 30°) να είναι εγγυημένη για ολόκληρο τον ορίζοντα. Επίσης, οι μεγάλης επικάλυψης φωτογραφίες βελτιώνουν κατά πολύ τα αποτελέσματα των αλγορίθμων σύνθεσης των τελικών εικόνων.

Κάθε HDR bracket διαφέρει από το προηγούμενο κατά ένα στοπ, και ο συνδυασμός των τιμών έκθεσης και των ISO είναι προκαθορισμένος, χωρίς να παίζει κάποιο ρόλο η τιμή της έντασης του φωτός στο πεδίο. Δεν χρειάζεται φωτομέτρηση πριν την συλλογή των φωτογραφιών πράγμα που σημαίνει πως η δημιουργία της συλλογής φωτογραφιών HDR είναι μια διαδικασία του ενός λεπτού. Το αποτέλεσμα μετά τον συνδυασμό όλων των φωτογραφιών είναι μια εικόνα ανάλυσης 423 MP (12MP x 3 κάμερες x 12 θέσης λήψης). Οι κάμερες έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε η οπτική ανάλυση να ταιριάζει με αυτή του νέφους σημείων όταν αυτό συλλέγεται με την υψηλότερη ανάλυση που δίνει ο κατασκευαστής που είναι 3mm στα 10m απόσταση αντικειμένου - σαρωτή.

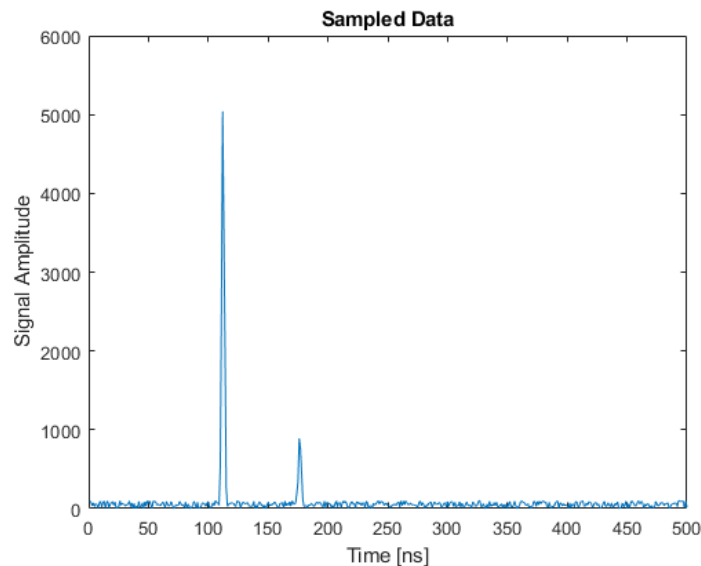


Εικόνα 3.3 : Πανοραμική εικόνα των επικαλυπτόμενων HDR φωτογραφιών του RTC360 [Biasion et al. 2019]

Ένα ζήτημα που απασχολεί ακόμα και σήμερα τους κατασκευαστές επίγειων σαρωτών, είναι η μέτρηση αξιόπιστων σημείων πάνω σε διαφορετικού είδους επιφάνειες. Υπάρχουν πολλοί παράγοντες οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν την μέτρηση των σημείων όπως η απόσταση που βρίσκεται η επιφάνεια, η ανακλαστικότητα και η γωνία πρόσπτωσης κ.ά.

Πιο συγκεκριμένα υπάρχει ο όρος albedo μιας επιφάνειας που πρόκειται για τον λόγο της προσπίπτουσας ακτίνας λέιζερ με αυτή που ανακλάται, και μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την πληρότητα του νέφους σημείων που έχει συλλεχθεί. Για να το ξεπεράσει αυτό η Leica προσέγγισε το πρόβλημα με έναν τρόπο που μοιάζει με αυτόν του HDR στις φωτογραφίες, απλώς το εφαρμόζει στο αποστασιόμετρο EDM (Electronic Distance Measurement).

Ουσιαστικά το HDR EDM υλοποιήθηκε με τον RTC360 και διαμορφώνει την εκπεμπόμενη δέσμη laser σε δύο παλμούς, και τους ονομάζει τον έναν “δυνατό” παλμό και τον άλλον “αδύναμο” παλμό. Οι δύο παλμοί έχουν μετατόπιση μεταξύ τους 75ns που σημαίνει πως ο χρόνος είναι τόσο μικρός που δεν δημιουργούνται σχεδόν καθόλου οπτικά σφάλματα και θόρυβος στο νέφος σημείων. Το αποτέλεσμα είναι ένας συνδυασμός των δεδομένων των δύο παλμών αυτών.



Διάγραμμα 3.1 : Δείγμα των εκπεμπόμενων δεσμών στους δύο διαφορετικής έντασης παλμούς

[Biasion et al. 2019]

Ο δυνατός παλμός, αφού φέρει πιο πολύ ενέργεια από ό,τι ο αδύναμος, είναι πιο ευαίσθητος σε επιφάνειες χαμηλής ανακλαστικότητας, έτσι συνήθως σημεία που βρίσκονται σε χαμηλής ανακλαστικότητας επιφάνειες έχουν μετρηθεί με τον δυνατό παλμό. Αντίστοιχα σε επιφάνειες υψηλής ανακλαστικότητας μεγαλύτερο ρόλο παίζει ο αδύναμος παλμός, αφού ο δυνατός παλμός θα επιστρέψει πολύ δυνατή ένταση με αποτέλεσμα να κορεστεί η δίοδος λήψης.

Οι ενεργειακή αναλογία μεταξύ αδύνατου και δυνατού παλμού είναι περίπου 1:7 και έχει παίξει σημαντικό ρόλο στις σαρώσεις επιφανειών χαμηλής ανακλαστικότητας, συγκριτικά πάντα με προηγούμενα μοντέλα EDM. Επίσης, τα δεδομένα που έχουν μετρηθεί από επιφάνειες χαμηλής ανακλαστικότητας εκτός του ότι είναι πιο ολοκληρωμένα, έχει μειωθεί κατά πολύ το εύρος του θορύβου αφού η ενέργεια του παλμού που χρησιμοποιείται είναι υψηλότερη.



Εικόνα 3.4 : Σύγκριση μεταξύ νέφους σημείων του σαρωτή Scanstation P40 (πάνω) και του RTC360(κάτω)

[Biasion et al. 2019]

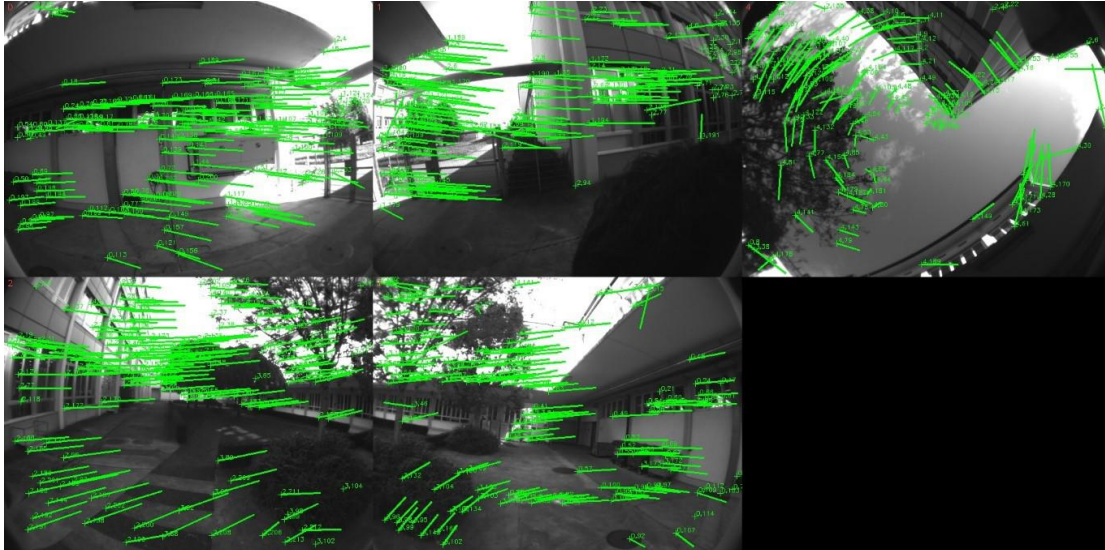
3.1.2 VIS

Όπως προαναφέρθηκε, η μεγάλη καινοτομία του σαρωτή RTC360 είναι το σύστημα VIS. Σκοπός του είναι να υπολογίσει τη σχετική θέση και προσανατολισμό μεταξύ δύο επικαλυπτόμενων σαρώσεων αυτόματα, χωρίς να χρειαστεί να επέμβει ο χρήστης. Με βάση τον σχετικό προσανατολισμό, το δεύτερο νέφος σημείων μετασχηματίζεται στο σύστημα του πρώτου. Αυτός ο αρχικός προσανατολισμός είναι πολύ σημαντικός για έναν πρώτο έλεγχο από τον χρήστη αλλά και για μια αυτόματη προσαρμογή με τον αλγόριθμο ICP οποίος απαιτεί καλές αρχικές τιμές ώστε να μπορέσει να τρέξει και να συγκλίνει στα επιθυμητά αποτελέσματα. Όλοι οι προσανατολισμοί των διαδοχικών σαρώσεων αποθηκεύονται πάντα ως metadata σε κάθε έργο. Έτσι, μπορούν να εφαρμοστούν στα δεδομένα στο πεδίο με τη χρήση του Cylone FIELD 360.

Το VIS έχει ως βασική αρχή λειτουργίας το Visual SLAM. Συνδυάζει οπτική πληροφορία που έχει συλλέξει με το σύστημα των πέντε καμερών και της μιας αδρανειακής μονάδας που φέρει στο εσωτερικό του, που έχει ως αποτέλεσμα μια πολύ ισχυρή και ακριβή εκτίμηση θέσης.

Οι πέντε κάμερες των 2MP βρίσκονται στις τέσσερις πάνω γωνίες του σαρωτή και η μία βρίσκεται στο πάνω μέρος. Έτσι διασφαλίζεται η κάλυψη όλου του οριζοντα μαζί με την υποστήριξη της πέμπτης κάμερας.

Αφού έχει ολοκληρωθεί η σάρωση στην πρώτη θέση, ο αλγόριθμος VIS εντοπίζει χαρακτηριστικά σημεία στην τοποθεσία από το πρώτο σετ εικόνων των πέντε καμερών. Αυτά τα σημεία πλέον μπορούν να έχουν τρισδιάστατες συντεταγμένες. Με την διαδικασία της οπισθοτομίας μπορεί να υπολογιστεί η θέση της πρώτης σάρωσης η οποία θεωρείται και η αρχή της πλοήγησης με το VIS.



Εικόνα 3.5 :Εξαγωγή χαρακτηριστικών σημείων από τις εικόνες με το σύστημα VIS [Basion et al. 2019]

Όταν αρχίσει η μετακίνηση του σαρωτή, η συνεχής διαδικασία της παρακολούθησης των χαρακτηριστικών σημείων δίνει τη δυνατότητα με συνεχείς οπισθοτομίες να υπολογίζεται η θέση του σαρωτή σε πραγματικό χρόνο στο σύστημα αναφοράς της θέσης της πρώτης σάρωσης.

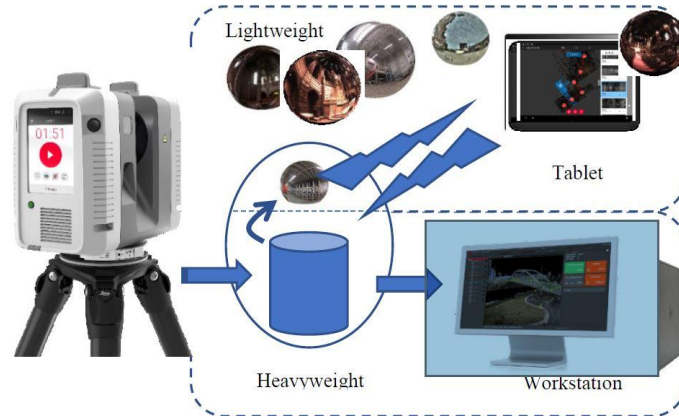
Όταν ο σαρωτής μετακινείται εκτός της αρχικής τοποθεσίας, όπου τα χαρακτηριστικά σημεία υπάρχουν διαθέσιμα ως τρισδιάστατα σημεία από την σάρωση, το VIS χρειάζεται να παραγάγει νέα τρισδιάστατα χαρακτηριστικά σημεία για να μπορέσει να υπολογίσει την θέση του σαρωτή στην άγνωστη πλέον τοποθεσία.

Τέλος, οι μετρήσεις της επιτάχυνσης και των ακτινικών περιστροφών από την αδρανειακή μονάδα (IMU) εισάγονται μαζί με τις θέσεις σάρωσης που προέκυψαν από τον προσανατολισμό των εικόνων σε ένα φίλτρο Kalman. Στο τέλος της κίνησης του σαρωτή, όλες οι ενδιάμεσες θέσεις και η τελευταία μαζί, επανυπολογίζονται με την εφαρμογή της μεθόδου συνόρθωσης δέσμης (bundle adjustment). Με αυτόν τον τρόπο το αποτέλεσμα είναι πιο ακριβές, αφού συμπεριλαμβάνει στο αποτέλεσμα όλες τις παρατηρήσεις που συλλέχθηκαν κατά τη μετακίνηση του σαρωτή, από την πρώτη θέση σάρωσης μέχρι και την τελευταία.

3.1.3 Λογισμικά σειράς CYCLONE

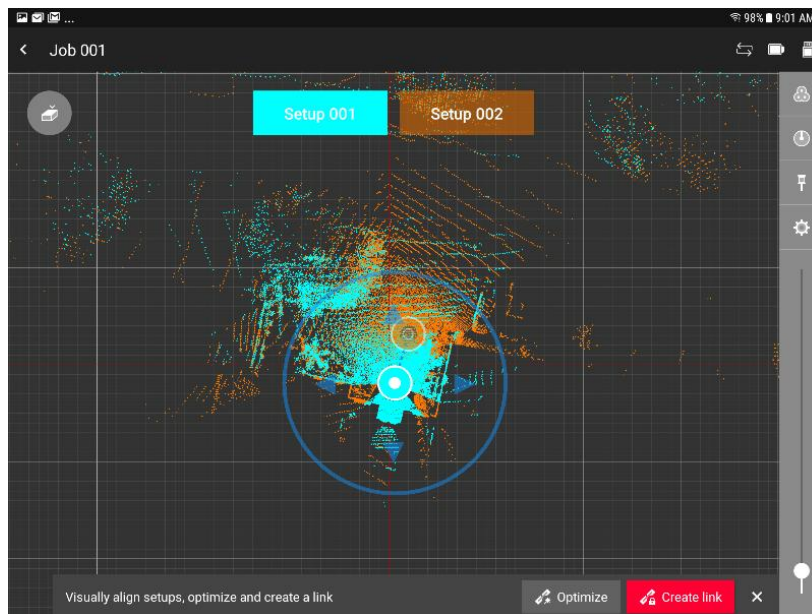
Ο σαρωτής της Leica, συνοδεύεται από δύο λογισμικά, όπως προαναφέρθηκε, εκδοχές του επίσημου λογισμικού της, Cyclone. Την βασική έκδοση αποτελεί το Cyclone Register 360 και υπάρχει και η έκδοση Cyclone Field 360 την οποία φέρει το τάμπλετ για τις εργασίες στο πεδίο.

Στο Cyclone Field 360 εμφανίζεται μια πιο “ελαφριά” έκδοση των δεδομένων που έχουν συλλεχθεί ώστε οι διαδικασίες να πραγματοποιούνται γρηγορότερα και ο όγκος δεδομένων να είναι μικρότερος. Ολόκληρος ο όγκος των δεδομένων μπορεί να περαστεί στη συνέχεια σε κάποιον υπολογιστή με τη χρήση ενός USB stick και να υποστεί επεξεργασία με το Cyclone Register 360.

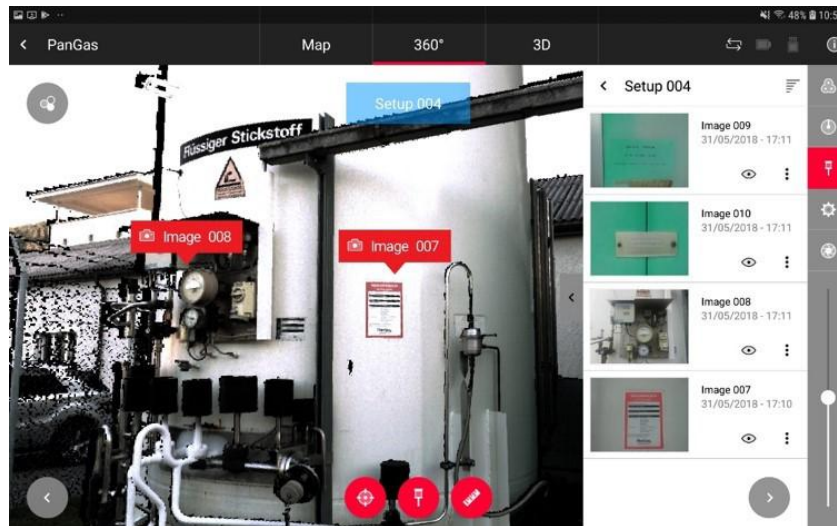


Εικόνα 3.6 : Διάγραμμα σχέσης δεδομένων και πλατφόρμας επεξεργασίας [Biasion et al. 2019]

Ακόμα, στο πεδίο με τη χρήση της εφαρμογής Field μπορεί ο χρήστης να προσανατολίσει οπτικά τα νέφη σημείων καθώς και να προσθέσει διάφορες πληροφορίες όπως ετικέτες στις εικόνες, σημειώσεις κειμένου, σημειώσεις ηχητικές, και γενικά θα μπορούσε να προσθέσει οποιοδήποτε είδος αρχείου επιθυμεί.



Εικόνα 3.7 : Οπτικός προσανατολισμός δύο νεφών σημείων στο λογισμικό Cyclone Field 360 [Biasion et al. 2019]

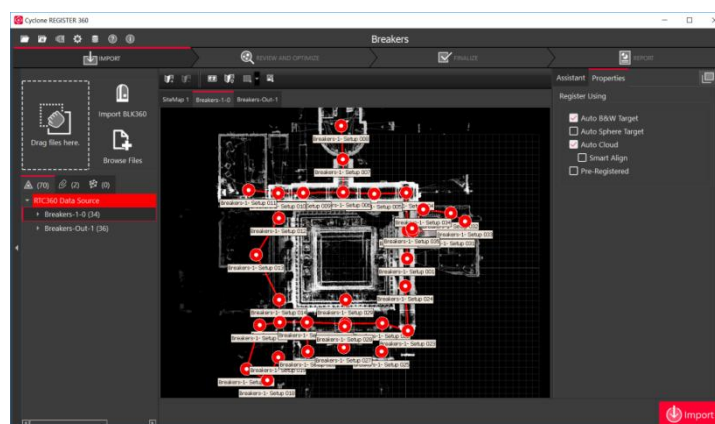


Εικόνα 3.8 : Τοποθέτηση ετικετών στο λογισμικό Cyclone Field 360

[Biasion et al. 2019]

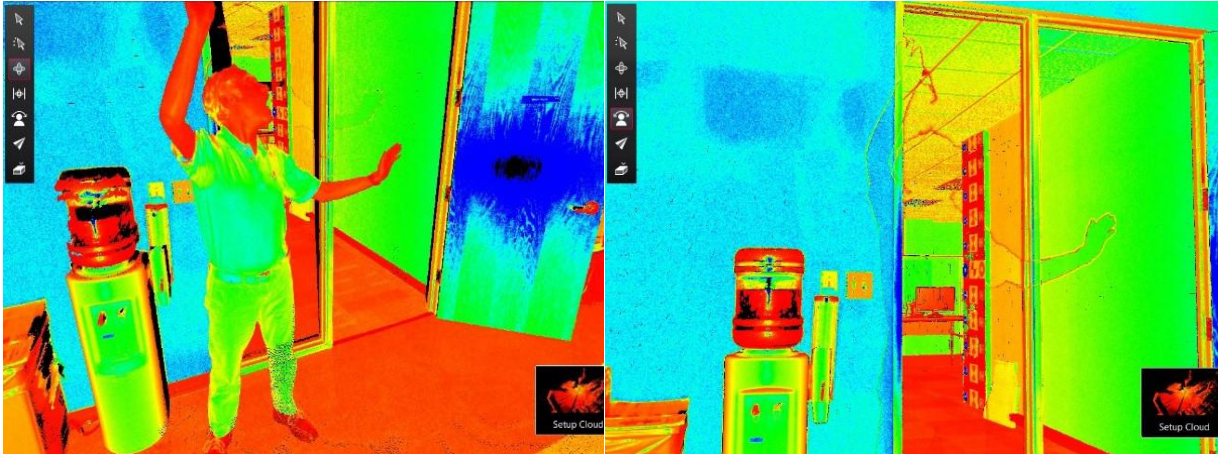
Όλες οι αλλαγές που πραγματοποιεί ο χρήστης με το λογισμικό στο πεδίο συγχρονίζονται με τον σαρωτή, και το μόνο σημείο όπου τα δεδομένα μένουν ακέραια είναι ο σαρωτής και το USB stick με το οποίο θα μεταφερθούν τα δεδομένα στον υπολογιστή.

Μετά το τέλος της σάρωσης στο πεδίο, τα δεδομένα μεταφέρονται με το USB stick στον υπολογιστή. Το περιβάλλον είναι αρκετά απλό για τον χρήστη και περιέχει λειτουργίες όπως “drag and drop” για να μεταφερθούν τα δεδομένα στον λογισμικό Cyclone Register 360. Σε πρώτη φάση, εμφανίζεται μια προεπισκόπηση της σάρωσης η οποία δεν απαιτεί χρόνο για την εμφάνισή της, και μπορεί ο χρήστης να παρατηρήσει τους προσανατολισμούς που έχουν πραγματοποιηθεί μεταξύ των νεφών στο πεδίο. Με το κουμπί «εισαγωγή» αρχίζει πλέον η διαδικασία εισαγωγής ολόκληρης της σάρωσης του πεδίου στο λογισμικό, όπου προηγουμένως μπορεί ο χρήστης να επιλέξει, αν επιθυμεί, διάφορες παραμέτρους όπως να εξαχθούν στόχοι που έχουν τοποθετηθεί ή να γίνει αυτόματη συνένωση των νεφών με την διαδικασία cloud to cloud που χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο ICP.



Εικόνα 3.9 : Προεπισκόπηση της σάρωσης στο Cyclone Register 360 πριν την εισαγωγή των δεδομένων

[Biasion et al. 2019]



Εικόνα 3.10 : Αφαίρεση κινούμενων εμποδίων στο λογισμικό Cyclone Register 360 [Biasion et al. 2019]

3.2 SLAM

Ο όρος SLAM, ακρωνύμιο για το Simultaneous Localization And Mapping, δηλώνει μια διαδικασία με την οποία με εφαρμογή κατάλληλων αλγορίθμων μπορεί να χαρτογραφηθεί μια άγνωστη περιοχή και να εντοπιστεί στη περιοχή αυτή, η θέση του συστήματος το οποίο φέρει τον αντίστοιχο αισθητήρα για την αναγνώριση και την χαρτογράφηση της περιοχής αυτής . Το SLAM χρησιμοποιείται ευρέως στην ρομποτική καθώς μπορεί να χαρτογραφήσει την γύρω από το ρομπότ άγνωστη περιοχή αλλά και να τοποθετήσει το ρομπότ στη σωστή θέση μέσα σε αυτή.

Το κομμάτι του SLAM θα μπορούσε να χωριστεί σε δύο μέρη. Πρώτο, αυτό που αφορά στον αισθητήρα τον οποίο χρησιμοποιεί το σύστημα ώστε να συλλέξει τα αντίστοιχα δεδομένα, και ένα δεύτερο με τους αλγορίθμους και τη μεθοδολογία που χρησιμοποιεί για να επεξεργαστεί τα δεδομένα αυτά και να προκύψουν τα αποτελέσματα που χρειάζεται.

Κάποια είδη SLAM που έχουν δημιουργηθεί με βάση τον αισθητήρα που χρησιμοποιούν είναι, το ακουστικό SLAM, SLAM με τη χρήση ραντάρ, wifi SLAM το οποίο ανιχνεύει τη ένταση του σήματος wifi από κοντινά σημεία πρόσβασης [Ferris, et al. 2007], καθώς και το visual SLAM το οποίο είναι η παραλλαγή που χρησιμοποιεί ο σαρωτής RTC360 της Leica, και είναι αυτό που έχει τραβήξει τα βλέμματα τον τελευταίο καιρό για ερευνητικούς, και όχι μόνο, σκοπούς.

Αφού γίνει η συλλογή των δεδομένων με τον εκάστοτε αισθητήρα, ακολουθούν κάποια στατιστικά μοντέλα και μεθοδολογίες στους αλγορίθμους επεξεργασίας των δεδομένων από τους οποίους οι πιο σημαντικοί είναι τα Particle filters (φίλτρο σωματιδίων) ή ακολουθιακές μέθοδοι Monte Carlo, το φίλτρο Kalman ή γραμμικός τετραγωνικός εκτιμητής (Linear Quadratic Estimator-LQE) και το GraphSLAM. Εδώ θα γίνει αναφορά εκτενέστερα στο φίλτρο Kalman το οποίο χρησιμοποιεί ο RTC360.

