



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ-ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ

**ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΣΑΡΩΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ SLAM ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ
ΤΗΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΚΛΗΡΟΝΟΜΙΑΣ**

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ Θ/Κ «Γ.ΑΒΕΡΩΦ»

Διπλωματική Εργασία

της

Μαρίας Ροϊδούλια



Επιβλέπουσα
Μαρία Τσακίρη
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα,
Φεβρουάριος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ-ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ

ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΣΑΡΩΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ SLAM ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΤΗΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΚΛΗΡΟΝΟΜΙΑΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ Θ/Κ «Γ.ΑΒΕΡΩΦ»

Διπλωματική Εργασία

της

Μαρίας Ροϊδούλια

Επιβλέπουσα:

Μαρία Τσακίρη

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή:

(Υπογραφή)

.....
Γεώργιος Πανταζής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Μαρία Τσακίρη
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Ορθοδοξία Αραμπατζή
Επίκουρος Καθηγήτρια
Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2023

(Υπογραφή)

.....

ΜΑΡΙΑ ΡΟΪΔΟΥΛΙΑ

Διπλωματούχος Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός-Μηχανικός Γεωπληροφορικής
Ε.Μ.Π.

Copyright © Ροϊδούλια Μαρία, 2023

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τη συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, η ζήτηση για την παραγωγή ψηφιακών τρισδιάστατων μοντέλων, με χαμηλό κόστος και σχετικά γρήγορο τρόπο, παρουσιάζει αλματώδη αύξηση. Παράλληλα, υπάρχει η ανάγκη διαφύλαξης και προβολής της πολιτιστικής κληρονομιάς, όπου η τοπογραφία μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο, συμβάλλοντας καθοριστικά σε αυτό, μέσα από την παραγωγή τέτοιων τρισδιάστατων μοντέλων. Από την φαρέτρα της πολιτιστικής κληρονομιάς δεν θα μπορούσαν να λείπουν και τα ιστορικά πλοία, που είτε αποτέλεσαν τεχνολογικά επιτεύγματα της εποχής τους, είτε συνέβαλαν καθοριστικά στην διαμόρφωση της παγκόσμιας και εθνικής ιστορίας. Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην ψηφιακή τρισδιάστατη τεκμηρίωση της ναυτικής κληρονομιάς και συγκεκριμένα στην αποτύπωση σύνθετων εσωτερικών χώρων που ανήκουν σε ένα σύμβολο πολιτιστικής κληρονομιάς. Πρόκειται για το ιστορικό πολεμικό πλοίο Θ/Κ «Γ. Αβέρωφ». Βασικός σκοπός είναι η δημιουργία εικονικών περιηγήσεων για ορισμένους χώρους του πλοίου, προκειμένου να δημιουργηθεί μία ψηφιακή βιβλιοθήκη, στα πλαίσια της διατήρησης της ναυτικής πολιτιστικής κληρονομιάς. Τα συστήματα χαρτογράφησης GeoSLAM ZEB Revo και ZEB Horizon που χρησιμοποιήθηκαν για τον σκοπό αυτό, βασίζονται στην τεχνολογία SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), η οποία αφορά την τρισδιάστατη σάρωση του χώρου εν κινήσει, έχοντας ταυτόχρονα τη δυνατότητα αυτοπροσδιορισμού του οργάνου στο προς σάρωση άγνωστο περιβάλλον, χωρίς την ανάγκη χρήσης στόχων αναφοράς ή την εξάρτηση από το παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα πλοήγησης GNSS. Ακόμη για την επίτευξη του σκοπού της εργασίας, χρησιμοποιήθηκε η περιστρεφόμενη κατά 360° κάμερα Matterport Pro2 3D, η οποία επίσης βασίζεται στην τεχνολογία SLAM και επιτρέπει την ανακατασκευή του χώρου σε πραγματικό χρόνο, με μεγάλη λεπτομέρεια και με φωτορεαλιστική απόδοση. Παράλληλα πραγματοποιήθηκε έλεγχος της μετρητικής αξιοπιστίας για καθένα από τα τρία συστήματα χαρτογράφησης, με την σύγκριση κάποιων αποστάσεων που είχαν μετρηθεί με την χρήση μετροταινίας και αυτών που μετρήθηκαν σε καθένα από αυτά. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι σαρωτές GeoSLAM ZEB Revo και ZEB Horizon δίνουν την ίδια ακρίβεια, η οποία είναι καλύτερη από αυτήν που δίνει η κάμερα Matterport Pro2 3D. Ακόμη διαπιστώθηκε ότι η ακρίβεια των μετρήσεων για τα τρία όργανα είναι συμβατή με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Τέλος πραγματοποιήθηκε σύγκριση των νεφών σημείων της κάμερας Matterport Pro2 3D με τα νέφη σημείων του σαρωτή ZEB Horizon που χρησιμοποιήθηκαν ως αναφορά, προκειμένου να ελεγχθεί ο παράγοντας κλίμακας που υπεισέρχεται στα δεδομένα της πρώτης. Τα νέφη αυτά συγκρίθηκαν ως προς τις συνολικές τους διαστάσεις, μέσα από τον υπολογισμό των απόλυτων αποστάσεων από νέφος σε νέφος (C2C). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι δεν υπάρχει παραμόρφωση λόγω κλίμακας στα δεδομένα της κάμερας Matterport.

Λέξεις-Κλειδιά: πολιτιστική κληρονομιά, ιστορικά πλοία, χαρτογράφηση εσωτερικών χώρων, SLAM, εικονική περιήγηση, μετρητική αξιοπιστία



Abstract

In recent years, there has been a surge in demand for low-cost, easy produced digital three-dimensional models. At the same time, there is a need to preserve and promote cultural heritage, and topography can play a significant role in this by producing such three-dimensional models. The historical ships, which were either technological achievements of their time or contributed significantly to the national history, could not be left out of the quiver of cultural heritage. This diploma thesis is concerned with the digital three-dimensional documentation of maritime heritage, specifically the mapping of complex interiors belonging to a cultural heritage symbol, namely the historic warship B/S G. Averof. In the context of preserving maritime cultural heritage, the practical part of the thesis refers to the creation of virtual tours for specific areas of the ship in order to create a digital library. The GeoSLAM ZEB Revo and ZEB Horizon mapping systems used for this purpose are based on SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) technology, which concerns the three-dimensional scanning of space while moving, with the ability to self-identify the instrument in the unknown environment to be scanned, without the need for reference targets or reliance on the GNSS global navigation satellite system. The 360° rotating Matterport Pro2 3D camera, which is also based on SLAM technology and allows the reconstruction of the space in real time, in great detail, and with photorealistic performance, was also used to achieve the purpose of the work. Simultaneously, the measurement reliability of each of the three mapping systems was tested by comparing distances measured with tape measure to those measured in each of them. The results showed that the GeoSLAM ZEB Revo and ZEB Horizon scanners give the same accuracy, which is better than that given by the Matterport Pro2 3D camera. The accuracy of the measurements for the three instruments was also found to be compatible with the manufacturer's specifications. In order to determine the scale factor at play in the data from the Matterport Pro2 3D camera, the point clouds from the latter were compared to the reference point clouds from the ZEB Horizon scanner. These clouds were compared in terms of their total dimensions by calculating the absolute distances between them (C2C). The results showed that there is no scale distortion in the Matterport camera data.

Keywords: cultural heritage, historic ships, indoor mapping, SLAM, virtual tour, measurement reliability

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της συγγραφής της παρούσας διπλωματικής εργασίας, σφραγίζεται η έξοδός μου από έναν πενταετή κύκλο προπτυχιακών σπουδών στην Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών-Μηχανικών Γεωπληροφορικής, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Μία σχολή που μου έμαθε τον τρόπο που πρέπει να σκέφτομαι ως μηχανικός για την επίλυση των προβλημάτων που τίθενται. Η εκπόνηση της παρούσας εργασίας δεν θα ήταν εφικτή, χωρίς την συμβολή ορισμένων ανθρώπων, για τους οποίους θέλω να κάνω ειδική μνεία και να τους ευχαριστήσω ιδιαίτερα.

Αρχικά ευχαριστώ θερμά την κα. Μαρία Τσακίρη, καθηγήτρια της Σχολής Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών-Μηχανικών Γεωπληροφορικής, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος. Κυρίως θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου για την ενθάρρυνση και την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου για την υλοποίηση του θέματος, την αμέριστη στήριξή της που με συντρόφευσε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, αλλά και για την καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την επίβλεψη, μέσα από την επισήμανση κάποιων βασικών διορθώσεων.

Επιπροσθέτως θα ήθελα να ευχαριστήσω ολόψυχα τον κ. Αντώνη Σιούλη, μέλος Ε.Δ.Ι.Π. της Σχολής Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών-Μηχανικών Γεωπληροφορικής, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την πολύτιμη βοήθειά του στην οργάνωση και την πραγματοποίηση των εργασιών πεδίου, στην επίλυση των αποριών που προέκυπταν καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, αλλά και για τις συμβουλές που μου έδινε κατά την συγγραφή της.

Ευχαριστώ τον Υποπλοίαρχο Γιώργο Κυριαζή ΠΝ, αλλά και τα μέλη του πληρώματος του θωρηκτού Θ/Κ «Γ. Αβέρωφ», στο οποίο έγινε η εφαρμογή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για την εγκάρδια υποδοχή τους και την προθυμία τους να βοηθήσουν σε οτιδήποτε χρειάστηκε κατά την διάρκεια των εργασιών πεδίου.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην εταιρία JGC A.E., για την διάθεση της κάμερας Matterport Pro2 3D. Συγκεκριμένα θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Γιάννη Κάλφα για την συμβολή του στην επίλυση των αποριών που είχα πάνω στην τεχνολογία του οργάνου, αλλά και την καθοδήγησή του με την παροχή βοηθητικού υλικού για την κατανόησή της.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην εταιρία Landmark για την διάθεση των σαρωτών GeoSLAM ZEB Revo και ZEB Horizon. Ειδικότερα θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Γιάννη Ψαλτάκη και τον κ. Δημήτρη Μαρκίδη, για την σημαντική βοήθειά τους στην επεξεργασία των δεδομένων και στον χρόνο που διέθεσαν για την επίλυση των αποριών που είχα πάνω στην τεχνολογία των οργάνων. Μα πάνω απ' όλα τους ευχαριστώ για την ευγένεια που είχαν σε κάθε επικοινωνία μας.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ θέλω να εκφράσω και να αφιερώσω στους γονείς μου Παναγιώτη και Κατερίνα, οι οποίοι όλα αυτά τα χρόνια μέσα από θυσίες με στηρίζουν και συμπλέουν μαζί μου στην πορεία που έχω χαράξει. Χωρίς αυτούς δεν θα μπορούσα να ολοκληρώσω τις σπουδές μου και να επιτύχω τους στόχους που έχω θέσει. Τέλος δεν θα μπορούσα να παραλείψω τους αγαπημένους μου φίλους και φίλες, που μου συμπαραστάθηκαν και με ενθάρρυναν, κάθε φορά που αντιμετώπιζα κάποια δυσκολία, κατανοώντας τα άγχη και τις ανησυχίες μου.

Μαρία Ροϊδούλια



Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	iv
Abstract	v
Ευχαριστίες.....	vi
Πίνακας περιεχομένων	vii
Ευρετήριο εικόνων.....	x
Ευρετήριο σχημάτων	xviii
Ευρετήριο πινάκων.....	xix
Ευρετήριο διαγραμμάτων.....	xx
Πίνακας συντομογραφιών	xxi
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	2
1.1 Η σημασία της τρισδιάστατης τεκμηρίωσης των χώρων πολιτιστικής κληρονομιάς.	2
1.2 Σκοπός, στόχοι και μεθοδολογικό πλαίσιο εργασίας.....	3
1.3 Δομή εργασίας.....	4
Κεφάλαιο 2: Τρισδιάστατα δεδομένα και σαρωτές	7
2.1 Εισαγωγή.....	7
2.2 Μέθοδος σάρωσης με laser	7
2.3 Επίγειοι σαρωτές laser ανά τεχνολογία χρήσης.....	9
2.3.1 Ενεργοί σαρωτές απόστασης.....	10
2.4 Σαρωτές laser ανά πλατφόρμα χρήσης.....	14
2.5 Εφαρμογές σάρωσης με laser	21
2.6 Κινητά συστήματα σάρωσης	23
2.6.1 Αρχή λειτουργίας και αισθητήρες κινητών συστημάτων σάρωσης.....	23
2.7 Σύγκριση των στατικών και κινητών συστημάτων σάρωσης.....	29
Κεφάλαιο 3: Τεχνολογία SLAM	32
3.1 Εισαγωγή.....	32
3.2 Η μέθοδος του ταυτόχρονου εντοπισμού και χαρτογράφησης (SLAM)	32



3.2.1 Αρχή λειτουργίας τεχνολογίας SLAM.....	33
3.2.2 Τα είδη των αισθητήρων της τεχνολογίας SLAM	34
3.2.3 Διαδικασίες front-end και back-end.....	36
3.2.4 Σφάλματα τεχνολογίας SLAM.....	40
3.2.5 Εφαρμογές της τεχνολογίας SLAM στην τεκμηρίωση της πολιτιστικής κληρονομιάς	44
3.3 Matterport.....	52
3.4 Εφαρμογές Matterport στην τεκμηρίωση της πολιτιστικής κληρονομιάς.....	62
3.5 Αποτυπώσεις ιστορικών πλοίων.....	66
3.5.1 Εξωτερικό πλοίων.....	66
3.5.2 Εσωτερικό πλοίων	69
Κεφάλαιο 4: Επεξεργασία τρισδιάστατων δεδομένων	73
4.1 Εισαγωγή.....	73
4.2 Διαδικασία επεξεργασίας νεφών σημείων.....	73
4.3 Χρησιμότητα νεφών σημείων.....	79
Κεφάλαιο 5: Το αντικείμενο μελέτης Θ/Κ «Γ.Αβέρωφ».....	83
5.1 Εισαγωγή.....	83
5.2 Ιστορικά στοιχεία.....	83
5.3 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και κύρια στοιχεία πλοίου.....	87
Κεφάλαιο 6: Συλλογή δεδομένων	93
6.1 Εισαγωγή.....	93
6.2 Η μεθοδολογία αποτύπωσης του Θ/Κ «Γ. Αβέρωφ»	93
6.3 Όργανα μέτρησης	93
6.3.1 ZEB Revo	94
6.3.2 ZEB Horizon.....	95
6.3.3 Matterport Pro2 3D	98
6.4 Εργασίες πεδίου.....	99
6.4.1 Εργασίες με τα όργανα ZEB Revo και ZEB Horizon.....	99



6.4.2 Εργασίες με την κάμερα Matterport Pro2 3D.....	102
Κεφάλαιο 7: Επεξεργασία δεδομένων & Αποτελέσματα	108
7.1 Εισαγωγή.....	108
7.2 Το λογισμικό CloudCompare.....	108
7.3 Επεξεργασία δεδομένων	109
7.3.1 Επεξεργασία δεδομένων σαρωτή GeoSLAM ZEB Revo	110
7.3.2 Επεξεργασία δεδομένων σαρωτή GeoSLAM ZEB Horizon.....	119
7.3.3 Δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων από τα δεδομένα των σαρωτών GeoSLAM ZEB Revo και ZEB Horizon	123
7.3.4 Επεξεργασία δεδομένων κάμερας Matterport Pro2 3D.....	132
7.3.5 Δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων από τα δεδομένα της κάμερας Matterport Pro2 3D.....	134
7.4 Ποιοτική σύγκριση αποτελεσμάτων.....	137
7.5 Μετρητική σύγκριση αποτελεσμάτων.....	138
Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα-Προτάσεις.....	153
8.1 Εισαγωγή.....	153
8.2 Συμπεράσματα.....	153
8.3 Προτάσεις.....	158
Βιβλιογραφία.....	160
Παράρτημα Α.....	168

Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 2.1: Από τις μετρήσεις με τον σαρωτή laser, στην κατασκευή ενός τρισδιάστατου μοντέλου.....	7
Εικόνα 2.2: Κατηγοριοποίηση επίγειων σαρωτών laser (Συμεωνίδης, 2007)	9
Εικόνα 2.3: Ο τρόπος λειτουργίας των σαρωτών μέτρησης του χρόνου πτήσης (Golubeva, 2022).....	11
Εικόνα 2.4: Ο τρόπος λειτουργίας των σαρωτών τριγωνισμού (Golubeva, 2022)	12
Εικόνα 2.5: Ο τρόπος λειτουργίας των σαρωτών μέτρησης της διαφοράς φάσης (Golubeva, 2022)	13
Εικόνα 2.6: Μετρήσεις με τον αερομεταφερόμενο τοπογραφικό σαρωτή (Petrie, 2009)	16
Εικόνα 2.7: Η μέτρηση του βάθους του νερού με τον αερομεταφερόμενο βαθυμετρικό σαρωτή (Infomar, 2006)	17
Εικόνα 2.8: Επίγειος στατικός σαρωτής (Hive Virtual Plant, 2020).....	19
Εικόνα 2.9: Ο οριζόντιος και ο κατακόρυφος άξονας του επίγειου στατικού σαρωτή (Medić et al., 2017)	20
Εικόνα 2.10: Η οριζόντια και κατακόρυφη γωνία και η απόσταση που μετρώνται, κατά την καταγραφή ενός σημείου από τον επίγειο στατικό σαρωτή laser (Leica Geosystems AG, 2012).....	20
Εικόνα 2.11: Κινητό σύστημα χαρτογράφησης (ArcGIS Desktop, n.d.)	21
Εικόνα 2.12: Αποτύπωση γέφυρας έπειτα από σύγκρουση με φορτηγό (Συμεωνίδης, 2007).....	23
Εικόνα 2.13: Κινητό σύστημα σάρωσης, τοποθετημένο σε όχημα (Elhashash et al., 2022)	24
Εικόνα 2.14: (α) Η ίδρυση πολλαπλών στάσεων μέτρησης κατά την στατική μέθοδο σάρωσης και (β) Η απλούστευση της διαδικασίας με την κίνηση του χρήστη του κινητού συστήματος σάρωσης μέσα στον χώρο.....	30
Εικόνα 3.1: Πόζες σαρωτή και περιορισμοί (Μπότης, 2019).....	38
Εικόνα 3.2: Διαδικασίες front-end και back-end (Jang & Kim, 2021).....	38
Εικόνα 3.3: Μετατόπιση του σαρωτή από την πραγματική τροχιά, με αποτέλεσμα την κατασκευή ενός λανθασμένου χάρτη (Matlab, 2020).....	39
Εικόνα 3.4: Το αθροιστικό σφάλμα, που έχει ως αποτέλεσμα την αναπαράσταση της ίδιας περιοχής σε διαφορετικές θέσεις στον χώρο (Matlab, 2020).....	39
Εικόνα 3.5: Ολική βελτιστοποίηση (Matlab, 2020).....	39

Εικόνα 3.6: Επαναληπτικές διαδικασίες front-end και back-end (Matlab, 2020).....	40
Εικόνα 3.7: Η επίδραση του σφάλματος μετατόπισης και η απόκλιση από την πραγματικότητα, κατά την σάρωση ενός επιμήκη διαδρόμου (Higgins, 2020).....	41
Εικόνα 3.8: Πρόβλημα στο κλείσιμο βρόγχου (MathWorks, n.d.).....	42
Εικόνα 3.9: Ελαχιστοποίηση του σφάλματος εντοπισμού και δημιουργία ακριβών δεδομένων χάρτη (MathWorks, n.d.).....	42
Εικόνα 3.10: Δεδομένα που αποκτήθηκαν με την χρήση της τεχνολογίας SLAM, όπου η κάθε διαδρομή απεικονίζεται με διαφορετικό χρώμα (Barba et al., 2021).....	45
Εικόνα 3.11: Τρισδιάστατο χρωματισμένο νέφος σημείων των κήπων, μέρος των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με την χρήση της τεχνολογίας SLAM (Hess & Ferreyra, 2021).....	46
Εικόνα 3.12: Το νέφος σημείων που προέκυψε με την χρήση του οργάνου Zeb Revo που βασίζεται στην τεχνολογία SLAM, μετά την διαδικασία της συγχώνευσης (Rabbia et al., 2020).....	47
Εικόνα 3.13: Το τελικό μοντέλο του σπηλαίου της νεκρόπολης, το οποίο έχει προκύψει με την χρήση διαφορετικών μεθόδων, ανάμεσα στις οποίες και η τεχνολογία SLAM (Rabbia et al., 2020).....	48
Εικόνα 3.14: Υπέρθυση της υπόγειας σπηλιάς, μήκους περίπου 3km, πάνω στη πόλη Camerano στην Ιταλία (Di Stefano et al., 2021).....	49
Εικόνα 3.15: Σύγκριση των νεφών σημείων που λαμβάνονται με την χρήση της τεχνολογίας SLAM και αυτών που λαμβάνονται με την επίγεια στατική μέθοδο σάρωσης, σε ένα τμήμα της υπόγειας σπηλιάς (Di Stefano et al., 2021).....	50
Εικόνα 3.16: Τρισδιάστατη οπτικοποίηση και πλοήγηση στο νέφος σημείων του παλατιού, χρησιμοποιώντας το λογισμικό Geoslam Hub (Patrucco et al., 2019).....	51
Εικόνα 3.17: Το τελικό νέφος σημείων του παλατιού που παράχθηκε, περιλαμβάνει περισσότερα από 100 εκατομμύρια σημεία (Di Fillipo et al., 2018).....	52
Εικόνα 3.18: Αριστερά η κάμερα Matterport Pro2 3D και δεξιά η εμφάνιση των δεδομένων στην εφαρμογή, κατά την διάρκεια της απόκτησής τους (Piniotis et al., 2020).....	54
Εικόνα 3.19: Σύγκριση των ευθυγραμμισμένων νεφών σημείων μεταξύ των οργάνων BLK2GO και Matterport, όπου (α) είναι εμφανής η διαφορά στα δεδομένα λόγω της κλίμακας παραμόρφωσης της κάμερας Matterport και (β) η μείωση της διαφοράς αυτής με την εφαρμογή του συντελεστή κλίμακας (Piniotis et al., 2020).....	55

Εικόνα 3.20: Αποτέλεσμα της σύγκρισης των νεφών σημείων του επίγειου στατικού σαρωτή και της κάμερας Matterport, με την εφαρμογή του συντελεστή κλίμακας, μέσα από το πρόγραμμα CloudCompare (Pulcrano et al., 2019).....	56
Εικόνα 3.21: Αδυναμία δημιουργίας τρισδιάστατου πλέγματος της κάμερας Matterport για την γυάλινη επιφάνεια του τραπέζιου (Matterport, 2022)	59
Εικόνα 3.22: Αύξηση του όγκου του μανομέτρου σε σχέση με την πραγματικότητα (Matterport, 2022).....	60
Εικόνα 3.23: Αύξηση του επιπέδου λεπτομέρειας ενός αντικειμένου από αριστερά προς τα δεξιά (Matterport, 2022).....	60
Εικόνα 3.24: Η δυνατότητα μέτρησης αποστάσεων μέσα από το Matterport (Sulaiman et al., 2020).....	61
Εικόνα 3.25: (α) Η απόκτηση των δεδομένων με την κάμερα Matterport, (β) Το νέφος σημείων της ατμοκίνητης ανυψωτικής μηχανής που προέκυψε με την κάμερα Matterport και (γ) Απόσπασμα της εικονικής περιήγησης (Shults et al., 2019)	63
Εικόνα 3.26: Το νέφος σημείων της εκκλησίας, που αποκτήθηκε με την κάμερα Matterport Pro2 3D (Pulcrano et al., 2019).....	65
Εικόνα 3.27: Απουσία τμημάτων στο νέφος σημείων της εκκλησίας που αποκτήθηκε με την κάμερα Matterport Pro2 3D (Pulcrano et al., 2019).....	65
Εικόνα 3.28: Αριστερά το πλοίο City of Adelaide και δεξιά το τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο του (ScARF, n.d.)	67
Εικόνα 3.29: Αριστερά το πλοίο RSS Discovery (Newsroom, 2016) και δεξιά το τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο του (Urquhart, 2013).....	67
Εικόνα 3.30: (α) Εικονική περιήγηση στο εσωτερικό του χαμηλότερου επιπέδου του πλοίου USS Constellation, μέσα από το Matterport και (β) Κάτοψη του χαμηλότερου επιπέδου του εσωτερικού του πλοίου USS Constellation, μέσα από το Matterport (Matterport Discover, n.d.)	70
Εικόνα 3.31: (α) Εικονική περιήγηση στο εσωτερικό του δεύτερου επιπέδου του πλοίου HMS Trincomalee, μέσα από το Matterport και (β) Κάτοψη του δεύτερου επιπέδου του εσωτερικού του πλοίου HMS Trincomalee, μέσα από το Matterport (Matterport Discover, n.d.).....	71
Εικόνα 4.1: Συνένωση σαρώσεων με την χρήση στόχων (Reshetyuk, 2009).....	75
Εικόνα 4.2: Συνένωση σαρώσεων με συνταύτιση γεωμετρικών επιφανειών (Reshetyuk, 2009).....	76

Εικόνα 5.1: Σχέδιο της μηκοτομής και της κάτοψης του Θ/Κ «Γ. Αβέρωφ», περί το 1905 (Γαρδικά-Κατσιαδάκη & Χαρωνίτης, 2002).....	83
Εικόνα 5.2: Η άφιξη του Θ/Κ «Γ. Αβέρωφ» στα φαληρικά νερά, την 1η Σεπτεμβρίου του 1911 (Πλωτό Ναυτικό Μουσείο-Θωρηκτό “Γεώργιος Αβέρωφ”)	84
Εικόνα 5.3: Πανοραμική άποψη του Θ/Κ «Γ. Αβέρωφ» από την αριστερή πρυμναία πλευρά του (Λάζαρης, 2020).....	88
Εικόνα 5.4: Αριστερά η κάτοψη του κύριου καταστρώματος και δεξιά η κάτοψη του καταστρώματος λεμβών	90
Εικόνα 5.5: Αριστερά η κάτοψη του πρώτου υποστρώματος και δεξιά η κάτοψη του δεύτερου υποστρώματος.....	91
Εικόνα 6.1: Ο σαρωτής GeoSLAM ZEB Revo (GeoSLAM, n.d.).....	95
Εικόνα 6.2: Ο σαρωτής GeoSLAM ZEB Horizon, με την προσθήκη της κάμερας ZEB Vision στο επάνω μέρος του (GeoSLAM, n.d.).....	97
Εικόνα 6.3: Χρωματισμένο νέφος σημείων των κεντρικών γραφείων της εταιρίας GeoSLAM, που καταγράφηκε με την χρήση της κάμερα ZEB Vision (GeoSLAM, n.d.)	97
Εικόνα 6.4: Η κάμερα Matterport Pro2 3D	99
Εικόνα 6.5: Επίπεδη σταθερή επιφάνεια εκκίνησης και τερματισμού λειτουργίας του σαρωτή GeoSLAM ZEB Horizon (Προσωπικό αρχείο).....	100
Εικόνα 6.6: Η κάμερα Matterport Pro2 3D, πάνω σε τρίποδα, στην πρώτη θέση σάρωσης (Προσωπικό αρχείο)	103
Εικόνα 6.7: Αριστερά η διαδρομή λήψης των δεδομένων με την κάμερα Matterport Pro2 3D που πρέπει να αποφεύγεται και δεξιά η διαδρομή που συνίσταται (Matterport, 2020)	103
Εικόνα 6.8: Λήψη δεδομένων με την κάμερα Matterport Pro2 3D, στο κέντρο του χώρου και υπό κάποια απόσταση μεταξύ των θέσεων σάρωσης (Matterport, 2020).....	104
Εικόνα 6.9: Τμήμα του τρισδιάστατου χώρου που δεν καταγράφηκε από την σάρωση με την κάμερα Matterport Pro2 3D (Matterport, 2023)	104
Εικόνα 6.10: Απώλεια σάρωσης, κατά την συλλογή των δεδομένων με την κάμερα Matterport Pro2 3D (Matterport, 2020).....	105
Εικόνα 6.11: Σφάλμα ευθυγράμμισης που εμφανίστηκε κατά την διάρκεια της σάρωσης με την κάμερα Matterport Pro2 3D (Matterport, 2020)	106
Εικόνα 7.1: Αποκοπή της περιττής πληροφορίας, γύρω από τον χώρο ενδιαφέροντος	110

Εικόνα 7.2: (α) Το αρχικό νέφος σημείων με την περιττή πληροφορία γύρω από τον χώρο ενδιαφέροντος και (β) Το αποτέλεσμα της αποκοπής.....	111
Εικόνα 7.3: Παράθυρο εξαγωγής των σημείων του νέφους σε βαθμωτά πεδία, βάσει των υψομέτρων.....	111
Εικόνα 7.4: Τα σημεία του νέφους σε βαθμωτά πεδία, βάσει των υψομέτρων.....	112
Εικόνα 7.5: Πραγματοποίηση τομής στο νέφος σημείων, για την απομόνωση της οροφής	113
Εικόνα 7.6: Θορυβώδη δεδομένα στο εσωτερικό του νέφους σημείων.....	113
Εικόνα 7.7: Δημιουργία του ειδώλου του αγαλατιδίου πίσω από τον καθρέπτη	114
Εικόνα 7.8: Παράθυρο επιλογής των κατάλληλων παραμέτρων για την απαλοιφή του θορύβου στο νέφος σημείων, μέσα από το πρόγραμμα CloudCompare.....	115
Εικόνα 7.9: Παράθυρο επιλογής των κατάλληλων παραμέτρων για την μείωση του αριθμού των σημείων στο νέφος, μέσα από το πρόγραμμα CloudCompare.....	117
Εικόνα 7.10: Κάτοψη με τομή από την οροφή, του τρισδιάστατου νέφους σημείων του καρέ αξιωματικών που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Revo, στιγμιότυπο της εικονικής περιήγησης.....	118
Εικόνα 7.11: Κάτοψη με τομή από την οροφή, του τρισδιάστατου νέφους σημείων των ναυαρχικών διαμερισμάτων που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Revo, στιγμιότυπο της εικονικής περιήγησης	118
Εικόνα 7.12: Το τρισδιάστατο νέφος σημείων του καρέ αξιωματικών, που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Horizon	121
Εικόνα 7.13: Κάτοψη με τομή από την οροφή, του τρισδιάστατου νέφους σημείων του καρέ αξιωματικών, που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Horizon.....	121
Εικόνα 7.14: Το τρισδιάστατο νέφος σημείων των ναυαρχικών διαμερισμάτων, που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Horizon	122
Εικόνα 7.15: Κάτοψη με τομή από την οροφή, του τρισδιάστατου νέφους σημείων των ναυαρχικών διαμερισμάτων, που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Horizon	122
Εικόνα 7.16: Στιγμιότυπο της εικονικής περιήγησης, μέσα στο τρισδιάστατο νέφος σημείων του καρέ αξιωματικών, που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Horizon.....	122
Εικόνα 7.17: Στιγμιότυπο της εικονικής περιήγησης, μέσα στο τρισδιάστατο νέφος σημείων των ναυαρχικών διαμερισμάτων, που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Horizon	123
Εικόνα 7.18: Παράθυρο επιλογής των κατάλληλων παραμέτρων για την μείωση του αριθμού των σημείων του νέφους, μέσα από το πρόγραμμα CloudCompare	124
Εικόνα 7.19: Κανονικά διανύσματα επιφάνειας (CG Masters, 2020).....	124

Εικόνα 7.20: Δομή octree (CloudCompareWiki).....	126
Εικόνα 7.21: Παράθυρο επιλογής των κατάλληλων παραμέτρων για την δημιουργία των κανονικών διανυσμάτων στο νέφος σημείων, μέσα από το πρόγραμμα CloudCompare	127
Εικόνα 7.22: Δημιουργία των κανονικών διανυσμάτων στο νέφος σημείων.....	128
Εικόνα 7.23: Παράθυρο επιλογής των κατάλληλων παραμέτρων για την δημιουργία του μοντέλου επιφανείας, μέσα από το πρόγραμμα CloudCompare	129
Εικόνα 7.24: Αριστερά η δημιουργία περιττών πολυγώνων από το πρόγραμμα και δεξιά η αφαίρεσή τους για την ανάδειξη του σωστού σχήματος του μοντέλου	130
Εικόνα 7.25: Εξαγωγή των επιθυμητών πολυγώνων του αντικειμένου.....	130
Εικόνα 7.26: Πραγματοποίηση εξομάλυνσης μετά την εξαγωγή του τελικού επιθυμητού πλέγματος.....	131
Εικόνα 7.27: Αριστερά τα αντικείμενα ως έχουν στην πραγματικότητα και δεξιά τα τρισδιάστατα μοντέλα επιφανείας τους	131
Εικόνα 7.28: Το τρισδιάστατο νέφος σημείων του καρέ αξιωματικών, που αποκτήθηκε με την κάμερα Matterport Pro2 3D.....	132
Εικόνα 7.29: Πλάγια όψη με τομή από την οροφή, του τρισδιάστατου νέφους σημείων του καρέ αξιωματικών, που αποκτήθηκε με την κάμερα Matterport Pro2 3D.....	133
Εικόνα 7.30: Το τρισδιάστατο νέφος σημείων των ναυαρχικών διαμερισμάτων, που αποκτήθηκε με την κάμερα Matterport Pro2 3D.....	133
Εικόνα 7.31: Πλάγια όψη με τομή από την οροφή, του τρισδιάστατου νέφους σημείων των ναυαρχικών διαμερισμάτων, που αποκτήθηκε με την κάμερα Matterport Pro2 3D	133
Εικόνα 7.32: Κάτοψη του μοντέλου του καρέ αξιωματικών, που δημιουργήθηκε αυτόματα μέσα από το Matterport Cloud.....	134
Εικόνα 7.33: Ετικέτα πληροφοριών μέσα στο μοντέλο του Matterport.....	134
Εικόνα 7.34: Απόσπασμα της εικονικής περιήγησης του Matterport, μέσα στα ναυαρχικά διαμερίσματα	135
Εικόνα 7.35: Μέτρηση αποστάσεων μέσα στο μοντέλο του Matterport.....	135
Εικόνα 7.36: Αύξηση του όγκου των αντικειμένων στο μοντέλο του Matterport	136
Εικόνα 7.37: Αδυναμία αποτύπωσης των γυάλινων επιφανειών και των καθρεπτών. Οι επιφάνειες αυτές εμφανίζονται χωρίς τρισδιάστατο πλέγμα (μαύρες).....	137
Εικόνα 7.38: Παράθυρο επιλογής του νέφους σημείων που πρόκειται να ευθυγραμμιστεί σε σχέση με το νέφος αναφοράς.....	143

Εικόνα 7.39: Επιλογή ομόλογων σημείων στα δύο νέφη σημείων (νέφος αναφοράς και νέφος που πρόκειται να ευθυγραμμιστεί).....	143
Εικόνα 7.40: Το προκύπτον σφάλμα της αρχικής ευθυγράμμισης	144
Εικόνα 7.41: Παράθυρο επιλογής των παραμέτρων της τελικής ευθυγράμμισης.....	145
Εικόνα 7.42: Το αποτέλεσμα της τελικής ευθυγράμμισης των δύο νεφών	145
Εικόνα 7.43: Το προκύπτον σφάλμα της τελικής ευθυγράμμισης	146
Εικόνα 7.44: Παράθυρο επιλογής του συγκριτικού νέφους και του νέφους αναφοράς	147
Εικόνα 7.45: Παράθυρο επιλογής των κατάλληλων παραμέτρων για τον υπολογισμό των αποστάσεων μεταξύ των δύο νεφών σημείων	147
Εικόνα 7.46: Οι υπολογισμένες αποστάσεις μεταξύ των νεφών σημείων του σαρωτή ZEB Horizon και της κάμερας Matterport, που αναφέρονται στα ναυαρχικά διαμερίσματα	148
Εικόνα 7.47: Διάγραμμα των υπολογισμένων αποστάσεων μεταξύ των νεφών σημείων του σαρωτή ZEB Horizon και της κάμερας Matterport, που αναφέρονται στα ναυαρχικά διαμερίσματα	149
Εικόνα 7.48: Παράθυρο επιλογής των παραμέτρων της τελικής ευθυγράμμισης, με εφαρμογή του συντελεστή κλίμακας.....	149
Εικόνα 7.49: Το προκύπτον σφάλμα της τελικής ευθυγράμμισης, με την εφαρμογή του συντελεστή κλίμακας.....	150
Εικόνα 7.50: Οι υπολογισμένες αποστάσεις μεταξύ των νεφών σημείων του σαρωτή ZEB Horizon και της κάμερας Matterport, που αναφέρονται στο καρέ αξιωματικών.....	151
Εικόνα 7.51: Διάγραμμα των υπολογισμένων αποστάσεων μεταξύ των νεφών σημείων του σαρωτή ZEB Horizon και της κάμερας Matterport, που αναφέρονται στο καρέ αξιωματικών.....	151
Εικόνα A.1: Πλάγιες όψεις με τομή από την οροφή, στιγμιότυπα της εικονικής περιήγησης του τρισδιάστατου νέφους σημείων του καρέ αξιωματικών που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Revo.....	168
Εικόνα A.2: Πλάγιες όψεις με τομή από την οροφή, στιγμιότυπα της εικονικής περιήγησης του τρισδιάστατου νέφους σημείων της αίθουσας συσκέψεων (ναυαρχικά διαμερίσματα) που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Revo	169
Εικόνα A.3: Πλάγιες όψεις με τομή από την οροφή, στιγμιότυπα της εικονικής περιήγησης του τρισδιάστατου νέφους σημείων της τραπεζαρίας ναυάρχου (ναυαρχικά διαμερίσματα) που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Revo	169



Εικόνα Α.4: Πλάγιες όψεις με τομή από την οροφή, στιγμιότυπα της εικονικής περιήγησης του τρισδιάστατου νέφους σημείων του υποδοματίου ναυάρχου (ναυαρχικά διαμερίσματα) που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Revo 170

Εικόνα Α.5: Πλάγιες όψεις με τομή από την οροφή, στιγμιότυπα της εικονικής περιήγησης του τρισδιάστατου νέφους σημείων του λουτρού ναυάρχου (ναυαρχικά διαμερίσματα) που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Revo..... 171

Εικόνα Α.6: Πλάγια όψη με τομή από την οροφή, του τρισδιάστατου νέφους σημείων του καρέ αξιωματικών, που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Horizon..... 171

Εικόνα Α.7: Πλάγια όψη με τομή από την οροφή, του τρισδιάστατου νέφους σημείων των ναυαρχικών διαμερισμάτων, που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Horizon 171

Εικόνα Α.8: Στιγμιότυπα της εικονικής περιήγησης, μέσα στο τρισδιάστατο νέφος σημείων του καρέ αξιωματικών, που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Horizon..... 172

Εικόνα Α.9: Στιγμιότυπα της εικονικής περιήγησης, μέσα στο τρισδιάστατο νέφος σημείων των ναυαρχικών διαμερισμάτων, που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Horizon 173



Ευρετήριο σχημάτων

Σχήμα 1.1: Το μεθοδολογικό πλαίσιο της εργασίας.....	3
Σχήμα 2.1: Οι βασικοί τύποι σαρωτών ανά πλατφόρμα χρήσης και οι υποκατηγορίες τους	14



Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 2.1: Τα χαρακτηριστικά των διαφορετικών αρχών μέτρησης των ενεργών σαρωτών απόστασης	14
Πίνακας 5.1: Τα χαρακτηριστικά του Θ/Κ «Γ. Αβέρωφ» (Πλωτό Ναυτικό Μουσείο-Θωρηκτό “Γεώργιος Αβέρωφ”)	87
Πίνακας 5.2: Οι χώροι του Θ/Κ «Γ. Αβέρωφ», ανά επίπεδο.....	88
Πίνακας 6.1: Σύγκριση των χαρακτηριστικών των σαρωτών GeoSLAM ZEB Revo και ZEB Horizon	98
Πίνακας 7.1: Αρχικός και τελικός αριθμός σημείων στα νέφη του σαρωτή ZEB Revo..	116
Πίνακας 7.2: Αρχικός και τελικός αριθμός σημείων στα νέφη του σαρωτή ZEB Horizon	120
Πίνακας 7.3: Αρχικός και τελικός αριθμός σημείων στα νέφη της κάμερας Matterport	132
Πίνακας 7.4: Τα στατιστικά των συγκρίσεων αποστάσεων που πραγματοποιήθηκαν μεταξύ των τριών οργάνων μέτρησης και της μετροταινίας	139
Πίνακας 7.5: Ο συντελεστής κλίμακας και οι αποκλίσεις μεταξύ των νεφών σημείων του σαρωτή ZEB Horizon και της κάμερας Matterport, που αναφέρονται στο καρέ αξιωματικών.....	140
Πίνακας 7.6: Ο συντελεστής κλίμακας και οι αποκλίσεις μεταξύ των νεφών σημείων του σαρωτή ZEB Horizon και της κάμερας Matterport, που αναφέρονται στα ναυαρχικά διαμερίσματα	140



Ευρετήριο διαγραμμάτων

Διάγραμμα 7.1: Έλεγχος συστηματικού σφάλματος στα δεδομένα της κάμερας Matterport σε συνάρτηση με την απόσταση 141

Πίνακας συντομογραφιών

AI	Artificial Intelligence
AR	Augmented Reality
BIM	Building Information Model
CAD	Computer-Aided Design
DMI	Distance Measurement Indicator
FoV	Field of View
GIS	Geographic Information System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HBIM	Heritage Building Information Model
ICP	Iterative Closest Point
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
IOS	iDevice Operating System
LiDAR	Light Detection and Ranging
LoD	Level of Detail
NDT	Normal Distributions Transform
RGB	Red Green Blue
RGB-D	Red Green Blue plus Depth data
RMS	Root Mean Square Error
SF	Scalar Fields
SIFT	Scale Invariant Feature Transform
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping



SURF	Speed Up Robust Feature
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VR	Virtual Reality
WGS	World Geodetic System
ΕΓΣΑ	Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς
Τ.Ε.Σ.	Ταμείο Εθνικού Στόλου



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Η σημασία της τρισδιάστατης τεκμηρίωσης των χώρων πολιτιστικής κληρονομιάς

Η πολιτιστική κληρονομιά αποτελεί αναντικατάστατη μαρτυρία μιας συγκεκριμένης στιγμής στην ανθρώπινη ιστορία. Δεν πρόκειται μόνο για μία απλή αναπαράσταση του παρελθόντος, αλλά μία σύνδεση αυτού με το παρόν. Διαμορφώνει την αίσθηση του ανήκειν και την πολιτιστική ταυτότητα των ανθρώπων σε τοπικό και εθνικό επίπεδο. Για τον λόγο αυτό καθίσταται αναγκαία η διαφύλαξή της.

Από την πολιτιστική κληρονομιά δεν θα μπορούσαν να λείπουν τα μεγάλα ιστορικά πλοία, που είτε αποτέλεσαν τεχνολογικά επιτεύγματα της εποχής τους, είτε συνέβαλαν στην διαμόρφωση των σελίδων της παγκόσμιας και εθνικής ιστορίας. Ωστόσο η καταγραφή και τεκμηρίωση της ναυτικής κληρονομιάς δεν είναι ακόμα αρκετά διαδεδομένη.

Η δημιουργία μιας τρισδιάστατης ανακατασκευής των χώρων πολιτιστικής κληρονομιάς, είναι μία σύνθετη διαδικασία. Κατά τη χαρτογράφηση αυτών των περιβαλλόντων για σκοπούς τεκμηρίωσης, η πρωταρχική ανάγκη είναι να επιτευχθεί μια πλήρης, σωστή και επαρκής αναπαράσταση των δομημένων χώρων και της γεωμετρίας τους.

Στην κατεύθυνση της διατήρησης της πολιτιστικής κληρονομιάς γενικότερα, αλλά και της ναυτικής κληρονομιάς ειδικότερα, μπορεί να συμβάλλει καθοριστικά και η τοπογραφία. Υπάρχουν τεχνικές έρευνας και αισθητήρες που επιτρέπουν την δημιουργία ρεαλιστικών τρισδιάστατων μοντέλων και χαρακτηρίζονται από καλή μετρητική ποιότητα και λεπτομέρεια που συνάδει με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οντότητας που μελετάται. Οι εξελίξεις στον τομέα αυτό τα τελευταία χρόνια επιτρέπουν την χρήση νέων και πολλά υποσχόμενων προηγμένων τεχνολογιών, για την οπτικοποίηση και τεκμηρίωση χώρων της πολιτιστικής κληρονομιάς. Οι τεχνολογίες αυτές επιτρέπουν ταχύτερες, τόσο χρονικά όσο και τεχνικά, διαδικασίες τρισδιάστατης αποτύπωσης. Η τεκμηρίωση των χώρων πολιτιστικής κληρονομιάς αποτελεί πρόκληση. Ένα αξιόπιστο τρισδιάστατο μοντέλο διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στις πολιτικές διαχείρισης που θα ακολουθηθούν. Τα τρισδιάστατα δεδομένα αποτελούν την βάση για την διεπιστημονική προσέγγιση, μελέτη και έρευνα των χώρων πολιτιστικής κληρονομιάς αλλά και την διαχείριση των παρεμβάσεων σε έργα συντήρησης, διατήρησης και αποκατάστασης που πραγματοποιούνται σε αυτά. Παράλληλα διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην προβολή και διάδοσή τους σε ένα μη τεχνικό κοινό, μέσω της δημιουργίας ενός περιβάλλοντος εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας. Με τον τρόπο αυτό όλοι αποκτούν πρόσβαση στον πολιτισμό.

Αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελούν ορισμένοι εσωτερικοί χώροι του θωρηκτού Θ/Κ «Γ. Αβέρωφ». Πρόκειται για ένα πλοίο-θρύλο που συνδέθηκε για σχεδόν μισό αιώνα με την ιστορία και τα πεπραγμένα ενός έθνους. Μαζί με την προσωπικότητα και το πατριωτικό ήθος του Ναυάρχου Παύλου Κουντουριώτη, συνέδεσε άρρηκτα το όνομά του με τη διαμόρφωση ιστορικών γεγονότων εθνικής

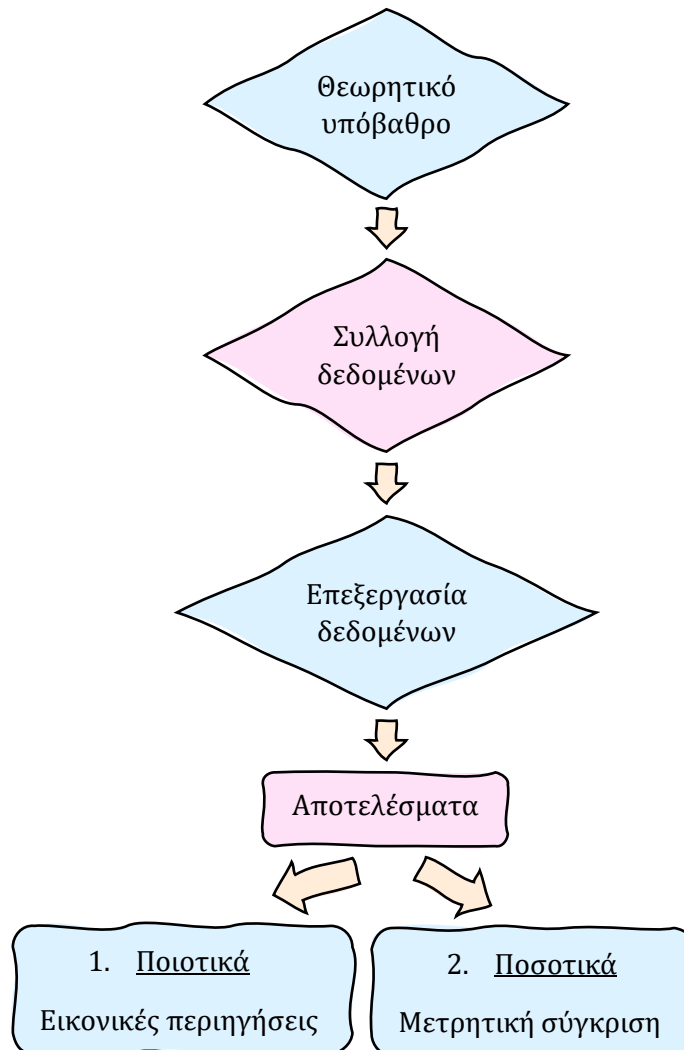
εμβέλειας. Σήμερα αποτελεί πλωτό ναυτικό μουσείο με έδρα το Άλσος Ελληνικής Ναυτικής Παράδοσης, στην Μαρίνα Φλοίσβου, στο Φάληρο.

1.2 Σκοπός, στόχοι και μεθοδολογικό πλαίσιο εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η χρήση της τρισδιάστατης τεχνολογίας SLAM για την ταχεία αποτύπωση δύσκολων εσωτερικών περιβαλλόντων, που ανήκουν σε ένα ιστορικό πολεμικό πλοίο, το Θ/Κ «Γ. Αβέρωφ». Οι επιμέρους στόχοι της εργασίας για την επίτευξη του σκοπού της αφορούν:

- Την χρήση οργάνων που βασίζονται στην τεχνολογία SLAM και έχουν διαφορετικές τεχνικές στην συλλογή των δεδομένων.
- Την διερεύνηση της αξιοπιστίας της τεχνολογίας που χρησιμοποιήθηκε, μέσα από την αξιολόγηση των παραγόμενων προϊόντων, τόσο ποιοτικά όσο και μετρητικά.

Παρακάτω ακολουθεί το μεθοδολογικό πλαίσιο της εργασίας.



Σχήμα 1.1: Το μεθοδολογικό πλαίσιο της εργασίας

1.3 Δομή εργασίας

Η εργασία στο σύνολό της, διαρθρώνεται ως εξής:

Στο **Κεφάλαιο 1**, που αποτελεί το εισαγωγικό κομμάτι της εργασίας, αναφέρεται η σημασία της τρισδιάστατης τεκμηρίωσης των χώρων πολιτιστικής κληρονομιάς, ενώ παρουσιάζεται ο σκοπός, οι επιμέρους στόχοι, το μεθοδολογικό πλαίσιο και η δομή της εργασίας.

Στο **Κεφάλαιο 2**, αναλύονται τα τρισδιάστατα δεδομένα και οι σαρωτές. Αναλυτικότερα γίνεται αναφορά στην μέθοδο σάρωσης με laser, ενώ κατηγοριοποιούνται οι επίγειοι σαρωτές laser ανάλογα με την τεχνολογία χρήσης, εμβαθύνοντας στις διαφορετικές αρχές που χρησιμοποιούν οι ενεργοί σαρωτές για την μέτρηση των αποστάσεων. Ακόμη πραγματοποιείται η κατηγοριοποίηση των σαρωτών laser ανάλογα με την πλατφόρμα χρήσης τους και δίνονται κάποιες εφαρμογές της μεθόδου σάρωσης με laser γενικότερα. Επιπροσθέτως γίνεται μία εκτενής αναφορά στα κινητά συστήματα σάρωσης, ενώ πραγματοποιείται σύγκριση των στατικών και κινητών συστημάτων σάρωσης στην χαρτογράφηση εσωτερικών χώρων.

Στο **Κεφάλαιο 3**, επεξηγείται η μέθοδος του ταυτόχρονου εντοπισμού και χαρτογράφησης (SLAM-Simultaneous Localization and Mapping) και συγκεκριμένα η βασική αρχή λειτουργίας της. Ακόμη αναφέρονται οι αισθητήρες που χρησιμοποιεί η συγκεκριμένη μέθοδος, αλλά και τα διάφορα είδη σφαλμάτων που προκύπτουν κατά την εφαρμογή της. Στην συνέχεια δίνονται διάφορα παραδείγματα εφαρμογής της στην τεκμηρίωση της πολιτιστικής κληρονομιάς μέσα από έρευνες, όπου σε κάθε περίπτωση προκύπτει και η ακρίβεια της μεθόδου. Επιπροσθέτως το κεφάλαιο περιγράφει την αρχή λειτουργίας της κάμερας Matterport, τα προβλήματα και τα πλεονεκτήματα που εντοπίζονται κατά την χρήση της, ενώ δίνονται και ορισμένα παραδείγματα εφαρμογής της στην τεκμηρίωση της πολιτιστικής κληρονομιάς. Τέλος στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην χρήση της τεχνολογίας σάρωσης, στην αποτύπωση τόσο του εξωτερικού όσο και του εσωτερικού μέρους ορισμένων ιστορικών πλοίων, για την διατήρηση της ναυτικής κληρονομιάς.

Στο **Κεφάλαιο 4**, παρουσιάζονται θεωρητικά ορισμένες βασικές διαδικασίες που ακολουθούνται για την επεξεργασία των τρισδιάστατων νεφών σημείων και αναλύονται η χρησιμότητα, αλλά και ο τρόπος αξιοποίησης αυτών.

Στο **Κεφάλαιο 5**, παρέχονται κάποιες ιστορικές και κατασκευαστικές πληροφορίες του αντικειμένου μελέτης της παρούσας εργασίας, που είναι το Θ/Κ «Γ. Αβέρωφ», ενώ παράλληλα παρουσιάζονται οι εσωτερικοί χώροι του πλοίου.

Στο **Κεφάλαιο 6**, επεξηγείται ο λόγος για τον οποίο προτιμήθηκε η χρήση των οργάνων μέτρησης που επιλέχθηκαν, παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, ενώ στην συνέχεια αναλύονται οι εργασίες πεδίου που πραγματοποιήθηκαν με καθένα από αυτά.

Στο **Κεφάλαιο 7**, παρέχονται κάποιες πληροφορίες σχετικά με το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την μερική επεξεργασία των νεφών σημείων που αποκτήθηκαν με την χρήση των τριών οργάνων. Ακόμη αναλύεται η συνολική επεξεργασία που



πραγματοποιήθηκε στα νέφη σημείων του εκάστοτε οργάνου μέτρησης και γίνεται τόσο ποιοτική, όσο και μετρητική σύγκριση τελικών νεφών που προέκυψαν.

Στο **Κεφάλαιο 8**, αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της τεχνολογίας SLAM για την τρισδιάστατη σάρωση των εσωτερικών χώρων του θωρηκτού Θ/Κ «Γ. Αβέρωφ», καθώς και ενδιαφέρουσες προτάσεις έρευνας με το αντικείμενο της τεχνολογίας αυτής σε μελλοντικές εργασίες. Τα συμπεράσματα στο οποία κατέληξε η εργασία ομαδοποιούνται στις ενότητες της συλλογής των δεδομένων και της επεξεργασίας-αποτελεσμάτων.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

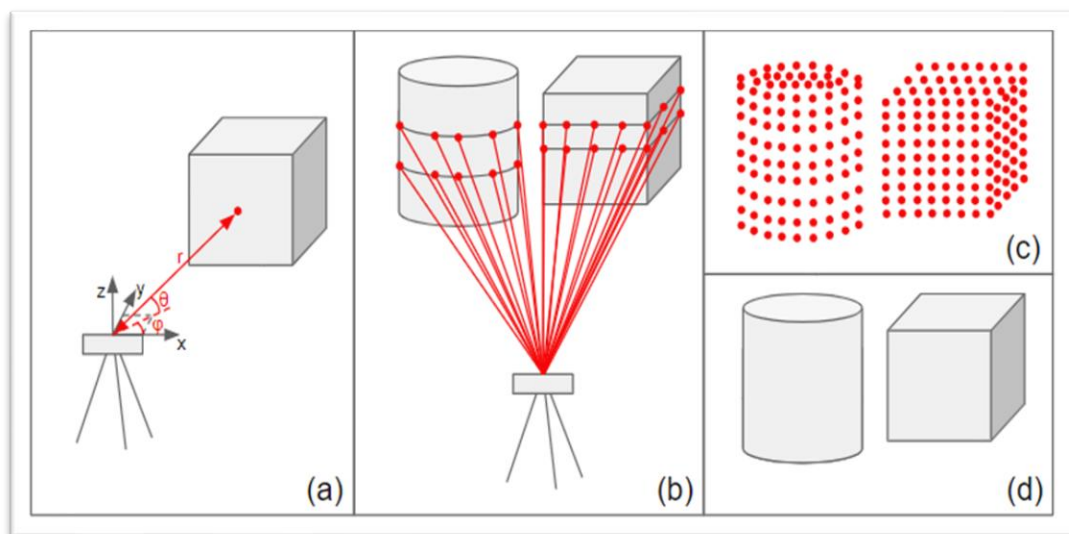
Κεφάλαιο 2: Τρισδιάστατα δεδομένα και σαρωτές

2.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο πραγματεύεται βασικές έννοιες για τα τρισδιάστατα δεδομένα και τους σαρωτές. Αναλυτικότερα γίνεται αναφορά στην μέθοδο σάρωσης με laser, ενώ κατηγοριοποιούνται οι επίγειοι σαρωτές laser ανάλογα με την τεχνολογία χρήσης, εμβαθύνοντας στις διαφορετικές αρχές που χρησιμοποιούν οι ενεργοί σαρωτές για την μέτρηση των αποστάσεων. Ακόμη πραγματοποιείται η κατηγοριοποίηση των σαρωτών laser ανάλογα με την πλατφόρμα χρήσης τους και δίνονται κάποιες εφαρμογές της μεθόδου σάρωσης με laser γενικότερα. Επιπροσθέτως γίνεται μία εκτενής αναφορά στα κινητά συστήματα σάρωσης, ενώ πραγματοποιείται σύγκριση των στατικών και κινητών συστημάτων σάρωσης στην χαρτογράφηση εσωτερικών χώρων.

2.2 Μέθοδος σάρωσης με laser

Οι σαρωτές laser, είναι όργανα τα οποία έχουν την δυνατότητα να μετρούν αποστάσεις με την χρήση ακτίνων laser διακριτών σημείων του περιβάλλοντος και να υπολογίζουν την θέση τους στις τρεις διαστάσεις (X, Y, Z), καθώς επίσης και στοιχεία σχετικά με την εμφάνισή τους (χρωματικά στοιχεία με την μορφή RGB τιμών), μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα. Οι τρισδιάστατες αυτές πληροφορίες είναι γνωστές και ως νέφη σημείων. Οι σαρωτές laser αποδίδουν το σχήμα και την γεωμετρία της οντότητας που μελετάται. Για την προσθήκη ρεαλιστικής υφής στο νέφος σημείων ή χρώματος στις σαρώσεις, μπορούν να ληφθούν φωτογραφίες, είτε από μία κάμερα που υπάρχει πάνω στο όργανο, είτε από μία εξωτερική κάμερα. Στην συνέχεια οι φωτογραφίες αυτές, συγχωνεύονται με τα δεδομένα σάρωσης, για την παραγωγή τρισδιάστατων νεφών σημείων που έχουν το πραγματικό τους χρώμα. Τα νέφη σημείων μπορούν μετά από κατάλληλη επεξεργασία να δώσουν τρισδιάστατες αναπαραστάσεις-μοντέλα, πολύ χρήσιμα σε μία πληθώρα εφαρμογών (Εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1: Από τις μετρήσεις με τον σαρωτή laser, στην κατασκευή ενός τρισδιάστατου μοντέλου

Οι σαρωτές laser αναπτύχθηκαν από τα αντίστοιχα αερομεταφερόμενα συστήματα, τα οποία χρησιμοποιούνταν με σκοπό να διαπερνούν το νερό, ώστε να είναι δυνατή η απεικόνιση του βυθού των λιμανιών, των λιμνών, κ.λ.π. Αργότερα τα όργανα αυτά απλουστεύτηκαν. Σταδιακά καταργήθηκαν και αφαιρέθηκαν τα αδρανειακά και γυροσκοπικά συστήματα και τα GPS, τα οποία ήταν απαραίτητα συστήματα για τα αερομεταφερόμενα όργανα. Έπειτα υιοθετήθηκε ένα πιο αδύνατο laser και έτσι ο σαρωτής laser βρήκε εφαρμογή σε απλούστερες αποτυπώσεις.

Οι σαρωτές laser, έχουν την δυνατότητα να στέλνουν τρισεκατομμύρια φωτόνια στην μονάδα του χρόνου πάνω σε ένα αντικείμενο. Τα φωτόνια αυτά αντανακλώνται επάνω στο αντικείμενο αποτύπωσης και ένα μικρό ποσοστό τους μετά από την αντανάκλαση αυτή κατευθύνεται προς τον σαρωτή. Το ποσοστό των φωτονίων που θα επιστρέψει στον σαρωτή εξαρτάται από την ανακλαστικότητα του κάθε αντικειμένου. Αυτή με την σειρά της εξαρτάται από ορισμένους παράγοντες, όπως είναι το χρώμα και το αλβέδο του αντικειμένου. Για παράδειγμα μία λευκή επιφάνεια αντανακλά περισσότερο ποσοστό της προσπίπτουσας οπτικής ακτινοβολίας από μία σκουρόχρωμη ή μαύρη επιφάνεια. Αντίστοιχα διάφανες επιφάνειες (γυαλί) διαθλούν την οπτική ακτινοβολία, με αποτέλεσμα να εισέρχονται σφάλματα στις μετρήσεις. Οπτικές διατάξεις που διαθέτει ο σαρωτής laser κατευθύνουν εντός της συσκευής τα φωτόνια που επέστρεψαν, τα οποία τελικά καταλήγουν επάνω σε έναν φωτο-ευαίσθητο αισθητήρα. Στη συνέχεια, ο μικροεπεξεργαστής του οργάνου πραγματοποιεί μία σειρά μετρήσεων και υπολογίζει την απόσταση μεταξύ συσκευής και αντικειμένου. Η σημαντικότερη διαφοροποίηση που εισέρχεται για την επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας (και κατά συνέπεια του κατάλληλου οργάνου) έχει να κάνει με το μέγεθος, την υφή και το είδος του αντικειμένου που πρόκειται να αποτυπωθεί.

Ο σκοπός ενός σαρωτή laser είναι να δημιουργήσει ένα νέφος σημείων, αποτυπώνοντας πολύ πυκνά διακριτά σημεία της επιφάνειας του αντικειμένου. Αυτά τα σημεία μετά από την επεξεργασία τους μπορούν να σχηματίσουν μία πιστή εικόνα του αντικειμένου. Όσο πυκνότερα είναι τα σημεία τόσο πιστότερη είναι η αναπαράσταση του αποτελέσματος.

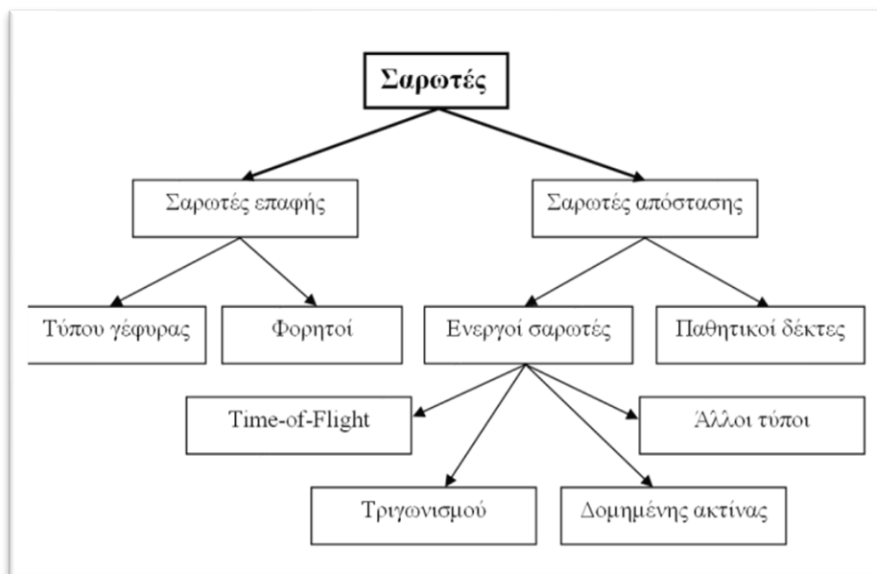
Οι σαρωτές laser έχουν την δυνατότητα αποτύπωσης από απόσταση. Για τον λόγο αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιοχές όπου δεν υπάρχει φυσική πρόσβαση (φυσικοί σχηματισμοί, κάθετοι βράχοι, βιομηχανικές εγκαταστάσεις), σε περιοχές με επικίνδυνα χαρακτηριστικά (οδικοί άξονες, ορυχεία, λατομεία, κτίρια υπό κατάρρευση), ή σε ευαίσθητα αντικείμενα και περιοχές (χώροι πολιτιστικής κληρονομιάς, περιοχές καταστροφών, ατυχημάτων και εγκλημάτων). Είναι ακριβά όργανα, ωστόσο η χρησιμοποίησή τους σε ορισμένες περιπτώσεις αποτελεί μονόδρομο. Σε άλλες μεθόδους αποτύπωσης (γεωδαιτικός σταθμός, GPS, κ.λ.π.), είναι απαραίτητος ο εντοπισμός και η αποτύπωση συγκεκριμένων σημείων τα οποία θεωρούνται σημαντικά, ώστε να αναπαραχθεί σωστά η περιοχή ή το αντικείμενο αποτύπωσης. Συνεπώς απαιτείται η σωστή επιλογή των σημείων. Αντιθέτως η σάρωση με laser μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές που έχουν μεγάλη λεπτομέρεια αποτύπωσης, καθώς αποτυπώνει ένα νέφος από εκατομμύρια σημεία και απαιτεί την γνώση χρήσης ενός λογισμικού επεξεργασίας του νέφους αυτού, προκειμένου να παραχθεί η τελική εικόνα του αντικειμένου. Η επεξεργασία ενός νέφους σημείων είναι μία διαδικασία αρκετά επίπονη, καθώς απαιτεί

την αφαίρεση όλης της περιττής πληροφορίας (θόρυβος). Αυτό αντισταθμίζεται από την μικρή απαίτηση σε χρόνο στο πεδίο των μετρήσεων.

Η ακρίβεια της σάρωσης laser, μπορεί να επηρεαστεί από τις θερμοκρασιακές και ατμοσφαιρικές συνθήκες (σκόνη, καπνός), την παρεμβολή ακτινοβολίας, τον θόρυβο, την απόσταση από το αντικείμενο σάρωσης, το βήμα σάρωσης, το μέγεθος της κουκίδας laser, την γωνία πρόσπτωσης του παλμού laser στην επιφάνεια του αντικειμένου, αλλά και την ανακλαστικότητα της επιφάνειάς του.

2.3 Επίγειοι σαρωτές laser ανά τεχνολογία χρήσης

Για να γίνει κατανοητή η λειτουργία των σαρωτών θα πρέπει αρχικά να διαχωριστούν οι διαφορετικοί τύποι τους. Ο διαχωρισμός αυτός θα γίνει μόνο για τους επίγειους σαρωτές, καθώς η τεχνολογία SLAM που αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας εντάσσεται στην κατηγορία αυτή. Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 2.2) απεικονίζονται οι κατηγορίες των επίγειων σαρωτών laser, ανάλογα με την τεχνολογία που αυτοί χρησιμοποιούν. Οι δύο κυριότεροι τύποι των επίγειων σαρωτών laser, περιλαμβάνουν τους σαρωτές επαφής και τους σαρωτές απόστασης. Οι σαρωτές απόστασης μπορούν με την σειρά τους να χωριστούν σε ενεργούς και παθητικούς σαρωτές. Οι ενεργοί σαρωτές χωρίζονται σε κατηγορίες, ανάλογα με την αρχή που χρησιμοποιούν για την μέτρηση της απόστασης.



Εικόνα 2.2: Κατηγοριοποίηση επίγειων σαρωτών laser (Συμεωνίδης, 2007)

Οι σαρωτές επαφής εξετάζουν το αντικείμενο μέσω φυσικής επαφής, δίνοντας σχετικές συντεταγμένες σε ένα ενσωματωμένο καταγραφικό σύστημα. Τα μειονεκτήματά τους όμως είναι σημαντικά, καθώς απαιτούν την φυσική επαφή με το αντικείμενο, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει στην μεταβολή ή ακόμα και στην καταστροφή του. Αυτό είναι σημαντικό όταν σαρώνονται ευαίσθητα αντικείμενα, όπως

για παράδειγμα έργα τέχνης ή ευαίσθητα όργανα και εξαρτήματα. Επιπροσθέτως αυτοί οι σαρωτές είναι σχετικά χρονοβόροι. Η κίνηση του βραχίονα σάρωσης γίνεται σε χαμηλές ταχύτητες. Οι σαρωτές αυτού του είδους σαρώνουν λιγότερα σημεία σε σχέση με τους σαρωτές απόστασης. Ένα από τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι ότι δεν χρειάζονται περαιτέρω μετρήσεις ώστε να γεωαναφερθούν τα μοντέλα που δημιουργούνται. Επιπροσθέτως, η σάρωση είναι ελεγχόμενη από τον χρήστη, ο οποίος ορίζει τα σημεία αποτύπωσης, αποφεύγοντας έτσι αρκετή από την διαδικασία της επεξεργασίας και κυρίως την διόρθωση περιττών σημείων. Οι σαρωτές αυτού του είδους βρίσκουν εφαρμογή στον τομέα του βιομηχανικού σχεδιασμού με την σάρωση αντικειμένων και εξαρτημάτων για την αναπαραγωγή, τον έλεγχο και την σχεδίαση βιομηχανικών στοιχείων, στον σχεδιασμό των computer games με την σάρωση αντικειμένων και μοντέλων για την εισαγωγή τους στο εικονικό περιβάλλον, κ.λ.π.

Οι σαρωτές απόστασης, σε αντίθεση με την τεχνολογία των σαρωτών επαφής, χρησιμοποιούν ακτινοβολία για να εντοπίσουν την θέση των σημείων που θα μετρηθούν. Η ακτινοβολία αυτή είτε εκπέμπεται από τον σαρωτή και καταγράφεται από τον ενσωματωμένο δέκτη (ενεργοί σαρωτές), είτε καταγράφεται απλά από έναν δέκτη που εκμεταλλεύεται την υπάρχουσα ακτινοβολία του αντικειμένου (παθητικοί σαρωτές).

Οι ενεργοί σαρωτές εκπέμπουν κάποιο είδος ακτινοβολίας και μετρώντας την αντανάκλασή της σε κάποιο αντικείμενο μπορούν να υπολογίσουν την απόσταση. Οι ακτινοβολίες που χρησιμοποιούνται είναι η οπτική (με την μορφή laser στην συντριπτική πλειοψηφία), η υπερηχητική και οι ακτίνες X.

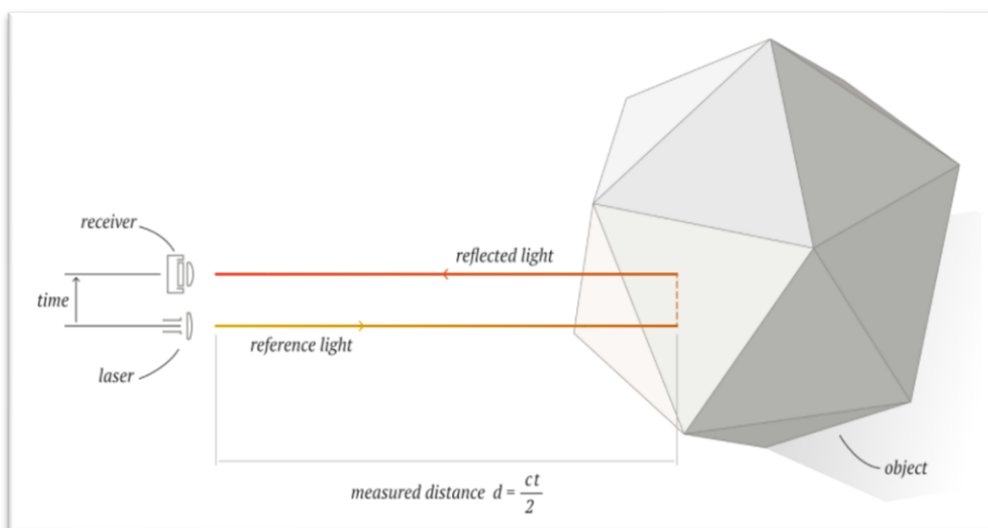
Αντιθέτως οι παθητικοί σαρωτές δεν εκπέμπουν κάποια ακτινοβολία κατά την διάρκεια των μετρήσεων, αλλά έχουν δέκτες που χρησιμοποιούν την ακτινοβολία την οποία εκπέμπουν τα προς σάρωση αντικείμενα και καταγράφοντάς την μπορούν να υπολογίσουν την απόσταση με την βοήθεια και των γωνιών που σχηματίζονται. Οι σαρωτές αυτοί έχουν την δυνατότητα να κάνουν μετρήσεις και στο υπέρυθρο φάσμα, πέρα από το ορατό. Πρόκειται για μικρούς, εύχρηστους δέκτες με αρκετά μικρές απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, οι οποίοι δεν απαιτούν κάποιο πολύ εξειδικευμένο λογισμικό. Φυσικά ως συνέπεια αυτών, η ακρίβειά τους σε σχέση με τους ενεργούς σαρωτές είναι περιορισμένη, όπως και οι εφαρμογές τους. Οι περισσότεροι στηρίζονται σε αρχές της Φωτογραμμετρίας (Συμεωνίδης, 2007).

2.3.1 Ενεργοί σαρωτές απόστασης

Οι ενεργοί σαρωτές απόστασης αποτελούν την πιο διαδεδομένη κατηγορία σαρωτών στις εφαρμογές αποτύπωσης. Χωρίζονται σε κατηγορίες, ανάλογα με την αρχή που χρησιμοποιούν για την μέτρηση των αποστάσεων και είναι οι εξής:

➤ Σαρωτές μέτρησης του χρόνου πτήσης (Time of Flight Scanners)

Οι συσκευές αυτές χρησιμοποιούνται συνήθως για την απόκτηση δεδομένων μεγάλης εμβέλειας (έως 2km). Στην ουσία μετρούν την απόσταση, υπολογίζοντας με ακρίβεια τον χρόνο που χρειάζεται ένας παλμός laser που στέλνεται σε ένα αντικείμενο από τον σαρωτή (πηγή), να ανακλαστεί πάνω στο αντικείμενο και να επιστρέψει πίσω στην πηγή της (αισθητήρας σαρωτή). Η απόσταση από το αντικείμενο υπολογίζεται από τον χρόνο μετάβασης του παλμού από την πηγή στον αισθητήρα, χρησιμοποιώντας τον τύπο $s=(c*\Delta t)/2$, όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός (m/s) και Δt είναι ο χρόνος μετάβασης-επιστροφής του παλμού (s), με δεδομένο ότι η ταχύτητα διάδοσης του παλμού laser είναι σταθερή και ίση με την ταχύτητα του φωτός στο κενό (Εικόνα 2.3). Αυτή η απόσταση χρησιμοποιείται στην συνέχεια για τον υπολογισμό μιας συντεταγμένης, για το τμήμα της επιφάνειας του αντικειμένου που χτυπήθηκε από την δέσμη laser. Οι σαρωτές αυτής της τεχνολογίας μπορούν να μετρήσουν εκατομμύρια σημεία ανά δευτερόλεπτο, ενώ η ακρίβειά τους καθορίζεται από την ικανότητα του συστήματος να μετράει με ακρίβεια τον χρόνο του σήματος επιστροφής. Η τυπική ακρίβεια για έναν σαρωτή αυτής της τεχνολογίας είναι της τάξης των μερικών χιλιοστών.

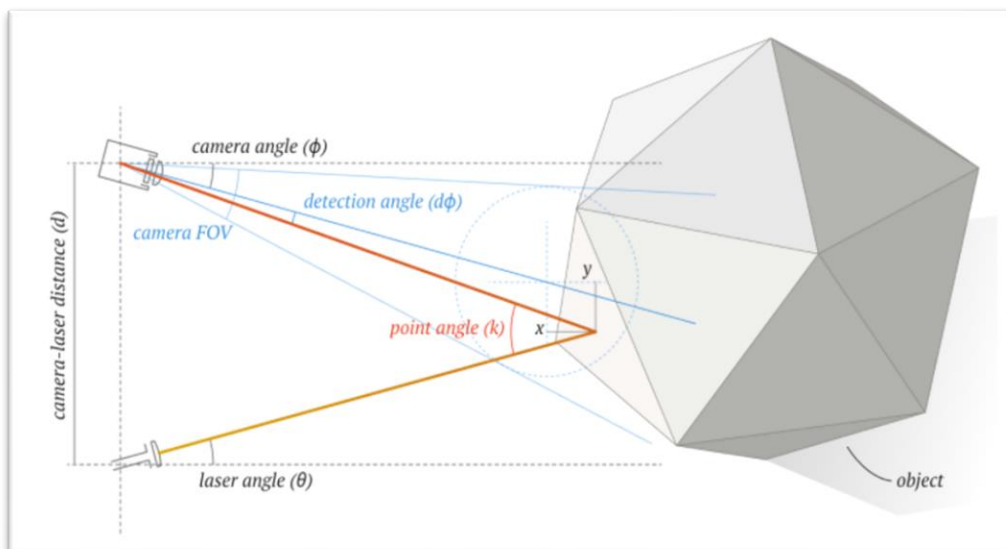


Εικόνα 2.3: Ο τρόπος λειτουργίας των σαρωτών μέτρησης του χρόνου πτήσης (Golubeva, 2022)

➤ Σαρωτές τριγωνισμού (Triangulation Scanners)

Στον συγκεκριμένο τύπο σαρωτών, η ακτίνα laser εκπέμπεται από τον σαρωτή για να φωτίσει σημεία πάνω στο αντικείμενο, ενώ μία κάμερα (που βρίσκεται σε διαφορετική θέση από τον σαρωτή) χρησιμοποιείται για να εντοπίσει τα σημεία που φωτίζει κάθε φορά η ακτίνα. Ανάλογα με το που χτυπάει η ακτίνα laser το αντικείμενο, εμφανίζεται και η εικόνα στην κάμερα. Η τεχνολογία πήρε το όνομά της από το τρίγωνο που σχηματίζουν ο πομπός laser, η εικόνα του laser πάνω στο αντικείμενο και η κάμερα. Η απόσταση μεταξύ του πομπού laser και της κάμερας είναι γνωστή, όπως αντίστοιχα είναι γνωστή η γωνία με την οποία βλέπει ο σαρωτής το αντικείμενο και η γωνία που σχηματίζει η κουκκίδα laser πάνω στο αντικείμενο με την οπτική ευθεία του δέκτη

(Εικόνα 2.4). Αυτά τα στοιχεία ορίζουν πλήρως το τρίγωνο και δίνουν την ακριβή θέση της κορυφής του, δηλαδή την θέση της κουκκίδας του laser πάνω στο αντικείμενο. Συνήθως, οι σαρωτές που βασίζονται σε τριγωνισμό είναι κατάλληλοι για τη σάρωση μικρότερων αντικειμένων και έχουν μικρή ακτίνα εφαρμογής, της τάξης των μερικών μέτρων (0.5m-2m), ακρίβεια μερικά μικρόμετρα (χιλιοστά του χιλιοστού), ενώ συλλέγουν εκατομμύρια σημεία ανά δευτερόλεπτο.



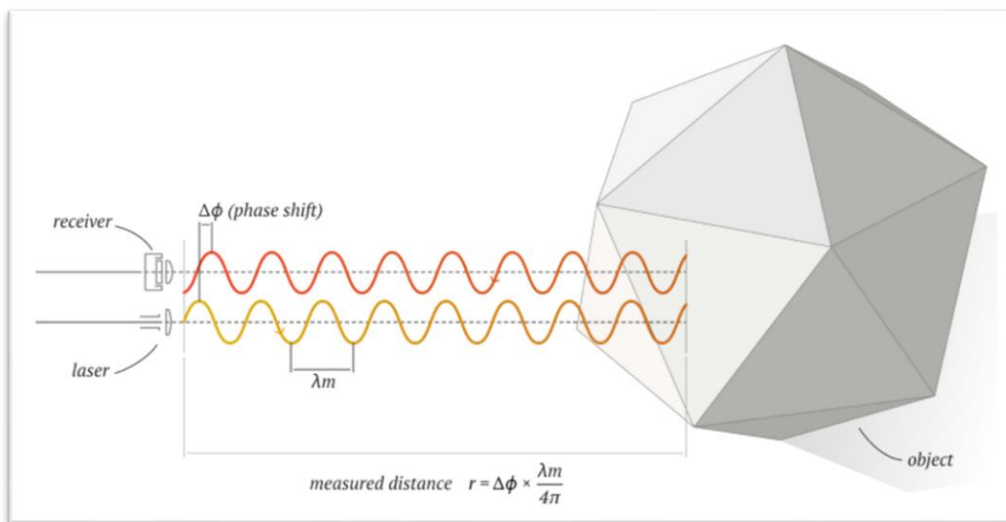
Εικόνα 2.4: Ο τρόπος λειτουργίας των σαρωτών τριγωνισμού (Golubeva, 2022)

➤ Σαρωτές δομημένης ακτίνας (Structured Light Scanners)

Οι σαρωτές αυτοί προβάλλουν στο αντικείμενο μία ευθεία ή έναν κানাβο με την βοήθεια της οπτικής ακτινοβολίας (στην συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων, laser). Και στις δύο περιπτώσεις μελετώνται οι παραμορφώσεις που προκαλούνται από την αντανάκλαση του κανονικού σχήματος (της ευθείας ή του κανάβου) πάνω στο αντικείμενο. Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται σε αυτές τις συσκευές για τους υπολογισμούς είναι στην ουσία ανάλογη με την τεχνολογία του τριγωνισμού. Γενικά χρησιμοποιείται αρκετά πολύπλοκη τεχνολογία με αντίστοιχους αλγορίθμους, οι οποίοι μπορούν να εκμεταλλευτούν την διαφορετική όψη του ίδιου αντικειμένου σε σχέση με την πηγή laser που αναγνωρίζουν οι δύο δέκτες (όπως ακριβώς συμβαίνει και με τα ανθρώπινα μάτια) και να ανακατασκευάσουν την τρισδιάστατη όψη του. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της τεχνολογίας δομημένης ακτίνας είναι η ταχύτητα. Αντί να υπολογίζει ένα σημείο την φορά, υπολογίζει πολλά σημεία πάνω σε μία γραμμή ή έναν κানাβο, μηδενίζοντας πρακτικά τον θόρυβο ή σφάλματα από δονήσεις και μικρομετακινήσεις του σαρωτή. Οι σαρωτές αυτού του τύπου χρησιμοποιούν μία CCD κάμερα σε συνδυασμό με μία συσκευή laser, πράγμα που κάνει αυτήν την τεχνολογία να πλησιάζει περισσότερο την Φωτογραμμετρία. Οι σαρωτές αυτοί έχουν εμβέλεια 1m περίπου, ακρίβεια μερικά μικρόμετρα (χιλιοστά του χιλιοστού), ενώ συλλέγουν εκατομμύρια σημεία ανά δευτερόλεπτο.

➤ Σαρωτές μέτρησης της διαφοράς φάσης (Phase Based Scanners)

Οι σαρωτές μέτρησης της διαφοράς φάσης, εκπέμπουν παλμούς laser σε μορφή ημιτονοειδών κυμάτων και καθορίζουν την απόσταση από ένα αντικείμενο μετρώντας τη διαφορά φάσης μεταξύ των εκπεμπόμενων και των ανακλώμενων κυμάτων. Αναλυτικότερα ο χρόνος μετάβασης-επιστροφής του σήματος δίνεται από τον τύπο $t = (T \cdot \phi) / (2 \cdot \pi)$, όπου t είναι ο χρόνος μετάβασης-επιστροφής (s), T είναι η χρονική διάρκεια ενός μήκος κύματος (s) και ϕ είναι η διαφορά φάσης (rad) (Εικόνα 2.5). Σε αντίθεση με τους σαρωτές μέτρησης του χρόνου πτήσης, οι σαρωτές μέτρησης διαφοράς φάσης, λειτουργούν σε μικρότερες ακτίνες σάρωσης των λίγων εκατοντάδων μέτρων (έως 300m), ενώ θεωρούνται ως οι ταχύτεροι σαρωτές laser, αποτυπώνοντας έως και 2.000.000 σημεία/δευτερόλεπτο. Έχουν επίσης υψηλότερη ακρίβεια και ανάλυση, ενώ δίνουν μεγαλύτερη πυκνότητα σημείων από τους σαρωτές μέτρησης του χρόνου πτήσης. Χάρη στην υψηλή τους ακρίβεια, οι σαρωτές αυτοί λειτουργούν καλύτερα για ανάγκες σαρώσεων μεσαίου εύρους. Βρίσκουν εφαρμογές, σε αποτυπώσεις όπου εντοπίζεται μεγάλο πλήθος αντικειμένων, που περιορίζουν το οπτικό πεδίο και δίνουν ακρίβεια της τάξης των λίγων χιλιοστών.



Εικόνα 2.5: Ο τρόπος λειτουργίας των σαρωτών μέτρησης της διαφοράς φάσης (Golubeva, 2022)

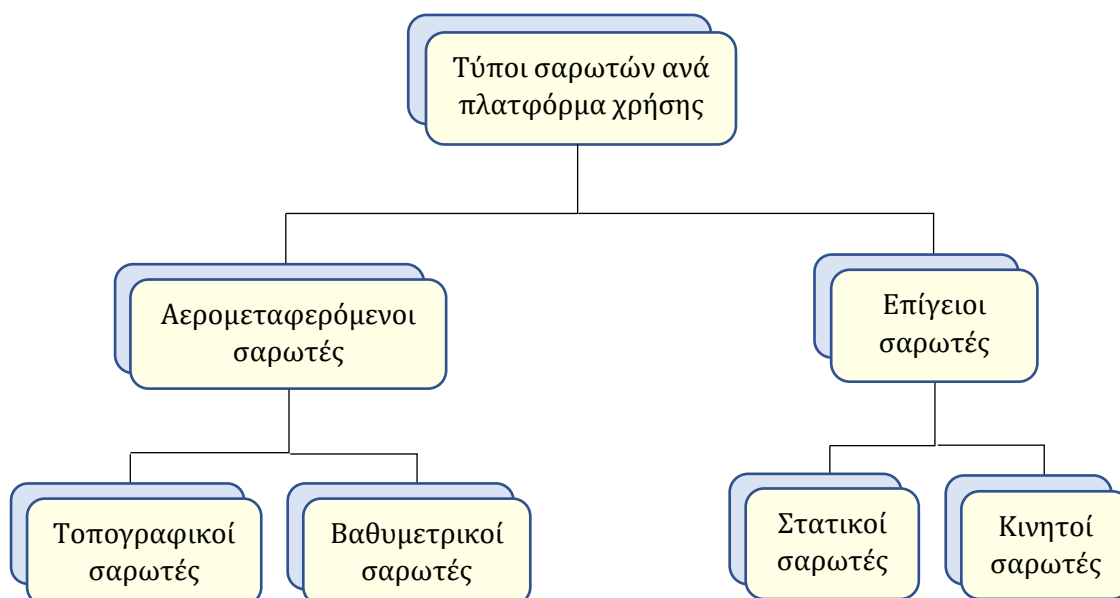
Όπως γίνεται αντιληπτό από τις προαναφερθείσες τεχνολογίες σαρωτών laser, καθεμιά εξυπηρετεί διαφορετικές απαιτήσεις. Η επιλογή της πιο κατάλληλης τεχνολογίας σάρωσης laser, γίνεται ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.1), συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά των διαφορετικών αρχών μέτρησης αποστάσεων που χρησιμοποιούν οι ενεργοί σαρωτές απόστασης.

Πίνακας 2.1: Τα χαρακτηριστικά των διαφορετικών αρχών μέτρησης των ενεργών σαρωτών απόστασης

Αρχή μέτρησης αποστάσεων	Σημεία ανά δευτερόλεπτο	Εμβέλεια μέτρησης	Ακρίβεια
Αρχή χρόνου πτήσης	Εκατομμύρια	έως 1 km-2km	Χιλιοστά
Αρχή τριγωνισμού	Εκατομμύρια	έως 0.5m-2m	Μικρόμετρα (χιλιοστά του χιλιοστού)
Αρχή δομημένης ακτίνας	Εκατομμύρια	έως 1m	Μικρόμετρα (χιλιοστά του χιλιοστού)
Αρχή διαφοράς φάσης	Εκατομμύρια	έως 300m	Χιλιοστά

2.4 Σαρωτές laser ανά πλατφόρμα χρήσης

Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι σαρωτών, οι οποίοι διαφέρουν στον τρόπο λειτουργίας και συλλογής των δεδομένων. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι δύο βασικοί τύποι σαρωτών, ανάλογα με την πλατφόρμα χρήσης τους. Πρόκειται για τους αερομεταφερόμενους και τους επίγειους σαρωτές, καθώς και τις υποκατηγορίες αυτών (Σχήμα 2.1). Η επιλογή της κατάλληλης πλατφόρμας στην οποία θα χρησιμοποιηθεί ο σαρωτής εξαρτάται από το αντικείμενο της εργασίας, το μέγεθος της περιοχής που πρόκειται να χαρτογραφηθεί, την προσβασιμότητα, κ.λ.π.



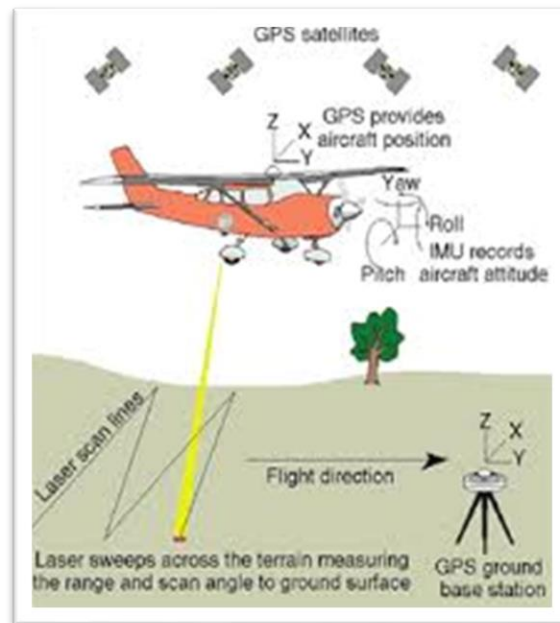
Σχήμα 2.1: Οι βασικοί τύποι σαρωτών ανά πλατφόρμα χρήσης και οι υποκατηγορίες τους

➤ Αερομεταφερόμενοι σαρωτές

Στους αερομεταφερόμενους σαρωτές, το σύστημα σάρωσης laser, στερεώνεται σε ένα αεροσκάφος (ελικόπτερο, μη επανδρωμένο αεροσκάφος). Οι αερομεταφερόμενοι σαρωτές μπορούν να σαρώσουν μεγαλύτερες περιοχές σε συντομότερο χρονικό διάστημα, σε σύγκριση με τους επίγειους. Ακόμη, δεν χρειάζεται να αποφύγουν εμπόδια που συναντώνται στο έδαφος, σε αντίθεση με τους επίγειους σαρωτές, που πρέπει να περιηγούνται γύρω από αυτά. Η χρήση ενός αεροσκάφους, μπορεί να είναι πιο δαπανηρή από την χρήση ενός επίγειου σαρωτή. Παρ' όλα αυτά σε περιπτώσεις μεγάλων έργων, η χρήση ενός αερομεταφερόμενου σαρωτή μπορεί να αποβεί πιο οικονομική λύση, διότι μπορεί να καλύψει μεγαλύτερη περιοχή σε μικρότερο χρονικό διάστημα, απ' ότι ένας επίγειος σαρωτής.

1. Τοπογραφικοί σαρωτές

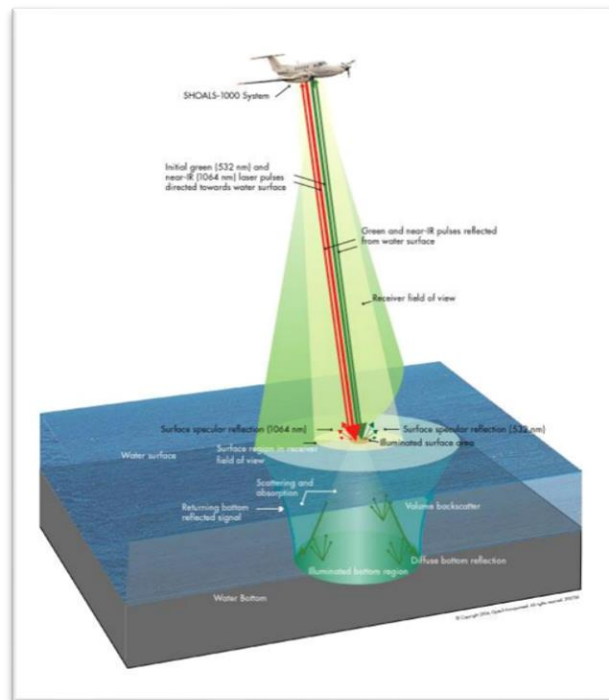
Η χρήση των τοπογραφικών σαρωτών περιορίζεται στην ξηρά. Ένα τέτοιο σύστημα αποτελείται από έναν σαρωτή laser που εκπέμπει υπέρυθρους παλμούς laser (μήκος κύματος 1064 nm), οι οποίοι ανακλώνται πάνω στην επιφάνεια της γης και των αντικειμένων κι επιστρέφουν σε αυτόν. Ο σαρωτής υπολογίζει την απόσταση, μετρώντας τον χρόνο που κάνει ο υπέρυθρος παλμός laser να ανακλαστεί στο αντικείμενο ή στην επιφάνεια της γης και να επιστρέψει πίσω σε αυτόν, μέσα από την σχέση $s=(c \times t)/2$. Ένα τέτοιο σύστημα αποτελείται από έναν δέκτη του παγκόσμιου δορυφορικού συστήματος πλοήγησης GPS/GNSS που υπολογίζει τις συντεταγμένες της αέριας πλατφόρμας και από μία αδρανειακή μονάδα μέτρησης, που παρέχει τον προσανατολισμό του σαρωτή. Όλα τα παραπάνω είναι τοποθετημένα την αέρια πλατφόρμα, ενώ ένας μόνιμος σταθμός αναφοράς GPS είναι τοποθετημένος στο έδαφος. Οι δορυφόροι σε συνδυασμό με τον μόνιμο σταθμό αναφοράς παρέχουν τις συντεταγμένες του δέκτη και κατά συνέπεια του σαρωτή που είναι τοποθετημένος στην αέρια πλατφόρμα. Ακόμη στην αέρια πλατφόρμα είναι τοποθετημένη και μία μονάδα ελέγχου που καταγράφει και συγχωνεύει τα δεδομένα που παρέχονται από τον σαρωτή laser, τον δέκτη του παγκόσμιου δορυφορικού συστήματος πλοήγησης GPS/GNSS και την αδρανειακή μονάδα μέτρησης, τα οποία στην συνέχεια επεξεργάζονται από έναν υπολογιστή και προκύπτουν οι τρισδιάστατες συντεταγμένες X, Y, Z των σαρωμένων σημείων (Εικόνα 2.6). Τέτοιου είδους σαρωτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον πολεοδομικό σχεδιασμό, την οικολογία, την δασοκομία, την γεωμορφολογία, την παράκτια μηχανική, την διαχείριση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης, κ.λ.π.



Εικόνα 2.6: Μετρήσεις με τον αερομεταφερόμενο τοπογραφικό σαρωτή (Petrie, 2009)

2. Βαθυμετρικοί σαρωτές

Τα μέρη του συστήματος ενός βαθυμετρικού σαρωτή είναι ίδια με αυτά που προαναφέρθηκαν και για τον τοπογραφικό σαρωτή. Η μόνη διαφορά εντοπίζεται στον σαρωτή laser που χρησιμοποιείται. Αναλυτικότερα ο βαθυμετρικός σαρωτής, εκπέμπει τόσο υπέρυθρους παλμούς laser (μήκος κύματος 1064 nm), όσο και πράσινους παλμούς laser (μήκος κύματος 532 nm). Οι υπέρυθροι παλμοί laser φτάνουν στην επιφάνεια του νερού και ανακλώνται προς τον σαρωτή, ενώ οι πράσινοι παλμοί laser έχουν την δυνατότητα να διεισδύουν στο νερό, να προσκρούουν στον πυθμένα και στην συνέχεια να ανακλώνται προς τον σαρωτή. Η διαφορά χρόνου μεταξύ αυτών των δύο διαφορετικών παλμών laser που επιστρέφουν στον σαρωτή, επιτρέπει τον υπολογισμό του βάθους του νερού (Εικόνα 2.7). Οι βαθυμετρικές πληροφορίες είναι πολύ σημαντικές κοντά στις ακτές, στα λιμάνια και στις όχθες. Χρησιμοποιούνται επίσης για τον εντοπισμό αντικειμένων στον πυθμένα των ωκεανών.



Εικόνα 2.7: Η μέτρηση του βάθους του νερού με τον αερομεταφερόμενο βαθυμετρικό σαρωτή (Infomar, 2006)

➤ Επίγειοι σαρωτές

Οι επίγειοι σαρωτές, όπως υποδηλώνει και το όνομά τους, λειτουργούν αποκλειστικά στο έδαφος και μπορεί να είναι στερεωμένοι σε ένα κινούμενο όχημα ή στατικοί πάνω από έναν τρίποδα. Αντί να σαρώνουν προς τα κάτω όπως κάνουν οι αερομεταφερόμενοι σαρωτές, τα επίγεια συστήματα συχνά σαρώνουν προς διάφορες κατευθύνσεις με τη χρήση κατόπτρων. Αυτό τους επιτρέπει να συλλαμβάνουν δεδομένα από παντού. Η αρχή λειτουργίας τους μοιάζει με αυτή των ολοκληρωμένων γεωδαιτικών σταθμών (total station), αλλά μετρούν αποστάσεις χωρίς την χρήση ανακλαστήρα, χρησιμοποιώντας παλμούς laser για να προσδιορίσουν την απόσταση. Οι επίγειοι σαρωτές laser, καταγράφουν την γεωμετρία και μερικές φορές πληροφορίες υψής για τις ορατές επιφάνειες των αντικειμένων και των χώρων. Σε σχέση με τους ολοκληρωμένους γεωδαιτικούς σταθμούς, εντοπίζονται αρκετές διαφορές που αφορούν το μήκος κύματος που χρησιμοποιούν, τον αριθμό και την ταχύτητα πρόσληψης των δεδομένων, τις εργασίες πεδίου, αλλά και την επεξεργασία και τα σφάλματα των μετρήσεων. Οι επίγειοι σαρωτές χρησιμεύουν στην συλλογή πυκνών τρισδιάστατων σημείων X, Y, Z (νέφη σημείων), με υψηλή ακρίβεια, ενώ μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την σάρωση περιοχών που δεν μπορούν να προσεγγίσουν οι αερομεταφερόμενοι σαρωτές, όπως κτίρια ή κάτω από δέντρα.

➤ Στατικοί σαρωτές

Οι στατικοί σαρωτές είναι προσαρμοσμένοι σε ένα σταθερό σημείο και συνήθως πάνω σε έναν τρίποδα και χρησιμοποιούνται, είτε για σάρωση ολόκληρης της γύρω περιοχής, είτε για εστίαση σε μια συγκεκριμένη περιοχή, ενώ μέσα από την εκπομπή παλμών laser μετρούν την απόσταση (Εικόνα 2.8). Ο τρίποδας μπορεί να μετακινηθεί σε διαφορετικές θέσεις μόλις ολοκληρωθούν οι σαρώσεις, για να διασφαλιστεί η ολοκληρωμένη κάλυψη μιας περιοχής. Τα πλεονεκτήματά τους είναι η μεγάλη ακρίβεια και η μεγάλη πυκνότητα λήψης σημείων. Το μεγάλο μειονέκτημα των στατικών σαρωτών αποτελεί η απαίτηση ίδρυσης στάσεων και η τοποθέτηση τους σε αυτές προκειμένου να ληφθούν δεδομένα, κάτι που οδηγεί σε αυξημένο χρόνο στο πεδίο των μετρήσεων. Τα συστήματα αυτά βρίσκουν εφαρμογή στην τοπογραφία, την εξόρυξη, την μηχανική και την αρχαιολογία, στις κατασκευές κτιρίων και στην βιομηχανία.

Για τη σάρωση μιας περιοχής, δηλαδή τη μέτρηση και καταγραφή μεγάλου αριθμού σημείων (νέφους σημείων) και την πλήρη αποτύπωσή της, χωρίς της χρήση ανακλαστήρων, απαιτείται κίνηση και ειδικότερα περιστροφή του σαρωτή laser γύρω από δύο άξονες: έναν οριζόντιο άξονα που ανήκει στο οριζόντιο επίπεδο που διέρχεται από τη συσκευή και έναν κατακόρυφο άξονα, κάθετο στο οριζόντιο επίπεδο (Εικόνα 2.9). Η στροφή γύρω από τον οριζόντιο άξονα εξασφαλίζει την δημιουργία ενός κατακόρυφου προφίλ και εκτελείται με τη μέτρηση της κεκλιμένης απόστασης και της αντίστοιχης κατακόρυφης γωνίας για μεγάλο αριθμό διαδοχικών σημείων του κατακόρυφου επιπέδου. Από τα καταγεγραμμένα αυτά στοιχεία, προκύπτουν με τη χρήση απλών μαθηματικών σχέσεων τα δεδομένα του προφίλ και συγκεκριμένα η οριζόντια απόσταση των μετρημένων σημείων από τη θέση του σαρωτή καθώς και η υψομετρική διαφορά τους από το οριζόντιο επίπεδο που διέρχεται από το σαρωτή.

Η συνολική κάλυψη της περιοχής μελέτης επιτυγχάνεται με τη λήψη μεγάλου αριθμού προφίλ. Επομένως, εκτός από την περιστροφή γύρω από οριζόντιο άξονα, που πραγματοποιείται με τη χρήση περιστρεφόμενου καθρέφτη ή πρίσματος, απαιτείται μηχανισμός που θα επιτρέπει τον έλεγχο και τη μέτρηση της αζιμουθιακής περιστροφής του σαρωτή laser γύρω από κατακόρυφο άξονα. Με τις δύο αυτές κινήσεις λαμβάνονται δεδομένα για την περιοχή που εκτείνεται περιμετρικά της συσκευής και επιτρέπουν τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων (Κοψιάτης, 2016).

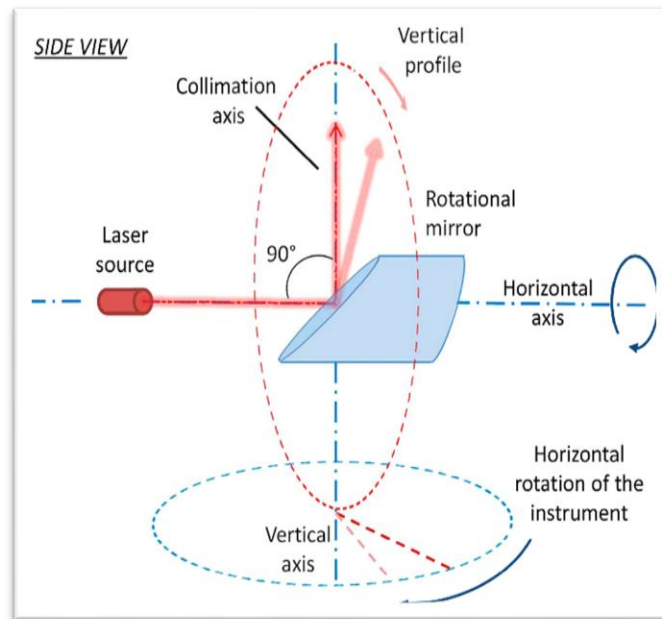
Όταν η δέσμη ακτίνων χτυπήσει ένα αντικείμενο, ένα μέρος αυτής επιστρέφει πίσω στον σαρωτή, όπου εάν αυτή η ανακλώμενη ενέργεια είναι ισχυρή, ο αισθητήρας του σαρωτή την εντοπίζει και την χρησιμοποιεί για να υπολογίσει την απόσταση του σαρωτή από το αντικείμενο. Ο μηχανισμός του σαρωτή θεωρείται ότι λειτουργεί με ένα σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων και σε κάθε ανίχνευση του επιστρεφόμενου σήματος που ανακλάται σε μια επιφάνεια, καταγράφει τις δύο γωνίες διεύθυνσης, την οριζόντια γωνία θ της περιστρεφόμενης κεφαλής του σαρωτή, την κατακόρυφη γωνία φ του περιστρεφόμενου καθρέφτη και την απόσταση ρ από την επιφάνεια του αντικειμένου που σαρώνεται (Εικόνα 2.10). Επίσης, για κάθε σημείο καταγράφεται και μια τιμή της έντασης της ανακλώμενης ακτινοβολίας. Κέντρο του σφαιρικού συστήματος αποτελεί ο ίδιος ο αισθητήρας του σαρωτή ($\theta=0, \varphi=0$). Ο σαρωτής αυτόματα ενώνει τα δεδομένα που προαναφέρθηκαν, για να υπολογίσει τις τρισδιάστατες συντεταγμένες θέσης (X, Y, Z) για

κάθε σημείο. Οι σφαιρικές συντεταγμένες μετατρέπονται σε καρτεσιανές. Αξίζει να σημειωθεί πως το γωνιακό βήμα σάρωσης κατά τις δύο διευθύνσεις (οριζόντια και κατακόρυφη) μπορεί να καθοριστεί από το χρήστη πριν την έναρξη της διαδικασίας σάρωσης.

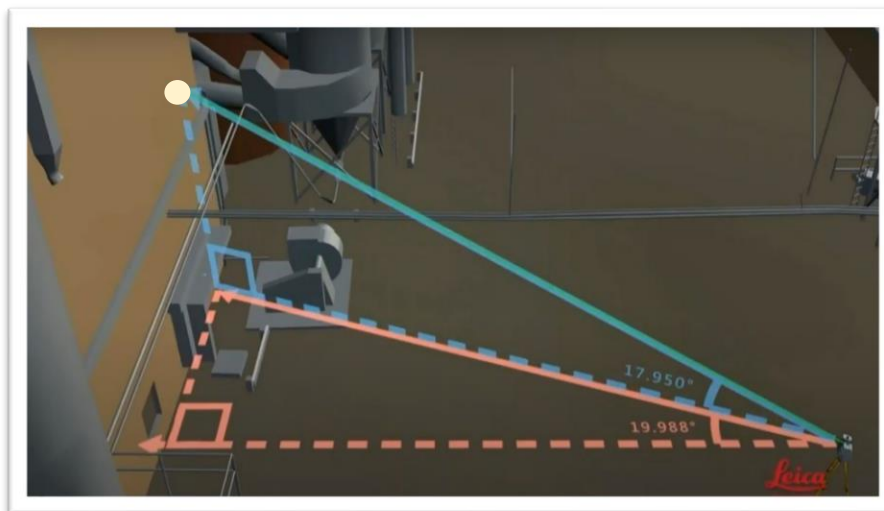
Ως προς την αρχή μέτρησης των αποστάσεων, οι στατικοί σαρωτές laser λειτουργούν, είτε με την αρχή διαφοράς φάσης, είτε με την αρχή του χρόνου πτήσης. Σε γενικές γραμμές, οι σαρωτές laser που βασίζουν τη λειτουργία τους στην αρχή της διαφοράς φάσης επιτρέπουν διαδοχικές μετρήσεις με μεγάλο ρυθμό και υψηλή ακρίβεια, αλλά με περιορισμένο εύρος μέτρησης. Αντίθετα, οι σαρωτές laser που χρησιμοποιούν την αρχή του χρόνου πτήσης έχουν τη δυνατότητα να μετρήσουν μεγάλες αποστάσεις, με μικρότερη όμως ακρίβεια (αν και στα αποδεκτά συνήθως όρια) και χαμηλότερο ρυθμό, συγκριτικά με την αρχή της διαφοράς φάσης. Όπως γίνεται αντιληπτό η καθεμιά από τις τεχνολογίες σάρωσης με laser που προαναφέρθηκαν ικανοποιεί διαφορετικές απαιτήσεις. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας εξαρτάται από τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής, συνυπολογίζοντας την ποιότητα του τελικού προϊόντος.



Εικόνα 2.8: Επίγειος στατικός σαρωτής (Hive Virtual Plant, 2020)



Εικόνα 2.9: Ο οριζόντιος και ο κατακόρυφος άξονας του επίγειου στατικού σαρωτή (Medić et al., 2017)

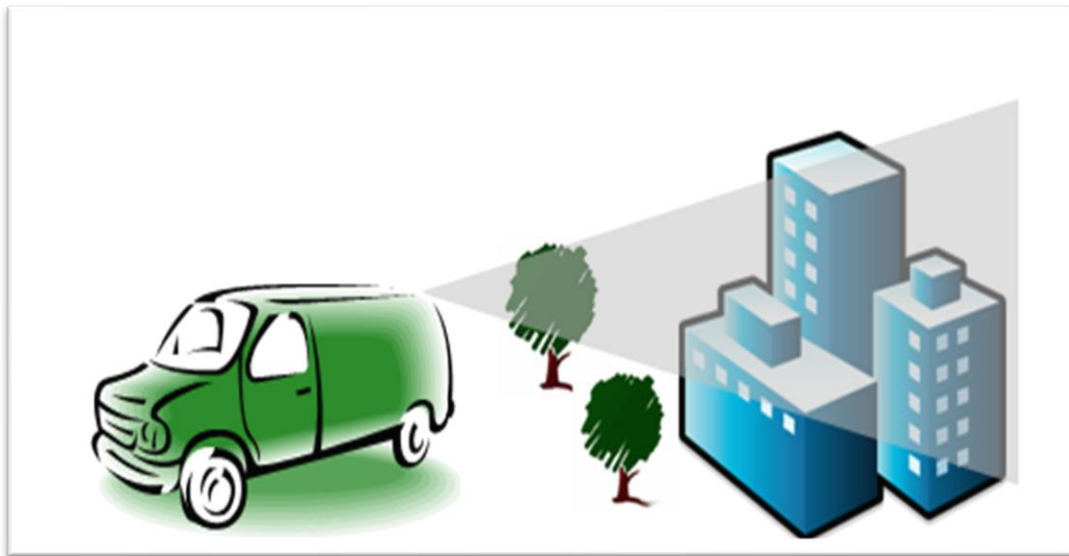


Εικόνα 2.10: Η οριζόντια και κατακόρυφη γωνία και η απόσταση που μετρώνται, κατά την καταγραφή ενός σημείου από τον επίγειο στατικό σαρωτή laser (Leica Geosystems AG, 2012)

1. Κινητοί σαρωτές

Οι κινητοί σαρωτές εγκαθίστανται σε κινούμενες πλατφόρμες (τρένα, σκάφη, οχήματα) (Εικόνα 2.11), σε μη επανδρωμένα οχήματα UAV ή κρατούνται στο χέρι, προκειμένου να συλλεχθούν σημεία για κάθε επιθυμητό αντικείμενο. Χαρακτηριστικό αυτής της τεχνικής, είναι ότι δεν υπάρχουν γνωστές στάσεις στις οποίες τοποθετείται ο σαρωτής, αλλά η σάρωση πραγματοποιείται κατά την κίνηση του συστήματος.

Επομένως για τον καθορισμό της τροχιάς του σε ένα άγνωστο περιβάλλον, ένας κινητός σαρωτής, περιλαμβάνει έναν αισθητήρα LiDAR, ένα παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης (GPS), ένα σύστημα αδρανειακής πλοήγησης (INS) και μερικές κάμερες. Από το κινούμενο όχημα, η μονάδα LiDAR εκπέμπει παλμούς laser προς όλες τις κατευθύνσεις και διαβάζει τις αντανακλάσεις. Στην συνέχεια, τα νέφη σημείων που συλλέγονται, υποβάλλονται σε επεξεργασία. Ο συγκεκριμένος τύπος σαρωτών χρησιμοποιείται στην σάρωση των οδικών και σιδηροδρομικών δικτύων.



Εικόνα 2.11: Κινητό σύστημα χαρτογράφησης (ArcGIS Desktop, n.d.)

2.5 Εφαρμογές σάρωσης με laser

Οι σαρωτές laser μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Τα μοναδικά χαρακτηριστικά τους τα καθιστούν ιδανικά, δίνοντας λύσεις σε προβλήματα αποτύπωσης, τα οποία με τις παραδοσιακές μεθόδους αποτύπωσης έμοιαζαν να μην αντιμετωπίζονται εύκολα.

➤ Συγκοινωνίες

Οι σαρωτές laser βρίσκουν εφαρμογή σε μελέτες οδοποιίας και συγκοινωνιακών έργων. Πλέον υπάρχει η δυνατότητα αποτύπωσης με την χρήση σαρωτών laser, χωρίς να απαιτείται η διακοπή της κυκλοφορίας. Ειδικότερα οι σαρωτές laser χρησιμεύουν στην τοπογραφική αποτύπωση οδών και διατομών, στον υπολογισμό του όγκου των χωματισμών, σε μετρήσεις διασταυρώσεων, πεζοδρομίων, οδοστρωμάτων, τεχνικών έργων, σε μετρήσεις-αναλύσεις ατυχημάτων, σε υπολογισμούς κλίσης και σταθερότητας πρανών, σε μετρήσεις προφίλ από σήραγγες, σε μετρήσεις ορατότητας, σε εργασίες που αφορούν αεροδρόμια, αεροδιάδρομους και τερματικούς σταθμούς και σε μετρήσεις σε σιδηροδρομικά δίκτυα και σταθμούς.

➤ Αρχιτεκτονική

Οι δυνατότητες των σαρωτών laser για την αποτύπωση λεπτομερειών και χώρων που δεν έχουν προσβασιμότητα είναι δύο λόγοι για τους οποίους αυτοί μπορούν να χρησιμεύσουν ιδιαίτερα στην αποτύπωση αρχιτεκτονικών συνόλων. Οι αποτυπώσεις μπορούν να γίνουν σε αστικές περιοχές με κινητικότητα, χωρίς να επηρεαστούν οι μετρήσεις. Αναλυτικότερα οι εφαρμογές αφορούν τις μελέτες μετατροπών, αλλαγών και επεκτάσεων των κτιρίων, τις αγορές ακινήτων, τις κατασκευές κτιρίων, την μέτρηση στοιχείων και όγκων κατά την ανέγερση κτιρίων, την αποτύπωση αρχιτεκτονικών και δομικών στοιχείων, την αποτύπωση κτιρίων πολιτιστικής κληρονομιάς, τις μελέτες αλλαγών χρήσεων, την αντιμετώπιση προβλημάτων στατικότητας αλλά και πολεοδομικής ή χωροθετικής οργάνωσης, την πρόληψη, αντιμετώπιση και διαχείριση φυσικών καταστροφών, ατυχημάτων, κ.λ.π. και την αποτύπωση χώρων για χρήση σε computer games, animation, κινηματογράφο, κ.λ.π. Ακόμη οι σαρωτές laser βρίσκουν εφαρμογή σε έναν άλλο πολύ σημαντικό κλάδο της αρχιτεκτονικής, που είναι οι αποτυπώσεις μνημείων. Ορισμένοι περιορισμοί, όπως για παράδειγμα η δυσκολία πρόσβασης και η πολυπλοκότητα καθιστούν αναγκαία την χρήση τους σε τέτοιες εφαρμογές. Αναλυτικότερα αποτυπώσεις μνημείων, αρχαιολογικών χώρων και αγαλμάτων, μέσα από την σάρωση με laser, είναι η λύση για τους αρχιτέκτονες που ασχολούνται με τέτοιου είδους εφαρμογές.

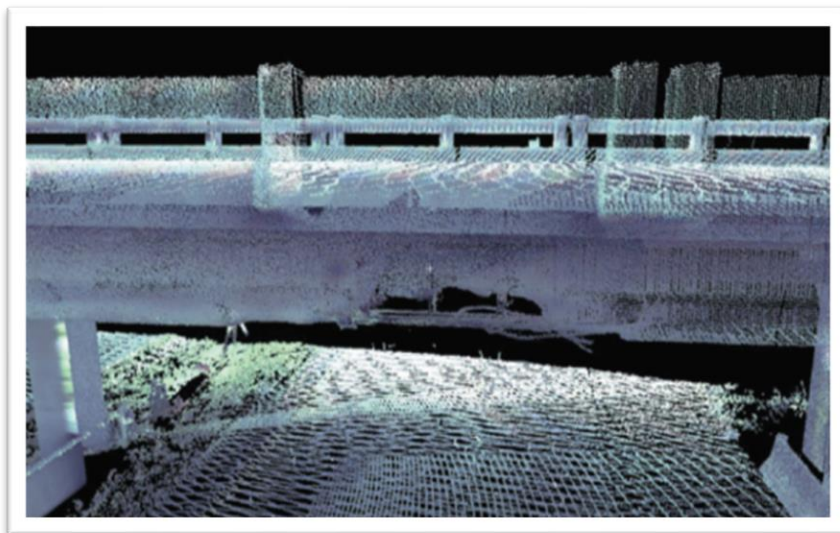
➤ Βιομηχανικές εφαρμογές

Οι σαρωτές laser χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό στην βιομηχανία και συγκεκριμένα στον σχεδιασμό αντικειμένων, στον εντοπισμό διαφόρων αστοχιών των συστημάτων και των εξαρτημάτων, κ.λ.π. Παράλληλα μπορούν να αποτυπωθούν και ολόκληρες εγκαταστάσεις. Στις βιομηχανικές εφαρμογές απαιτείται η μέγιστη δυνατή ακρίβεια και η ταχύτητα κατά την αποτύπωση. Η σάρωση γίνεται από απόσταση, καθιστώντας εύκολη την αποτύπωση απρόσιτων και επικίνδυνων εγκαταστάσεων.

➤ Ανάλυση ατυχημάτων

Σε περιπτώσεις ατυχημάτων (Εικόνα 2.12) βασικός στόχος είναι η αποκατάσταση της κανονικότητας στην περιοχή (η στατικότητα σε περιπτώσεις καταρρεύσεων, η κυκλοφορία σε περιπτώσεις τροχαίων, κ.λ.π.). Για τον λόγο αυτό είναι σημαντικό η αποτύπωση να γίνεται ταχύτατα και με υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας, κάτι που συχνά είναι χρονοβόρο. Αυτές οι δύο παράμετροι ικανοποιούνται με την χρήση των σαρωτών laser, οι οποίοι δίνουν μία πυκνή γεωμετρική πληροφορία της περιοχής που αποτυπώνεται. Συχνά οι περιοχές ατυχημάτων έχουν έντονη ανθρώπινη παρουσία, γεγονός που καθιστά δύσκολη την αποτύπωση με κλασικές μεθόδους. Αντίθετα στην σάρωση με laser τα εμπόδια αυτά αποτελούν απλώς θόρυβο που μπορεί να αφαιρεθεί κατά την διαδικασία της επεξεργασίας του νέφους σημείων. Επιπροσθέτως η αποτύπωση δεν πρέπει να διαταράξει την σκηνή του ατυχήματος. Η σάρωση με την χρήση laser, ικανοποιεί και αυτή την παράμετρο, εφόσον οι μετρήσεις πραγματοποιούνται από απόσταση. Το τρισδιάστατο νέφος σημείων που παράγεται,

επιτρέπει στον μελετητή να κάνει τις υποθέσεις του, τους υπολογισμούς του και να καταλήξει σε κάποια συμπεράσματα, σε δεύτερο χρόνο, στο γραφείο του. Τέλος μέσα από την σάρωση με laser, είναι εφικτή η αποτύπωση της σκηνης του ατυχήματος ανεξάρτητα από τις συνθήκες φωτισμού και την παρουσία καπνού ή σκόνης στο περιβάλλον (Συμεωνίδης, 2007).



Εικόνα 2.12: Αποτύπωση γέφυρας έπειτα από σύγκρουση με φορτηγό (Συμεωνίδης, 2007)

2.6 Κινητά συστήματα σάρωσης

Η ανάπτυξη των κινητών συστημάτων σάρωσης, χαρακτηρίζεται από την χρήση πολλαπλών αισθητήρων, καθώς και ολοκληρωμένων μεθόδων επεξεργασίας των δεδομένων των αισθητήρων, που έχουν ως αποτέλεσμα την εκπόνηση εξαιρετικά λεπτομερών ερευνών κατά μήκος της τροχιάς ενός κινούμενου οχήματος.

2.6.1 Αρχή λειτουργίας και αισθητήρες κινητών συστημάτων σάρωσης

Η επανάσταση που εισήγαγαν τα κινητά συστήματα χαρτογράφησης ήταν ο άμεσος προσανατολισμός των αισθητήρων απεικόνισης από τους αισθητήρες πλοήγησης, αποφεύγοντας έτσι την κλασική έμμεση μέθοδο, η οποία αντ' αυτού χρησιμοποιούσε σημεία ελέγχου για τις απαιτούμενες τοπογραφικές έρευνες.

Ένα κινητό σύστημα χαρτογράφησης είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα αισθητήρων χαρτογράφησης, τοποθετημένο σε μία κινούμενη πλατφόρμα, που παρέχει την θέση της πλατφόρμας κατά την συλλογή γεωχωρικών δεδομένων. Μία τυπική πλατφόρμα ενός κινητού συστήματος χαρτογράφησης χρησιμοποιεί LiDAR και/ή κάμερες υψηλής ανάλυσης ως κύριους αισθητήρες για την λήψη δεδομένων σχετικά με αντικείμενα/περιοχές ενδιαφέροντος, ενσωματωμένους με αισθητήρες θέσης και προσανατολισμού, όπως το παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα πλοήγησης GNSS, μία αδρανειακή μονάδα μέτρησης IMU (Inertial Measurement Unit) και ένα αποστασιόμετρο DMI (Distance Measurement Indicator) (Εικόνα 2.13). Συνεπώς ένα κινητό σύστημα

χαρτογράφησης αποτελείται από αισθητήρες εντοπισμού θέσης, οι οποίοι λαμβάνουν τις γεωγραφικές θέσεις και την κίνηση των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για την γεωαναφορά των συλλεχθέντων τρισδιάστατων δεδομένων, μέσα από τα GNSS, IMU και DMI.



Εικόνα 2.13: Κινητό σύστημα σάρωσης, τοποθετημένο σε όχημα (Elhashash et al., 2022)

Για να επιτευχθεί ένας πιο ακριβής εντοπισμός θέσης, οι μετρήσεις από αυτούς τους αισθητήρες (GNSS, IMU, DMI) συγχωνεύονται. Η συγχώνευση μπορεί επίσης να πραγματοποιηθεί μεταξύ των αισθητήρων θέσης και πλοήγησης. Απαραίτητη είναι η συγχώνευση των μετρήσεων GNSS, IMU και DMI, καθώς ούτε ο δέκτης GNSS, αλλά ούτε τα IMU/DMI από μόνα τους μπορούν να παρέχουν ακριβείς μετρήσεις για την πλοήγηση σε κινητές πλατφόρμες. Οι μετρήσεις GNSS εξαρτώνται από την διακύμανση της ισχύος του σήματος σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Για παράδειγμα υπάρχουν περιοχές όπου το σήμα είναι ισχυρό (ανοιχτοί χώροι) και περιοχές όπου είναι αδύναμο ή υπάρχει ολοκληρωτική απώλεια (σήραγγες, εσωτερικοί χώροι), οδηγώντας σε απώλεια πληροφοριών. Από την άλλη πλευρά, τα IMU και DMI υπόκεινται σε μια σημαντική συσσώρευση σφαλμάτων και συχνά χρησιμοποιούνται ως συμπληρωματικές παρατηρήσεις για την πλοήγηση όταν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα GPS.

Οι αισθητήρες απεικόνισης αποτελούνται κυρίως από LiDAR και ψηφιακές κάμερες, παρέχοντας ακατέργαστες δισδιάστατες ή τρισδιάστατες μετρήσεις του περιβάλλοντος. Οι τρισδιάστατες μετρήσεις ενός κινητού συστήματος χαρτογράφησης, πραγματοποιούνται από αισθητήρες LiDAR, ενώ οι εικόνες χρησιμοποιούνται κυρίως για την παροχή χρωματομετρικών/φασματικών πληροφοριών.

Το LiDAR, είναι ένα οπτικό όργανο που χρησιμοποιεί κατευθυνόμενες ακτίνες laser για τη μέτρηση των αποστάσεων και των θέσεων των αντικειμένων. Παρέχει ακριβή μέτρηση των σημείων σε ένα τρισδιάστατο αντικείμενο. Πολλές από αυτές τις μετρήσεις μαζί, αποτελούν πληροφορίες για το σχήμα και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας των

αντικειμένων στο περιβάλλον. Το LiDAR έχει πολλά επιθυμητά χαρακτηριστικά σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο, καθώς είναι πολύ ακριβές, μπορεί να αποκτήσει πυκνές τρισδιάστατες πληροφορίες σε σύντομο χρονικό διάστημα και δεν επηρεάζεται από τις συνθήκες φωτισμού. Είναι ένα όργανο που χρησιμοποιείται για την μέτρηση σχετικών θέσεων. Απαιτεί μία σειρά από καλά βαθμονομημένα και υψηλής ακρίβειας συστήματα για την ανάκτηση των παγκόσμιων τρισδιάστατων σημείων. Πέρα από την δημιουργία νεφών σημείων, μπορεί να χρησιμεύσει και στην αντιστοίχιση των σαρώσεων. Ενώ οι αισθητήρες LiDAR μπορούν να παρέχουν σχετικά ακριβείς μετρήσεις εύρους, η απόδοσή τους επιδεινώνεται σημαντικά σε άσχημες καιρικές συνθήκες όπως η βροχή, το χιόνι και η ομίχλη.

Οι κάμερες, είναι από τους πιο δημοφιλείς αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για την συλλογή δεδομένων, λόγω του χαμηλού κόστους και της ικανότητάς τους να παρέχουν πληροφορίες υψής υψηλής ανάλυσης. Συνήθως τοποθετούνται στο επάνω ή στο μπροστινό μέρος της κινούμενης πλατφόρμας για να καταγράφουν πληροφορίες σχετικά με το περιβάλλον. Προορίζονται να αποκτήσουν πολλές εικόνες, σε έναν υψηλό ρυθμό καρτέ. Χρησιμοποιούνται για την ανάκτηση της γεωμετρίας της σκηνής που συνήθως λαμβάνεται μέσω στερεοσκοπικών/διόφθαλμων καμερών, οι οποίες επεξεργάζονται ένα ζεύγος επικαλυπτόμενων εικόνων και ανακτούν πληροφορίες βάθους, χρησιμοποιώντας στερεοφωνικές προσεγγίσεις αντιστοίχισης εικόνας. Ακόμη είναι σε θέση να αποκτήσουν την υφή των αντικειμένων, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή φωτορεαλιστικών μοντέλων. Ορισμένα είδη αισθητήρων κάμερας είναι οι μονόφθαλμες, οι διόφθαλμες, οι RGB-D, τα συστήματα πολλαπλών καμερών, fisheye, κ.λ.π. Οι κάμερες είναι ευαίσθητες στις συνθήκες φωτισμού.

Ο δέκτης GNSS χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της απόλυτης θέσης, ταχύτητας, και υψομέτρου, σε ανοιχτές περιοχές. Τα παραπάνω γεωαναφέρονται σε ένα παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων (π.χ. WGS84). Λαμβάνει σήματα από τέσσερις κατ' ελάχιστο δορυφόρους και υπολογίζει τις θέσεις σε πραγματικό χρόνο. Αφού εξαρτάται από μία εξωτερική πηγή σήματος, το GNSS συχνά εμφανίζει λιγότερα σφάλματα συσσώρευσης ή και καθόλου.

Η αδρανειακή μονάδα μέτρησης IMU, καταγράφει τη σχετική θέση του προσανατολισμού και την κατεύθυνση της επιτάχυνσης της πλατφόρμας. Σε αντίθεση με το GNSS, δεν απαιτεί σύνδεση προς εξωτερικές πηγές σήματος, και καταγράφει τις σχετικές θέσεις, έχοντας ως αναφορά το σημείο εκκίνησής του (το οποίο συνήθως σε ανοιχτούς χώρους μπορεί να παρέχεται από το GNSS). Για τον λόγο αυτό εμφανίζει σφάλματα συσσώρευσης, οδηγώντας σε σημαντικές μετατοπίσεις σε σχέση με τις πραγματικές θέσεις. Μία αδρανειακή μονάδα μέτρησης αποτελείται από ένα επιταχυνσιόμετρο κι ένα γυροσκόπιο, με τα οποία ανιχνεύει την επιτάχυνση και την γωνιακή ταχύτητα αντίστοιχα. Αυτές οι ακατέργαστες μετρήσεις τροφοδοτούνται σε μια ενσωματωμένη υπολογιστική μονάδα για την παροχή εντοπισμού θέσης σε πραγματικό χρόνο. Μία αδρανειακή μονάδα μέτρησης μπορεί να λειτουργήσει σε περιβάλλοντα όπου υπάρχει απώλεια GPS, σε εσωτερικούς, εξωτερικούς χώρους και σε σήραγγες. Από την στιγμή που το GNSS παρέχει λογική ακρίβεια σε έναν ανοιχτό χώρο και οι μετρήσεις του δεν εμφανίζουν σφάλμα συσσώρευσης καθώς η πλατφόρμα κινείται, συχνά ενσωματώνει τις μετρήσεις της αδρανειακής μονάδας μέτρησης ως πρόσθετες

παρατηρήσεις, παρέχοντας πιο ακριβή δεδομένα θέσης, τόσο σε ανοιχτά όσο και σε περιβάλλοντα που το σήμα διακόπτεται τακτικά.

Η μονάδα αναφοράς χρόνου μετράει την απόσταση που έχει διανύσει η πλατφόρμα. Σε πολλές περιπτώσεις, η μονάδα αναφοράς χρόνου αναφέρεται εναλλακτικά ως οδόμετρο ή αισθητήρας τροχού, για τα κινητά συστήματα χαρτογράφησης που βασίζονται σε οχήματα. Υπολογίζει την απόσταση, με βάση τον αριθμό των κύκλων του τροχού που περιστρέφεται. Δεδομένου ότι μετράει μόνο την απόσταση, χρησιμοποιείται συχνά για την παροχή συμπληρωματικών πληροφοριών στα GNSS/IMU, ως αποτελεσματικό μέσο για τη μείωση των συσσωρευμένων σφαλμάτων και περιορίζει την μετατόπιση από την αδρανειακή μονάδα μέτρησης σε περιβάλλοντα που δεν λειτουργεί το GPS, όπως είναι οι σήραγγες. Απαιτεί βαθμονόμηση πριν από τη χρήση και μετρά την απόσταση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση.

Για εσωτερικά περιβάλλοντα με απώλεια GPS, οι αισθητήρες μπορεί να διαφέρουν σημαντικά από εκείνες που χρησιμοποιούνται σε εξωτερικούς χώρους. Για παράδειγμα μπορεί να βασίζονται κυρίως στην αδρανειακή μονάδα μέτρησης ή στην οπτική οδομετρία για τον εντοπισμό θέσης.

Για την μετατροπή των ακατέργαστων δεδομένων των αισθητήρων σε ένα τελικό τρισδιάστατο προϊόν απαιτούνται μερικά βήματα επεξεργασίας. Αναλυτικότερα τα βήματα αυτά αφορούν την απόκτηση των δεδομένων, την βαθμονόμηση των αισθητήρων, την συγχώνευση των δεδομένων, την γεωαναφορά και την επεξεργασία τους.

Η προγραμματισμένη διαδρομή πρέπει να αναλυθεί και να επιλεγθούν οι πλατφόρμες και οι αισθητήρες που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Για παράδειγμα θα πρέπει να είναι γνωστό εάν στην περιοχή μελέτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί το GNSS. Για τον εντοπισμό θέσης, τα GNSS, IMU και DMI, μετρούν συνεχώς την θέση και την κίνηση της πλατφόρμας. Στις περισσότερες εφαρμογές εξωτερικών χώρων, τα κύρια δεδομένα πλοήγησης και εντοπισμού θέσης παρέχονται από τους δορυφόρους και τον δέκτη GNSS. Τα IMU και DMI χρησιμοποιούνται παρέχοντας συμπληρωματικές μετρήσεις όταν τα σήματα GNSS είναι ανεπαρκή ή χάνονται.

Η βαθμονόμηση των αισθητήρων και η συγχώνευση των δεδομένων τους εκτελούνται συχνά σε όλο τον κύκλο συλλογής των δεδομένων. Ο στόχος είναι η βαθμονόμηση των σχετικών θέσεων μεταξύ των πολλαπλών αισθητήρων, δηλαδή μεταξύ των καμερών, μεταξύ κάμερας και LiDAR, ή μεταξύ LiDAR, κάμερας και αισθητήρων πλοήγησης. Η έξοδός τους πρέπει να συγχωνευθεί για την επίτευξη πιο ακριβών μετρήσεων θέσης. Ακόμη με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ο ακριβής εντοπισμός, μια πιο ακριβής γεωμετρική ανακατασκευή και ευθυγράμμιση των δεδομένων για συγχώνευση.

Η βαθμονόμηση κάμερας αναφέρεται στη διαδικασία αυστηρού προσδιορισμού των εγγενών παραμέτρων της κάμερας (δηλαδή, εστιακή απόσταση, κύριο σημείο), διαφόρων παραμορφώσεων του φακού (π.χ. ακτινική παραμόρφωση) και άλλων εγγενών παραμορφώσεων.

Η βαθμονόμηση μεταξύ LiDAR και κάμερας γίνεται ως εξής: πρώτα, οι εικόνες συγχρονίζονται χρονικά με τις σαρώσεις LiDAR. Δεύτερον, υπολογίζεται ο σχετικός

προσανατολισμός μεταξύ του LiDAR και των ακτίνων της κάμερας. Τρίτον, τα παραπάνω πρέπει να έχουν την ίδια οπτική γωνία για την αποφυγή των παραλλαγών.

Η ενοποίηση των δεδομένων των GNSS, IMU και DMI χωρίζεται σε πολλά βήματα. Αρχικά πραγματοποιείται η εργαστηριακή/εργοστασιακή προβαθμονόμηση, η οποία εκτιμά τη σχετική μετατόπιση μεταξύ αυτών των αισθητήρων και τη σχετική τους θέση με τους αισθητήρες απεικόνισης (π.χ. LiDAR και κάμερες). Έπειτα πραγματοποιείται η συγχώνευση των πληροφοριών των αισθητήρων, προκειμένου να προκύψουν οι εκτιμώμενες θέσεις μέσω βέλτιστων στατιστικών εκτιμητών. Ένας τυπικός αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για τον σκοπό αυτό είναι το φίλτρο Kalman. Πρόκειται για ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων, που χρησιμοποιεί μία σειρά μετρήσεων που παρατηρούνται με την πάροδο του χρόνου, που περιέχουν θόρυβο κι άλλες ανακρίβειες, για να παράγει εκτιμήσεις παρελθοντικών, παροντικών και μελλοντικών καταστάσεων, που τείνουν να είναι πιο ακριβείς από την χρήση μίας μόνο μέτρησης. Λειτουργεί αναδρομικά σε ροές θορυβωδών δεδομένων εισόδου, για να παράγει μία στατιστικά βέλτιστη εκτίμηση της υποκείμενης κατάστασης του συστήματος. Βρίσκει εφαρμογή στην καθοδήγηση, την πλοήγηση και τον έλεγχο του οχήματος. Λαμβάνει τις πληροφορίες θέσης του οχήματος με πληροφoρία για τον χρόνο που παρέχεται από τους δορυφόρους GNSS, τις πληροφορίες για τον προσανατολισμό του οχήματος στον χώρο από μία εσωτερικά τοποθετημένη αδρανειακή μονάδα μέτρησης IMU και την μέτρηση της απόστασης από το DMI. Η διαδικασία για τον υπολογισμό της βέλτιστης εκτίμησης της τροχιάς του οχήματος, περιλαμβάνει την στατική καταγραφή δεδομένων GPS, πέντε λεπτά στην αρχή και στο τέλος κάθε έρευνας, προκειμένου να ληφθούν ακριβή δεδομένα GNSS. Με αυτό τον τρόπο προκύπτει η λύση της πλοήγησης και κατά συνέπεια η τροχιά του οχήματος, η οποία χρησιμοποιείται στην συνέχεια για να δημιουργηθεί ένα γεωαναφερμένο νέφος σημείων, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα σάρωσης laser.

Το LiDAR και οι κάμερες συλλέγουν δεδομένα σε ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων. Η γεωαναφορά τους, αναφέρεται στον προσδιορισμό των παγκόσμιων/γεωδαιτικών συντεταγμένων τους, βάσει των συγχωνευμένων δεδομένων θέσης που παρέχουν τα GNSS/IMU/DMI. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται έπειτα από την βαθμονόμηση μεταξύ αυτών των αισθητήρων συλλογής των δεδομένων. Η γεωαναφορά περιλαμβάνει την εκτίμηση των παραμέτρων/μετατοπίσεων της θέσης και του προσανατολισμού, ως προς το GNSS και το IMU. Οι παράμετροι θέσης και προσανατολισμού ορίζουν την γεωμετρική σχέση μεταξύ των αισθητήρων εντοπισμού θέσης και των αισθητήρων απεικόνισης. Για τον σκοπό απαιτείται η ίδρυση ενός συστήματος συντεταγμένων στο όχημα. Η αρχή του συστήματος αυτού είναι το IMU, οπότε όλοι οι αισθητήρες πρέπει να αναφέρονται σε αυτή την μονάδα. Συνεπώς πρέπει να υπολογιστούν οι θέσεις και οι προσανατολισμοί μεταξύ IMU και GNSS, IMU και DMI, IMU και LiDAR και IMU και κάμερας (Puentes et al., 2013).

Οι πλατφόρμες των κινητών συστημάτων χαρτογράφησης διακρίνονται σε οχήματα και σε ελαφριές/φορητές συσκευές χαρτογράφησης. Κάποιες από αυτές έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν μόνο σε εσωτερικούς χώρους χωρίς να βασίζονται στο GNSS, ενώ άλλες λειτουργούν σε εσωτερικούς κι εξωτερικούς χώρους.

Τα κινητά συστήματα χαρτογράφησης που βασίζονται σε οχήματα, λειτουργούν κυρίως σε δρόμους, συλλέγοντας τρισδιάστατα δεδομένα σε επίπεδο πόλης. Οι αισθητήρες τοποθετούνται στην κορυφή ενός οχήματος για τη λήψη πυκνών νεφών σημείων. Αυτά τα συστήματα επιτρέπουν υψηλό ρυθμό απόκτησης δεδομένων, σε συνδυασμό με την ταχύτητα του οχήματος. Οι αισθητήρες μπορούν να τοποθετηθούν σε διαφορετικές πλατφόρμες, όπως αυτοκίνητα, τρένα ή σκάφη, ανάλογα με την εφαρμογή χαρτογράφησης. Γενικά, τα συστήματα που τοποθετούνται σε όχημα επιτυγχάνουν υψηλότερη ακρίβεια σε σύγκριση με άλλες κινητές πλατφόρμες χαρτογράφησης, κυρίως λόγω του μεγέθους και του ωφέλιμου φορτίου τους, που τους επιτρέπει να φιλοξενούν αισθητήρες υψηλής ποιότητας. Ένα κινητό σύστημα χαρτογράφησης τοποθετημένο σε όχημα, είναι συνήθως εξοπλισμένο με ένα LiDAR που παρέχει πυκνές και ακριβείς μετρήσεις, καθώς και μια βαθιά ενσωματωμένη κάμερα FoV 360°, που παρέχει πληροφορίες υψής. Όσον αφορά τους αισθητήρες θέσης, ένα σύστημα τοποθετημένο σε όχημα συνήθως συγχωνεύει μετρήσεις από δέκτες GNSS με μετρήσεις IMU και DMI. Τα συστήματα που τοποθετούνται σε οχήματα χρησιμοποιούνται για την αστική τρισδιάστατη μοντελοποίηση, για την διαχείριση των οδικών στοιχείων και τον έλεγχο της κατάστασής τους, την αυτοματοποιημένη ανίχνευση αλλαγών σε περιοχές που χαρτογραφούνται και για τις εφαρμογές παρακολούθησης σιδηροδρόμων. Παρόλο που τα συστήματα που τοποθετούνται σε οχήματα διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην κινητή χαρτογράφηση, το σχετικά μεγάλο τους μέγεθος εμποδίζει την προσβασιμότητά τους σε πολλές τοποθεσίες, όπως σε στενά σοκάκια και σε εσωτερικά περιβάλλοντα. Επιπλέον, ορισμένες μελέτες έχουν δείξει ότι η ταχύτητα του οχήματος μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα των τρισδιάστατων δεδομένων. Επομένως, η ταχύτητα και η διαδρομή πρέπει να προγραμματιστούν πριν την αποστολή χαρτογράφησης.

Οι ελαφριές/φορητές συσκευές, όπως τα συστήματα σακιδίων πλάτης, τα συστήματα που κρατιούνται στο χέρι ή τα συστήματα που βασίζονται σε τρόλεϊ, ανάλογα με την εφαρμογή τους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εξωτερικούς ή εσωτερικούς χώρους, αλλά και σε περιβάλλοντα με απώλεια GPS. Τα συστήματα που κρατιούνται στο χέρι, αλλά και τα συστήματα σακιδίων πλάτης, ακολουθούν έναν ελαφρύ και συμπαγή σχεδιασμό, χρησιμοποιώντας μικρού μεγέθους αισθητήρες. Ο χρήστης μπορεί να κρατήσει ή να φορέσει την πλατφόρμα και να περπατήσει στην περιοχή ενδιαφέροντος. Και τα δύο συστήματα διακρίνονται λόγω της φορητότητάς τους, η οποία επιτρέπει τη χαρτογράφηση περιβαλλόντων που υπάρχει απώλεια του σήματος GPS, όπως είναι οι κλειστοί χώροι, τα πολύπλοκα εδάφη ή στενοί χώροι στους οποίους δεν μπορούν να έχουν πρόσβαση τα οχήματα. Λόγω της φύσης αυτών των περιβαλλόντων, τα συστήματα που κρατιούνται στο χέρι και τα συστήματα σακιδίων πλάτης, ενδέχεται να μην βασίζονται σε δέκτες GNSS για τον εντοπισμό της θέσης, αλλά μπορούν αντ' αυτού να εξαρτώνται από μία αδρανειακή μονάδα μέτρησης ή να χρησιμοποιούν LiDAR και κάμερα τόσο για την συλλογή των δεδομένων, όσο και για τον εντοπισμό (χρησιμοποιώντας προσεγγίσεις του ταυτόχρονου εντοπισμού και χαρτογράφησης). Τα συστήματα που κρατιούνται στο χέρι και τα συστήματα σακιδίων πλάτης είναι αποτελεσματικά στη χαρτογράφηση κλειστών χώρων. Για παράδειγμα, αυτές οι συσκευές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη χαρτογράφηση σπηλαίων, όπου τα σήματα GNSS και ο καλός φωτισμός δεν είναι διαθέσιμα. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται για τη χαρτογράφηση χώρων πολιτιστικής κληρονομιάς, που μπορεί να είναι περίπλοκοι και

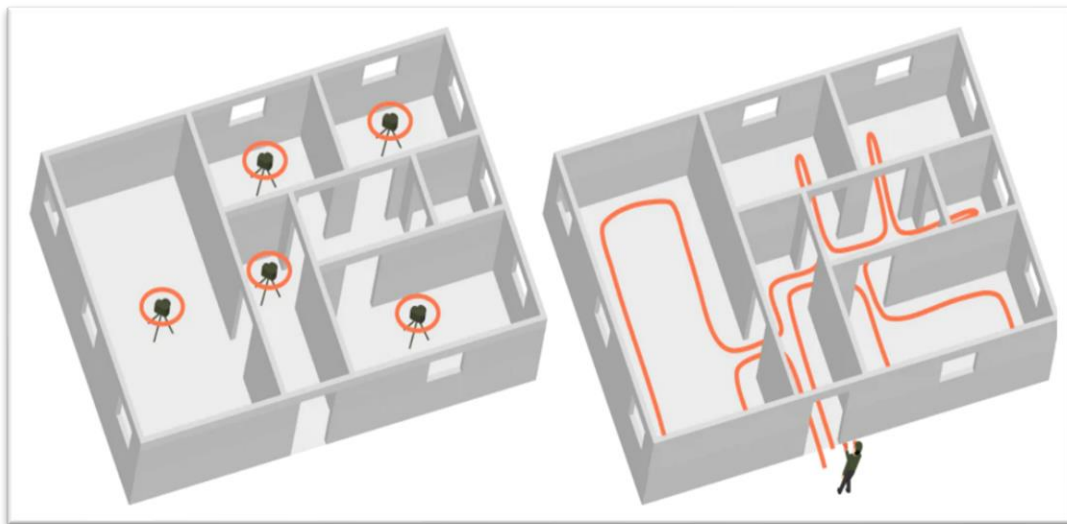
να απαιτούν αποτελεσματική συλλογή δεδομένων από διαφορετικά σημεία θέασης. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται επίσης στην δασομετρία και στην δημιουργία μοντέλων δομικών πληροφοριών. Τα συστήματα που βασίζονται σε τρόλεϊ είναι παρόμοια στην φύση με τα συστήματα σακιδίων πλάτης, ενώ είναι ελαφρώς πιο μεγάλα και μεταφέρουν βαρύτερο ωφέλιμο φορτίο. Είναι κατάλληλα για χαρτογράφηση εσωτερικών κι εξωτερικών χώρων, όπου το έδαφος είναι επίπεδο. Είναι επίσης κατάλληλα για την επιθεώρηση σηράγγων, την μέτρηση της τραχύτητας της ασφάλτου, την δημιουργία κατόψεων και μοντέλων δομικών πληροφοριών. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία τρισδιάστατων εσωτερικών γεωχωρικών προβολών κάθε είδους υποδομής, όπως εργοστασιακών εγκαταστάσεων, οικιστικών και εμπορικών κτιρίων, αεροδρομίων και σιδηροδρομικών σταθμών (Elhashash et al., 2022).

2.7 Σύγκριση των στατικών και κινητών συστημάτων σάρωσης

Παρ' όλο που τα στατικά συστήματα σάρωσης παράγουν ακριβή και λεπτομερή μοντέλα τρισδιάστατης απεικόνισης του περιβάλλοντος χώρου, η διαδικασία της συλλογής των δεδομένων και της επεξεργασίας των νεφών σημείων είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα, ενώ απαιτούνται πολλαπλές στατικές ρυθμίσεις ογκωδών συστημάτων που βασίζονται σε τρίποδο, κατά την μεταφορά τους από σημείο σε σημείο. Σε ορισμένα περιβάλλοντα σάρωσης, όπως για παράδειγμα στους εσωτερικούς χώρους, τα στατικά συστήματα σάρωσης δεν είναι καθόλου εύκολα ως προς την χρήση τους. Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 2.14α) απεικονίζονται οι στάσεις που έχουν ιδρυθεί, προκειμένου να καταγραφεί ένας περίπλοκος χώρος, χρησιμοποιώντας την στατική μέθοδο σάρωσης και συνένωση με την χρήση στόχων. Σε αυτή την περίπτωση, θα πρέπει να προστεθούν επιπλέον στάσεις σε κάθε πόρτα, για την εγγραφή τους από νέφος σημείων σε νέφος σημείων. Περισσότερες στάσεις θα πρέπει να ιδρυθούν εάν υπάρχουν αντικείμενα που εμποδίζουν την ορατότητα του σαρωτή και ακόμη περισσότερες σε περίπτωση που είναι επιθυμητή η καταγραφή των λεπτομερειών των χαρακτηριστικών. Όπως γίνεται αντιληπτό, η καταγραφή των μη επικαλυπτόμενων χώρων, δημιουργώντας επιπλέον στατικές σάρωσεις, προκειμένου να συνδεθούν τα νέφη των μη επικαλυπτόμενων σημείων, είναι μία διαδικασία αρκετά επίπονη, ενώ παράλληλα περιορίζει την απόσταση που μπορεί κανείς να μετακινήσει το όργανο μέχρι την επόμενη στάση μέτρησης. Μια άλλη επιλογή για την καταγραφή αυτών των μη επικαλυπτόμενων νεφών σημείων είναι η χρήση μεθόδων γεωδαισίας, προκειμένου να μετρηθούν τα σημεία σύνδεσης, κάτι που ασφαλώς είναι χρονοβόρο και αφετέρου χρειάζεται επιπλέον εξοπλισμό και τεχνογνωσία. Συνεπώς η στατική σάρωση σε εσωτερικά περιβάλλοντα, όπου η ορατότητα είναι περιορισμένη, απαιτεί περισσότερες θέσεις σάρωσης και προσεκτικό σχεδιασμό των μετρήσεων. Σε μία ροή εργασιών, αυτός ο τρόπος σάρωσης μπορεί να απαιτεί τη ρύθμιση του σαρωτή δεκάδες φορές για ένα μόνο έργο, ίσως και εκατοντάδες, εάν το έργο είναι ιδιαίτερα μεγάλο. Παράλληλα, το τρισδιάστατο μοντέλο που θα δημιουργηθεί ενδέχεται να είναι ελλιπές, λόγω της επιλογής ακατάλληλων σταθμών μέτρησης ή την ύπαρξη εμποδίων στον χώρο, δημιουργώντας κενά στην επιφάνειά του.

Η χαρτογράφηση με φορητές συσκευές επιταχύνει σημαντικά τη ροή εργασίας. Σε τυπικά έργα, έχει παρατηρηθεί αύξηση της ταχύτητας έως και 10 φορές ή περισσότερο.

Η χρήση μιας φορητής μονάδας σάρωσης με laser, επιλύει ορισμένα από τα προβλήματα που προαναφέρθηκαν, καθώς είναι δυνατή η γρήγορη σάρωση μεγάλων και πολύπλοκων περιοχών (μεγάλοι ανοιχτοί χώροι, στενοί χώροι και πολυώροφοι χώροι με σκάλες). Τα οφέλη των κινητών συστημάτων σάρωσης είναι γνωστά στη βιομηχανία χαρτογράφησης. Σε σύγκριση με τους στατικούς σαρωτές laser, αυτά τα εργαλεία προσφέρουν ταχύτερη ροή εργασιών και καλύτερη κάλυψη, πράγμα που συνεπάγεται μειωμένο χρόνο στο πεδίο των μετρήσεων και χαμηλότερο κόστος λήψης των δεδομένων. Είναι ευέλικτα και βολικά όργανα σάρωσης, καθώς παρέχουν την δυνατότητα συλλογής των δεδομένων εν κινήσει, αποτυπώνοντας ακόμα και τα πιο περίπλοκα περιβάλλοντα (Εικόνα 2.14β). Η συνένωση των καρτέ που λαμβάνονται πραγματοποιείται αυτόματα, χωρίς την ανάγκη χρήσης στόχων για την συνένωση κατά την διάρκεια της επεξεργασίας, όπως συμβαίνει με τους στατικούς σαρωτές. Ενώ οι στατικοί σαρωτές μπορούν να σαρώσουν προς όλες τις κατευθύνσεις, εξακολουθούν να υπάρχουν ορισμένες περιοχές από τις οποίες δεν μπορούν να συλλέξουν δεδομένα, όπως για παράδειγμα οι δυσπρόσιτες περιοχές. Αντιθέτως, τα φορητά συστήματα σάρωσης μπορούν να ερευνούν περιοχές που δεν είναι ασφαλείς ή προσβάσιμες για τον άνθρωπο. Χρησιμοποιώντας μία οθόνη tablet, τα συστήματα αυτά δείχνουν την ποιότητα της λήψης κατά την διάρκεια της σάρωσης, προσφέροντας ανατροφοδότηση σε πραγματικό χρόνο. Η οθόνη καταγράφει την τροχιά χαρτογράφησης και μπορεί να υποδείξει, τις περιοχές στις οποίες δεν έχουν ληφθεί επαρκή δεδομένα, ώστε να μπορεί να γίνει αμέσως διόρθωση. Η ακρίβεια των συστημάτων αυτών είναι της τάξεως του εκατοστού και δεν είναι τόσο καλή σε σχέση με την ακρίβεια που δίνει ένα στατικό σύστημα σάρωσης, λόγω της διάδοσης των σφαλμάτων θέσης στο νέφος σημείων.



(α)

(β)

Εικόνα 2.14: (α) Η ίδρυση πολλαπλών στάσεων μέτρησης κατά την στατική μέθοδο σάρωσης και (β) Η απλούστευση της διαδικασίας με την κίνηση του χρήστη του κινητού συστήματος σάρωσης μέσα στον χώρο



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Κεφάλαιο 3: Τεχνολογία SLAM

3.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο περιγράφεται η μέθοδος του ταυτόχρονου εντοπισμού και χαρτογράφησης (SLAM-Simultaneous Localization and Mapping) και συγκεκριμένα η βασική αρχή λειτουργίας της. Ακόμη γίνεται αναφορά στους αισθητήρες που χρησιμοποιεί η συγκεκριμένη μέθοδος, αλλά και στα διάφορα είδη σφαλμάτων που προκύπτουν κατά την εφαρμογή της. Στην συνέχεια δίνονται διάφορα παραδείγματα εφαρμογής της στην τεκμηρίωση της πολιτιστικής κληρονομιάς μέσα από έρευνες, όπου σε κάθε περίπτωση προκύπτει και η ακρίβεια της μεθόδου. Επιπροσθέτως το κεφάλαιο περιγράφει την αρχή λειτουργίας της κάμερας Matterport, τα προβλήματα και τα πλεονεκτήματα που εντοπίζονται κατά την χρήση της, ενώ δίνονται και ορισμένα παραδείγματα εφαρμογής της στην τεκμηρίωση της πολιτιστικής κληρονομιάς. Τέλος στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην χρήση της τεχνολογίας σάρωσης, στην αποτύπωση τόσο του εξωτερικού όσο και του εσωτερικού μέρους ορισμένων ιστορικών πλοίων, για την διατήρηση της ναυτικής κληρονομιάς.

3.2 Η μέθοδος του ταυτόχρονου εντοπισμού και χαρτογράφησης (SLAM)

Την τελευταία δεκαετία έχουν εμφανιστεί τεχνολογίες που απλοποίησαν την διαδικασία συλλογής των δεδομένων για την λεπτομερή τρισδιάστατη χαρτογράφηση των εσωτερικών χώρων. Οι τεχνολογίες αυτές εφαρμόζονται στις κατασκευές, στην διαχείριση και την ανάπτυξη των ακινήτων, στην διαχείριση και την απογραφή δασών, σε περιπτώσεις εκτάκτων αναγκών, στην εγκληματολογία, στην προσομοίωση ατυχημάτων, σε σήραγγες, υπόγεια, ορυχεία, μεταλλεία, κ.λ.π. Στα υπόγεια ορυχεία, στις αστικές περιοχές με πολυώροφα κτίρια, στα δάση όπου η πυκνότητα των δέντρων μπορεί να αποτελεί εμπόδιο για το σήμα, αλλά και στους εσωτερικούς χώρους, είναι μερικές από τις περιπτώσεις που υπάρχει απώλεια της ορατότητας με τους δορυφόρους, η οποία καθιστά αδύνατη την επικοινωνία του δέκτη με το GNSS. Όσον αφορά τους εσωτερικούς χώρους, πολλές φορές αυτοί χαρακτηρίζονται από πολύπλοκες δομές. Οι παραπάνω παράγοντες αποτελούν προκλήσεις κατά την χαρτογράφηση των περιβαλλόντων που προαναφέρθηκαν. Τα συστήματα που έχουν σχεδιαστεί για την επίλυση των παραπάνω προβλημάτων, αντιμετωπίζουν το ζήτημα της στιγμιαίας πλοήγησης, με έναν διαφορετικό τρόπο. Οι αναλυτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επίλυση αυτού του προβλήματος ανήκουν στην κατηγορία των λεγόμενων αλγορίθμων του ταυτόχρονου εντοπισμού και χαρτογράφησης (SLAM-Simultaneous Localization and Mapping), που αναπτύχθηκαν αρχικά στην ρομποτική.

Το SLAM αποτελεί αντικείμενο τεχνικής έρευνας για αρκετά χρόνια. Μέσα από την βελτίωση στην ταχύτητα επεξεργασίας που προσφέρουν οι υπολογιστές και την διάθεση αισθητήρων χαμηλού κόστους, όπως είναι οι κάμερες και οι συσκευές laser, το SLAM χρησιμοποιείται πλέον για πρακτικές εφαρμογές σε έναν συνεχώς αυξανόμενο αριθμό πεδίων.

Πλέον η τεχνολογία SLAM βρίσκει εφαρμογή τόσο σε επανδρωμένα, όσο και σε αυτόνομα οχήματα. Το SLAM δίνει τη δυνατότητα να φτάσει κανείς σε πολύπλοκους και κλειστούς χώρους, είτε σαρώνοντας με το χέρι είτε συνδέοντας έναν σαρωτή σε τρόλεϊ.

Ο ταυτόχρονος εντοπισμός και χαρτογράφηση είναι ένας ευρύς όρος για μια τεχνολογική διαδικασία, που αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1980, η οποία επέτρεψε στα ρομπότ να πλοηγούνται αυτόνομα σε νέα περιβάλλοντα χωρίς χάρτη. Βασική επιδίωξη ήταν η πλοήγηση των ρομπότ στον χώρο και η αποφυγή της σύγκρουσής τους με αντικείμενα και τοίχους (GIS Resources, 2020).

Στην συνέχεια η ιδέα αυτή αναπτύχθηκε αρχικά από τους Durrant-Whyte και Leonard (2006), οι οποίοι βασίστηκαν στις προηγούμενες εργασίες των Smith και Cheeseman (1985). Η τεχνολογία SLAM, επιδιώκει την επίλυση του προβλήματος του ταυτόχρονου εντοπισμού και χαρτογράφησης. Βασίζεται στην τοποθέτηση ενός σαρωτή σε μία άγνωστη θέση, σε ένα άγνωστο περιβάλλον και στην δημιουργία ενός χάρτη αυτού του περιβάλλοντος, ενώ ταυτόχρονα προσδιορίζεται η θέση του σαρωτή εντός αυτού του χάρτη. Η επίτευξη της ιδέας αυτής είναι αρκετά δύσκολη, διότι ο σαρωτής πρέπει να έχει έναν χάρτη του περιβάλλοντος για να εκτιμήσει τη δική του θέση, αλλά για να δημιουργήσει αυτόν τον χάρτη, πρέπει να γνωρίζει τη δική του θέση. Στον εντοπισμό ο σαρωτής έχει έναν χάρτη του περιβάλλοντος και πρέπει να απαντήσει στο ερώτημα σχετικά με το που βρίσκεται. Στην χαρτογράφηση ο σαρωτής γνωρίζει την ακριβή του θέση και πρέπει να απαντήσει στο ερώτημα σχετικά με το πως μοιάζει το περιβάλλον. Η μέθοδος του ταυτόχρονου εντοπισμού και χαρτογράφησης αποτελεί την πιο κοινή και επιτυχή προσέγγιση για την εκτέλεση απόλυτου εντοπισμού σε έναν άγνωστο περιβάλλοντα χώρο (Κόρδιτς, 2017).

3.2.1 Αρχή λειτουργίας τεχνολογίας SLAM

Προκειμένου να αντιληφθεί κανείς ευκολότερα την έννοια της τεχνολογίας SLAM, ας πάρει ως παράδειγμα μία οικιακή σκούπα ρομπότ. Χωρίς την τεχνική του ταυτόχρονου εντοπισμού και χαρτογράφησης, το ρομπότ θα κινείται τυχαία μέσα σε ένα δωμάτιο και ενδεχομένως να μην καταφέρει να καθαρίσει ολόκληρη την επιφάνεια του δαπέδου. Από την άλλη πλευρά, τα ρομπότ με την χρήση της τεχνικής του ταυτόχρονου εντοπισμού και χαρτογράφησης, μπορούν να χρησιμοποιήσουν πληροφορίες, όπως τον αριθμό των περιστροφών των τροχών και δεδομένα από κάμερες και άλλους αισθητήρες απεικόνισης, για να προσδιορίσουν την κίνηση που απαιτείται. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται εντοπισμός. Το ρομπότ μπορεί επίσης να χρησιμοποιήσει ταυτόχρονα την κάμερα και άλλους αισθητήρες για να δημιουργήσει έναν χάρτη με τα εμπόδια που υπάρχουν στο περιβάλλον του και να αποφύγει τον καθαρισμό της ίδιας περιοχής δύο φορές. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται χαρτογράφηση. Το SLAM είναι χρήσιμο και σε πολλές άλλες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα στην πλοήγηση ενός στόλου κινητών ρομπότ για την τακτοποίηση ραφιών σε μια αποθήκη, στην στάθμευση ενός αυτοκινούμενου οχήματος σε ένα κενό σημείο ή στην παράδοση ενός πακέτου πλοηγώντας ένα drone σε ένα άγνωστο περιβάλλον (MathWorks, n.d.).

3.2.2 Τα είδη των αισθητήρων της τεχνολογίας SLAM

Ένας σαρωτής SLAM, αποτελείται από αισθητήρες μέτρησης των χαρακτηριστικών σημείων του περιβάλλοντος, οι οποίοι μπορεί να είναι κάμερες ή αισθητήρες μέτρησης εύρους και φωτός LiDAR. Ακόμη ένας σαρωτής SLAM χρησιμοποιεί ως αισθητήρα μία αδρανειακή μονάδα μέτρησης, για την μέτρηση κάθε σχετικής πόζας (θέση και προσανατολισμός), κατά την κίνησή του κατά μήκος της τροχιάς, με την πάροδο του χρόνου. Δηλαδή μετράει το πόσο μακριά έχει μετακινηθεί ο σαρωτής σε σχέση με την προηγούμενη πόζα του. Τέλος ένας σαρωτής SLAM μπορεί να χρησιμοποιεί μία κάμερα RGB για την λήψη έγχρωμων δεδομένων. Σε κάθε πόζα, οι μετρήσεις των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για την συλλογή των χαρακτηριστικών σημείων συνδέονται με τις μετρήσεις που παρέχει η αδρανειακή μονάδα μέτρησης. Διαφορετικά εάν δεν υπάρχουν μετρήσεις που αναφέρονται στο περιβάλλον, δεν είναι εφικτή η σωστή διόρθωση της σχετικής πόζας κάθε χρονική στιγμή και κατά συνέπεια η ευθυγράμμιση των δεδομένων με αλληλουχία.

Οι οπτικοί αισθητήρες αναφέρονται σε συστήματα απεικόνισης (κάμερες), που χρησιμοποιούνται για την συλλογή δεδομένων, λόγω του χαμηλού τους κόστους και της ικανότητάς τους να παρέχουν πληροφορίες υψής με υψηλή ανάλυση. Αναλυτικότερα χρησιμοποιούνται μονόφθαλμες κάμερες, στερεοφωνικές κάμερες, κάμερες RGB-D, κ.λπ. Οι μονόφθαλμες κάμερες (χαμηλού κόστους κάμερες), παρέχουν μία σειρά μεμονωμένων εικόνων RGB, χωρίς πρόσθετες πληροφορίες βάθους. Συνεπώς οι αλγόριθμοι και το λογισμικό που απαιτούνται για το μονόφθαλμο SLAM είναι πολύ πιο περίπλοκα λόγω της έλλειψης άμεσων πληροφοριών βάθους από μια διδιάστατη εικόνα. Ωστόσο υπάρχουν τρόποι για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος. Οι στερεοφωνικές κάμερες αποτελούνται από δύο κάμερες που χωρίζονται από μία σταθερή απόσταση. Οι παρατηρήσεις της θέσης του ίδιου τρισδιάστατου σημείου και στις δύο κάμερες επιτρέπουν τον υπολογισμό του βάθους μέσω τριγωνισμού. Τα περισσότερα από τα συστήματα SLAM αναπτύσσουν κάμερες RGB-D που παρέχουν ταυτόχρονα RGB εικόνες και πληροφορίες βάθους, μέσω της αρχής δομημένου φωτός. Κατά την αρχή του δομημένου φωτός, η κάμερα προβάλλει ένα γνωστό μοτίβο σε αντικείμενα και αντιλαμβάνεται την παραμόρφωση του σχεδίου από μια κάμερα υπερύθρων, για να υπολογίσει το βάθος και τις πληροφορίες επιφάνειας των αντικειμένων. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούν την αρχή του δομημένου φωτός, είναι ευαίσθητοι στον φωτισμό. Αυτό περιορίζει την εφαρμογή τους στο άμεσο ηλιακό φως, συνεπώς χρησιμοποιούνται κυρίως σε εσωτερικούς χώρους. Εκτός από αυτό, δεν παρέχουν αξιόπιστα δεδομένα εμβέλειας για ημιδιαφανείς ή εξαιρετικά ανακλαστικές επιφάνειες και έχουν επίσης περιορισμένη αποτελεσματική εμβέλεια. Δεδομένου ότι οι κάμερες παρέχουν μεγάλο όγκο πληροφοριών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό ορόσημων (προηγουμένως μετρημένες θέσεις). Η ανίχνευση ορόσημων μπορεί επίσης να συνδυαστεί με βελτιστοποίηση βάσει γραφημάτων, επιτυγχάνοντας την ευελιξία στην υλοποίηση SLAM.

Οι αισθητήρες ανίχνευσης εύρους και φωτός, στέλνουν παλμούς φωτός laser και μετρούν την ακριβή απόσταση του αντικειμένου ή του χαρακτηριστικού. Ο υψηλός ρυθμός λήψης δεδομένων με μεγαλύτερη ακρίβεια, επιτρέπει στους αισθητήρες LiDAR να χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλής ταχύτητας, όπως αυτοοδηγούμενα

αυτοκίνητα και drones. Τα δεδομένα εξόδου από τους αισθητήρες laser, είναι ένα δισδιάστατο (x,y) ή τρισδιάστατο (x,y,z) νέφος σημείων. Το νέφος σημείων ενός αισθητήρα laser παρέχει μετρήσεις απόστασης υψηλής ακρίβειας και λειτουργεί πολύ αποτελεσματικά για την κατασκευή χαρτών με SLAM. Γενικά, η κίνηση υπολογίζεται διαδοχικά, ταιριάζοντας τα νέφη των σημείων. Η κίνηση που υπολογίζεται (διανυθείσα απόσταση) χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό του οχήματος. Για την αντιστοίχιση των νεφών σημείων LiDAR, χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι καταχώρισης, όπως επαναληπτικοί αλγόριθμοι μετασχηματισμού πλησιέστερου σημείου (ICP) και κανονικής κατανομής (NDT). Οι δισδιάστατοι ή τρισδιάστατοι χάρτες των νεφών σημείων, μπορούν να αναπαρασταθούν ως χάρτης πλέγματος ή χάρτης voxel. Από την άλλη πλευρά, τα νέφη σημείων που προκύπτουν με την χρήση αισθητήρων που βασίζονται σε LiDAR, δεν είναι τόσο λεπτομερή όσο οι εικόνες, όσον αφορά την πυκνότητα και δεν παρέχουν πάντα επαρκή χαρακτηριστικά για αντιστοίχιση. Για παράδειγμα, σε μέρη όπου υπάρχουν λίγα χαρακτηριστικά, είναι δύσκολο να ευθυγραμμιστούν τα νέφη σημείων και αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα να χαθεί το ίχνος της θέσης του οχήματος. Επιπλέον, η αντιστοίχιση του νέφους σημείων απαιτεί γενικά υψηλή επεξεργαστική ισχύ, επομένως είναι απαραίτητο να βελτιστοποιηθούν οι διαδικασίες για να βελτιωθεί η ταχύτητα. Λόγω αυτών των προκλήσεων, ο εντοπισμός για αυτόνομα οχήματα μπορεί να περιλαμβάνει τη συγχώνευση άλλων αποτελεσμάτων μέτρησης, όπως είναι η οδομετρία των τροχών, το παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα πλοήγησης (GNSS) και τα δεδομένα της αδρανειακής μονάδας μέτρησης IMU ([MathWorks, n.d.](#)).

Γίνεται αντιληπτό, πως υπάρχουν διαφορετικοί αισθητήρες SLAM, καθένας από τους οποίους εμφανίζει μοναδικά πλεονεκτήματα και ορισμένους περιορισμούς. Οι αισθητήρες LiDAR δεν παρέχουν τόσες πλούσιες οπτικές πληροφορίες όπως αυτές που παράγονται από τις κάμερες. Είναι πιο ογκώδεις και πιο ακριβοί σε σύγκριση με τις κάμερες, αλλά δίνουν καλύτερη ακρίβεια. Αντιθέτως οι κάμερες έχουν χαμηλό κόστος, μικρό μέγεθος και μικρό βάρος σε σχέση με τους αισθητήρες LiDAR. Αν και η ακρίβεια μέτρησης ενός σημείου με κάμερα είναι χαμηλότερη από αυτή του LiDAR, αυτή μπορεί να δημιουργήσει πιο πυκνούς χάρτες νεφών σημείων. Οι αισθητήρες LiDAR είναι ευαίσθητοι στις αντανάκλασεις και στην βροχή. Απ' την άλλη πλευρά οι κάμερες αντιμετωπίζουν προβλήματα σε περιβάλλοντα με κακές συνθήκες φωτισμού (σκοτεινά περιβάλλοντα) ή σε περιβάλλοντα με αραιή υφή.

Όταν ο σαρωτής εκκινείται, η τεχνολογία SLAM συγχωνεύει δεδομένα από τους ενσωματωμένους αισθητήρες του και στη συνέχεια τα επεξεργάζεται χρησιμοποιώντας αλγόριθμους όρασης υπολογιστή για να «αναγνωρίσει» χαρακτηριστικά στον περιβάλλοντα χώρο. Ωστόσο οι μετρήσεις των ενσωματωμένων αισθητήρων περιέχουν σφάλματα, τα οποία συσσωρεύονται προκαλώντας εκτεταμένη μετατόπιση. Γι' αυτό τον λόγο, είναι αδύνατο να βασίζεται κανείς αποκλειστικά σε αυτούς τους αισθητήρες. Οι πληροφορίες από άλλους αισθητήρες, όπως το LiDAR, χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση της θέσης που δίνει η αδρανειακή μονάδα μέτρησης IMU. Η θέση των χαρακτηριστικών μετρείται με την βοήθεια του LiDAR. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στο SLAM να δημιουργήσει έναν πρόχειρο χάρτη, καθώς και να κάνει μια αρχική εκτίμηση της θέσης του σαρωτή. Στην συνέχεια, μέσω της αλλαγής της θέσης λόγω της ανθρώπινης κίνησης, ο σαρωτής συλλέγει νέα δεδομένα από τους ενσωματωμένους αισθητήρες

αδρανειακής πλοήγησης και κάνει μια νέα, βελτιωμένη εκτίμηση θέσης. Μόλις γίνει γνωστή αυτή η νέα εκτίμηση θέσης, ο χάρτης ενημερώνεται με τη σειρά του, ενώ παράλληλα παρακολουθείται και η διαδρομή του σαρωτή. Σε κάθε περίπτωση ο αλγόριθμος ταιριάζει τα νέα χαρακτηριστικά με τα χαρακτηριστικά που παρατηρήθηκαν από προηγούμενες θέσεις, αξιοποιώντας την συσχέτιση τους για τη διόρθωση της νέας θέσης. Τα χαρακτηριστικά που δεν είχαν εντοπιστεί στην προηγούμενη φάση προστίθενται ως νέες παρατηρήσεις και μπορούν να παρατηρηθούν ξανά αργότερα. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται σε κάθε νέα αλλαγή της θέσης του σαρωτή. Ο αλγόριθμος SLAM χρησιμοποιεί μια επαναληπτική διαδικασία για τη βελτίωση της εκτιμώμενης θέσης με τις νέες πληροφορίες θέσης. Όσες περισσότερες φορές πραγματοποιείται η επαναληπτική διαδικασία, τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια χαρακτηρίζει την θέση του εκάστοτε σημείου. Αυτό μπορεί να ακούγεται εύκολο, αλλά απαιτεί τεράστιους μαθηματικούς υπολογισμούς και επεξεργασία, για να συγχωνευτούν τα δεδομένα από τους διαφορετικούς αισθητήρες (κάμερα, LiDAR και IMU) και να τοποθετηθούν σε έναν χάρτη με πληροφορίες θέσης (GIS Resources, 2020).

Επίσης, πρόσθετες αισθητήριες πηγές χρησιμοποιούνται για την καλύτερη αντίληψη της θέσης και κίνησης του ρομπότ, όπως οι πυξίδες, η τεχνολογία υπερύθρων και το παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης (GPS). Μαζί αυτοί οι αισθητήρες συλλέγουν δεδομένα και δημιουργούν μια εικόνα του περιβάλλοντος χώρου. Ωστόσο, η χρήση όλων αυτών των αισθητήρων επιφέρει σφάλματα, τα οποία συχνά αναφέρονται ως θόρυβος των μετρήσεων.

3.2.3 Διαδικασίες front-end και back-end

Υπάρχουν αρκετές προσεγγίσεις επίλυσης του προβλήματος του ταυτόχρονου εντοπισμού και χαρτογράφησης. Μία προσέγγιση που χρησιμοποιείται συχνότερα, βασίζεται στην βελτιστοποίηση μέσα από την κατασκευή ενός γραφήματος (graph-based SLAM), που παρουσιάζει τις μετρήσεις του σαρωτή. Οι κόμβοι του γραφήματος αναπαριστούν την θέση και τον προσανατολισμό (πόζα) του σαρωτή, τα τετράγωνα αποτελούν τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος, ενώ οι ακμές είναι τα αποτελέσματα της συσχέτισης των δεδομένων από παρατηρήσεις που αναφέρονται ως περιορισμοί. Αυτοί οι περιορισμοί αντιπροσωπεύουν την απόσταση μεταξύ γειτονικών θέσεων, καθώς και την απόσταση μεταξύ των θέσεων αυτών και των ορόσημων (Εικόνα 3.1). Ένας περιορισμός συνήθως αποτελείται από σχετικούς μετασχηματισμούς ανάμεσα σε δύο πόζες. Αυτοί οι μετασχηματισμοί είναι είτε μετρήσεις οδομετρίας μεταξύ διαδοχικών θέσεων του σαρωτή, ή καθορίζονται με την ευθυγράμμιση των παρατηρήσεων που αποκτώνται από διαδοχικές θέσεις του σαρωτή. Όταν κατασκευαστεί το γράφημα, η διαδικασία βελτιστοποίησης ξεκινάει να βρίσκει την διαμόρφωση της καθεμιάς πόζας του σαρωτή, που ικανοποιεί καλύτερα τους περιορισμούς. Συνεπώς η προσέγγιση αυτή περιλαμβάνει δύο βασικές διαδικασίες:

1. Την κατασκευή του γραφήματος από τις ακατέργαστες μετρήσεις των αισθητήρων (front-end)

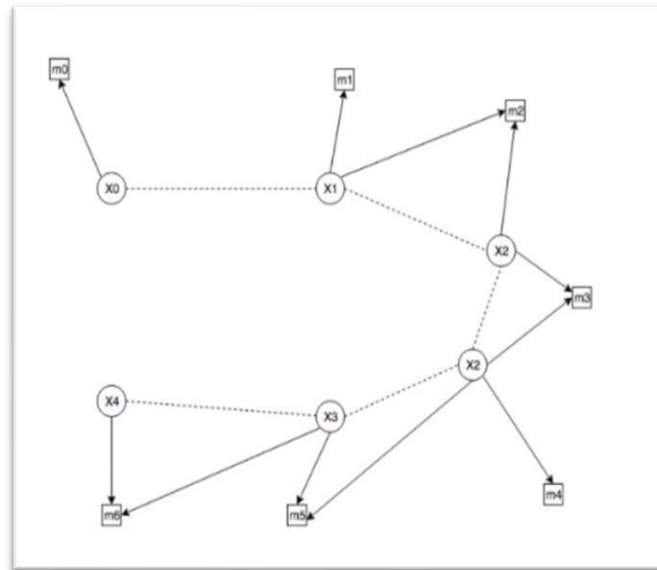
2. Την βελτιστοποίηση του γραφήματος, που προσδιορίζει την πιθανότερη διαμόρφωση της καθεμιάς πόζας, όταν δίνονται οι ακμές του γραφήματος (back-end) (Εικόνα 3.2)

Κατά την διαδικασία front-end, το γράφημα κατασκευάζεται, καθώς ο αισθητήρας μετακινείται, ανακαλύπτοντας νέες περιοχές και νέες πόζες προστίθενται στο γράφημα. Όταν προστίθενται μία νέα πόζα, απαιτείται η ευθυγράμμιση των δεδομένων. Μικρά λάθη στην διαδικασία αυτή συσσωρεύονται, με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός λανθασμένου χάρτη. Τα λάθη αυτά είναι εμφανή μέσα από την επαναπροβολή ενός μέρους για δεύτερη φορά στον χάρτη. Γι' αυτό χρειάζεται η διαδικασία back-end, η οποία προσαρμόζει το συσσωρευμένο σφάλμα και ευθυγραμμίζει τα δεδομένα με αλληλουχία. Η ευθυγράμμιση των διαφορετικών καρέ δεδομένων γίνεται συνήθως με την εκτίμηση ενός κατά προσέγγιση μετασχηματισμού μεταξύ αυτών και έπειτα με την βελτιστοποίηση αυτής της αρχικής εκτίμησης. Προκειμένου να πραγματοποιηθούν τα προαναφερθέντα, χρειάζεται πρώτα να γίνει η συσχέτιση των δεδομένων (data association), μέσα από την αντιστοίχιση των χαρακτηριστικών σημείων (feature match) που παρατηρούνται. Κατά την διαδικασία αυτή ο αισθητήρας παίρνει τα κοινά χαρακτηριστικά σημεία (π.χ. γωνιακά σημεία) που έχει αναγνωρίσει μεταξύ δύο καρέ, βλέπει το πως αυτά έχουν μετακινηθεί και κατά συνέπεια εκτιμάει το πόσο έχει μετακινηθεί ο ίδιος από το ένα καρέ στο άλλο. Με λίγα λόγια προσδιορίζει χαρακτηριστικά σημεία και καθορίζει την θέση του σε σχέση με αυτά (pose estimation). Η συνένωση μεταξύ διαδοχικών νεφών παράγει ικανοποιητικά αποτελέσματα αλλά μόνο για μικρές ή μεσαίες αποστάσεις, καθώς λάθη στην κατά ζεύγη ευθυγράμμιση των νεφών προκαλούν την εκτιμώμενη πόζα να παρασύρεται με την πάροδο του χρόνου με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός λανθασμένου χάρτη (Εικόνα 3.3). Αυτό είναι προφανές όταν χαρτογραφηθεί ένα μακρύ μονοπάτι, επιστρέφοντας σε μια θέση που έχει επισκεφθεί προηγουμένως ο σαρωτής. Το αθροιστικό σφάλμα στη στοίχιση των νεφών, οδηγεί σε έναν χάρτη που έχει δύο αναπαραστάσεις της ίδιας περιοχής σε διαφορετικές θέσεις στον χώρο (Εικόνα 3.4). Αυτό είναι γνωστό ως πρόβλημα κλεισίματος βρόχου. Το κλείσιμο βρόχου ουσιαστικά αναφέρεται στο πέρασμα του σαρωτή από περιοχές που έχει ήδη επισκεφθεί προηγουμένως. Μόλις εντοπιστεί ένας βρόγχος, η νέα αντιστοιχία μεταξύ των κόμβων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρόσθετος περιορισμός στη γραφική παράσταση. Ο περιορισμός αυτός αναφέρεται στην εύρεση της σωστής σχετικής θέσης ανάμεσα σε δύο πόζες, βάσει των κοινών περιοχών που έχουν παρατηρηθεί από καθεμιά από αυτή.

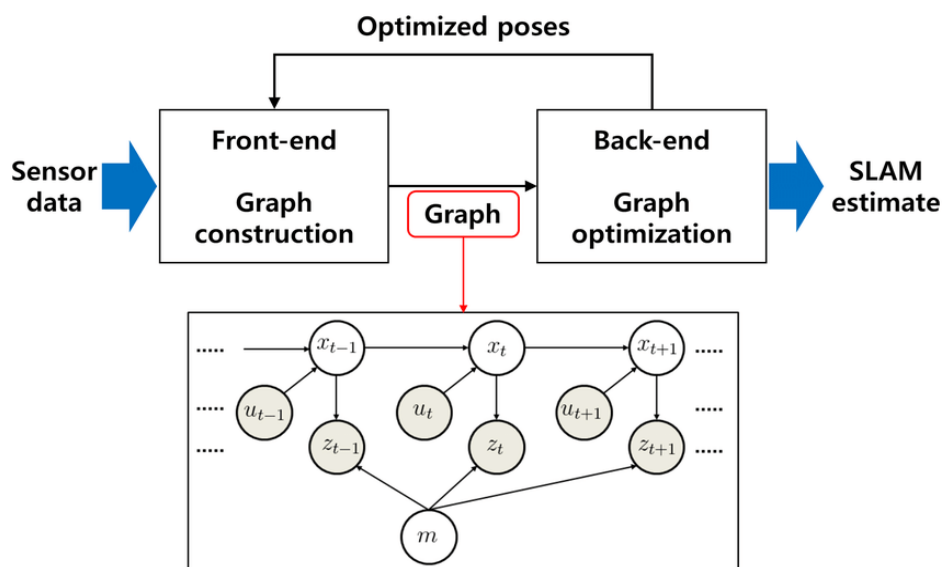
Ο ρόλος του back-end του SLAM είναι να βελτιστοποιήσει τον χάρτη, μειώνοντας το σφάλμα, μέσα από την βελτιστοποίηση της υποκείμενης δομής του γραφήματος που παρέχεται από το μπροστινό μέρος. Αυτό το γράφημα αποτελείται από έναν αριθμό κόμβων που περιλαμβάνει τις μετρήσεις σε συγκεκριμένες θέσεις και ακμές που αντιπροσωπεύουν τους περιορισμούς μεταξύ αυτών των θέσεων. Οι τεχνικές της ολικής βελτιστοποίησης προσπαθούν να εκτιμήσουν βέλτιστα όλες τις στάσεις για την κατασκευή ενός ορθού χάρτη του περιβάλλοντος (Εικόνα 3.5). Η ολική βελτιστοποίηση μπορεί να θεωρηθεί η επιλογή της καλύτερης λύσης, που ελαχιστοποιεί μια συνάρτηση σφάλματος από όλες τις εφικτές λύσεις (Doaa et al., 2014). Μοιάζει με την διαδικασία

συνόρθωσης που πραγματοποιείται σε μία όδευση, με την εύρεση του σφάλματος συσσώρευσης και το μοίρασμά του σε όλες τις κορυφές της.

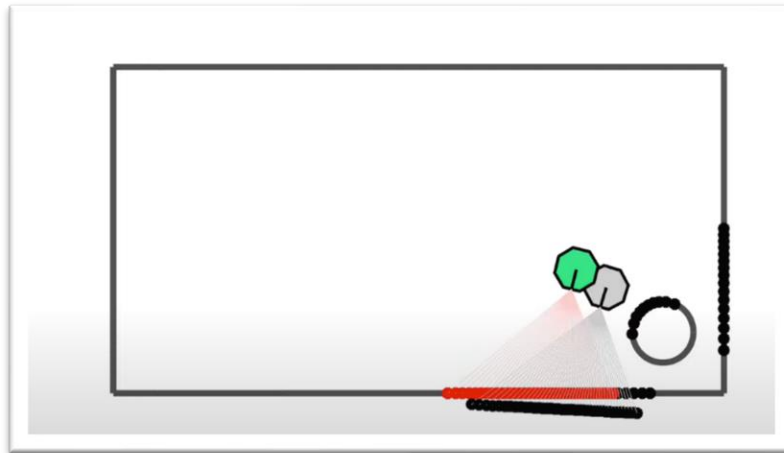
Οι διαδικασίες front-end και back-end, αποτελούν επαναληπτικές διαδικασίες, καθώς με την κίνηση του σαρωτή προστίθενται νέες θέσεις και περιορισμοί και εκτιμώνται βέλτιστα όλες οι θέσεις για την κατασκευή ενός ορθού χάρτη του περιβάλλοντος. Η επαναληπτική αυτή διαδικασία μοιάζει με την δημιουργία δευτερευουσών οδεύσεων μέσα σε μία κύρια όδευση (Εικόνα 3.6).



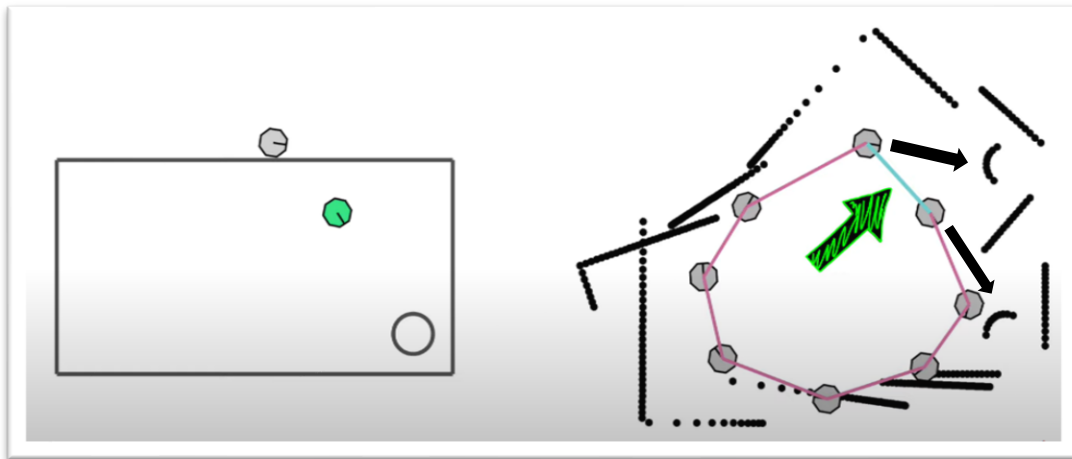
Εικόνα 3.1: Πόζες σαρωτή και περιορισμοί (Μπότης, 2019)



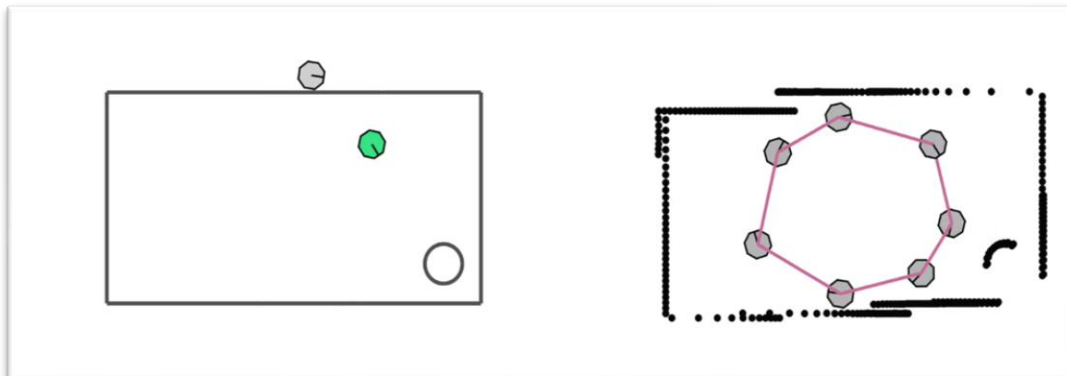
Εικόνα 3.2: Διαδικασίες front-end και back-end (Jang & Kim, 2021)



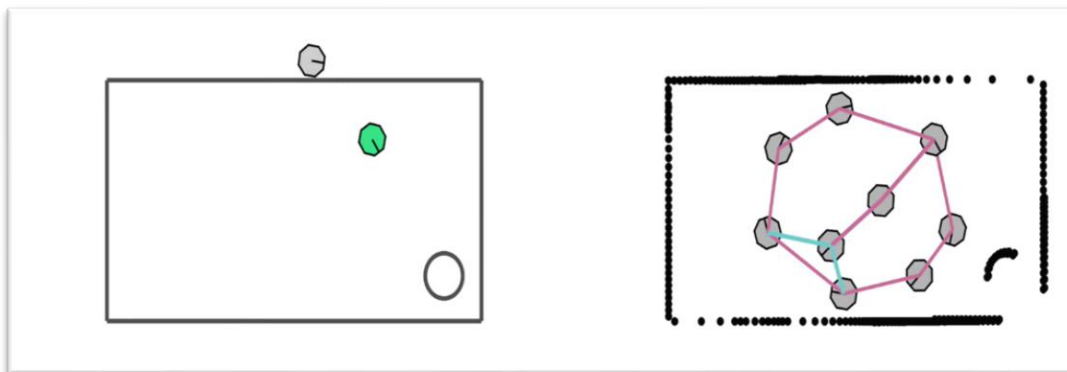
Εικόνα 3.3: Μετατόπιση του σαρωτή από την πραγματική τροχιά, με αποτέλεσμα την κατασκευή ενός λανθασμένου χάρτη (Matlab, 2020)



Εικόνα 3.4: Το αθροιστικό σφάλμα, που έχει ως αποτέλεσμα την αναπαράσταση της ίδιας περιοχής σε διαφορετικές θέσεις στον χώρο (Matlab, 2020)



Εικόνα 3.5: Ολική βελτιστοποίηση (Matlab, 2020)



Εικόνα 3.6: Επαναληπτικές διαδικασίες front-end και back-end (Matlab, 2020)

3.2.4 Σφάλματα τεχνολογίας SLAM

Προκειμένου να κατανοήσει κανείς την ακρίβεια μιας συσκευής SLAM, πρέπει αρχικά να αντιληφθεί μια βασική διαφορά στον τρόπο με τον οποίο τα συστήματα χαρτογράφησης καταγράφουν δεδομένα.

Ένας επίγειος στατικός σαρωτής laser, αποτυπώνει ένα περιβάλλον περιστρέφοντας έναν αισθητήρα laser σε 360° και λαμβάνοντας μετρήσεις αυτού του περιβάλλοντος. Εφόσον η σκόπευση πραγματοποιείται από ένα σταθερό σημείο, κάθε μέτρηση που καταγράφεται στο νέφος σημείων είναι ήδη ευθυγραμμισμένη με ακρίβεια στον χώρο σε σχέση με τον σαρωτή.

Αντιθέτως ένα κινητό σύστημα χαρτογράφησης ναι μεν περιστρέφει έναν αισθητήρα laser σε 360° , αλλά όχι από μια σταθερή θέση σκόπευσης. Εφόσον η σάρωση πραγματοποιείται εν κινήσει, μετακινείται και ο αισθητήρας ενώ περιστρέφεται. Αυτό προκαλεί σφάλματα ευθυγράμμισης για κάθε μέτρηση και υποβαθμίζει την ακρίβεια του τελικού νέφους σημείων.

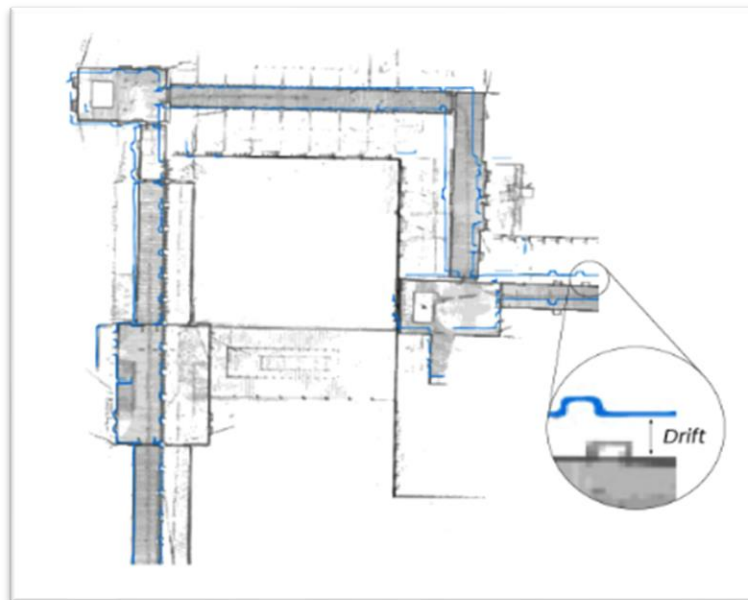
Ένα παρόμοιο φαινόμενο βιώνει κανείς εάν προσπαθήσει να πραγματοποιήσει λήψη μιας φωτογραφίας τη νύχτα και μετακινήσει την κάμερα. Τότε θα παρατηρήσει ότι δημιουργείται μία θόλωση στην εικόνα. Ομοίως, αν κοιτάξει κανείς τα ακατέργαστα δεδομένα από ένα κινητό σύστημα χαρτογράφησης, προτού καθαριστούν από έναν αλγόριθμο SLAM, αντιλαμβάνεται ότι τα σημεία φαίνονται ακατάστατα και απλωμένα στον χώρο.

Ένα κινητό σύστημα χαρτογράφησης μπορεί να διορθώσει τα σφάλματα ευθυγράμμισης και να παράγει ένα καθαρό και ακριβές νέφος σημείων. Για να γίνει αυτό, χρησιμοποιεί την τροχιά που καταγράφεται από τον αλγόριθμο SLAM. Αυτά τα δεδομένα του επιτρέπουν να προσδιορίσει τη θέση του σαρωτή τη στιγμή που καταγράφηκε κάθε μέτρηση και να ευθυγραμμίσει αυτά τα σημεία με ακρίβεια στο χώρο.

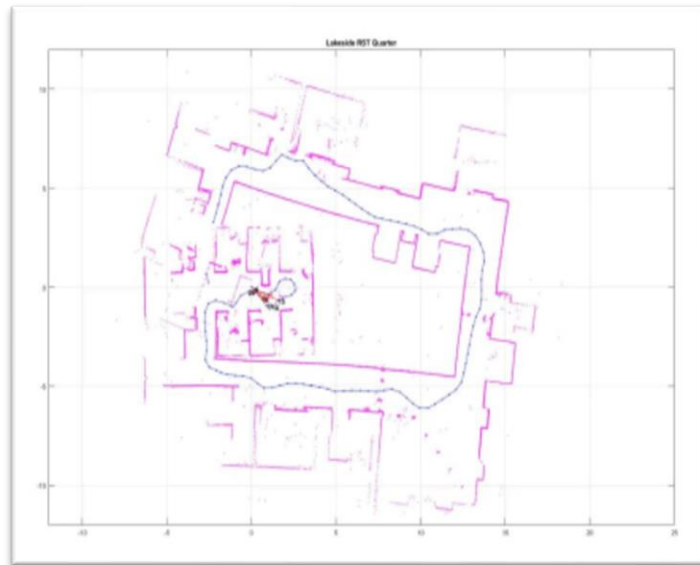
Αυτό σημαίνει ότι η ακρίβεια ενός κινητού συστήματος χαρτογράφησης που λειτουργεί με την τεχνολογία SLAM εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, πέρα από την ακρίβεια του ίδιου του αισθητήρα. Για παράδειγμα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πόσο καλά ο αλγόριθμος SLAM παρακολουθεί την πορεία του (Higgins, 2020). Αναλυτικότερα τα σφάλματα που εντοπίζονται στην τεχνολογία SLAM είναι τα εξής:

1. Σφάλμα μετατόπισης

Ο αλγόριθμος SLAM χρησιμοποιεί τα δεδομένα αισθητήρων για να υπολογίσει τη θέση του συστήματος και όλοι οι αισθητήρες παράγουν σφάλματα κατά την μέτρηση. Για παράδειγμα οι κάμερες και τα LiDAR παράγουν σφάλματα κατά την μέτρηση των σημείων του περιβάλλοντος, ενώ η αδρανειακή μονάδα μέτρησης αποτελείται από επιταχυνσιόμετρο και από γυροσκόπιο, που επίσης παράγουν θόρυβο. Λόγω του τρόπου με τον οποίο λειτουργούν οι αλγόριθμοι SLAM, υπολογίζοντας κάθε θέση με βάση προηγούμενες θέσεις, τα σφάλματα του αισθητήρα συσσωρεύονται κατά την διάρκεια της σάρωσης. Αυτό προκαλεί την αλλοίωση της ακρίβειας της τροχιάς (απόκλιση από τις πραγματικές τιμές) (Εικόνα 3.7) και την υποβάθμιση της ποιότητας των τελικών αποτελεσμάτων (παραμόρφωση των δεδομένων του χάρτη), καθώς το σημείο αρχής και τέλος του σαρωτή δεν συμπίπτουν. Αυτό είναι γνωστό ως πρόβλημα κλεισίματος βρόγχου (Εικόνα 3.8).

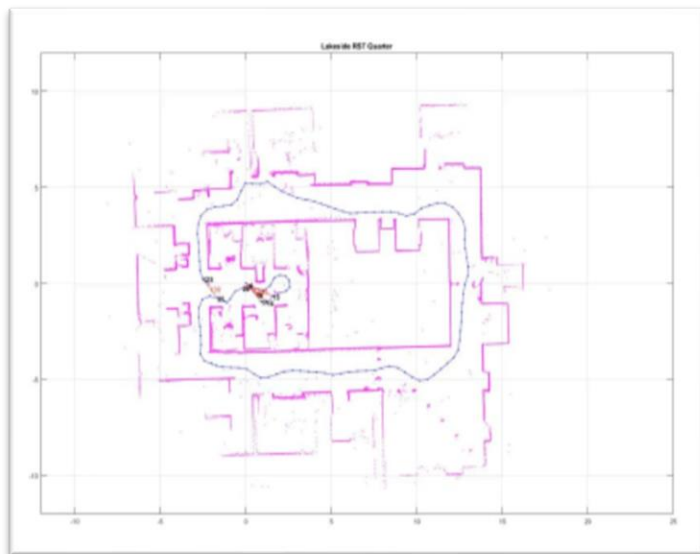


Εικόνα 3.7: Η επίδραση του σφάλματος μετατόπισης και η απόκλιση από την πραγματικότητα, κατά την σάρωση ενός επιμήκη διαδρόμου (Higgins, 2020)



Εικόνα 3.8: Πρόβλημα στο κλείσιμο βρόγχου (MathWorks, n.d.)

Η πιο συνήθης διαδικασία για τη διόρθωση των σφαλμάτων ονομάζεται κλείσιμο βρόγχου. Για την εκτέλεση ενός κλεισίματος βρόγχου, πραγματοποιείται η αναγνώριση ορισμένων χαρακτηριστικών από ένα μέρος που έχει επισκεφθεί ο σαρωτής προηγουμένως ως ορόσημα και η ελαχιστοποίηση του σφάλματος εντοπισμού. Αυτό δίνει στον σαρωτή όλες τις πληροφορίες που χρειάζεται για να υπολογίσει τυχόν σφάλματα μετατόπισης ή παρακολούθησης θέσης που έχουν προκύψει, προκειμένου να κάνει τις απαραίτητες διορθώσεις. Επιλύοντας την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων ως πρόβλημα βελτιστοποίησης, μπορούν να δημιουργηθούν πιο ακριβή δεδομένα χάρτη (Εικόνα 3.9).



Εικόνα 3.9: Ελαχιστοποίηση του σφάλματος εντοπισμού και δημιουργία ακριβών δεδομένων χάρτη (MathWorks, n.d.)

Αν και το κλείσιμο ενός βρόγχου είναι αποτελεσματικό σε κάποιους χώρους, ορισμένα περιβάλλοντα (όπως για παράδειγμα οι επιμήκεις διάδρομοι) μπορεί να καταστήσουν δύσκολη την εφαρμογή του. Γι' αυτές τις περιπτώσεις, τα πιο προηγμένα συστήματα χαρτογράφησης προσφέρουν μια δυνατότητα κλειδώματος των δεδομένων σάρωσης με την χρήση σημείων ελέγχου. Αυτή η διαδικασία είναι απλή και αναφέρεται στην τοποθέτηση τοπογραφικών σημείων ελέγχου (στόχοι σκακιέρας), σε όλο τον χώρο που πρέπει να καταγραφεί. Στην συνέχεια, καταγράφονται οι συντεταγμένες των σημείων αυτών, χρησιμοποιώντας ένα σύστημα με υψηλότερο επίπεδο ακρίβειας από το κινητό σύστημα χαρτογράφησης, όπως για παράδειγμα έναν ολοκληρωμένο γεωδαιτικό σταθμό. Κατά την σάρωση του χώρου, καταγράφονται και τα σημεία ελέγχου. Το κινητό σύστημα χαρτογράφησης θα χρησιμοποιήσει αυτές τις πληροφορίες για να τοποθετήσει το κινητό νέφος σημείων στη θέση του, να μειώσει τα σφάλματα και να παράγει υψηλή ακρίβεια ακόμη και στα πιο δύσκολα περιβάλλοντα. Όταν η ακρίβεια είναι υψίστης σημασίας, η μέθοδος αυτή είναι η καταλληλότερη.

2. Σφάλμα παρακολούθησης θέσης

Οι αλγόριθμοι SLAM αντιμετωπίζουν προβλήματα σε ορισμένα περιβάλλοντα. Για παράδειγμα ένα ομοιόμορφο περιβάλλον, συνήθως στερείται των γεωμετρικών χαρακτηριστικών στα οποία βασίζεται η τεχνολογία SLAM, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει στο σύστημα την απώλεια της θέσης του.

Ακόμη, η χαρτογράφηση μιας εικόνας και ενός νέφους σημείων δεν λαμβάνει υπόψη τα χαρακτηριστικά της κίνησης ενός σαρωτή. Σε ορισμένες περιπτώσεις, αυτή η προσέγγιση μπορεί να δημιουργήσει ασυνεχείς εκτιμήσεις θέσης. Αυτό το είδος αποτυχίας εντοπισμού μπορεί να αποφευχθεί, είτε χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο ανάκτησης, είτε συγχωνεύοντας το μοντέλο κίνησης με πολλούς αισθητήρες, για να γίνουν οι υπολογισμοί με βάση τα δεδομένα του αισθητήρα.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για τη χρήση ενός μοντέλου κίνησης με συγχώνευση πληροφοριών αισθητήρα. Μια κοινή μέθοδος είναι η χρήση του φίλτρου Kalman για τον εντοπισμό της θέσης. Ακόμη χρησιμοποιούνται συχνά εκτεταμένα φίλτρα Kalman και φίλτρα σωματιδίων (εντοπισμός Monte Carlo). Μερικοί αισθητήρες που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι συσκευές αδρανειακής μέτρησης όπως IMU, συστήματα αδρανειακής μέτρησης INS, επιταχυνσιόμετρα, γυροσκόπια και μαγνητικοί αισθητήρες. Οι αισθητήρες τροχών που είναι προσαρτημένοι στο όχημα χρησιμοποιούνται συχνά για οδομετρία ([MathWorks, n.d.](#)).

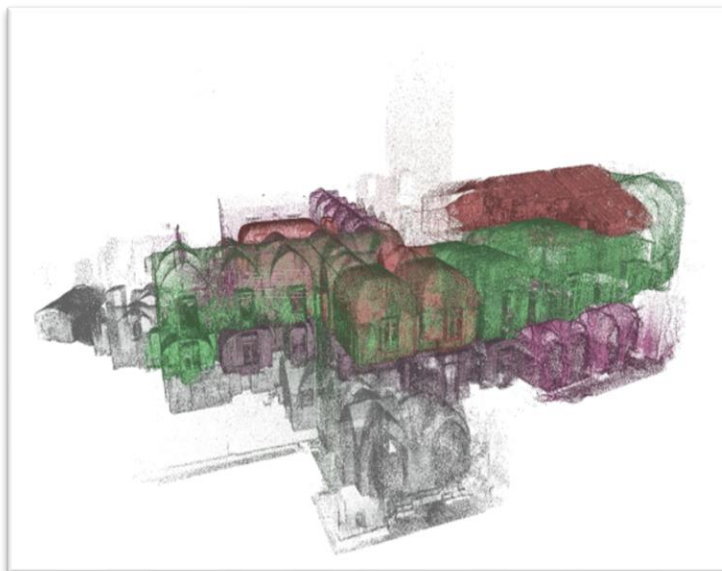
Το σφάλμα παρακολούθησης θέσης μπορεί να διορθωθεί με το κλείσιμο βρόγχου, ή με την χρήση σημείων ελέγχου, όπως αυτά έχουν προαναφερθεί και για το σφάλμα μετατόπισης.

Σε αυτό το σημείο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι κάθε κατασκευαστής ενός κινητού συστήματος χαρτογράφησης, χρησιμοποιεί έναν δικό του αλγόριθμο. Αυτοί οι αλγόριθμοι μπορούν να φαίνονται παρόμοιοι, αλλά οι μικρές διαφορές μεταξύ τους μπορούν να σημαίνουν σημαντική διαφορά στην τελική ποιότητα των δεδομένων. Γι' αυτό οι πιο σημαντικοί παράγοντες για την επιλογή ενός τέτοιου συστήματος με στόχο την εξασφάλιση αποτελεσμάτων υψηλής ποιότητας, είναι η έρευνα των διαφόρων εν κινήσει συστημάτων χαρτογράφησης και η εύρεση των λεπτομερειών σχετικά με την τεχνολογία SLAM που χρησιμοποιεί καθένα από αυτά. Συγκεκριμένα, πρέπει να μελετάται ποιες μεθόδους υποστηρίζει ο αλγόριθμος SLAM για τη διόρθωση σφαλμάτων, αν μπορεί να χρησιμοποιήσει σημεία κλεισίματος και ελέγχου βρόχου, πόσο καλά λειτουργούν αυτές οι μέθοδοι στα περιβάλλοντα που πρόκειται να αποτυπωθούν, πόσο καλά αποδίδει ο αλγόριθμος SLAM σε δύσκολες καταστάσεις, τι ακρίβεια μπορεί να επιτύχει σε επιμήκεις διαδρόμους ή σε μεγάλους, ανοιχτούς χώρους και πώς χειρίζεται τις επιφάνειες υψηλής και χαμηλής ανακλαστικότητας ή ακόμη και κινούμενα αντικείμενα. Όλες αυτές οι παράμετροι καθορίζουν την αναμενόμενη ακρίβεια του συστήματος και βοηθούν στην επιλογή του κατάλληλου συστήματος κινητής χαρτογράφησης για την εκάστοτε εφαρμογή (Higgins, 2020).

3.2.5 Εφαρμογές της τεχνολογίας SLAM στην τεκμηρίωση της πολιτιστικής κληρονομιάς

Το πρώτο παράδειγμα που αφορά την ψηφιακή τεκμηρίωση της πολιτιστικής κληρονομιάς, συνδυάζει ένα επίγειο στατικό σύστημα σάρωσης με laser κι ένα φορητό σύστημα σάρωσης που βασίζεται στην τεχνολογία SLAM, προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η ακρίβεια της λύσης του τελευταίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εργασία που εκπονήθηκε αξιολογεί παράλληλα την καταλληλότητα ενός φορητού συστήματος χαρτογράφησης για την ψηφιοποίηση ενός σύνθετου εσωτερικού περιβάλλοντος, που ανήκει σε ένα κτίριο πολιτιστικής κληρονομιάς, καθώς και για την παραγωγή των χαρτογραφικών προϊόντων που απαιτούνται, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η συντήρηση και η αποκατάστασή του. Ακόμη, η μελέτη επικεντρώθηκε στο να επαληθεύσει εάν κατά μήκος της διαδρομής απόκτησης των δεδομένων, έχουν προκύψει σφάλματα μετατόπισης που απορρέουν από την τεχνολογία SLAM, σε σχέση με το νέφος σημείων που παράχθηκε με την επίγεια στατική μέθοδο σάρωσης, η οποία χρησιμοποιείται ως αναφορά. Η εφαρμογή πραγματοποιήθηκε στην Villa Rufolo, ένα πολιτιστικό σύμβολο της πόλης Ravello στην ακτή Amalfi, η οποία χτίστηκε μεταξύ του 12^{ου} και 13^{ου} αιώνα, ως οικογενειακή κατοικία και πιστή αναπαράσταση της τότε εξέχουσας κοινωνικής θέσης. Έχει μοναδικά αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά, που συνδυάζουν αραβικά και βυζαντινά στοιχεία, με αυτά του τοπικού πολιτισμού. Το φορητό όργανο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το GeoSLAM Zeb1, το οποίο βασίζεται στην τεχνολογία SLAM. Για την κάλυψη ολόκληρης της περιοχής ενδιαφέροντος, η λήψη των δεδομένων πραγματοποιήθηκε σε πέντε διαφορετικές διαδρομές (Εικόνα 3.10). Έπειτα επιλέχθηκε μία από τις διαδρομές απόκτησης των δεδομένων, η οποία χωρίστηκε σε τρία τμήματα. Η τιμή του μέσου απόλυτου σφάλματος που προέκυψε, ήταν 2.67cm για το πρώτο τμήμα, 14.81cm για το δεύτερο και τέλος 32.73cm για το τρίτο. Παρατηρείται

λοιπόν μια προοδευτική συσσώρευση μετατόπισης σχετικά με το νέφος σημείων της επίγειας στατικής σάρωσης, που χρησιμοποιείται ως αναφορά. Όσον αφορά την ακρίβεια του οργάνου, ο κατασκευαστής δηλώνει μια τιμή του 0.1% για μία σάρωση διάρκειας 10 λεπτών, με το κλείσιμο ενός βρόχου. Το μέσο απόλυτο σφάλμα που υπολογίστηκε ήταν ίσο με 30cm και απεδείχθη συμβατό με την ακρίβεια που δηλώθηκε από τον κατασκευαστή, για μία διαδρομή σάρωσης των 10 λεπτών και με ένα μόνο κλείσιμο βρόγχου. Η μελέτη έδειξε ότι η τεχνολογία SLAM, παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία στην επεξεργασία και καθιστά δυνατή τη δημιουργία τρισδιάστατων αποκαταστάσεων που είναι πιο ακριβείς, ταχύτερες, διαλειτουργικές και συνδυαστικές μεταξύ διαφορετικών μεθόδων. Οι εφαρμογές της τεχνολογίας SLAM δεν περιορίζονται μόνο στην τεκμηρίωση της πολιτιστικής κληρονομιάς, αλλά λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της μεθοδολογίας, αυτές μπορεί να κυμαίνονται από ταχεία χαρτογράφηση σε συνθήκες έκτακτης ανάγκης έως την παραγωγή μοντέλων για τη διάδοση περιεχομένου σε ένα μη τεχνικό κοινό, όπως για παράδειγμα την δημιουργία ενός ψηφιακού περιβάλλοντος περιήγησης (Barba et al., 2021).



Εικόνα 3.10: Δεδομένα που αποκτήθηκαν με την χρήση της τεχνολογίας SLAM, όπου η κάθε διαδρομή απεικονίζεται με διαφορετικό χρώμα (Barba et al., 2021)

Το δεύτερο παράδειγμα αφορά την εφαρμογή της τεχνολογίας SLAM, στην καταγραφή της αρχιτεκτονικής ορισμένων ιστορικών κήπων. Η τρισδιάστατη ανάλυση των δεδομένων που προέκυψαν, είχε ως σκοπό την διεπιστημονική προσέγγισή τους (καλλιτεχνική, ιστορική, αρχιτεκτονική). Ακόμη, οι τρισδιάστατες εγγραφές μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση για την μελλοντική παρακολούθηση και την φροντίδα των κήπων, στα πλαίσια της διατήρησης της πολιτιστικής κληρονομιάς, αλλά και προκειμένου να καταστήσουν δυνατή την απομακρυσμένη εικονική περιήγηση του κοινού σε αυτούς. Αναλυτικότερα η μελέτη επικεντρώθηκε σε τρεις μπαρόκ κήπους με κτίρια που ανήκουν στο Κιστερκιανό τάγμα, όλα χτισμένα στο ίδιο περίπου χρονικό διάστημα, κατά τη διάρκεια του 17^{ου}-18^{ου} αιώνα. Τα αρχιτεκτονικά στοιχεία του

ιστορικού κήπου χρησιμεύουν για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών που καθιέρωσαν οι μεταγενέστεροι ιδιοκτήτες του. Η τεχνολογία SLAM, ήταν η προτιμώμενη μέθοδος για την συλλογή των δεδομένων, με αποδεκτή τιμή σφάλματος 3cm. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το GeoSLAM ZEB Horizon. Η σχετική ακρίβεια των σημείων που ελήφθησαν από το συγκεκριμένο όργανο ήταν 30mm (3cm) στο καταχωρημένο νέφος σημείων, υπό κανονικές συνθήκες φωτισμού, δηλαδή υπό το φως της ημέρας. Συνεπώς η ακρίβεια που προέκυψε ήταν εντός της ακρίβειας που δίνει ο κατασκευαστής. Η μελέτη έδειξε την ταχύτερη αποτύπωση του πολιτιστικού αυτού τοπίου, με την χρήση της τεχνολογίας SLAM (Hess & Ferreyra, 2021). Ένα μέρος των αποτελεσμάτων που προέκυψαν παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 3.11).



Εικόνα 3.11: Τρισδιάστατο χρωματισμένο νέφος σημείων των κήπων, μέρος των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με την χρήση της τεχνολογίας SLAM (Hess & Ferreyra, 2021)

Το τρίτο παράδειγμα αφορά την εφαρμογή της τεχνολογίας SLAM, σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες, όπως είναι η αερομεταφερόμενη και η επίγεια στατική σάρωση, για την τεκμηρίωση ενός αρχαιολογικού πάρκου. Πρόκειται για το αρχαιολογικό πάρκο Baratti e Populonia, το οποίο εκτείνεται στις πλαγιές του ακρωτηρίου του Piombino και στον κόλπο του Baratti. Είναι ένα υπαίθριο μουσείο, όπου το έδαφος της νεκρόπολης είναι πλούσιο σε κοιτάσματα σιδήρου. Η νεκρόπολη της ελληνιστικής περιόδου, παρεμβάλλεται ανάμεσα σε μία πολύ εκτεταμένη δασώδη έκταση και περιλαμβάνει ομάδες από υπόγειους τάφους χαραγμένες σε βράχο. Η περιοχή μελέτης εκτείνεται περίπου στα 2km² και παρουσιάζει σημαντικές υψομετρικές διαφορές, επί των οποίων εντοπίζονται πολυάριθμοι υπόγειοι τάφοι. Η μελέτη ανέδειξε την θεμελιώδη σημασία της τεχνολογίας SLAM, για την ανακατασκευή ενός τοπίου αρχαίας κληρονομιάς, που είναι η νεκρόπολη των σπηλαίων του πάρκου Baratti e Populonia, που βρίσκεται μέσα σε ένα πυκνό δάσος. