



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ – ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΑΡΩΤΩΝ SLAM

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΤΟΠΑΛΗ ΧΡΙΣΤΙΝΑΣ

Επιβλέπων : Ανδρέας Γεωργόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2023

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, νιώθω υποχρεωμένη να ευχαριστήσω όλους εκείνους που συνέβαλαν με τη γνώση, αλλά και την ουσιαστική βοήθεια τους, στο τελικό αποτέλεσμα.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά, τον κ. Ανδρέα Γεωργόπουλο για την πολύτιμη υποστήριξη και καθοδήγησή του, τις εποικοδομητικές υποδείξεις και το αμείωτο ενδιαφέρον του, κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και για όλες τις γνώσεις που αποκόμισα από εκείνον, κατά τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω, επίσης, στον κ. Αντώνη Σαρδελιάνο, της εταιρίας Metrics, και στον κ. Γιάννη Ψαλτάκη, της εταιρείας Landmark, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν με τον εξοπλισμό τους, αλλά και τις οδηγίες που μου παρείχαν για τη χρήση των σαρωτών και του αντίστοιχου λογισμικού τους.

Θα ήθελα, ακόμα, να ευχαριστήσω την κ. Σεβαστή Ταπεινάκη για την άμεση ανταπόκριση και ουσιαστική βοήθειά της σε οποιαδήποτε τεχνική δυσκολία αντιμετώπισα στο κομμάτι της επεξεργασίας των δεδομένων.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ ανήκει στην οικογένεια και τους φίλους μου, για τη συνεχή συμπαράστασή τους, για τις πολύτιμες συμβουλές τους και για όσα μου έχουν προσφέρει όλα τα χρόνια της ζωής μου αλλά και των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ακρωνύμια	5
Ευρετήριο Εικόνων	6
Ευρετήριο Πινάκων	10
Ερμηνεία αγγλικών όρων	11
Εισαγωγή	12
Abstract	13
1. Ιστορική Αναδρομή	14
2. Περιγραφή της τεχνολογίας SLAM	16
2.1. SLAM Front-end	16
2.1.1 Οπτικοί δέκτες – Visual SLAM	17
2.1.2 Δέκτες Laser – LiDAR SLAM	18
2.1.3 Δέκτες Sonar – SONAR SLAM	19
2.1.4 Δέκτες Radar – RADAR SLAM	20
2.1.5. Μονάδα Αδρανειακών Μετρήσεων – IMU	21
2.2. SLAM Back-end	22
2.2.1. Φίλτρο EKF – Visual SLAM	22
2.2.2. Αλγόριθμος ICP – LiDAR SLAM	24
2.2.3. Φίλτρο Σωματιδίων Rao-Blackwellized – SONAR SLAM	25
2.2.4. Μετασηματισμός Fourier-Mellin – RADAR SLAM	26
3. Έλεγχος σαρωτών	26
4. Εξοπλισμός	29
4.1. ZEB Horizon – GeoSLAM	30
4.1.1. Γενικές πληροφορίες	31
4.1.2. Τρόπος λειτουργίας – Διαδικασία σάρωσης	32
4.2. BLK2GO – Leica Geosystems	35
4.2.1. Γενικές πληροφορίες	36
4.2.2. Τρόπος λειτουργίας – Διαδικασία σάρωσης	37
5. Περιοχή μελέτης	39
6. Πειραματικές μετρήσεις	40
6.1. Καθορισμός διαδρομών σάρωσης	40
6.2. Σημεία ελέγχου	43
7. Επεξεργασία πειραματικών μετρήσεων	44
7.1. Γεωαναφορά νεφών σημείων – Ακρίβεια εντοπισμού στόχων	44
7.1.1. ZEB HORIZON	45

7.1.2. BLK2GO.....	46
7.2 Σύγκριση νεφών σημείων.....	48
7.2.1 Εξωτερικά «μακρινά» νέφη.....	48
7.2.2 Εξωτερικά «κοντινά» νέφη.....	66
7.2.3 Εσωτερικά νέφη	77
8. Συμπεράσματα	95
Βιβλιογραφία	99

Ακρωνύμια

SLAM:	Simultaneous Localization and Mapping
EKF:	Extended Kalman Filter
MLE:	Maximum Likelihood Estimation
RBPF:	Rao–Blackwellized Particle Filter
2D/3D:	2/3 Dimensions
LiDAR:	Light Detection and Ranging
SONAR:	Sound Detection and Ranging
RADAR:	Radio Detection and Ranging
BA:	Bundle Adjustment
SfM:	Structure from Motion
IMU:	Inertial Measurement Unit
ToF:	Time of Flight
EGM:	Evidence Grid Maps
ICP:	Iterative Closest Point
PSM:	Polar Scan Matching
FMT:	Fourier – Mellin Transform
LDM:	Laser Distance Measurer
HLS:	Handheld Laser Scanner
TPS:	Total Station
TLS:	Terrestrial Laser Scanner

Ευρετήριο Εικόνων

Κεφάλαιο	Αριθμός	Περιγραφή	Σελίδα
1	1.1	Η εξέλιξη της τεχνολογίας SLAM	15
2	2.1	Ροή επεξεργασίας δεδομένων στα συστήματα SLAM	16
	2.2	IMU με δύο ειδών αισθητήρες	21
	2.3	IMU με τριών ειδών αισθητήρες	21
	2.4	Στοιχεία vSLAM	23
	2.5	Δομή φίλτρου EKF	23
	2.6	Αλγόριθμος ICP	24
	2.7	Υπολογισμός δυναμικής τροχιάς με το RBPF	25
3	3.1	Θέσεις σημείων ελέγχου	28
4	4.1	Σαρωτής ZEB Horizon	30
	4.2	Εξαρτήματα ZEB Horizon	31
	4.3	Σαρωτής BLK2GO	35
	4.4	Εξαρτήματα BLK2GO	36
	4.5	Φωτεινές ενδείξεις κατά τη σάρωση με το BLK2GO	37
	4.6	Σύνοψη φωτεινών ενδείξεων BLK2GO	39
5	5.1	Λαμπαδάρειο κτήριο	40
6	6.1	Διαδρομή με ZEB Horizon	41
	6.2	Διαδρομή με BLK2GO	41
	6.3	Διαδρομή με ZEB Horizon	42
	6.4	Διαδρομή με BLK2GO	42
	6.5	Διαδρομή με ZEB Horizon	43
	6.6	Διαδρομή με BLK2GO	43
7	7.1	Νέφος σημείων ZEB Horizon (Νοτιοδυτική Προβολή)	49
	7.2	Νέφος σημείων ZEB Horizon (Βορειοανατολική Προβολή)	49
	7.3	Νέφος σημείων ZEB Horizon (Κάτοψη)	50
	7.4	Θόρυβος από βροχή ZEB Horizon (N. Όψη)	50
	7.5	Φίλτρο αφαίρεσης θορύβου	51
	7.6	Νέφος σημείων ZEB Horizon με φίλτρο θορύβου (Νοτιοδυτική Προβολή)	51
	7.7	Νέφος σημείων ZEB Horizon με φίλτρο θορύβου (Βορειοανατολική Προβολή)	52
	7.8	Νέφος σημείων ZEB Horizon με φίλτρο θορύβου (Κάτοψη)	52
	7.9	Νέφος σημείων BLK2GO (Νοτιοδυτική Προβολή)	53

7.10	Νέφος σημείων BLK2GO (Βορειοανατολική Προβολή)	54
7.11	Νέφος σημείων BLK2GO (Κάτοψη)	54
7.12	Νέφος σημείων BLK2GO με φίλτρο θορύβου (Νοτιοδυτική Προβολή)	55
7.13	Νέφος σημείων BLK2GO με φίλτρο θορύβου (Βορειοανατολική Προβολή)	55
7.14	Νέφος σημείων BLK2GO με φίλτρο θορύβου (Κάτοψη)	56
7.15	Μοντέλο υψομέτρων ZEB Horizon	56
7.16	Κανονική κατανομή μοντέλου υψομέτρων ZEB Horizon	57
7.17	Μοντέλο υψομέτρων BLK2GO	57
7.18	Κανονική κατανομή μοντέλου υψομέτρων BLK2GO	58
7.19	Παράμετροι Εργαλείου M3C2 Distance	59
7.20	Διαφορές νεφών (Κάτοψη)	59
7.21	Διαφορές νεφών (Νοτιοδυτική Προβολή)	60
7.22	Διαφορές νεφών (Βορειοανατολική Προβολή)	60
7.23	Κανονική κατανομή διαφορών	61
7.24	Significant Change (Κάτοψη)	62
7.25	Significant Change (Νοτιοδυτική Προβολή)	63
7.26	Significant Change (Βορειοανατολική Προβολή)	63
7.27	Distance Uncertainty	64
7.28	Διαφορές τμήματος νεφών	64
7.29	Κανονική κατανομή διαφορών	65
7.30	Διάγραμμα αβεβαιοτήτων	65
7.31	Νέφος σημείων ZEB Horizon (Νοτιοδυτική Προβολή)	66
7.32	Νέφος σημείων ZEB Horizon (Βορειοανατολική Προβολή)	66
7.33	Νέφος σημείων ZEB Horizon (Κάτοψη)	67
7.34	Νέφος σημείων ZEB Horizon με φίλτρο θορύβου (Νοτιοδυτική Προβολή)	67
7.35	Νέφος σημείων ZEB Horizon με φίλτρο θορύβου (Βορειοανατολική Προβολή)	68
7.36	Νέφος σημείων ZEB Horizon με φίλτρο θορύβου (Κάτοψη)	68
7.37	Νέφος σημείων BLK2GO (Νοτιοδυτική Προβολή)	69

7.38	Νέφος σημείων BLK2GO (Βορειοανατολική Προβολή)	69
7.39	Νέφος σημείων BLK2GO (Κάτοψη)	70
7.40	Νέφος σημείων BLK2GO με φίλτρο θορύβου (Νοτιοδυτική Προβολή)	70
7.41	Νέφος σημείων BLK2GO με φίλτρο θορύβου (Βορειοανατολική Προβολή)	71
7.42	Νέφος σημείων BLK2GO με φίλτρο θορύβου (Κάτοψη)	71
7.43	Διαφορές νεφών (Νοτιοδυτική Προβολή)	72
7.44	Διαφορές νεφών (Βορειοανατολική Προβολή)	72
7.45	Διαφορές νεφών (Κάτοψη)	73
7.46	Κανονική κατανομή διαφορών	73
7.47	Significant Change (Κάτοψη)	74
7.48	Significant Change (Νοτιοδυτική Προβολή)	74
7.49	Significant Change (Βορειοανατολική Προβολή)	75
7.50	Distance Uncertainty	75
7.51	Διαφορές τμήματος νέφους	76
7.52	Κανονική κατανομή διαφορών	76
7.53	Διάγραμμα αβεβαιοτήτων	77
7.54	Νέφος σημείων ZEB Horizon (Νοτιοδυτική Προβολή)	78
7.55	Νέφος σημείων ZEB Horizon (Βορειοανατολική Προβολή)	78
7.56	Νέφος σημείων ZEB Horizon (Κάτοψη)	79
7.57	Νέφος σημείων ZEB Horizon (Οριζόντια Τομή – Υπόγειο)	79
7.58	Νέφος σημείων ZEB Horizon (Οριζόντια Τομή – Ισόγειο)	80
7.59	Σκάλες (Δυτικό τμήμα κτηρίου)	81
7.60	Σκάλες (Ανατολικό τμήμα κτηρίου)	81
7.61	Αίθουσες Λ	81
7.62	Ντουλάπια αποθήκευσης εξοπλισμού (Υπόγειο)	82
7.63	Ισόγειο με φίλτρο θορύβου	82
7.64	Ανθρώπινες φιγούρες στις ανατολικές σκάλες με φίλτρο θορύβου	83
7.65	Νέφος σημείων BLK2GO (Κάτοψη)	84
7.66	Νέφος σημείων BLK2GO (Νότια όψη κτηρίου)	84
7.67	Νέφος σημείων BLK2GO (Οριζόντια τομή - Υπόγειο)	85

7.68	Νέφος σημείων BLK2GO (Οριζόντια τομή - Ισόγειο)	85
7.69	Σκάλες (Ανατολικό τμήμα κτηρίου)	86
7.70	Σκάλες (Δυτικό τμήμα κτηρίου)	87
7.71	Ντουλάπια αποθήκευσης εξοπλισμού	87
7.72	Ανθρώπινες φιγούρες με φίλτρο θορύβου	88
7.73	Διαφορές νεφών (Οριζόντια τομή – Υπόγειο)	89
7.74	Διαφορές νεφών (Οριζόντια τομή – Ισόγειο)	89
7.75	Κανονική κατανομή διαφορών	90
7.76	Significant Change (Οριζόντια τομή – Υπόγειο)	91
7.77	Significant Change (Οριζόντια τομή – Ισόγειο)	91
7.78	Distance Uncertainty (Οριζόντια τομή – Υπόγειο)	92
7.79	Distance Uncertainty (Οριζόντια τομή – Ισόγειο)	92
7.80	Διάγραμμα αβεβαιοτήτων	93
7.81	Διαφορές τμήματος νεφών	93
7.82	Κανονική κατανομή διαφορών	94
7.83	Διάγραμμα αβεβαιοτήτων	94

Ευρετήριο Πινάκων

Κεφάλαιο	Αριθμός	Περιγραφή	Σελίδα
3	3.1	Τοπική ακρίβεια ZEB Horizon	28
	3.2	Παγκόσμια ακρίβεια ZEB Horizon	29
	3.3	Παγκόσμια ακρίβεια BLK2GO	29
4	4.1	Σαρωτές LiDAR SLAM	29
	4.2	Γενικές πληροφορίες για το ZEB Horizon	31-32
	4.3	Σύνοψη φωτεινών ενδείξεων ZEB Horizon	35
	4.4	Γενικές πληροφορίες για το BLK2GO	36-37
7	7.1	Σημεία ελέγχου εξωτερικών νεφών	44
	7.2	Σημεία ελέγχου εσωτερικού νέφους	44
	7.3	Μέσα Τετραγωνικά Σφάλματα Γεωαναφοράς	44
8	8.1	Σύγκριση σαρωτών	98

Ερμηνεία αγγλικών όρων

- **Probabilistic mapping:** Η διαδικασία αποτύπωσης μίας επιφάνειας κάνοντας χρήση στατιστικών μοντέλων. Η επιφάνεια που δημιουργείται παρουσιάζει την πιθανότητα μια μεταβλητή να παίρνει τιμές μεγαλύτερες ή μικρότερες μιας τιμής κατωφλίου που καθορίζει ο χρήστης.
- **Visual Navigation:** Το πρόβλημα της πλοήγησης ενός κινητού ρομπότ σε ένα περιβάλλον, χρησιμοποιώντας μόνο δεδομένα εισόδου μίας ή περισσότερων καμερών.
- **Robust Perception:** Το σύνολο των τεχνικών που συμβάλλουν στην ενίσχυση της αυτονομίας του ρομπότ-σαρωτή όσον αφορά στην πλοήγηση, στην ανίχνευση χαρακτηριστικών σημείων και στη δυνατότητα του να αναγνωρίζει με ευκολία περίπλοκη γεωμετρία ή εξαιρετικά απλά επαναλαμβανόμενα μοτίβα στο χώρο.

Εισαγωγή

Ο περιβάλλον χώρος αποτελεί μια ραγδαία εναλλασσόμενη και μεταλλασσόμενη μεταβλητή, απασχολώντας ένα ευρύ φάσμα ειδικοτήτων, από τον τομέα της κατασκευής έως τον περιβαλλοντικό. Τα προνόμια της συνεχούς και ακριβούς χαρτογράφησης του χώρου, αλλά και της τρισδιάστατης ανακατασκευής του, έχουν υπάρξει σημαντικά, ενθαρρύνοντας την τεχνολογική εξέλιξη και χαράσσοντας τον δρόμο για την ανάπτυξη νέων μεθόδων και τεχνικών για τον σκοπό αυτό. Παρά την εξέλιξη της τεχνολογίας, όμως, η συλλογή των δεδομένων καθώς και τα απαιτούμενα βήματα επεξεργασίας, ώστε να χαρακτηριστεί μια περιοχή αποτυπωμένη, εξακολουθούν να αποτελούν στάδια μίας περίπλοκης και χρονοβόρας διαδικασίας, η αυτοματοποίηση της οποίας έχει απασχολήσει την επιστημονική κοινότητα επανειλημμένα. Οι δυσκολίες της τρισδιάστατης αποτύπωσης μιας περιοχής δεν περιορίζονται μόνο στον τομέα του χρόνου, αλλά επεκτείνονται και στο κομμάτι της επιστημονικής γνώσης και κατάρτισης που απαιτούνταν μέχρι πρόσφατα για να γίνει χρήση του αντίστοιχου εξοπλισμού, στην προσβασιμότητα και έκταση της υπό μελέτη περιοχής, στα καιρικά φαινόμενα, στη γεωαναφορά των δεδομένων και σε μία συνεχώς αυξανόμενη λίστα παραμέτρων. Σε μία προσπάθεια αντιμετώπισης ενός μέρους των προαναφερθέντων προβληματισμών, αναπτύχθηκε μία καινούργια γενιά σαρωτών πεδίου, που εκμεταλλεύεται την τεχνολογία SLAM.

Η τεχνολογία SLAM, το ακρωνύμιο της οποίας αντιπροσωπεύει την ταυτόχρονη χαρτογράφηση και εντοπισμό της θέσης της συσκευής συλλογής δεδομένων στο χώρο, αναπτύχθηκε αρχικά στο πλαίσιο της επιστήμης της ρομποτικής και στη συνέχεια αξιοποιήθηκε για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας της αποτύπωσης του χώρου και του εντοπισμού του ρομπότ-σαρωτή μέσα σε αυτόν. Ανταποκρινόταν, επιτυχώς, στο πρόβλημα της προσβασιμότητας καθώς οι σαρωτές που επωφελούνταν από την τεχνολογία αυτή, ήταν και είναι φορητοί και η χρήση τους είναι απλή σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς σταθερούς σαρωτές. Επιπλέον, έκανε την επακόλουθη επεξεργασία των δεδομένων αισθητά συντομότερη, δεδομένου ότι πολλές διαδικασίες που γίνονταν χειροκίνητα, όπως η συρραφή των δεδομένων από διαφορετικά τμήματα της ίδιας περιοχής, πραγματοποιείτο πλέον αυτόματα και στο πεδίο.

Η εξέλιξη των μεθόδων της τρισδιάστατης ανακατασκευής αντικειμένων που κάνουν χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας, έχει περάσει από πολλά στάδια τα τελευταία χρόνια, με εναλλαγές και συνδυασμό διαφορετικών αισθητήρων, αλγορίθμων και συσκευών με σκοπό τη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων. Παρατηρώντας τη ραγδαία ανταπόκριση της επιστημονικής, και όχι μόνο, κοινότητας στην πρόκληση αυτή, γίνεται μελέτη των πιο πρόσφατων καινοτομιών στον τομέα των σαρωτών SLAM αλλά και αξιολόγησή τους.

Λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα παραπάνω, σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η γενικότερη περιγραφή της διαδικασίας της τρισδιάστατης αποτύπωσης του χώρου κάνοντας χρήση της τεχνολογίας SLAM, η ποιοτική σύγκριση δύο εκ των πιο πρόσφατων σαρωτών SLAM στην αγορά, η καταγραφή τόσο των πλεονεκτημάτων όσο και των μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν σε σχέση με τους παραδοσιακούς σαρωτές και η συνολική αξιολόγησή τους μετά από τη χρήση των σαρωτών σε κοινό περιβάλλον και την επεξεργασία των προϊόντων τους σε αντίστοιχα λογισμικά.

Abstract

Space is a rapidly changing and mutating variable, troubling a wide range of specialties, from the construction to the environmental sector. The advantages of continuous and accurate mapping of space, but also of its three-dimensional reconstruction, have been crucial, encouraging technological evolution and paving the way for the development of new methods and techniques for this purpose. Despite the evolution of technological endeavors, however, the collection of data as well as the required processing steps, for an area to be characterized as mapped, are still stages of a complex and time-consuming process, the automation of which has concerned the scientific community repeatedly. The difficulties of the three-dimensional mapping of an area are not only limited to the domain of time, but also extend to the scientific knowledge and training that was required until recently to use the corresponding machines, to the accessibility and extent of the area under study, to the weather phenomena, to georeferencing the data and an ever-growing list of parameters. In an attempt to address part of the aforementioned concerns, a new generation of field scanners was developed, which made use of the SLAM technology.

SLAM technology, whose acronym stands for Simultaneous Localization and Mapping, was originally developed in the context of robotics science and then exploited to automate the process of mapping the space and locating the robot – scanner in it. It successfully addressed the problem of accessibility, as the scanners benefiting from this technology were and are portable, and their use is simple compared to traditional scanners. In addition, it made the data processing routine in the office significantly shorter, as many processes which were performed manually, such as stitching data from different parts of the same area, were now performed both automatically and on the spot.

The methods of 3D reconstruction of objects using this technology have undergone numerous phases of evolution, making changes and combining various sensors, algorithms, and devices throughout time, in order to optimize the results. Observing the rapid response of the scientific community, amongst others, to this challenge, it is believed to be of utmost importance to study the latest innovations in the field of SLAM scanners and evaluate them at an academic level.

Taking into account all the above, the purpose of this dissertation is the general description of the process of 3D mapping using SLAM technology, the qualitative comparison of two of the latest SLAM scanners on the market, the exploration of both their advantages and disadvantages in comparison to traditional scanners and their overall evaluation after using the scanners in a common environment and processing their products in corresponding software.

1. Ιστορική Αναδρομή

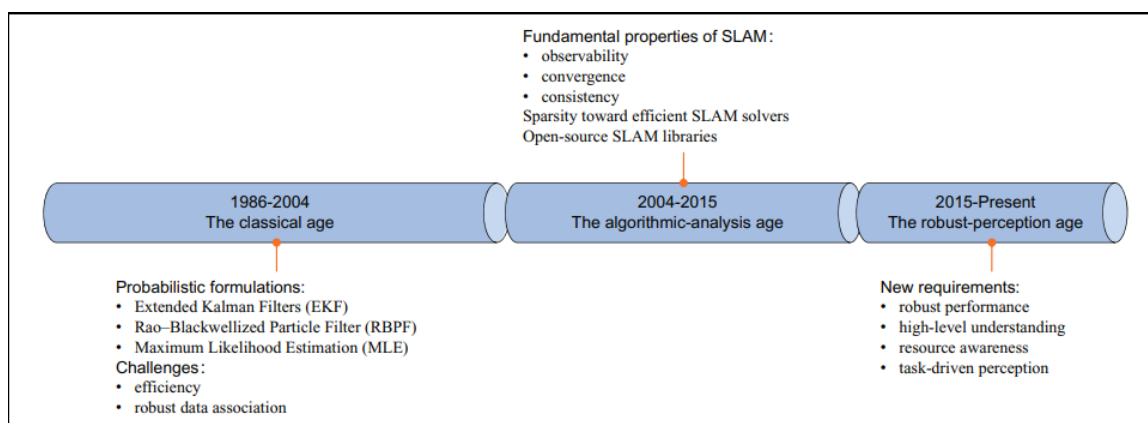
Αρχικά, η τεχνολογία SLAM είχε τη μορφή της «πιθανολογικής αποτύπωσης» (probabilistic mapping) και χαρτογράφησης του χώρου και αποτελούσε θεμελιώδες πρόβλημα στον τομέα της ρομποτικής. Σύμφωνα με τους Durrant-Whyte και Bailey (Durrant-Whyte, Bailey, 2006), το πρόβλημα διερευνούσε την δυνατότητα ενός κινητού ρομπότ που τοποθετείται σε άγνωστη τοποθεσία, μέσα σε ένα άγνωστο περιβάλλον, να δημιουργεί σταδιακά ένα συνεπή χάρτη αυτού του περιβάλλοντος, ενώ ταυτόχρονα να προσδιορίζει την θέση του σε αυτόν τον χάρτη. Την εποχή της πρώιμης ανάπτυξης της τεχνολογίας, μια λύση στο πρόβλημα αυτό θα θεωρείτο σημαντική πρόοδος για την κοινότητα της κινητής ρομποτικής, καθώς θα παρείχε τα μέσα για να γίνει ένα ρομπότ πραγματικά αυτόνομο.

Οι πιθανολογικές μέθοδοι, οι οποίες κάνουν χρήση στατιστικών μοντέλων για την απόδοση όλων των πιθανών θέσεων ενός αντικειμένου στο χώρο και που χρησιμοποιήθηκαν ως πρώτες δοκιμές επίλυσης του προβλήματος, σύμφωνα με τον Durrant-Whyte (Durrant-Whyte, 1988), αντιμετώπιζαν πολλά υπολογιστικά ζητήματα, παρόλα αυτά αποτέλεσαν τη βάση της συζήτησης γύρω από την επίλυση του προβλήματος για τουλάχιστον μία δεκαετία. Σταδιακά, αναγνωρίστηκε η σημαντικότητα της γεωμετρίας των οντοτήτων του χώρου και ο χαρακτηρισμός σημείων αναφοράς, και καθιερώθηκε μια στατιστική βάση για την περιγραφή των σχέσεων μεταξύ σημείων αναφοράς και χειρισμού της γεωμετρικής αβεβαιότητας. Αποδείχθηκε, έτσι, ότι πρέπει να υπάρχει υψηλός βαθμός συσχέτισης μεταξύ των εκτιμήσεων της θέσης διαφορετικών σημείων αναφοράς σε έναν χάρτη και ότι οι συσχετισμοί αυτοί βελτιώνονται όσο αυξάνονται οι διαδοχικές παρατηρήσεις.

Παράλληλα με τις προσπάθειες μαθηματικής απόδοσης των πιθανολογικών μοντέλων με εισαγωγή χαρακτηριστικών σημείων στην εξίσωση, οι Ayache και Faugeras (Ayache, Faugeras, 1988) εξερευνούσαν την «οπτική πλοήγηση» (visual navigation), ενώ ο Crowley (Crowley, 1989) και οι Chatila και Laumond (Chatila, Laumond, 1985) ασχολήθηκαν με την πλοήγηση κινητών ρομπότ κάνοντας χρήση δεκτών SONAR. Οι προσεγγίσεις αυτές είχαν πολλά κοινά με την έρευνα που είχε προηγηθεί και ο συνδυασμός των μεθόδων τους ταυτίζεται με την πρώτη αναφορά στον όρο «SLAM» το 1986 από τους Smith, Cheeseman και Self (Smith et al., 1986), που το χαρακτηρίζουν ως ένα εξαιρετικό εργαλείο αυτό-εντοπισμού κινητών ρομπότ σε μία άγνωστη τοποθεσία και μέσα σε ένα άγνωστο περιβάλλον. Σε σχετική δημοσίευση (Leonard, Durrant-Whyte, 1991) των Leonard J. και Durrant-Whyte H. το 1991, αναφέρεται ότι καθώς κινείται ένα ρομπότ μέσα σε ένα άγνωστο περιβάλλον, λαμβάνοντας σχετικές παρατηρήσεις σημείων αναφοράς, οι εκτιμήσεις αυτών των σημείων αναγκαστικά συσχετίζονται μεταξύ τους λόγω του κοινού σφάλματος στην εκτιμώμενη θέση του οχήματος. Αυτό υπονοούσε ότι για την επίλυση του προβλήματος θα έπρεπε να είναι γνωστή, ανά πάσα στιγμή, τόσο η θέση του οχήματος, όσο και η τοποθεσία των σημείων αναφοράς, η οποία θα ενημερωνόταν μετά από κάθε παρατήρηση.

Το συμπέρασμα ότι η λύση των δυσκολιών που παρουσιάζονταν με τη χρήση της τεχνολογίας SLAM έγκειται στην αντιμετώπιση της πλοήγησης και της χαρτογράφησης ως μεταβλητές του ίδιου προβλήματος, και όχι ως δύο ανεξάρτητες διαδικασίες, αποτέλεσε έναυσμα για την παραγωγή πληθώρας αλγορίθμων, δεκτών και τεχνολογιών για την επίλυση των διαδικαστικών και υπολογιστικών προκλήσεων που μέχρι εκείνη την περίοδο φαίνονταν ανυπέρβλητες. Έκτοτε, οι σαρωτές SLAM γνώρισαν ραγδαία εξέλιξη και αναγνωρίστηκαν ως χρήσιμο εργαλείο εντός και εκτός των ορίων της επιστήμης της ρομποτικής.

Σήμερα, λαμβάνοντας υπόψιν τις σημαντικότερες ερευνητικές δημοσιεύσεις και τεχνολογικές υπερβάσεις στον τομέα των σαρωτών SLAM, η εξέλιξή τους χωρίζεται σε τρεις περιόδους-ορόσημα. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται τόσο οι χαρακτηριστικές χρονικές περίοδοι όσο και οι σημαντικότερες καινοτομίες της κάθε περιόδου.



Εικόνα 1.1 – Η εξέλιξη της τεχνολογίας SLAM (Xia et al., 2020)

Η πρώτη περίοδος ονομάστηκε κλασική και κατά τη διάρκεια αυτής δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην ανάπτυξη αλγορίθμων συσχέτισης των δεδομένων, που συλλέγονταν από τους σαρωτές σε κάθε περίπτωση. Η ενδυνάμωση της συσχέτισης αυτής και η αποδοτικότητα του συστήματος αποτέλεσαν τους βασικούς πυλώνες έρευνας και οδήγησαν σε διαφορετικές, αλλά εξίσου σημαντικές, προσεγγίσεις στις προκλήσεις της τεχνολογίας SLAM κατά την πρώτη εικοσαετία εξέλιξής της. Χαρακτηριστικά, αναφέρονται:

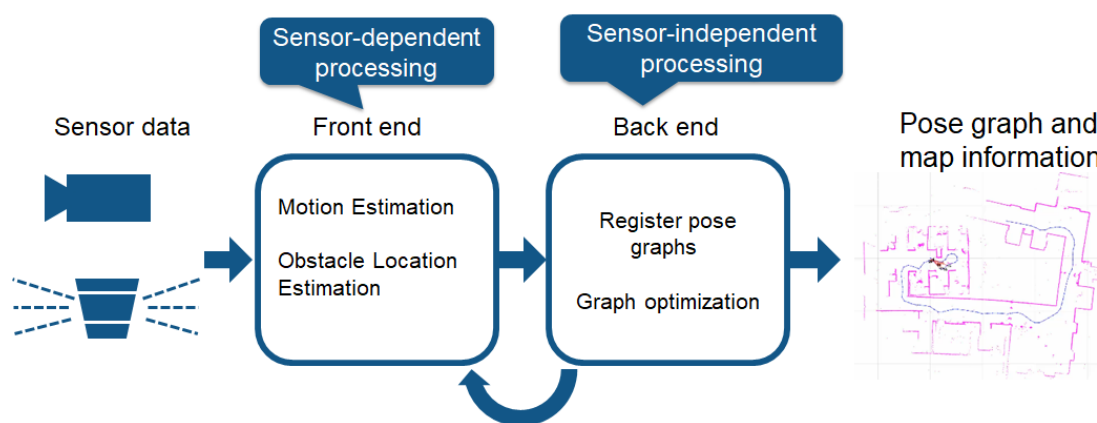
- το Extended Kalman Filter (EKF), του οποίου η επίλυση βασίζεται σε χαρακτηριστικά σημεία, μοντελοποιώντας την υπό μελέτη περιοχή ως ένα σύνολο από γεωμετρικά χαρακτηριστικά,
- η Μέθοδος Εκτίμησης Μέγιστης Πιθανοφάνειας – Maximum Likelihood Estimation (MLE), που καθορίζει τιμές για τις παραμέτρους ενός μοντέλου. Οι τιμές των παραμέτρων βρίσκονται έτσι ώστε να μεγιστοποιούν την πιθανότητα η διαδικασία που περιγράφεται από το μοντέλο να παράγει τα δεδομένα που πραγματικά παρατηρήθηκαν, και
- το Rao-Blackwellized Particle Filter (RBPF), το οποίο δειγματίζει μερικές από τις μεταβλητές και περιθωριοποιεί τις υπόλοιπες με σκοπό τη μείωση των υπολογισμών και τη μέγιστη αποδοτικότητα του μοντέλου.

Η επόμενη δεκαετία εξέλιξης της τεχνολογίας SLAM (2004-2015), χαρακτηρίστηκε από την ανάπτυξη αλγορίθμων με έμφαση σε ιδιότητες που θεωρήθηκαν θεμελιώδεις για τα επόμενα βήματα, όπως η παρατηρησιμότητα του σαρωτή, δηλαδή η δυνατότητα του να ανιχνεύει και να καταγράφει με λεπτομέρεια τα γεωμετρικά μοντέλα στο χώρο, η σύγκλιση των παραγόμενων μοντέλων και η συνέπεια στη συλλογή δεδομένων. Σε αυτό το χρονικό διάστημα, άρχισαν να δημοσιεύονται βιβλιοθήκες SLAM ανοιχτού κώδικα στα πλαίσια της συνέπειας στην εξέλιξη, αφού υπήρξε αισθητή έλλειψη νέων προτάσεων για τη λύση του προβλήματος. Από το 2015 έως και σήμερα, η τεχνολογία SLAM διανύει την περίοδο της «ισχυρής αντίληψης» (robust perception), κατά την οποία το ενδιαφέρον μεταβιβάζεται σε

έννοιες όπως η ισχυρή απόδοση, η υψηλού επιπέδου κατανόηση, η επίγνωση των διαθέσιμων πόρων και η αντίληψη όσον αφορά τις απαιτήσεις της εκτελούμενης εργασίας και της περιοχής μελέτης.

2. Περιγραφή της τεχνολογίας SLAM

Για καλύτερη κατανόηση, η περιγραφή της τεχνολογίας SLAM προσεγγίζεται, συχνά, σε δύο επιμέρους τμήματα, το «μπροστά» και το «πίσω» τμήμα του συστήματος. Το «μπροστά» τμήμα (front-end), αφορά και εξαρτάται από το εκάστοτε μέσο - αισθητήρα συλλογής δεδομένων, αλλά και τους αλγορίθμους ανίχνευσης χαρακτηριστικών σημείων και εκτίμησης της θέσης τους, ενώ το «πίσω» τμήμα (back-end), αφορά τους αλγορίθμους επεξεργασίας των συλλεγέντων δεδομένων και είναι ανεξάρτητο του αισθητήρα.



Εικόνα 2.1 – Ροή επεξεργασίας δεδομένων στα συστήματα SLAM (MathWorks, n.d.)

Αξίζει να σημειωθεί, ότι εκτός από τους βασικούς αισθητήρες και αλγορίθμους ανίχνευσης χαρακτηριστικών σημείων που συνοδεύουν το εκάστοτε σύστημα SLAM, είναι συχνή και η χρήση συμπληρωματικών ή και συνδυαστικών συστημάτων για τον εμπλουτισμό των δεδομένων και τη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων. Τα συστήματα αυτά κατατάσσονται στο πρώτο μέρος της παραπάνω τμηματοποίησης.

2.1. SLAM Front-end

Η δυνατότητα ορθής συλλογής πληροφοριών από το περιβάλλον είναι σημαντική και έτσι ανά τα χρόνια, έχει κατασκευαστεί, αναβαθμιστεί και τροποποιηθεί πληθώρα σαρωτών με διαφορετικά χαρακτηριστικά συστήματος. Οι διαφορές αυτές οφείλονται στο γεγονός, ότι κάθε είδος δέκτη έχει τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα, και η επιλογή ανάμεσα στα είδη αυτά, συνδέεται άμεσα με την επικείμενη χρήση και τον απώτερο σκοπό της εργασίας. Σε γενικότερες γραμμές, όμως, οι δέκτες που χρησιμοποιούνται σήμερα στα

συστήματα SLAM μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις βασικές κατηγορίες, με τη δυνατότητα συνδυασμού αυτών. Οι κατηγορίες αυτές παρουσιάζονται παρακάτω:

- Οπτικοί δέκτες (συστήματα μίας ή περισσότερων καμερών) – Visual SLAM (vSLAM)
- Δέκτες Laser – 2D/3D LiDAR SLAM (lSLAM)
- Δέκτες Sonar – SONAR SLAM (sSLAM)
- Δέκτες Radar – RADAR SLAM (rSLAM)

Όσον αφορά στους αλγορίθμους ανίχνευσης χαρακτηριστικών σημείων, αυτοί ποικίλλουν εξίσου και εξαρτώνται σημαντικά από το δέκτη-αισθητήρα. Παρόλα αυτά, στην πλειονότητά τους θέτουν τους εξής, κοινούς, περιορισμούς για την αξιοπιστία των χαρακτηριστικών σημείων:

- Πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα εντοπισμού εύλογου αριθμού σημείων
- Πρέπει τα σημεία να είναι ευδιάκριτα και διαχωρίσιμα μεταξύ τους
- Πρέπει τα σημεία να είναι σταθερά
- Πρέπει τα σημεία να επανεντοπίζονται με σχετική ευκολία

2.1.1 Οπτικοί δέκτες – Visual SLAM

Οι οπτικοί δέκτες είναι από τις πρώτες μεθόδους συλλογής δεδομένων που ενσωματώθηκαν στα συστήματα SLAM και, αναμφίβολα, η πιο διαδεδομένη. Αποτελεί, επίσης, την πιο προσιτή έκδοση της τεχνολογίας αυτής, καθώς ξεφεύγει από τα αυστηρά επαγγελματικά πλαίσια και μπορεί να προσαρμοστεί σε οποιαδήποτε φορητή συσκευή που διαθέτει μία ή περισσότερες κάμερες.

Οι οπτικοί δέκτες, είναι η μόνη κατηγορία δεκτών που δεν λαμβάνει μετρητική πληροφορία από το περιβάλλον, άρα η απόσταση μεταξύ του δέκτη και των σημείων του χώρου δεν αποτελεί μέρος των δεδομένων εισόδου. Για την ανακατασκευή της τρισδιάστατης δομής των αντικειμένων, η μέθοδος αυτή βασίζεται στο συνδυασμό αλγορίθμων όρασης υπολογιστών και φωτογραμμετρίας, κάνοντας χρήση των ιδιοτήτων της παραγόμενης εικόνας. Η μεθοδολογία που ακολουθείται αποτελείται από τρεις βασικές διαδικασίες:

- Την ανίχνευση χαρακτηριστικών σημείων (feature detection)
- Τη συνόρθωση δέσμης (BA) και
- Τη δομή από κίνηση (SfM) (Wang, 2018)

Αρχικά, ο αλγόριθμος εντοπίζει αντικείμενα του χώρου με διακριτή γεωμετρία τα οποία αποτελούν το γεωμετρικό τόπο των χαρακτηριστικών σημείων που καταχωρούνται. Ο τρόπος ανίχνευσης των σημείων αυτών εξαρτάται από το είδος αλγόριθμου που χρησιμοποιείται, αλλά μία βασική αρχή που ακολουθείται σε πληθώρα αλγορίθμων αναγνώρισης χαρακτηριστικών σημείων, είναι ο εντοπισμός απότομων μεταβολών στη φωτεινότητα γειτονικών εικονοστοιχείων. Κατά τη συνόρθωση δέσμης, ανοικοδομούνται οι ακτίνες φωτός μεταξύ της θέσης της κάμερας ή των καμερών και των σημείων του πραγματικού χώρου και τέλος, με τη μέθοδο της δομής από κίνηση, εντοπίζονται οι αντιστοιχίες των χαρακτηριστικών σημείων στα στερεοζεύγη που παράγονται από τις ακολουθίες εικόνων, με την προϋπόθεση ότι τα αντικείμενα στα οποία έχουν εντοπιστεί χαρακτηριστικά σημεία είναι απολύτως ακίνητα.

Η ευρεία χρήση των οπτικών δεκτών στα συστήματα SLAM έγκειται στα πλεονεκτήματα που διαθέτουν έναντι άλλων σαρωτών. Αφενός, η πυκνότητα της πληροφορίας που συλλέγεται από τον παθητικό δέκτη είναι αισθητά μεγαλύτερη σε σύγκριση με τους αντίστοιχους ενεργητικούς δέκτες, και αφετέρου η τιμή τους κυμαίνεται αρκετά χαμηλότερα από άλλου είδους δέκτες, κάνοντάς τους πιο προσιτούς. Στον αντίποδα, οι οπτικοί δέκτες επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τις διακυμάνσεις της φωτεινότητας, ενώ ο υπολογιστικός φόρτος για την εύρεση των χαρακτηριστικών σημείων και τη μοντελοποίηση είναι σημαντικού βαθμού και μπορεί να επηρεάσει χρονικά και κοστολογικά τη διαδικασία παραγωγής των προϊόντων.

2.1.2 Δέκτες Laser – LiDAR SLAM

Οι δέκτες laser, αναπτύχθηκαν για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1960 με σκοπό την ακριβή καταγραφή της γεωμετρικής πληροφορίας, μειώνοντας το χρόνο τόσο της αποτύπωσης όσο και της επεξεργασίας των δεδομένων. Σε αντίθεση με τους οπτικούς δέκτες, οι δέκτες laser αποτελούν ενεργητικούς δέκτες, εκπέμποντας παλμούς laser και λαμβάνοντας μετρητική πληροφορία για δεκάδες χιλιάδες σημεία το δευτερόλεπτο, από την οποία δημιουργούνται νέφη σημείων με μεγάλη λεπτομέρεια. Ανάλογα τον δέκτη και τις ανάγκες του χειριστή, η αποτύπωση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε δύο ή τρεις διαστάσεις, και αντίστοιχα υπάρχουν σαρωτές δισδιάστατης (2D LiDAR) και τρισδιάστατης (3D LiDAR) αποτύπωσης. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει το γεγονός, ότι ακόμα και με χρήση ενός περιστρεφόμενου 2D LiDAR σαρωτή ή με την εγκάρσια τοποθέτηση δύο 2D σαρωτών LiDAR, μπορεί να γίνει τρισδιάστατη αποτύπωση του περιβάλλοντος.

Με βάση την φέρουσα πλατφόρμα, οι σαρωτές μπορούν να χωριστούν σε επίγειους (Terrestrial LiDAR) ή αερομεταφερόμενους (Airborne LiDAR), αλλά εκείνοι που μπορούν να ενσωματωθούν σε συστήματα SLAM είναι, αποκλειστικά, οι κινητοί σαρωτές laser (Mobile LiDAR). Όσον αφορά στα συστήματα SLAM που κάνουν χρήση σαρωτών LiDAR, απαιτείται η ταυτόχρονη χρήση αδρανειακών συστημάτων (IMU) για την ανίχνευση αλλαγών τόσο στη διεύθυνση και στη γωνία παρατήρησης του συστήματος, όσο και στην ταχύτητα με την οποία κινείται το σύστημα, ώστε να πραγματοποιείται σωστά η αυτόματη συνένωση των νεφών σημείων και να υπολογίζεται επιτυχημένα η πορεία του σαρωτή.

Η διαδικασία που ακολουθείται για την καταγραφή σημείων χρησιμοποιώντας δέκτες laser, βασίζεται σε μία εκ των δύο βασικών αρχών:

- 1) Του παλμού (Pulse Method) και
- 2) Τη διαφορά φάσης (Phase Shift) (Zunino, Christensen, 2001)

Κατά τη χρήση της μεθόδου Pulse η οποία αναφέρεται και ως Time of Flight (ToF), μετράται ο χρόνος επιστροφής του εκπεμπόμενου παλμού στο δέκτη και, κατόπιν, υπολογίζεται η απόσταση δέκτη – σημείου, ενώ με τη χρήση της τεχνικής Phase Shift, μετράται η διαφορά φάσης μιας συνεχούς διαμορφωμένης ακτινοβολίας.

Τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης κατηγορίας δεκτών είναι πολλά και σημαντικά. Αρχικά, η μεγάλη ταχύτητα καταγραφής σημείων ισοδυναμεί με σχεδόν στιγμιαίες μετρήσεις, για τις οποίες, σε πολλές περιπτώσεις, υπάρχει δυνατότητα επί τόπου παρατήρησης, κάνοντάς τους ιδανικούς για ενσωμάτωση σε κινούμενα συστήματα. Επιπλέον, το γεγονός ότι το σύστημα λαμβάνει απευθείας μετρητική πληροφορία μειώνει σημαντικά το υπολογιστικό κόστος και

τέλος, παράγουν αποτελέσματα μεγάλης ακρίβειας, η οποία είναι ανεξάρτητη από το βαθμό φωτεινότητας του περιβάλλοντος. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται συχνά σε εσωτερικούς χώρους ανεξάρτητα από τον φωτισμό.

Στα αρνητικά των δεκτών laser, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η ακρίβεια μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά, όταν την απόσταση μεταξύ σαρωτή και αντικειμένου είναι μεγάλη, λόγω γωνιακού σφάλματος. Μεγάλα σφάλματα δημιουργούνται, επίσης, εξαιτίας μετρήσεων που γίνονται έναντι επιφανειών με υψηλής ανακλαστικότητας ή διαφάνειας υλικά, λόγω διάθλασης της ακτίνας laser. Τέλος, ένα λιγότερο τεχνικό, αλλά εξίσου σημαντικό μειονέκτημα, είναι το υψηλό κόστος των συγκεκριμένων σαρωτών.

2.1.3 Δέκτες Sonar – SONAR SLAM

Οι δέκτες sonar είναι ακουστικοί δέκτες, χρησιμοποιούν, δηλαδή, ακουστικά κύματα για την ανίχνευση σημείων. Οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό, κυμαίνονται από πολύ υψηλές (υπερήχων) έως πολύ χαμηλές (υποήχων). Οι χρήσεις τους ποικίλουν αλλά επιλέγονται, κυρίως, για υποβρύχιες αποτυπώσεις λόγω της αποδοτικότητας των μηχανικών κυμάτων σε τέτοιου είδους περιβάλλοντα, σε αντίθεση με δέκτες που χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Οι τελευταίοι περιορίζονται στα έως και 10 μέτρα βάθος, ανάλογα με την καθαρότητα των υδάτων, ενώ οι δέκτες sonar φτάνουν μέχρι και τα 150 μέτρα με την αποδοτικότητά τους να είναι ανεξάρτητη από την καθαρότητα του νερού. Πολλές φορές, όμως, και ανάλογα με το βαθμό δυσκολίας αποτύπωσης του υποβρύχιου περιβάλλοντος, οι δέκτες sonar συνδυάζονται με οπτικούς δέκτες.

Όσον αφορά τόσο στις επίγειες όσο και στις υποβρύχιες αποτυπώσεις, οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται δεν βασίζονται στην αναγνώριση χαρακτηριστικών σημείων αλλά στην βέλτιστη ταύτιση των επιμέρους χαρτών που δημιουργούνται. Συχνότερα, χρησιμοποιείται η τεχνική των Χαρτών Πλέγματος Αποδείξεων/Πιθανοτήτων (Evidence Grid Maps). Η προσέγγιση EGM περιγράφει το περιβάλλον του σαρωτή με ένα δισδιάστατο ή τρισδιάστατο κανονικό πλέγμα. Σε κάθε κελί του πλέγματος αποθηκεύεται η απόδειξη, ή η πιθανότητα, ότι το συγκεκριμένο τμήμα του χώρου είναι κατειλημμένο. Η πιθανότητα αυτή υπολογίζεται με βάση τις συσσωρευμένες μετρήσεις του αισθητήρα και επηρεάζεται από την απόσταση του αισθητήρα από το πλησιέστερο αντικείμενο σε μια δεδομένη κατεύθυνση. Οι πιθανότητες τα κελιά κοντά στο υποδεικνυόμενο αντικείμενο να είναι κατειλημμένα είναι αυξημένες, ενώ μειώνονται για τα κελιά μεταξύ του αντικειμένου και του αισθητήρα, καθώς είναι το πρώτο ανιχνεύσιμο αντικείμενο προς αυτή την κατεύθυνση (Martin, Moravec, 1966)

Τα πλέγματα που δημιουργούνται με την τεχνική αυτή είναι ανθεκτικά στο θόρυβο και τις διακυμάνσεις της πυκνότητας των σημείων, μπορούν να ενσωματώσουν έναν απροσδιόριστο αριθμό περιοχών και να διαχωρίζουν ξεκάθαρα τον κενό καθώς και τον κατειλημμένο χώρο, παρόλα αυτά τα δεδομένα που παράγονται από τα τρισδιάστατα πλέγματα μπορεί να είναι εξαιρετικά ογκώδη (Fairfield et al., 2007).

Οι δέκτες sonar είναι αρκετά προσιτοί και πολύ αποδοτικοί όσον αφορά εργασίες σε απαιτητικά περιβάλλοντα, όπως τα υποβρύχια. Όπως και οι δέκτες laser είναι ικανοποιητικά ακριβείς, εντός ορισμένων ορίων απόστασης από το στόχο, και δεν εξαρτώνται από τη φωτεινότητα. Παρόλα αυτά, η χρήση και η επεξεργασία των παραγώγων τους απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, καθώς

- ο ίδιος παλμός μπορεί να ανακλαστεί πολλές φορές από διαφορετικά αντικείμενα και να προκαλέσει σύγχυση στη σύνταξη του χάρτη,
- η απόσταση των αντικειμένων από το δέκτη συχνά υπερεκτιμάται λόγω χαμηλής ισχύος του σήματος,
- η ταχύτητα διάδοσης των ηχητικών παλμών περιορίζει την ταχύτητα μέτρησης, σε αντίθεση με τους δέκτες laser, και τέλος
- η κακή γωνιακή ανάλυση μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα του τελικού χάρτη.

2.1.4 Δέκτες Radar – RADAR SLAM

Οι δέκτες radar αποτελούν, επίσης, ενεργητικούς δέκτες εκπέμποντας κύματα ραδιοσυχνοτήτων, ή μικροκυμάτων, και ανιχνεύοντας το μέρος αυτών που ανακλάται από τα αντικείμενα του περιβάλλοντος. Δημιουργούν, έτσι, καταγραφές έντασης της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας, ως τελικά παράγωγα. Διαθέτουν μεγάλη ποικιλία εφαρμογών, όπως στα συστήματα εναέριας και ναυτικής πλοήγησης, στην ανίχνευση έκτακτων καιρικών συνθηκών στην ατμόσφαιρα, όπως τυφώνες, ανεμοστρόβιλοι και ορισμένες διανομές αερίου, στις εφαρμογές γεωλογίας με radar διεϊσδυσης για τη χαρτογράφηση του εσωτερικού της γης και σε εφαρμογές αστρονομίας για τον καθορισμό της επιφάνειας και της γεωμετρίας κοντινών αστρονομικών αντικειμένων.

Όσον αφορά στην ενσωμάτωση δεκτών radar σε συστήματα SLAM, χρησιμοποιείται συμπληρωματικά, όπως και με τους δέκτες LiDAR, μονάδα αδρανειακών μετρήσεων IMU για τον εντοπισμό του συστήματος, την ανίχνευση κίνησής του στον τρισδιάστατο χώρο και την καταγραφή της πορείας του.

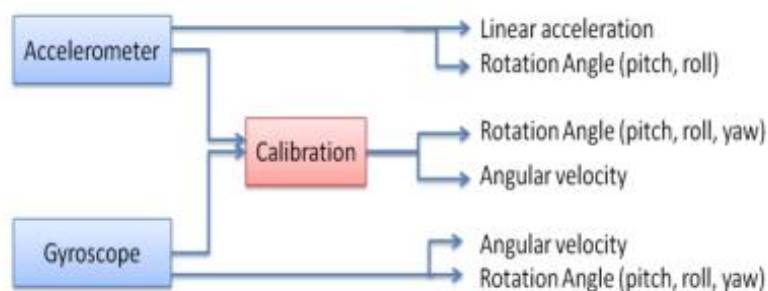
Για τον υπολογισμό του μεγέθους της απόστασης μεταξύ δέκτη και αντικειμένου και δεδομένου ότι τα αντικείμενα του χώρου θεωρούνται ακίνητα, χρησιμοποιείται και πάλι η μέθοδος Pulse, ενώ μπορεί να προσδιοριστεί και το υψόμετρο των αντικειμένων μετρώντας τη γωνία των ανακλώμενων κυμάτων. Αντιθέτως, αν ο δέκτης χρησιμοποιείται για την ανίχνευση κινούμενων αντικειμένων, η χρήση του Doppler Effect είναι προτιμότερη, καθώς ανάμεσα στις μεταβλητές που υπολογίζονται από τον αλγόριθμο είναι και η ταχύτητα του αντικειμένου (Hong et al., 2022). Τέλος, τα αντικείμενα ενδιαφέροντος και τα χαρακτηριστικά σημεία στις παραγόμενες καταγραφές εντοπίζονται με μεθόδους όρασης υπολογιστών.

Το κύριο πλεονέκτημα των δεκτών radar επί των άλλων κατηγοριών είναι η δυνατότητα χρήσης τους ανεξαρτήτως καιρού ή φωτεινότητας, καθώς τα ραδιοκύματα διαπερνούν τα σωματίδια της ατμόσφαιρας. Κάνοντας τα ιδανικά για εργασίες υπό φαινόμενα ομίχλης, συννεφιάς ακόμα και βροχής. Επιπλέον, οι δέκτες radar έχουν μεγαλύτερο εύρος από τους υπόλοιπους δέκτες, καθιστώντας τους ανταγωνιστική επιλογή σε δυσπρόσιτες περιοχές ή σε εναέριες λήψεις. Στον αντίποδα, όμως, οι παραγόμενες καταγραφές είναι χαμηλότερης ποιότητας σε σύγκριση με τις παραγόμενες εικόνες των οπτικών δεκτών, τόσο ώστε μικρού μεγέθους αντικείμενα να είναι δυσδιάκριτα και κατ' επέκταση δύσκολο να οριστεί η ακριβής τους απόσταση από το δέκτη. Τέλος οι συχνότητες με τις οποίες λειτουργεί ένας δέκτης radar τον καθιστούν πολύ ευαίσθητο όσον αφορά στην αντανάκλαση του σήματος και έτσι αναπόφευκτα παράγεται ανεπιθύμητος «θόρυβος» στις τελικές καταγραφές.

2.1.5. Μονάδα Αδρανειακών Μετρήσεων – IMU

Οι μονάδες αδρανειακών μετρήσεων έκαναν την εμφάνισή τους το 1930 σε εφαρμογές πλοήγησης αεροσκαφών. Σήμερα, χρησιμοποιούνται ευρέως σε τομείς όπως η πλοήγηση, η βιομηχανία και η ρομποτική, ενώ αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της πλειονότητας των συστημάτων SLAM ως συμπληρωματικά δεδομένα για τον υπολογισμό της θέσης του σαρωτή.

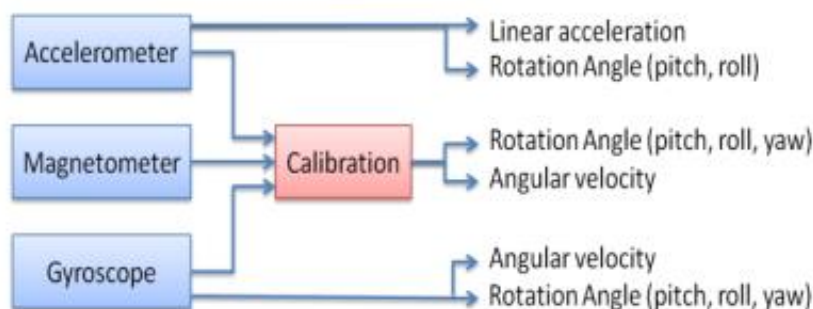
Τα IMU είναι υπεύθυνα για τη μέτρηση της ταχύτητας και του προσανατολισμού του συστήματος. Αρχικά, η μονάδα αποτελείτο από δύο ειδών αισθητήρες, τα επιταχυνσιόμετρα, τα οποία χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της αδρανειακής επιτάχυνσης και τα γυροσκόπια, που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των γωνιακών περιστροφών. Οι τιμές της επιτάχυνσης από το επιταχυνσιόμετρο και οι τιμές της γωνιακής ταχύτητας από το γυροσκόπιο αποθηκεύονται ξεχωριστά, παρόλα αυτά οι γωνίες μπορούν να μετρηθούν και από τους δύο αισθητήρες, επομένως και μπορούν να βαθμονομηθούν αμφότερα για πιο ακριβή δεδομένα εξόδου.



Εικόνα 2.2 – IMU με δύο ειδών αισθητήρες (Ahmad et al., 2013)

Ο κάθε αισθητήρας έχει δύο με τρεις βαθμούς ελευθερίας για τους άξονες x, y και z αντίστοιχα, οπότε συνολικά το σύστημα έχει τέσσερις με έξι.

Η εξέλιξη των IMU ήρθε μερικά χρόνια μετά με την προσθήκη ενός ακόμα αισθητήρα στο σύστημα, του μαγνητόμετρου. Το μαγνητόμετρο προστέθηκε με σκοπό τη βελτίωση των αναγνώσεων του γυροσκοπίου, αυξάνοντας τους συνολικούς βαθμούς ελευθερίας σε εννιά.



Εικόνα 2.3 – IMU με τριών ειδών αισθητήρες (Ahmad et al., 2013)

Παρόλο που το μαγνητόμετρο βελτιώνει την ποιότητα των δεδομένων εξόδου, υπάρχει ένα σημαντικό μειονέκτημα. Εάν το IMU χρησιμοποιείται σε περιβάλλον που περιβάλλεται από σιδηρομαγνητικό μέταλλο, οι μετρήσεις ενδέχεται να επηρεαστούν λόγω διαταραχών στο μαγνητικό πεδίο.

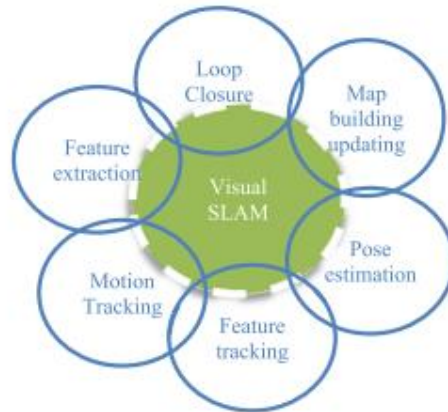
2.2. SLAM Back-end

Το back-end τμήμα ενός συστήματος SLAM αφορά στους αλγόριθμους επεξεργασίας των δεδομένων που συλλέγονται από τον εκάστοτε αισθητήρα, τα δεδομένα πλοήγησης του συστήματος στο χώρο και την εξάλειψη των σφαλμάτων που παράγονται με τις μετρήσεις. Ως αρχή, το back – end είναι ανεξάρτητο του front – end τμήματος, αλλά στην πραγματικότητα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δέκτη και ο τρόπος συλλογής των δεδομένων από τον αισθητήρα λαμβάνονται υπόψιν ώστε να επιλεγεί ο κατάλληλος αλγόριθμος για τη βέλτιστη επεξεργασία διαφορετικών τύπων δεδομένων. Αυτό συμβαίνει γιατί μετά τη μαζική παραγωγή αλγόριθμων για την επίλυση του προβλήματος SLAM στα αρχικά στάδια ανάπτυξής του, το front-end τμήμα εξελίχθηκε με προηγμένους αισθητήρες και προσθήκη συμπληρωματικών συστημάτων για την καλύτερη ποιότητα των δεδομένων. Αναπόφευκτα, οι αλγόριθμοι εξειδικεύτηκαν ώστε να αντιμετωπίζουν τις διαφορετικές προκλήσεις που επέρχονταν με τη χρήση κάθε είδους αισθητήρα. Παρακάτω, αναλύονται οι επικρατέστεροι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για την επίλυση κάθε συστήματος με βάση το front-end, και τα συμπληρωματικά συστήματα του back-end που αποσκοπούν στα βέλτιστα αποτελέσματα.

2.2.1. Φίλτρο EKF – Visual SLAM

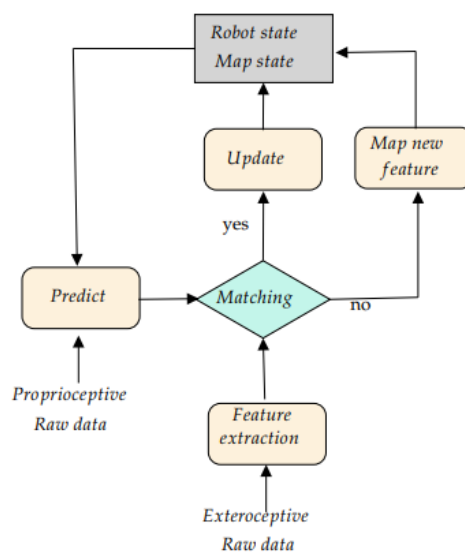
Το φίλτρο Kalman είναι ο συχνότερα χρησιμοποιούμενος τρόπος επεξεργασίας δεδομένων οπτικών δεκτών παγκοσμίως. Εναλλακτικά, αναφέρεται ως γραμμικός τετραγωνικός εκτιμητής και βασίζεται στα χαρακτηριστικά σημεία που έχουν εντοπιστεί, για τη μοντελοποίηση της περιοχής ως ένα ευρύτερο σύνολο από γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

Μέσα σε ένα χρονικό πλαίσιο, ο αλγόριθμος κάνει χρήση μιας σειράς φυσικών χαρακτηριστικών του περιβάλλοντος που μπορούν να παρατηρηθούν αξιόπιστα σε διαδοχικές μετρήσεις του αισθητήρα και μπορούν να περιγραφούν με ακρίβεια. Οι μετρήσεις αυτές, συνοδεύονται από στατιστικές αβεβαιότητες, όπως ο «θόρυβος», και με κάθε μέτρηση που προστίθεται, το μοντέλο βελτιστοποιείται. Η επεξεργασία των δεδομένων εισόδου γίνεται με τη μορφή πινάκων και διανυσμάτων, με μεταβλητές που αφορούν τόσο στα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος, ως γεωμετρικές οντότητες, όσο και στη θέση της κινητής μονάδας στον τρισδιάστατο χώρο. Τα μοντέλα που δημιουργούνται στα χρονικά αυτά «παράθυρα» είναι μέρη μιας επαναλαμβανόμενης διαδικασίας που, συνήθως, ολοκληρώνεται με την επαναφορά του συστήματος στην αρχική θέση καταγραφής (loop closure). Όταν το σύστημα επισκεφτεί για δεύτερη φορά την αρχική θέση καταγραφής, διορθώνεται η ολίσθηση (drift) της τροχιάς και τα αντίστοιχα σφάλματα, τα οποία είναι σωρευτικά.



Εικόνα 2.4 – Στοιχεία vSLAM (Taheri, Zhao, 2021)

Το φίλτρο Kalman μετρά πλέον πολλές εκδοχές και παραλλαγές. Μια από τις πιο πρόσφατες και ίσως η επικρατέστερη, όσον αφορά στα συστήματα vSLAM, είναι το Extended Kalman Filter, μια μη γραμμική έκδοση του φίλτρου Kalman που βρίσκει επιπλέον χρήσεις σε συστήματα πλοήγησης και δορυφορικά συστήματα. Χρησιμοποιώντας, πρακτικά, ένα πιθανολογικό μοντέλο μειώνει τις αβεβαιότητες και εγγυάται τη σύγκλιση και τη συνέπεια του χάρτη. Ωστόσο, είναι πολύ ευαίσθητο σε σφάλματα συσχέτισης δεδομένων και η μόνιμη ενημέρωση όλων των χαρακτηριστικών σημείων και του πίνακα συμμεταβλητότητάς τους απαιτεί μεγάλη υπολογιστική δύναμη. Οι state-of-the-art προσεγγίσεις που επιλύουν αυτό το πρόβλημα, χάρη σε τεχνικές βελτιστοποίησης, είναι η τεχνική της Συνόρθωσης Δέσμης (BA), κατά την οποία εκτιμώνται οι 6 βαθμοί ελευθερίας της τροχιάς του αισθητήρα στον χώρο και παράγεται το τρισδιάστατο νέφος σημείων με ίχνη από τα χαρακτηριστικά σημεία (Bustos et al., 2019), και τα Νευρωνικά Δίκτυα (Neural Networks) που «εκπαιδεύουν» τον αλγόριθμο να προβλέπει τη θέση και τον προσανατολισμό του αισθητήρα, πάλι κάνοντας χρήση χαρακτηριστικών σημείων, αυτοματοποιώντας, έτσι, τη διαδικασία και μειώνοντας τον υπολογιστικό φόρτο (Tateno et al., 2017, O'Mahony et al., 2018)

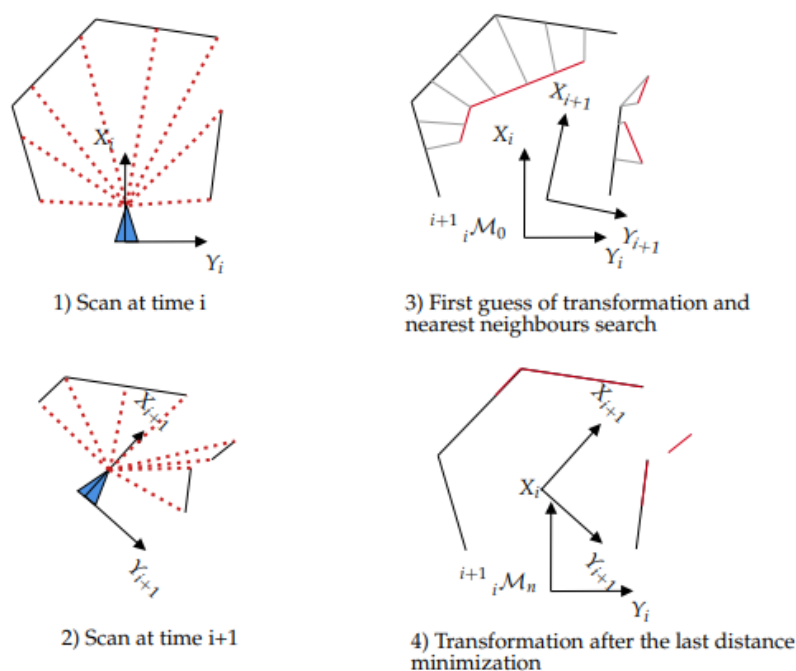


Εικόνα 2.5 – Δομή φίλτρου EKF (Debeunne, Vivet, 2020)

2.2.2. Αλγόριθμος ICP – LiDAR SLAM

Ο αλγόριθμος του Επαναληπτικά Κοντινότερου Σημείου – Iterative Closest Point αποτελεί τη νόρμα για την καταγραφή και συνένωση τρισδιάστατων νεφών σημείων και ως εκ τούτου χρησιμοποιείται εκτεταμένα στα συστήματα LiDAR SLAM.

Αποτελεί μία επαναληπτική σημειακή προσέγγιση που ασχολείται με τα ανεπεξέργαστα νέφη σημείων, αναζητώντας και συσχετίζοντας αντίστοιχα σημεία από δύο επικαλυπτόμενες τρισδιάστατες σαρώσεις. Ο αλγόριθμος συγκλίνει πάντα μονότονα προς το πλησιέστερο τοπικό ελάχιστο μιας μέσης τετραγωνικής απόστασης μεταξύ των σημείων από δύο διαδοχικές σαρώσεις και ο ρυθμός σύγκλισης είναι ιδιαίτερα γρήγορος κατά τη διάρκεια των πρώτων επαναλήψεων (Besl, McKay, 1992). Σε κάθε επανάληψη, τα πλησιέστερα σημεία που αντιστοιχούν, εξάγονται μεταξύ των δύο σαρώσεων και, όταν ολοκληρωθούν οι αντιστοιχίσεις μεταξύ των δύο νεφών, η δεύτερη, κάθε φορά, σάρωση μετασχηματίζεται με βάση την πρώτη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.6. Ο αλγόριθμος, και σε αυτή την περίπτωση, λειτουργεί ακριβέστερα με επαναφορά στο αρχικό σημείο καταγραφής (loop closure), καθώς το σφάλμα διαμοιράζεται εξίσου σε κάθε μέτρηση και διορθώνεται η τροχιά του σαρωτή.



Εικόνα 2.6 – Αλγόριθμος ICP (Debeunne, Vivet, 2020)

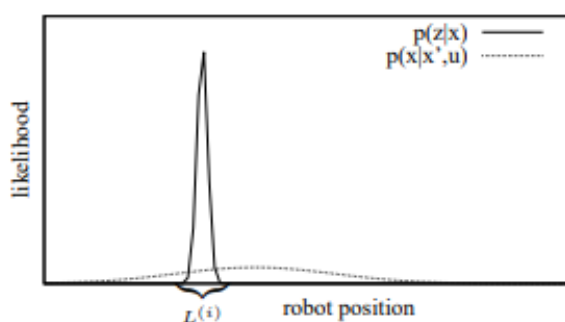
Ως μια τοπική μέθοδος ελαχιστοποίησης, ο αλγόριθμος ICP παρουσιάζει μειονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένης της εξάρτησής του από μια επαρκή αμοιβαία επικάλυψη και αρχική ευθυγράμμιση των δύο σαρώσεων που πρέπει να αντιστοιχιστούν. Επιπλέον, είναι απαραίτητο να υπάρχουν τουλάχιστον τρία ομόλογα σημεία για να πραγματοποιηθεί συνένωση των νεφών, και αφού η ταύτιση των ίδιων σημείων σε κάθε επανάληψη είναι απίθανη, ελέγχει επαναληπτικά την απόσταση μεταξύ όλων των σημείων των νεφών έως ότου εντοπιστεί ο μετασχηματισμός με το μικρότερο δυνατό σφάλμα. Μια εναλλακτική state-of-the-art προσέγγιση, με λιγότερη απαίτηση σε υπολογιστική δύναμη, είναι η μέθοδος Polar Scan Matching που λειτουργεί στο σύστημα πολικών συντεταγμένων του σαρωτή laser, αντί

του καρτεσιανού, και εκτιμά τις αντιστοιχίες των σημείων του νέφους εκμεταλλευόμενη τις δομές σε αυτό. Βάσει της μεθόδου PSM, αποφεύγεται η αναζήτηση αντιστοιχιών αποκλειστικά με βάση τις αποστάσεις των σημείων, η θέση εκτιμάται με εφαρμογή γραμμικής παλινδρόμησης που μετασχηματίζει τα σημεία σάρωσης στο πλαίσιο πολικών συντεταγμένων της σάρωσης αναφοράς και ο προσανατολισμός του νέφους προσδιορίζεται από μετατόπιση της τελευταίας σάρωσης προς τα αριστερά και προς τα δεξιά, μέχρι να βρεθεί η καλύτερη δυνατή αντιστοιχία με τη σάρωση αναφοράς (Diosi, Kleeman, 2007).

2.2.3. Φίλτρο Σωματιδίων Rao-Blackwellized – SONAR SLAM

Οι δέκτες sonar έχουν ως παράγωγα νέφη σημείων και παρόλο που η επίλυση του συστήματος θα μπορούσε να γίνει με τεχνικές αντιστοίχισης σημείων η χαρακτηριστικών γεωμετρικών δομών, τα απαιτητικά περιβάλλοντα στα οποία χρησιμοποιούνται οι δέκτες της κατηγορίας αυτής αποκλείουν οποιαδήποτε επιτυχημένη εφαρμογή τους. Αντ' αυτού χρησιμοποιείται το φίλτρο σωματιδίων Rao – Blackwellized – Rao Blackwellized Particle Filter που έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι μειώνει τα σφάλματα τόσο στην δημιουργία του χάρτη, όσο και στον υπολογισμό της τροχιάς του ρομπότ (Grisetti et al., 2007).

Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιεί ένα σωματιδιακό φίλτρο σύμφωνα με το οποίο κάθε σωματίδιο φέρει έναν ξεχωριστό χάρτη του περιβάλλοντος και αντιστοιχεί σε μία δυναμική τροχιά του ρομπότ. Οι μεμονωμένοι χάρτες συνδέονται με κάθε παρατήρηση και μετά από έναν αριθμό αρχικών παρατηρήσεων, ο αλγόριθμος υπολογίζει στατιστικά μοντέλα για τις μελλοντικές δυναμικές τροχιές του ρομπότ. Αυτή η εκτίμηση εκτελείται με δεδομένες τόσο τις παρατηρήσεις του αισθητήρα σόναρ, όσο και τις μετρήσεις οδομετρίας που λαμβάνονται από το ρομπότ.



Εικόνα 2.7 – Υπολογισμός δυναμικής τροχιάς με το RBPF (Grisetti et al., 2007)

Επομένως, δημιουργούνται χάρτες χρησιμοποιώντας την παρατήρηση και το αντίστοιχο σωματίδιο που σχετίζεται με την τροχιά. Το βάρος που δίνεται σε κάθε σωματίδιο και τον χάρτη που φέρει για τη σύνδεση του με το υπόλοιπο δείγμα, εξαρτάται από το ποσοστό ταύτισης της τροχιάς που ανήκει με την τροχιά που προέβλεψε στατιστικά ο αλγόριθμος. Αν η απόκλιση είναι μεγάλη, το σωματίδιο και ο χάρτης του απορρίπτονται και ο αλγόριθμος συνεχίζει με τις επόμενες μετρήσεις. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται συνεχώς και τα δεδομένα ενημερώνονται μετά από κάθε επανάληψη. Η προσέγγιση RBPF έχει επιδειχθεί

παραλλαγές και βελτιώσεις ανά τα χρόνια, τροποποιώντας τις στατιστικές κατανομές που χρησιμοποιούνταν ανάλογα με τον αισθητήρα, το περιβάλλον και τα συνδυαστικά συστήματα που έφερε το ρομπότ για τον υπολογισμό της τροχιάς του.

2.2.4. Μετασχηματισμός Fourier-Mellin – RADAR SLAM

Μία από τις πλέον αξιοποιήσιμες μεθόδους για την επίλυση του συστήματος RADAR SLAM είναι ο μετασχηματισμός Fourier-Mellin. Η μέθοδος FMT λαμβάνει υπόψη τις συνεισφορές από όλα τα σημεία των εικόνων, και αποφεύγει το πρόβλημα συσχέτισης δεδομένων αποθηκεύοντας έναν λεπτομερή χάρτη αντί για αραιά χαρακτηριστικά σημεία, κάνοντάς την ιδανική μέθοδο για εξωτερικούς χώρους με ελλιπή σημεία – ορόσημα. Η μέθοδος αποδεικνύεται πιο αποτελεσματική σε σχέση με μεθόδους επίλυσης βασισμένες σε χαρακτηριστικά σημεία, καθώς η παραγωγή εικόνων από αισθητήρες ραντάρ συνεπάγεται αυξημένα επίπεδα θορύβου και δυσδιάκριτες γεωμετρικές δομές, πράγμα που ευνοεί την εμφάνιση χονδροειδών σφαλμάτων στην αναγνώριση επαναλαμβανόμενων χαρακτηριστικών σημείων και κατ' επέκταση στην επίλυση του συστήματος.

Γενικότερα, τα σχήματα που βασίζονται στον μετασχηματισμό Fourier είναι σε θέση να εκτιμήσουν μεγάλες περιστροφές και μετατοπίσεις. Η βασική αρχή του FMT στο πλαίσιο της τεχνολογίας SLAM είναι η καταχώρηση εικόνων ραντάρ σε μια ακολουθία, από την οποία μπορεί να εκτιμηθούν οι μετατοπίσεις και οι στροφές του αισθητήρα στον τρισδιάστατο χώρο. Για την αντιστοίχιση δύο διαδοχικών σαρώσεων που μετατοπίζονται και περιστρέφονται μεταξύ τους, αρχικά εφαρμόζονται φίλτρα για την εξάλειψη του θορύβου, οι ορθογώνιες συντεταγμένες μετασχηματίζονται σε πολικές και τέλος χρησιμοποιείται η μέθοδος συσχέτισης φάσης, βάση την οποία οι μετατοπίσεις στα συστήματα συντεταγμένων δύο σαρώσεων μετατρέπεται σε γραμμική διαφορά φάσης των σημάτων τους (Cecchin et al., 2009). Η τεχνική λειτουργεί πιο αποτελεσματικά με επιστροφή στο αρχικό σημείο καταγραφής (loop closure) και μπορεί να συνδυαστεί τόσο με το φίλτρο EKF όσο και με τη μέθοδο ICP αφού προηγηθεί η μετατροπή των δεδομένων σε νέφος σημείων.

3. Έλεγχος σαρωτών

Κατά την εκτίμηση της ποιότητας ενός συστήματος, οι κατασκευαστές καθορίζουν έναν αριθμό μετρητικών παραμέτρων βάσει των οποίων γίνεται η αξιολόγηση. Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες είναι η ακρίβεια και η ορθότητα. Η ακρίβεια μέτρησης καθολικά ορίζεται ως ο βαθμός συμμόρφωσης μιας μετρούμενης ποσότητας προς την πραγματική της τιμή (τιμή αναφοράς) και η ορθότητα μέτρησης ως ο βαθμός στον οποίο δείχνουν οι περαιτέρω μετρήσεις το ίδιο αποτέλεσμα.

Σαφώς, κατά την αξιολόγηση της ακρίβειας, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα δευτερεύον σύστημα μέτρησης για την παροχή της τιμής αναφοράς και αυτό το σύστημα πρέπει να είναι μεγαλύτερης ακρίβειας από το υπό δοκιμή σύστημα. Η ακρίβεια αναλύεται περαιτέρω σε τοπική και παγκόσμια. Όσον αφορά στους σαρωτές laser, η τοπική ακρίβεια σχετίζεται με την απόσταση μεταξύ δύο σημείων του νέφους τα οποία μπορούν να μετρηθούν από μία θέση

παρατήρησης, ενώ η παγκόσμια ακρίβεια σχετίζεται με την απόσταση μεταξύ δύο σημείων στο νέφος τα οποία δεν μπορούν να μετρηθούν από μία, μόνο, θέση παρατήρησης.

Για την αξιολόγηση διαφορετικών ειδών σαρωτών laser, έχουν καθιερωθεί διαφορετικές μεθοδολογίες διακρίβωσης του συστήματος τους, τόσο εντός εργαστηριακού περιβάλλοντος όσο και στο πεδίο. Μία αρκετά διαδεδομένη διαδικασία ελέγχου σαρωτών, που αφορά στον έλεγχο εντός εργαστηριακού περιβάλλοντος, είναι η χρήση βάσεων ελέγχου ή βάσεων διακρίβωσης των οργάνων. Η μεθοδολογία αυτή εντάσσεται στις μεθόδους αντιστοίχισης σημείων (point-to-point), σύμφωνα με τους Boehler et al. (Boehler et al., 2003), και έχει χρησιμοποιηθεί τόσο από πανεπιστημιακά ιδρύματα, όπως το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (Τσακίρη et al., 2005), όσο και από ιδιωτικές εταιρίες που δραστηριοποιούνται στον τομέα των σαρωτών laser, όπως η Metrica A.E. (Metrica, n.d.). Με βάση τη μεθοδολογία αυτή, υπάρχουν σταθερά τοποθετημένες βάσεις σε προκαθορισμένες αποστάσεις και γωνίες εντός του εργαστηρίου, και οι μετρήσεις του σαρωτή γίνονται με τοποθέτηση ειδικού ανακλαστήρα-στόχου σε κάθε μία από αυτές. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία σάρωσης, η αξιολόγηση γίνεται υπολογίζοντας την τυπική απόκλιση μεταξύ των συλλεχθέντων δεδομένων από τον σαρωτή και των τιμών του εκάστοτε βάρους, που έχουν υπολογιστεί εκ των προτέρων από διακριβωμένα όργανα όπως γεωδαιτικούς σταθμούς (TPS).

Για την αξιολόγηση της διακριτικής ικανότητας ενός επίγειου σαρωτή laser σε εξωτερικό περιβάλλον, ακολουθείται, συχνά, παρόμοια διαδικασία με την τοποθέτηση σταθερών στόχων σε προκαθορισμένες αποστάσεις στο πεδίο και τον υπολογισμό των συντεταγμένων των κέντρων τους, με βάση το νέφος που σχηματίζεται. Η διαφορά από τις εργαστηριακές μετρήσεις, και ο λόγος που ενθαρρύνεται ο έλεγχος των σαρωτών τόσο σε εσωτερικό όσο και σε εξωτερικό περιβάλλον, έγκειται στις διαφορετικές συνθήκες που αντιμετωπίζει ο σαρωτής, όπως οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και η υγρασία.

Μία εναλλακτική μέθοδος αξιολόγησης ενός σαρωτή laser, που έχει μελετηθεί εκτεταμένα από τους Kersten et al. (Kersten et al., 2009), είναι η χρήση ενός ή περισσότερων σαρωτών μεγαλύτερης ακρίβειας, όπως ενός μετρητή απόστασης laser (LDM), ενός γεωδαιτικού σταθμού (TPS) ή ενός επίγειου σαρωτή laser (TLS). Τα αποτελέσματα των παραπάνω συστημάτων θεωρούνται η βάση σύγκρισης για τα αποτελέσματα του ελεγχόμενου σαρωτή. Η διαφορά της μεθόδου με αντίστοιχες point-to-point μεθόδους είναι ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση, δεν απαιτείται η ύπαρξη προκαθορισμένων στόχων σε δεδομένες αποστάσεις, καθώς οι συγκρίσεις γίνονται σε όλο το εύρος του νέφους, αλλά για τον ίδιο λόγο απαιτείται κοινή περιοχή σάρωσης.

Στην περίπτωση του ZEB HORIZON, η αξιολόγηση της ακρίβειας του συστήματος, και ειδικότερα της παγκόσμιας ακρίβειας, έγινε με τη διεξαγωγή σύγκρισης του νέφους σημείων του με το νέφος ενός TLS, υπολογιστικά, τονίζοντας τις αποκλίσεις σε ολόκληρο το εύρος του νέφους αναφοράς. Ενώ καταβάλλεται σημαντική προσπάθεια για να διασφαλιστεί ότι το περιβάλλον παραμένει αμετάβλητο μεταξύ των σαρώσεων σε τέτοιου είδους διαδικασίες ελέγχου, στην περίπτωση ελέγχου του ZEB HORIZON συμπεριλαμβάνονται αποκλίσεις έως και 50mm στην ανάλυση, ενώ δεδομένα πάνω από αυτό το όριο θεωρήθηκαν ως ακραία και δεν χρησιμοποιήθηκαν.

Για την αξιολόγηση της τοπικής και παγκόσμιας ακρίβειας του ZEB HORIZON, οι πειραματικές σαρώσεις πραγματοποιήθηκαν σε μια τυπική βρετανική κατοικία, στην οποία τοποθετήθηκαν πλακέτες ελέγχου LiDAR σε 8 διακριτές θέσεις διάσπαρτα στο σπίτι. Οι

πλακέτες τοποθετήθηκαν για να δημιουργήσουν 5 ζεύγη για συγκρίσεις από σημείο σε σημείο.



Εικόνα 3.1 – Θέσεις σημείων ελέγχου (GeoSLAM, 2021)

Ως σύστημα αναφοράς χρησιμοποιήθηκε ο επίγειος σαρωτής Riegl VZ-400, με τον οποίο σαρώθηκε το κτήριο πριν τις πειραματικές σαρώσεις με το ZEB HORIZON, και ως συμπληρωματική προεργασία έγιναν μετρήσεις από σημείο σε σημείο μεταξύ των 5 ζευγών παράλληλων πλακών ελέγχου, με χρήση του μετρητή απόστασης DistoTM D110.

Για την καταχώρηση των δεδομένων του Riegl VZ-400, τοποθετήθηκαν ειδικοί στόχοι διαμέτρου 145mm, ενώ για την επεξεργασία των δεδομένων αυτών χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή RiScan Pro V2.11. Αντίστοιχα, για την επεξεργασία των δεδομένων του ZEB Horizon χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή Connect V2.0. Και στις δύο περιπτώσεις εφαρμόστηκε στατιστικό φίλτρο ακραίων τιμών για την αφαίρεση του θορύβου από τα νέφη.

Τα αποτελέσματα της τοπικής ακρίβειας του ZEB HORIZON στον παρακάτω πίνακα προέκυψαν ως η διαφορά των τιμών που μετρήθηκαν με το HLS και το LDM.

Τοπική ακρίβεια	ZEB HORIZON
Σημεία A-B	6mm
Σημεία C-D	11mm
Σημεία E-F	10mm
Σημεία G-H	12mm

Πίνακας 3.1 – Τοπική ακρίβεια ZEB HORIZON (GeoSLAM, 2021)

Τέλος, όσον αφορά στην παγκόσμια ακρίβεια, αυτή υπολογίστηκε με σύγκριση μεταξύ των νεφών του HLS και του TLS σε δύο επίπεδα εμπιστοσύνης. Τα επίπεδα εμπιστοσύνης σχετίζονται με την τυπική απόκλιση. Έτσι, η ακρίβεια 6mm στο 1 σίγμα, σημαίνει ότι το 68% όλων των μετρήσεων πρέπει να είναι εντός του εύρους των 6 χιλιοστών και αντίστοιχα η ακρίβεια 19mm σε 2 σίγμα σημαίνει ότι το 95% όλων των μετρήσεων πρέπει να βρίσκεται εντός του δεδομένου εύρους των 19 χιλιοστών.

Παγκόσμια ακρίβεια	ZEB HORIZON
Επίπεδο εμπιστοσύνης 68%	6mm
Επίπεδο εμπιστοσύνης 95%	19mm

Πίνακας 3.2 – Παγκόσμια ακρίβεια ZEB HORIZON (GeoSLAM, 2021)

Ένα ακόμα πρότυπο ελέγχου ακρίβειας των σαρωτών laser είναι η πραγματοποίηση πειραματικών μετρήσεων σε ειδικά διαμορφωμένα εργαστήρια – ελεγχόμενα περιβάλλοντα. Αντί να χρησιμοποιηθεί συσκευή μεγαλύτερης ακρίβειας ως σύστημα αναφοράς, τα εργαστήρια ελέγχου διαθέτουν σταθεροποιημένους στόχους γνωστής θέσεως, οι οποίοι αποτελούν τη βάση σύγκρισης. Συγκρίνονται, λοιπόν, οι θέσεις των στόχων με τις αντίστοιχες θέσεις στο νέφος του εκάστοτε HLS, ανιχνεύονται οι αποκλίσεις και ως εκ τούτου υπολογίζεται η ακρίβεια του σαρωτή.

Η συγκεκριμένη μέθοδος ελέγχου χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της ακριβείας του σαρωτή BLK2GO, στα ειδικά διαμορφωμένα εργαστήρια της Leica Geosystems στο Heerbrugg της Ελβετίας (Leica Geosystems, 2022). Η διάρκεια σάρωσης ανήρθε στα 2 λεπτά και τα αποτελέσματα του ελέγχου καθόρισαν την παγκόσμια ακρίβεια του σαρωτή στα 10mm σε 1 σίγμα, δηλαδή σε επίπεδο εμπιστοσύνης 68%.

Παγκόσμια ακρίβεια	BLK2GO
Επίπεδο εμπιστοσύνης 68%	10mm

Πίνακας 3.3 – Παγκόσμια ακρίβεια BLK2GO (Leica Geosystems, 2021)

4. Εξοπλισμός

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής και την πραγματοποίηση των πειραματικών μετρήσεων, επιλέχθηκαν συστήματα της κατηγορίας LiDAR SLAM. Παρακάτω, παρατίθεται πίνακας με έξι από τα πιο πρόσφατα και θετικά αξιολογημένα συστήματα LiDAR SLAM στην αγορά και στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά οι σαρωτές που χρησιμοποιήθηκαν, οι λειτουργίες και τα ιδιαίτερα τεχνικά χαρακτηριστικά τους.

Μάρκα	Προϊόν	Ταχύτητα Σάρωσης (σημεία/δευτερόλεπτο)	Χώρα Κατασκευής
GeoSLAM	ZEB Horizon	300.000	Ηνωμένο Βασίλειο
Viametris	BMS3D	300.000	Γαλλία
Leica Geosystems	BLK2GO	420.000	Ελβετία
NavVis	VLX (2 ^η γενιά)	600.000	Γερμανία
Kaarta	Stencil Pro	600.000	ΗΠΑ
FARO	Focus Swift	1.000.000	ΗΠΑ

Πίνακας 4.1 – Σαρωτές LiDAR SLAM

Από τα παραπάνω, έγινε χρήση του σαρωτή ZEB Horizon της εταιρίας GeoSLAM, καθώς και του σαρωτή BLK2GO της εταιρίας Leica Geosystems. Ακολουθεί ανάλυση των συστημάτων τους.

4.1. ZEB Horizon – GeoSLAM

Το ZEB HORIZON αποτελεί το τελευταίο 3D φορητό σαρωτή laser της εταιρίας GeoSLAM και έναν από τους κορυφαίους στις αξιολογήσεις των σαρωτών της γενιάς του. Η σύγχρονη σχεδίασή του αλλά και οι ανανεωμένοι αλγόριθμοι επεξεργασίας των δεδομένων σάρωσης που έχουν εγκατασταθεί στο σύστημά του, του επιτρέπει να καλύπτει τις ανάγκες αποτύπωσης και χαρτογράφησης για πληθώρα διαφορετικών εφαρμογών, σε εσωτερικούς, εξωτερικούς και υπόγειους χώρους.



Εικόνα 4.1 – Σαρωτής ZEB Horizon

Το ZEB Horizon αποτελείται από έναν σαρωτή laser δύο διαστάσεων, που λειτουργεί με τεχνολογία Pulse (ή ToF), και μία μονάδα αδρανειακών μετρήσεων (IMU). Η τρίτη διάσταση που απαιτείται για τη δημιουργία τρισδιάστατης πληροφορίας, παρέχεται από την κίνηση της κεφαλής και τις καταγραφές των αδρανειακών μετρήσεων.

Το συνολικό πακέτο για τη λειτουργία και χρήση του σαρωτή, αλλά και τη μεταγενέστερη μεταφορά των δεδομένων προς επεξεργασία, αποτελείται από τα παρακάτω τμήματα:



Εικόνα 4.2 – Εξαρτήματα ZEB HORIZON

Όπου,

1. Σαρωτής laser χειρός, ZEB-HORIZON
2. Καταγραφικό δεδομένων
3. Καλώδιο
4. USB stick
5. Φορτιστής μπαταρίας και τροφοδοτικό
6. Ιμάντας ώμου καταγραφικού
7. Σακίδιο

4.1.1. Γενικές πληροφορίες

Ο πίνακας που ακολουθεί παραθέτει μερικές από τις πιο σημαντικές πληροφορίες για την ασφαλή λειτουργία του σαρωτή, την κατανόηση των χαρακτηριστικών του και τη δυνατότητα ερμηνείας των αποτελεσμάτων που παράγει.

Μέγιστο βεληνεκές σάρωσης	100m
Πεδίο σάρωσης	360° (κατακόρυφος άξονας) x 270° (οριζόντιος άξονας)
Ρυθμός σάρωσης	300.000 σημεία/δευτερόλεπτο
Αριθμός αισθητήρων	16
Κατακόρυφη γωνιακή ανάλυση	2°
Οριζόντια γωνιακή ανάλυση	0,2°
Σχετική ακρίβεια	6mm (υπό την προϋπόθεση χρήσης του λογισμικού ZEB Horizon RT για την επεξεργασία του νέφους)
Κλάση ασφαλείας laser	Κλάση 1 – Ασφαλές για τα μάτια
Μήκος κύματος laser	903nm (υπέρυθρο)
Θερμοκρασία λειτουργίας	0°C – 50°C
Βάρος	Κεφαλή σαρωτή με λαβή: 1,49 kg Καταγραφικό δεδομένων: 0,72 kg Μπαταρία: 0,55 kg

	Σακίδιο: 4,2 kg
Διαστάσεις	Κεφαλή σαρωτή: 216x108x266mm Σακίδιο και περιεχόμενα: 470x220x180mm
Διάρκεια μπαταρίας	Περίπου 3 ώρες συνεχούς χρήσης
Τιμή	45.970 ευρώ

Πίνακας 4.2 – Γενικές πληροφορίες για το ZEB Horizon (GeoSLAM, 2019)

4.1.2. Τρόπος λειτουργίας – Διαδικασία σάρωσης

Σε αυτή την ενότητα, αρχικά περιγράφεται ο τρόπος συναρμολόγησης των επιμέρους εξαρτημάτων του ZEB-HORIZON ώστε να είναι έτοιμο για χρήση, επιπλέον εξηγείται ο τρόπος εκκίνησης, συλλογής των δεδομένων και τερματισμού της διαδικασίας σάρωσης και τέλος, αναλύεται ο τρόπος αποθήκευσης και μεταφοράς των ανεπεξέργαστων δεδομένων σάρωσης από το καταγραφικό δεδομένων στον υπολογιστή που θα πραγματοποιηθεί η επεξεργασία.

Συναρμολόγηση – Η μπαταρία τοποθετείται στην κατάλληλη θέση και η βάση βιδώνεται στη λαβή του σαρωτή. Το κύριο καλώδιο (3) συνδέεται στην υποδοχή στο πλάι της κεφαλής του σαρωτή ZEB-HORIZON. Το άλλο άκρο του καλωδίου συνδέεται στην υποδοχή REVO, που διακρίνεται με πορτοκαλί χρώμα και που βρίσκεται στο καταγραφικό. Αφού ολοκληρωθεί η σύνδεση, η ένδειξη στα φώτα LED που φέρει ο σαρωτής πρέπει να είναι στιγμιαία μπλε.

Αρχικοποίηση – Ο σαρωτής τοποθετείται σε επίπεδη ακίνητη επιφάνεια. Ελέγχεται, στη συνέχεια, ότι η κεφαλή σάρωσης είναι καθαρή και ελεύθερη να περιστραφεί. Το καταγραφικό δεδομένων ενεργοποιείται πατώντας στιγμιαία το κουμπί ενεργοποίησης/απενεργοποίησης (on/off). Σε αυτό το στάδιο της διαδικασίας, ο σαρωτής βρίσκεται σε φάση αναμονής, κατάσταση που μπορεί να αναγνωριστεί από τα κόκκινα φωτάκια LED που ανάβουν διαδοχικά και επαναλαμβανόμενα (standby mode).

Εκκίνηση σάρωσης – Για την εκκίνηση μιας καινούργιας σάρωσης, αρκεί η παρατεταμένη πίεση του κουμπιού λειτουργίας (on/off), μέχρι τα φωτάκια να γίνουν σταθερά κόκκινα. Ο σαρωτής, τότε, εισέρχεται σε φάση αρχικοποίησης κατά την οποία πρέπει να παραμείνει ακίνητος για μια περίοδο 15 δευτερολέπτων. Εάν η κεφαλή της σάρωσης διαταραχθεί κατά τη διάρκεια της αρχικοποίησης, το σύστημα θα επανέλθει σε κατάσταση αναμονής. Η φάση αρχικοποίησης αναγνωρίζεται από την ενεργοποίηση παλλόμενων πορτοκαλί ενδείξεων στα φωτάκια που φέρει ο σαρωτής.

Σάρωση – Μετά το πέρας της περιόδου αρχικοποίησης, τα φωτάκια θα γίνουν πράσινα, η κεφαλή του σαρωτή θα αρχίσει να περιστρέφεται και η διαδικασία σάρωσης θα έχει ξεκινήσει. Για μια επιτυχημένη σάρωση, είναι σημαντικό τα δεδομένα να καταγράφονται με ταχύτητα βαδίσματος, για να διασφαλιστεί καλή κάλυψη της περιοχής μελέτης και δεδομένα υψηλής ανάλυσης.

Τα δεδομένα εντός μικρής εμβέλειας (<50cm) δεν υποβάλλονται σε επεξεργασία (από προεπιλογή), για να εξαλειφθούν μεγάλες αποκλίσεις λόγω σφάλματος στη γωνία σάρωσης. Το μέγιστο βεληνεκές του σαρωτή είναι 100m, αυτό το εύρος, όμως, επιτυγχάνεται μόνο σε βέλτιστες συνθήκες, όπως εσωτερικοί χώροι με επιφάνειες καλής ανακλαστικότητας στόχου. Το τυπικό μέγιστο εύρος είναι 60-80m στις περισσότερες συνθήκες, αλλά συνιστάται από τον

κατασκευαστή το εύρος να διατηρείται σε λιγότερο από 50m, όπου είναι δυνατόν, για να εξασφαλιστεί καλή πυκνότητα σημείων και να βοηθηθεί ο αλγόριθμος SLAM στη συνένωση των νεφών. Όταν η σάρωση περιλαμβάνει ψηλά αντικείμενα, συνίσταται να μεγαλώνει η απόσταση σάρωσης, πάντα εντός των ορίων, ώστε να αποφευχθούν τα μεγάλα σφάλματα στη γωνία σάρωσης που αφορά τα ψηλότερα σημεία του αντικειμένου.

Όσον αφορά στη μετάβαση μεταξύ διαφορετικών χώρων, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στον ρυθμό και τον τρόπο διέλευσης από το ένα περιβάλλον στο άλλο. Υπό δύσκολες, για το σαρωτή, συνθήκες όπως η μετάβαση μεταξύ των ακμών μιας στενής στροφής, η τοπική προβολή μπορεί να αλλάξει απότομα και ο αλγόριθμος SLAM να δυσκολευτεί να συσχετίσει το νέο περιβάλλον με το προηγούμενο. Απαιτείται, λοιπόν, αργή μετάβαση και στοχευμένη σάρωση και στις δύο πλευρές της στροφής, αλλιώς οι δύο πλευρές της γωνίας μπορεί να παρουσιάσουν απόκλιση στην ευθυγράμμιση των νεφών σημείων τους. Η ίδια αντιμετώπιση συνίσταται και κατά τη μετάβαση από ένα κλειστό, πλούσιο σε χαρακτηριστικά σημεία, περιβάλλον σε ένα ανοιχτό, «φτωχό» περιβάλλον. Η κεφαλή σάρωσης πρέπει, επίσης, να παραμείνει ακίνητη για μικρά χρονικά διαστήματα (15-20 δευτερόλεπτα), ενώ ο χειριστής διαπραγματεύεται δύσκολη πρόσβαση σε κάποιο νέο περιβάλλον ή όταν το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται έχει ελλιπή χαρακτηριστικά σημεία, για να κάνει τη σύνδεση των σαρώσεων. Το ίδιο χρονικό διάστημα ακινησίας του σαρωτή μπορεί να εφαρμοστεί σε μια συγκεκριμένη θέση για την αυτόματη εξαγωγή ενός reference point. Η λειτουργία αυτή είναι χρήσιμη για την επικείμενη γεωαναφορά του νέφους κάνοντας χρήση των σημείων ακινησίας (reference points) έναντι ασπρόμαυρων στόχων. Τέλος, πρέπει να αποφεύγεται η σάρωση κινούμενων αντικειμένων, όπου αυτό είναι εφικτό, καθώς μπορεί να οδηγήσουν στην εισαγωγή σφαλμάτων.

Πριν την ολοκλήρωση της σάρωσης, και δεδομένου ότι κάθε νέο νέφος σημείων βασίζει τις θέσεις των σημείων του στο αμέσως προηγούμενο, θεωρείται καλή πρακτική το "κλείσιμο του βρόχου" (loop closure). Αυτό ουσιαστικά ερμηνεύεται ως η επανάληψη σάρωσης ίδιων περιοχών και ειδικότερα της θέσεως εκκίνησης της σάρωσης, έτσι ώστε το σύνθετο σφάλμα να μπορεί να «εξαπλωθεί» σε όλο το βρόχο. Συνιστάται, επίσης, ο χειριστής να κλείνει τον βρόχο όσο πιο συχνά γίνεται, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα και να βελτιωθεί η ακρίβεια του νέφους σημείων που προκύπτει. Τα αποτελέσματα βελτιώνονται ακόμη περισσότερο αν οι βρόχοι που δημιουργούνται είναι κυκλικοί αντί για γραμμικοί, καθώς στη δεύτερη περίπτωση η διαδρομή σάρωσης απλά διπλασιάζεται.

Τέλος, παρόλο που η διάρκεια της μπαταρίας επιτρέπει σαρώσεις διάρκειας έως και τρεις ώρες, συνίσταται ο επιμερισμός τους σε αρχεία σαρώσεων που δεν ξεπερνούν τη μισή ώρα, για την αποφυγή των υπέρογκων αρχείων και την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων.

Τερματισμός σάρωσης – Για να τον τερματισμό της σάρωσης, αρκεί η παρατεταμένη πίεση του κουμπιού λειτουργίας (on/off) από τον χειριστή, μέχρι να σταματήσει η περιστροφή της κεφαλής σάρωσης. Τότε τα φωτάκια LED εκπέμπουν πορτοκαλί χρώμα, ενώ παράλληλα τα δεδομένα της σάρωσης μετατρέπονται στην απαιτούμενη μορφή εξόδου. Στη συνέχεια, ο σαρωτής μπαίνει πάλι σε κατάσταση αναμονής, μέχρι την εκκίνηση της επόμενης σάρωσης ή την οριστική απενεργοποίηση του. Αυτή πραγματοποιείται με μία δεύτερη παρατεταμένη πίεση του κουμπιού λειτουργίας και επιβεβαιώνεται όταν ακουστούν δύο σύντομοι ήχοι από τον σαρωτή.

Μεταφορά και αποθήκευση δεδομένων σάρωσης – Για τη μεταφορά των ανεπεξέργαστων δεδομένων σάρωσης από το καταγραφικό του σαρωτή σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, ο

σαρωτής ZEB HORIZON πρέπει να είναι ενεργοποιημένος. Κατόπιν το USB stick, που παρέχεται μαζί με τον υπόλοιπο εξοπλισμό του σαρωτή, συνδέεται στην αντίστοιχη υποδοχή του καταγραφικού. Η σύνδεση είναι επιτυχημένη όταν τα φώτα LED του σαρωτή εκπέμπουν πράσινο χρώμα. Τα δεδομένα, τότε, μεταφέρονται αυτόματα στο κλειδί μνήμης. Αξίζει να σημειωθεί ότι μεταφέρονται μόνο τα δεδομένα που δεν έχουν αντιγραφεί ξανά στο κλειδί, ενώ αν απαιτείται αντιγραφή δεδομένων για δεύτερη φορά είναι αναγκαία η χρήση της εφαρμογής USB Prepare. Η διαδικασία μεταφοράς ολοκληρώνεται όταν τα φώτα LED σβήσουν και μόνο τότε μπορεί να αφαιρεθεί το USB stick.

Τα αρχεία, στη συνέχεια, αποθηκεύονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με τη βοήθεια της εφαρμογής GeoSLAM Hub και ονομάζονται αυτόματα σύμφωνα με την ημερομηνία και την ώρα έναρξης της εγγραφής του συνόλου των δεδομένων και πάντα σύμφωνα με την ώρα/ημερομηνία που έχει οριστεί στο ρολόι του καταγραφικού. Η τελική μορφή που παίρνουν τα αρχεία είναι η παρακάτω:

YYYY-MM-DD_hh-mm-ss.zip

όπου,

- YYYY: Χρονιά
- MM: Μήνας
- DD: Μέρα του μήνα (αριθμός)
- hh: ώρα (μορφή εικοσιτετράωρου)
- mm: λεπτά
- ss: δευτερόλεπτα

Η ημερομηνία και ώρα της εγγραφής μπορεί να αλλάξει χρησιμοποιώντας και πάλι την εφαρμογή USB Prepare. Όσον αφορά το συμπυκνωμένο αρχείο **.zip**, αυτό με τη σειρά του περιέχει άλλα δύο αρχεία όπως φαίνεται στη συνέχεια:

1. YYYY-MM-DD_hh-mm-ss.geoslam

το οποίο περιέχει τα ανεπεξέργαστα δεδομένα της σάρωσης και

2. YYYY-MM-DD_hh-mm-ss.params

το οποίο περιέχει βασικές παραμέτρους που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή δεδομένων.

Επιπλέον, υπάρχει δυνατότητα, μέσω της ίδιας εφαρμογής, να επιλυθεί το SLAM και εξαχθούν στον υπολογιστή απευθείας τα νέφη σημείων, τα οποία θα έχουν με μορφή αρχείου **.LAZ**.

Σύνοψη φωτεινών ενδείξεων – Τέλος, παρουσιάζεται ο παρακάτω πίνακας που συνοψίζει τις ερμηνείες των φωτεινών ενδείξεων του σαρωτή κατά τη χρήση του, αλλά και κατά τη μεταφορά των δεδομένων, όπως αυτές περιεγράφηκαν παραπάνω στα αντίστοιχα στάδια της εκάστοτε διαδικασίας.

REVOLED on data logger		LED array on scan head		Description
✱	BLUE flash	-	-	Data logger booting
●	BLUE	●●●●	BLUE	Connecting to scan head
●	RED pulse	→ ○○○○ ← ○○○○	RED LED strobing from left to right	Scanner is in standby mode
●	RED	●●●●	RED	Scanner about to enter initiation mode
✱	ORANGE flash	✱✱✱✱	ORANGE flash	The scanner is in initiation mode
●	GREEN	●●●●	GREEN	The scanner is scanning mode
DATA LED on data logger				
●	ORANGE	-	-	Scan data is being formatted ! Do not turn the data logger off
●	GREEN	-	-	Data is transferring to USB memory stick ! Do not remove the USB memory stick

Πίνακας 4.3 – Σύνοψη φωτεινών ενδείξεων ZEB HORIZON (GeoSLAM, 2019)

4.2. BLK2GO – Leica Geosystems

Ο σαρωτής BLK2GO της εταιρίας Leica Geosystems είναι και αυτός ένας από τους πιο εύχρηστους, μοντέρνους και εργονομικούς σαρωτές LiDAR της γενιάς του. Είναι σχεδιασμένος για γρήγορη χρήση με ικανότητα σάρωσης σε εσωτερικούς, εξωτερικούς και υπόγειους χώρους και διαθέτει ευκολία μετακίνησης όντας φορητός με χειρολαβή.



Εικόνα 4.3 – Σαρωτής BLK2GO

Εκτός από τον σαρωτή laser που βρίσκεται κάτω από το θόλο της συσκευής και λειτουργεί με τεχνολογία Pulse (ή ToF), το BLK2GO διαθέτει, επίσης, μονάδα αδρανειακών μετρήσεων (IMU) και ενσωματωμένο σύστημα καμερών πανοραμικής οράσεως για τον χρωματισμό των δεδομένων του και την ενίσχυση της αποδοτικότητας του υπολογισμού της θέσεως. Το

σύνολο του εξοπλισμού που συνοδεύει το σαρωτή, καθώς και τα επιμέρους τμήματα του, καταμετρώνται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 4.4 – Εξαρτήματα BLK2GO (Leica Geosystems, 2019)

Το πακέτο το οποίο λαμβάνει ο χειριστής με την απόκτηση του σαρωτή BLK2GO περιλαμβάνει τα παρακάτω εξαρτήματα:

- a. Σαρωτής BLK2GO με αποσπώμενη βάση
- b. Μπαταρίες
- c. Καλώδιο εναλλασσόμενου ρεύματος
- d. Μετασχηματιστής εναλλασσόμενου ρεύματος
- e. Φορτιστής μπαταριών
- f. Θήκη

4.2.1. Γενικές πληροφορίες

Στον πίνακα παρουσιάζονται μερικά από τα βασικότερα περιγραφικά, τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του σαρωτή BLK2GO.

Μέγιστο βεληνεκές σάρωσης	25m
Πεδίο σάρωσης	270° (κατακόρυφος άξονας) x 360° (οριζόντιος άξονας)
Ρυθμός σάρωσης	420.000 σημεία/δευτερόλεπτο
Αριθμός αισθητήρων	Αισθητήρας laser, κάμερα λεπτομερειών και δύο πανοραμικές κάμερες
Κατακόρυφη γωνιακή ανάλυση	0,008°
Οριζόντια γωνιακή ανάλυση	0,008°
Σχετική ακρίβεια	6-15mm (εξάρτηση από το περιβάλλον σάρωσης)
Κλάση ασφαλείας laser	Κλάση 1 – Ασφαλές για τα μάτια
Μήκος κύματος laser	830nm (υπέρυθρο)

Θερμοκρασία λειτουργίας	5°C – 40°C
Βάρος	Κεφαλή σαρωτή με λαβή: 0,655 kg Μπαταρία: 0,1 kg Θήκη: 4,2 kg
Διαστάσεις	Κεφαλή σαρωτή: 216x108x266mm Θήκη: 200x380x200mm
Διάρκεια μπαταρίας	Περίπου 40-45 λεπτά συνεχούς χρήσης
Τιμή	48.269 ευρώ

Πίνακας 4.4 – Γενικές πληροφορίες για το BLK2GO (Leica Geosystems, 2019)

4.2.2. Τρόπος λειτουργίας – Διαδικασία σάρωσης

Μετά την περιγραφή του σαρωτή, αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας και χρήσης του. Λεπτομερέστερα, επεξηγείται με συνοδεία εικόνων, ο τρόπος εκκίνησης της σάρωσης, η διαδικασία καταγραφής δεδομένων στο χώρο, ο τερματισμός λειτουργίας, η αποθήκευση των δεδομένων και τέλος, η μεταφορά τους στο σύστημα του υπολογιστή, όπου θα γίνει η επεξεργασία τους.



Εικόνα 4.5 – Φωτεινές ενδείξεις κατά τη σάρωση με το BLK2GO (Leica Geosystems, 2019)

Συναρμολόγηση – Ο σαρωτής και η βάση του αφαιρούνται από τη θήκη, ελέγχεται η καθαρότητα του θόλου και τοποθετείται μία πλήρως φορτισμένη μπαταρία στη ειδική θέση που βρίσκεται στη χειρολαβή του σαρωτή.

Αρχιβοποίηση – Ο σαρωτής ενεργοποιείται με το στιγμιαίο πάτημα του κουμπιού ενεργοποίησης/απενεργοποίησης (on/off). Ο σαρωτής βρίσκεται στο στάδιο ενεργοποίησης και προετοιμασίας όταν ο φωτεινός δακτύλιος, που βρίσκεται στη βάση του θόλου,

αναβοσβήνει με κίτρινο χρώμα (1) . Όταν το χρώμα του δακτυλίου γίνει πράσινο, ο σαρωτής είναι έτοιμος για χρήση. Σε αυτό το στάδιο ο σαρωτής μπορεί να συνδεθεί ασύρματα, και αυτόματα, με κινητό τηλέφωνο (2) υπό την προϋπόθεση ότι στο τηλέφωνο υπάρχει η εφαρμογή BLK2GO Live και η λειτουργία Wi-Fi είναι ενεργοποιημένη. Με την εφαρμογή αυτή ο χρήστης μπορεί να παρακολουθεί ζωντανά την εξέλιξη της σάρωσης στις δύο ή στις τρεις διαστάσεις, και να ελέγχει σημαντικές ενδείξεις που αφορούν τη λειτουργικότητα της συσκευής, όπως η θερμοκρασία της και η κατάσταση της μπαταρίας της.

Εκκίνηση σάρωσης – Για την εκκίνηση της σάρωσης, ο σαρωτής πρέπει να τοποθετηθεί στη βάση του και να πατηθεί στιγμιαία το κουμπί on/off. Τότε ο δακτύλιος αναβοσβήνει ξανά με κίτρινο χρώμα, ένδειξη ότι το σύστημα προετοιμάζεται για σάρωση (3), και μετά από μερικά δευτερόλεπτα ο δακτύλιος γίνεται σταθερά πράσινος και η σάρωση ξεκινά (4).

Σάρωση – Κατά τη σάρωση με το BLK2GO ισχύουν οι ίδιες αρχές που αναφέρθηκαν και στην ενότητα του ZEB HORIZON. Η προσοχή, δηλαδή, εφίσταται στις μεταβάσεις από εσωτερικούς σε εξωτερικούς χώρους, στις γωνίες, στην αποφυγή σάρωσης κινούμενων στόχων, στην ταχύτητα σάρωσης που οφείλει να είναι εκείνη του βαδίσματος και, τέλος, στη χρήση του σαρωτή έναντι επιφανειών υψηλής ανακλαστικότητας. Το εύρος σάρωσης για το συγκεκριμένο σαρωτή πρέπει να είναι ανώτερο των 55 εκατοστών και κατώτερο των 25 μέτρων. Η βέλτιστη απόσταση για να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή ακρίβεια στο νέφος ορίζεται στα 10 μέτρα. Σε κάθε περίπτωση, όμως, κρίνεται απαραίτητη η επιλογή απόστασης σάρωσης λαμβάνοντας υπόψιν τη γεωμετρία και το ύψος των αντικειμένων, για να αποφευχθούν μεγάλες γωνίες σάρωσης και εισαγωγή χονδροειδών σφαλμάτων στο νέφος.

Όσον αφορά επιπλέον λειτουργίες του σαρωτή, υπάρχει δυνατότητα λήψης φωτογραφίας κάποιου σημείου ιδιαίτερου ενδιαφέροντος με το στιγμιαίο πάτημα του κουμπιού on/off, ενώ η σάρωση βρίσκεται σε εξέλιξη (5). Ως ένδειξη επιτυχούς λήψης, ο δακτύλιος αναβοσβήνει μία φορά. Είναι δυνατή, επίσης, η επί τόπου επισκόπηση τόσο των φωτογραφιών αυτών όσο και των νεφών που δημιουργούνται μέσω της εφαρμογής BLK2GO Live, ώστε να αναβαθμίζεται η εμπειρία της σάρωσης και να υπάρχει ταυτόχρονος έλεγχος των παραγώγων.

Στις οδηγίες χρήσης του σαρωτή (Leica Geosystems, 2019), τονίζεται ιδιαίτερα η πρακτική του «κλεισίματος βρόχου» ως αναγκαία για την ολοκλήρωση της σάρωσης. Παρόλα αυτά, όπως και στην περίπτωση του ZEB HORIZON, ενθαρρύνεται η πρακτική αυτή να εφαρμόζεται όσο το δυνατόν συχνότερα και σε κυκλικές τροχιές.

Τερματισμός σάρωσης – Αφού ολοκληρωθεί η σάρωση, ο σαρωτής επανατοποθετείται στη βάση του και με το παρατεταμένο πάτημα του κουμπιού on/off τερματίζεται η διαδικασία. Όσο τα δεδομένα της σάρωσης αποθηκεύονται και μετατρέπονται στην κατάλληλη μορφή εξόδου, ο δακτύλιος αναβοσβήνει με κίτρινο χρώμα. Αφού τα δεδομένα αποθηκευτούν, ο δακτύλιος ξαναγίνεται πράσινος (6). Για την απενεργοποίηση του σαρωτή, αρκεί η παρατεταμένη πίεση του κουμπιού on/off, όποτε και ο δακτύλιος σβήνει.

Μεταφορά και αποθήκευση δεδομένων σάρωσης – Τα δεδομένα μπορούν να μεταφερθούν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή είτε με ασύρματα, συνδέοντας τον υπολογιστή με το ομώνυμο δίκτυο Wi-Fi και κάνοντας χρήση του κωδικού που βρίσκεται κάτω από την μπαταρία του σαρωτή, είτε με τη χρήση καλωδίου USB-C, το οποίο συνδέεται στην υποδοχή USB του υπολογιστή και στην αντίστοιχη υποδοχή που βρίσκεται στη συσκευή του σαρωτή κάτω από τη μπαταρία. Κατά τη μεταφορά των δεδομένων, η μπαταρία του σαρωτή πρέπει να έχει









αφαιρεθεί και ο σαρωτής να βρίσκεται στη βάση του. Κατά τη σύνδεση, ο δακτύλιος αναβοσβήνει και όταν η σύνδεση επιτευχθεί γίνεται σταθερά πράσινος.

Μετά τη σύνδεση, τα αρχεία μπορούν να αποθηκευτούν στον υπολογιστή κάνοντας χρήση της εφαρμογής Cyclone Register360. Οι επιλογές αποθήκευσης είναι τρεις:

1. Εξαγωγή των ανεπεξέργαστων αρχείων σε τοπικό φάκελο – Μορφή αρχείου **.b2g**,
2. Επίλυση SLAM και εξαγωγή χρωματισμένου νέφους σημείων – Μορφή αρχείου **.e57**,
3. Ρυθμίσεις τροχιάς – Ρύθμιση της συχνότητας δημιουργίας πανοραμικών εικόνων από τα οπτικά δεδομένα που έχουν συλλέξει οι τρεις κάμερες του σαρωτή. Η επιλογή αυτή επιλέγεται παράλληλα με τις προηγούμενες δύο.

Η γρηγορότερη επιλογή για την εξαγωγή των δεδομένων είναι η δεύτερη, αλλά είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η τρίτη επιλογή επηρεάζει, επίσης, το χρόνο εξαγωγής ανάλογα με το πόσο αυξάνεται ή μειώνεται η συχνότητα παραγωγής πανοραμικών εικόνων. Τέλος, υπάρχει η επιλογή απενεργοποίησης του χρωματισμού του νέφους, μειώνοντας το χρόνο εξαγωγής των δεδομένων που αποτελούνται, πλέον, μόνο από τα δεδομένα laser.

Σύνοψη φωτεινών ενδείξεων – Ολοκληρώνοντας, συνοψίζονται τα είδη των φωτεινών ενδείξεων του δακτυλίου LED του σαρωτή, καθώς και οι πιθανές ερμηνείες της εκάστοτε ένδειξης.

LED colour	Lighting interval	Instrument status	LED colour	Lighting interval	Instrument status
	none	The BLK2GO is off.		blinking	The BLK2GO is starting, initialising or switching off.
	continuous	The BLK2GO is ready.		pulsating	The BLK2GO is in recording state and something is notified or a problem occurred.
	pulsating	The BLK2GO is in recording state.		1 blink	An error occurred and the picture from the detail camera was not taken.
	1 blink	Picture from the detail camera successfully taken.		continuous	Critical problem or major failure. Contact a Leica Geosystems authorised service centre for further investigation.

Εικόνα 4.6 – Σύνοψη φωτεινών ενδείξεων BLK2GO (Leica Geosystems, 2019)

5. Περιοχή μελέτης

Οι πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με τους δύο σαρωτές laser SLAM έλαβαν χώρα εντός και περιμετρικά του κτηρίου του Λαμπαδαρίου στη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Το Λαμπαδάριο αποτέλεσε το πρώτο κτήριο της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών Γεωπληροφορικής στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, η οποία στεγάστηκε εκεί από τις αρχές του 1970, ενώ από το 2001 προστέθηκαν και δύο νέα κτίρια, το κτήριο Α και το κτήριο Β (κτήριο Βέη).



Εικόνα 5.1 – Λαμπαδάρειο κτήριο

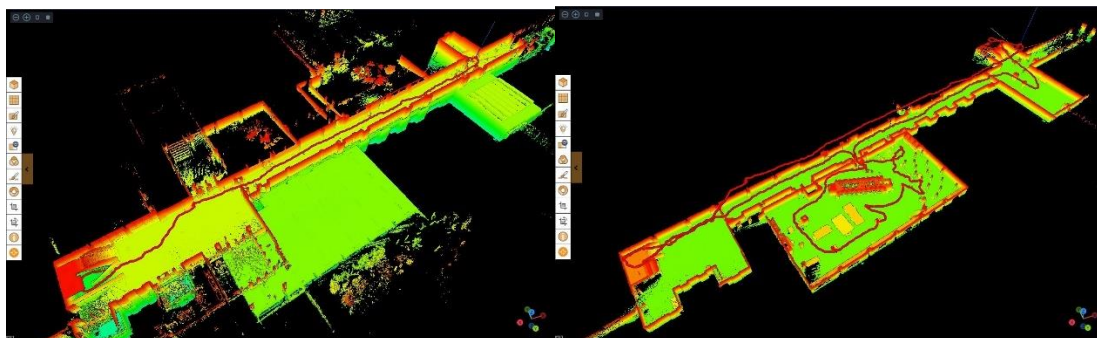
6. Πειραματικές μετρήσεις

6.1. Καθορισμός διαδρομών σαρώσεων

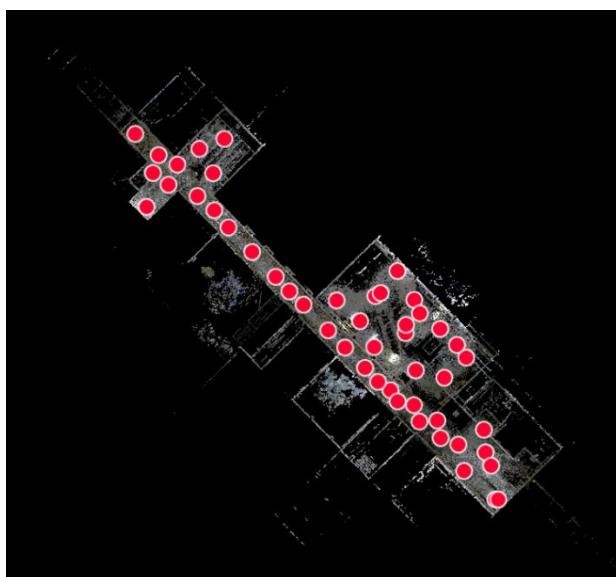
Οι διαδρομές που σαρώθηκαν με τους δύο σαρωτές laser είναι στο σύνολο 3 και ο καθορισμός τους έγινε μετά από αναγνώριση της περιοχής και με την προοπτική του ελέγχου των δυνατοτήτων των σαρωτών σε διαφορετικά περιβάλλοντα και συνθήκες.

Η πρώτη σάρωση έλαβε χώρα στο εσωτερικό του Λαμπαδάρειου κτιρίου, και ενώ η διαδρομή ήταν η ίδια για τους δύο σαρωτές, διέφερε το σημείο εκκίνησης. Αυτό καθορίστηκε λαμβάνοντας υπόψη την πιθανότητα διατάραξης της αρχικοποίησης της σάρωσης από κινούμενους στόχους. Για το σαρωτή ZEB Horizon, η σάρωση πραγματοποιήθηκε ακολουθώντας μία κυκλική διαδρομή η οποία είχε ως αφετηρία την είσοδο του κέντρου Γεωπληροφορικής. Στη συνέχεια, υπήρξε μετάβαση στο υπόγειο του κτιρίου μέσω της σκάλας, και σάρωση του χώρου μπροστά από την αποθήκη του τοπογραφικού εξοπλισμού του κτιρίου. Διανύοντας τον διάδρομο του υπογείου με κατεύθυνση προς το κτήριο Α, και περίπου στα μέσα του διαδρόμου, έγινε είσοδος στην αίθουσα ελέγχου (Υ24) του κτιρίου, της οποίας η πόρτα είχε ήδη ανοιχτεί για αποφυγή σάρωσής της, και η αίθουσα σαρώθηκε κυκλικά. Η διαδρομή συνεχίστηκε με την επιστροφή στο ισόγειο μέσω της σκάλας μπροστά από το κτήριο Α, και τη σάρωση του διαδρόμου μπροστά από τις αίθουσες Λ. Τέλος, η σάρωση ολοκληρώθηκε στο σημείο έναρξης μπροστά από το κέντρο Γεωπληροφορικής κλείνοντας τον βρόχο. Για το σαρωτή BLK2GO, το σημείο εκκίνησης ορίστηκε στη σκάλα μπροστά από το κτήριο Α και η διαδρομή που ακολουθήθηκε ήταν όμοια με αυτή του ZEB Horizon. Η συγκεκριμένη διαδρομή επιλέχθηκε ώστε να ελεγχθεί η ανταπόκριση των σαρωτών σε περιβάλλον με μακρείς διαδρόμους, με ύπαρξη τζαμιών, σκαλιών και μετάβαση μεταξύ ορόφων. Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια της σάρωσης υπήρξαν και

αναπόφευκτοι κινούμενοι στόχοι παρόλο που έγινε προσπάθεια να περιοριστούν στο ελάχιστο.

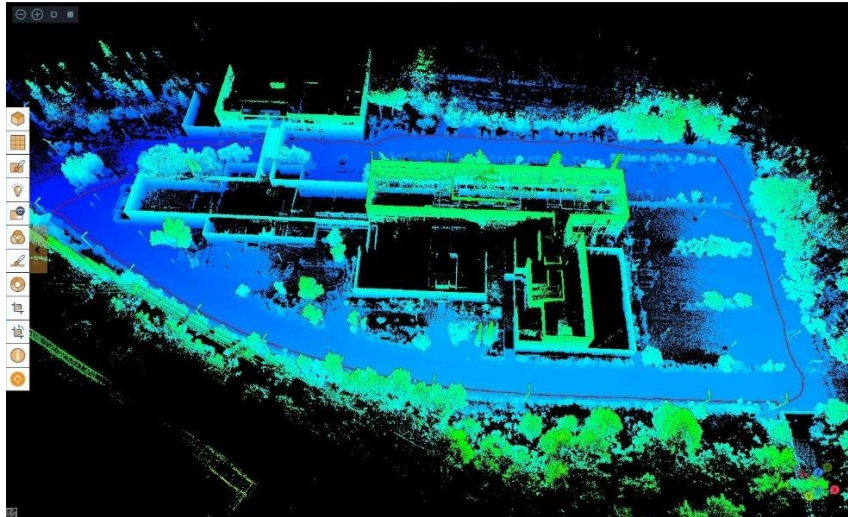


Εικόνα 6.1 – Διαδρομή με ZEB Horizon



Εικόνα 6.2 – Διαδρομή με BLK2GO

Η δεύτερη σάρωση έλαβε χώρα στο εξωτερικό του κτιρίου με μέση απόσταση μεταξύ σαρωτή και κτιρίου περίπου ίση με 25 μέτρα. Η σάρωση ξεκίνησε από το χώρο στάθμευσης που βρίσκεται ανατολικά του κτηρίου και εξελίχθηκε περιμετρικά αυτού, με δεξιόστροφη φορά. Σαρώθηκε, δηλαδή, το εξωτερικό των αιθουσών Α, το κυλικείο, ο χώρος απέναντι από το κτήριο Βέη, η κεντρική είσοδος του Λαμπαδάρειου κτηρίου και πραγματοποιήθηκε κλείσιμο του βρόχου στο σημείο εκκίνησης. Η διαδρομή διατηρήθηκε εσκεμμένα σε μεγαλύτερη απόσταση, που μερικές φορές έφτανε και στο μέγιστο εύρος σάρωσης των συστημάτων, ώστε να ελεγχθεί η δυνατότητα καταγραφής σημείων στους ανώτερους ορόφους του κτιρίου, δηλαδή με μεγάλες κατακόρυφες γωνίες σάρωσης. Επιπλέον, αποφασίστηκε να πραγματοποιηθεί σάρωση στον εξωτερικό χώρο του κτιρίου καθώς αποτελεί πιο απαιτητικό περιβάλλον για την τεχνολογία SLAM, δεδομένης της ύπαρξης βλάστησης, παραθύρων, υγρασίας, αφού οι σαρώσεις έγιναν τον Μάρτιο, και κινούμενων αντικειμένων, όπως αυτοκίνητα.

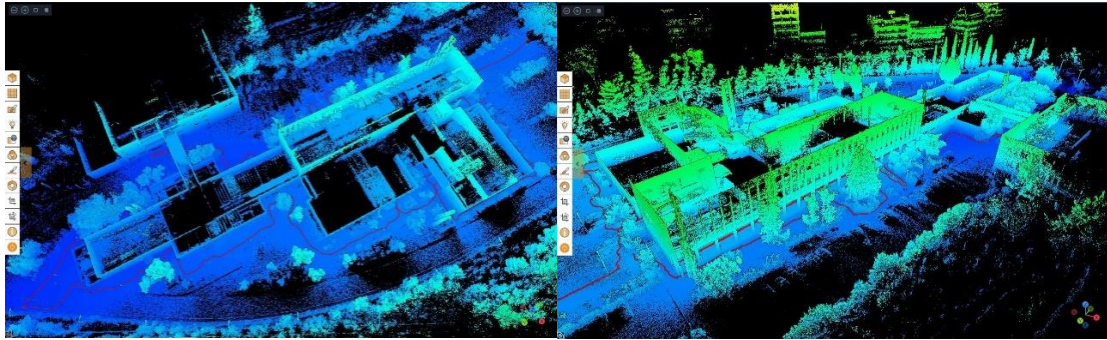


Εικόνα 6.3 – Διαδρομή με ZEB Horizon



Εικόνα 6.4 – Διαδρομή με BLK2GO

Η τρίτη, και τελευταία διαδρομή, είχε το ίδιο σημείο εκκίνησης και ολοκλήρωσης με τη δεύτερη και ήταν, επίσης, περιμετρική του κτηρίου του Λαμπαδαρίου με δεξιόστροφη φορά. Η διαφορά έγκειται στη μέση απόσταση μεταξύ σαρωτή και κτιρίου, η οποία ορίστηκε στα 5 περίπου μέτρα. Η απόφαση της σάρωσης σε κοντινή απόσταση από το κτήριο, πολλές φορές αγγίζοντας τα κατώτερα όρια του εύρους σάρωσης των συστημάτων, πάρηκε έτσι ώστε να ελεγχθεί η δυνατότητα καταγραφής λεπτομερειών, ο βαθμός παραγωγής θορύβου και η κατακόρυφη απόσταση στην οποία μπορούσε να λάβει πίσω δεδομένα ο κάθε σαρωτής.



Εικόνα 6.5 – Διαδρομή με ZEB Horizon



Εικόνα 6.6 – Διαδρομή με BLK2GO

6.2. Σημεία ελέγχου

Για την επικείμενη γεωαναφορά των νεφών σημείων απαιτείτο ο ορισμός τουλάχιστον 3 στάσεων γνωστών συντεταγμένων ανά διαδρομή. Κατά τον σχεδιασμό των διαδρομών, επιλέχθηκαν 4-5 στάσεις για κάθε εξωτερική διαδρομή και 4 στάσεις για την εσωτερική, διαμοιρασμένες όσο καλύτερα γίνεται στο χώρο. Η επιλογή περισσότερων στάσεων από τις αυστηρά απαραίτητες έγινε τόσο για τη διασφάλιση της επιτυχούς γεωαναφοράς, σε περίπτωση αντιμετώπισης προβλήματος με κάποια στάση, όσο και για καλύτερο διαμοιρασμό του σφάλματος κλεισίματος.

Για την εσωτερική σάρωση, χρησιμοποιήθηκαν τα βάρθρα που προϋπήρχαν στην αίθουσα ελέγχου οργάνων του κτιρίου και που είχαν συντεταγμένες τοπικού συστήματος αναφοράς. Όσο για τις εξωτερικές σαρώσεις, χρησιμοποιήθηκαν στάσεις που είχαν οριστεί από το Εργαστήριο Γεωδαισίας της Σχολής και είχαν συντεταγμένες που αναφέρονταν στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς – ΕΓΣΑ '87. Οι συντεταγμένες όλων των στάσεων έχουν μετρηθεί και καθοριστεί με Ολοκληρωμένο Γεωδαιτικό Σταθμό, άρα όργανο με μεγαλύτερη ακρίβεια από τα όργανα που ελέγχονται πειραματικά στην παρούσα διπλωματική.

Όσον αφορά στο σαρωτή ZEB HORIZON, η αναγνώριση της στάσης κατά τη διάρκεια της σάρωσης γινόταν με την προσωρινή παύση του βαδίσματος στο σημείο ενδιαφέροντος για

περίπου 15 δευτερόλεπτα. Έτσι το σύστημα αναγνώριζε τη στάση και την αποθήκευε ξεχωριστά από τα υπόλοιπα σημεία, χωρίς τη χρήση στόχων.

Στην περίπτωση του BLK2GO, έγινε χρήση κυκλικών ασπρόμαυρων στόχων που τοποθετήθηκαν πάνω στις προϋπάρχουσες στάσεις ταυτίζοντας όσο το δυνατόν καλύτερα τα κέντρα τους. Οι στόχοι αυτοί αναγνωρίζονται από το σύστημα και εντοπίζονται αυτόματα κατά την επεξεργασία του νέφους. Παρόλα αυτά αξίζει να σημειωθεί ότι γεωαναφορά θα μπορούσε να γίνει και με τοποθέτηση ψηφιακών στόχων, εκ των υστέρων, αν μπορούσαν να στοχευθούν με ακρίβεια οι στάσεις γνωστών συντεταγμένων στο νέφος.

7. Επεξεργασία πειραματικών μετρήσεων

7.1. Γεωαναφορά νεφών σημείων – Ακρίβεια εντοπισμού στόχων

Παρακάτω, παρουσιάζεται η λίστα των διαθέσιμων σημείων ελέγχου για τη γεωαναφορά των εξωτερικών νεφών:

Κωδικός σημείου	X (m)	Y (m)	Z (m)
D137	480490.531	4202840.765	191.341
S388	480631.797	4202764.979	194.451
Σ38	480607.027	4202714.163	195.817
Σ51	480547.287	4202734.625	196.086
Σ52	480500.448	4202757.345	195.183
Σ54	480463.299	4202788.951	193.170
Σ55	480428.102	4202831.416	190.139

Πίνακας 7.1 – Σημεία ελέγχου εξωτερικών νεφών

και αντίστοιχα του εσωτερικού νέφους:

Κωδικός σημείου	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	246.886	183.763	192.52
2	242.362	188.396	192.51
3	240.528	186.725	192.52
4	236.364	190.966	192.52

Πίνακας 7.2 – Σημεία ελέγχου εσωτερικού νέφους

Επιπλέον, στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται συνολικά τα τελικά μέσα τετραγωνικά σφάλματα της γεωαναφοράς, με σκοπό την ευκολότερη μελέτη και σύγκριση.

Νέφος Σημείων/Σαρωτής	ZEB Horizon	BLK2GO
Εσωτερικό	0.003m	0.003m
Εξωτερικό (Μικρή Απόσταση)	0.043m	0.094m
Εξωτερικό (Μεγάλη Απόσταση)	0.057m	0.079m

Πίνακας 7.3 – Μέσα Τετραγωνικά Σφάλματα Γεωαναφοράς

Είναι φανερό ότι οι διαφορές στα σφάλματα των εξωτερικών σαρώσεων είναι σημαντικές και δεν μπορούν, προφανώς, να αποδοθούν μόνο στις αντιξοότητες των εξωτερικών σε σχέση με τις εσωτερικές σαρώσεις, που αναφέρθηκαν ήδη. Για το λόγο αυτό, στις υποενότητες 7.1.1 και 7.1.2 που ακολουθούν, θα σχολιαστούν, αναλυτικότερα, τόσο οι διαφοροποιήσεις στη διαδικασία της γεωαναφοράς για τον κάθε σαρωτή, όσο και οι λόγοι των διαφορών στα σφάλματα των εξωτερικών σαρώσεων, όπως αυτοί προέκυψαν από τη διαδικασία σύγκρισης των νεφών τους.

7.1.1. ZEB HORIZON

Για την γεωαναφορά των νεφών σημείων που προέκυψαν από τις σαρώσεις με τον σαρωτή ZEB HORIZON, έγινε χρήση των προγραμμάτων GeoSLAM Hub και PointCab Origins.

Αρχικά, οι σαρώσεις μεταφέρθηκαν από το καταγραφικό του σαρωτή σε περιβάλλον ηλεκτρονικού υπολογιστή, μέσω του GeoSLAM Hub. Αφού ολοκληρώθηκε η μεταφορά, έγινε εξαγωγή των σημείων αναφοράς (reference points) ως ξεχωριστό αρχείο .txt. Η ενέργεια αυτή πραγματοποιείται εντοπίζοντας το αρχείο της σάρωσης και εκτελώντας την εντολή Export => Reference Points (Επιλογή: with reference based offset).

Στη συνέχεια, έγινε εισαγωγή όλων των νεφών, διαδοχικά, στο πρόγραμμα PointCab Origins, αλλάζοντας τις παρακάτω μεταβλητές:

- Maximum point error: 5mm
- Single point filter distance: 0.5m

Η πρώτη ρύθμιση περιορίζει το μέγιστο σφάλμα που μπορούν να έχουν τα σημεία κατά την εγγραφή (Registration), ενώ η δεύτερη ρύθμιση περιορίζει την απόσταση που μπορούν να έχουν τα επιμέρους σημεία από το υπόλοιπο νέφος. Η επικείμενη γεωαναφορά πραγματοποιείται με αντιστοίχιση των σημείων αναφοράς (reference points) με τα αντίστοιχα σημεία ελέγχου (control points). Για την αντιστοίχιση γίνεται χρήση του εργαλείου Transform Calculator, το οποίο βρίσκεται στην καρτέλα Registration. Εντός της πλατφόρμας του εργαλείου, εισήχθη το αρχείο των reference points στο παράθυρο με ονομασία «PointCloud system», το αρχείο των control points στο παράθυρο με ονομασία «Reference System» και η ενέργεια ολοκληρώθηκε με την εντολή Find Constellations. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε για κάθε νέφος ξεχωριστά.

Όσον αφορά στην εξωτερική σάρωση με απόσταση αντικειμένου-σαρωτή περίπου 25 μέτρα, και που στο εξής θα αναφέρεται ως «μακρινή» σάρωση, οι στάσεις που είχαν προγραμματιστεί να σαρωθούν και να χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία ήταν οι Σ51, Σ54, Σ55, D137 και S388. Κατά την επεξεργασία, παρατηρήθηκε ότι, το σύστημα εντόπισε και κατέγραψε, λανθασμένα, κάποια σημεία ως reference points χωρίς να αποτελούν πραγματικές στάσεις. Οι θέσεις που αναγνωρίστηκαν ως σημεία αναφοράς χωρίς να βρίσκονται πάνω σε στάση, πιθανώς οφείλονται στην αργή σάρωση ή τη στιγμιαία στάση του χειριστή στο σημείο για την καλύτερη σάρωση του τοπίου. Τα σημεία αυτά, αφαιρέθηκαν από τη λίστα των reference points χειροκίνητα πριν τη γεωαναφορά του νέφους. Αναγνωρίστηκαν, επίσης, στάσεις που δεν θα σαρώνονταν βάσει του αρχικού πλάνου, αλλά λόγω της αργής μετάβασης επί του σημείου για την ανάγνωση του κωδικού της στάσης, κωδικοποιήθηκαν ως σημεία αναφοράς. Τέτοια περίπτωση αποτελούν οι στάσεις Σ38 και

Σ52, οι οποίες, όμως, λόγω της μικρής απόκλισης των συντεταγμένων εντοπισμού από τις πραγματικές διατηρήθηκαν στη λίστα. Τελικά, οι στάσεις που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι Σ38, Σ388, D137, Σ51, Σ52, Σ54 και Σ55 και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα που υπολογίστηκε ήταν περίπου 0.057m.

Όσον αφορά στη γεωαναφορά της εξωτερικής σάρωσης με απόσταση αντικειμένου-σαρωτή περίπου 5 μέτρα, και που στο εξής θα αναφέρεται ως «κοντινή» σάρωση, οι στάσεις που είχαν προγραμματιστεί να σαρωθούν ήταν και πάλι οι Σ51, Σ54, Σ55, D137 και Σ388. Το σύστημα δεν εντόπισε λανθασμένα σημεία αναφοράς ως στάσεις, σε αυτή την περίπτωση, είχε παρόλα αυτά ελλείψεις. Η έλλειψη αναφέρεται, συγκεκριμένα, στη στάση Σ51 η οποία δεν εντοπίστηκε, πιθανότατα λόγω ελλιπή χρόνου σάρωσης. Επιπλέον, παρουσιάστηκε πρόβλημα με τη στάση Σ54, η οποία ενώ εντοπίστηκε από το πρόγραμμα, είχε μεγάλη απόκλιση μεταξύ των συντεταγμένων εντοπισμού της και των πραγματικών. Η απόκλιση αυτή συνέβαλε σημαντικά στην αύξηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος και, έτσι, αποφασίστηκε η αφαίρεσή της από τη λίστα με σκοπό την ελαχιστοποίησή του. Η γεωαναφορά στο συγκεκριμένο νέφος έγινε, τελικά, με τη χρήση των στάσεων Σ388, D137 και Σ55. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας, υπολογίστηκε περίπου 0.043m.

Τέλος, για την εσωτερική σάρωση, εντοπίστηκαν επιτυχώς και οι 4 διαθέσιμες στάσεις πάνω στα βάρθρα. παράγοντας εμφανώς μικρότερο σφάλμα της τάξης των 0.003m.

Η διαφορά του σφάλματος στην εσωτερική σάρωση σε σύγκριση με τις εξωτερικές οφείλεται, εν μέρει, στις καλύτερες συνθήκες του περιβάλλοντος (έλλειψη ηλιοφάνειας, χαμηλότερη θερμοκρασία, έλλειψη υγρασίας) αλλά και στη δυνατότητα εναπόθεσης του σαρωτή πάνω στα βάρθρα με μεγαλύτερη ακρίβεια απ' ό,τι στις εξωτερικές στάσεις.

7.1.2. BLK2GO

Για τη μεταφορά των αρχείων από το καταγραφικό του σαρωτή σε περιβάλλον ηλεκτρονικού υπολογιστή και τη γεωαναφορά των νεφών σημείων που προέκυψαν από τις σαρώσεις με τον σαρωτή BLK2GO, έγινε χρήση του προγράμματος Cyclone Register 360. Τα δεδομένα αποθηκεύτηκαν ως αρχεία τύπου .b2g. Το αρχείο .b2g περιέχει τόσο το νέφος σε ανεπεξέργαστη μορφή, όσο και τα συνοδευόντα δεδομένα, όπως π.χ. εικόνες. Για τη γεωαναφορά χρησιμοποιήθηκαν οι στάσεις Σ54, Σ55, Σ388 και D137.

Αρχικά, εισήχθησαν ξεχωριστά τα αρχεία των σαρώσεων στο λογισμικό, ρυθμίζοντας τα παρακάτω:

- Register Using: Auto B&W Target
- Import Options: Import Images
- Trajectory Settings: Waypoints from GeoTag location(s) – Waypoint Interval: 5.00 m

Με την πρώτη ρύθμιση εντοπίζονται αυτόματα οι ασπρόμαυροι στόχοι που έχουν τοποθετηθεί και επισημαίνονται ξεχωριστά ως Targets. Με τη δεύτερη ρύθμιση εισάγονται οι εικόνες που έχουν καταγραφεί από τις κάμερες χαμηλής ανάλυσης του σαρωτή κατά τη διάρκεια των σαρώσεων. Τέλος, με την τρίτη ρύθμιση δημιουργούνται εικονικές θέσεις πλοήγησης στο νέφος, με τη μεταξύ τους απόσταση να ανέρχεται στα 5 μέτρα. Στις θέσεις

των εικονικών αυτών «στάσεων» δημιουργούνται, αυτόματα πανοραμικές εικόνες 360 μοιρών. Η απόσταση αυτή επιλέγεται από το χρήστη και απαιτείται αναλογικά περισσότερος χρόνος επεξεργασίας όσο πυκνότερες είναι οι θέσεις των πανοραμικών εικόνων.

Αφού ολοκληρωθεί η εισαγωγή του νέφους, επιλέγεται από τις ρυθμίσεις να χρωματιστεί το νέφος, κάνοντας χρήση των δεδομένων των εικόνων, για καλύτερη ερμηνεία των αντικειμένων. Επιπλέον, ορίζεται το Μέγιστο Σφάλμα Στόχου στα 5 μέτρα. Η ρύθμιση αυτή ορίζει το μέγιστο σφάλμα που μπορεί να έχει ο εντοπισμός ενός στόχου, και σε περίπτωση υπέρβασης του ορίου αυτού ο στόχος απορρίπτεται και δεν συμπεριλαμβάνεται στη διαδικασία της γεωαναφοράς. Ο λόγος που το όριο επιλέχθηκε να φτάνει τα 5 μέτρα είναι για να υπάρχει ευελιξία στις δοκιμές και να εξεταστεί η δυνατότητα του λογισμικού να εντοπίσει με ακρίβεια τους στόχους.

Για τη γεωαναφορά, αρχικά ελέγχονται οι αυτόματα εντοπισμένοι στόχοι για τυχόν αποκλίσεις, λανθασμένα εντοπισμένες στάσεις ή ελλείψεις. Για τον έλεγχο, η προβολή του νέφους πρέπει να γίνει στο Setup Cloud Viewer, μία εκ των τριών επιλογών προβολής των δεδομένων μέσα στο λογισμικό. Η πλοήγηση στις επιθυμητές θέσεις γίνεται με την επιλογή της κοντινότερης εικονικής θέσης (Waypoint) και η επεξεργασία των στόχων πραγματοποιείται με το εργαλείο Edit Targets. Αφού γίνει προσθήκη, αφαίρεση ή επανατοποθέτηση των στόχων, εισάγεται το αρχείο των στάσεων γνωστών συντεταγμένων ως σημεία ελέγχου (control points), σε μορφή .txt. Αφού ελεγχθεί η εγκυρότητά τους, εκτελείται η ενέργεια Apply Control με δεξί κλικ στο αρχείο με το όνομα του νέφους. Η ενέργεια αυτή, ουσιαστικά, αντιστοιχίζει τους στόχους με τα σημεία ελέγχου.

Όσον αφορά στην εξωτερική «κοντινή» σάρωση, εντοπίστηκε αυτόματα μόνο η στάση S55 και 2 λανθασμένοι στόχοι, οι οποίοι αφαιρέθηκαν, εκ των υστέρων, χειροκίνητα. Οι λανθασμένα εντοπισμένες στάσεις, σε αυτή την περίπτωση, οφείλονταν σε ασπρόμαυρες ζωγραφιές στους τοίχους του κτηρίου. Επιπλέον, προστέθηκαν χειροκίνητα οι στόχοι S388 και D137, ενώ επιλέχθηκε να μην χρησιμοποιηθεί η στάση S54, λόγω μεγάλης απόκλισης της θέσης από τη χειροκίνητη τοποθέτηση, με την πραγματική θέση της. Η χειροκίνητη τοποθέτηση ήταν ανεπιτυχής λόγω των διαφορετικών προβολών του στόχου από δύο διαφορετικές εικονικές στάσεις. Η γεωαναφορά πραγματοποιήθηκε, τελικώς, με τη χρήση 3 στάσεων και μέσο τετραγωνικό σφάλμα, σύμφωνα με την τελική αναφορά, 0.094m.

Σχετικά με την εξωτερική «μακρινή» σάρωση, εντοπίστηκαν αυτόματα οι στόχοι S55 και D137. Εντοπίστηκε, επίσης, ένας λανθασμένος στόχος σε τοίχο του κτηρίου και πάλι λόγω ασπρόμαυρης ζωγραφιάς και στη συνέχεια αφαιρέθηκε χειροκίνητα. Τέλος, προστέθηκε χειροκίνητα ο στόχος S388 και επιχειρήθηκε να προστεθεί και ο στόχος στην στάση S54, αφού φαινομενικά υπήρχε καλύτερη ορατότητα, αλλά και πάλι λόγω μεγάλης απόκλισης δεν χρησιμοποιήθηκε στη γεωαναφορά. Η γεωαναφορά έγινε, τελικά, με τη χρήση 3 στάσεων και με μέσο τετραγωνικό σφάλμα 0.079m.

Όσον αφορά στην εσωτερική σάρωση, οι στόχοι που εντοπίστηκαν αυτόματα περιείχαν όλες τις επιθυμητές στάσεις αλλά και πολλά σημεία που επισημάνθηκαν λανθασμένα ως στάσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι εργασίες πραγματοποιήθηκαν στην αίθουσα ελέγχου του Λαμπαδαρείου, και υπήρχε πληθώρα διάσπαρτων ασπρόμαυρων στόχων στο χώρο. Οι στόχοι που δεν αντιστοιχούσαν σε βάρθρα αφαιρέθηκαν χειροκίνητα και η γεωαναφορά ολοκληρώθηκε με μέσο τετραγωνικό σφάλμα 0.003m, αισθητά μικρότερο από τις εξωτερικές σαρώσεις.

Ένα γενικό πρόβλημα, που εντοπίστηκε εκ των υστέρων, ήταν οι αποκλίσεις μεταξύ των πανοραμικών εικόνων και του νέφους. Αυτό οδήγησε σε δυσκολία τοποθέτησης ή ελέγχου των στόχων με βάση το κέντρο τους, ειδικά αν αυτή γίνεται χειροκίνητα. Η απόκλιση, πιθανόν, να προέρχεται από την κλίση που δινόταν στον σαρωτή κατά την προσέγγιση στους στόχους ώστε να σαρωθούν, λαμβάνοντας υπόψη τη θέση των στόχων πάνω στα βάρθρα και στο έδαφος κάτω από τον σαρωτή. Η δυνατότητα να δοθεί κλίση στο σαρωτή κατά τη σάρωση υπάρχει, βάσει των οδηγιών χρήσης, αλλά όσο περισσότερο αποκλίνει ο σαρωτής από την κατακόρυφη θέση αρχικοποίησης της σάρωσης, τόσο πιο πιθανό είναι να εισαχθούν σφάλματα στον εντοπισμό της θέσης του. Επιπλέον, οι μεγάλες κλίσεις αλλοιώνουν την απεικόνιση των στόχων στις φωτογραφίες που συλλέγονται κατά τη διάρκεια της σάρωσης. Ως αποτέλεσμα, οι θέσεις των στόχων, και ειδικά των κέντρων τους, αποτελούσαν σε πολλές εικονικές λήψεις «τυφλό» πεδίο για το συγκεκριμένο όργανο.

Η διαφορά του τελικού σφάλματος της εσωτερικής σάρωσης σε σύγκριση με τις εξωτερικές, οφείλεται τόσο στις καλύτερες συνθήκες ορατότητας (ομοιόμορφος ψυχρός φωτισμός), όσο και στην διαδρομή. Στις εξωτερικές σαρώσεις οι στόχοι τοποθετήθηκαν στο έδαφος, άρα η κλίση που έπρεπε να δοθεί στο σαρωτή για να καταγραφούν ήταν μεγάλη, ενώ σαρώθηκαν βαδίζοντας πλευρικά της στάσης, γεγονός που ισοδυναμεί με περιορισμένες λήψεις. Αντιθέτως, στην εσωτερική σάρωση υπήρξε μια κυκλική πλοήγηση μέσα στην αίθουσα με αποτέλεσμα να υπάρχουν πολλαπλές λήψεις του στόχου από διαφορετικές οπτικές γωνίες. Επιπλέον, οι στόχοι ήταν τοποθετημένοι σε βάρθρα, άρα η κλίση που έπρεπε να δοθεί στο σαρωτή για την καταγραφή τους από τις κάμερες ήταν αισθητά μικρότερη. Τέλος, η θέση των βάρθρων ήταν πλεονεκτική γιατί απέκλειε την πιθανότητα να βρεθούν οι στόχοι στο τυφλό σημείο σάρωσης της συσκευής.

7.2 Σύγκριση νεφών σημείων

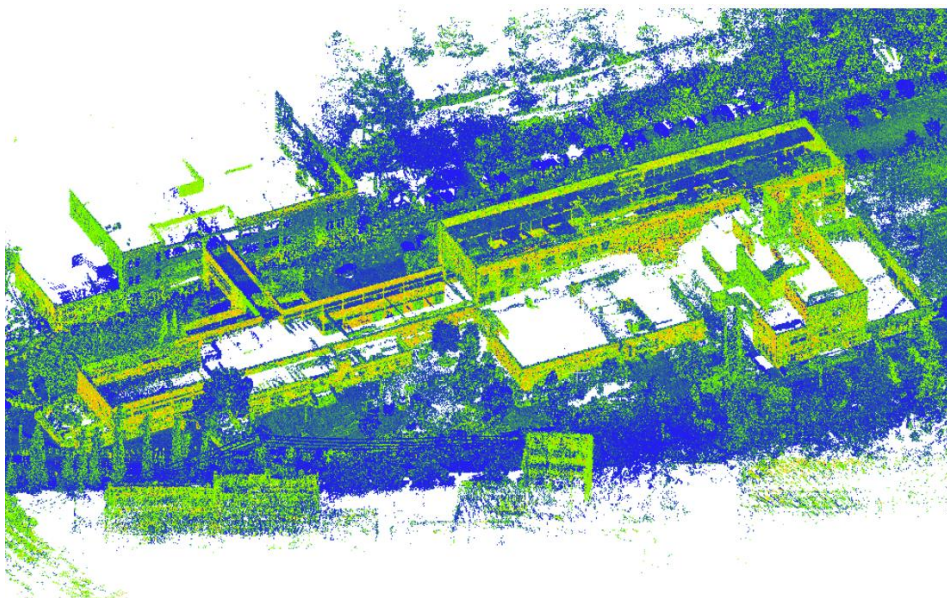
Η σύγκριση των νεφών πραγματοποιήθηκε σε ζεύγη, αξιοποιώντας το λογισμικό CloudCompare και πιο συγκεκριμένα το εργαλείο M3C2 Distance. Τα χαρακτηριστικά του εργαλείου και η επικείμενη χρήση του για τη διαδικασία της σύγκρισης παρουσιάζονται αναλυτικότερα παρακάτω, για κάθε ζεύγος ξεχωριστά.

7.2.1 Εξωτερικά «μακρινά» νέφη

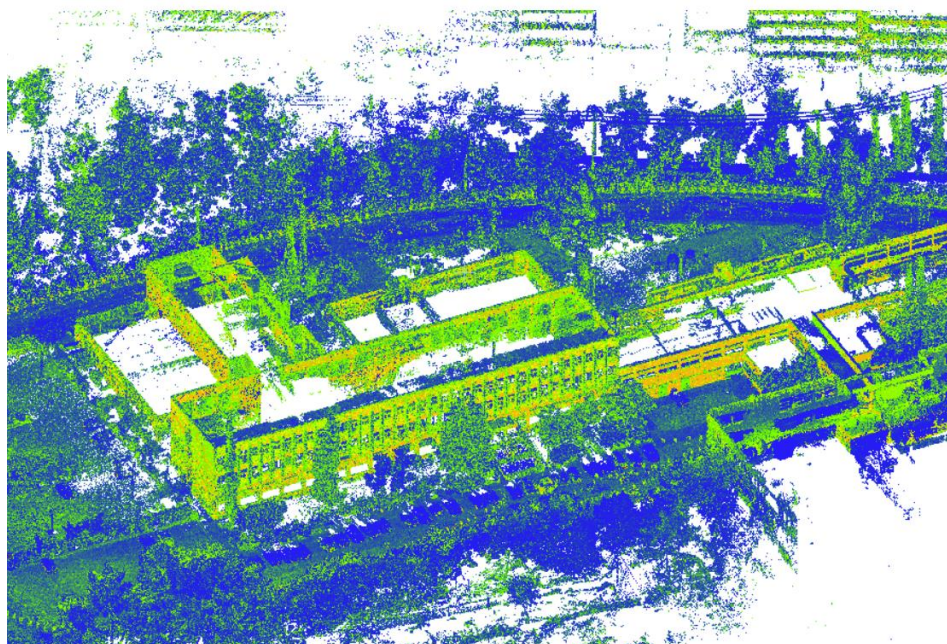
Παρατηρώντας τα νέφη ξεχωριστά, οι κύριες διαφορές τους βρίσκονται στην εμβέλεια σάρωσης, τον αριθμό των σημείων και χαρακτηριστικά όπως το χρώμα. Το νέφος που δημιουργήθηκε από τα δεδομένα του σαρωτή ZEB Horizon είχε συνολικά 108,268,641 σημεία και εμφανώς εκτενέστερη, χωρικά, καταγραφή. Το νέφος που δημιουργήθηκε από το σαρωτή BLK2GO κατέγραψε, αντίστοιχα, 69,337,994 σημεία και σε αντίθεση με το νέφος του ZEB Horizon ήταν χρωματισμένο. Η διαφορά στον αριθμό των σημείων, παρόλο που ο σαρωτής BLK2GO σαρώνει περισσότερα σημεία ανά δευτερόλεπτο, αποδίδεται κυρίως στη διαφορά εμβέλειας, στην οποία υπερτερεί ο σαρωτής ZEB Horizon, στο πεδίο σάρωσης του BLK2GO που περιορίζει την πυκνότητα σημείων στο έδαφος, και τις μικρές διαφορές στο χρόνο σάρωσης.

Παρακάτω, φαίνονται στιγμιότυπα από το νέφος του ZEB Horizon. Είναι φανερό ότι ο σαρωτής έχει καταγράψει πολλή πληροφορία στο ευρύτερο περιβάλλον του κτηρίου, όπως τις παλιές φοιτητικές εστίες και ειδικότερα τους ανώτερους ορόφους. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει το βεληνεκές σάρωσης που δίνει ο κατασκευαστής, λαμβάνοντας υπόψη την απόσταση του Λαμπαδαρείου από τα κτήρια των εστιών.

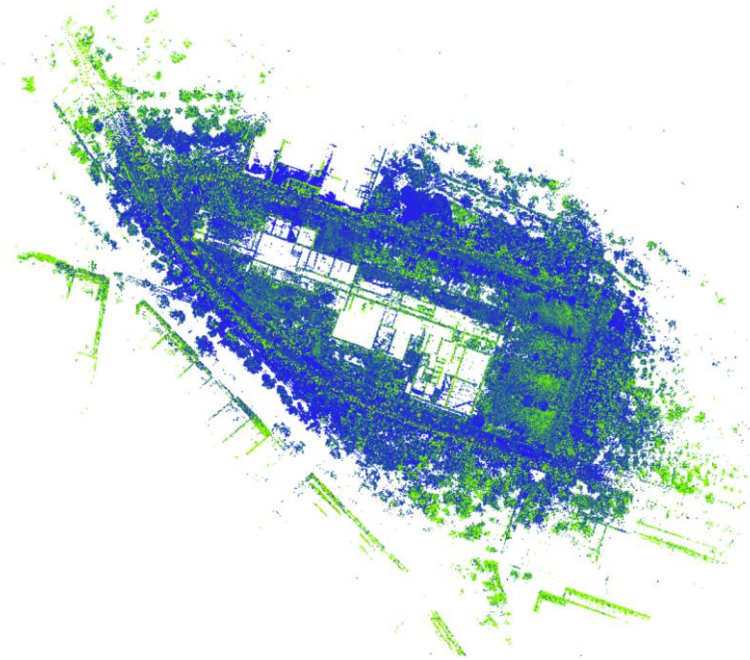
Όσο για το ίδιο το Λαμπαδάρειο, φαίνονται, επίσης, όλοι οι όροφοι του κτηρίου, αλλά και στοιχεία του δώματος. Το νέφος είναι ικανοποιητικά πυκνό και τα όρια διακριτά, παρόλη την πυκνή βλάστηση που περιβάλλει το κτήριο. Όπως ήταν αναμενόμενο, παρατηρείται αυξημένος θόρυβος γύρω από αντικείμενα με υψηλή ανακλαστικότητα όπως παράθυρα και γυάλινες πόρτες, λόγω διάθλασης του laser.



Εικόνα 7.1 – Νέφος σημείων ZEB Horizon (Νοτιοδυτική Προβολή)

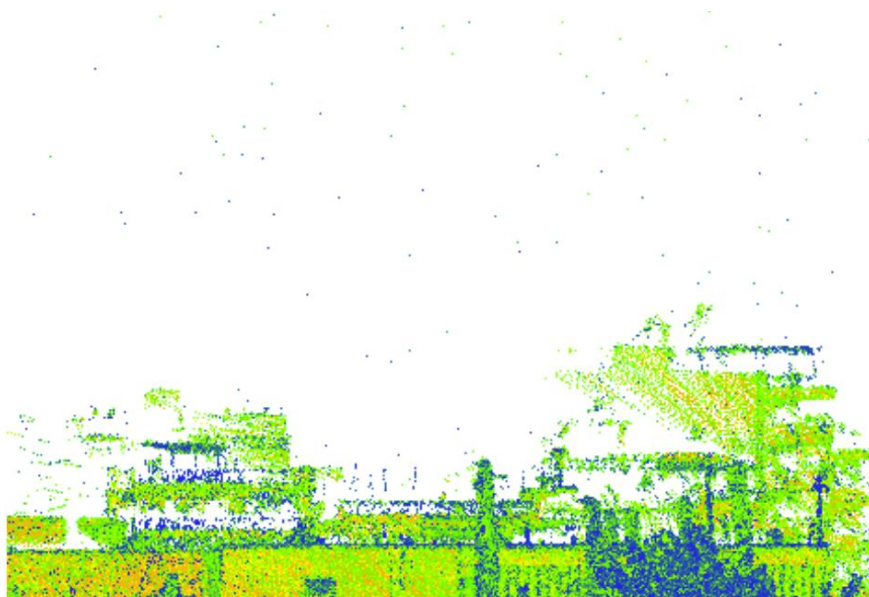


Εικόνα 7.2 – Νέφος σημείων ZEB Horizon (Βορειοανατολική Προβολή)



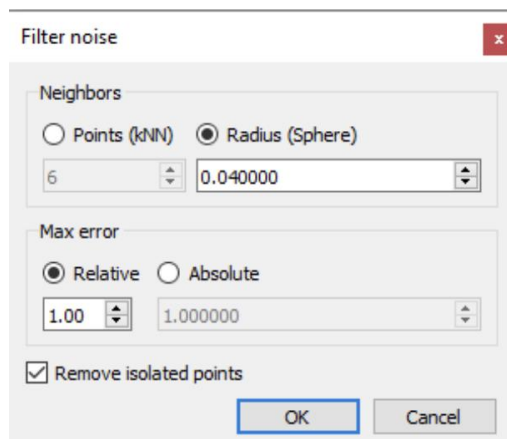
Εικόνα 7.3 – Νέφος σημείων ZEB Horizon (Κάτοψη)

Αξίζει να σημειωθεί, ότι την ημέρα της εξωτερικής μακρινής σάρωσης με τον σαρωτή ZEB Horizon, η ατμόσφαιρα είχε αυξημένη υγρασία και, για ένα χρονικό διάστημα, η σάρωση ήταν σε εξέλιξη ενώ έβρεχε ανεπαίσθητα. Αυτό αντικατοπτρίζεται καθαρά στα αποτελέσματα, προσθέτοντας επιπλέον θόρυβο στο νέφος.



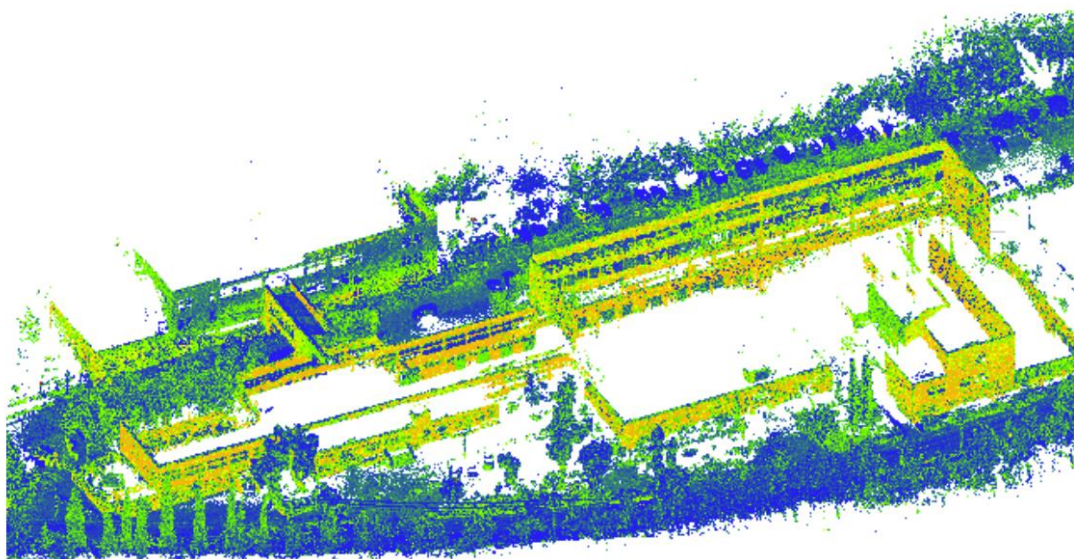
Εικόνα 7.4 – Θόρυβος από βροχή ZEB Horizon (N. Όψη)

Για την αντιμετώπιση του θορύβου, αλλά και το γενικότερο καθαρισμό του νέφους από περιττή πληροφορία, εφαρμόστηκε φίλτρο αφαίρεσης θορύβου (Filter Noise), ρυθμίζοντας τις παρακάτω παραμέτρους. Η ακτίνα ορίστηκε στα 4 εκατοστά μετά από δοκιμές, ώστε το νέφος να καθαριστεί επαρκώς, αλλά να μην χαθεί σημαντική πληροφορία που θα αλλοίωνε τα αποτελέσματα.

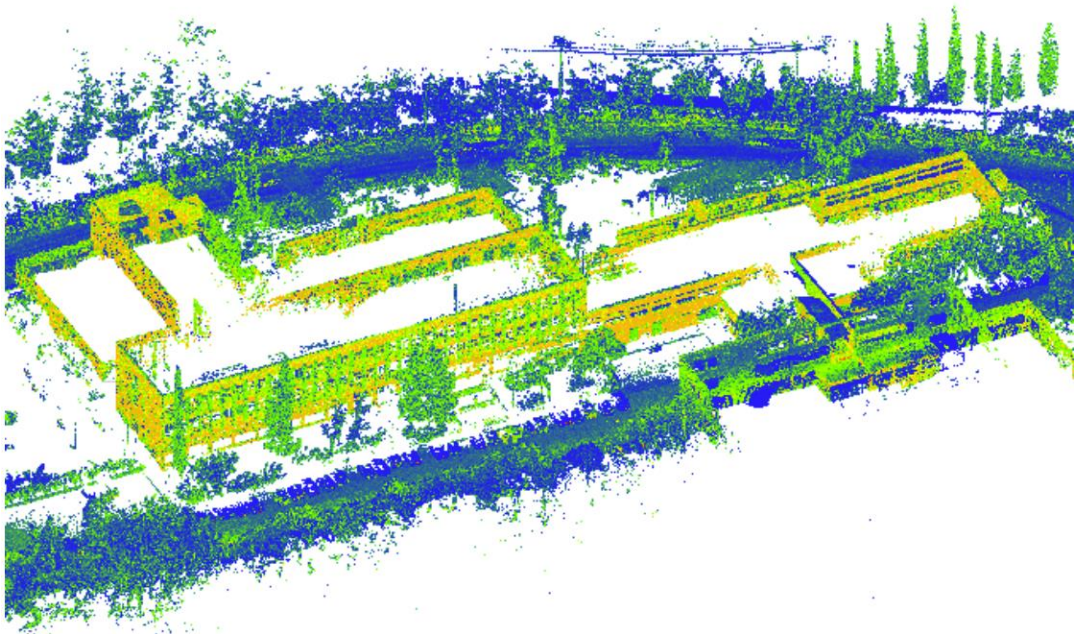


Εικόνα 7.5 – Φίλτρο αφαίρεσης θορύβου

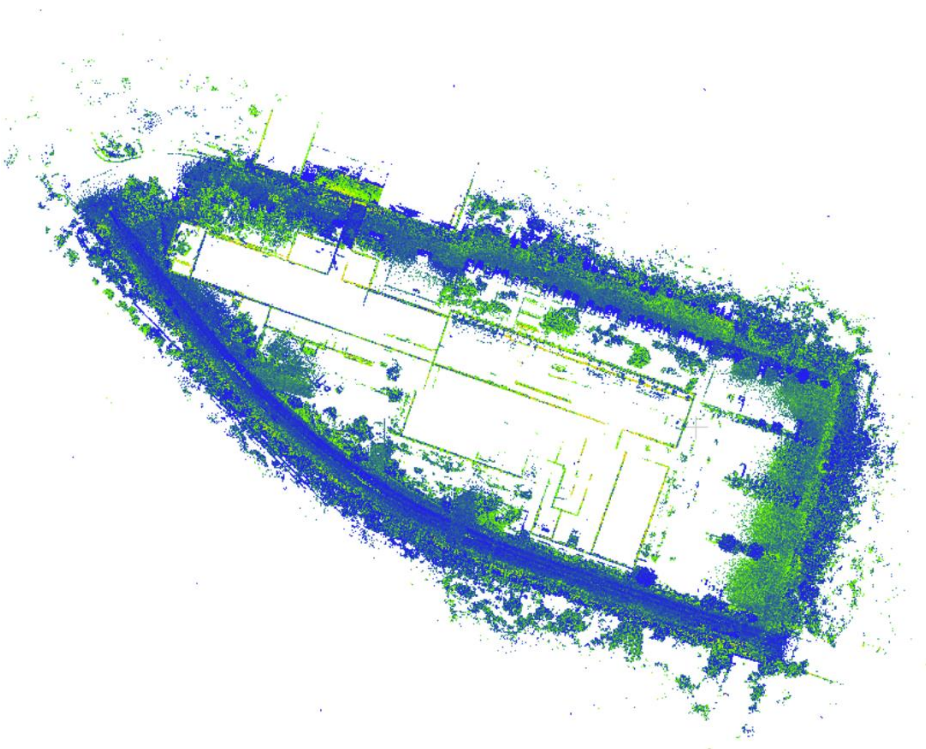
Το προϊόν που παράχθηκε ήταν ένα πιο καθαρό νέφος, με 60,089,131 σημεία, διατηρώντας ικανοποιητική πυκνότητα και έκταση, και επιτυγχάνοντας σημαντική μείωση των σημείων που ήταν αποτέλεσμα βροχής ή άλλος θόρυβος. Παρόλα αυτά, φαίνεται ότι λόγω του αυξημένου θορύβου γύρω από την ακανόνιστη θαμνώδη βλάστηση, αφαιρέθηκαν μαζικά τμήματά της, αφήνοντας κενά και στο επίπεδο του εδάφους, περιμετρικά της βάσης του κτηρίου. Δεν ισχύει το ίδιο για πιο ψηλή βλάστηση, όπως δέντρα, πιθανόν λόγω πιο συγκεκριμένου σχήματος.



Εικόνα 7.6 – Νέφος σημείων ZEB Horizon με φίλτρο θορύβου (Νοτιοδυτική Προβολή)



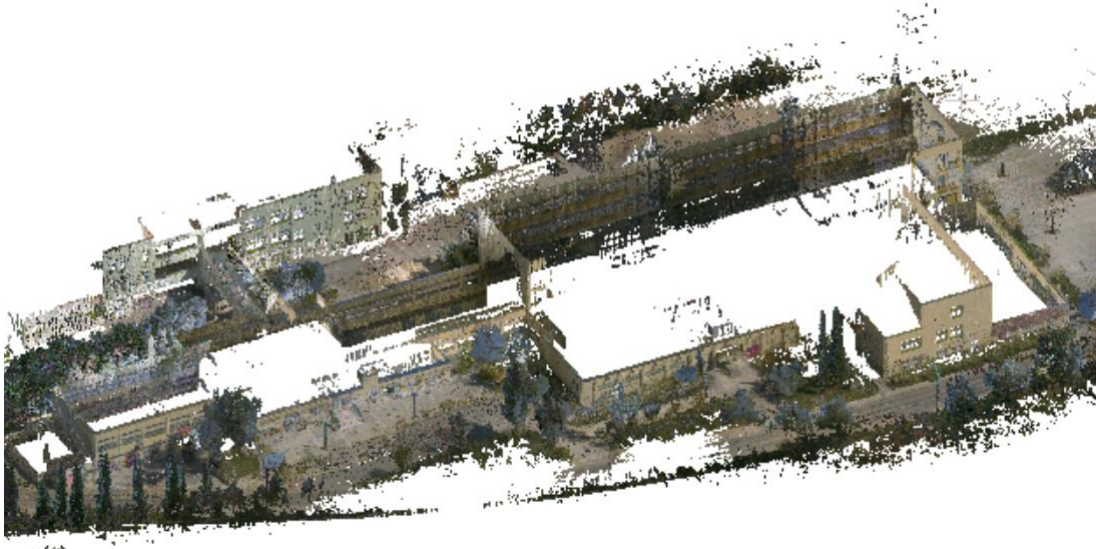
Εικόνα 7.7 – Νέφος σημείων ZEB Horizon με φίλτρο θορύβου (Βορειοανατολική Προβολή)



Εικόνα 7.8 – Νέφος σημείων ZEB Horizon με φίλτρο θορύβου (Κάτοψη)

Όσον αφορά στο αντίστοιχο νέφος του σαρωτή BLK2GO, είναι φανερό, και αναμενόμενο με βάση το βεληνεκές του σαρωτή, ότι τα σημεία δεν εκτείνονται τόσο σε απόσταση, και οι ανώτεροι όροφοι του κτηρίου έχουν αραιή πληροφορία.

Σε σύγκριση με το νέφος του ZEB Horizon, παρατηρούνται, εξ αρχής, κενά στο έδαφος, που οφείλονται πιθανώς στο κατακόρυφο πεδίο σάρωσης του σαρωτή, που εκτείνεται στις 270 μοίρες. Έτσι, δεν καταγράφεται πληροφορία κάτω από τον σαρωτή και η δημιουργία του επιπέδου του εδάφους εξαρτάται από τη σάρωση περιμετρικά από το όργανο. Σε πολλές περιπτώσεις αυτό δεν είναι εφικτό λόγω εμποδίων, όπως η φιγούρα του χειριστή, και δημιουργούνται κενά στο νέφος. Το γεγονός ότι το νέφος έχει ραδιομετρική πληροφορία βοηθά σημαντικά στην αναγνώριση των αντικειμένων, αφού το κάνει πιο ρεαλιστικό. Θόρυβος υπάρχει, φυσικά, και σε αυτή την περίπτωση γύρω από επιφάνειες υψηλής ανακλαστικότητας, παρόλα αυτά φαίνεται πιο περιορισμένος.



Εικόνα 7.9 – Νέφος σημείων BLK2GO (Νοτιοδυτική Προβολή)



Εικόνα 7.10 – Νέφος σημείων BLK2GO (Βορειοανατολική Προβολή)



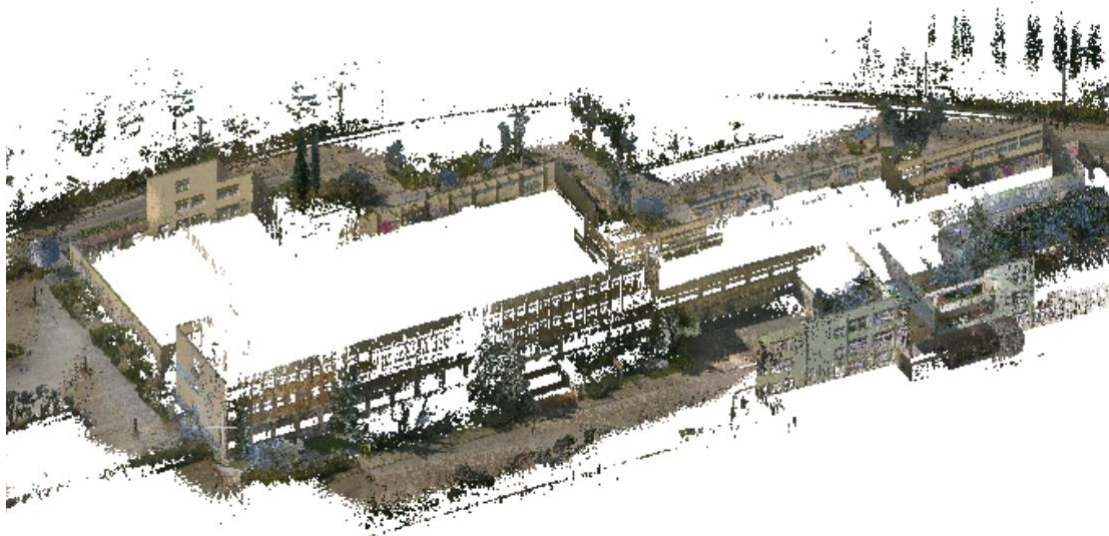
Εικόνα 7.11 – Νέφος σημείων BLK2GO (Κάτοψη)

Η ίδια διαδικασία για τη μείωση του θορύβου, μέσω εφαρμογής φίλτρου, εφαρμόστηκε και σε αυτό το νέφος, διατηρώντας τις ίδιες παραμέτρους. Τα αποτελέσματα ήταν και πάλι τα επιθυμητά, με μείωση του θορύβου και περιορισμό της περιττής πληροφορίας, ενώ τα τελικά σημεία ήταν στο σύνολο τους 44,500,260. Σε αυτή την περίπτωση, ο θόρυβος από τους θάμνους περιορίστηκε χωρίς να δημιουργηθούν κενά στο έδαφος και το κτήριο διαχωρίζεται πιο επιτηχημένα από τη χαμηλή βλάστηση που το περιβάλλει. Αντιθέτως με το

νέφος του ZEB Horizon, αφαιρέθηκε μεγαλύτερο κομμάτι θορύβου της ψηλότερης βλαστησης, αφού παρατηρούνται κενά σε κομμάτια του κτηρίου που καλύπτονταν από δέντρα. Στιγμιότυπα του φιλτραρισμένου νέφους φαίνονται παρακάτω.



Εικόνα 7.12 – Νέφος σημείων BLK2GO με φίλτρο θορύβου (Νοτιοδυτική Προβολή)



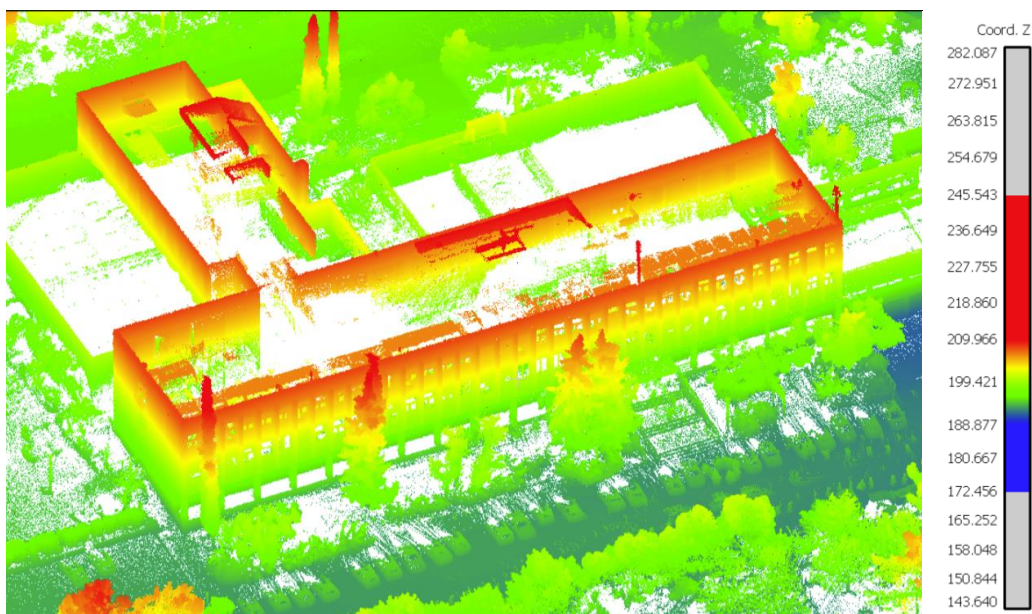
Εικόνα 7.13 – Νέφος σημείων BLK2GO με φίλτρο θορύβου (Βορειοανατολική Προβολή)



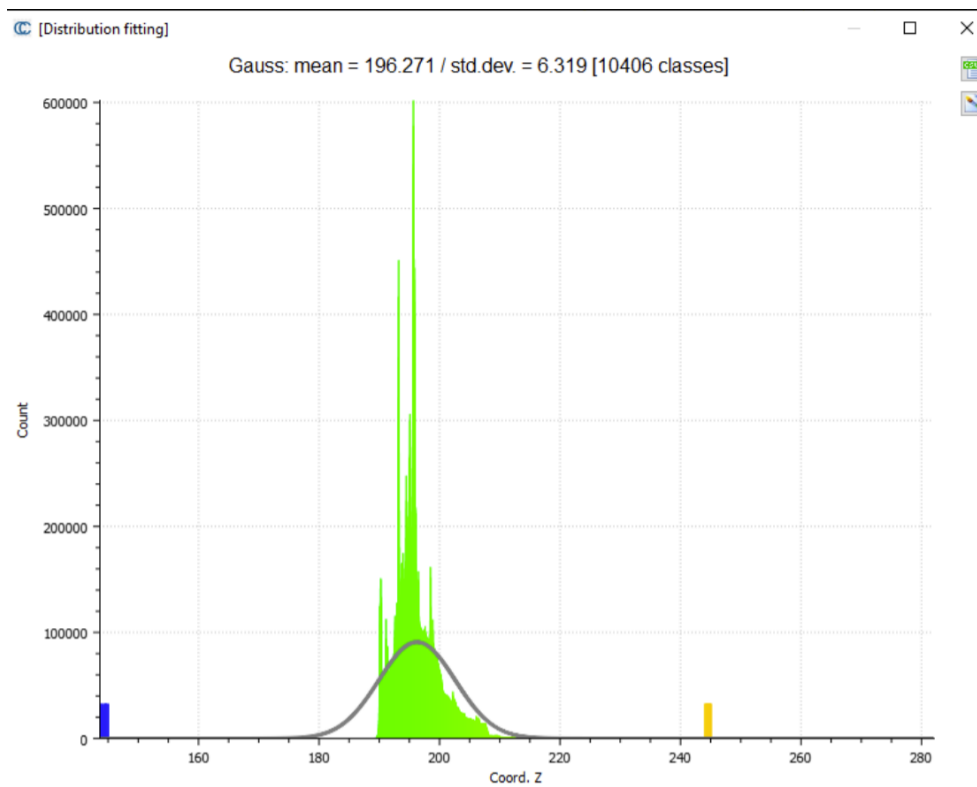
Εικόνα 7.14 – Νέφος σημείων BLK2GO με φίλτρο θορύβου (Κάτοψη)

Φαίνεται ότι στην περίπτωση του ZEB Horizon αφαιρέθηκε περίπου το 45% των σημείων από το φίλτρο θορύβου, ενώ στην περίπτωση του BLK2GO αφαιρέθηκε περίπου το 35%. Αυτό δείχνει ότι υπήρξε λιγότερος θόρυβος στο νέφος του BLK2GO, που είναι ένα λογικό συμπέρασμα δεδομένης της βροχής στο νέφος του ZEB Horizon.

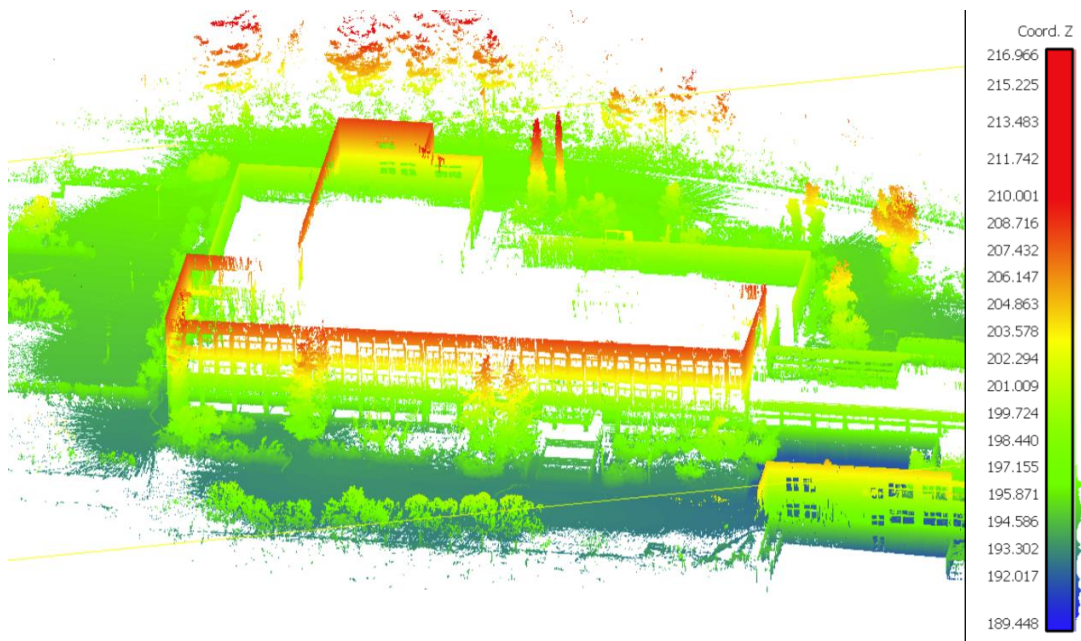
Αφού η εξωτερική μακρινή σάρωση προγραμματίστηκε εξ αρχής για να αξιολογηθεί η ικανότητα των σαρωτών να σαρώσουν τα ανώτερα τμήματα του κτηρίου, θεωρήθηκε σκόπιμο να δημιουργηθούν, επιπλέον, μοντέλα υψομέτρων των νεφών και να γίνει σύγκριση αυτών. Τα μοντέλα δημιουργήθηκαν με την εντολή Tools – Export Coordinates to SF – Z. Συμπληρωματικά, του μοντέλου υψομέτρων έγινε και υπολογισμός της κανονικής κατανομής και εξαγωγή των αντίστοιχων διαγραμμάτων.



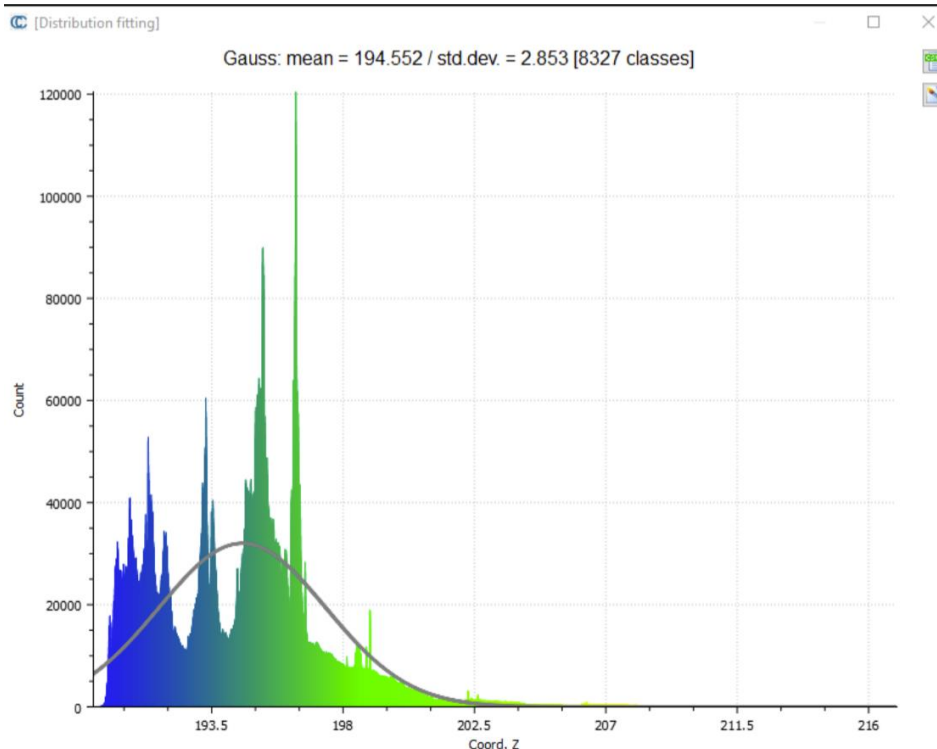
Εικόνα 7.15 – Μοντέλο υψομέτρων ZEB Horizon



Εικόνα 7.16 – Κανονική κατανομή μοντέλου υψομέτρων ZEB Horizon



Εικόνα 7.17 – Μοντέλο υψομέτρων BLK2GO



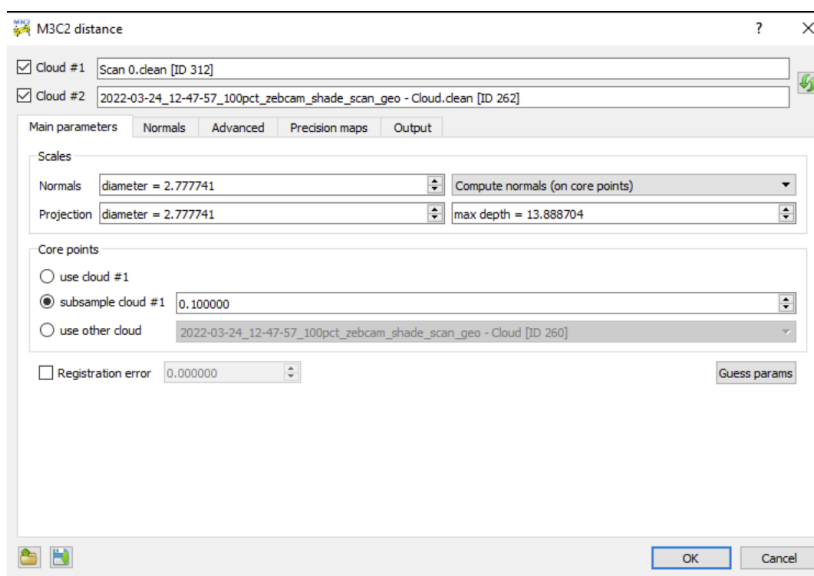
Εικόνα 7.18 – Κανονική κατανομή μοντέλου υψομέτρων BLK2GO

Επιβεβαιώνεται τόσο από τα στιγμιότυπα των μοντέλων όσο και με τη βοήθεια της κανονικής κατανομής των υψομέτρων των σημείων, η διαφορά στην εμβέλεια σάρωσης των δύο σαρωτών, κατά τουλάχιστον 60 m. Ο μέσος όρος της κατανομής είναι ελαφρώς μεγαλύτερος στην περίπτωση του ZEB Horizon, αφού επηρεάζεται από τα σημεία μεγαλύτερων υψομέτρων. Μεγαλύτερη είναι, επίσης, και η τυπική απόκλιση για το συγκεκριμένο σαρωτή, που πιθανώς οφείλεται στα διάσπαρτα σημεία που ανιχνεύτηκαν λόγω βροχής, αλλά και στην ακανόνιστη βλάστηση που έχει ανιχνευτεί σε μεγαλύτερα ποσοστά.

Αφού έγινε η προεπεξεργασία που περιγράφηκε στα δύο νέφη, χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο M32C Distance (CloudCompare, n.d.), το οποίο αποτελεί μία επέκταση του λογισμικού CloudCompare. Σκοπός του εργαλείου είναι να μελετώνται ποιοτικά και μαζικά οι διαφορές μεταξύ δύο νεφών. Ως αρχική προσέγγιση, το εργαλείο θεωρεί ένα από τα δύο νέφη ως βάση και, στη συνέχεια, υπολογίζονται οι ευκλείδειες αποστάσεις των σημείων του δεύτερου νέφους ως προς το πρώτο. Το νέφος που επιλέχθηκε ως βάση, σε αυτή την περίπτωση είναι το νέφος του BLK2GO. Η επιλογή του νέφους βάσης δεν επηρεάζει ουσιαστικά την επεξεργασία και δεν αλλάζει ποιοτικά τα αποτελέσματα. Η μόνη αλλαγή που παρατηρείται από την επιλογή του νέφους βάσης είναι στα πρόσημα των τιμών των διαφορών μεταξύ των δύο νεφών, επειδή το νέφος σύγκρισης «αφαιρείται» από το νέφος βάσης.

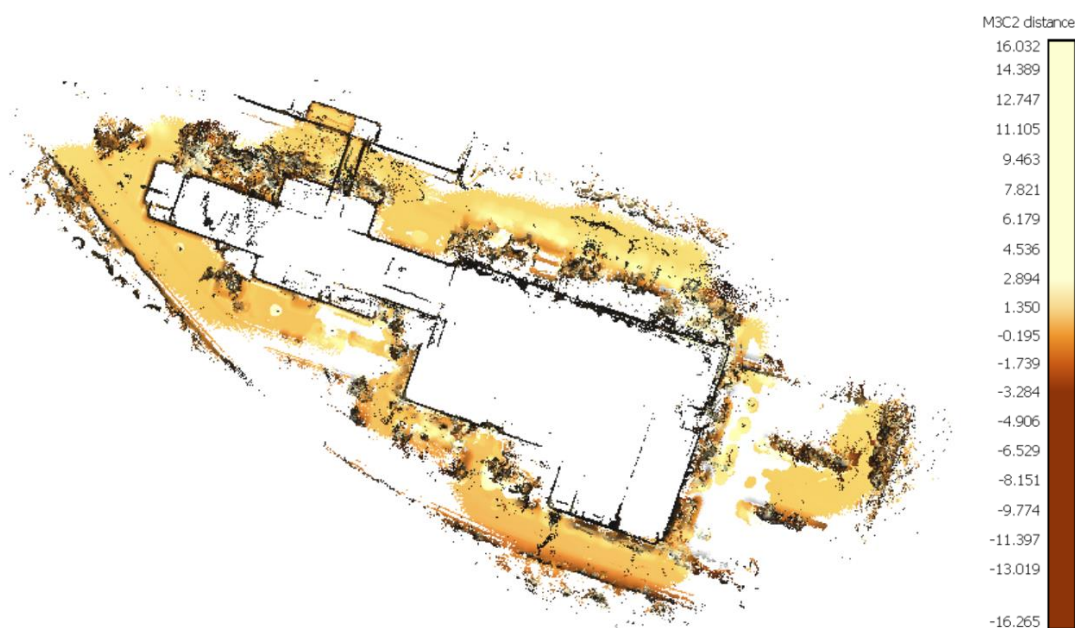
Οι ρυθμίσεις του εργαλείου παρέχουν πληθώρα επιλογών για το πώς θα γίνει η περαιτέρω επεξεργασία για τη σύγκριση των νεφών. Μία από τις επιλογές που αξιοποιήθηκε ήταν η υποδειγματοληψία ή αραίωση του νέφους βάσης. Η διαδικασία αυτή αποτελεί ένα επαναλαμβανόμενο μοτίβο και πραγματοποιείται δεδομένης μιας ακτίνας που απαιτείται να ορίσει ο χειριστής. Στην ουσία, όσα σημεία βρίσκονται, κάθε φορά, εντός της ορισμένης ακτίνας απορρίπτονται, ενώ αυτά που βρίσκονται σε απόσταση μεγαλύτερη της ακτίνας διατηρούνται. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται φιλτράροντας όλα τα σημεία διαδοχικά και τα

σημεία που, τελικά, διατηρούνται, ονομάζονται «core points». Σκοπός της υποδειγματοληψίας είναι να αραιώνεται το νέφος και να επιταχύνονται οι υπολογισμοί, καθώς η επικείμενη σύγκριση μεταξύ των δύο νεφών γίνεται, πλέον, μόνο με τα διατηρούμενα σημεία (core points). Για τα δύο εξωτερικά νέφη, η ακτίνα ορίστηκε στα 10cm, λόγω της μεγάλης πυκνότητάς τους. Οι υπόλοιπες ρυθμίσεις, όπως η ρύθμιση των παραμέτρων για τον υπολογισμό των κάθετων διανυσμάτων των core points (Normals), παρέμειναν στις τιμές που προτείνονται από το λογισμικό (default).

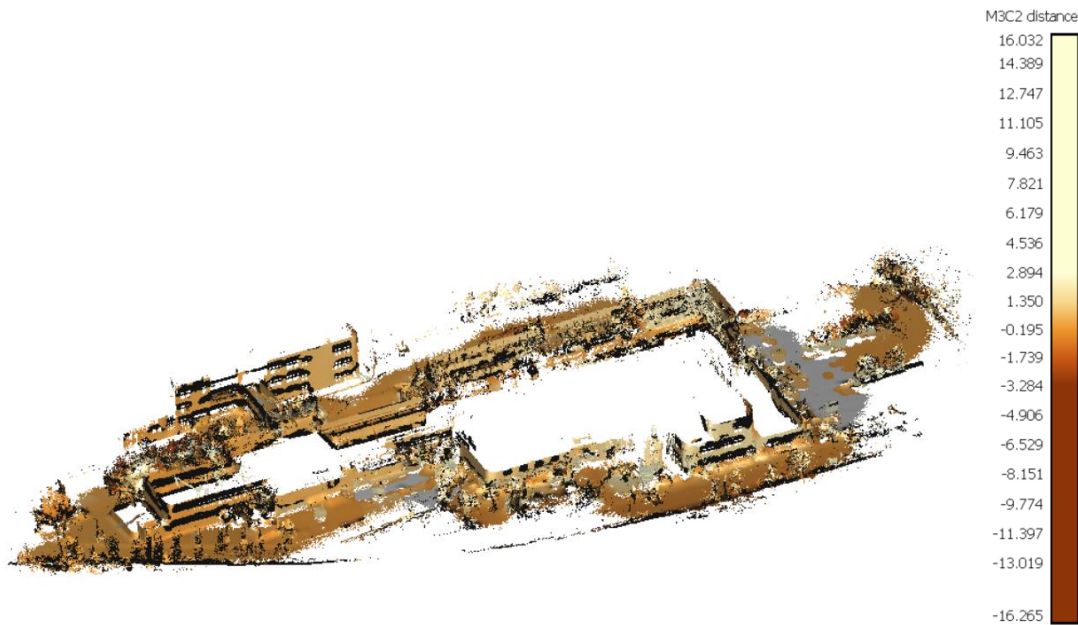


Εικόνα 7.19 – Παράμετροι εργαλείου M3C2 Distance

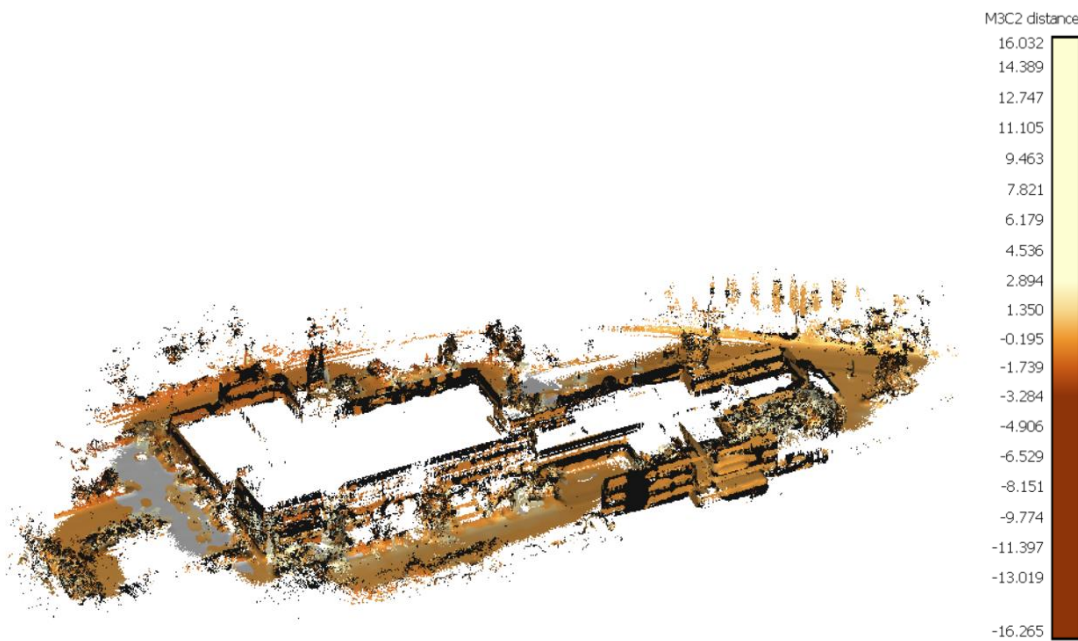
Ένα από τα παράγωγα του εργαλείου, είναι ένα νέφος σημείων που αντικατοπτρίζει τις διαφορές των δύο αρχικών νεφών, υπολογίζοντας τις αποστάσεις μεταξύ των σημείων τους. Οι διαφορές παρουσιάζονται σε μέτρα.



Εικόνα 7.20 – Διαφορές νεφών (Κάτοψη)



Εικόνα 7.21 – Διαφορές νεφών (Νοτιοδυτική Προβολή)

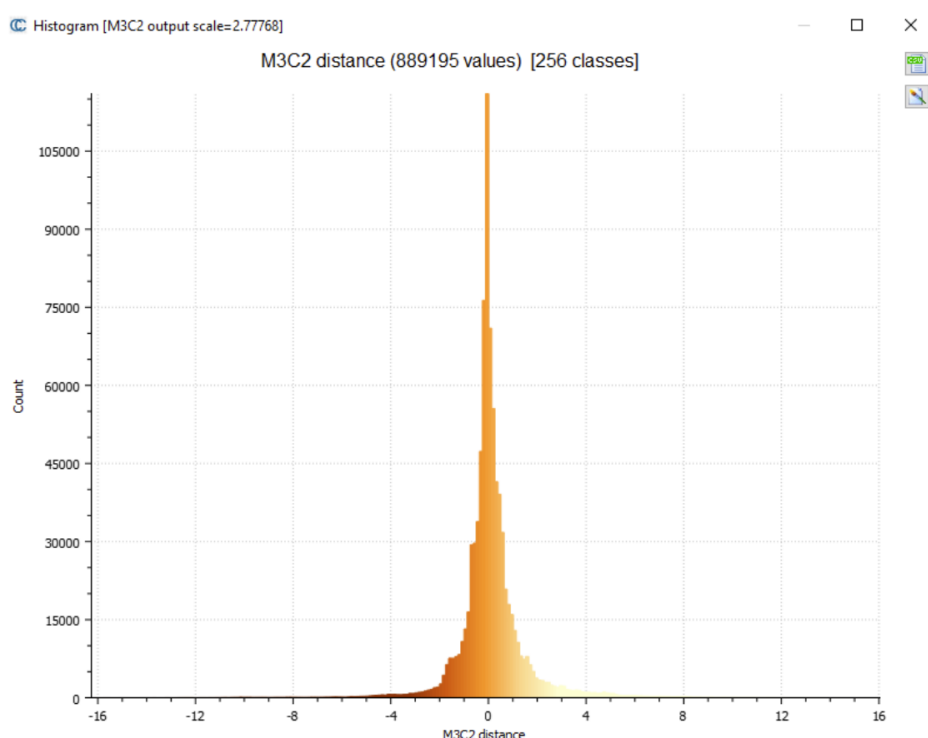


Εικόνα 7.22 – Διαφορές νεφών (Βορειοανατολική Προβολή)

Οι γκριζες περιοχές, που δεν περιγράφονται στην χρωματική κλίμακα τους νέφους διαφορών, αφορούν τα σημεία του πρώτου νέφους που δεν αντιστοιχίζονται στο δεύτερο. Οι υπόλοιπες περιοχές, που περιγράφονται χρωματικά, αφορούν τις αποστάσεις των σημείων του νέφους «βάσης», δηλαδή του BLK2GO, με των σημείων που ο αλγόριθμος θεώρησε ως αντίστοιχα στο νέφος «σύγκρισης», δηλαδή του του ZEB Horizon.

Όπως φαίνεται από τα στιγμιότυπα, οι διαφορές είναι μεγαλύτερες, στα άκρα του νέφους. Αυτό οφείλεται, εν μέρει, στη διαφορετική εμβέλεια σάρωσης, αλλά και στην πιθανή στρόφη του πρώτου νέφους ως προς το δεύτερο. Οι αποκλίσεις λόγω στρόφης μεγαλώνουν προς τα

άκρα, άρα δικαιολογείται το σταθερό μοτίβο διαφορών στα πιο απομακρυσμένα σημεία του νέφους που παρήγαγε το εργαλείο. Αναμενόμενες αποκλίσεις υπάρχουν, επίσης, στα ψηλότερα τμήματα του κτηρίου, λόγω διαφορών στην πυκνότητα και έκταση των δύο νεφών. Διαφορές παρατηρούνται περιμετρικά του κτηρίου, κοντά στη βάση, λόγω των διαφορετικών αποτελεσμάτων από την αφαίρεση του θορύβου που οφειλόταν στη θαμνώδη βλάστηση. Η παρουσία διαφορών γύρω από τη βλάστηση παρατηρείται σταθερά σε όλο το νέφος και φαίνεται καθαρά σε όλες τις όψεις του κτηρίου. Στο επίπεδο του εδάφους παρατηρούνται, επίσης, περιοχές μεγαλύτερων διαφορών μεταξύ των νεφών, λόγω των κενών ή της αραιής πληροφορίας σε ένα εκ των δύο. Αξίζει να σημειωθεί ότι εφόσον το νέφος του ZEB Horizon «αφαιρέθηκε» από το νέφος του BLK2GO, που λειτούργησε ως νέφος βάσης, οι αρνητικές τιμές αφορούν τα τμήματα του νέφους του ZEB Horizon που έχουν περισσότερη πληροφορία και, αντίστοιχα, οι θετικές τιμές αντιπροσωπεύουν περιοχές μεγαλύτερης πυκνότητας δεδομένων για το νέφος του BLK2GO.

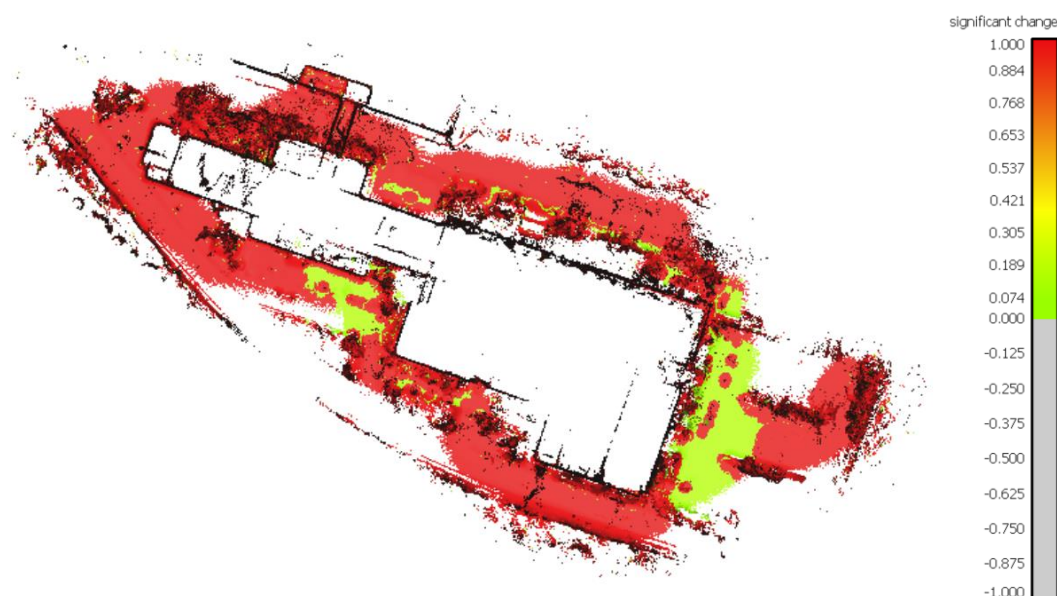


Εικόνα 7.23 – Κανονική κατανομή διαφορών

Τα αποτελέσματα της κανονικής κατανομής των αποστάσεων μεταξύ των δύο νεφών δείχνουν ότι η οι τιμές σε ένα μεγάλο μέρος του νέφους σύγκρισης κυμαίνονται μεταξύ του μηδέν και του ενός μέτρου, με την πλειονότητα να αφορά αποστάσεις των 50cm. Αυτό σημαίνει ότι σε ορισμένες περιοχές υπάρχουν σημαντικές διαφορές στα προϊόντα των δύο σαρωτών. Στα άκρα του διαγράμματος οι τιμές φτάνουν έως τα 16m, αποτέλεσμα που, όμως, δεν είναι αντιπροσωπευτικό. Το πιο πιθανόν είναι να προέκυψε από μεμονωμένα σημεία θορύβου λόγω βροχής, των οποίων η απόσταση μετρήθηκε από τα κοντινότερα δυνατά σημεία που μπορούσαν να αντιστοιχηθούν στο δεύτερο νέφος. Επιπλέον, πρέπει να ληφθεί υπόψη και η έλλειψη πληροφορίας σε μεμονωμένες περιοχές και η αντιστοιχίση όσων σημείων θεωρήθηκαν από τον αλγόριθμο πραγματικά και όχι θόρυβος, με σημεία του άλλου νέφους, λανθασμένα. Τέλος, σημαντικό σφάλμα στον υπολογισμό των αποστάσεων μεταξύ αντίστοιχων σημείων εισάγει και το σφάλμα της γεωαναφοράς.

Εφόσον υπάρχουν τέτοιου είδους ανακρίβειες, η σύγκριση των δύο νεφών θα γίνει παράλληλα με τα υπόλοιπα προϊόντα που παράγει το εργαλείο M3C2 Distance, ώστε το τελικό αποτέλεσμα να είναι πιο εμπειριστωμένο. Εκτός από το νέφος των διαφορών με βάση την απόσταση, το εργαλείο παράγει δύο ακόμα προϊόντα. Το πρώτο είναι το νέφος «Significant Change», που προσφέρει έναν άλλο τρόπο να ελεγχθεί το μέγεθος και η αξιοπιστία των διαφορών μεταξύ των δύο νεφών. Η επιλογή αυτή, είναι ένα μέσο αξιολόγησης της πιθανότητας να αντιστοιχεί η απόσταση μεταξύ των σημείων των δύο νεφών σε πραγματική αλλαγή ή όχι. Αυτό, πρακτικά, σημαίνει ότι ο αλγόριθμος αξιολογεί αν η εκάστοτε απόσταση που υπολόγισε προέρχεται από αντίστοιχα σημεία στα δύο νέφη ή αν πρόκειται για σφάλμα λόγω κενών, θορύβου ή διαφοράς εμβέλειας σάρωσης. Οι αποστάσεις εντός ενός ορίου, που καθορίζει ο αλγόριθμος με βάση το σύνολο των μετρήσεων, θεωρούνται πραγματική αλλαγή, ενώ οι αποστάσεις πάνω από αυτό το όριο θεωρούνται σφάλματα. Η κλίμακα, σε αυτή την περίπτωση, κυμαίνεται από το μηδέν (η απόσταση δεν αποτελεί πραγματική αλλαγή) έως το ένα (η απόσταση αποτελεί πραγματική αλλαγή).

Όπως φαίνεται παρακάτω, ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του συγκεκριμένου προϊόντος αναγνωρίζει την πλειονότητα των αποστάσεων ως πραγματικές μεταβολές. Αυτές παρουσιάζονται με βαθύ κόκκινο. Ξεχωρίζουν παρόλα αυτά, ως σφάλματα, οι αποστάσεις που προέκυψαν από περιοχές με παντελή έλλειψη πληροφορίας σε ένα εκ των δύο νεφών. Οι περιοχές αυτές φαίνονται με ανοιχτό πράσινο. Στο ενδιάμεσο, υπάρχουν, επίσης, περιοχές με μικρή πιθανότητα να μην αποτελούν πραγματικές μεταβολές. Οι περιοχές αυτές έχουν χρωματιστεί με πιο ανοιχτό κόκκινο και καλύπτουν κυρίως τμήματα στη βάση του κτηρίου, στις άκρες του νέφους και γύρω από τη βλάστηση. Η αμφιβολία για την αξιοπιστία των διαφορών στις περιοχές αυτές, προέρχεται από το γεγονός ότι υπάρχουν αυξημένα επίπεδα θορύβου και αραιή πληροφορία σε ένα εκ των δύο ή και στα δύο νέφη. Εκεί, η αντιστοίχιση των σημείων δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως αξιόπιστη και κατ'επέκταση ο υπολογισμός των αποστάσεων μεταξύ των σημείων αυτών δεν είναι αντιπροσωπευτικός.



Εικόνα 7.24 – Significant Change (Κάτοψη)

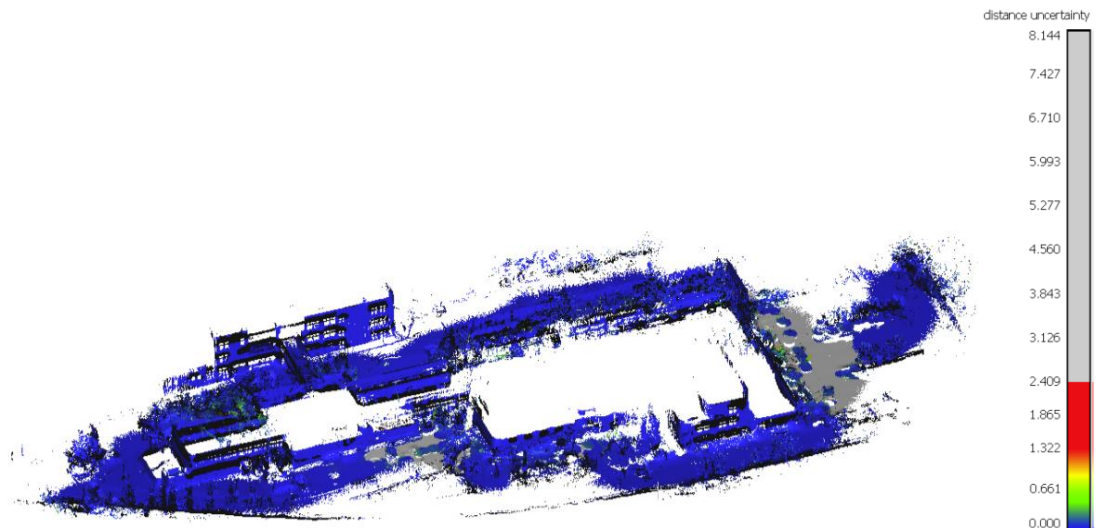


Εικόνα 7.25 – Significant Change (Νοτιοδυτική Προβολή)



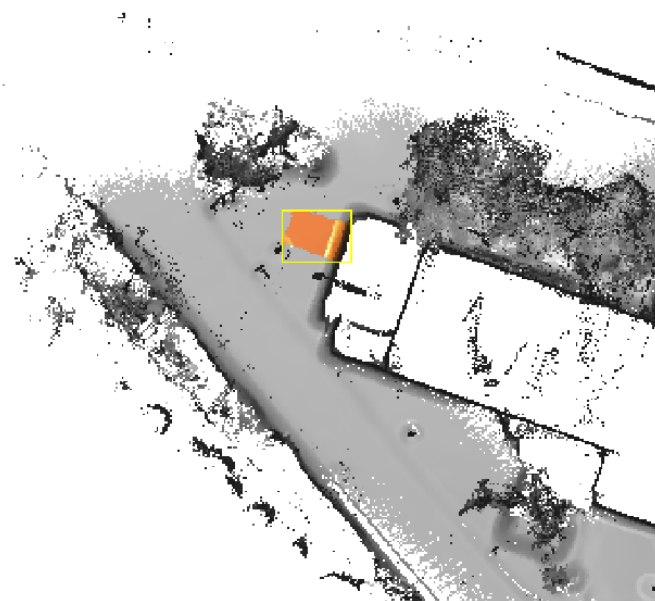
Εικόνα 7.26 – Significant Change (Βορειοανατολική Προβολή)

Το τελευταίο προϊόν που παράγεται από το εργαλείο είναι το νέφος «Distance Uncertainty», που περιγράφει την αβεβαιότητα των υπολογισμών των αποστάσεων μεταξύ των νεφών. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω στιγμιότυπο, το νέφος αυτό επιβεβαιώνει τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα προηγούμενα δύο προϊόντα. Οι μεγάλες αβεβαιότητες, της τάξης των 20cm, βρίσκονται σε περιοχές στα άκρα του νέφους και σε περιοχές με αυξημένο θόρυβο, όπως κοντά σε παράθυρα και γύρω από τη βλάστηση. Στο υπόλοιπο νέφος η πλειονότητα των τιμών των αβεβαιοτήτων κυμαίνεται από το μηδέν έως τα 5cm. Για το συγκεκριμένο προϊόν παρατίθεται μόνο το στιγμιότυπο με τις πιο εμφανείς αβεβαιότητες, που φαίνονται με ανοιχτό πράσινο.



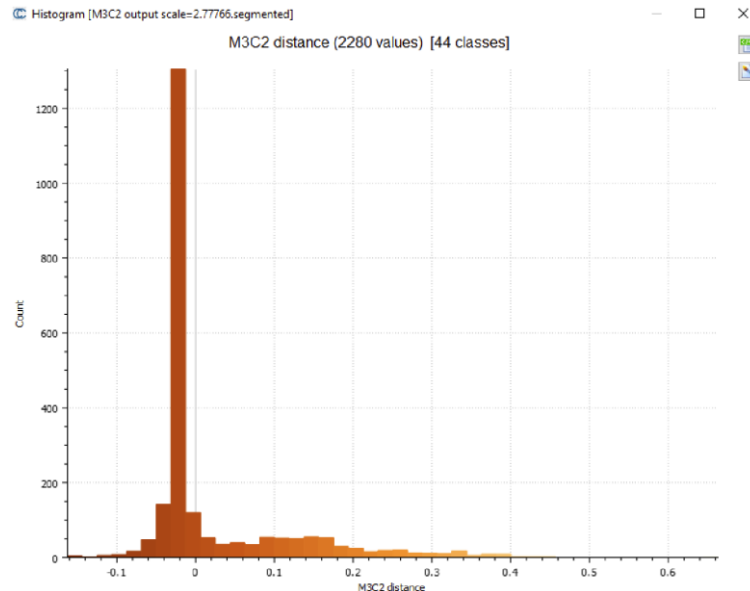
Εικόνα 7.27 – Distance Uncertainty

Για την ολοκλήρωση της σύγκρισης των δύο εξωτερικών «μακρινών» νεφών και την επιβεβαίωση της θεωρίας ότι οι μεγάλες διαφορές δεν είναι αντιπροσωπευτικές όλου του νέφους αλλά παράγωγα θορύβου, θα εξεταστεί ανεξάρτητα ένα τμήμα του νέφους που έχει σαρωθεί επιτυχημένα και από τους δύο σαρωτές. Σκοπός αυτού του ελέγχου είναι να φανεί η τάξη των πραγματικών διαφορών στα δύο νέφη, χωρίς να επηρεάζονται τα αποτελέσματα από χονδροειδή σφάλματα. Το τμήμα που επιλέχθηκε να ελεγχθεί αποτελεί κομμάτι του τοίχου στον εξωτερικό χώρο του κυλικείου της Σχολής, στη σάρωση του οποίου δεν μεσολαβεί βλάστηση, δεν αποτελείται από υλικά υψηλής ανακλαστικότητας, δεν σαρώθηκε με μεγάλη γωνία σάρωσης και είναι αρκετά χαμηλό ώστε να βρίσκεται εντός εμβέλειας και για τους δύο σαρωτές.



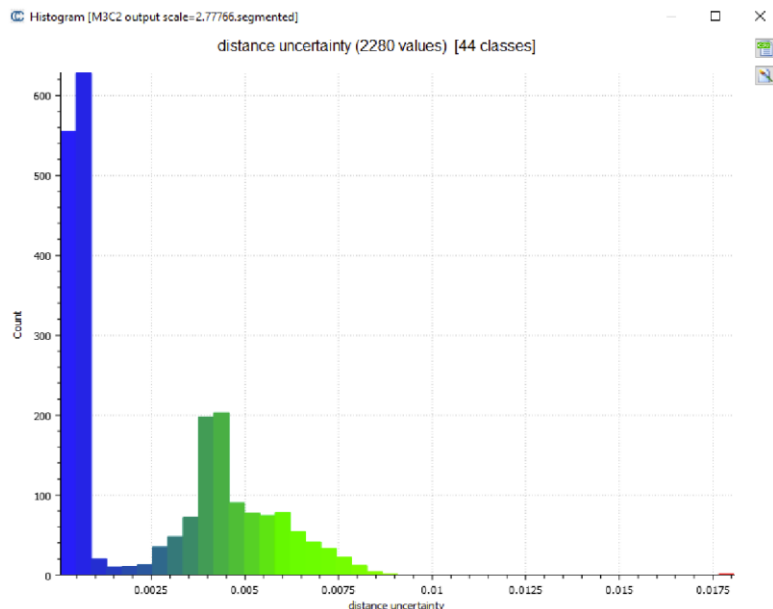
Εικόνα 7.28 – Διαφορές τμήματος νεφών

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα της κανονικής κατανομής, που αναφέρεται μόνο στο συγκεκριμένο τμήμα, η πλειονότητα των τιμών περιορίζεται σε διαφορές της τάξης των 5cm, ενώ ελάχιστες φτάνουν σε μεγαλύτερες διαφορές της τάξης των 30-40cm. Σε καμία περίπτωση δεν φαίνεται οι διαφορές να αγγίζουν τις τάξεις των μέτρων, όπως φάνηκε στη σύγκριση του συνόλου των σημείων από τα δύο νεφη.



Εικόνα 7.29 – Κανονική κατανομή διαφορών

Τέλος, όσον αφορά στις αβεβαιότητες στο συγκεκριμένο τμήμα του νέφους, αυτές δεν φαίνεται να ξεπερνούν, στην πλειονότητά τους, το 1cm, επαληθεύοντας τη θεωρία ότι σε καθαρά, από άποψη θορύβου, τμήματα οι διαφορές μεταξύ των νεφών είναι πολύ μικρότερες.

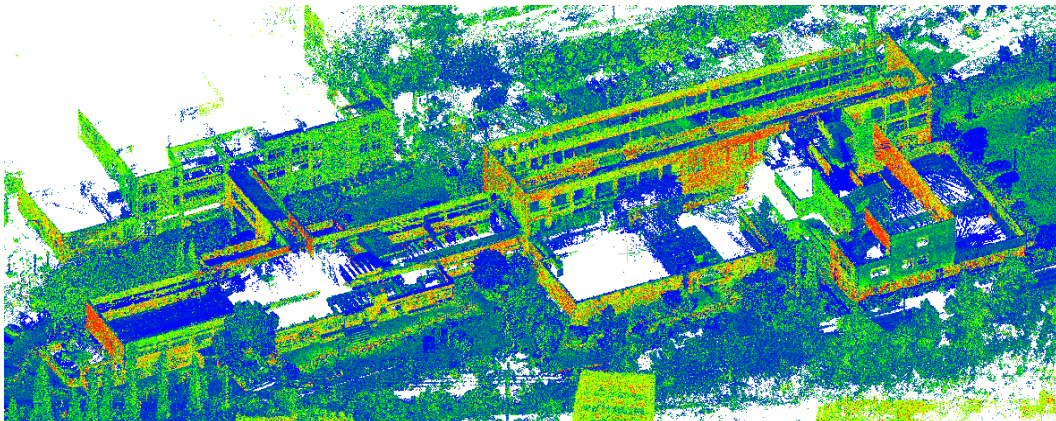


Εικόνα 7.30 – Διάγραμμα αβεβαιοτήτων

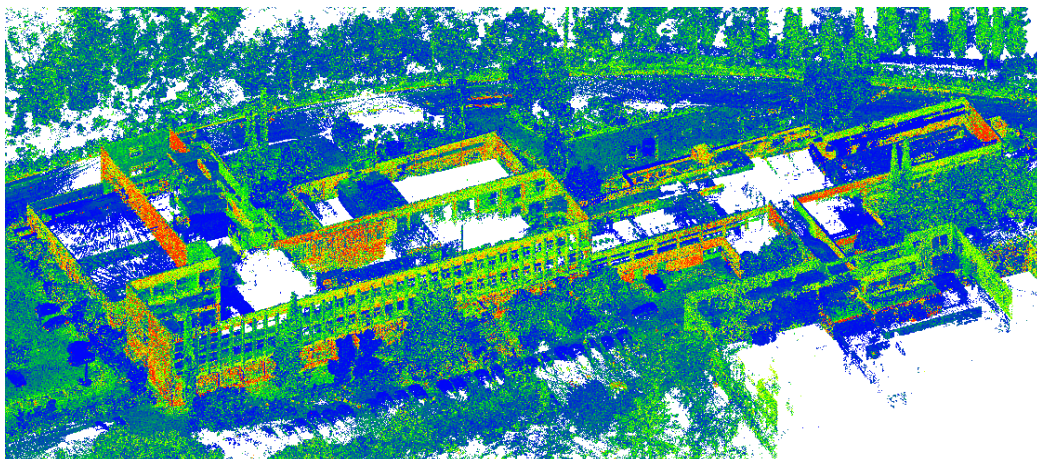
7.2.2 Εξωτερικά «κοντινά» νέφη

Ο σκοπός των κοντινών εξωτερικών σαρώσεων ήταν η αξιολόγηση της ικανότητας των σαρωτών να καταγράψουν χαρακτηριστικά του κτηρίου με ικανοποιητική πυκνότητα και λεπτομέρεια, αλλά και να παρατηρηθεί η ποιότητα καταγραφής επιφανειών υψηλής ανακλαστικότητας. Επιπλέον, θα αξιολογηθεί κατά πόσο επηρεάστηκε η ακρίβεια των σαρώσεων από την γωνία σάρωσης, σε τμήματα που η απόσταση μεταξύ σαρωτή και κτηρίου ήταν μικρή.

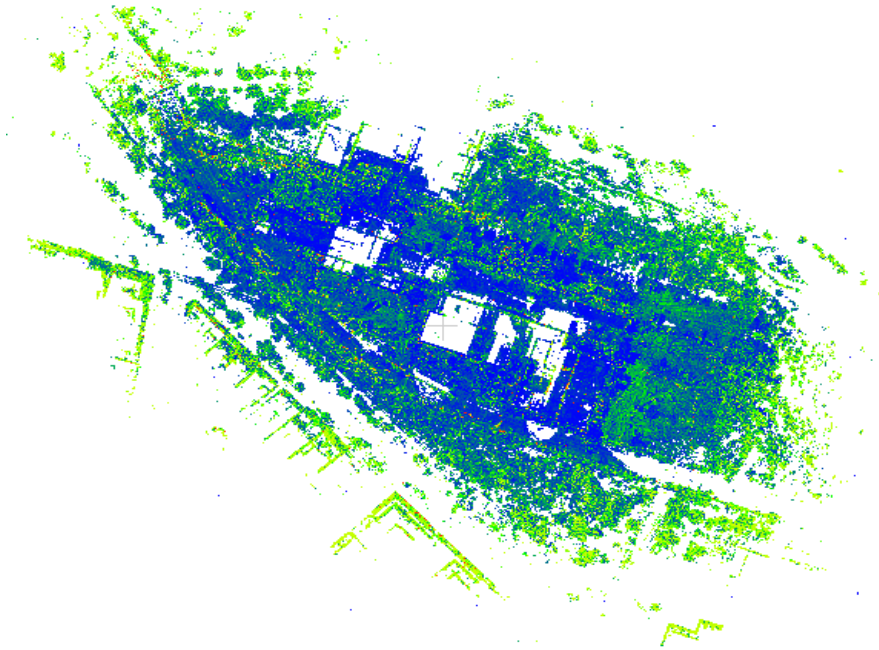
Το νέφος που δημιουργήθηκε από τα δεδομένα του σαρωτή ZEB Horizon είχε συνολικά 219,095,035 σημεία. Είναι φανερά πιο πυκνό το περίγραμμα του κτηρίου, σε σχέση με την μακρινή σάρωση, και μπορούν να διαχωριστούν ευκολότερα οι λεπτομέρειες του. Φαίνεται, επίσης, αυξημένη η πληροφορία στο εσωτερικό του, λόγω της εγγύτερης, σε παράθυρα και γυάλινες πόρτες, σάρωσης. Όπως ήταν αναμενόμενο, υπάρχουν, και εδώ, αυξημένα ποσοστά θορύβου γύρω από τη βλάστηση και τις γυάλινες επιφάνειες, τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά του κτηρίου. Τα σημεία στους ανώτερους ορόφους του κτηρίου είναι αραιά κατανεμημένα, ενώ δεν διακρίνεται καθόλου το δώμα. Τέλος, έχουν καταγραφεί, και σε αυτή τη σάρωση, οι παλιές φοιτητικές εστίες με την εξαίρεση των ανώτερων ορόφων τους.



Εικόνα 7.31 – Νέφος σημείων ZEB Horizon (Νοτιοδυτική Προβολή)

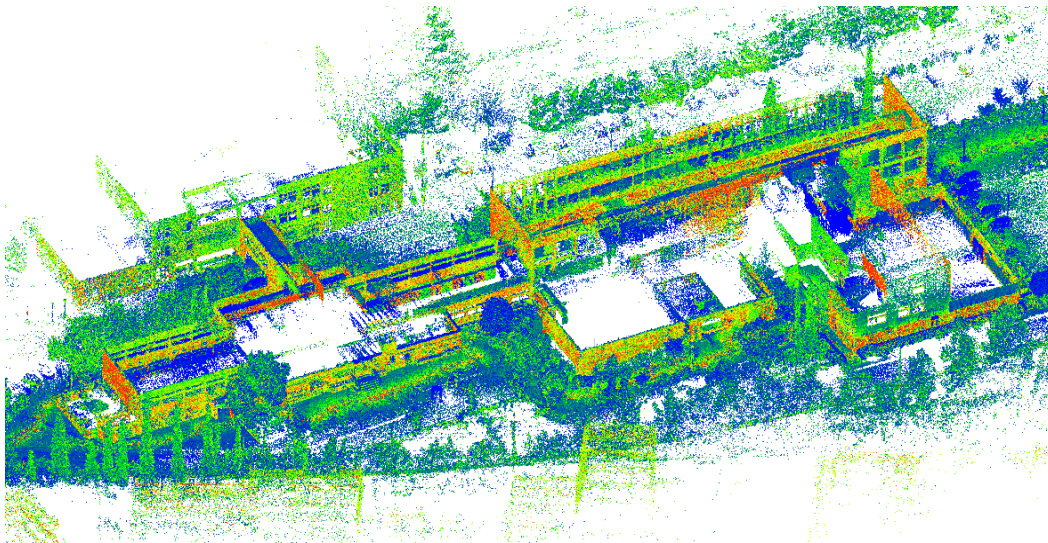


Εικόνα 7.32 – Νέφος σημείων ZEB Horizon (Βορειοανατολική Προβολή)

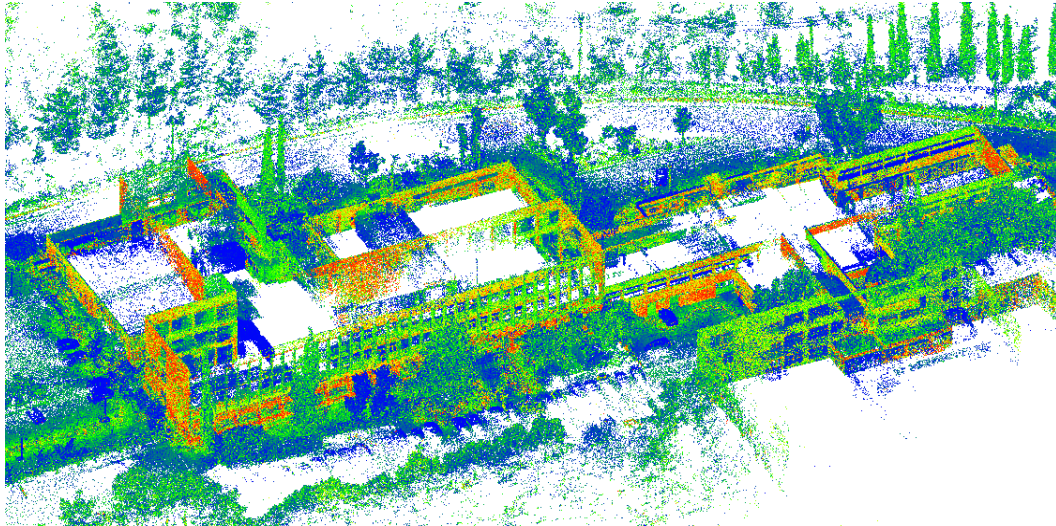


Εικόνα 7.33 – Νέφος σημείων ZEB Horizon (Κάτοψη)

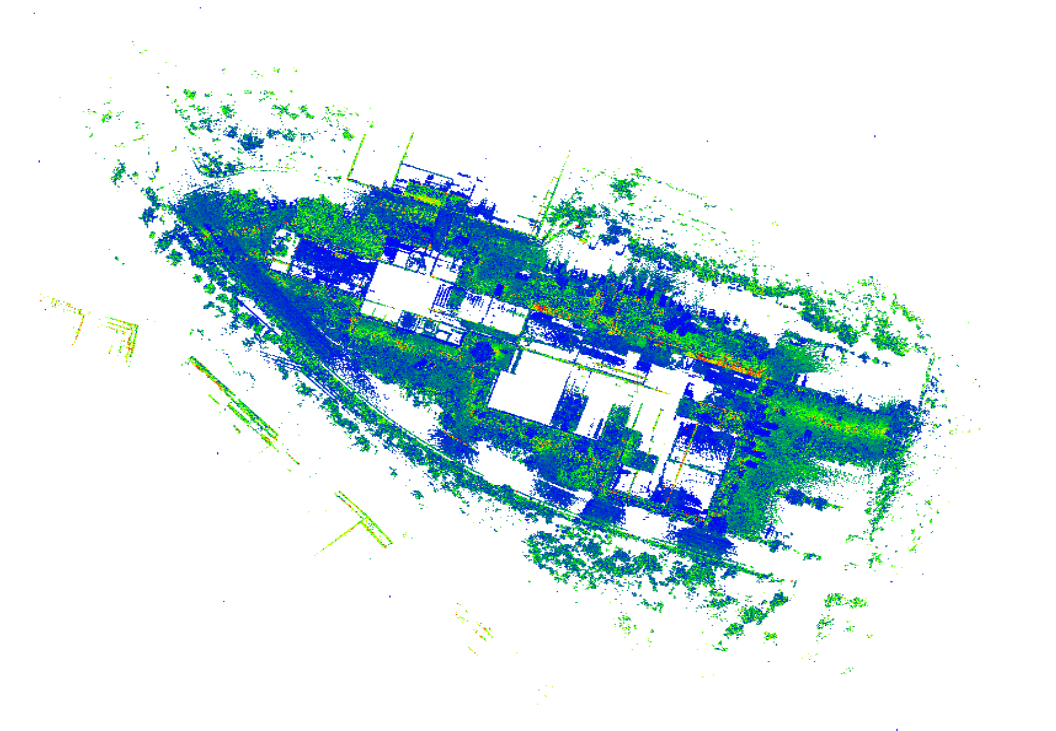
Εφαρμόστηκε, και εδώ, φίλτρο αφαίρεσης θορύβου, ρυθμίζοντας την ακτίνα στα 8 εκατοστά. Μετά την εφαρμογή του φίλτρου, παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση στον θόρυβο εσωτερικά του κτηρίου, σε σημεία κοντά στη βάση του, σε περιοχές εγγύτερης, στο κτήριο, σάρωσης και γενικότερα γύρω από τη βλάστηση. Τα σημεία που απέμειναν μετά την εφαρμογή του φίλτρου ήταν συνολικά 157,290,407.



Εικόνα 7.34 – Νέφος σημείων ZEB Horizon με φίλτρο θορύβου (Νοτιοδυτική Προβολή)



Εικόνα 7.35 – Νέφος σημείων ZEB Horizon με φίλτρο θορύβου (Βορειοανατολική Προβολή)



Εικόνα 7.36 – Νέφος σημείων ZEB Horizon με φίλτρο θορύβου (Κάτοψη)

Το αντίστοιχο νέφος που δημιουργήθηκε από τα δεδομένα του σαρωτή BLK2GO είχε 130,033,137 σημεία. Η πληροφορία είναι, και σε αυτή την περίπτωση, εμφανώς πιο πυκνή αλλά και πιο συγκεντρωμένη κοντά στο κτήριο, με μερικά σημεία να ξεφεύγουν σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Η διαφορά στον αριθμό των σημείων μεταξύ των δύο νεφών είναι, και πάλι, αποτέλεσμα εμβέλειας, αραιής πληροφορίας στο έδαφος λόγω πεδίου σάρωσης του BLK2GO, αλλά και μειωμένου θορύβου σε περιοχές όπως το εσωτερικό του κτηρίου, συγκριτικά με το νέφος του ZEB Horizon.

Οι ψηλότεροι όροφοι του κτηρίου έχουν, όπως είναι αναμενόμενο, πιο αραιή πληροφορία. Ο θόρυβος γύρω από τη βλάστηση, και ιδιαίτερα τους θάμνους κοντά στη βάση του κτηρίου, είναι αρκετός. Επίσης, έχουν εντοπιστεί σημεία και στο εσωτερικό του κτηρίου, με διακριτά τα όρια κάποιων δωματίων του ισογείου, ωστόσο αυτά είναι αναξιόπιστα από άποψη θέσης,

λόγω διάθλασης της ακτινοβολίας. Η διαφορά στο πλήθος σημείων που καταγράφηκε εσωτερικά του κτηρίου μεταξύ κοντινής και μακρινής σάρωσης, δεν είναι τόσο μεγάλη όσο στην περίπτωση του ZEB Horizon. Αυτό μπορεί να υποδεικνύει ότι τα αποτελέσματα δεν σχετίζονται τόσο με την απόσταση σάρωσης, όσο με τη δυνατότητα του back-end τμήματος του BLK2GO να αναγνωρίζει πιο επιτυχημένα τις γυάλινες επιφάνειες.

Ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι, και στις δύο περιπτώσεις, έχουν δημιουργηθεί μικρά κενά κοντά σε τοίχους του κτηρίου που σαρώθηκαν από πολύ κοντινή απόσταση. Αυτό επιβεβαιώνει το κατώτατο όριο εμβέλειας των σαρωτών και το γεγονός ότι ο αλγόριθμος αφαιρεί αυτόματα τα σημεία που ανιχνεύονται σε μικρότερη απόσταση από αυτό.



Εικόνα 7.37 – Νέφος σημείων BLK2GO (Νοτιοδυτική Προβολή)



Εικόνα 7.38 – Νέφος σημείων BLK2GO (Βορειοανατολική Προβολή)



Εικόνα 7.39 – Νέφος σημείων BLK2GO (Κάτοψη)

Η εφαρμογή του φίλτρου θορύβου πραγματοποιήθηκε διατηρώντας τις ίδιες παραμέτρους με την περίπτωση της κοντινής σάρωσης με το σαρωτή ZEB Horizon. Τα αποτελέσματα του φίλτρου φαίνονται, σε μεγαλύτερο βαθμό, στα άκρα του νέφους και εσωτερικά του κτηρίου. Το νέφος έχει καθαριστεί αισθητά από την περιττή πληροφορία και είναι πιο διακριτά τα όρια του κτηρίου, χωρίς να έχει αλλοιωθεί το σχήμα του ή να έχουν δημιουργηθεί κενά. Τα σημεία που απέμειναν σε αυτή την περίπτωση ήταν συνολικά 95,119,755.



Εικόνα 7.40 – Νέφος σημείων BLK2GO με φίλτρο θορύβου (Νοτιοδυτική Προβολή)



Εικόνα 7.41 – Νέφος σημείων BLK2GO με φίλτρο θορύβου (Βορειοανατολική Προβολή)

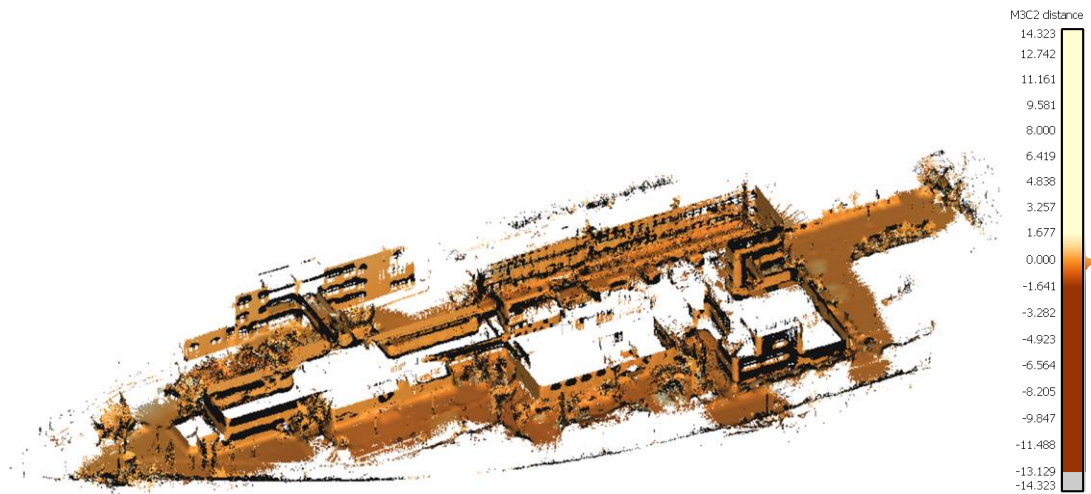


Εικόνα 7.42 – Νέφος σημείων BLK2GO με φίλτρο θορύβου (Κάτοψη)

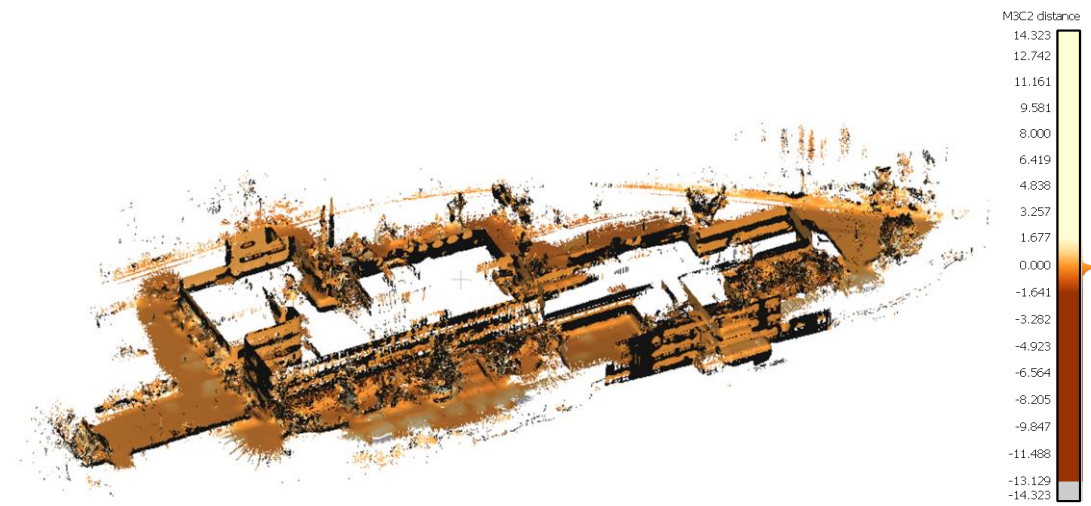
Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της εφαρμογής του φίλτρου, στην περίπτωση του ZEB Horizon αφαιρέθηκε περίπου το 28% των σημείων, ενώ στην περίπτωση του BLK2GO αφαιρέθηκε περίπου το 27%. Αυτό δείχνει ότι τα ποσοστά θορύβου στα νέφη των δύο σαρωτών ήταν σχεδόν τα ίδια.

Στη συνέχεια, έγινε σύγκριση των δύο νεφών κάνοντας χρήση του εργαλείου M3C2 Distance. Από το νέφος διαφορών που παράχθηκε, φαίνεται ότι οι κύριες διαφορές είναι, αρχικά, στις άκρες του νέφους. Όπως και στην περίπτωση των μακρινών σαρώσεων, αυτό οφείλεται σε ένα συνδυασμό διαφορών στην εμβέλεια σάρωσης και στην πιθανή στροφή του ενός νέφους ως προς το άλλο. Επιπλέον, μεγάλες διαφορές παρατηρούνται γύρω από τη βλάστηση, λόγω θορύβου, και, όπως είναι λογικό, γύρω από τις γυάλινες επιφάνειες λόγω διάθλασης του laser. Υπάρχει επίσης ένδειξη μεγάλων διαφορών στο χώρο στάθμευσης μπροστά στην κύρια

είσοδο του Λαμπαδαρείου κτηρίου. Αυτό οφείλεται, στο γεγονός ότι οι σαρώσεις έγιναν διαφορετικές μέρες και έτσι ο αριθμός, αλλά και η θέση των αυτοκινήτων που ήταν σταθμευμένα στο χώρο, άλλαξε.



Εικόνα 7.43 – Διαφορές νεφών (Νοτιοδυτική Προβολή)

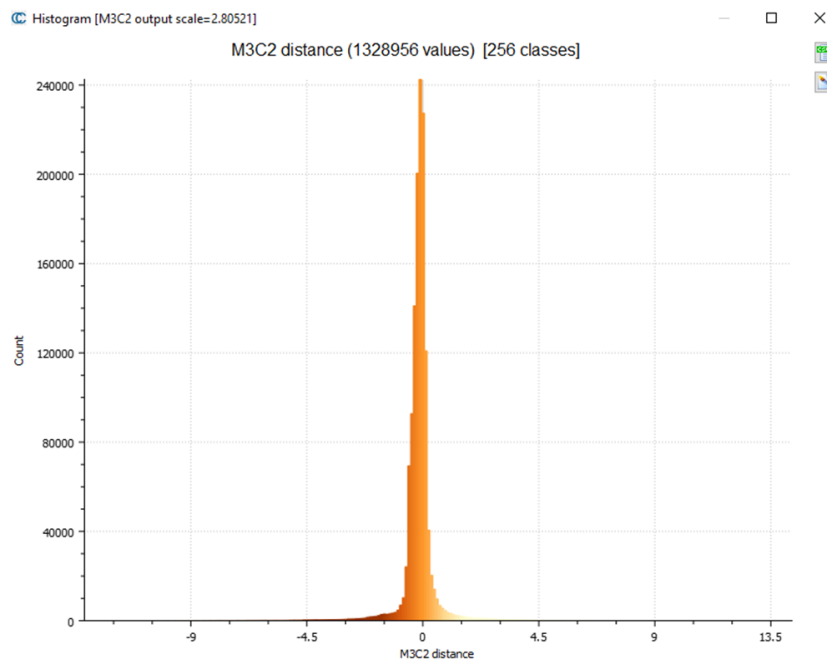


Εικόνα 7.44 – Διαφορές νεφών (Βορειοανατολική Προβολή)



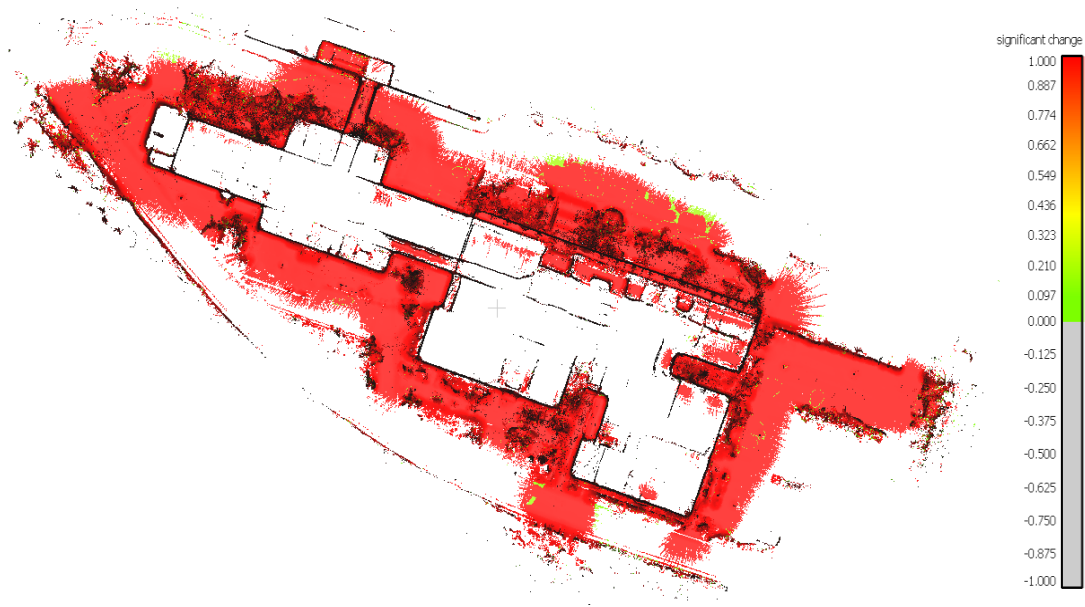
Εικόνα 7.45 – Διαφορές νεφών (Κάτοψη)

Όπως και στην περίπτωση των μακρινών σαρώσεων, έγινε συμπληρωματικά η εξαγωγή της κανονικής κατανομής του νέφους διαφορών. Από αυτή φαίνεται ένα μεγάλο κομμάτι των τιμών να κυμαίνεται από το μηδέν έως τα 75cm, ενώ η πλειοψηφία δεν ξεπερνά τα 35cm. Λίγες τιμές φτάνουν έως το 1,5m αλλά αυτές αποτελούν μεμονωμένες περιπτώσεις. Παρόλο που η σάρωση έγινε πιο κοντά σε γυάλινες επιφάνειες και πυκνή βλάστηση, οπότε θα περίμενε κανείς μεγαλύτερες διαφορές λόγω αυξημένου θορύβου, οι τιμές των διαφορών είναι εμφανώς μικρότερες από το μακρινό νέφος. Αυτό επιβεβαιώνει πόσο καθοριστικά επηρεάζουν οι καιρικές συνθήκες τα αποτελέσματα των σαρώσεων, καθώς η διαφορά της πλειονότητας των τιμών μεταξύ μακρινού και κοντινού νέφους σύγκρισης, φτάνει σχεδόν τα 20cm.

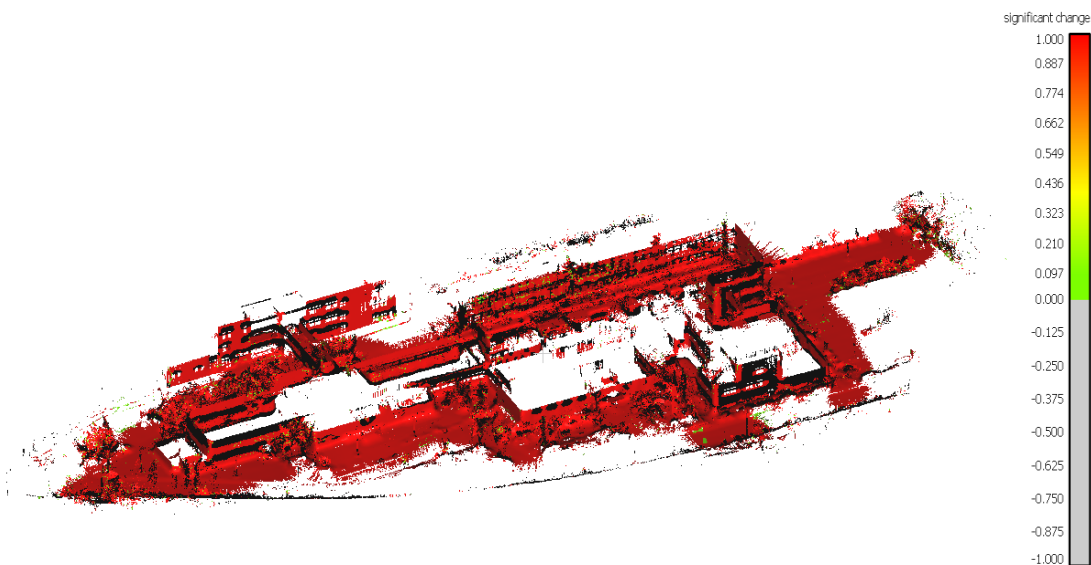


Εικόνα 7.46 – Κανονική κατανομή διαφορών

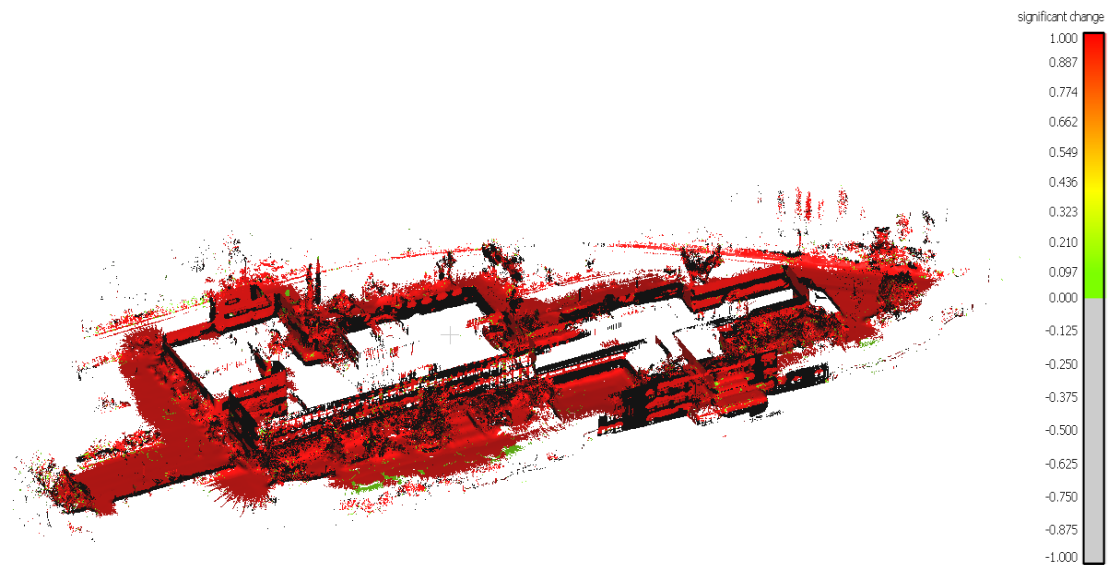
Όσον αφορά στο προϊόν «Significant Change», φαίνεται ότι το μεγαλύτερο μέρος του νέφους αντικατοπτρίζει πραγματικές αλλαγές. Εξαιρέση αποτελούν κάποια τμήματα του εδάφους και του πεζοδρομίου, που οφείλονται σε έλλειψη πληροφορίας στο νέφος ενός εκ των δύο σαρωτών, αλλά και τμήματα των παραθύρων και της θαμνώδους βλάστησης που αποτελούν προϊόν θορύβου. Υπάρχουν, επίσης, ενδιάμεσες τιμές που ερμηνεύονται ως πιθανές αλλαγές. Αυτές βρίσκονται, επίσης, στα άκρα του νέφους, στη βάση του κτηρίου, λόγω κοντινών αποστάσεων και ως εκ τούτου μεγάλης γωνίας σαρωσης, και σε μέρη με αυξημένο θόρυβο.



Εικόνα 7.47 – Significant Change (Κάτοψη)

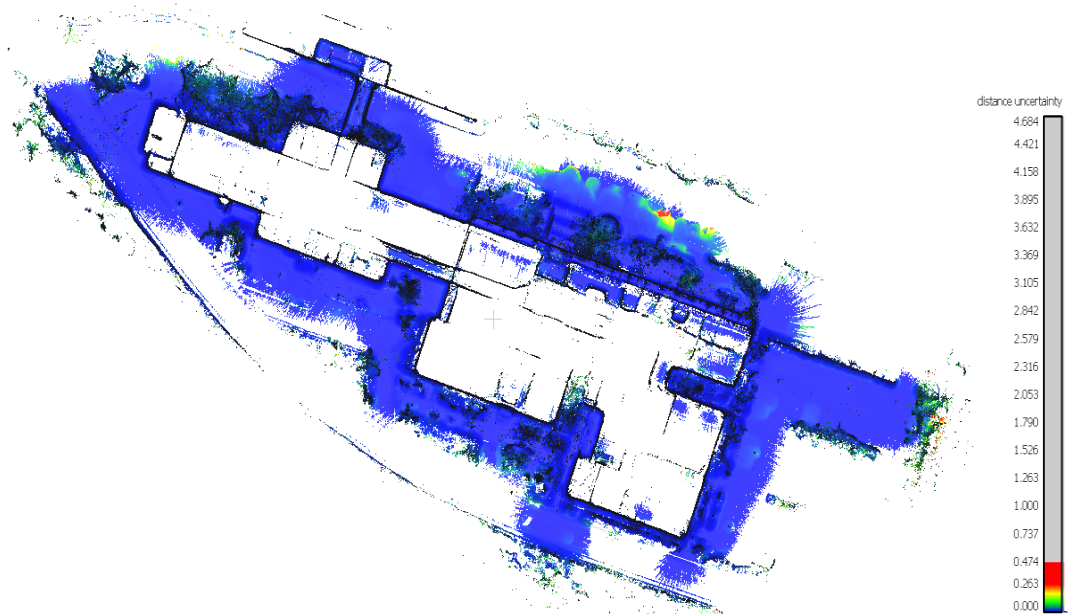


Εικόνα 7.48 – Significant Change (Νοτιοδυτική Προβολή)



Εικόνα 7.49 – Significant Change (Βορειοανατολική Προβολή)

Τέλος, σύμφωνα με το νέφος «Distance Uncertainty», η πλειοψηφία των αβεβαιοτήτων δεν ξεπερνά τα 5cm. Σε πολύ λίγες περιπτώσεις που αφορούν περιοχές κυρίως στα άκρα του νέφους οι αβεβαιότητες κυμαίνονται από 5 έως 25cm. Παρακάτω, παρουσιάζεται μόνο η κάτοψη του νέφους αβεβαιοτήτων, καθώς σε αυτό φαίνονται καλύτερα οι μεγαλύτερες τιμές.



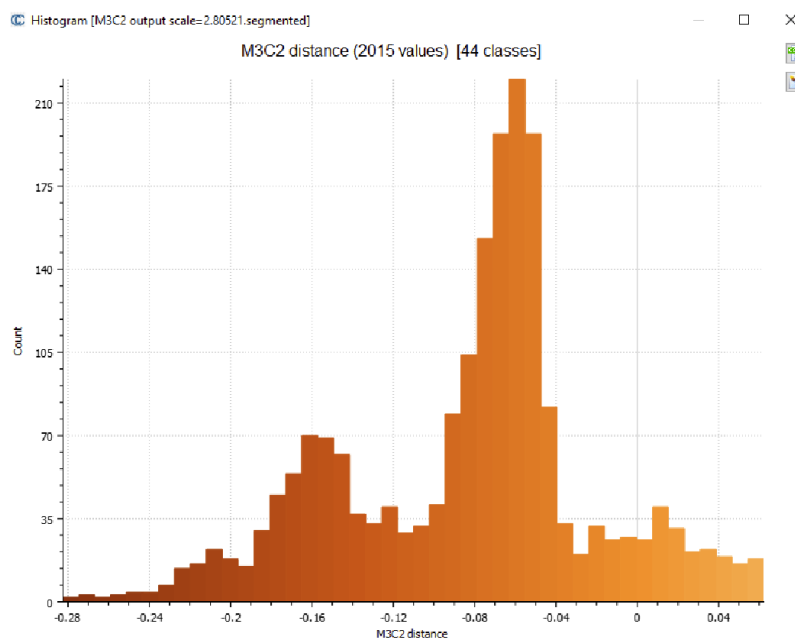
Εικόνα 7.50 – Distance Uncertainty

Με το πέρας της σύγκρισης του συνόλου των διαφορών στα δύο νέφη έγινε και εδώ εξαγωγή ενός καθαρού, από θόρυβο, τμήματος για πιο λεπτομερή έλεγχο. Και σε αυτή την περίπτωση, επιλέχθηκε τμήμα του τοίχου και του δαπέδου μπροστά από το κυλικείο της Σχολής.



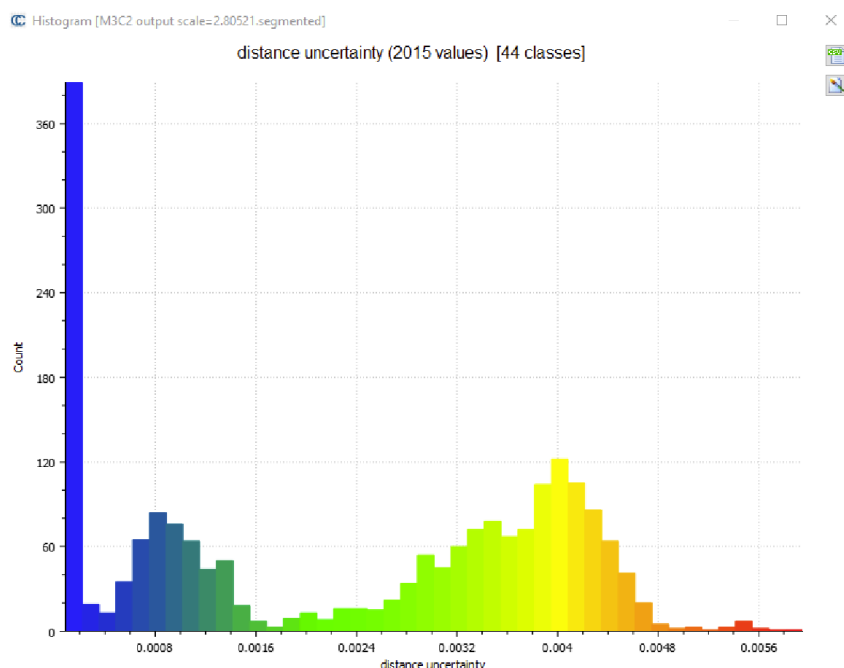
Εικόνα 7.51 – Διαφορές τμήματος νεφών

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα της κανονικής κατανομής, που αναφέρεται μόνο στο συγκεκριμένο τμήμα, η πλειονότητα των τιμών περιορίζεται σε διαφορές της τάξης των 10cm, με μερικές να φτάνουν έως τα 28cm. Οι διαφορές της τάξης των μερικών μέτρων απουσιάζουν, σε αντίθεση με τη σύγκριση του συνόλου των σημείων από τα δύο νεφη.



Εικόνα 7.52 – Κανονική κατανομή διαφορών

Τέλος, όσον αφορά στις αβεβαιότητες στο συγκεκριμένο τμήμα του νέφους, αυτές δεν ξεπερνούν, τα 6mm, αποτέλεσμα το οποίο είναι εμφανώς καλύτερο από τη σύγκριση των νεφών στο σύνολό τους.



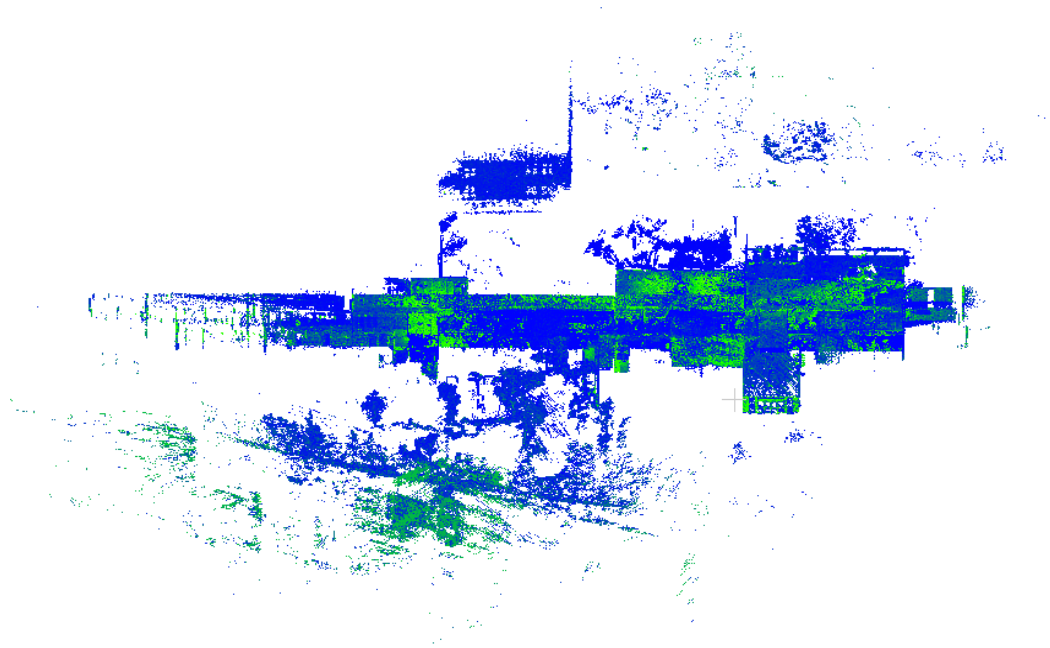
Εικόνα 7.53 – Διάγραμμα αβεβαιοτήτων

7.2.3 Εσωτερικά νέφη

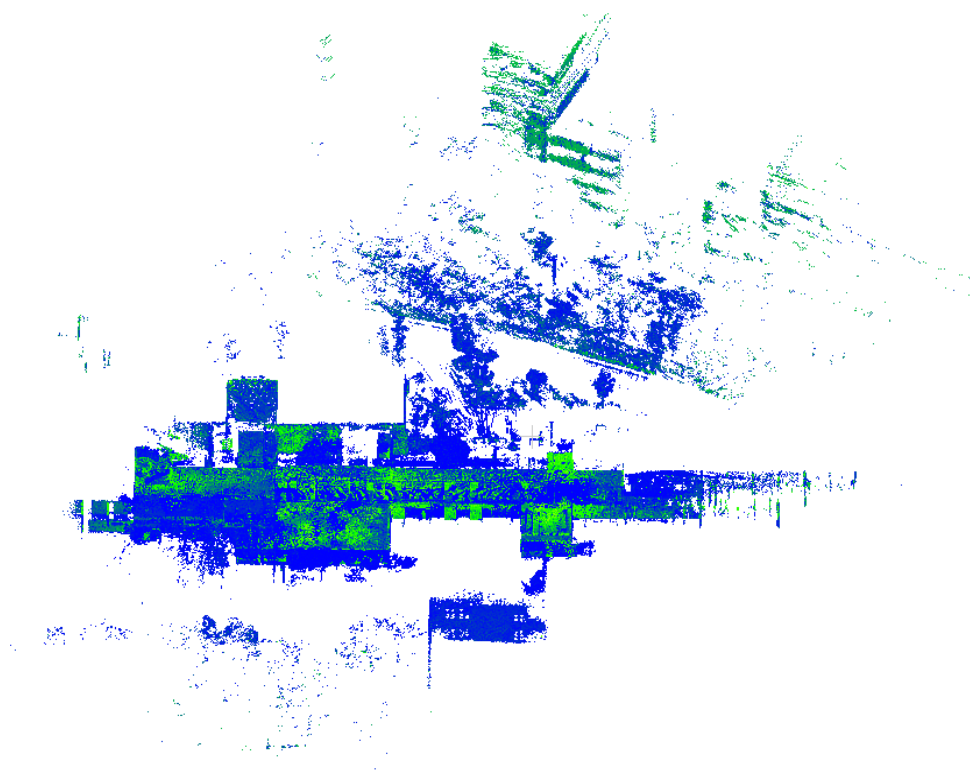
Η εσωτερική σάρωση πραγματοποιήθηκε για την αξιολόγηση των σαρωτών σε εσωτερικούς χώρους με τις προκλήσεις των μακρών διαδρόμων, άρα και επαναλαμβανόμενων μοτίβων, τις μεταβάσεις μεταξύ ορόφων από σκάλες, αλλά και τη μετάβαση μεταξύ δωματίων.

Η σάρωση του σαρωτή ZEB Horizon ολοκληρώθηκε, έχοντας καταγράψει 140,354,206 σημεία, παράγοντας ένα ικανοποιητικά πυκνό και λεπτομερές νέφος. Το εντυπωσιακό στη συγκεκριμένη καταγραφή είναι ότι, ενώ η σάρωση έγινε στο εσωτερικό του κτηρίου, έχουν ανιχνευτεί αντικείμενα του εξωτερικού χώρου, έως και τον έκτο όροφο των παλιών φοιτητικών εστίων, αναδεικνύοντας την εμβέλεια σάρωσης του οργάνου.

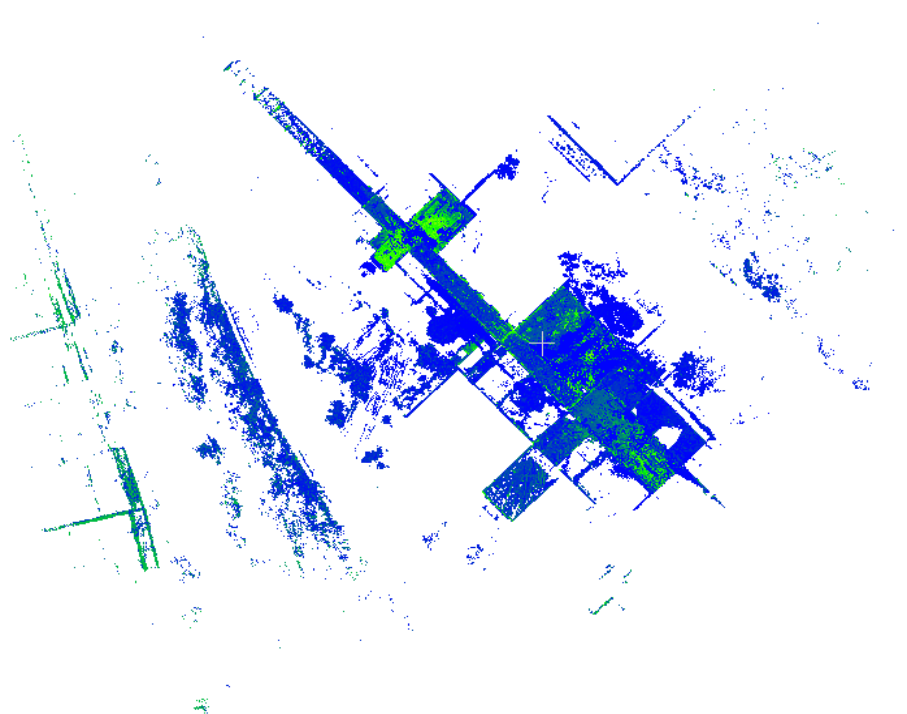
Στον αντίποδα, φαίνεται πως οι γυάλινες επιφάνειες του κτηρίου δεν αναγνωρίζονται ως εμπόδια από το back-end τμήμα του σαρωτή, καθώς ο εξωτερικός χώρος σαρώθηκε, αποκλειστικά, μέσα από γυάλινες πόρτες και παράθυρα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, αυτό αποτελεί πρόβλημα, καθώς δημιουργείται σημαντική ποσότητα περιττής πληροφορίας, που επιβραδύνει τη μετέπειτα επεξεργασία. Το περίγραμμα του κτηρίου και των εσωτερικών χώρων του είναι διακριτό και χωρίς κενά αλλά, όπως είναι φυσικό, υπάρχει αυξημένος θόρυβος γύρω από γυάλινες επιφάνειες.



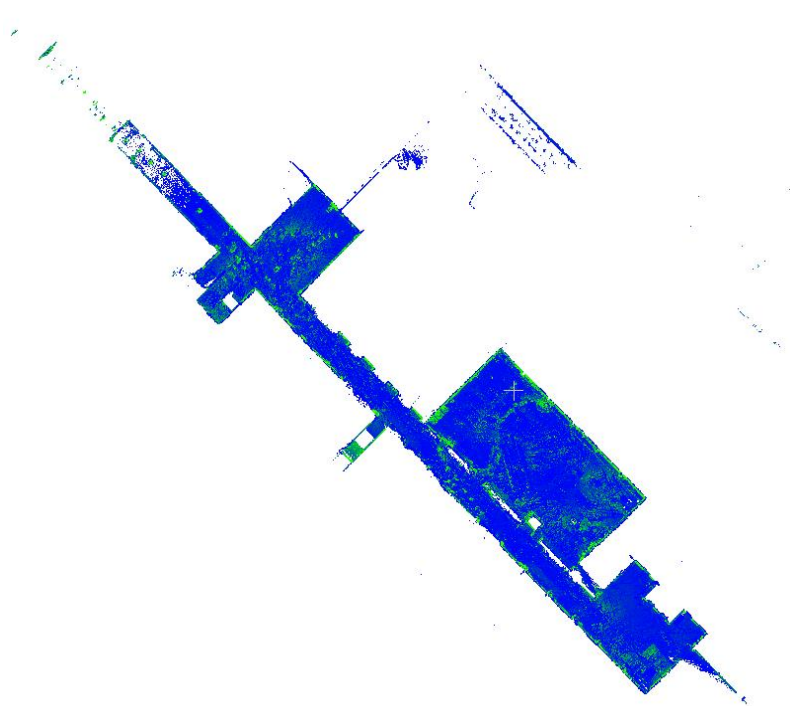
Εικόνα 7.54 – Νέφος σημείων ZEB Horizon (Νοτιοδυτική Προβολή)



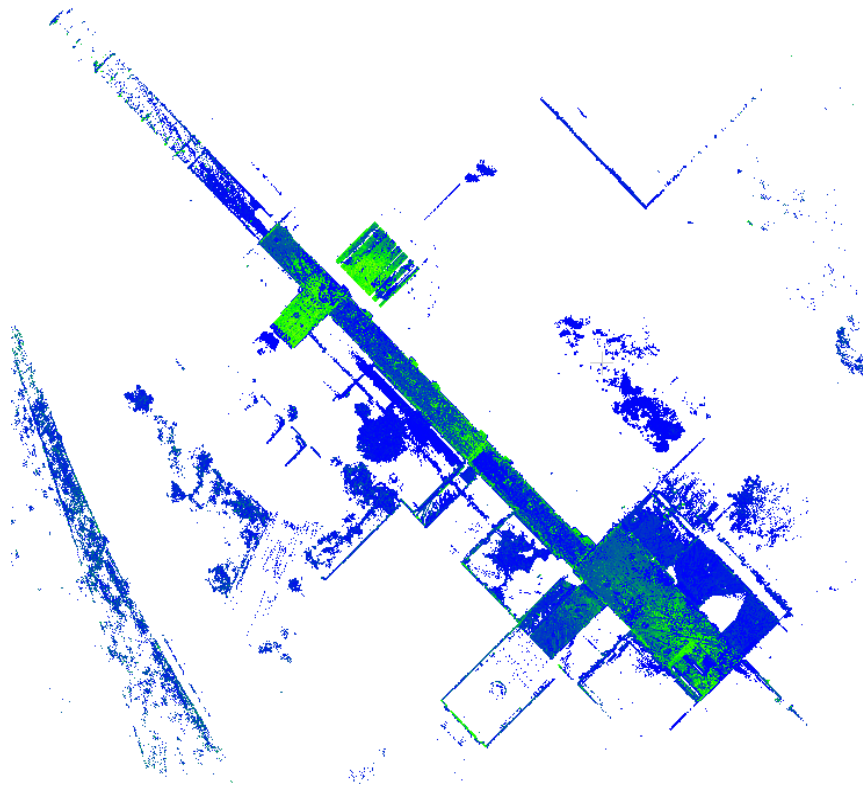
Εικόνα 7.55 – Νέφος σημείων ZEB Horizon (Βορειοανατολική Προβολή)



Εικόνα 7.56 – Νέφος σημείων ZEB Horizon (Κάτοψη)



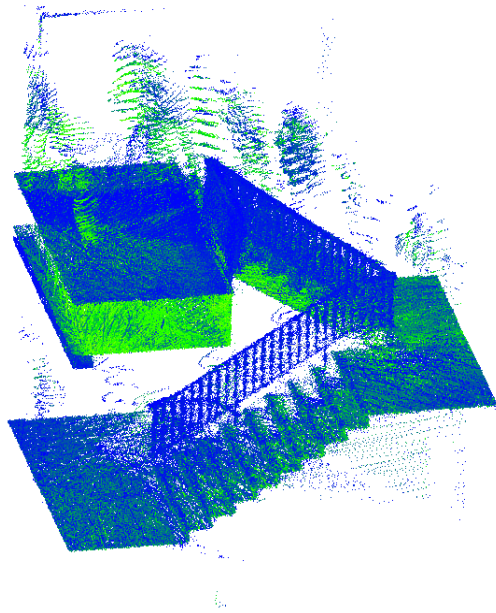
Εικόνα 7.57 – Νέφος σημείων ZEB Horizon (Οριζόντια τομή - Υπόγειο)



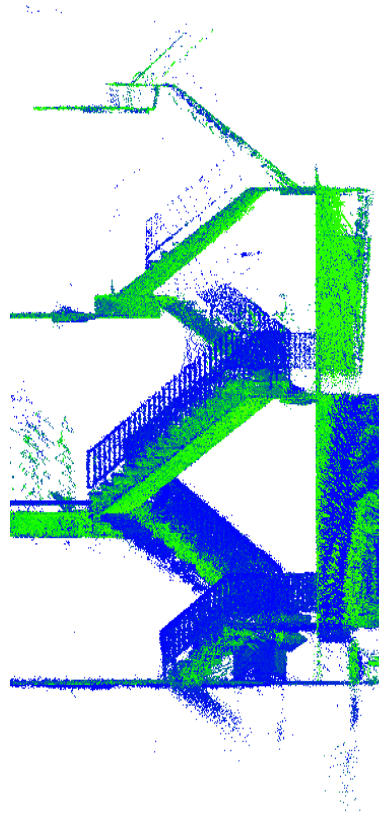
Εικόνα 7.58 – Νέφος σημείων ZEB Horizon (Οριζόντια τομή - Ισόγειο)

Παρατηρώντας πιο συγκεκριμένα στιγμιότυπα του εσωτερικού νέφους, φαίνεται να έχει γίνει λεπτομερής καταγραφή σε σκάλες και γενικότερα σε σημεία μεταβάσεων. Τα επίπεδα των ορόφων που έχουν δημιουργηθεί, ταιριάζουν με την πραγματικότητα και τα επιμέρους νέφη έχουν συνενωθεί επιτυχημένα από το λογισμικό του σαρωτή, χωρίς διπλά ή μετατοπισμένα επίπεδα. Επιτυχημένη είναι και η συνένωση των επιμέρους τμημάτων των διαδρόμων του κτηρίου που, ενώ εκτείνονται μερικά μέτρα, παρουσιάζουν συνέχεια στη γεωμετρία τους.

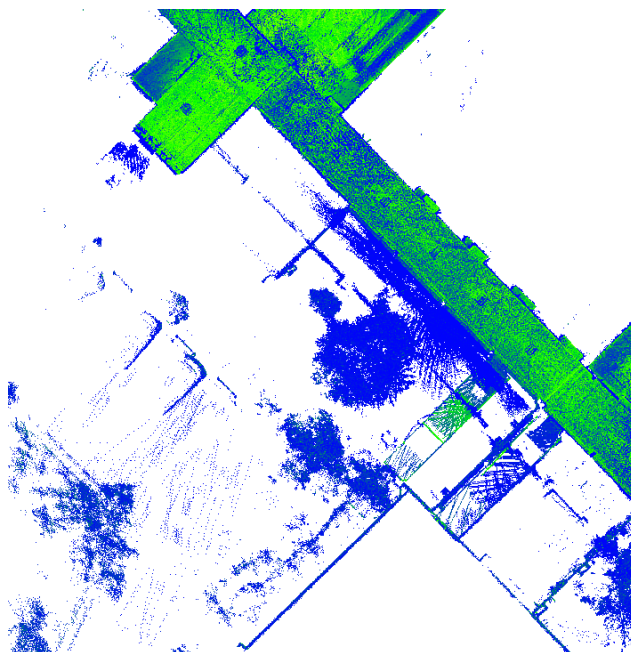
Στα μειονεκτήματα που μπορούν να σχολιαστούν εκ πρώτης όψης, είναι οι ανθρώπινες φιγούρες που φαίνονται σε τμήματα του νέφους, και που δεν κατάφερε να αναγνωρίσει ο σαρωτής ως κινούμενα αντικείμενα και να τα απομονώσει. Επιπλέον, παρατηρούνται υψηλά επίπεδα θορύβου στο τμήμα του κτηρίου που βρίσκονται οι αίθουσες Λ, γύρω από τα παράθυρα, αλλά και στα ντουλάπια αποθήκευσης εξοπλισμού, στο υπόγειο του κτηρίου. Και στις δύο περιπτώσεις ο θόρυβος οφείλεται στην υψηλή ανακλαστικότητα των υλικών.



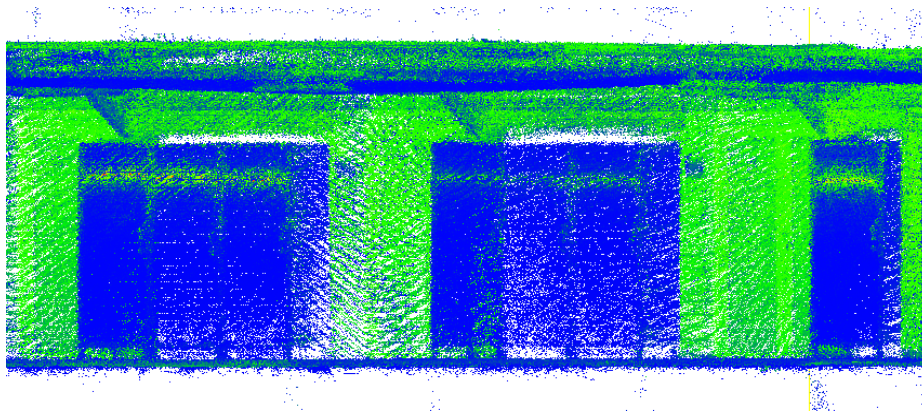
Εικόνα 7.59 – Σκάλες (Δυτικό τμήμα κτηρίου)



Εικόνα 7.60 – Σκάλες (Ανατολικό τμήμα κτηρίου)

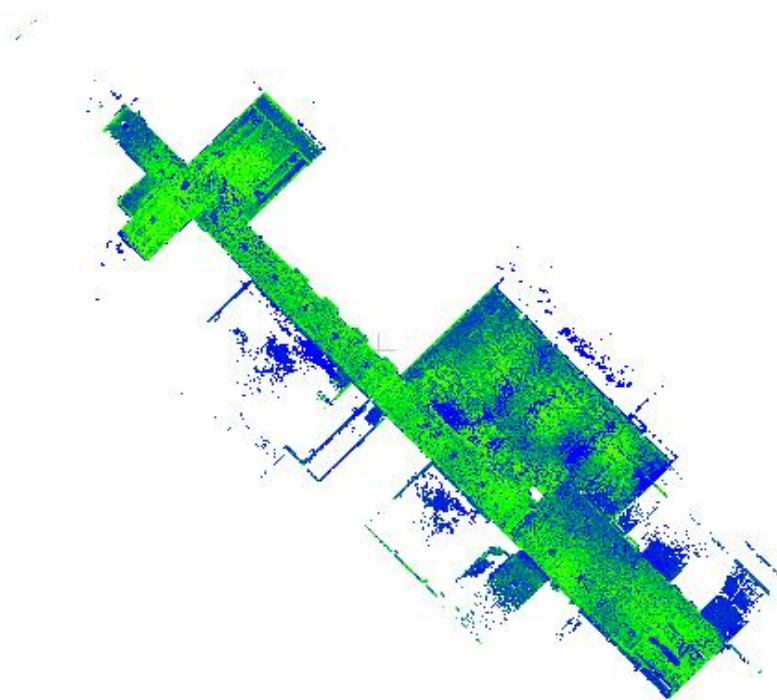


Εικόνα 7.61 – Αίθουσες Λ

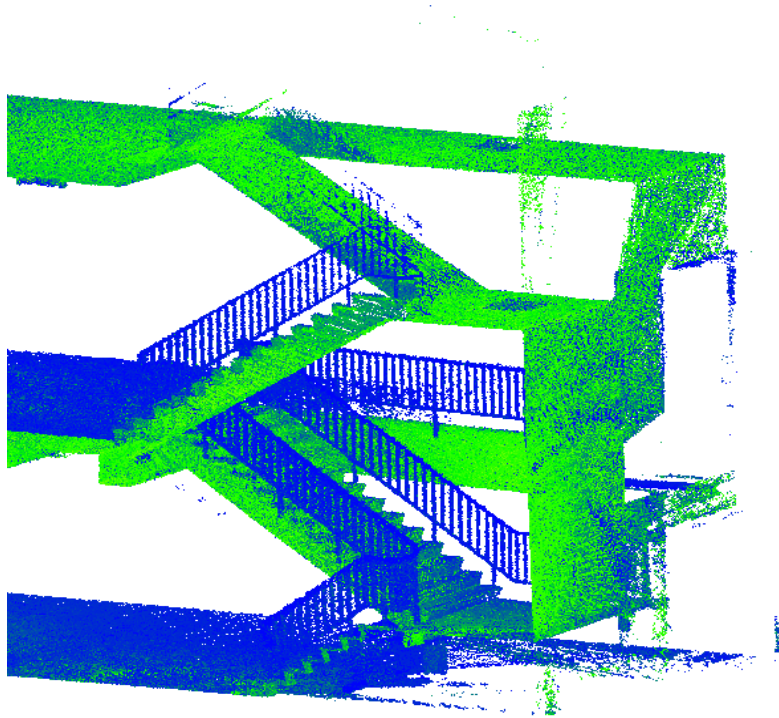


Εικόνα 7.62 – Ντουλάπια αποθήκευσης εξοπλισμού (Υπόγειο)

Το φίλτρο θορύβου εφαρμόστηκε σε αυτή την περίπτωση με ακτίνα 2cm. Κατάφερε να αφαιρέσει σε μεγάλο βαθμό το θόρυβο και την περιττή πληροφορία του εξωτερικού τμήματος του κτηρίου, αλλά και να ελαττώσει την εμφάνιση ανθρώπινων φιγουρών. Παρακάτω παρουσιάζονται δύο χαρακτηριστικά στιγμιότυπα του τελικού νέφους, το οποίο είχε συνολικά 102,974,364 σημεία.



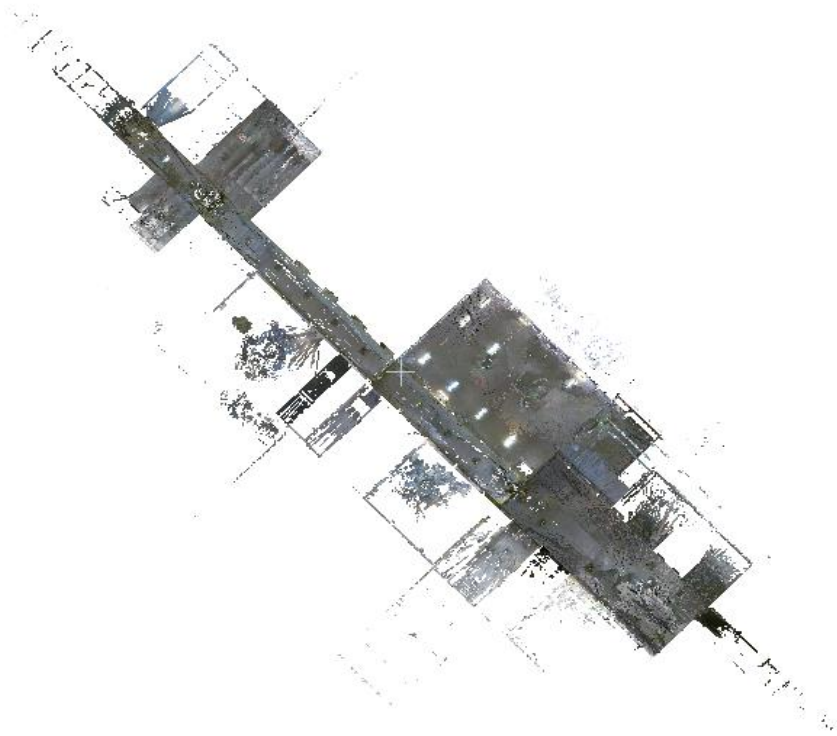
Εικόνα 7.63 – Ισόγειο με φίλτρο θορύβου



Εικόνα 7.64 – Ανθρώπινες φιγούρες στις ανατολικές σκάλες με φίλτρο θορύβου

Όσον αφορά στο αντίστοιχο νέφος του σαρωτή BLK2GO, η καταγραφή του ολοκληρώθηκε σαρώνοντας 129,552,000 σημεία.

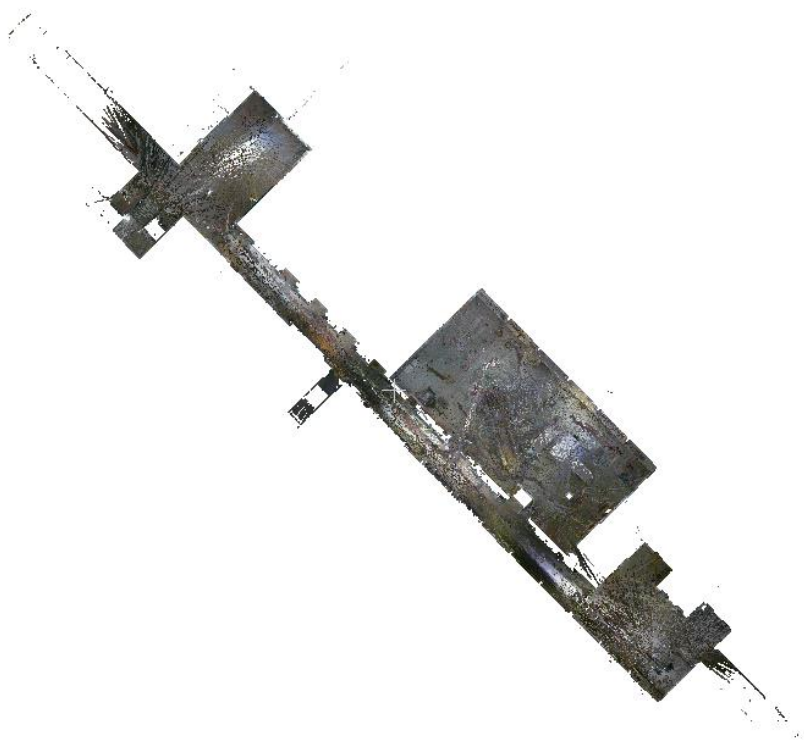
Είναι πιο αραιό από το νέφος του ZEB Horizon, αλλά, ταυτόχρονα, δεν περιέχει τόσο θόρυβο ή περιττή πληροφορία στο εξωτερικό τμήμα του κτηρίου. Αυτό είναι αποτέλεσμα τόσο της εμβέλειας σάρωσης, όσο και, καλύτερης αναγνώρισης των γυάλινων επιφανειών από το back-end τμήμα του σαρωτή. Το πάτωμα φαίνεται να παρουσιάζει μερικές ασυνέχειες που, και σε αυτή την περίπτωση, θα αποδοθούν στο κατακόρυφο πεδίο σάρωσης του σαρωτή, καθώς είναι η πιο πιθανή αιτία των συγκεκριμένων ελλείψεων. Παρατηρώντας τη νότια όψη του κτηρίου, φαίνεται, εκ πρώτης όψεως, επιτυχημένη η συνένωση του υπογείου με το ισόγειο και εξίσου καλή φαίνεται η συνένωση των επιμέρους τμημάτων του κτηρίου ανάμεσα στα οποία μεσολαβούν διάδρομοι.



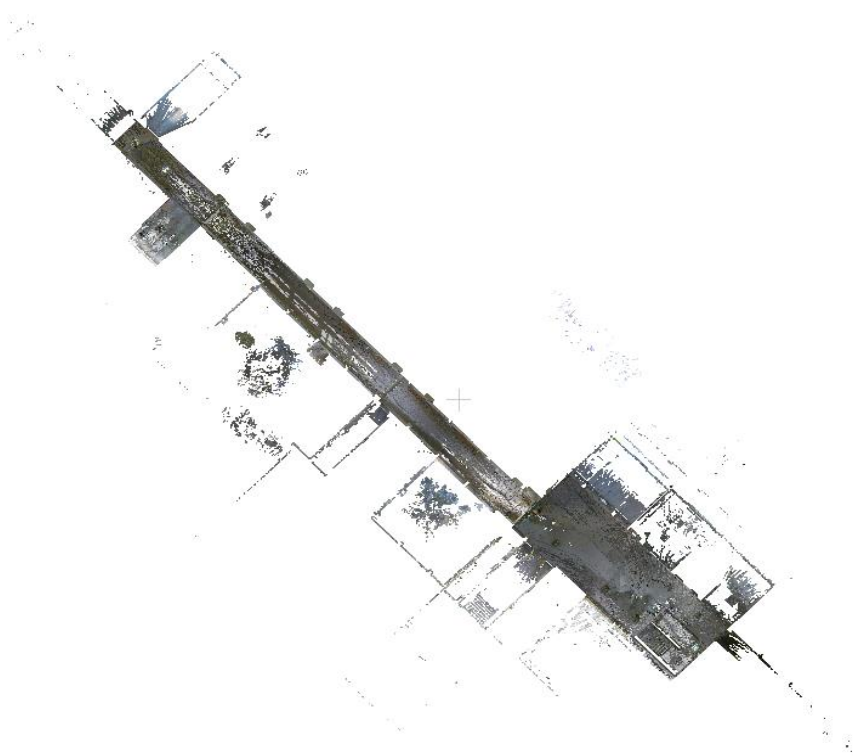
Εικόνα 7.65 – Νέφος σημείων BLK2GO (Κάτοψη)



Εικόνα 7.66 – Νέφος σημείων BLK2GO (Νότια όψη κτηρίου)

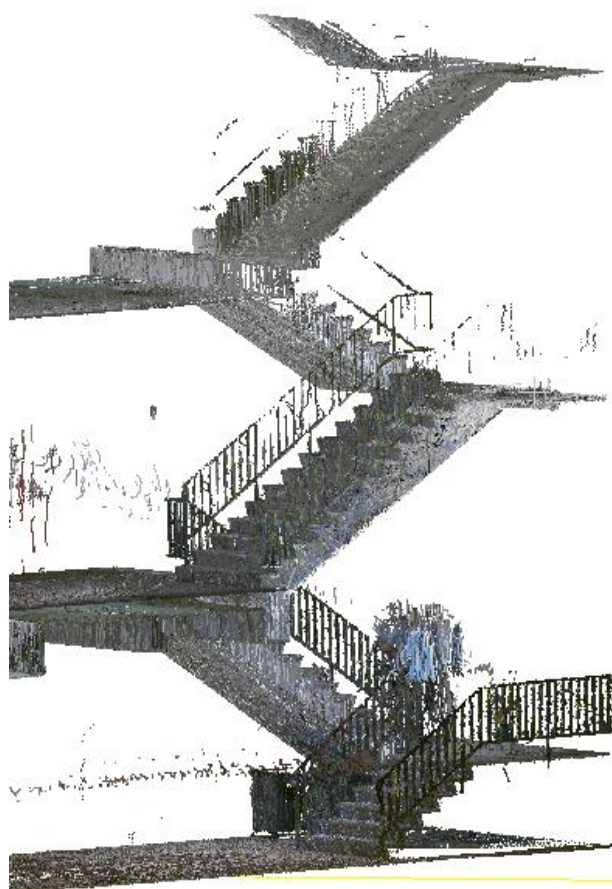


Εικόνα 7.67 – Νέφος σημείων BLK2GO (Οριζόντια Τομή – Υπόγειο)

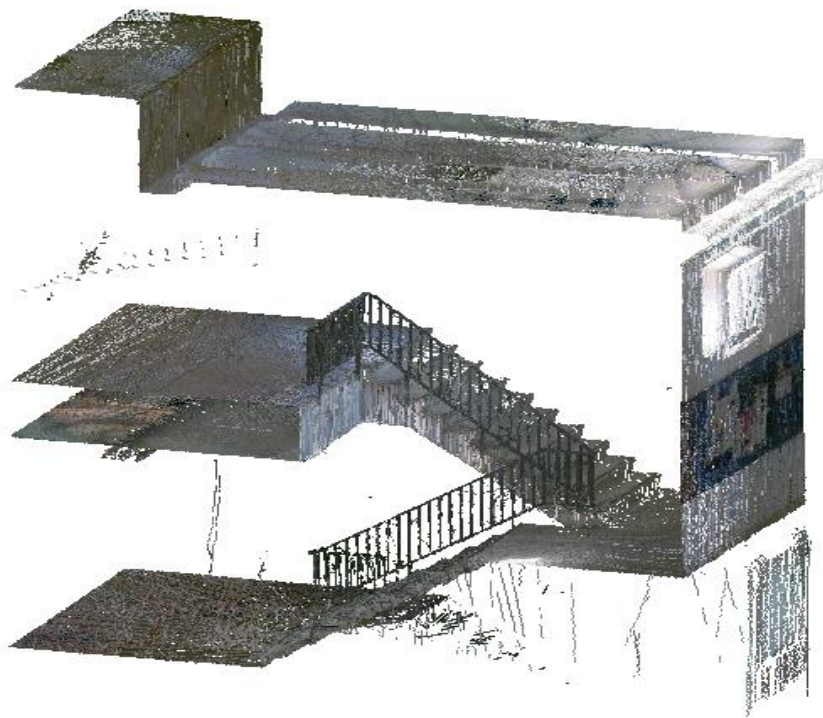


Εικόνα 7.68 – Νέφος σημείων BLK2GO (Οριζόντια Τομή – Ισόγειο)

Οι σκάλες, τόσο στην ανατολική όσο και στη δυτική πλευρά του κτηρίου, έχουν αποδοθεί ικανοποιητικά. Παρόλα αυτά, και σε αυτή την περίπτωση, υπάρχουν ανθρώπινες φιγούρες σε τμήματά τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι το μεταλλικό υλικό των ντουλαπιών επηρεάζει πολύ τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης σάρωσης καθώς, πέραν των υψηλών επιπέδων θορύβου, υπάρχουν και σημαντικές ελλείψεις στις επιφάνειες τους. Οι ελλείψεις στο κατώτερο τμήμα των ντουλαπιών δεν μπορούν να αποδοθούν στο κατακόρυφο πεδίο σάρωσης, σε αυτή την περίπτωση, καθώς στο επίπεδο του ισογείου έχουν σαρωθεί επιτυχημένα τα αντικείμενα στα αντίστοιχα ύψη από το δάπεδο.



Εικόνα 7.69 – Σκάλες (Ανατολικό τμήμα κτηρίου)



Εικόνα 7.70 – Σκάλες (Δυτικό τμήμα κτηρίου)



Εικόνα 7.71 – Ντουλάπια αποθήκευσης εξοπλισμού

Πριν γίνει η σύγκριση του ζεύγους των εσωτερικών σαρώσεων, εφαρμόστηκε και εδώ το φίλτρο θορύβου διατηρώντας τις ίδιες παραμέτρους με την αντίστοιχη περίπτωση του ZEB Horizon. Το φίλτρο κατάφερε να αραιώσει, ελαφρώς, τα σημεία που αφορούσαν ανθρώπινες φιγούρες και να αφαιρέσει ένα μικρό τμήμα του θορύβου γύρω από τις γυάλινες επιφάνειες και τα ντουλάπια. Τα αποτελέσματα, παρόλο που ως σύνολο αποτελούνται από 102,974,364

σημεία, δεν είναι ιδιαίτερα βελτιωμένα, οπότε θα παρουσιαστεί μόνο η αραίωση των φιγουρών όπου θεωρείται διακριτή η αλλαγή.



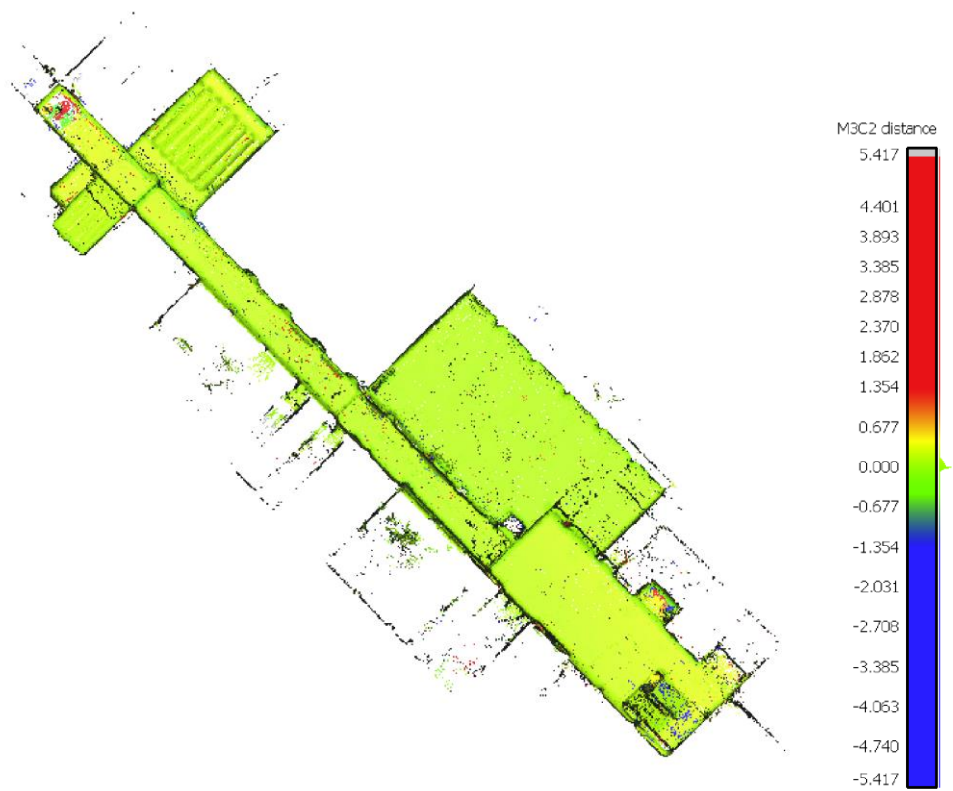
Εικόνα 7.72 – Ανθρώπινες φιγούρες με φίλτρο θορύβου

Από το αρχικό νέφος του ZEB Horizon αφαιρέθηκε περίπου το 27% των σημείων, ενώ από το αρχικό νέφος του BLK2GO αφαιρέθηκε περίπου το 33%. Παρατηρείται ότι το ποσοστό θορύβου που αφαιρέθηκε από το νέφος του BLK2GO είναι ελαφρώς μεγαλύτερο, πιθανόν λόγω των προβλημάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω.

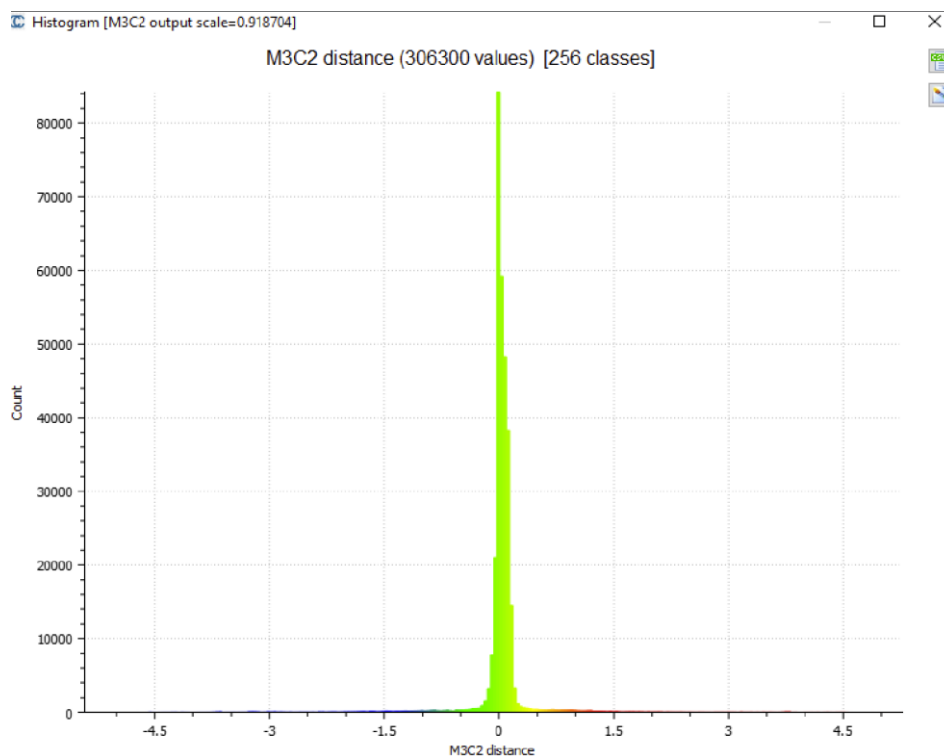
Τα παράγωγα της εφαρμογής του εργαλείου M3C2 Distance παρουσιάζονται ανά όροφο. Ένα μεγάλο μέρος των τιμών φτάνει έως και τα 25cm, αλλά η πλειονότητα των διαφορών φαίνεται να μην ξεπερνάει τα 12cm. Υπάρχουν, φυσικά, και εξαιρέσεις που φαίνεται να ξεπερνούν το μέτρο, αλλά αυτές αντιπροσωπεύουν ελάχιστες τιμές και θεωρούνται, επί το πλείστον, αναξιόπιστες. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι οι περιοχές με τις υψηλότερες τιμές φαίνεται να βρίσκονται κατά μήκος των ντουλαπιών, όπου υπάρχουν και μεγάλα κενά στο ένα νέφος, σε περιοχές που υπήρχαν, ακόμα και μετά την εφαρμογή του φίλτρου θορύβου, ανθρώπινες φιγούρες, σε τμήματα που σαρώθηκαν μέσω κάποιας γυάλινης επιφάνειας και σε περιοχές που υπήρχαν ασυνέχειες στο ένα νέφος. Ενδιαφέρον αποτελούν οι μεγάλες τιμές που βρίσκονται σε σημεία μεταβάσεων, όπως σκάλες και πόρτες. Αυτές είναι δυνατόν να αποτελούν πραγματικές διαφορές στα νέφη, αφού αυτά τα σημεία θεωρούνται γνωστή πρόκληση για τον αλγόριθμο SLAM και απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή κατά τη σάρωση. Για να αξιολογηθεί η αξιοπιστία των τιμών, ιδιαίτερα στα σημεία αυτά, θα παρατηρηθεί συμπληρωματικά και το νέφος «Significant Change».



Εικόνα 7.73 – Διαφορές νεφών (Οριζόντια Τομή - Υπόγειο)



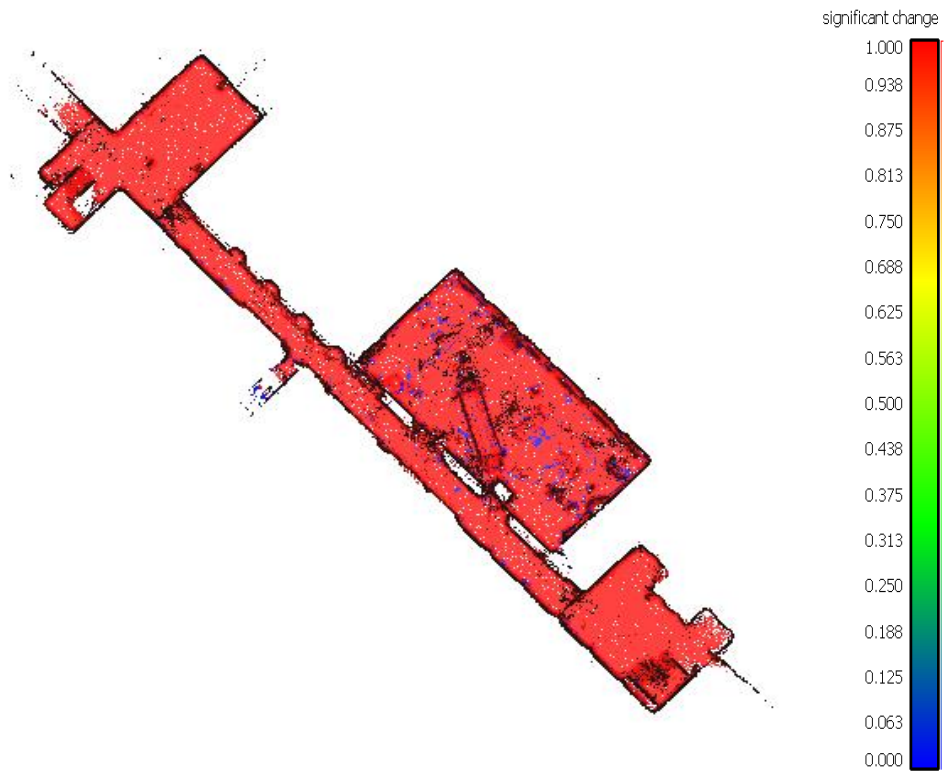
Εικόνα 7.74 – Διαφορές νεφών (Οριζόντια Τομή - Ισόγειο)



Εικόνα 7.75 – Κανονική κατανομή διαφορών

Σύμφωνα με το νέφος «Significant Change», οι περισσότερες διαφορές εντός της αίθουσας ελέγχου αλλά και στο διάδρομο με τα ντουλάπια αποθήκευσης δεν αποτελούν πραγματικές αλλαγές. Αυτό είναι αναμενόμενο, αφού το σφάλμα γεωαναφοράς και στα δύο νέφη ήταν αρκετά μικρό, και έτσι δεν δικαιολογούνται μεγάλες διαφορές γύρω από τους στόχους στην αίθουσα ελέγχου. Από την άλλη, οι διαφορές στο διάδρομο με τα ντουλάπια ήταν, εμφανώς, προϊόν ελλείψεων και λανθασμένης αντιστοίχισης σημείων και όχι πραγματικές αποστάσεις μεταξύ των νεφών. Τα σημεία που σαρώθηκαν μέσω γυάλινων επιφανειών έχουν, επίσης, αντιστοιχηθεί λανθασμένα και, ως εκ τούτου, οι αποστάσεις μεταξύ τους δεν είναι αξιόπιστες. Τα σημεία αυτά θα μπορούσαν να αφαιρεθούν χειροκίνητα για να βελτιωθεί το τελικό προϊόν, αλλά διατηρήθηκαν ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι εξωτερικές παρεμβάσεις στη διαδικασία της σύγκρισης και να αναδειχθεί η ικανότητα του backend τμήματος του εκάστοτε σαρωτή να φιλτράρει τέτοιου είδους θόρυβο.

Όσον αφορά στα σημεία μεταβάσεων, οι μετρημένες αποστάσεις μεταξύ των νεφών αποτελούν πραγματική αλλαγή, επιβεβαιώνοντας ότι η αυτόματη σύνδεση διαφορετικών χώρων στα νέφη σημείων είναι επιρρεπής σε μεγάλα σφάλματα. Τέλος, φαίνεται ότι οι διαφορές που παρατηρούνται στα άκρα του νέφους αποτελούν πραγματική αλλαγή και αποδίδονται, πιθανώς, σε στροφή του πρώτου νέφους ως προς το δεύτερο. Αυτό είναι πιθανό λόγω σφαλμάτων στη γεωαναφορά σε συνδυασμό με τις αποκλίσεις στην αυτόματη συνένωση των νεφών που εκτελεί το σύστημα.



Εικόνα 7.76 – Significant Change (Οριζόντια Τομή – Υπόγειο)



Εικόνα 7.77 – Significant Change (Οριζόντια Τομή – Ισόγειο)

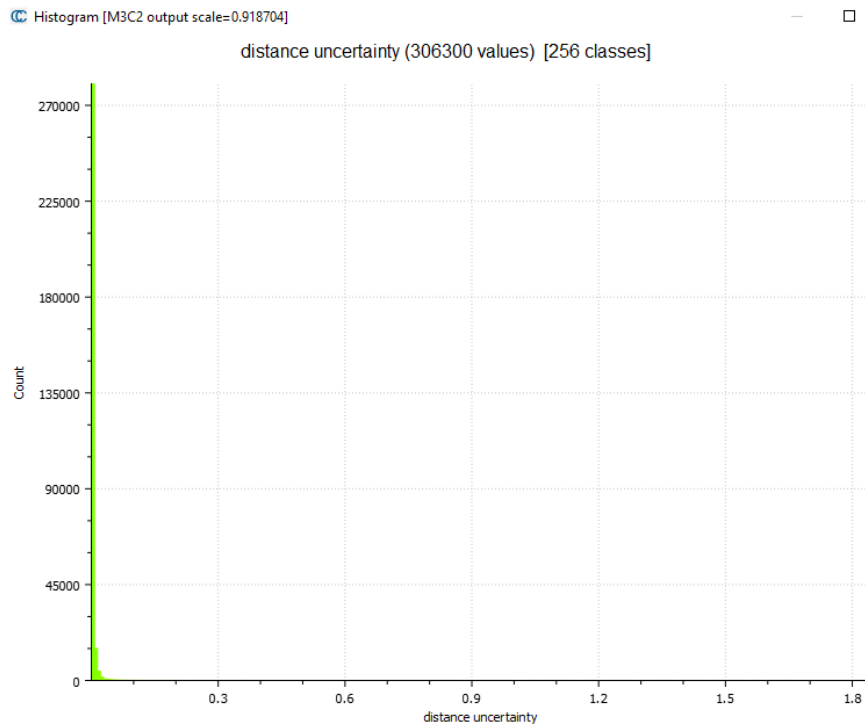
Τέλος, σύμφωνα με το προϊόν «Distance Uncertainty» οι αβεβαιότητες, στην πλειονότητά τους κυμαίνονται από το 1 έως τα 3cm. Οι μεγαλύτερες αβεβαιότητες λαμβάνουν χώρα, όπως είναι αναμενόμενο, στα άκρα του νέφους, σε περιοχές ελλείψεων και στον εξωτερικό χώρο του κτηρίου. Δεδομένου ότι οι τιμές είναι πολύ μικρές, η διάκριση τους φαίνεται καλύτερα στο διάγραμμα που ακολουθεί τα στιγμιότυπα των ορόφων.



Εικόνα 7.78 – Distance Uncertainty (Οριζόντια Τομή – Υπόγειο)

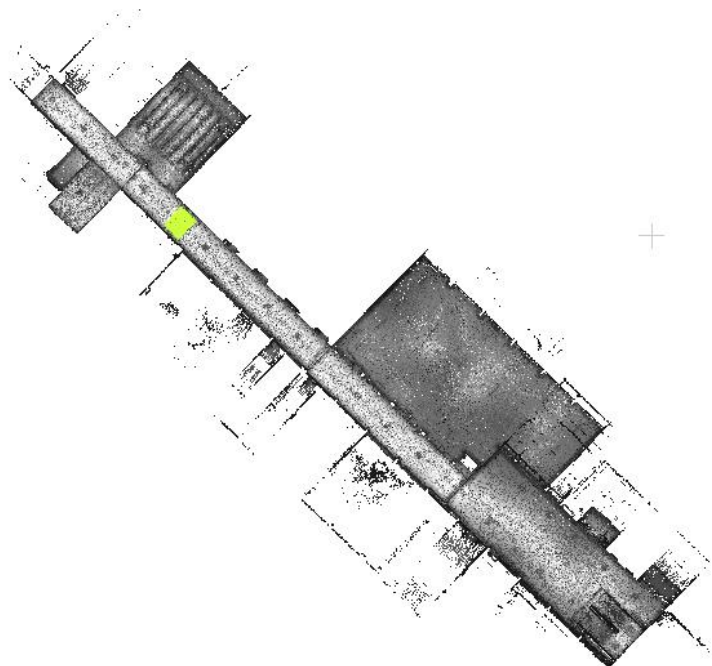


Εικόνα 7.79 – Distance Uncertainty (Οριζόντια Τομή – Ισόγειο)



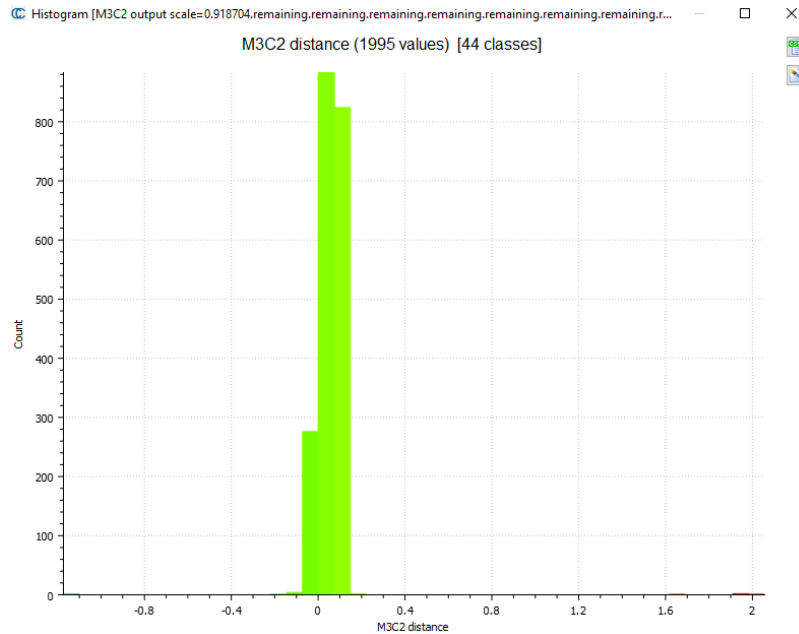
Εικόνα 7.80 – Διάγραμμα Αβεβαιοτήτων

Όπως και στις προηγούμενες δύο περιπτώσεις, για την αξιολόγηση των πραγματικών διαφορών μεταξύ των νεφών είναι σημαντικό να γίνεται σύγκριση σε τμήματα με όσο το δυνατό λιγότερο θόρυβο. Έτσι, έγινε και εδώ εξαγωγή ενός καθαρού, από θόρυβο, τμήματος το οποίο βρίσκεται στο διάδρομο του επίπεδου του ισογείου, ανάμεσα στο κέντρο Γεωπληροφορικής και τις αίθουσες Λ.



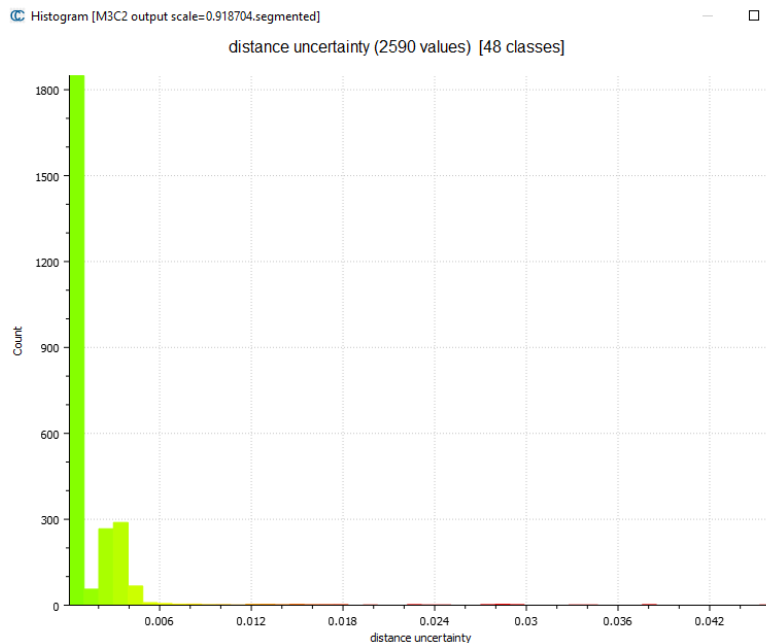
Εικόνα 7.81 – Διαφορές τμήματος νεφών

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα της κανονικής κατανομής, που αναφέρεται μόνο στο συγκεκριμένο τμήμα, η πλειονότητα των τιμών περιορίζεται σε διαφορές της τάξης των 10cm. Φαίνεται ότι οι τιμές αυτές αγγίζουν το κατώτατο όριο των διαφορών που είχαν ανιχνευτεί στις συγκρίσεις των εσωτερικών νεφών των δύο σαρωτών, επιβεβαιώνοντας πως οι μεγαλύτερες τιμές είναι προϊόντα χονδροειδών σφαλμάτων και όχι πραγματικών διαφορών στα νέφη.



Εικόνα 7.82 – Κανονική κατανομή διαφορών

Τέλος, όσον αφορά στις αβεβαιότητες στο τμήμα του διαδρόμου, αυτές δεν ξεπερνούν, τα 5mm, που αποτελεί μία εμφανώς βελτιωμένη τιμή σε σύγκριση με τις αβεβαιότητες των νεφών σαν σύνολο.



Εικόνα 7.83 – Διάγραμμα αβεβαιοτήτων

8. Συμπεράσματα

Η τεχνολογία SLAM αποτελεί, αναμφίβολα, μια πρωτοποριακή αναβάθμιση στο χώρο των σαρωτών. Εγγυάται τη γρήγορη συλλογή δεδομένων, με ελάχιστες ενέργειες από μεριάς του χειριστή, ενώ στα θετικά προστίθεται, επίσης, η ευκολία μεταφοράς και αποθήκευσης του εξοπλισμού. Το γεγονός ότι οι σαρωτές με την τεχνολογία αυτή είναι αποκλειστικά φορητοί (handheld), τους κάνει ιδανικούς για δύσβατες ή δυσπρόσιτες περιοχές και πολύπλοκα αντικείμενα. Επιπλέον, μειώνει τις απαιτήσεις ανθρωπίνου δυναμικού, αφού ένας μόνο χειριστής αρκεί για να σαρωθούν ικανοποιητικά μεγάλες περιοχές σε ελάχιστο χρόνο. Τόσο η γρήγορη καταγραφή, όσο και η αυτόματη συνένωση των νεφών που καταγράφονται, ελαχιστοποιεί τις μετέπειτα επεξεργασίες και είναι ισοδύναμη με μέρες αντίστοιχης δουλειάς τόσο στο πεδίο όσο και στο γραφείο.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω και μέσα από την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής, κάνοντας χρήση δύο εκ των πιο πρόσφατων σαρωτών Laser με τεχνολογία SLAM, συμπεραίνονται τα παρακάτω.

Διαδικασία σάρωσης:

Οι σαρωτές έχουν σχεδιαστεί με γνώμονα το χειριστή και γι' αυτό η χρήση τους είναι πολύ εύκολη. Στην περίπτωση των δύο σαρωτών που χρησιμοποιήθηκαν, αρκούσε το πάτημα ενός κουμπιού τόσο για τη σάρωση, όσο και για τη μεταφορά των δεδομένων. Όσον αφορά στη διαδικασία σάρωσης, ο σαρωτής BLK2GO ήταν πιο εύκολος στη μεταφορά, καθώς ζύγιζε σχεδόν το ένα τρίτο του σαρωτή ZEB Horizon, ενώ αρκετά βοηθητική ήταν και η χρήση της εφαρμογής παρακολούθησης της σάρωσης σε πραγματικό χρόνο. Παρόλα αυτά ο σαρωτής ZEB Horizon, λόγω της βάσης του, μπορεί να μεταφερθεί με παραπάνω από έναν τρόπους, ενώ η λαβή του BLK2GO περιορίζει το χειριστή να κρατάει το σαρωτή με το χέρι.

Μπαταρία:

Η μπαταρία του ZEB Horizon διασφαλίζει σχεδόν τον πενταπλάσιο χρόνο συνεχούς χρήσης, σε σχέση με το σαρωτή BLK2GO, συμβάλλοντας ενεργά στην εξοικονόμηση χώρου και καταργώντας την ανάγκη μεταφοράς πολλαπλών μπαταριών και την ανάγκη επανειλημμένων φορτίσεων.

Συλλογή δεδομένων:

Αν και ο σαρωτής BLK2GO σαρώνει περισσότερα σημεία ανά δευτερόλεπτο, το νέφος του ZEB Horizon ήταν αισθητά πιο πυκνό, σε όλες τις σαρώσεις. Επίσης, το πεδίο σάρωσης της κεφαλής του ZEB Horizon έδρασε πλεονεκτικά, καθώς σάρωνε 360 μοίρες κατακόρυφα και 270 μοίρες οριζόντια, αφήνοντας εκτός πεδίου σάρωσης μόνο τη φιγούρα του χειριστή. Όσον αφορά το πεδίο σάρωσης του BLK2GO, με 360 μοίρες οριζόντια σάρωση και 270 μοίρες κατακόρυφη, δημιουργήθηκαν αναπόφευκτα κενά στο τμήμα του νέφους που θα βρισκόταν το έδαφος, ενώ η φιγούρα του χειριστή ήταν σε όλες σχεδόν τις λήψεις. Μετά την επεξεργασία των δεδομένων έγινε σαφές ότι η τοποθέτηση των στόχων θα έπρεπε να γίνει

σε κάποιο τοίχο και όχι στο έδαφος γιατί αυτό επηρέασε πολύ την ακρίβεια εντοπισμού τους από το σαρωτή. Αντίστοιχα, για το σαρωτή ZEB Horizon, ο αυτόματος ορισμός ενός σημείου αναφοράς, ανάλογα με το χρόνο στάσης, ευνοεί σε περιπτώσεις που είναι αδύνατη η τοποθέτηση στόχων, αλλά δεν ήταν 100% ακριβής, καθώς υπήρχαν τόσο σημεία που επισημάνθηκαν, λανθασμένα, ως στάσεις όσο και ελλείψεις. Τέλος, όσον αφορά στο χρωματισμό του νέφους, ο σαρωτής BLK2GO διαθέτει ενσωματωμένες κάμερες, ενώ ο σαρωτής ZEB Horizon χρειάζεται προσθήκη εξωτερικού αξεσουάρ (ZEB Vision), για τη λειτουργία αυτή, που φυσικά αυξάνει το κόστος.

Κόστος:

Η αρχική τιμή του ZEB Horizon είναι κατά 2,299 ευρώ μικρότερη του BLK2GO. Παρόλα αυτά αν ο χειριστής επιδιώκει την παραγωγή έγχρωμου νέφους, η τιμή της κάμερας ZEB Vision ανέρχεται στα 7,678 ευρώ, γεγονός που αυξάνει το συνολικό κόστος του ZEB Horizon στα 53,648 ευρώ. Στην περίπτωση αυτή, η τιμή του ZEB Horizon, με την προσθήκη του ZEB Vision, ξεπερνά αυτή BLK2GO κατά 5,379 ευρώ.

Επεξεργασία - Αποτελέσματα:

Όσον αφορά στην επεξεργασία των νεφών, τα δεδομένα του κάθε ενός σαρωτή εισήχθησαν σε συγκεκριμένο περιβάλλον που έχει αναπτύξει η κάθε εταιρία. Και στις δύο περιπτώσεις, η χρήση των λογισμικών ήταν εύκολη και κατανοητή, καθώς υπάρχουν ακριβείς οδηγίες για τις επιμέρους επεξεργασίες. Τα λογισμικά των εταιριών χρησιμοποιήθηκαν μόνο για τη γεωαναφορά των νεφών, ενώ για τη σύγκριση χρησιμοποιήθηκε λογισμικό ελεύθερης χρήσης. Στο συγκεκριμένο κομμάτι της επεξεργασίας, είναι φανερό ότι τα αποτελέσματα της γεωαναφοράς έχουν πολύ μικρότερα σφάλματα στην περίπτωση του ZEB Horizon. Εξαιρέση αποτελεί το εσωτερικό νέφος, όπου τα σφάλματα των δύο σαρωτών είναι ίδια. Η μεγάλη διαφορά στα σφάλματα γεωαναφοράς στις εξωτερικές σαρώσεις αποδίδεται, κυρίως, στην τοποθέτηση των στόχων στο δάπεδο, μη λαμβάνοντας υπόψη το πεδίο σάρωσης του σαρωτή και στις κλίσεις που δόθηκαν και αλλοίωσαν αναπόφευκτα την ποιότητα των φωτογραφιών. Η θεωρία αυτή επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα της εσωτερικής σάρωσης, στην οποία οι στόχοι ήταν τοποθετημένοι σε βάθρα, και όπου τα σφάλματα γεωαναφοράς ήταν ίδια και για τους δύο σαρωτές.

Όσον αφορά το back-end τμήμα των σαρωτών, ένα χαρακτηριστικό που επιβεβαιώθηκε επανειλημμένα είναι ότι ο σαρωτής BLK2GO φαίνεται να αναγνώριζε με μεγαλύτερη επιτυχία τις γυάλινες επιφάνειες σε σχέση με το σαρωτή ZEB Horizon, που τις διαπερνούσε σαν να απουσίαζαν. Παρόλα αυτά, σε επιφάνειες υψηλής ανακλαστικότητας, που δεν ήταν γυαλί, ο σαρωτής ZEB Horizon κατέγραφε πιο επιτυχημένα την επιφάνεια και περιόριζε το θόρυβο. Η ποιότητα του νέφους, λαμβάνοντας υπόψη το θόρυβο, τις επιφάνειες που αναγνώριζε και κατέγραφε επιτυχημένα ο σαρωτής, την πυκνότητα και έκταση του νέφους, και τους αλγορίθμους περιορισμού των κινούμενων στόχων, ο σαρωτής ZEB Horizon παράγαγε καλύτερα αποτελέσματα.

Μετά από συλλογική αξιολόγηση της χρήσης των σαρωτών, συμπεραίνεται ότι υπήρχαν συνθήκες που θα μπορούσαν να έχουν αποφευχθεί, και που ήταν λογικό να αυξήσουν τα σφάλματα. Για το σαρωτή ZEB Horizon, η κύρια αιτία των σφαλμάτων ήταν ο αυξημένος

θόρυβος λόγω κινούμενων στόχων στο χώρο, αλλά και η βροχή, ενώ στην περίπτωση του σαρωτή BLK2GO, καθοριστικό ρόλο έπαιξε η τοποθέτηση των στόχων για τη γεωαναφορά. Και στις δύο περιπτώσεις η σάρωση πρέπει να γίνεται με ταχύτητα κανονικού βαδίσματος και με ιδιαίτερη προσοχή σε σημεία μεταβάσεων, ενώ θα έπρεπε να έχει αποφευχθεί η σάρωση σε πολύ κοντινή απόσταση από το αντικείμενο μελέτης.

Τελικώς, και λαμβάνοντας υπόψη ότι και οι δύο σαρωτές που χρησιμοποιήθηκαν, δοκιμάστηκαν σε απαιτητικό περιβάλλον, τα αποτελέσματα παραμένουν αρκετά εντυπωσιακά.

Αξιολόγηση ακριβειών κατασκευαστή:

Με βάση τα πειραματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν και υπέστησαν επεξεργασία, είναι σχεδόν βέβαιο ότι οι ακρίβειες των κατασκευαστών, και των δύο σαρωτών, μπορούν να επιτευχθούν μόνο σε εσωτερικούς χώρους, με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Ιδανική θα ήταν η αποφυγή επιφανειών υψηλής ανακλαστικότητας, η διατήρηση μίας σταθερής απόστασης από το αντικείμενο σάρωσης και η ελαχιστοποίηση των μεταβάσεων μεταξύ διαφορετικών χώρων. Επιπλέον, θα ήταν επιθυμητή η απομόνωση του χώρου από κόσμο και το συχνό κλείσιμο των βρόχων, που δημιουργούνται κατά τη σάρωση, ώστε να ελαχιστοποιούνται τα σφάλματα.

Αξιολόγηση αποτελεσμάτων σε σχέση με TLS και TPS:

Τα νέφη των φορητών (handheld) σαρωτών σε σχέση με τα αυτόματα συνενωμένα νέφη αντίστοιχων TLS είναι, προφανώς, υποδεέστερα από άποψη ακρίβειας, με τη διαφορά να ανέρχεται σε μερικά εκατοστά. Η διαφορά μεγαλώνει ακόμα περισσότερο στην περίπτωση των TPS, των οποίων τα σφάλματα δεν ξεπερνούν, τις περισσότερες φορές, τα λίγα χιλιοστά. Τέτοιου είδους ακρίβεια δεν μπορεί να επιτευχθεί με την τεχνολογία SLAM, τουλάχιστον ακόμα. Αν η ακρίβεια των λίγων χιλιοστών δεν αποτελεί, παρόλα αυτά, προϋπόθεση, η χρήση φορητών σαρωτών SLAM αποτελεί πιο αξιόλογη λύση από άποψη χρόνου, ευελιξίας και όγκου πληροφορίας.

Συμπερασματικά, παρόλο που οι φορητοί σαρωτές αποτελούν τη χρυσή τομή της γρήγορης καταγραφής και της ευκολίας χρήσης, δεν μπορούν να αποτελέσουν καθολική ή αποκλειστική λύση για όλες τις εργασίες πεδίου. Αυτό προκύπτει αφενός, λόγω του μεγάλου τους κόστους και αφετέρου, λόγω των ξεχωριστών απαιτήσεων της κάθε εργασίας, οπότε, συνήθως, προτιμάται ο συνδυασμός τους με κάποιο άλλο όργανο καλύτερης ακρίβειας.

Περιπτώσεις που θα μπορούσε να αξιοποιηθεί αυτόνομα η τεχνολογία των φορητών σαρωτών είναι, για παράδειγμα, στην παρακολούθηση των όγκων χωματουργικών εργασιών, όπου η ακρίβεια δεν είναι αυστηρή, και στη σάρωση σπηλαίων, όπου η τοποθέτηση τριπόδου είναι δύσκολη έως αδύνατη. Οι εφαρμογές πέραν των εργασιών του Τοπογράφου Μηχανικού, όπου ίσως η ακρίβεια δεν παίζει τόσο μεγάλο ρόλο, είναι αμέτρητες. Μερικές από αυτές λαμβάνουν ήδη χώρα, εδώ και μερικά χρόνια και αφορούν εικονικές περιηγήσεις σε μουσεία, ή εικονική ξενάγηση σε ακίνητα μέσω μεσιτικών γραφείων.

Περίληπτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων:

Χαρακτηριστικό/Σαρωτής	ZEB Horizon	BLK2GO
Εμβέλεια Σάρωσης	100m, με τη βέλτιστη ακρίβεια να παρουσιάζεται περίπου στο μισό της απόστασης αυτής	25m, με τη βέλτιστη ακρίβεια να παρουσιάζεται περίπου στο μισό της απόστασης αυτής
Εξοπλισμός για χρωματισμό νέφους	Ανάγκη επιπρόσθετου εξοπλισμού για χρωματισμό του νέφους (ZEB Vision)	Ενσωματωμένες κάμερες
Τιμή	45,970 ευρώ / 53,648 ευρώ (με ZEB Vision)	48,269 ευρώ
Ευκολία χρήσης	Εξαιρετικά εύκολο στη χρήση, χωρίς τη δυνατότητα παρακολούθησης της διαδικασίας σε πραγματικό χρόνο	Εξαιρετικά εύκολο στη χρήση, με δυνατότητα παρακολούθησης της διαδικασίας σε πραγματικό χρόνο
Θόρυβος	Παρατηρήθηκε εκτεταμένη παραγωγή θορύβου γύρω από τη βλάστηση και γύρω από γυάλινες επιφάνειες. Περιορισμένος θόρυβος γύρω από άλλες επιφάνειες υψηλής ανακλαστικότητας, όπως μέταλλο.	Παρατηρήθηκε εκτεταμένη παραγωγή θορύβου γύρω από επιφάνειες υψηλής ανακλαστικότητας, όπως μέταλλο, και γύρω από τη βλάστηση. Περιορισμένος θόρυβος γύρω από γυάλινες επιφάνειες.
Ανίχνευση κινούμενων στόχων	Περιορισμένη ανίχνευση κινούμενων στόχων	Περιορισμένη ανίχνευση κινούμενων στόχων
Ενώσεις νεφών	Επιτυχημένη ένωση σε σημεία μεταβάσεων, σωστή απεικόνιση της γεωμετρίας των αντικειμένων	Επιτυχημένη ένωση σε σημεία μεταβάσεων, σωστή απεικόνιση της γεωμετρίας των αντικειμένων
Γεωαναφορά	Δυνατότητα γεωαναφοράς χωρίς τη χρήση στόχων και ανεξάρτητα από τη θέση της στάσης γνωστών συντεταγμένων	Δυνατότητα γεωαναφοράς με ή χωρίς τη χρήση στόχων τα αποτελέσματα της οποίας μπορεί να επηρεαστούν σημαντικά από τη θέση της στάσης γνωστών συντεταγμένων

Πίνακας 8.1 – Σύγκριση σαρωτών

Βιβλιογραφία

1. Ahmad N., Ariffin R., Ghazilla R. & Khairi M.N. 2013, 'Reviews on Various Inertial Measurement Unit (IMU) Sensor Applications', *International Journal of Signal Processing Systems*, vol.1, no.2, pp. 256–262.
2. Ayache N. & Faugeras O. 1988, 'Building, registering, and fusing noisy visual maps', *International Journal of Robotics Research*, vol.7, no.6, pp. 45-65.
3. Besl P.J. & McKay N.D. 1992, 'A method for registration of 3-D shapes', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.14, no.2, pp.239-256, DOI:10.1109/34.121791.
4. Boehler W., Bordas V. M. & Marbs A. 2003, 'Investigating Laser Scanner Accuracy', *The international archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, Institute for Spatial Information and Surveying Technology, Mainz, Germany*, vol.34, no.5, pp.696-701.
5. Bustos A., Chin T., Eriksson A. & Reid I. 2019, 'Visual SLAM: Why Bundle Adjust?', *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2385–2391, DOI:10.1109/ICRA.2019.8793749.
6. Chatila R. & Laumond J.P. 1985, 'Position referencing and consistent world modeling for mobile robots', *IEEE International Conference on Robotics and Automation, St. Louis, MO, USA*, vol. 2, pp.138 – 145.
7. Checchin P., Gérossier F., Blanc C., Chapuis R. & Trassoudaine L. 2009, 'Radar Scan Matching SLAM using the Fourier-Mellin Transform', *Field and Service Robotics, Results of the 7th International Conference, Cambridge, Massachusetts, USA*, vol.62, pp.151-161, DOI:10.1007/978-3-642-13408-1_14.
8. CloudCompare, M3C2 (plugin), CloudCompareWiki, n.d.
9. Crowley J. 1989, 'World modeling and position estimation for a mobile robot using ultra-sonic ranging', *IEEE Conference on Robotics and Automation, ICRA 89, Scottsdale Az., Vol 3*, pp 1574-1579.
10. Debeunne C & Vivet D. 2020. 'A Review of Visual-LiDAR Fusion based Simultaneous Localization and Mapping'. *Sensors*, vol 20, no.7.
11. Diosi A. & Kleeman L. 2007, 'Fast Laser Scan Matching using Polar Coordinates', *The International Journal of Robotics Research*, vol.26, no.10, pp.1125-1153, DOI:10.1177/0278364907082042.
12. Durrant-Whyte H. 1988, 'Uncertain geometry in robotics', *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 4, no.1, pp. 23-31.
13. Durrant-Whyte H. & Bailey T. 2006, 'Simultaneous Localization and Mapping: Part I', *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 13, no.2, pp. 99-110.
14. Fairfield N., Jonak D., Kantor G. & Wettergreen D. 2007, 'Field Results of the Control, Navigation, and Mapping Systems of a Hovering AUV', *The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, USA*.
15. GeoSLAM 2019, ZEB-HORIZON Specifications Sheet, GeoSLAM, 2019
16. GeoSLAM 2019, ZEB-HORIZON User Manual v1.2, GeoSLAM, 2019
17. GeoSLAM 2021, Accuracy Report, Assessing the performance of GeoSLAM's handheld laser scanners, GeoSLAM, 2021
18. Grisetti G., Stachniss C. & Burgard W. 2007, 'Improved Techniques for Grid Mapping with Rao-Blackwellized Particle Filters', *IEEE Transactions on Robotics*, vol.23, no.1, pp.34-46, DOI:10.1109/TRO.2006.889486.

19. Hong Z, Petillot Y, Wallace A. & Wang S. 2022, 'RadarSLAM: A robust simultaneous localization and mapping system for all weather conditions', *The International Journal of Robotics Research*, vol.41, no.5, pp.519-542.
20. Kersten T. P., Mechelke K., Lindstaedt M. & Sternberg H. 2009. 'Methods for Geometric Accuracy Investigations of Terrestrial Laser Scanning Systems', *Photogramm. Fernerkund. Geoinf*, pp.301-315.
21. Κουρουγιώτη Ο. 2018, 'Παραγωγή Ορθοφωτογραφιών μεγάλης κλίμακας με εκμετάλλευση της τεχνικής SLAM – Εφαρμογή στην Καλαμωτή Χίου', Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ελλάδα.
22. Leica Geosystems 2019, BLK2GO User Manual Version 1.0, Leica Geosystems BLK, 2019
23. Leica Geosystems 2021, Leica BLK2GO: Reality Capture. Handheld, Leica Geosystems BLK, 2021
24. Leica Geosystems 2022, Leica Geosystems, Calibration Certificates, White Paper, Leica Geosystems, 2022
25. Leonard J. & Durrant-Whyte H. 1991, 'Simultaneous map building and localization for an autonomous mobile robot', *IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems '91*, Osaka, Japan, vol.3, pp. 1442-1447.
26. Martin C. Martin & Moravec P. Hans 1966, 'Robot Evidence Grids', The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.
27. MathWorks, What is SLAM:3 things you need to know, MathWorks, n.d.
28. Metrica, Services-Certificates, Metrica, n.d.
29. O'Mahony N., Campbell S., Krpalkova L., Riordan, D., Walsh J., Murphy A. & Ryan C. 2018, 'Deep Learning for Visual Navigation of Unmanned Ground Vehicles: A review.', 29th Irish Signals and Systems Conference (ISSC), DOI:10.1109/ISSC.2018.8585381.
30. Smith R., Cheeseman P. & Self M. 1986, 'Estimating Uncertain Spatial Relationships in Robotics', *Second Annual Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA, USA, vol.1, pp.435-461.
31. Taheri H. & Zhao X. 2021, 'SLAM; definition and evolution', *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol.97, no.5, DOI:10.1016/j.engappai.2020.104032.
32. Tateno, K., Tombari F., Laina I. & Navab N. 2017, 'CNN – SLAM: Real-time dense monocular slam with learned depth prediction', *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 6565-6574.
33. Τσακίρη Μ., Σταθάς Δ., Μπίθας Α. & Βαλάνη Α. 2005, 'Ανάπτυξη Μεθοδολογίας Ελέγχου Επίγειων Σαρπών Laser', Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα Ελλάδα.
34. Wang Z. 2018, 'Structure from Motion with Higher-level Environment Representations', MA thesis, The Australian National University, Canberra, Australia.
35. Wijk O. & Christensen H. 2000, 'Triangulation-Based Fusion of Sonar Data with Application in Robot Pose Tracking', *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol.16, no.6, pp.740-752, DOI:10.1109/70.897785.
36. Xia L, Cui J, Shen R, Xu X, Gao Y & Li X. 2020, 'A survey of image semantics-based visual simultaneous localization and mapping: Application-oriented solutions to autonomous navigation of mobile robots', *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 17, no. 3, DOI:10.1177/1729881420919185
37. Zunino G. & Christensen H.I. 2001, 'SLAM in Realistic Environments' in M. Devy (ed.), *Symposium on Intelligent Robotic Systems*, Toulouse, France.