3.2.1 VSLAM

Το Visual SLAM (VSLAM), όπως είναι κατανοητό και από το όνομά του, αφορά σε οπτικούς αισθητήρες οι οποίοι μπορούν να είναι απλές RGB φωτογραφικές μηχανές, ή στερεοκάμερες ή RGB-D κάμερες όπως κάμερες υπολογισμού βάθους. Το VSLAM απασχολεί πολύ τον κόσμο της ρομποτικής τελευταία, καθώς αποτελεί μια εύκολη και φθηνή λύση με τη χρήση φωτογραφικών

μηχανών, αλλά επίσης πλέον με την τεχνολογική εξέλιξη που παρουσιάζεται σήμερα, οι κάμερες υπάρχουν παντού, σε κινητά, τάμπλετ, υπολογιστές ακόμα και σε αυτοκίνητα γεγονός το οποίο προκαλεί πολλές ιδέες και ευκαιρίες για τη δημιουργία εφαρμογών με τη χρήση SLAM.

Κάποιες από τις εφαρμογές που παρατηρούνται είναι η ρομποτική πλοήγηση, όπως για παράδειγμα σε ρομποτικές ηλεκτρικές σκούπες οι οποίες χαρτογραφούν το χώρο όπου βρίσκονται και στη συνέχεια κινούνται σε αυτόν αποφεύγοντας εμπόδια και καλύπτοντας με μεγάλη ακρίβεια όλη την επιφάνεια του χώρου, στην ρομποτική χαρτογράφηση όπου ένα αυτόνομο ρομποτικό όχημα μπορεί να χαρτογραφήσει μια άγνωστη ή/και επικίνδυνη περιοχή όπως έναν άγνωστο πλανήτη, αλλά και σε εφαρμογές εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας που μπορούν να βρεθούν πλέον σε κάθε κινητό τηλέφωνο. Μια γενικότερη ιδέα είναι πως το SLAM μπορεί να αντικαταστήσει σε ορισμένες περιπτώσεις τους δορυφορικούς δέκτες για τον εντοπισμό, ειδικά εκεί που αυτοί δεν παρέχουν σήμα. Τέτοιες περιπτώσεις είναι οι εσωτερικοί χώροι ή οι μεγάλες πόλεις όπου τα ψηλά κτίρια δεν επιτρέπουν στον δορυφορικό δέκτη να εντοπίσει επαρκή αριθμό δορυφόρων για τον προσδιορισμό της θέσης του.

Πλέον το VSLAM βρίσκει εφαρμογή σε επίγειους σαρωτές. Είναι μια διαδικασία η οποία ελαχιστοποιεί κατά πολύ το χρόνο επεξεργασίας των δεδομένων στο γραφείο μετά τη σάρωση, και με τη χρήση κάποιων ακόμα παραγόντων μπορούν πολλαπλές επικαλυπτόμενες σαρώσεις να συνενωθούν αυτόματα με μεγάλη ακρίβεια σε μικρό χρονικό διάστημα.

3.2.1.1 KALMAN FILTER - EKF SLAM

Όπως προαναφέρθηκε, υπάρχουν αρκετοί τρόποι επεξεργασίας των δεδομένων που έχουν συλλέξει οι αισθητήρες αλλά ο πλέον χρησιμοποιούμενος παγκοσμίως στο VSLAM είναι το φίλτρο Kalman. Το φίλτρο Kalman ή γραμμικός τετραγωνικός εκτιμητής, είναι ένας αλγόριθμος ο οποίος χρησιμοποιεί μια σειρά μετρήσεων που έχουν παρατηρηθεί σε μια χρονική περίοδο, μαζί με διάφορες ανακρίβειες όπως ο στατιστικός “θόρυβος”, και βρίσκει εκτιμήσεις κάποιων άγνωστων τιμών οι οποίες τείνουν να είναι πιο ακριβείς από αυτές που έχουν από αποκτηθεί από μια μέτρηση μόνο. Το φίλτρο αυτό πήρε το όνομά του από τον Rudolf E. Kalman ο οποίος ήταν από τους πρώτους που ανέπτυξε αυτή τη θεωρία. (*Kalman, et al. 1960*)

Πλέον υπάρχουν πολλές εκδοχές και παραλλαγές του φίλτρου Kalman οι οποίες χρησιμοποιούνται στο SLAM. Μια από αυτές είναι η EKF (extended Kalman filter), όπου πρόκειται ουσιαστικά για μια μη γραμμική έκδοση του φίλτρου Kalman και βρίσκει χρήσεις σε συστήματα πλοήγησης και δορυφορικά συστήματα. Το EKF αποτελεί πλέον την de facto μεθοδολογία επίλυσης του SLAM καθώς είναι η πιο αποτελεσματική λύση.

Πρόκειται για μια επίλυση βασισμένη στα χαρακτηριστικά σημεία (features). Αυτό σημαίνει πως η άγνωστη περιοχή μοντελοποιείται ως ένα σύνολο από γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Το περιβάλλον σχετίζεται με ένα σύνολο στοιχείων $[B, R, F_1, \dots, F_n]$ και περιγράφεται από έναν πίνακα $M^B = (x^B, P^B)$ όπου x^B είναι το στοχαστικό διάνυσμα κατάστασης με εκτιμώμενη μέση τιμή \underline{x}^B και σφάλμα συμμεταβλητότητας P^B .

$$\hat{x}^B = E[\hat{x}^B] = \begin{bmatrix} \hat{x}^B \\ \vdots \\ x_{F_n}^B \end{bmatrix}$$

$$P^B = E[(x^B - \hat{x}^B)(x^B - \hat{x}^B)^T] = \begin{bmatrix} P_R^B & \cdots & P_{RF_n}^B \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{F_n}^B & \cdots & P_{F_n}^B \end{bmatrix}$$

Το διάνυσμα x^B περιέχει την εκτιμώμενη θέση της κινητής μονάδας R και τον χαρακτηριστικών του περιβάλλοντος F_1, \dots, F_n τα οποία είναι σε σχέση με τη βάση B. Στην περίπτωση της κινητής μονάδας το διάνυσμα κατάστασης x^B περιγράφει τον μετασχηματισμό από το B στο R, τα διαγώνια στοιχεία του P^B παριστάνουν το σφάλμα συμμεταβλητότητας των διαφόρων χαρακτηριστικών και της θέσης της κινητής μονάδας ενώ τα εκτός διαγωνίου στοιχεία του P^B το σφάλμα συμμεταβλητότητας μεταξύ της εκτιμώμενης θέσης και των χαρακτηριστικών. [Τσουβάλου et al. 2009]

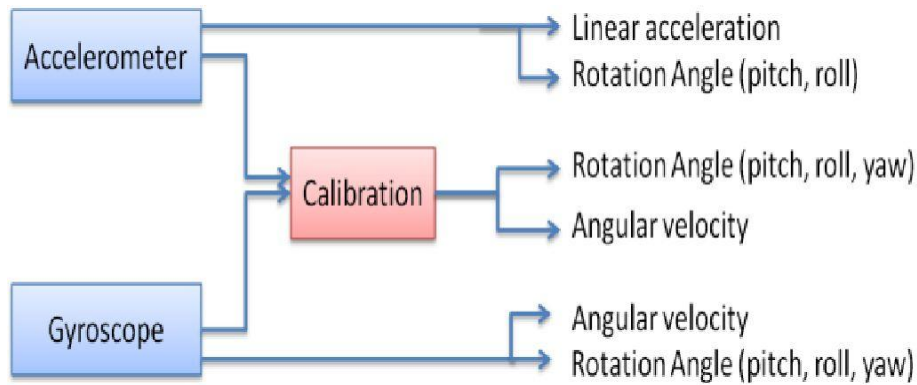
3.3 Μονάδα αδρανειακών μετρήσεων (IMU)

Μαζί με τους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή δεδομένων για την πραγματοποίηση του SLAM συνήθως υπάρχει ένας ακόμα αισθητήρας. Μια αδρανειακή μονάδα μέτρησης (Inertial Measurement Unit-IMU). Τα IMU χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλές κινητές εφαρμογές. Με τα χρόνια έχει αυξηθεί η εμφάνισή τους σε τομείς όπως πλοήγηση, βιομηχανία και προφανώς ρομποτική.

Τα IMU πρωτοεμφανίστηκαν το 1930 σε εφαρμογές πλοήγησης αεροσκαφών. Λόγω των περιορισμών που είχε κυρίως από το μέγεθος, το κόστος και την κατανάλωση ενέργειας, η χρήση του εμφανιζόταν μόνο σε ογκώδεις εφαρμογές και ήταν λιγότερο δημοφιλής σε μικρότερες συσκευές και εφαρμογές καταναλωτών.

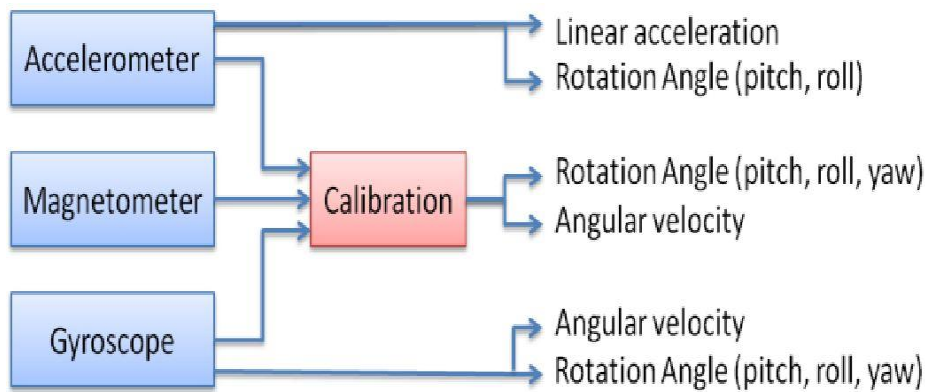
Η τεχνολογία του IMU χρησιμοποιείται κυρίως σε συσκευές για μετρήσεις ταχύτητας, προσανατολισμού και βαρυτικής δύναμης. Σε αρχικό στάδιο η τεχνολογία των IMU αποτελούνταν από δύο ειδών αισθητήρες, επιταχυνσιόμετρα και γυροσκόπια. Το επιταχυνσιόμετρο χρησιμοποιούνταν για την μέτρηση της αδρανειακής επιτάχυνσης, ενώ το γυροσκόπιο για τις μετρήσεις των γωνιακών περιστροφών. Και οι δύο αισθητήρες έχουν τρεις βαθμούς ελευθερίας μετρήσεων στους τρεις άξονες. Μετά από κάποια χρόνια η τεχνολογία των IMU προχώρησε με την εφαρμογή ενός ακόμα αισθητήρα, του μαγνητόμετρου, με το οποίο ουσιαστικά μπορεί να βελτιωθεί η ανάγνωση του γυροσκοπίου.

Οι μονάδες IMU με τους δύο αισθητήρες, έχουν συνήθως δυο με τρεις βαθμούς ελευθερίας για τους άξονες x,y, και z αντίστοιχα για κάθε αισθητήρα, οπότε στο σύνολο έχουν τέσσερις με έξι βαθμούς ελευθερίας. Οι τιμές της επιτάχυνσης από το επιταχυνσιόμετρο και οι τιμές της γωνιακής ταχύτητας από το γυροσκόπιο κρατούνται ξεχωριστά. Οι γωνίες μπορούν να μετρηθούν και από τους δύο αισθητήρες για αυτό και χρησιμοποιούνται μαζί στη βαθμονόμηση για καλύτερα και πιο ακριβή αποτελέσματα. (Norhafizan, et al. 2013)



Διάγραμμα 3.2 : Αδρανειακό σύστημα δύο αισθητήρων (pitch-x,roll-y,yaw-z) [Ahmad, et al. 2013]

Το πλεονέκτημα της χρήσης αυτού του είδους IMU είναι πως δεν θα παρουσιαστούν παρεμβολές στις μετρήσεις όταν η συσκευή βρίσκεται κοντά σε κάποιο σιδηρομαγνητικό υλικό.



Διάγραμμα 3.3 : Αδρανειακό σύστημα τριών αισθητήρων (pitch-x,roll-y,yaw-z) [Ahmad,Ariffin,Ghazilla,Khairi et al. 2013]

3.4 Συνένωση νεφών σημείων

Ένα από τα σημαντικότερα στάδια κατά τη διαδικασία μιας τρισδιάστατης ανακατασκευής, είναι αυτό της συνένωσης των νεφών. Στην περίπτωση των επίγειων σαρωτών, για τη σάρωση ενός αντικειμένου ή χώρου, τις περισσότερες φορές θα χρειαστούν περισσότερες από μία σαρώσεις από διαφορετικές θέσεις για να καλυφθεί όλο το αντικείμενο. Κάθε σάρωση έχει ως αποτέλεσμα ένα νέφος σημείων σε ένα ανεξάρτητο σύστημα αναφοράς διαφορετικό για κάθε θέση σάρωσης. Τα νέφη αυτά θα πρέπει να μετασχηματιστούν σε ένα ενιαίο σύστημα αναφοράς. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε άμεσα είτε έμμεσα.

3.4.1 Άμεση μέθοδος συνένωσης

Άμεση συνένωση σημαίνει πως η θέση και ο προσανατολισμός του σαρωτή και κατά συνέπεια και του παραγόμενου νέφους υπολογίζεται άμεσα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί όταν η θέση του σαρωτή και ο προσανατολισμός του οργάνου είναι γνωστά. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να παραχθούν σημεία στο χώρο κατευθείαν γεωαναφερόμενα σε ενιαίο σύστημα αναφοράς. Στη περίπτωση που ο σαρωτής είναι κατακορυφωμένος προσεχτικά και γνωρίζοντας τη θέση της στάσης

(XYZ) αφού το σύστημα είναι τρισδιάστατο, ο προσανατολισμός μπορεί να καθοριστεί με τη σάρωση μόνο ενός στόχου στην επόμενη στάση σάρωσης που θα βρεθεί ο σαρωτής. Ένας άλλος τρόπος καθορισμού της θέσης του σαρωτή είναι ο σαρωτής να φέρει πάνω του έναν δέκτη GPS, όπου με τη μέθοδο RTK (Real Time Kinematic) μπορεί να αποδώσει στη θέση του συντεταγμένες με ακρίβεια 1cm σε κάθε διάσταση.

3.4.2 Έμμεση μέθοδος συνένωσης

Στη περίπτωση της έμμεσης μεθόδου, απαιτείται η ύπαρξη και αναγνώριση στοιχείων συνταύτισης στα διαφορετικά επί μέρους νέφη σε τοπικό σύστημα συντεταγμένων. Η σχέση που συνδέει τα δύο συστήματα σάρωσης αποτελείται από έξι παραμέτρους προσανατολισμού. Έτσι χρειάζονται τουλάχιστον 3 κοινά σημεία μεταξύ των σαρώσεων για την επίλυση ή στην περίπτωση που ο σαρωτής έχει οριζοντιωθεί προσεχτικά η επίλυση μπορεί να πραγματοποιηθεί με 2 ομολογίες αφού γίνεται η παραδοχή πως οι στροφές Ω , Φ περί τους άξονες X,Y αντίστοιχα είναι δεσμευμένες. Προφανώς, σε κάθε περίπτωση θα ήταν καλό οι παρατηρήσεις να είναι περισσότερες από τις ελάχιστες για τον υπολογισμό των σφαλμάτων του μετασχηματισμού. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν στόχοι, σφαίρες για τη συνένωση των νεφών, η γεωαναφορά μπορεί να πραγματοποιηθεί πολύ εύκολα αποδίδοντας συντεταγμένες στους στόχους με τη χρήση κάποιου γεωδαιτικού σταθμού (total station).

Αυτή η μέθοδος συνένωσης είναι και αυτή που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία και είναι και η μέθοδος που συνηθίζεται να χρησιμοποιείται. Από άποψη χρόνου η μέθοδος αυτή δεν είναι ιδιαίτερα απαιτητική, καθώς ο σαρωτής τοποθετείται στο πεδίο και ξεκινάει η σάρωση χωρίς να χρειάζεται να προηγηθεί οριζοντίωση ή κέντρωση αυτού ως προς ένα σταθερό σημείο. Επίσης, το γεγονός πως δεν είναι απαραίτητη συνθήκη να φέρει ο σαρωτής έναν δέκτη GPS, όπως σε μια από τις περιπτώσεις της άμεσης μεθόδου συνένωσης, τη καθιστά την οικονομικότερη μέθοδο συνένωσης.

3.4.2.1 Συνένωση με στόχους (target to target)

Κατά τη σάρωση μιας περιοχής, τις περισσότερες φορές χρησιμοποιούνται σφαίρες ή τεχνητοί στόχοι που προτείνει ο κατασκευαστής, είτε τυπωμένα πρότυπα τοποθετημένα στο χώρο έτσι ώστε να καλύπτουν την περιοχή σάρωσης από κάθε θέση σάρωσης. Οι στόχοι και οι σφαίρες αυτές μπορούν εύκολα να εντοπιστούν με μεγάλη ακρίβεια από το εκάστοτε λογισμικό του κατασκευαστή, να αναγνωριστεί η γεωμετρία τους και να εξαχθούν οι συντεταγμένες του κέντρου τους. Τα λογισμικά αυτά συνήθως ονομάζουν τη συνένωση αυτή ‘‘target to target’’ καθώς ουσιαστικά ταυτίζονται οι κοινοί στόχοι από τις διαφορετικές σαρώσεις, ενώ στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιούνται τεχνητοί στόχοι αλλά φυσικά σημεία ενδιαφέροντος της περιοχής, η συνένωση εμφανίζεται ως συνένωση ‘‘point to point’’.



Εικόνα 3.11 : Τεχνητοί στόχοι και σφαίρες

Συνήθως προτιμώνται κατά τη σάρωση οι σφαίρες που προτείνει ο κατασκευαστής του σαρωτή, αφού το λογισμικό μπορεί στη συνέχεια να εντοπίσει τη σφαίρα και να αναγνωρίσει ακριβώς τη γεωμετρία της με αποτέλεσμα να μπορέσει να εξαγάγει ως σημείο ενδιαφέροντος το ακριβές κέντρο της σφαίρας, το οποίο προηγουμένως έχει μετρηθεί και του έχουν αποδοθεί συντεταγμένες με τη χρήση ενός γεωδαιτικού σταθμού.

3.4.2.2 Συνένωση με τη μέθοδο *cloud to cloud*

Ένας άλλος τρόπος συνένωσης δύο νεφών σημείων είναι αυτός του *cloud to cloud* (νέφος σε νέφος). Αυτός ο τρόπος απαιτεί τα νέφη σημείων να έχουν επικάλυψη της τάξης του 30-40% οπότε και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος του επαναληπτικά κοντινότερου σημείου ή ICP (*Iterative Closest Point*.) για τη συνένωση των σετ δεδομένων. (*Besl & McKay 1992*). Ο αλγόριθμος χρειάζεται να έχει τρία τουλάχιστον ομόλογα σημεία για να μπορέσει να προχωρήσει στη συνένωση των νεφών, και αφού τα σημεία αυτά δεν θα είναι ποτέ ακριβώς τα ίδια ελέγχει επαναληπτικά την απόσταση μεταξύ όλων των σημείων των νεφών μέχρι να μπορέσει να βρει τον μετασχηματισμό που θα παρουσιάζει το μικρότερο δυνατό σφάλμα.

Ο αλγόριθμος αυτός είναι και αυτός που χρησιμοποιεί ο επίγειος σαρωτής της Leica RTC360. Ο ICP παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τους Besl και McKay το 1992 και στη συνέχεια δέχθηκε αρκετές βελτιώσεις από τους Zhang, Chen & Medioni το 1992 και 1994. Ο αλγόριθμος αυτός αποτελεί τη δημοφιλέστερη μέθοδο συνένωσης νεφών, αφού μπορεί γρήγορα να συγκλίνει στο ελάχιστο της συνάρτησης του σφάλματος χωρίς να χρειαστεί πολλές επαναλήψεις. Το μόνο ίσως μειονέκτημα είναι πως ο αλγόριθμος αυτός δεν είναι απόλυτα αυτοματοποιημένος αφού αφενός θεωρεί το ένα νέφος σημείων υποσύνολο του άλλου πράγμα που σημαίνει πως θέλει μεγάλες επικαλύψεις, και αφετέρου προϋποθέτει πως η σχετική θέση μεταξύ των δύο σαρώσεων έχει ως ένα βαθμό αποκατασταθεί.

Στο λειτουργικό κομμάτι του αλγορίθμου, αν θεωρηθεί το πρώτο σημειοσύνολο P με πλήθος σημείων N_p και το δεύτερο σημειοσύνολο X με πλήθος σημείων N_x τότε τα στάδια του αλγορίθμου για να μετασχηματιστεί το X στο P είναι τα παρακάτω:

- Αναζήτηση ομολογιών μεταξύ των δύο σημειοσυνόλων
- Υπολογισμός μετασχηματισμού στερεού σώματος με τη χρήση των παραπάνω ομολογιών με το τετραδικό σύστημα Hamilton
- Εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός ώστε τα σημεία P να μετασχηματιστούν στο σύστημα αναφοράς του X

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

Το μέτρο ομοιότητας για την εύρεση του εγγύτερου γείτονα κάθε σημείου του \mathbf{P} στο σημειοσύνολο \mathbf{X} είναι η ευκλείδεια απόσταση. Έτσι πρέπει να ικανοποιείται το παρακάτω κριτήριο:

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

Όπου:

$P_i = (x_{pi}, y_{pi}, z_{pi})$ κάθε ένα σημείο του \mathbf{P} με $i=1$ έως N_p

$X_i = (x_{xi}, y_{xi}, z_{xi})$ κάθε ένα σημείο του \mathbf{X} με $i=1$ έως N_x

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

$$Y = C(P, X)$$

Πρόκειται για μια πολύ απαιτητική υπολογιστικά διαδικασία καθώς ο αριθμός των πιθανών αποστάσεων μεταξύ όλων των σημείων είναι πολύ μεγάλος. Έτσι εφαρμόζεται μια μέθοδος αναζήτησης βασισμένη στη δημιουργία δένδρων δομών δεδομένων συγκεκριμένης διάστασης (k-D tree). [Zhang et al. 1992]

Σε επόμενο βήμα ο αλγόριθμος υπολογίζει τον μετασχηματισμό στερεού σώματος εφαρμόζοντας τη μέθοδο του τετραδικού συστήματος Hamilton. Αφού υπολογιστούν οι παράμετροι του μετασχηματισμού, μετασχηματίζονται τα σημεία από το ένα σύστημα στο άλλο και επαναλαμβάνεται η διαδικασία μέχρι να τηρηθεί το κριτήριο σύγκλισης του αλγορίθμου.

Κεφάλαιο 4^ο

Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων

Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1, σκοπός της παρούσας διπλωματικής, είναι ο προσδιορισμός της ακρίβειας του αυτόματα συνενωμένου νέφους που προκύπτει από σαρώσεις με τον επίγειο σαρωτή της Leica RTC360 και με τη χρήση του SLAM και στη συνέχεια ICP αλγόριθμου για την cloud to cloud συνένωση των διαδοχικών σαρώσεων. Η ακρίβεια αυτή θα υπολογιστεί, συγκρίνοντας το αυτόματα συνενωμένο νέφος σημείων με ένα νέφος σημείων συνενωμένο χειροκίνητα με στόχους . Ως περιοχή μελέτης, επιλέχθηκε το κτήριο του Λαμπαδαρίου της σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

4.1- Περιοχή μελέτης

Το κτήριο του Λαμπαδαρίου πήρε το όνομά του από τον Δημήτριο Λαμπαδάριο, ο οποίος γεννήθηκε στην Αθήνα το 1887. Το 1910 έγινε διπλωματούχος πολιτικός μηχανικός ΕΜΠ και εργάστηκε ως μηχανικός στην ανοικοδόμηση νέων κτηρίων. Κατά την περίοδο 1927-1933 διετέλεσε διευθυντής και στη συνέχεια έγινε ο πρώτος πρόεδρος του ΕΜΠ. Θεωρείται ο ιδρυτής της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του ΕΜΠ και του σώματος Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών στην Ελλάδα, και για πολλά χρόνια υπήρξε τακτικός καθηγητής της Γεωδαισίας στο ΕΜΠ καθώς και κοσμήτορας της παραπάνω σχολής. (ΣΑΤΜ, Ιστορική αναδρομή)



Εικόνα 4.1: Δημήτριος Λαμπαδάριος 1887-1950

Το κτήριο του Λαμπαδαρίου αποτελεί και το πρώτο κτήριο της σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, και η σχολή στεγάζεται εκεί από τις αρχές του 1970. Βρίσκεται στο νότιο τμήμα του συγκροτήματος της ΣΑΤΜ-ΜΓ και από το 2001 συνορεύει πλέον με τα νέα κτήρια Α και Β (κτήριο Βέη).

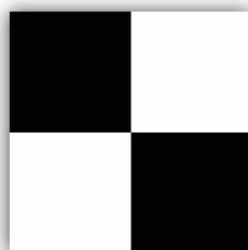


Εικόνα 4.2: Κτήριο Λαμπαδαρίου της ΣΑΤΜ-ΜΓ ΕΜΠ

4.2 Εξοπλισμός και συλλογή παρατηρήσεων

Σε πρώτη φάση, πραγματοποιήθηκε η αναγνώριση της περιοχής ώστε να εντοπισθούν πιθανές θέσεις τοποθέτησης των στόχων που θα χρειαστούν για την target to target συνένωση των νεφών, πιθανές θέσεις σάρωσης, και αναγνώριση τυχόν δυσκολιών που μπορεί να παρουσιαστούν κατά τις εργασίες πεδίου. Ακόμα καθορίστηκε η διαδρομή των σαρώσεων στο εξωτερικό αλλά και στο εσωτερικό της περιοχής μελέτης.

Οι θέσεις που τοποθετήθηκαν οι στόχοι επιλέχθηκαν έτσι ώστε να καλύπτουν ολόκληρη την περιοχή μελέτης και να είναι ορατές από δύο ή και παραπάνω διαδοχικές σαρώσεις. Για την απόδοση συντεταγμένων στους στόχους, ιδρύθηκε μια όδευση περιμετρικά του κτηρίου του Λαμπαδαρίου με στάσεις του ήδη υπάρχοντος δικτύου που βρίσκεται περιμετρικά της σχολής των Τοπογράφων Μηχανικών αλλά και κάποιες νέες που ιδρύθηκαν κατά τις εργασίες στο πεδίο. Για μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις η όδευση επιλύθηκε ως κλειστή. Οι συντεταγμένες των στάσεων που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτές του εργαστηρίου Γενικής Γεωδαισίας της ΣΑΤΜ ΕΜΠ και είναι στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (ΕΓΣΑ87).



Εικόνα 4.3: Η μορφή στόχου που χρησιμοποιήθηκε διαστάσεων 20x20 εκατοστά



Εικόνα 4.4 : Οι θέσεις των στάσεων γύρω από το κτήριο του Λαμπαδαρίου

Στην εικόνα 4.4, με πράσινο φαίνονται οι στάσεις του δικτύου της ΣΑΤΜ οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν ως γνωστές για την επίλυση των οδεύσεων, ενώ με πορτοκαλί φαίνονται οι στάσεις των οποίων οι συντεταγμένες υπολογίστηκαν από την επίλυση της όδευσης.

Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν είναι ένα total station της Topcon σειράς gpt 6002 για την πραγματοποίηση των μετρήσεων της όδευσης, καθώς και ο επίγειος σαρωτής της Leica RTC360 για την σάρωση του κτηρίου του Λαμπαδαρίου.



Εικόνα 4.5: Total station Topcon gpt 6002 (αριστερά), Leica RTC360 (δεξιά)

Ακολουθούν πίνακες με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δύο οργάνων σύμφωνα με τους κατασκευαστές.

DISTANCE MEASUREMENT	
Measuring Range Non-prism mode In low light condition and without sun glare on target	(Target: White wall) 3 to 150m Measurement range for other objects depends on surface texture
Prism mode 1 prism (Condition 1)	7,000m
Condition 1: Sight haze with visibility about 20km moderate sunlight with light heat shimmer.	
Measurement Accuracy Non-prism mode 3 to 25m 25m or more	(Diffusing Surface) ±(10mm) m.s.e. ±(5mm+2ppmXD*) m.s.e.
Prism Mode	±(3mm+2ppmXD*) m.s.e.
Least Count in Measurement Fine measurement mode Coarse measurement mode Tracking measurement mode	1mm/0.2mm 1mm 10mm
Measurement Display	11 digits: max. display 9999999.9999
Measuring Time Fine measurement mode Coarse measurement mode	1mm: Approx. 1.2 sec. (Initial 3.0 sec.) 0.2mm: Approx. 3.0 sec. (Initial 4.0 sec.) Approx. 0.5 sec. (Initial 2.5 sec.)
Tracking measurement mode	Approx. 0.3 sec. (Initial 2.5 sec.)
Atmospheric Correction Range	-999.9ppm to +999.9ppm, in 0.1ppm increments
Prism Constant Correction Range	-99.9mm to +99.9mm, in 0.1mm increments
ANGLE MEASUREMENT	
Method	Absolute Reading
Horizontal	2 sides
Vertical	2 sides
Minimum Reading	0.5"/1" (0.1/0.5mgon)
Accuracy**	1" (0.3mgon) 2" (0.6mgon) 3" (1.0mgon) 5" (1.5mgon)
Diameter of circle	71mm

Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά Topcon Gpt 6002

SCANNING

Distance measurement	High-speed, high dynamic time of flight enhanced by Waveform Digitising (WFD) technology
Laser class	1 (in accordance with IEC 60825-1:2014), 1550 nm (invisible)
Field of view	360° (horizontal) / 300° (vertical)
Range	Min. 0.5 - up to 130 m
Speed	Up to 2,000,000 pts / sec
Resolution	3 user selectable settings (3/6/12 mm @ 10 m)
Accuracy*	Angular accuracy 18" Range accuracy 1.0 mm + 10 ppm 3D point accuracy 1.9 mm @ 10 m 2.9 mm @ 20 m 5.3 mm @ 40 m
Range noise* **	0.4 mm @ 10 m, 0.5 mm @ 20 m

Πίνακας 4.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά Leica RTC360

4.2.1 Επίλυση οδούσεων

Μετά τη συλλογή των μετρήσεων ακολούθησε η επίλυση των οδούσεων στο γραφείο. Για την επεξεργασία και επίλυση της όδευσης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Verm5. Η κύρια όδευση επιλύθηκε ως κλειστή και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δύο ακόμα οδύσεις για να δοθούν συντεταγμένες σε δύο ακόμα "τυφλές" στάσεις. Η μία λύθηκε ως ανοιχτή εξαρτημένη από τα δύο άκρα και η άλλη ως ανοιχτή εξαρτημένη από το ένα άκρο. Ακολουθούν τα αποτελέσματα της επίλυσης των οδούσεων αυτών.

ΣΗΜΕΙΟ	X (m)	Y (m)	H(m)
Σ24	480639,59	4202789,25	193,83
Σ38A	480607,11	4202714,27	195,78
Σ388A	480631,89	4202765,09	194,42
Σ389	480631,08	4202786,33	193,81
Σ390	480590,63	4202808,20	193,23
Σ391	480553,97	4202821,88	193,08
Σ392	480521,64	4202822,22	192,28
Σ393	480441,88	4202856,76	190,00
Σ51	480547,35	42-2734,691	196,00
Σ52	480500,49	4202757,37	195,18
Σ54	480463,30	4202788,95	193,17
Σ55	480428,10	4202831,42	190,14
Σ137A	480490,53	4202840,80	191,31

Πίνακας 4.3: Συντεταγμένες στάσεων

Κατά την διαδικασία συλλογής παρατηρήσεων για την όδευση, συλλέχθηκαν παράλληλα και μετρήσεις για τον προσδιορισμό των συντεταγμένων των στόχων. Όσοι στόχοι έχουν μετρηθεί παραπάνω από μια φορά από διαφορετικές στάσεις, ελέγχθηκαν για τυχόν χονδροειδή σφάλματα και μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ τους. Αφού δεν παρουσιάστηκε κάποιο πρόβλημα, υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι των συντεταγμένων σε όποιους στόχους ήταν δυνατό αυτό με αποτέλεσμα τις τελικές συντεταγμένες των στόχων όπως φαίνονται παρακάτω.

Σημείο	X(m)	Y(m)	H(m)	Σημείο	X(m)	Y(m)	H(m)
1	480595,18	4202784,87	194,79	22	480456,98	4202830,42	194,66
2	480590,45	4202785,23	195,98	24	480448,44	4202823,44	193,78
3	480587,66	4202788,33	196,92	25	480450,44	4202819,23	193,03
4	480580,10	4202790,94	196,83	26	480464,93	4202812,09	193,62
5	480584,92	4202789,11	200,12	27	480468,46	4202812,77	195,50
6	480560,86	4202797,58	196,98	28	480479,59	4202802,87	195,73
7	480564,65	4202796,28	196,86	29	480492,40	4202798,43	196,35
8	480527,77	4202831,96	195,04	30	480504,19	4202794,35	196,14
9	480541,86	4202804,13	196,91	31	480515,45	4202782,93	196,95
10	480514,47	4202811,46	193,54	32	480512,09	4202773,93	197,27
11	480507,57	4202813,65	193,45	34	480538,12	4202764,93	198,03
12	480504,31	4202818,20	194,97	35	480549,83	4202746,15	198,03
13	480520,85	4202833,15	194,23	36	480561,55	4202742,05	198,22
14	480509,35	4202837,13	193,92	37	480576,14	4202736,91	198,97
15	480495,72	4202830,65	193,31	38	480578,16	4202736,68	197,38
17	480499,55	4202829,32	193,27	39	480582,21	4202748,27	198,16
18	480497,63	4202836,70	195,87	40	480585,42	4202757,47	199,06
19	480471,53	4202850,23	192,52	41	480592,95	4202778,44	197,26
20	480481,04	4202846,94	192,81	42	480592,53	4202777,29	199,70
21	480450,99	4202834,31	191,76				

Πίνακας 4.4: Συντεταγμένες στόχων

Όσον αφορά στην αβεβαιότητα προσδιορισμού των στόχων αυτών, δεν είναι δυνατός ο υπολογισμός της ακριβούς τιμής αυτών καθώς η όδευση και οι μετρήσεις δεν επιλύθηκαν ως δίκτυο. Έτσι μπορεί να γίνει μια εκτίμηση των αβεβαιοτήτων αυτών κάνοντας κάποιες παραδοχές. Αρχικά, ο κατασκευαστής δίνει ως αβεβαιότητα προσδιορισμού ενός σημείου το οποίο βρίσκεται σε απόσταση από 3-25m τα 10mm. Σε αυτό, κάνοντας την παραδοχή ύπαρξης αβεβαιότητας λόγω

απόκλισης στην κέντρωση του οργάνου μπορεί να προστεθεί μια αβεβαιότητα ακόμα της τάξης των 2mm. Οπότε σύνολο τα σημεία αυτά των στόχων έχουν μια μέση αβεβαιότητα περίπου στα 12mm.

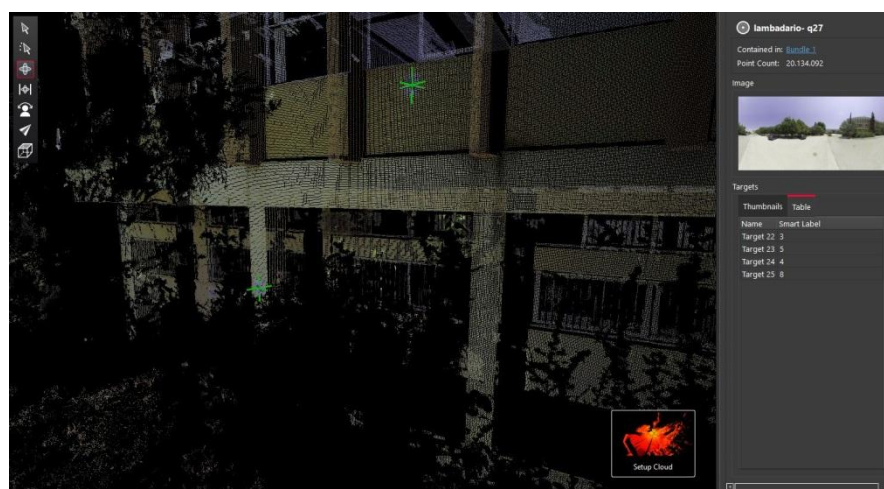
4.3 Επεξεργασία σαρώσεων στο λογισμικό Cyclone Register 360

Αφού σαρώθηκε ολόκληρη η περιοχή μελέτης, μεταφέρθηκαν τα αρχεία σε Η/Υ μέσω usb stick, ώστε να υποστούν επεξεργασία οι σαρώσεις και να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες εργασίες για τον έλεγχο των δεδομένων. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το λογισμικό της Leica, Cyclone Register 360.

Για να γίνει ο έλεγχος της αυτόματης συνένωσης με SLAM που προσφέρει ο σαρωτής Leica RTC360 ακολουθήθηκε η εξής ροή εργασιών: Αφού συλλέχθηκαν τα δεδομένα, μέσω του τάμπλετ του σαρωτή και του Cyclone Field 360, δημιουργήθηκαν οι πρώτες συνενώσεις μεταξύ των σαρώσεων, με τη χρήση SLAM. Η ανάλυση που χρησιμοποιήθηκε στις σαρώσεις ήταν η μεσαία, δηλαδή τα 6mm @10m. Επιλέχθηκε αυτή καθώς αφενός δεν ήταν απαραίτητη η μεγαλύτερη ακρίβεια για τις εργασίες και στόχο της διπλωματικής, και αφετέρου ο όγκος των δεδομένων θα ήταν πολύ μεγάλος. Στη μεσαία ανάλυση που χρησιμοποιήθηκε ο όγκος ανέρχεται περίπου στα 30GB έπειτα από 55 σαρώσεις και ο αριθμός των σημείων περίπου στο 1,2 δισεκατομμύρια.

Στη συνέχεια, τα δεδομένα εισήχθησαν στο Cyclone Register 360 με την επιλογή pre-registered κρατώντας έτσι τον προσανατολισμό που είχαν από το πεδίο μέσω SLAM. Ακόμα, επιλέχθηκε η αυτόματη αναζήτηση ασπρόμαυρων στόχων στις σαρώσεις ώστε να μπορέσει να εντοπίσει το λογισμικό αυτόματα τις θέσεις των στόχων. Η τελευταία επιλογή, έκανε τη διαδικασία εισαγωγής πιο χρονοβόρα και το αποτέλεσμα ήταν σχετικά ικανοποιητικό καθώς δεν εντοπίστηκαν όλοι οι στόχοι στην περιοχή μελέτης, και οι περισσότεροι αν όχι όλοι χρειάζονταν χειροκίνητα την σωστή επανατοποθέτησή τους.

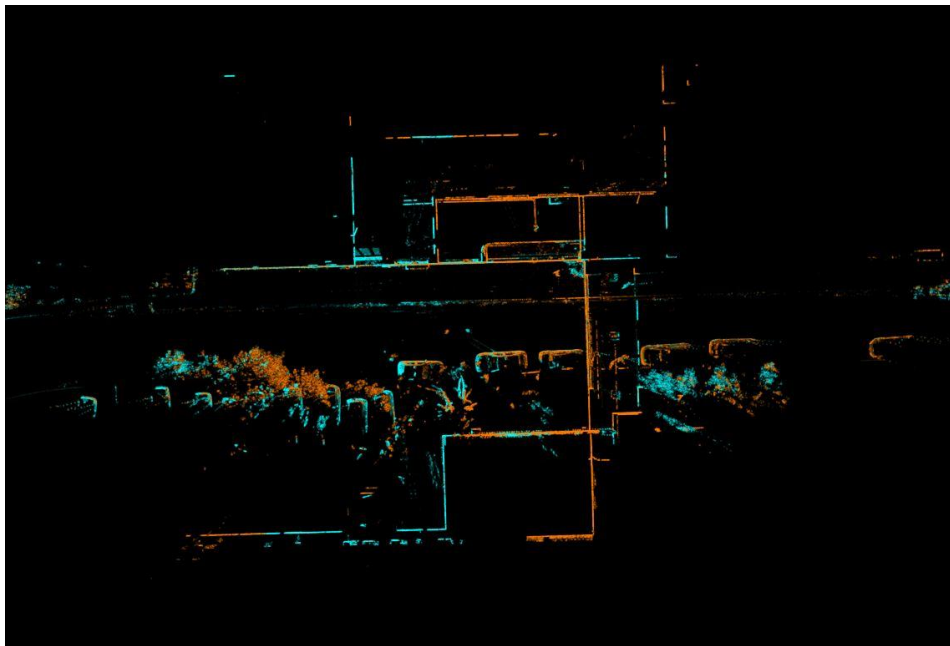
Στο κομμάτι του ‘‘αυτόματα’’ συνενωμένου νέφους σημείων με SLAM, οι εργασίες που πραγματοποιήθηκαν στον Η/Υ δεν ήταν πολλές. Το νέφος ήταν ήδη συνενωμένο στο λογισμικό του Cyclone register 360 καθώς οι συνενώσεις και οι συνδέσεις των νεφών έγιναν στο πεδίο με τη χρήση του Cyclone field 360 στο τάμπλετ. Οι εργασίες που πραγματοποιηθήκαν ήταν αρχικά να τρέξει ο αλγόριθμος ICP σε ολόκληρο το νέφος για να επιτευχθούν καλύτερες ακρίβειες, και στη συνέχεια η σωστή επανατοποθέτηση των στόχων και η σωστή ονομασία αυτών ώστε να είναι κοινοί και στα δύο νέφη σημείων.



Εικόνα 4.6: Τοποθέτηση στόχων στο νέφος σημείων και σωστή ονομασία αυτών (Cyclone Register 360)

Ακόμα χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος “detect moving objects” (εντοπισμός κινούμενων αντικειμένων), όπως προαναφέρθηκε, με τον οποίο αφαιρέθηκαν διάφορα σημεία που θεώρησε ο αλγόριθμος ως “θόρυβο”, όπως αυτοκίνητα που άλλαξε η τοποθεσία στάθμευσής τους κατά την περίοδο των σαρώσεων, αλλά και άνθρωποι οι οποίοι βρέθηκαν σε ορισμένες σαρώσεις. Αξίζει να αναφερθεί πως σε ορισμένες περιοχές ο αλγόριθμος εντόπισε ως “θόρυβο” και σημεία τα οποία αποτελούσαν κομμάτι του κτηρίου αλλά λόγω των λανθασμένων συνενώσεων τα σημεία αυτά βρίσκονταν σε θέσεις που δεν θα έπρεπε να υπάρχουν, όπως σημεία τοίχου που βρέθηκαν στο άνοιγμα μιας πόρτας ή ενός παραθύρου. Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα να επιλεγθούν ποια από τα σημεία αυτά μπορεί ο χρήστης να σβήσει και ποια να κρατήσει. Σε γενικές γραμμές, ο αλγόριθμος βοήθησε στο να αφαιρεθεί περιττός θόρυβος όπως αυτοκίνητα, άνθρωποι, βλάστηση αλλά και σημεία των οποίων κατά την αποτύπωση μεσολαβούσε μεταξύ αυτών και του σαρωτή κάποιο διαφανές παράθυρο ή πόρτα.

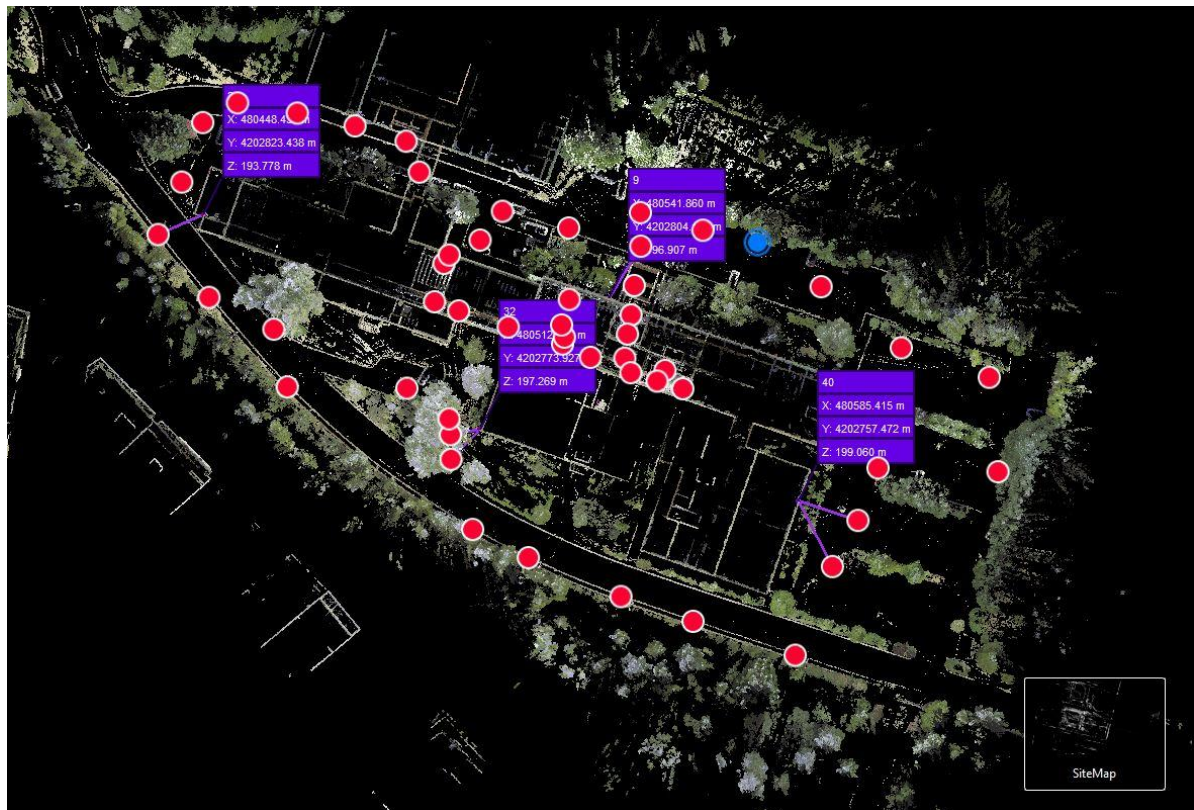
Στο κομμάτι του “χειροκίνητα” συνδεδεμένου νέφους σημείων η διαδικασία απαιτούσε περισσότερες εργασίες. Αρχικά εντοπίστηκε πρόβλημα στην εισαγωγή των σαρώσεων στο λογισμικό χωρίς να κρατούν τον προσανατολισμό και τις συνενώσεις από το πεδίο μέσω SLAM, καθώς ακόμα και αν το αρχείο εισερχόταν στο λογισμικό χωρίς την παράμετρο pre-registered επιλεγμένη, οι σαρώσεις παρουσιάζονταν συνδεδεμένες όπως και στο προηγούμενο στάδιο. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στο ότι οι συνενώσεις πραγματοποιήθηκαν στο πεδίο στο field 360 και “κλειδώθηκαν” οι συνδέσεις τους είτε στο γεγονός πως ίσως αμελήθηκε να “κατέβει” από τον σαρωτή κάποιο αρχείο που να περιέχει τις raw σαρώσεις. Ύστερα από αρκετή αναζήτηση και κάποιους πειραματισμούς, βρέθηκε ένα αρχείο με το όνομα “SetupPositions”, το οποίο λόγω του ονόματός του θεωρήθηκε πως περιέχει τις πληροφορίες προσανατολισμού της κάθε σάρωσης. Έτσι, το πρόβλημα ξεπεράστηκε με το να αφαιρεθεί από τον φάκελο που βρισκόταν το project της σάρωσης το αρχείο SetupPositions και να ξαναφορτωθεί το αρχείο του project στο λογισμικό. Με τον τρόπο αυτό πλέον οι σαρώσεις εμφανίζονται όλες στο ίδιο σημείο χωρίς καμία στροφή και μετάθεση. Στη συνέχεια επιλέγονται με τη σειρά οι σαρώσεις, όπως αυτές πραγματοποιήθηκαν στο πεδίο, και προσανατολίζονται σε πρώτη φάση οπτικά (visual alignment), προσανατολίζοντας κάθε φορά την επόμενη “καινούργια” σάρωση με την προηγούμενη προσανατολισμένη σάρωση.



Εικόνα 4.7: Visual alignment – οπτικός προσανατολισμός (Cyclone Register 360)

Η διαδικασία αυτή απαιτούσε σημαντικό χρόνο ώστε να προσανατολιστούν οι σαρώσεις με αρκετά καλή ακρίβεια καθώς στη συνέχεια σε ορισμένες σαρώσεις χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος ICP ο οποίος απαιτεί καλές αρχικές τιμές για να εκτελεστεί σωστά. Αφού ολοκληρώθηκε ο οπτικός προσανατολισμός των σαρώσεων, εντοπίστηκαν οι στόχοι που είχαν τοποθετηθεί στο πεδίο και ορίστηκαν τα σημεία με τα σωστά τους ονόματα. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν οι συνδέσεις μεταξύ των σαρώσεων. Όπου ήταν δυνατή η σύνδεση πραγματοποιήθηκε μόνο με τη χρήση των στόχων. Για να γίνει η target to target συνένωση έπρεπε να υπάρχουν στις διαδοχικές σαρώσεις τουλάχιστον τρεις στόχοι κοινοί. Αυτό δεν ήταν δυνατό σε όλες τις σαρώσεις καθώς είτε υπήρξαν εμπόδια μεταξύ των στόχων και του σαρωτή όπως αυξημένη βλάστηση, αλλά και η λανθασμένη ή ελλιπής τοποθέτηση στόχων. Επισημαίνεται ότι αντίστοιχα προβλήματα συναντώνται και στην πράξη, και έτσι η σύγκριση και αξιολόγηση είναι πιο ρεαλιστική. Τέλος χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος εντοπισμού κινούμενων αντικειμένων και αφαιρέθηκε ο περιττός θόρυβος.

Έχοντας τελειώσει με τις παραπάνω διαδικασίες, το αποτέλεσμα ήταν δύο νέφη σημείων συνενωμένα το ένα αυτόματα με τη χρήση SLAM και το δεύτερο χειροκίνητα με την διαδικασία που αναφέρθηκε προηγουμένως. Για να μπορέσουν να πραγματοποιηθούν οι έλεγχοι στα παραπάνω νέφη σημείων, θα έπρεπε τα σημεία αυτά να βρίσκονται στο ίδιο σύστημα αναφοράς. Έτσι επιλέχθηκαν 4 στόχοι, κοινοί και στα δύο συνενωμένα νέφη, περιμετρικά του κτηρίου της περιοχής μελέτης ώστε να πραγματοποιηθεί η γεωαναφορά αυτών με την δυνατότητα του λογισμικού cyclone register 360, import control points (εισαγωγή σημείων ελέγχου). Εισήχθη έτσι ένα αρχείο ASCII με τις συντεταγμένες των στόχων που περιείχε το όνομά τους όπως αυτό είχε αποδοθεί στους στόχους μέσα στο λογισμικό. Οι συνδέσεις μεταξύ των σαρώσεων έπρεπε να είναι κλειδωμένες έτσι ώστε να αποφευχθούν τυχόν μετατοπίσεις και αλλαγές μεταξύ των σαρώσεων και οι μετασχηματισμοί κατά τη γεωαναφορά να πραγματοποιηθούν σε ολόκληρο το νέφος σημείων ως ένα.



Εικόνα 4.8: Το γεωαναφερόμενο νέφος σημείων και οι 4 στόχοι που χρησιμοποιήθηκαν μαζί με τις συντεταγμένες τους (Cyclone Register 360)

Με τα δύο νέφη σημείων γεωαναφερόμενα πια, ένας πρώτος έλεγχος που πραγματοποιήθηκε ήταν να ελεγχθούν οι συντεταγμένες των στόχων όπως αυτές προέκυψαν στις δύο περιπτώσεις, με τις ‘πραγματικές’ συντεταγμένες όπως αυτές μετρήθηκαν από το total station. Τα αποτελέσματα ακολουθούν στο κεφάλαιο 5.

4.4 Επεξεργασία δεδομένων στο λογισμικό CloudCompare

Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε το ανοιχτό λογισμικό CloudCompare για τον υπολογισμό των αποστάσεων μεταξύ των δύο νεφών σημείων. Για τον λόγο ότι η περιοχή μελέτης αποτελούνταν από 55 στο σύνολο σαρώσεις, πράγμα που σημαίνει πολύ μεγάλος όγκος δεδομένων και τεράστιος αριθμός σημείων (περίπου 1.5 δις), η περιοχή χωρίστηκε σε μικρότερες υποπεριοχές. Ο διαχωρισμός αυτός έγινε με την εισαγωγή συγκεκριμένου αριθμού σαρώσεων κάθε φορά ώστε να μπορεί να ανταπεξέλθει το λογισμικό. Οι υποπεριοχές που χωρίστηκαν είναι πέντε και αφορούν τρεις περιοχές περιμετρικά του κτηρίου του Λαμπαδαρίου, μια περιοχή στον πρώτο όροφο του κτηρίου και μία περιοχή στο ισόγειο του κτηρίου.

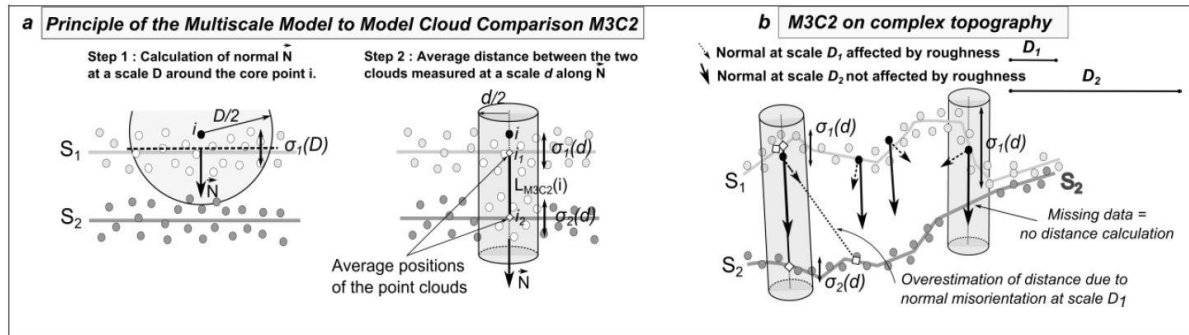
Οι περιοχές εισήχθησαν σε ζευγάρια στο λογισμικό, ένα μέρος του χειροκίνητα συνενωμένου και ένα μέρος του αυτόματα συνενωμένου νέφους σημείων και χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή M3C2 Distance που προσφέρει το λογισμικό .

4.4.1 Η εφαρμογή M3C2 distance

Σε πρώτη φάση, η εφαρμογή αυτή για να ελαχιστοποιήσει τον χρόνο υπολογισμού των αποστάσεων, δίνει τη δυνατότητα ‘‘αραιώσης’’ του αρχικού νέφους σημείων. Μπορεί ο χρήστης να ορίσει μια ακτίνα με βάση την οποία θα επιλέγονται σημεία που βρίσκονται στην απόσταση αυτή, για παράδειγμα 10cm έτσι θα επιλέγονται σημεία ανά 10 cm και σημεία που βρίσκονται εντός αυτής της ακτίνας θα παραλείπονται. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα πιο ‘‘αραιό’’ νέφος σημείων από το αρχικό το οποίο αποτελείται από τα γνωστά ως core points (σημεία πυρήνης) (Brodu et al 2012). Ακόμα και αν έχει δημιουργηθεί αυτό το αραιωμένο νέφος σημείων, οι υπολογισμοί όλοι γίνονται με βάση τα αρχικά δεδομένα.

Αφού υπολογιστούν τα core points, υπολογίζονται τα normal vectors (κάθετα διανύσματα) για κάθε core point. Για να υπολογιστούν τα διανύσματα αυτά, για κάθε core point i ορίζεται μια επιφάνεια με βάση τα γειτονικά core points NN_i τα οποία βρίσκονται εντός μια ακτίνας $D/2$ από το i . Κάθε κάθετο διάνυσμα προσανατολίζεται ως θετικό αναλόγως τον προσανατολισμό των θέσεων σάρωσης. Η εφαρμογή δίνει τη δυνατότητα να υπολογιστούν τα κάθετα διανύσματα στο ‘‘αραιωμένο’’ νέφος σημείων για να επιταχύνει τους υπολογισμούς αλλά κρατώντας παράλληλα καλή ακρίβεια. Έχοντας υπολογιστεί τα κάθετα διανύσματα για τα core points, χρησιμοποιούνται για να προβληθούν τα σημεία αυτά σε κάθε νέφος σε κλίμακα d που ονομάζεται κλίμακα προβολής. Με αυτόν τον τρόπο ορίζονται οι μέσες θέσεις των i_1 και i_2 της γειτονιάς των i στα δύο νέφη. Αυτό γίνεται ορίζοντας έναν κύλινδρο ακτίνας $d/2$ του οποίου ο άξονας περνάει από το i και έχει ίδιο προσανατολισμό με το κάθετο διάνυσμα. Επιβάλλεται το μέγιστο μήκος στον κύλινδρο για να επιταχυνθούν οι διαδικασίες. Η τομή κάθε νέφους σημείων με τον κύλινδρο ορίζει δύο μικρότερα σημειοσύνολα μεγέθους n_1 και n_2 αντίστοιχα. Προβάλλοντας κάθε ένα σημειοσύνολο στον άξονα του κυλίνδρου, δίνονται δύο διανομές αποστάσεων με σημείο αναφοράς το i . Ο μέσος όρος των διανομών δίνει την μέση θέση του νέφους κατά την κατεύθυνση του κάθετου διανύσματος $i_{1,2}$ και οι τυπικές αποκλίσεις δίνουν μια τοπική εκτίμηση της διακύμανσης των νεφών σημείων $\sigma_1(d)$ και

$\sigma_2(d)$ κατά την κατεύθυνση του κάθετου διανύσματος. Η τοπική απόσταση μεταξύ των δύο νεφών σημείων $L_{M3C2}(i)$ δίνεται από την απόσταση μεταξύ του i_1 και i_2 . (Lague, et al. 2013).



Εικόνα 4.9: Οι αρχές λειτουργίας του M3C2. Από αριστερά, a1: υπολογισμός των κανονικών διανυσμάτων σε κλίμακα D γύρω από το core point i , a2: μέση απόσταση μεταξύ δύο νεφών σημείων υπολογισμένη υποκλίμακα κατά μήκος του κανονικού διανύσματος N . b: περίπλοκο παράδειγμα τοπογραφίας (Lague, et al. 2013)

Συγκριτικά με τις προϋπάρχουσες τεχνικές υπολογισμού διαφορών μεταξύ δύο νεφών, ο αλγόριθμος M3C2 εισάγει καινούργια στοιχεία που απλοποιούν την σύγκριση νεφών σημείων. Αρχικά, είναι μια εφαρμογή η οποία δεν χρησιμοποιεί παρεμβολές για να “δημιουργήσει” δεδομένα εκεί που δεν υπάρχουν όπως οι τεχνικές DoD και C2M οι οποίες παράγουν πλαστά αποτελέσματα. Για τον λόγο αυτό ο αλγόριθμος M3C2 είναι πολύ εύρωστος όταν έχει να κάνει με δεδομένα που λείπουν και απλοποιεί πολύ την διαδικασία επεξεργασίας του νέφους σημείων πριν τον υπολογισμό των διαφορών αφού δεν απαιτείται χειροκίνητη αφαίρεση σημείων.

4.5 Παρατηρήσεις

Μετά την ολοκλήρωση των εργασιών για την παρούσα διπλωματική εργασία παρατηρήθηκαν διάφορα σφάλματα που θα μπορούσαν ίσως να αποφευχθούν νωρίτερα στο πεδίο ή κατά την επεξεργασία των δεδομένων στο γραφείο.

Όσον αφορά στο πρόβλημα μη ύπαρξης επαρκούς αριθμού κοινών στόχων μεταξύ των σαρώσεων, φταίει αφενός το περιβάλλον της περιοχής μελέτης που λόγω εποχής η βλάστηση ήταν πολύ έντονη και αφετέρου η λανθασμένη τοποθέτηση των στόχων. Έχοντας στο νου πως η περιοχή μελέτης και το αντικείμενο σάρωσης είναι το κτήριο του Λαμπαδαρίου αυτομάτως θεωρήθηκε σωστό πως οι στόχοι θα πρέπει να τοποθετηθούν πάνω σε αυτό, πράγμα το οποίο δεν είναι απαραίτητο καθώς οι στόχοι θα μπορούσαν να είχαν τοποθετηθεί σε πολλά σημεία εκτός του κτηρίου της περιοχής μελέτης και να υπήρχαν κοινοί στόχοι μεταξύ όλων σχεδόν των σαρώσεων, ώστε να είναι δυνατή στο μεγαλύτερο μέρος της η target to target συνένωση των σαρώσεων.

Σχετικά με τη μεταχείριση του σαρωτή RTC360 στο πεδίο κατά τη διάρκεια των σαρώσεων, παρατηρήθηκε πως η τεχνολογία VIS Slam λειτουργούσε στο μεγαλύτερο μέρος ικανοποιητικά αλλά θα έπρεπε η μετακίνηση του σαρωτή από τη μία θέση σάρωσης στην επόμενη να μην περιλαμβάνει έντονες κινήσεις και στροφές καθώς έστω και μια μικρή σχετικά και απότομη στροφή του σαρωτή σε ορισμένα σημεία έκανε τον σαρωτή να χάσει τη θέση του όπου μετά από λίγο κατάφερε να την προσδιορίσει ξανά. Αυτό συνέβη στον εξωτερικό χώρο περιμετρικά του κτηρίου όπου οι αποστάσεις ήταν μεγαλύτερες μεταξύ αυτού και τυχόν σημείων ενδιαφέροντος ώστε να βοηθήσουν στον εντοπισμό της θέσης του. Στο εσωτερικό του κτηρίου ο σαρωτής εντόπιζε τη θέση του με αρκετή ευκολία ακόμα και αν οι δύο θέσεις σάρωσης είχαν μεταξύ τους έντονη υψομετρική διαφορά και μεγάλες κλίσεις όπως στη βάση και στην κορυφή μιας σκάλας.

Τέλος, όσον αφορά στις εργασίες γραφείου, παρατηρήθηκε πως ο όγκος δεδομένων του Leica RTC360 είναι αρκετά μεγάλος, γεγονός που καθιστά διάφορες διαδικασίες χρονοβόρες, όπως η εισαγωγή και εξαγωγή των αρχείων στο λογισμικό αλλά και διαδικασίες όπως ο αυτόματος εντοπισμός ασπρόμαυρων στόχων ή ο αυτόματος εντοπισμός κινούμενων αντικειμένων, για τον λόγο αυτό συνιστάται η μεταχείριση των δεδομένων να γίνεται σε υποομάδες, όπου φυσικά αυτό είναι δυνατό.

Κεφάλαιο 5^ο

Αποτελέσματα-Συμπεράσματα

5.1 Αποτελέσματα σύγκρισης συντεταγμένων φωτοσταθερών

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των ελέγχων που διεξήχθησαν για την παρούσα διπλωματική. Ένας πρώτος έλεγχος που πραγματοποιήθηκε αφορούσε στις συντεταγμένες των στόχων μετά από τους δύο τρόπους συνένωσης. Ακολουθούν οι πίνακες των αποτελεσμάτων. Για μεγαλύτερη ευκολία στη σύγκριση των αποτελεσμάτων θεωρήθηκε περιττό να παρουσιαστούν οι συντεταγμένες των στόχων με τις δύο μεθόδους συνένωσης, έτσι ακολουθούν οι διαφορές των συντεταγμένων για τους τρεις άξονες X, Y και Z στις δύο μεθόδους σε σχέση με τις συντεταγμένες μέσω total station.

	Χειροκίνητα συνενωμένο νέφος (m)			Αυτόματα συνενωμένο νέφος (m)		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
2	-0,014	0,013	0,011	-0,100	0,180	0,031
3	-0,015	0,008	0,012	0,179	0,027	0,046
4	-0,012	0,010	0,032	0,194	0,040	0,049
5	-0,014	0,000	0,037	0,188	0,007	0,082
6	-0,009	0,009	0,014	0,112	-0,082	0,013
7	-0,008	0,010	0,015	0,148	-0,054	0,033
8	-0,010	0,001	0,019	0,077	0,035	0,044
9	0,002	-0,002	0,007	0,008	-0,006	-0,004
10	-0,007	-0,001	0,012	0,113	-0,034	0,000
12	0,003	-0,008	0,011	0,109	-0,049	-0,018
13	-0,007	-0,008	0,024	0,104	-0,036	0,048
14	-0,009	-0,008	0,028	0,098	-0,038	0,036
15	-0,020	0,000	0,015	0,103	-0,043	0,007
17	0,001	-0,009	0,014	0,118	-0,047	0,014
18	0,004	-0,005	0,022	-0,015	0,001	0,088
19	0,012	-0,001	0,012	-0,005	0,006	0,072

20	-0,001	-0,001	0,017	-0,012	0,008	0,084
21	0,015	0,006	0,009	0,007	-0,001	0,012
22	-0,003	0,003	0,004	-0,008	-0,008	0,016
24	0,000	-0,007	-0,002	-0,003	-0,014	-0,005
25	-0,007	0,004	0,000	-0,004	0,000	-0,012
26	-0,008	0,004	0,003	0,000	0,001	0,008
27	-0,009	0,004	0,011	-0,004	-0,004	0,011
28	-0,015	0,009	0,004	-0,002	-0,001	0,019
29	-0,010	0,005	0,002	-0,010	0,003	0,035
30	-0,007	0,009	0,008	-0,005	0,007	0,027
31	-0,005	0,009	-0,003	-0,006	0,007	0,012
32	-0,003	0,003	0,007	0,006	-0,004	0,001
35	0,002	0,014	-0,016	0,066	-0,002	-0,046
36	-0,009	0,015	-0,003	0,067	-0,003	-0,048
37	-0,001	0,023	-0,007	0,053	0,008	-0,046
38	0,009	-0,007	-0,006	0,044	-0,015	-0,043
39	0,001	-0,022	-0,006	0,019	-0,010	-0,026
40	-0,001	-0,001	0,001	-0,010	0,007	-0,005
41	-0,016	-0,023	0,008	-0,134	0,052	0,009
42	-0,026	-0,017	0,002	-0,068	-0,011	0,049

	Χειροκίνητα συνενωμένο νέφος			Αυτόματα συνενωμένο νέφος		
	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta Z(m)$	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta Z(m)$
Μέγιστο	0,026	0,023	0,037	0,194	0,180	0,088
Ελάχιστο	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Μέση τιμή	-0,005	0,001	0,009	0,040	-0,002	0,017
	rmsX (m)	rmsY (m)	rmsZ (m)	rmsX (m)	rmsY (m)	rmsZ (m)
	0,010	0,010	0,014	0,082	0,040	0,039

Πίνακας 5.1 Οι διαφορές των συντεταγμένων των στόχων στα δύο νέφη σημείων σε σχέση με του total station

Όσον αφορά στο χειροκίνητα συνενωμένο νέφος, όπως παρατηρείται στον πίνακα, οι τιμές των διαφορών είναι αρκετά μικρές με την μεγαλύτερη να φαίνεται στον άξονα Z και να είναι σχεδόν 4εκ. Οι μέσες τιμές των διαφορών στους τρεις άξονες είναι μικρότερες του εκατοστού πράγμα που δείχνει πως έχει επιτευχθεί μια ικανοποιητική συνένωση στα νέφη με αρκετά καλή ακρίβεια. Συγκεκριμένα, αν θεωρηθεί πως τα περισσότερα σημεία βρίσκονται σε ακτίνα περίπου 20m από τον σαρωτή, ο κατασκευαστής δίνει μια ακρίβεια προσδιορισμού του σημείου στις 3 διαστάσεις στα 2.9mm, στο οποίο αν συνυπολογιστεί και ο τυχόν θόρυβος η αβεβαιότητα φτάνει τα 3.4mm. Οι

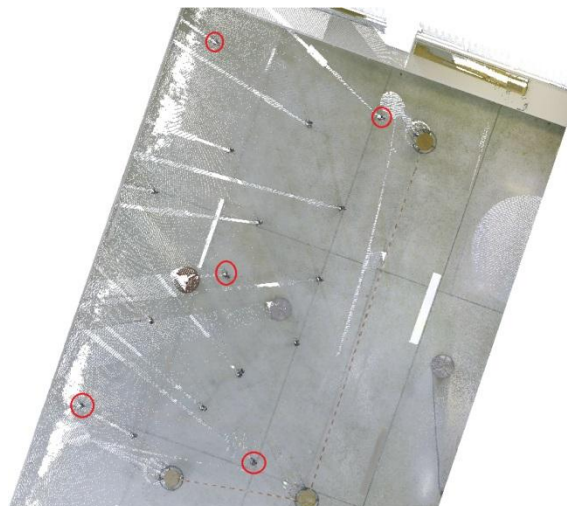
μέσες τιμές των διαφορών των στόχων στο χειροκίνητο νέφος δεν πληρούν τις ακρίβειες αυτές αλλά βρίσκονται αρκετά κοντά.

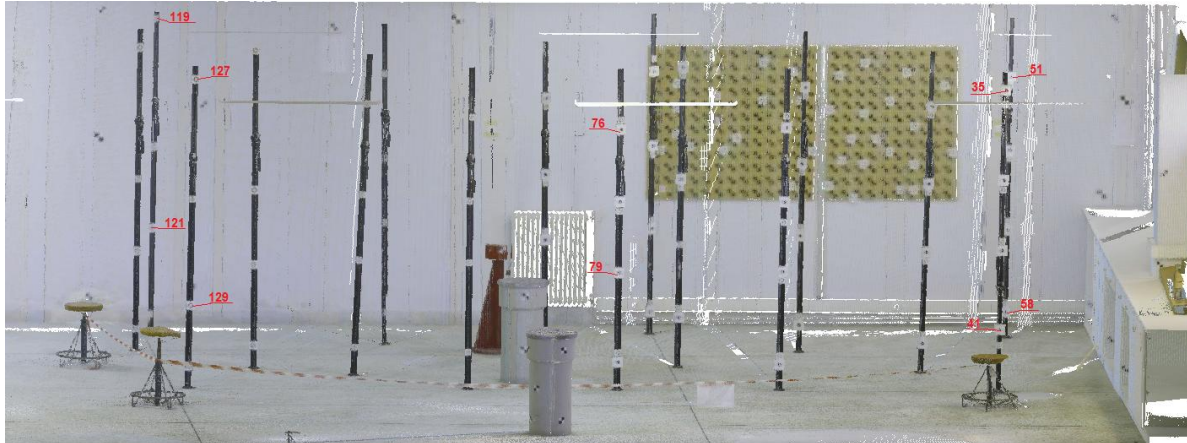
Στο αυτόματα συνενωμένο νέφος σημείων, οι μέσες τιμές των διαφορών είναι ικανοποιητικές, αλλά παρουσιάζονται μεγάλες τιμές στις διαφορές ορισμένων στόχων. Οι στόχοι αυτοί που παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές είναι οι στόχοι από 2-7 οι οποίοι βρίσκονται στη βορεινή πλευρά του κτηρίου του Λαμπαδαρίου. Η περιοχή αυτή αποτέλεσε πρόβλημα και στις δύο μεθόδους συνένωσης καθώς υπήρχε αυξημένη βλάστηση σε σημεία τέτοια που η θέση του σαρωτή έπρεπε να είναι σε σχετικά μεγάλη απόσταση από το κτήριο, και από τις οποίες θέσεις το κτήριο ήταν ορατό σε μεγαλύτερο ύψος όπου και πάλι σε πολλές περιπτώσεις περιείχε "θόρυβο" λόγω της βλάστησης. Επίσης παρατηρήθηκαν μεγάλες διαφορές στους στόχους 15 και 17 και πρόκειται για τους στόχους που βρίσκονται κάτω από την πεζογέφυρα που ενώνει το κτήριο Λαμπαδαρίου με το κτήριο Βέη. Εκεί οι διαφορές είναι μεγάλες πιθανόν γιατί οι σαρώσεις πραγματοποιήθηκαν αριστερόστροφα του κτηρίου Λαμπαδαρίου με πρώτη θέση σάρωσης στη βόρεια πλευρά του κτηρίου, μπροστά από το κτήριο Βέη μετά την πεζογέφυρα, ύστερα συνεχίστηκαν οι σαρώσεις στη δυτική πλευρά του κτηρίου, έπειτα στη νότια, μετά στην ανατολική πλευρά και τέλος (στις εξωτερικές σαρώσεις) πάλι βόρεια μπροστά από το κτήριο Βέη αλλά πριν την πεζογέφυρα. Οι συνδέσεις των σαρώσεων πραγματοποιήθηκαν όπως και η σειρά των σαρώσεων με αποτέλεσμα να ξεκινήσει από την πρώτη (μετά την πεζογέφυρα) και να τελειώσει με την τελευταία πριν την πεζογέφυρα, και η πρώτη με την τελευταία σάρωση δεν είχαν σύνδεση μεταξύ τους οπότε πιθανόν για αυτό να παρουσιάζουν αυτές τις διαφορές που στον άξονα των X είναι περίπου στα 10εκ.

Τέλος, όπως φαίνεται και στον πίνακα 5.1, οι μεγαλύτερες τιμές των διαφορών φαίνονται στον άξονα των X. Παρουσιάζεται μια γενική μετατόπιση των νεφών μεταξύ τους κατά τον άξονα των X, άλλοτε θετικές και άλλοτε αρνητικές. Αυτό πιθανά να ευθύνεται στο ότι το κτήριο του Λαμπαδαρίου είναι σχήματος ορθογώνιου παραλληλόγραμμου με την μεγάλη πλευρά, μήκους 145μ, να εκτείνεται κατά τον άξονα των X, όπου βρίσκονται και οι περισσότερες θέσεις σάρωσης

5.2 Αποτελέσματα συγκρίσεων στο πεδίο ελέγχου

Ένας ακόμα έλεγχος που διεξήχθη αφορούσε στο πεδίο ελέγχου της ΣΑΤΜ-ΜΓ. Ο χώρος αυτός περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό στόχων με υπολογισμένες τις συντεταγμένες τους σε αυθαίρετο σύστημα. Για τον λόγο ότι οι συντεταγμένες βρίσκονται σε αυθαίρετο σύστημα οι μόνοι έλεγχοι που μπορούσαν να πραγματοποιηθούν είναι χρησιμοποιώντας τις αποστάσεις μεταξύ των στόχων αυτών. Η επιλογή των στόχων έγινε έτσι ώστε να είναι αραιά και ομοιόμορφα κατανομημένοι στον χώρο όπως φαίνεται στην εικόνα 5.1 που ακολουθεί.





Εικόνα 5.1: Σκαρίφημα στόχων πεδίου ελέγχου (πάνω κάτωψη, κάτω 3D ορθή προβολή)

Αφού έγινε η επιλογή των στόχων, υπολογίστηκαν οι αποστάσεις μεταξύ των στόχων χρησιμοποιώντας τις συντεταγμένες του αυθαίρετου συστήματος του πεδίου. Στη συνέχεια έγινε η εξαγωγή των συντεταγμένων των στόχων σε ΕΓΣΑ87 από τα δύο νέφη σημείων. Υπολογίστηκαν οι ίδιες αποστάσεις σε κάθε νέφος ξεχωριστά και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν οι συγκρίσεις. Αρχικά συγκρίθηκαν οι αποστάσεις του κάθε νέφους με αυτές που υπολογίστηκαν από τις συντεταγμένες του πεδίου και στη συνέχεια συγκρίθηκαν οι αποστάσεις των δύο νεφών μεταξύ τους. Στον πίνακα 5.2 ακολουθούν τα αποτελέσματα όπου M=Manual για το χειροκίνητα συνενωμένο νέφος, A=Auto για το αυτόματα συνενωμένο νέφος και PE=Πεδίο ελέγχου

	DS(M-A)(m)	DS(PE-A)(m)	DS(PE-M)(m)
S_79-51	-0,0027	-0,0037	-0,0011
S_76-58	-0,0022	-0,0008	0,0015
S_76-121	-0,0021	0,0045	0,0066
S_79-119	0,0011	0,0024	0,0013
S_76-129	-0,0017	-0,0005	0,0012
S_79-127	0,0005	0,0012	0,0007
S_76-41	0,0016	0,0008	-0,0008
S_79-35	0,0018	-0,0028	-0,0046
S_121-35	0,0005	0,0126	0,0122
S_129-51	-0,0042	-0,0046	-0,0004
S_41-119	0,0033	0,0046	0,0013
S_58-127	-0,0025	0,0003	0,0028

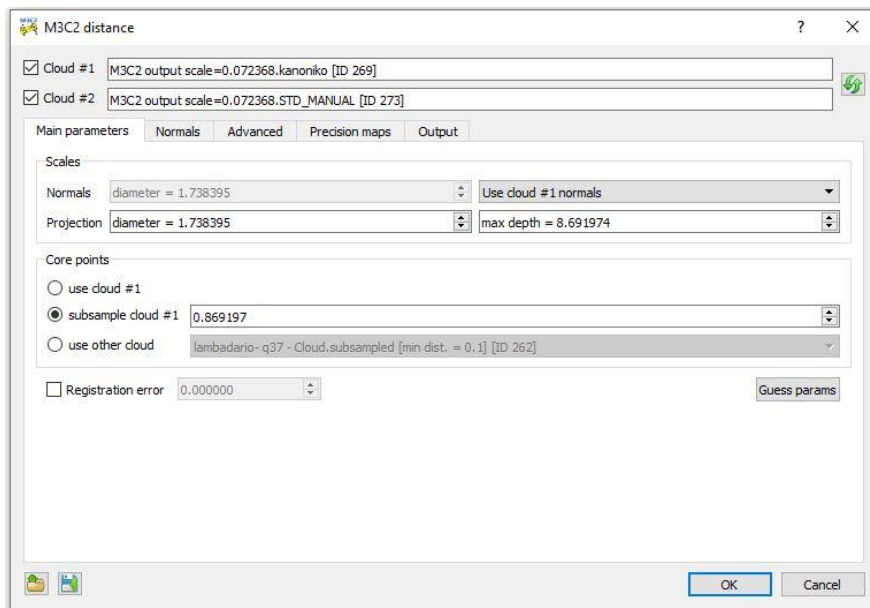
Πίνακα 5.2: Αποτελέσματα συγκρίσεων αποστάσεων στο πεδίο ελέγχου

Όπως φαίνεται και στα αποτελέσματα του πίνακα 5.2, οι διαφορές είναι πολύ μικρές σε όλες τις συγκρίσεις των αποστάσεων, το οποίο δείχνει πως και στις δύο μεθοδολογίες συνένωσης οι σαρώσεις συνενώθηκαν με μεγάλη ακρίβεια. Η μεγαλύτερη ίσως διαφορά φαίνεται στην απόσταση 121-35 όπου πιθανώς ευθύνεται σε ίσως λανθασμένη σκόπευση του φωτοσταθερού 35 στα δύο νέφη σημείων (αυτόματο, χειροκίνητο) λόγω της έλλειψης σημείων καθώς βρισκόταν στο βάθος του πεδίου ελέγχου και πιθανώς να μεσολάβησαν κάποια εμπόδια και να μην υπήρχε επαρκής αριθμός σημείων από τη σάρωση.

5.3 Αποτελέσματα συγκρίσεων στο CloudCompare

Όπως προαναφέρθηκε, λόγω του όγκου των δεδομένων η περιοχή μελέτης χωρίστηκε σε 5 υποπεριοχές. Αυτές εισήχθησαν στο λογισμικό σε ζεύγη, με ένα νέφος σημείων να είναι αυτό που συνενώθηκε αυτόματα και ένα αυτό που συνενώθηκε χειροκίνητα. Στην εφαρμογή M3C2 distance που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των στατιστικών ελέγχων, το πρώτο νέφος που επιλέγεται θεωρείται ως το σταθερό ενώ το δεύτερο είναι αυτό του οποίου υπολογίζονται οι διαφορές ως προς το πρώτο. Στη περίπτωση της διπλωματικής αυτής επιλέχθηκε ως σταθερό το αυτόματα συνενωμένο νέφος σημείων και υπολογίστηκαν οι διαφορές του χειροκίνητα συνενωμένου ως προς το πρώτο.

Πριν την εκτέλεση της εφαρμογής M3C2 distance, προέχει ο ορισμός κάποιων παραμέτρων. Όσον αφορά στις παραμέτρους που χρειάζονται για τον υπολογισμό των κάθετων διανυσμάτων (normals), δίνεται από το λογισμικό η επιλογή guess params με την οποία εκτιμώνται αυτόματα οι παράμετροι αυτές. Για τους σκοπούς της διπλωματικής αυτής επιλέχθηκε να υπολογιστούν αυτόματα οι παράμετροι αυτές, καθώς δεν υπάρχει γνώση επί του θέματος και η επιλογή αυτή είναι αυτή που συστήνεται και από τους δημιουργούς της εφαρμογής. Μια ακόμα παράμετρος που έπρεπε να οριστεί είναι αυτή με την οποία ορίζεται το πόσο θα "αραιώσει" το νέφος σημείων όπου στην περίπτωση αυτή επιλέχθηκε ως 0.10m. Όλα αυτά αναφέρονται αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 4.4.1 της παρούσας διπλωματικής.

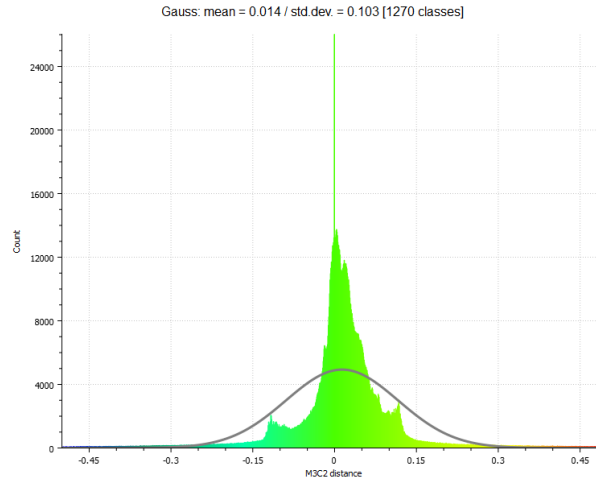


Εικόνα 5.2: Παράμετροι εφαρμογής M3C2 distance

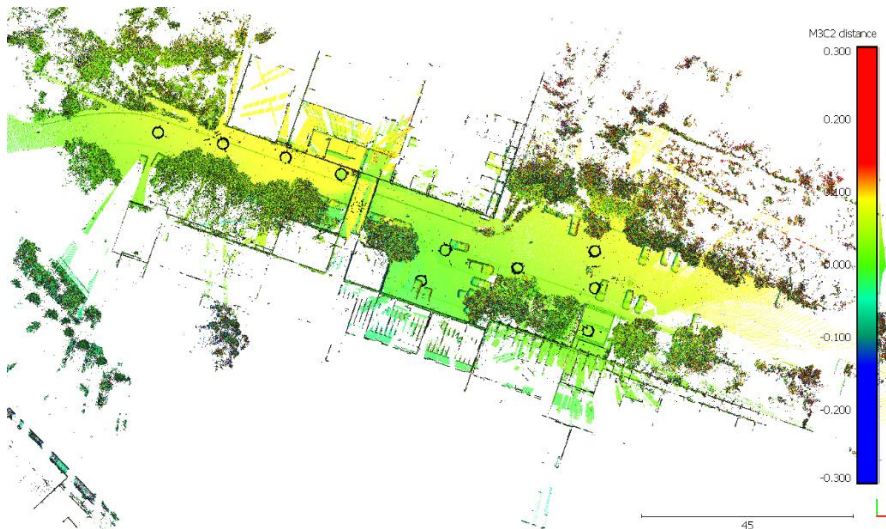
Η εφαρμογή δίνει ως αποτέλεσμα ένα νέφος σημείων το οποίο όμως έχει διάφορα πεδία. Το ένα από αυτά είναι προφανώς οι διαφορές που έχουν τα δύο νέφη σημείων. Κάποια ακόμα πεδία είναι αυτά των τυπικών αποκλίσεων για κάθε νέφος σημείων καθώς και δύο πεδία τα οποία περιέχουν το πού είναι συσσωρευμένα τα περισσότερα σημεία στα δύο νέφη. Το τελευταίο χρησιμοποιήθηκε απλώς για να εντοπιστούν οι θέσεις σάρωσης και να χρησιμοποιηθεί σαν ένα πρόσθετο επίπεδο πάνω από το βασικό που είναι αυτό των διαφορών, ώστε να υπάρχει μια εικόνα του πού βρίσκονται οι θέσεις σάρωσης. Τα πεδία των τυπικών αποκλίσεων περιέχουν τις τυπικές αποκλίσεις των αποστάσεων των γειτονικών σημείων από την καλύτερα εφαρμοσμένη επιφάνεια που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των καθέτων διανυσμάτων. Αυτό χρησιμοποιείται ως μέτρο τραχύτητας του νέφους (cloud roughness) και εμφανίζει έναν πρώτο εσωτερικό θόρυβο που

μπορεί να έχει κάθε νέφος. Όπως θα φανεί και στη συνέχεια, σε πολλά σημεία όπου το cloud roughness είναι έντονο υπάρχουν και μεγάλες διαφορές στα δύο νέφη σημείων. Ακόμα παρουσιάζονται τα διαγράμματα Gauss, με τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση των διαφορών των δύο νεφών για κάθε περιοχή.

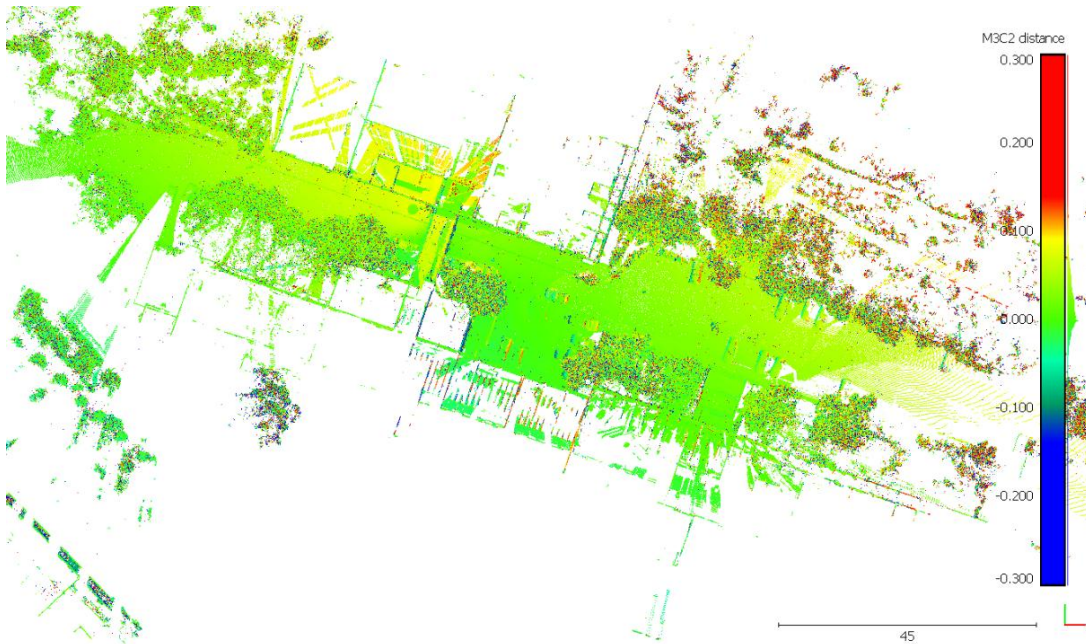
Ακολουθούν τα αποτελέσματα των συγκρίσεων για την πρώτη περιοχή. Η πρώτη περιοχή αφορά στην βορεινή όψη του κτηρίου του Λαμπαδαρίου, από το κυλικείο της σχολής μέχρι σχεδόν το εργαστήριο της φωτογραμμετρίας.



Διάγραμμα 5.1: Διάγραμμα κατανομής Gauss των διαφορών των δύο νεφών (περιοχή 1^η)



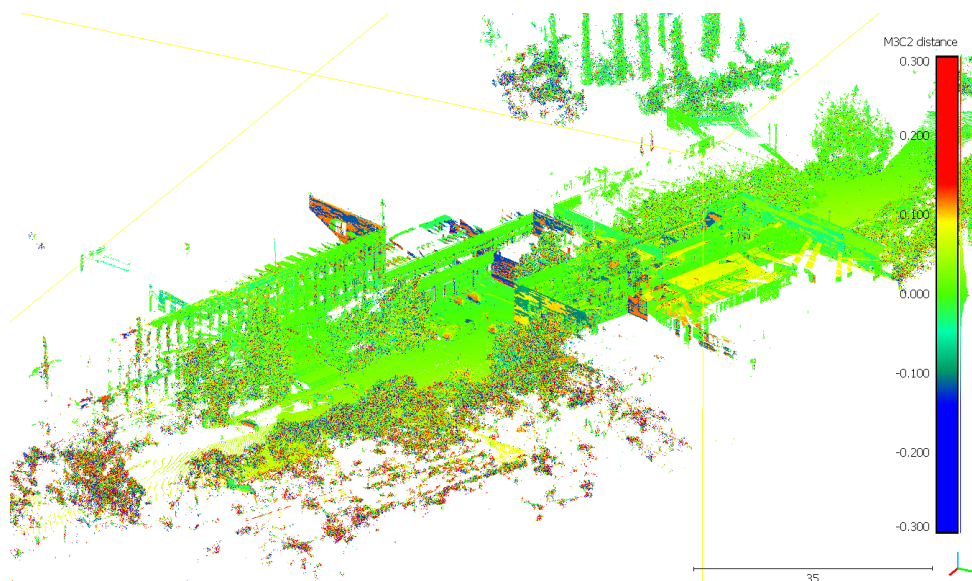
Εικόνα 5.3: Διαφορές νεφών σημείων μαζί με τα κανονικά διανύσματα σε κάτοψη (περιοχή 1^η)



Εικόνα 5.4: Διαφορές νεφών σημείων περιοχή ,σε κάτοψη (περιοχή I^η)

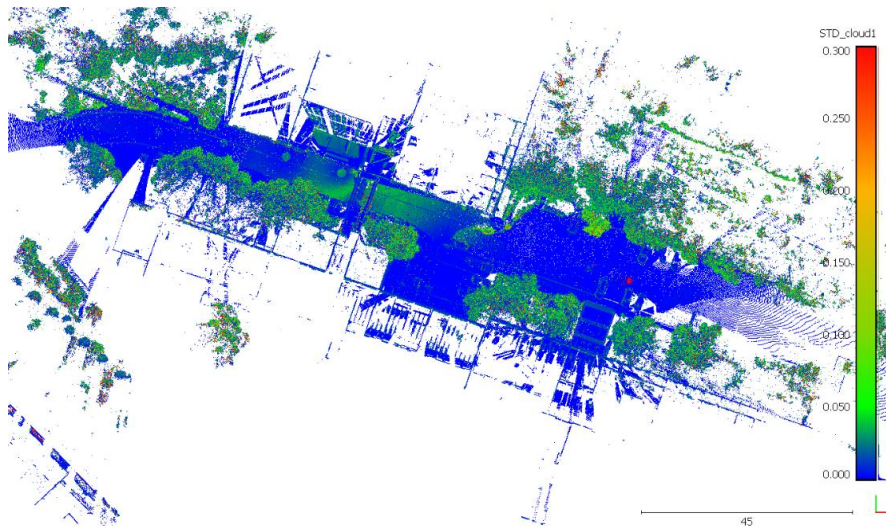
Για την καλύτερη αντίληψη του χώρου επιλέχθηκε σε ορισμένες περιοχές να παρουσιαστεί μια εικόνα μαζί με τα κανονικά διανύσματα (εικόνα 5.3) γιατί με αυτά φαίνονται καλύτερα οι λεπτομέρειες της περιοχής μελέτης όπως κτήρια, πεζοδρόμια κλπ. Ακόμα στην εικόνα 5.2 φαίνονται οι θέσεις σάρωσης ενώ στην εικόνα 5.4 παρουσιάζονται μόνο οι διαφορές των δύο νεφών.

Σε πρώτη φάση, παρατηρείται πως οι διαφορές των δύο νεφών είναι αρκετά μικρές της τάξης των 1-5cm, ενώ σε ορισμένα σημεία οι διαφορές πλησιάζουν τα 10cm. Συγκεκριμένα, το 61% των διαφορών κυμαίνονται από -0.05m έως +0.05m ενώ το 13% αφορά αρνητικές τιμές μεγαλύτερες του -0.05m και το 24% θετικές τιμές μεγαλύτερες του +0.05m. Τα σημεία αυτά βρίσκονται στην πεζογέφυρα που ενώνει το κτήριο Βέη με το Κτήριο του Λαμπαδαρίου που όπως προαναφέρθηκε υπήρχε πρόβλημα κατά τη συνένωση στο αυτόματα συνενωμένο νέφος σημείων. Μεγάλες διαφορές και διακυμάνσεις παρουσιάζονται, όπως είναι λογικό, στα σημεία όπου υπάρχει βλάστηση, σε σημεία όπου βρίσκονταν αυτοκίνητα, αλλά και σε σημεία όπου μεσολαβούσε μεταξύ σαρωτή και σημείου κάποιο παράθυρο ή πόρτα με γυαλί. Στην εικόνα 5.5 που ακολουθεί φαίνονται οι διαφορές των νεφών σημείων σε μια 3D εικόνα ορθής προβολής.

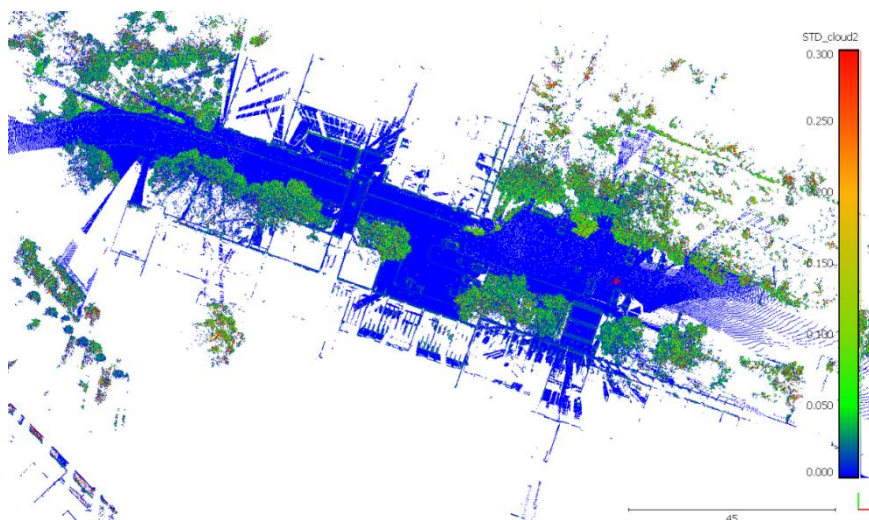


Εικόνα 5.5: Διαφορές νεφών σημείων σε 3D ορθή προβολή (περιοχή I^η)

Εδώ φαίνονται πάλι οι μικρές διαφορές σε γενικές γραμμές στα δύο νέφη και οι έντονες διακυμάνσεις που υπάρχουν στα σημεία με βλάστηση. Ακόμα φαίνεται καλύτερα πως στις περιοχές σάρωσης γύρω από την πεζογέφυρα που ενώνει τα δύο κτήρια οι διαφορές είναι μεγαλύτερες με τις τιμές σε ορισμένα σημεία να κυμαίνονται από 10 μέχρι και 20cm. Το μέρος που φαίνονται οι τιμές αυτές είναι η πλευρά του κτηρίου κατά την είσοδο στο ισόγειο του Λαμπαδαρίου όπου βρίσκεται η αποθήκη του γεωδαιτικού εξοπλισμού της σχολής. Οι διαφορές αυτές μπορεί να είναι τόσο μεγάλες καθώς στην περιοχή αυτή υπήρξε πρόβλημα κατά την συνένωση του αυτόματα συνενωμένου νέφους σημείων. Όπως θα φανεί και σε επόμενη περιοχή, η σειρά συνένωσης των σαρώσεων είναι διαφορετική για το αυτόματα και για το χειροκίνητα συνενωμένο νέφος στο κομμάτι αυτό λόγω κάποιων προβλημάτων που αντιμετωπίστηκαν στο εσωτερικό του κτηρίου. Η διαφορά αυτή στη σειρά συνένωσης οδήγησε σε κάποιες μεγάλες διαφορές σε ορισμένα σημεία. Ακόμα, μεγάλες διαφορές παρατηρούνται στη δυτική πλευρά του κεντρικού κτηρίου του Λαμπαδαρίου οι οποίες ίσως ευθύνονται λόγω του ότι η γωνία πρόσπτωσης των ακτινών από τον σαρωτή στην επιφάνεια του τοίχου ήταν πολύ μικρή και η απόσταση σχετικά μεγάλη. Γενικά όπως είναι λογικό, αν για παράδειγμα το ένα νέφος έχει μια μικρή στροφή ως προς το άλλο οι διαφορές θα είναι πιο έντονες στα άκρα τους.

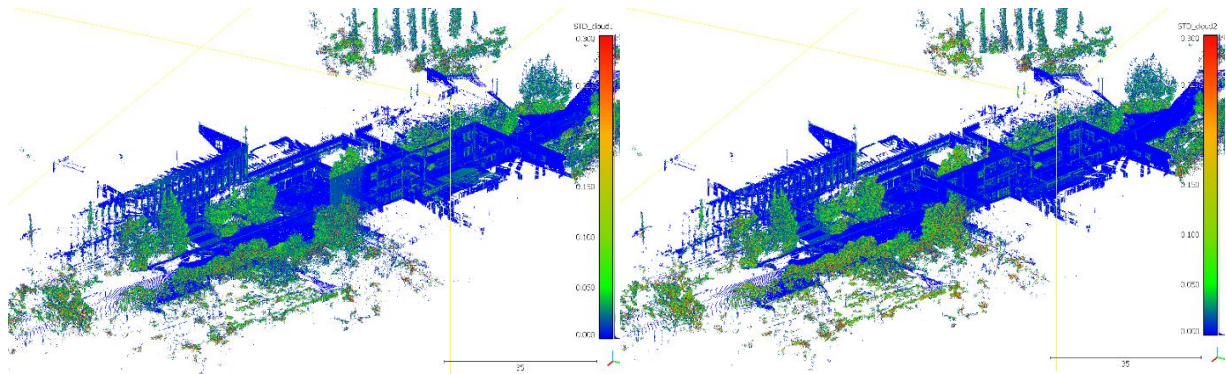


Εικόνα 5.6: Τραχύτητα αυτόματα συνενωμένου νέφους, κάτοψη (περιοχή 1^η)



Εικόνα 5.7: Τραχύτητα χειροκίνητα συνενωμένου νέφους, κάτοψη (περιοχή 1^η)

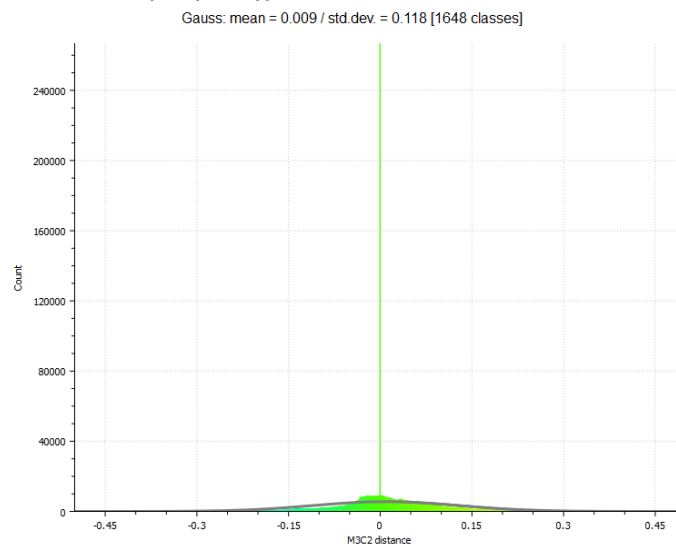
Εδώ παρατηρείται η έντονη διακύμανση και μεγάλες τιμές στις τυπικές αποκλίσεις σε περιοχές με βλάστηση. Ακόμα, φαίνεται ξεκάθαρα η διαφορά που υπάρχει στις τυπικές αποκλίσεις στην περιοχή της πεζογέφυρας, όπου στο αυτόματα συνενωμένο νέφος σημείων οι τιμές κυμαίνονται από 5-10cm ενώ στη χειροκίνητα συνενωμένο νέφος σημείων αυτό το πρόβλημα δεν υπάρχει, καθώς οι συνενώσεις πραγματοποιηθήκανε με στόχους. Αυτό δίνει μια εικόνα για τον θόρυβο που μπορεί να έχει το αυτόματα συνενωμένο νέφος στο σημείο αυτό.



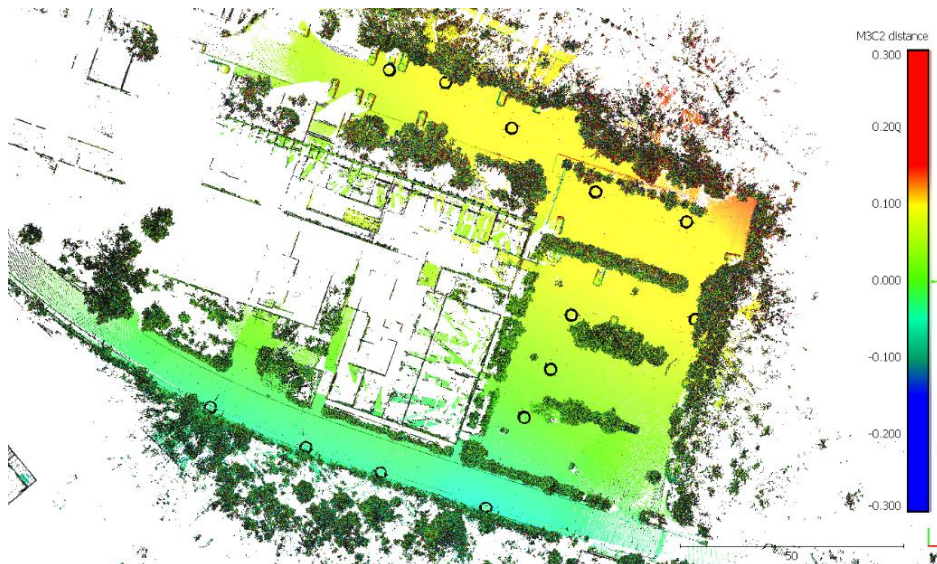
Εικόνα 5.8: Τραχύτητα των δύο νεφών σημείων σε 3D ορθή προβολή (αριστερά αυτόματα, δεξιά χειροκίνητο)(περιοχή 1^η)

Στην εικόνα 5.8 παρατηρείται πως σε γενικές γραμμές οι τιμές των αποκλίσεων είναι μικρές και στα δύο νέφη σημείων. Ίσως μπορεί κανείς να παρατηρήσει και στα δύο νέφη, με πράσινο χρώμα ορισμένα σημεία που βρίσκονται στην βορεινή όψη του κεντρικού κτηρίου του Λαμπαδαρίου που οι τυπικές αποκλίσεις τους κυμαίνονται από 5-10cm και είναι λίγο πιο έντονα στην περίπτωση του αυτόματα συνενωμένου νέφους. Η περιοχή αυτή του κτηρίου όπως προαναφέρθηκε αποτέλεσε γενικότερο πρόβλημα κατά τις συνενώσεις καθώς η βλάστηση ήταν πολύ έντονη και οι αποστάσεις αρκετά μεγάλες. Το πρόβλημα θα φανεί πιο καθαρά στην επόμενη περιοχή.

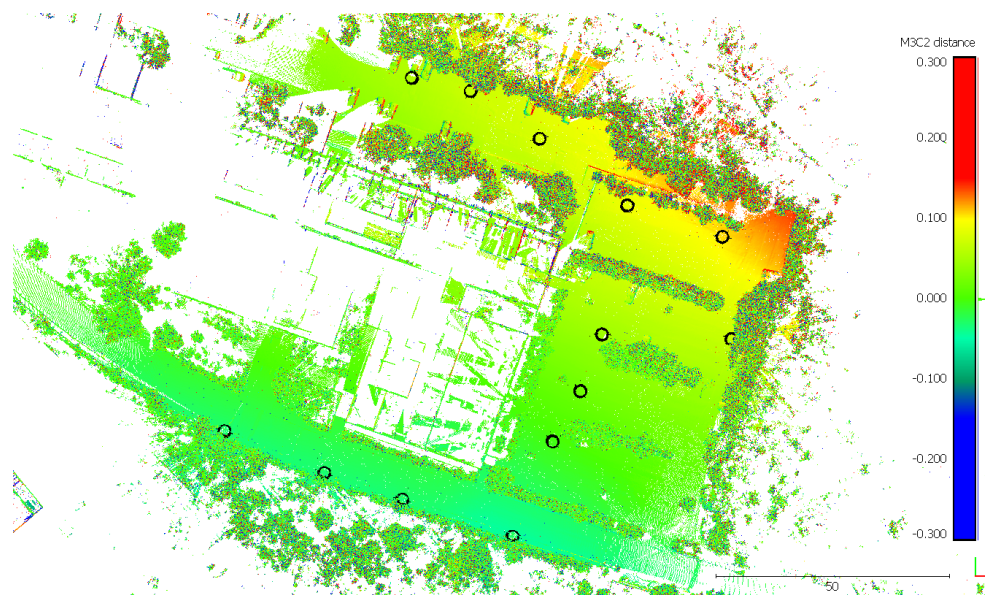
Η επόμενη περιοχή αφορά στο κομμάτι του Λαμπαδαρίου όπου βρίσκεται το εργαστήριο φωτογραμμετρίας καθώς και την ανατολική και μέρος της νότιας όψης του κτηρίου. Με μαύρους κύκλους φαίνονται ξανά οι θέσεις σάρωσης.



Διάγραμμα 5.2: Διάγραμμα κατανομής Gauss των διαφορών των δύο νεφών (περιοχή 2^η)

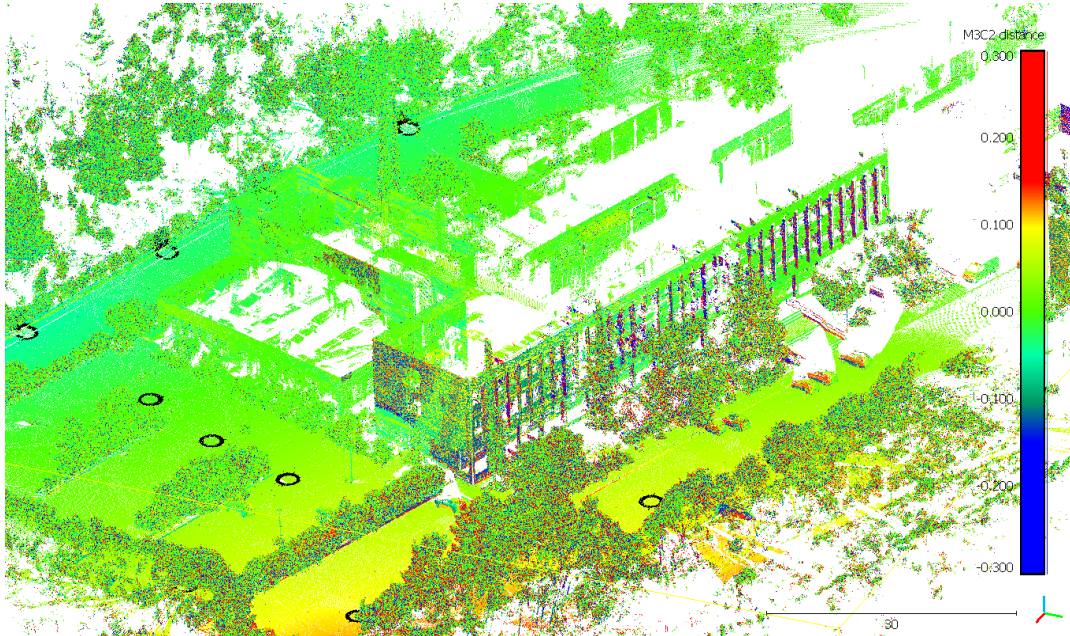


Εικόνα 5.9 Διαφορές νεφών σημείων μαζί με τα κανονικά διανύσματα σε κάτοψη (περιοχή 2^η)



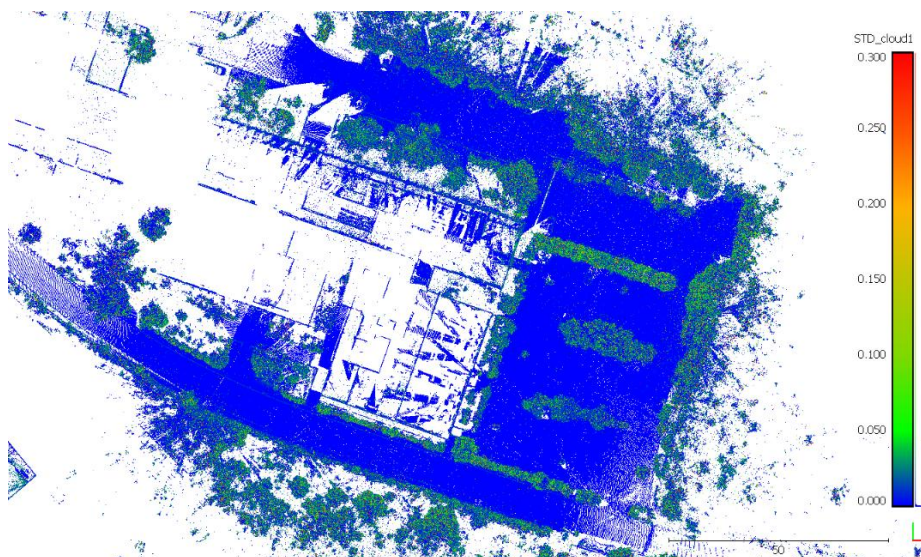
Εικόνα 5.10: Διαφορές νεφών σημείων σε κάτοψη (περιοχή 2^η)

Οι τιμές των διαφορών, όπως φαίνεται στην κάτοψη, είναι αρκετά μικρές με πιο τις πιο μεγάλες να βρίσκονται σε περιοχές με βλάστηση. Το 53% των διαφορών κυμαίνονται μεταξύ -0.05m και $+0.05\text{m}$, με το 18% να είναι αρνητικές τιμές μεγαλύτερες του -0.05m , και το 27% θετικές τιμές μεγαλύτερες του $+0.05\text{m}$. Οι μεγαλύτερες τιμές βρίσκονται στο βορειοανατολικό κομμάτι της περιοχής όπου ήταν και η περιοχή που δυσκόλεψε πιο πολύ τις συνενώσεις των σαρώσεων και με τις δύο μεθόδους καθώς οι αποστάσεις μεταξύ σαρωτή και κτηρίου ήταν αρκετά μεγάλες και η βλάστηση ήταν τόσο έντονη αλλά και σε τέτοια σημεία που οι επικαλύψεις των σαρώσεων ήταν ελάχιστες. Ενδιαφέρον παρουσιάζει πως όσον αφορά στα σημεία του εδάφους, σε όλα τα νέφη σημείων που αφορούν το εξωτερικό του κτηρίου, εμφανίζεται μια αριστερή στροφή στον ιδεατό άξονα κατά μήκος του κτηρίου του Λαμπαδαρίου. Παρατηρείται πως οι διαφορές των δύο νεφών στη βορεινή πλευρά αποτελούνται κατά κύριο λόγο από θετικές τιμές ενώ στη νότια από αρνητικές. Αυτό ευθύνεται αφενός στο ότι η νότια πλευρά της περιοχής διασχίζεται από την περιφερειακή οδό του ΕΜΠ και το υψόμετρο είναι μεγαλύτερο από της βόρειας και αφετέρου παρατηρώντας τις τιμές του πίνακα 5.1 μπορεί κανείς να δει πως οι τιμές διαφορών κατά τον άξονα Z, στο αυτόματα συνενωμένο νέφος σημείων κυμαίνονται στο μεγαλύτερο μέρος τους από μεγάλες σχετικά τιμές, από 3cm μέχρι σχεδόν 9cm.

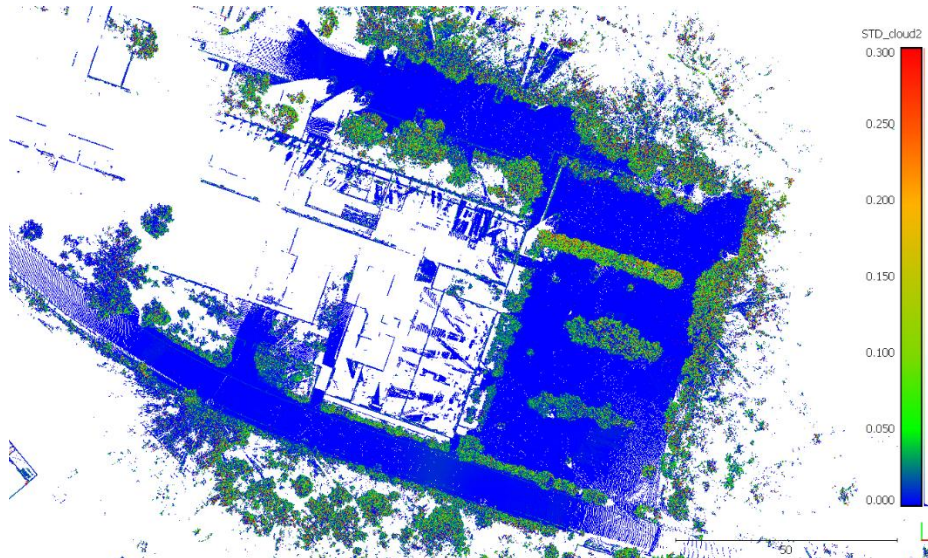


Εικόνα 5.11: Διαφορές νεφών σημείων σε 3D ορθή προβολή (περιοχή 2^η)

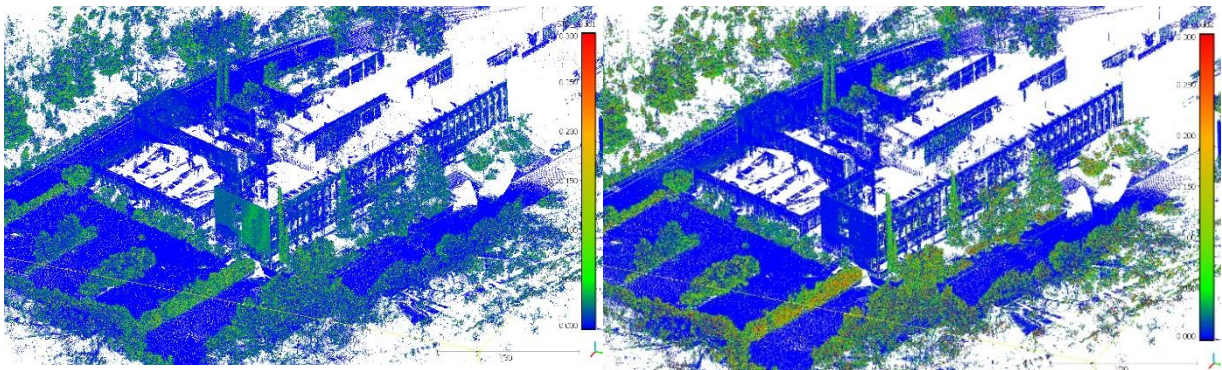
Εδώ φαίνονται πιο καθαρά οι έντονες διαφορές μεταξύ των δύο νεφών στο κτήριο του Λαμπαδαρίου και στις επόμενες εικόνες 5.12-5.13 φαίνεται τραχύτητα των δύο νεφών σε κάτοψη.



Εικόνα 5.12: Τραχύτητα αυτόματα συνεννομένου νέφους, κάτοψη (περιοχή 2^η)



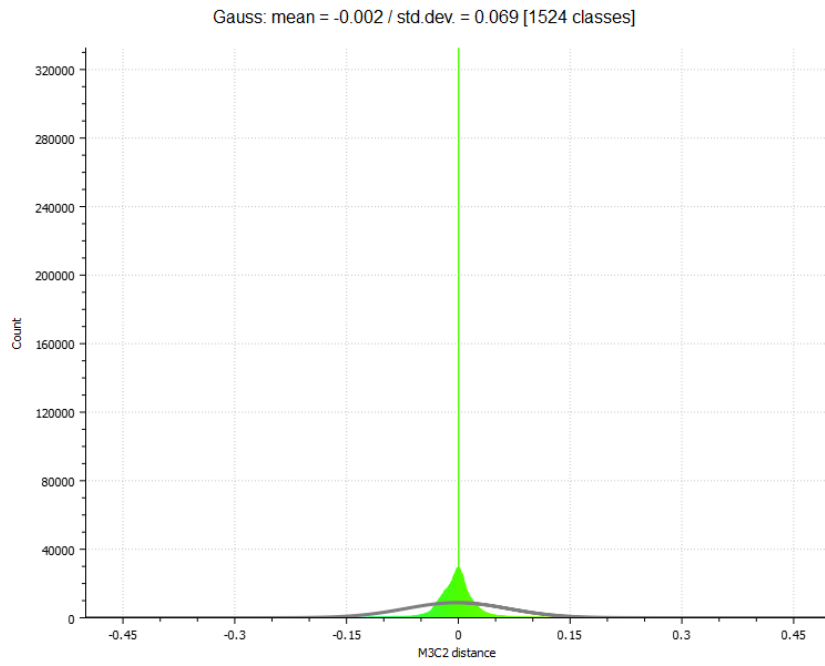
Εικόνα 5.13: Τραχύτητα χειροκίνητα συνενωμένου νέφους, κάτω (περιοχή 2^η)



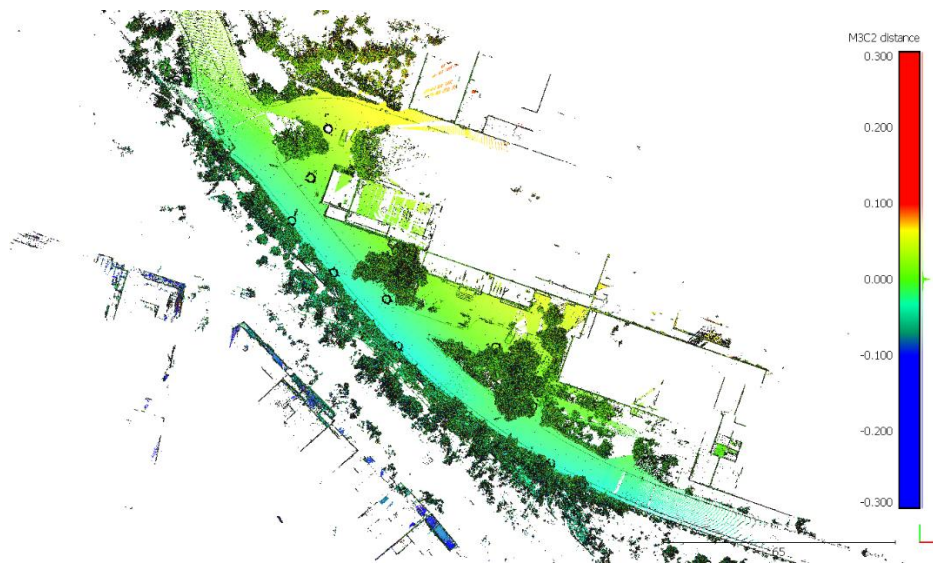
Εικόνα 5.14: Τραχύτητα των δύο νεφών 3D ορθή προβολή (αριστερά αυτόματα, δεξιά χειροκίνητο)(περιοχή 2^η)

Στην εικόνα 5.14 φαίνονται αριστερά οι τυπικές αποκλίσεις των σημείων στο αυτόματα συνενωμένο νέφος σημείων οι οποίες στην ανατολική πλευρά του κεντρικού κτηρίου του Λαμπαδαρίου κυμαίνονται σε σχετικά μεγάλες τιμές από 5-10cm. Στην δεξιά εικόνα όπου είναι οι τυπικές αποκλίσεις του χειροκίνητα συνενωμένου νέφους οι τυπικές αποκλίσεις είναι αρκετά χαμηλές και οι μεγαλύτερες βρίσκονται σε μέρη με έντονη βλάστηση ,όπως είναι και αναμενόμενο.

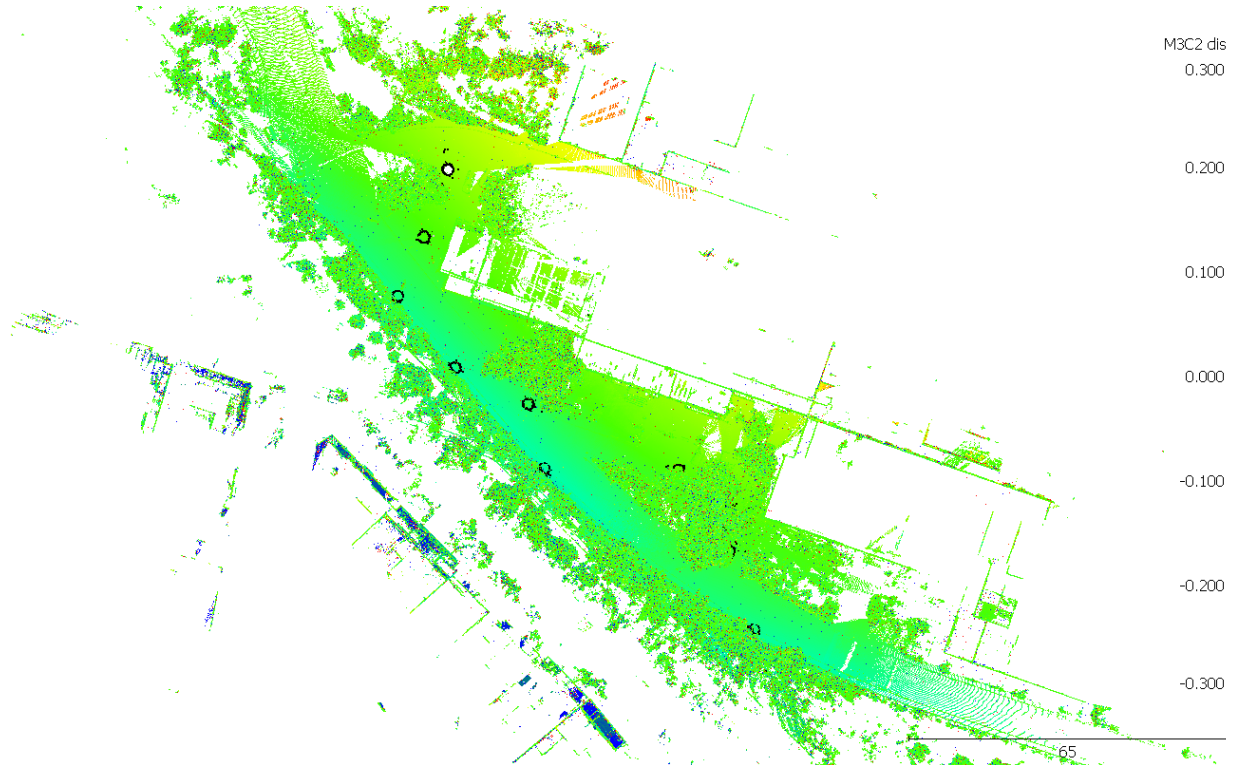
Η τρίτη περιοχή αφορά και στην τελευταία περιοχή στο εξωτερικό του κτηρίου του Λαμπαδαρίου. Πρόκειται για ένα μέρος της νότιας πλευράς και του κτηρίου μαζί με τη δυτική πλευρά όπου βρίσκεται το κυλικείο της ΣΑΤΜ.



Διάγραμμα 5.3: Διάγραμμα κατανομής Gauss των διαφορών των δύο νεφών (περιοχή 3^η)

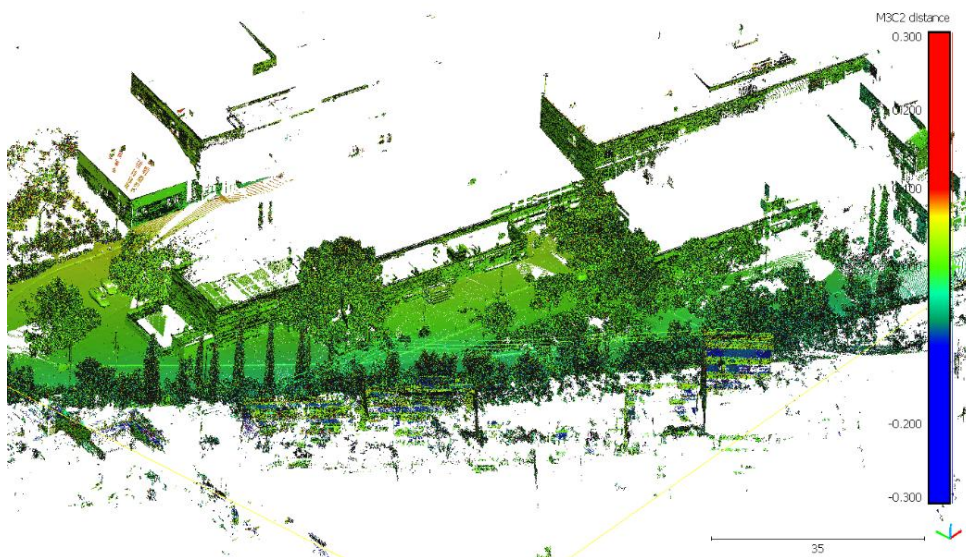


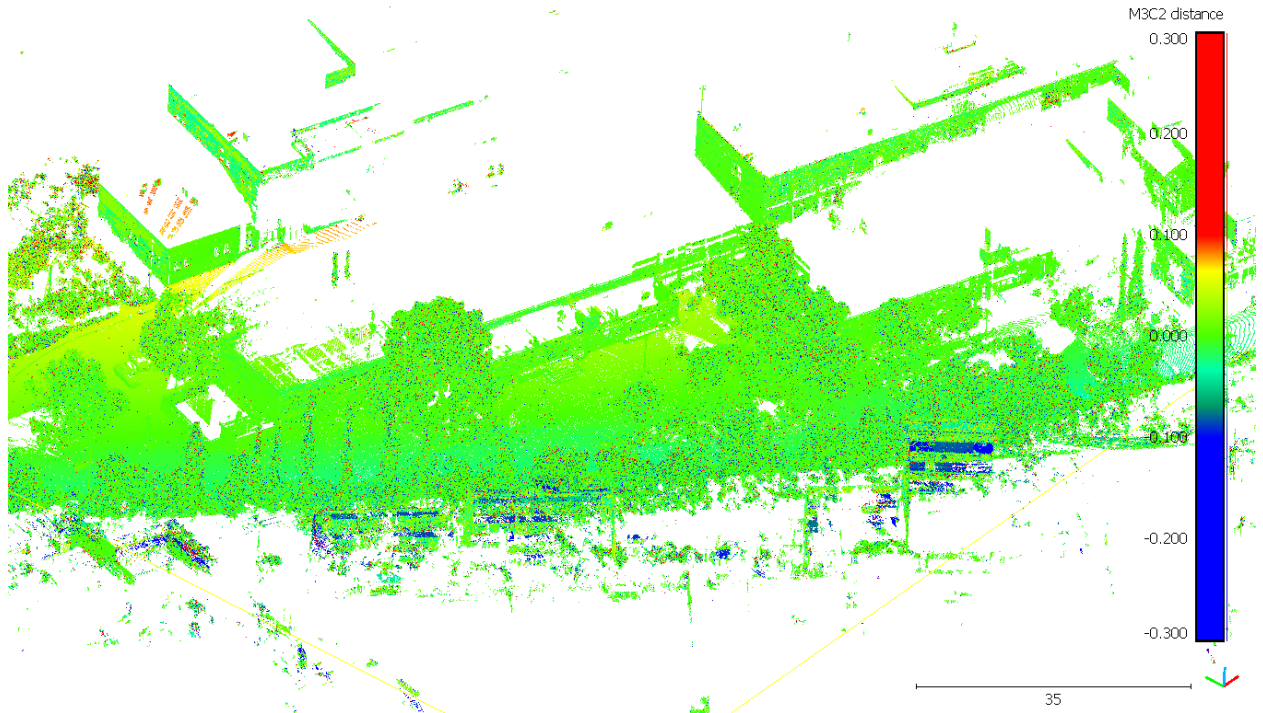
Εικόνα 5.15: Διαφορές νεφών σημείων μαζί με τα κανονικά διανύσματα σε κάτοψη (περιοχή 3^η)



Εικόνα 5.16: Διαφορές νεφών σημείων σε κάτοψη (περιοχή 3^η)

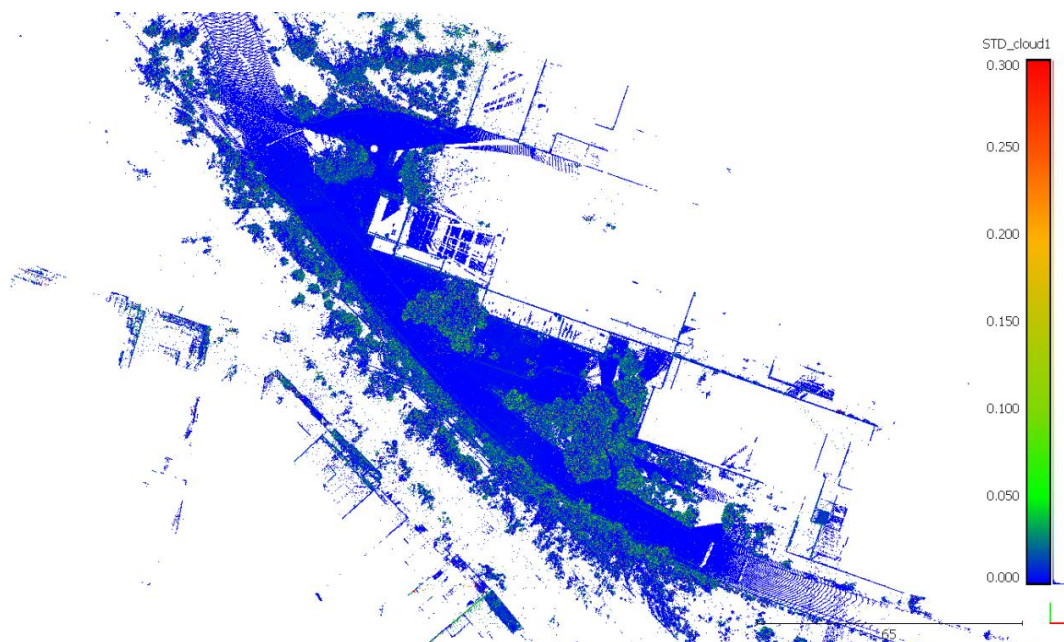
Εδώ φαίνονται πάλι οι θετικές τιμές στη διαφορά των δύο νεφών στη βόρεια πλευρά της περιοχής και οι αρνητικές τιμές στη νότια πλευρά. Σε γενικές γραμμές οι διαφορές είναι πολύ μικρές, αφού το 87% των διαφορών κυμαίνεται μεταξύ -0.05m και $+0.05\text{m}$, ενώ με κίτρινο και πορτοκαλί φαίνονται οι διαφορές που κυμαίνονται από 5-8cm και αφορούν την περιοχή της πεζογέφυρας που όπως προαναφέρθηκε υπήρξε θέμα κατά τη συνένωση. Ακόμα, ένα 6% των διαφορών αφορά αρνητικές τιμές μεγαλύτερες του -0.05m και ένα 6% θετικές τιμές μεγαλύτερες του $+0.05\text{m}$. Με έντονο πορτοκαλί φαίνονται σημεία τα οποία βρίσκονται στις άκρες των νεφών και οι διαφορές μπορεί να είναι έντονες. Ακολουθεί 3D εικόνα ορθής προβολής της περιοχής μαζί με τα κανονικά διανύσματα διότι είναι δύσκολη η αντίληψη της δομής του χώρου χωρίς αυτά.



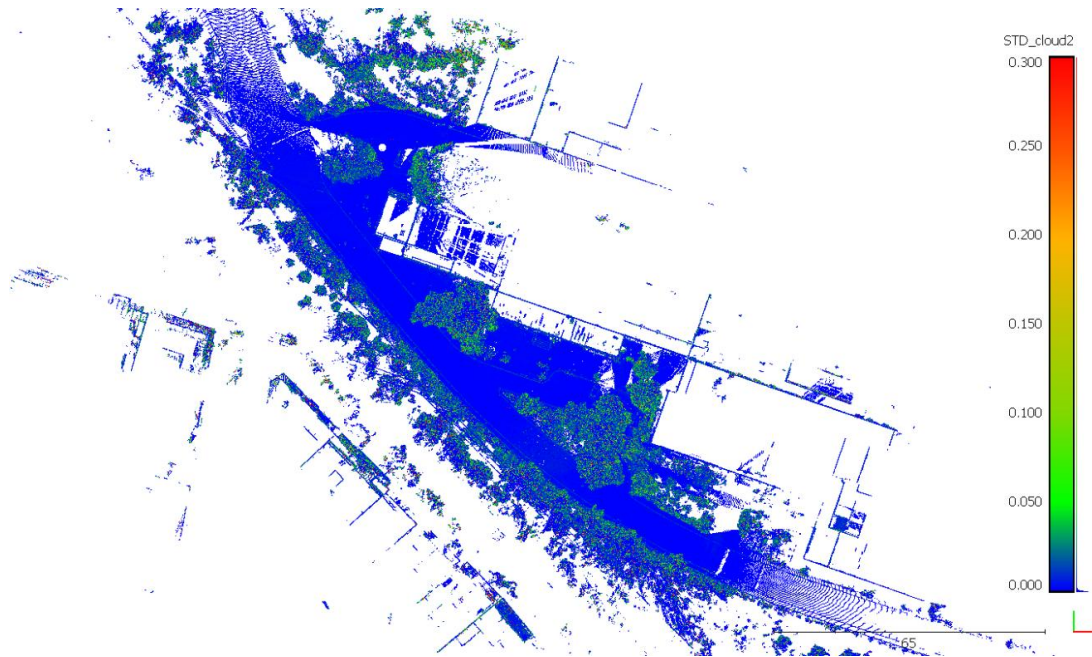


Εικόνα 5.17: Διαφορές νεφών σημείων σε 3D ορθή προβολή(πάνω με normal, κάτω χωρίς) (περιοχή 3^η)

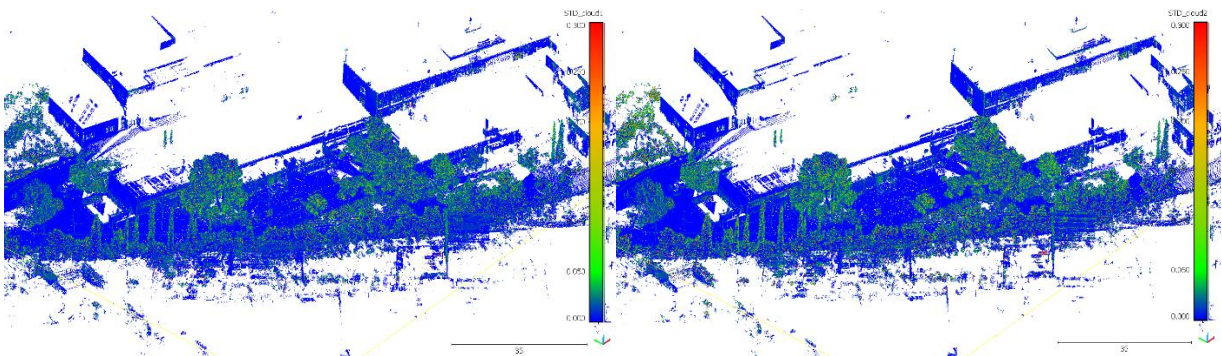
Η περιοχή αυτή παρουσιάζει τις μικρότερες τιμές στις διαφορές των δύο νεφών. Ενδιαφέρον παρουσιάζει πως κατά τη διάρκεια των σαρώσεων στο πεδίο, κατά τη μετακίνηση του σαρωτή από μια θέση σάρωσης στην επόμενη, το σύστημα VSLAM “μπερδεύτηκε” λόγω της αυξημένης βλάστησης και της γρήγορης ίσως μετακίνησης και έχασε την θέση του σαρωτή. Παρόλα αυτά αρκούσε η επανάληψη ενός μέρους της διαδρομής από την πρώτη στη δεύτερη θέση σάρωσης για να επαναπροσδιορίσει ο σαρωτής τη θέση του. Ενώ με το “μπέρδεμα” αυτό στο πεδίο θεωρήθηκε πως θα υπάρξει σοβαρό πρόβλημα στη συνένωση, τελικά η περιοχή αυτή αποτελεί και την περιοχή με τις μικρότερες διαφορές. Ακολουθούν οι εικόνες με τις τυπικές αποκλίσεις των σημείων στα δύο νέφη.



Εικόνα 5.18: Τραχύτητα αυτόματα συνενωμένου νέφους, κάτοψη (περιοχή 3^η)



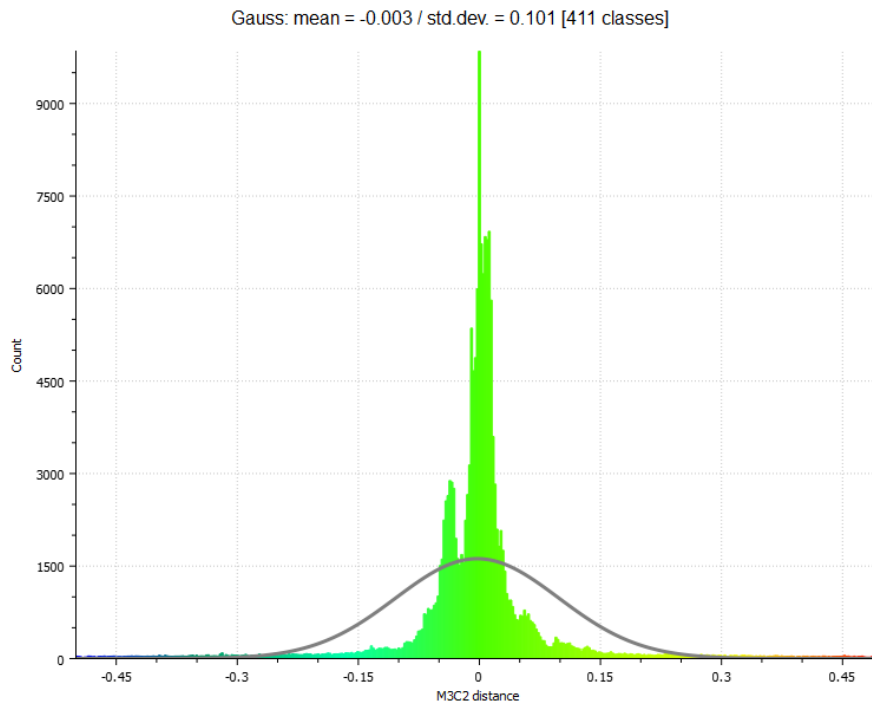
Εικόνα 5.19: Τραχύτητα χειροκίνητα. συνενωμένου νέφους, κάτωψη (περιοχή 3^η)



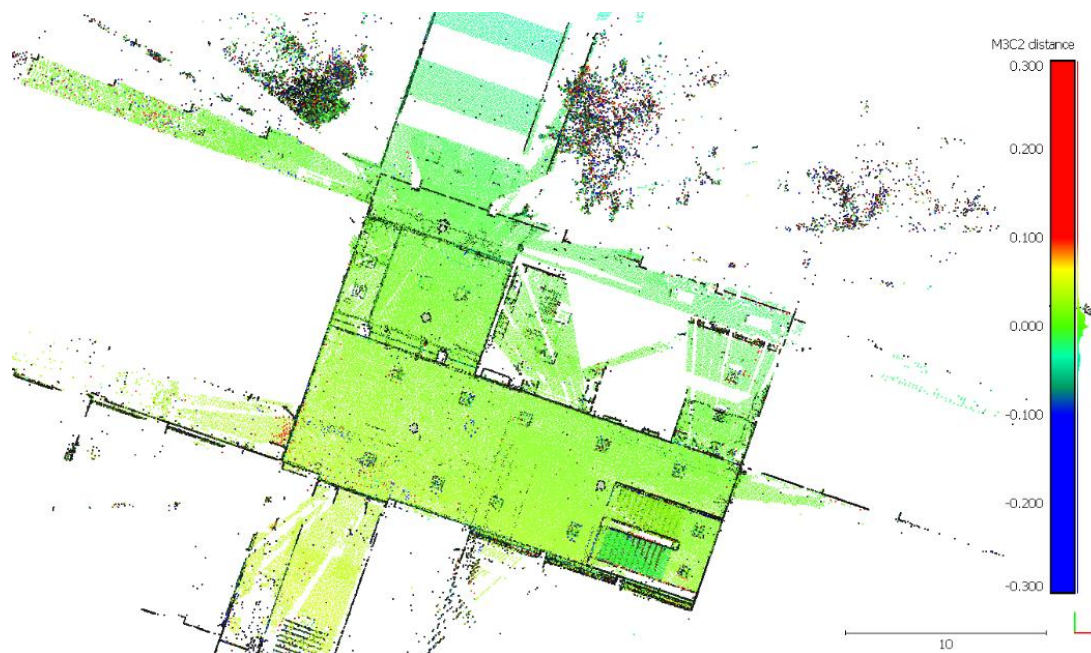
Εικόνα 5.20: Τραχύτητα των δύο νεφών σημείων σε 3D ορθή προβολή (αριστερά αυτόματα, δεξιά χειροκίνητο)(περιοχή 3^η)

Με βάση τις εικόνες 5.18, 5.19, 5.20, παρατηρείται πως οι τιμές των τυπικών αποκλίσεων είναι πολύ μικρές με τις μεγαλύτερες να φαίνονται πάλι σε σημεία όπου υπάρχει βλάστηση.

Ακολουθεί η 4^η περιοχή η οποία αφορά στον πρώτο όροφο του κεντρικού κτηρίου του Λαμπαδαρίου. Λόγω του ότι πρόκειται για εσωτερικό χώρο, δημιουργήθηκε μια τομή ώστε να αφαιρεθούν τα σημεία που βρίσκονται στο ταβάνι του χώρου και να φανούν τα σημεία του εσωτερικού. Όπου κρίθηκε αυτό αναγκαίο, υπάρχει συνοδευτική εικόνα όπου περιέχονται τα κανονικά διανύσματα, για την καλύτερη αντίληψη του χώρου.



Διάγραμμα 5.4: Διάγραμμα κατανομής Gauss των διαφορών των δύο νεφών (περιοχή 4^η)

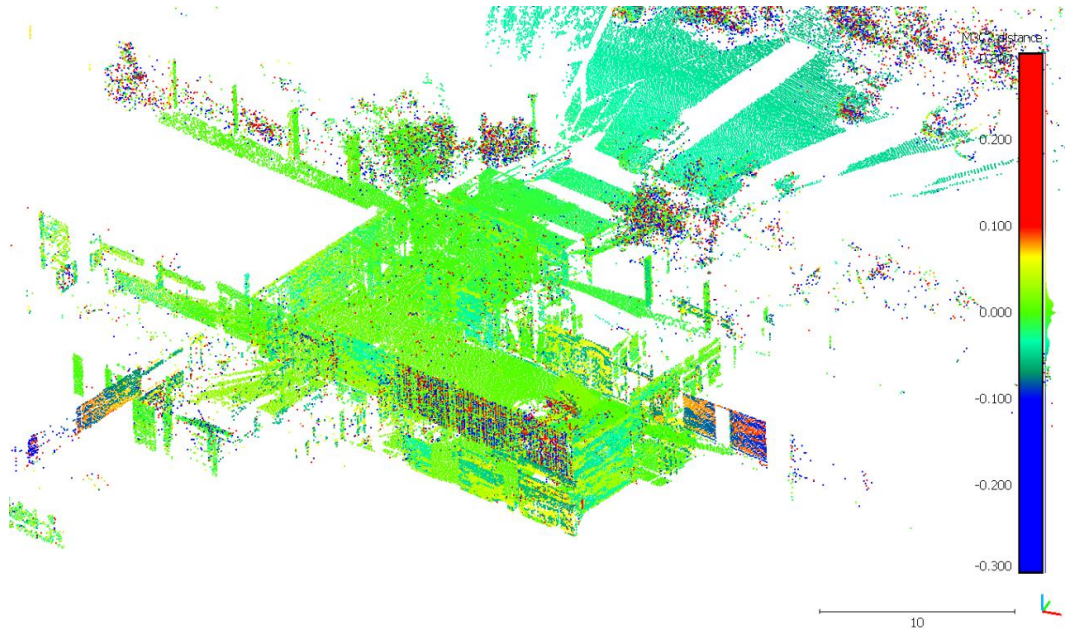


Εικόνα 5.21: Διαφορές νεφών σημείων μαζί με τα κανονικά διανύσματα σε κάτοψη (περιοχή 4^η)



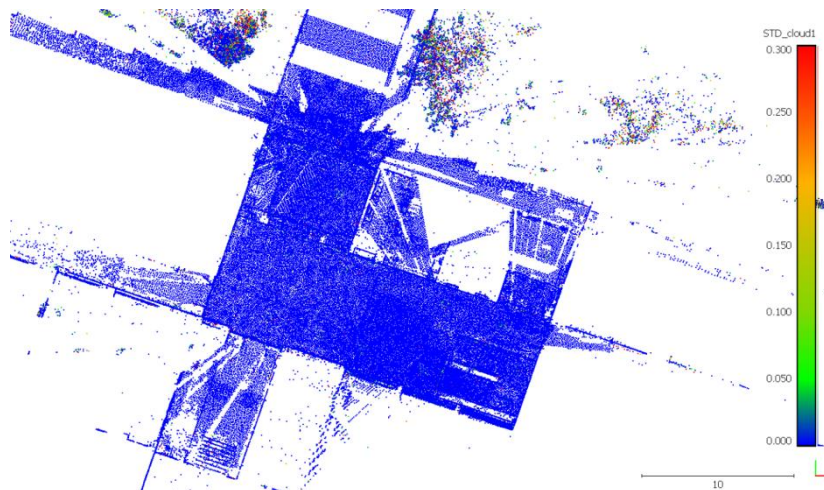
Εικόνα 5.22: Διαφορές νεφών σημείων σε κάτοψη (περιοχή 4^η)

Στην περιοχή αυτή, οι τιμές των διαφορών των δύο νεφών είναι χαμηλές το οποίο ήταν και το αναμενόμενο καθώς στο εσωτερικό του κτηρίου όλες οι αποστάσεις μεταξύ σαρωτή και σημείων είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με το εξωτερικό άρα και η ακρίβεια είναι μεγαλύτερη. Το 75% των διαφορών κυμαίνεται μεταξύ -0.05m και 0.05m με 12% των διαφορών να είναι αρνητικές μεγαλύτερες του -0.05m και 11% θετικές μεγαλύτερες του $+0.05\text{m}$. Σημεία με μεγάλες διαφορές παρατηρείται πως συσσωρεύονται σε μέρη όπου υπήρχαν παράθυρα ή πόρτες από γυαλί αλλά και σε σημεία με βλάστηση στο μπροστινό μέρος του κτηρίου. Αξίζει να αναφερθεί πως το σύστημα VSLAM του σαρωτή δούλεψε άψογα στο εσωτερικό ακόμα και κατά το σημείο μετάβασης από τον πρώτο όροφο του κτηρίου στο ισόγειο, που μεσολαβούσανε σκάλες άρα και έντονες υψομετρικές αλλαγές και απότομες κλίσεις.

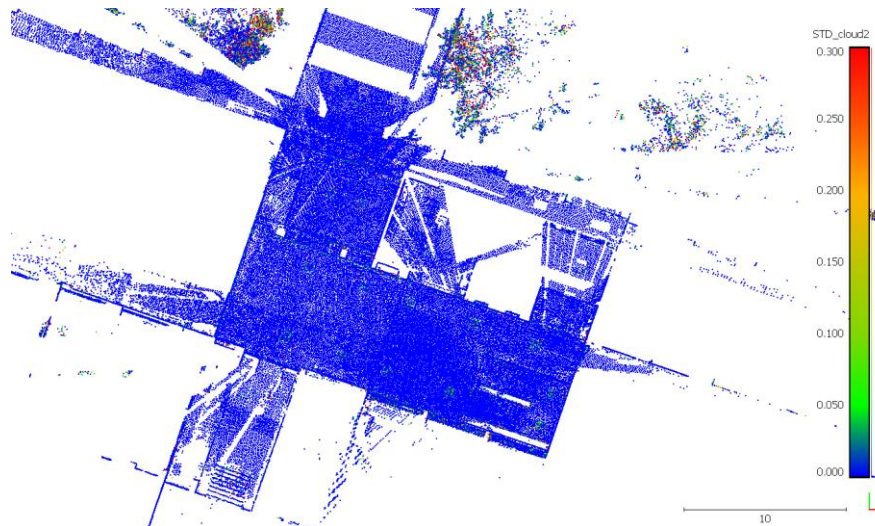


Εικόνα 5.23: Διαφορές νεφών σημείων σε 3D ορθή προβολή με τομή. (περιοχή 4^η)

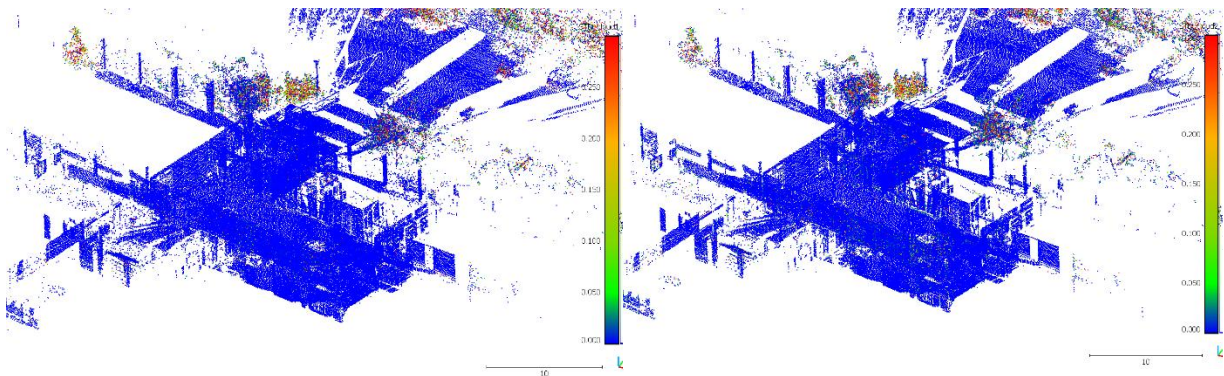
Στην εικόνα 5.23, όπου έχει αφαιρεθεί το ταβάνι με τομή, φαίνονται καλύτερα οι μεγάλες διαφορές που υπάρχουν στα σημεία που βρίσκονται παράθυρα, βλάστηση αλλά και σημεία τα οποία είχαν πολύ μικρή γωνία πρόσπτωσης με τον σαρωτή και βρίσκονται στις άκρες του νέφους, όπως ο διάδρομος που ενώνει την είσοδο του κτηρίου με τις αίθουσες Α. Στις εικόνες 5.24, 5.25, 5.26 που ακολουθούν φαίνονται οι τυπικές αποκλίσεις των σημείων στα δύο νέφη σημείων.



Εικόνα 5.24: Τραχύτητα αυτόματα συνενωμένου νέφους, κάτοψη (περιοχή 4^η)

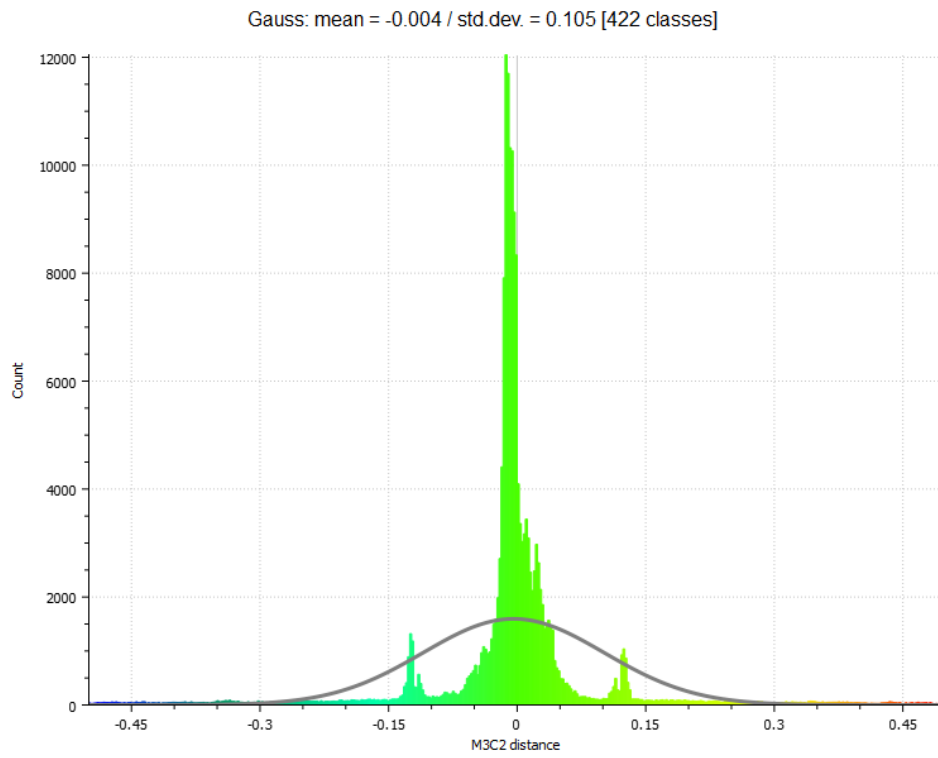


Εικόνα 5.25: Τραχύτητα χειροκίνητα συνηωμένου νέφους, κάτωψη (περιοχή 4^η)

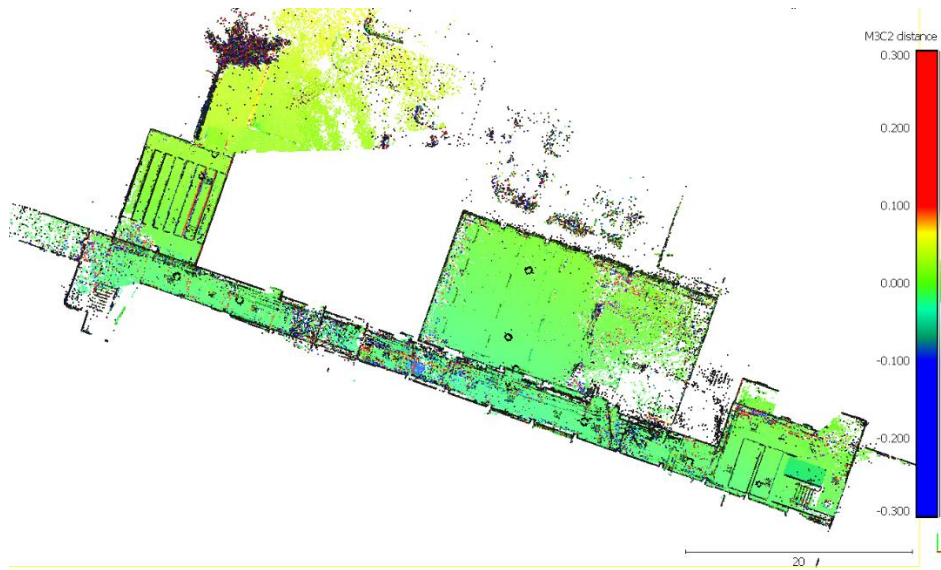


Εικόνα 5.26: Τραχύτητα των δύο νεφών σημείων σε 3D ορθή προβολή (αριστερά αυτόματα, δεξιά χειροκίνητα)(περιοχή 4^η)

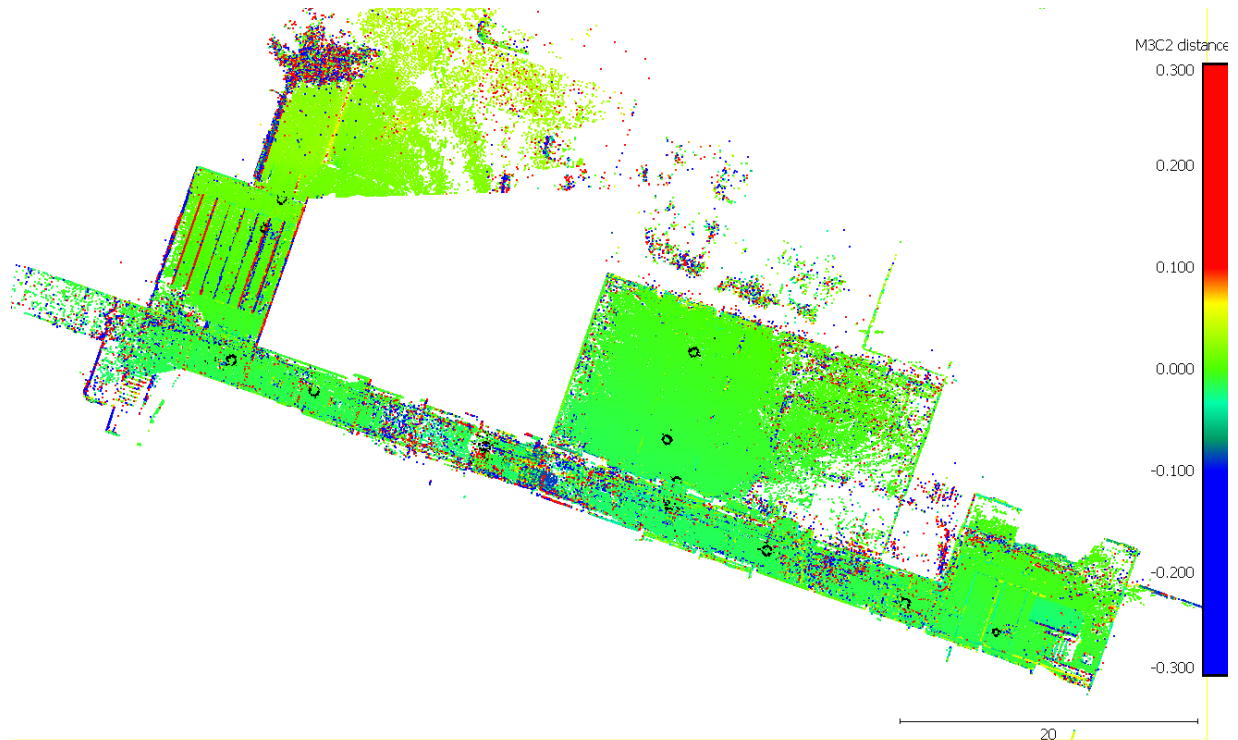
Η 5^η και τελευταία περιοχή αφορά στο ισόγειο του κτηρίου του Λαμπαδαρίου και οι σαρώσεις πραγματοποιήθηκαν από τις σκάλες που τελείωσε η προηγούμενη περιοχή σάρωσης μέχρι την αποθήκη του γεωδαιτικού εξοπλισμού όπου βρίσκεται η έξοδος του κτηρίου στο ισόγειο.



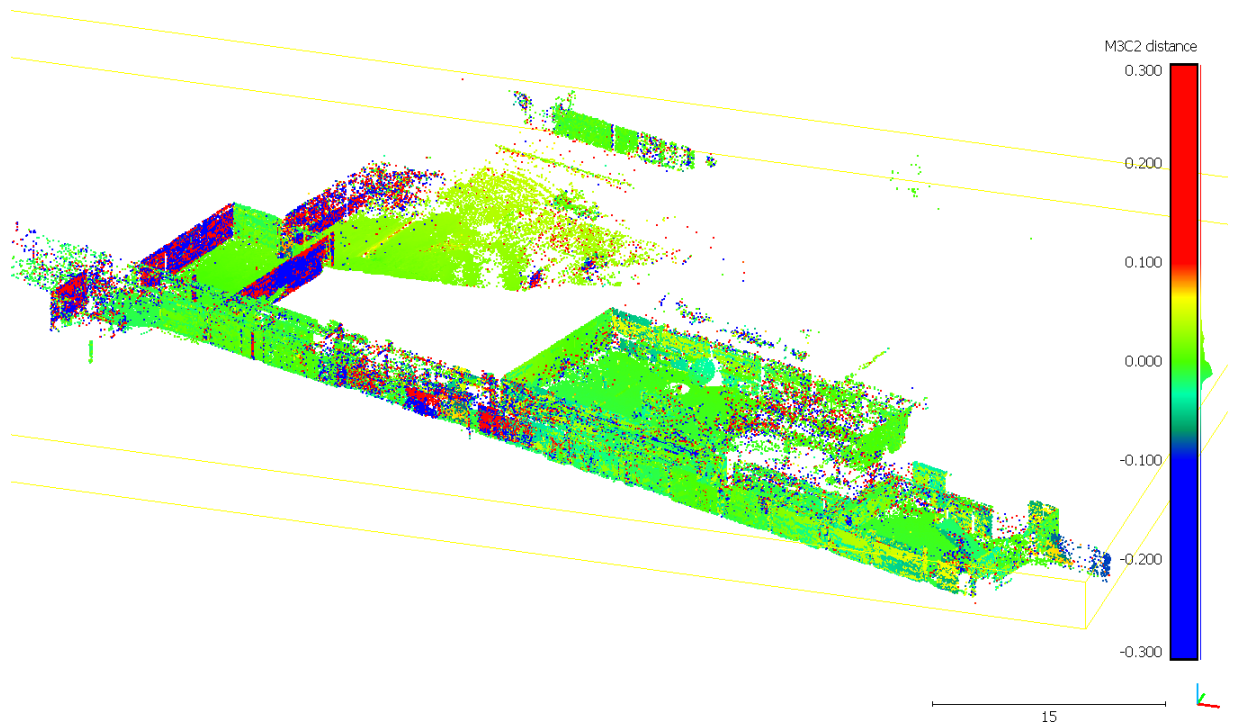
Διάγραμμα 5.5: Διάγραμμα κατανομής Gauss των διαφορών των δύο νεφών (περιοχή 5^η)



Εικόνα 5.27: Διαφορές νεφών σημείων μαζί με τα κανονικά διανύσματα σε κάτοψη (περιοχή 5^η)



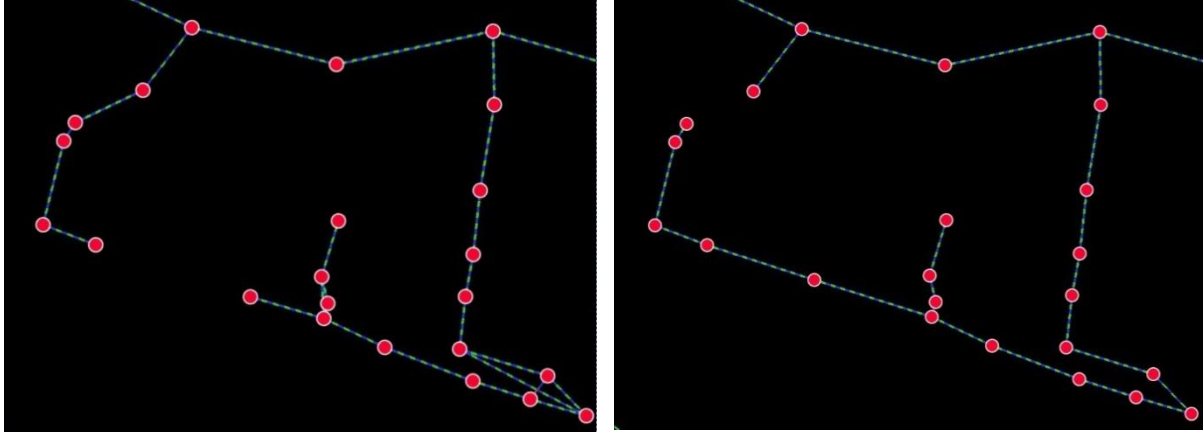
Εικόνα 5.28: Διαφορές νεφών σημείων σε κάτοψη (περιοχή 5^η)



Εικόνα 5.29: Διαφορές νεφών σημείων σε 3D ορθή προβολή (περιοχή 5^η)

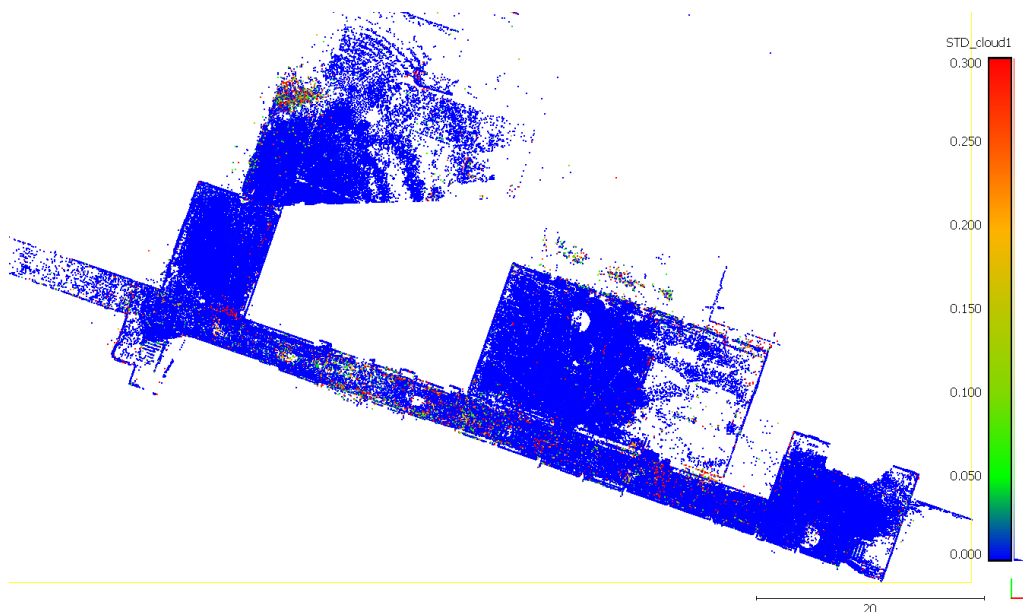
Σε γενικές γραμμές οι διαφορές των δύο νεφών σημείων είναι μικρές με το 82% των διαφορών να κυμαίνονται μεταξύ -0.05m και 0.05m και 9% αρνητικές τιμές μεγαλύτερες του -0.05m και 8% θετικές τιμές μεγαλύτερες του $+0.05\text{m}$. Παρ' όλα αυτά, μεγάλες διαφορές παρατηρούνται στον διάδρομο στον οποίο κατά τη διάρκεια δύο σαρώσεων μεσολάβησαν κάποια

άτομα τα οποία δεν έγιναν αντιληπτά ώστε να επαναληφθούν οι σαρώσεις, με αποτέλεσμα να υπάρξει πρόβλημα με τον προσδιορισμό της θέσης του σαρωτή με το σύστημα VSLAM και εν συνεχεία με την σωστή αυτόματη συνένωση των νεφών. Λόγω αυτού του προβλήματος οι συνενώσεις των σαρώσεων στο αυτόματα συνενωμένο νέφος πραγματοποιήθηκαν με άλλη σειρά από ότι στο χειροκίνητα συνενωμένο νέφος όπως φαίνεται στην *εικόνα 5.30*.

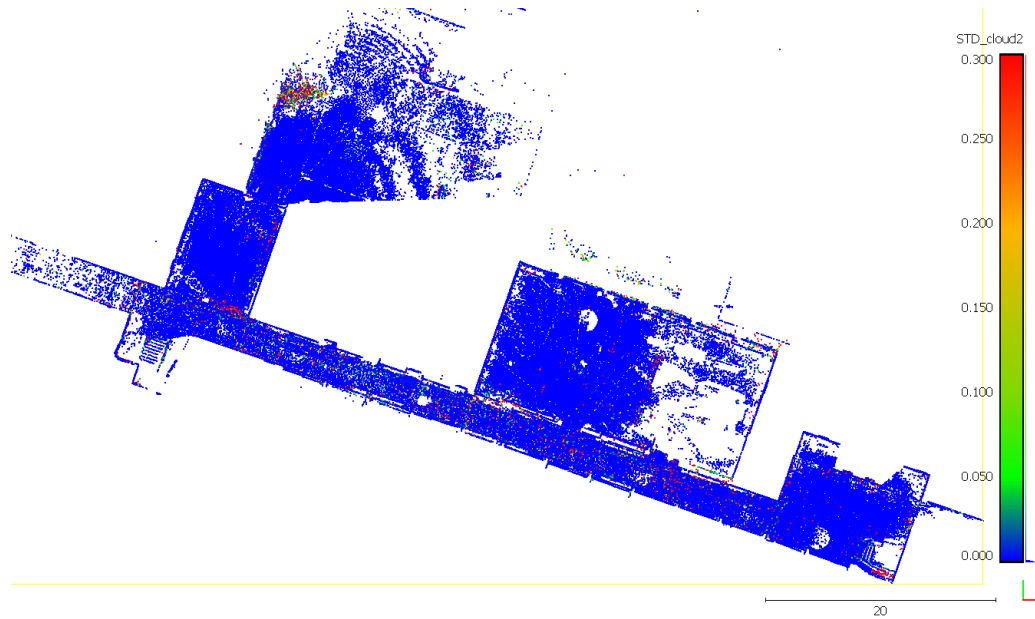


Εικόνα 5.30: Η σειρά συνενώσεων των σαρώσεων (αριστερά αυτόματα συνενωμένο νέφος, δεξιά χειροκίνητα συνενωμένο νέφος)

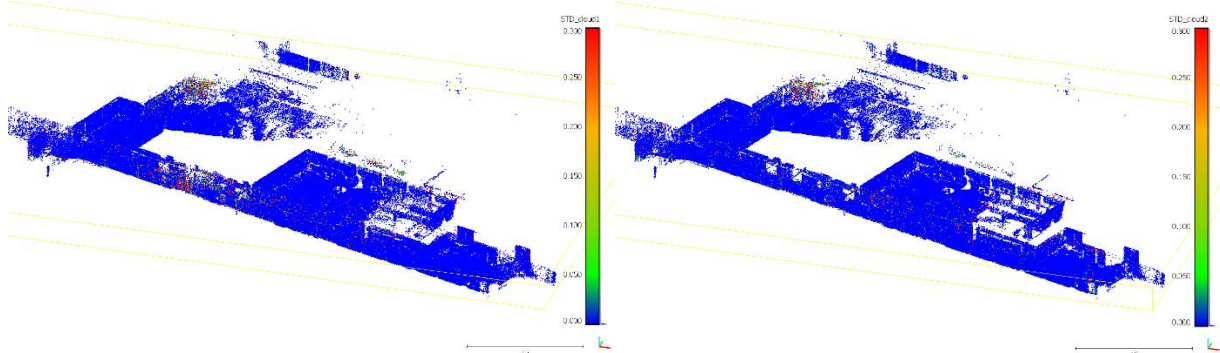
Για τον λόγο αυτό πιθανώς να παρατηρούνται οι μεγάλες διαφορές μεταξύ των δύο νεφών σημείων στο σημείο αυτό έξω από την αποθήκη γεωδαιτικού εξοπλισμού. Ακόμα, μεγάλες διαφορές μεταξύ των δύο νεφών υπάρχουν και στον τοίχο ακριβώς έξω από την έξοδο του κτηρίου που πιθανώς να οφείλεται στον ίδιο λόγο. Η σειρά των σαρώσεων, όπως αυτές συνενώθηκαν στο αυτόματα συνενωμένο νέφος, ακολουθούσαν μια διαδρομή από το εσωτερικό στο εξωτερικό τμήμα του κτηρίου. Λόγω του ότι το άνοιγμα της πόρτας ήταν αρκετά μικρό, οι επικαλύψεις μεταξύ των σαρώσεων ήταν πολύ μικρές και αυτό ίσως οδήγησε σε λανθασμένες συνενώσεις των σαρώσεων όσον αφορά το αυτόματα συνενωμένο νέφος σημείων.



Εικόνα 5.31: Τραχύτητα αυτόματα συνενωμένου νέφους, κάτοψη με τομή(περιοχή 5^η)



Εικόνα 5.32: Τραχύτητα χειροκίνητα συνενωμένου νέφους, κάτω με τομή (περιοχή 5^η)



Εικόνα 5.33: Τραχύτητα των δύο νεφών σημείων σε 3D ορθή προβολή (αριστερά αυτόματα, δεξιά χειροκίνητα)(περιοχή 5^η)

Στις παραπάνω εικόνες 5.31,5.32,5.33 οι τυπικές αποκλίσεις και στα δύο νέφη είναι χαμηλές, με τις ψηλότερες να εμφανίζονται στο αυτόματα συνενωμένο νέφος στον διάδρομο όπου υπήρξε το πρόβλημα που προαναφέρθηκε. Το χειροκίνητα συνενωμένο νέφος πραγματοποιήθηκε με τη χρήση στόχων για αυτό δεν παρατηρείται κάποια μεγάλη τιμή στις τυπικές αποκλίσεις, καθώς δεν επηρεάστηκε από το γεγονός πως μεσολαβήσανε κάποια άτομα μεταξύ των σαρώσεων.

5.4 Συμπεράσματα

Η τεχνολογία SLAM που φέρει ο σαρωτής της Leica RTC360 μαζί με το σύστημα VIS αποτελούν μια καινοτομία η οποία περνάει την σάρωση και τις εργασίες πεδίου σε ένα άλλο επίπεδο. Η απόκτηση εκατομμυρίων σημείων σε ελάχιστο χρόνο καθώς και η αυτόματη συνένωση των νεφών μπορεί να αυξήσει την παραγωγικότητα κατά πολύ, όταν ένας χειριστής μπορεί μόνος του να αποτυπώσει τεράστιες εκτάσεις σε πολύ λίγο χρόνο. Σίγουρα βοηθά το γεγονός πως το περιβάλλον λειτουργίας του σαρωτή αλλά και των λογισμικών της Leica είναι πολύ φιλικό για τον χειριστή και μπορεί ο οποιοσδήποτε με ευκολία να χρησιμοποιήσει τον σαρωτή αυτό με πολύ καλά αποτελέσματα.

Μέσα από την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας όμως προέκυψαν κάποιες παρατηρήσεις. Το σύστημα VSLAM του σαρωτή, δούλεψε στο μεγαλύτερο κομμάτι του πειράματος άψογα με τις συνενώσεις των σαρώσεων να γίνονται αυτόματα σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα

και με ακρίβεια που φαίνεται σε πρώτη όψη ικανοποιητική. Αφού πραγματοποιήθηκαν οι έλεγχοι όμως με τη χρήση φωτοσταθερών, παρατηρήθηκε πως οι διαφορές των συντεταγμένων στο μεγαλύτερο μέρος του νέφους παρουσίαζαν αποκλίσεις της τάξης των 2 έως και 9 σχεδόν εκατοστών. Αυτό δείχνει πως αν κάποιος χρειάζεται μεγάλη ακρίβεια στις σαρώσεις του, δεν μπορεί να σταθεί μόνο στις μετρήσεις και δεδομένα του σαρωτή RTC360. Κρίνεται απαραίτητη η χρήση ορισμένων σταθερών σημείων για τις σωστές συνενώσεις των σαρώσεων και πραγματοποίηση ελέγχων.

Σίγουρα φαντάζει τέλειος ένας σαρωτής "plug and play" όπου ο χειριστής μπορεί να σαρώσει τεράστιες εκτάσεις και με τη χρήση ελάχιστων φωτοσταθερών να πραγματοποιήσει γεωναφορά στο νέφος του, αλλά κρίνεται πως ο σαρωτής δεν ικανοποιεί αυτές τις συνθήκες. Τέτοιες εφαρμογές θα μπορούσαν να ήταν ίσως σαρώσεις σε μεγάλα εργοτάξια και παρακολούθηση όγκων χωματουργικών κλπ, όπου η ακρίβεια δεν θα παίζει τόσο μεγάλο ρόλο, αλλά ακόμα και σε αυτές τις εφαρμογές υπεισέρχεται η οικονομική παράμετρος καθώς η τιμή του σαρωτή δεν είναι ιδιαίτερα προσιτή και υπάρχουν οικονομικότεροι τρόποι (drones κ.ά.).

Εν κατακλείδι, ο σαρωτής της Leica RTC360, είναι ένας σαρωτής ο οποίος μπορεί να συλλέξει τεράστιους όγκους δεδομένων σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα πράγμα που τον καθιστά από τους πιο γρήγορου σαρωτές στην αγορά. Το σύστημα VIS του σαρωτή μαζί με την τεχνολογία VSLAM αποτελούν μια μεγάλη καινοτομία που ελαχιστοποιεί σε τεράστιο βαθμό τους χρόνους εργασίας γραφείου. Αλλά εφόσον η εφαρμογή απαιτεί υψηλή ακρίβεια, κρίνεται απαραίτητη ανάγκη ο χειριστής να παρέμβει με τη χρήση στόχων και φωτοσταθερών σημείων.

Βιβλιογραφία

- [1] Ahmad N., Ariffin R., Ghazilla R. και Khairi M.N. 2013. *Reviews on Various Inertial Measurement Unit (IMU) Sensor Applications*
- [2] Bailey T. και Durrant-Whyte H., 2006. *Simultaneous Localization and Mapping (SLAM):Part II*
- [3] Biasion A., Moerwald T., Walser B. και Walsh G. 2019. *Leica RTC360 : A new approach to the Terrestrial Laser Scanning workflow*
- [4] Βέργος Κ. 2015. *Διερεύνηση αξιολόγησης μεθοδολογιών συνένωσης νεφών σημείων.* (Διπλωματική εργασία) Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- [5] Edl M., Mizerák M. και Trojan J. 2018. *3D Laser Scanners : History and Applications*
- [6] Kerster P. T., Stange M., Lindstaedt M. και Mechelke K. 2020. *Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen der terrestrischen Laserscanner Lecia RTC360 und Z+F IMAGER 5016 im Labor und im Feldprüfverfahren*
- [7] Κούκης Ν., 2017. *Σχεδιασμός και Ανάπτυξη Συστήματος SLAM για την ταυτόχρονη χαρτογράφηση και προσδιορισμό θέσης με πολλαπλά τροχοφόρα ρομπότ.* (Διπλωματική). Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- [8] Κυπαρίσση Β. 2011. *Συνένωση νεφών σημείων από ομολογίες εικόνων.* (Διπλωματική εργασία) Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- [9] Lague D., Brodu N. και Leroux J., 2013. *Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner : application to the Rangitikei canyon (N-Z)*
- [10] Luhmann T., Chizhova M., Gorkovchuk D., Hastedt H., Chachava N. και Lekveishvili N. 2019. *Combination of terrestrial laserscanning , UAV and close-range photogrammetry for 3D reconstruction of complex churches in Georgia.*
- [11] Mishra B., Griffin R. και Erhan Sevil H., 2021. *Modelling Software Architecture for Visual Simultaneous Localization and Mapping*
- [12] Neitzel F., Gordon B. και Wujanz D. 2014. *Verfahren zur standardisierten überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS)*
- [13] Novakovic G. και Paar R. 2009. *Testing the precision of geodetic instruments according to international standards*
- [14] Ogawa T. και Hori Y. 2019. *Comparison with accuracy of terrestrial laser scanner by using point cloud aligned with shape matching and best fitting methods.*
- [15] Τσουβάλογλου Ι. 2009. *Μέθοδοι συσχέτισης δεδομένων κατά τη χρήση του φίλτρου Extended Kalman Filter στο πρόβλημα SLAM.* (Μεταπτυχιακή διατριβή). Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

- [16] Wahlqvist K., 2019. *A Comparison of Motion Priors for EKF-SLAM in Autonomous Race Cars* (Πτυχιακή). KTH Royal Institute of Technology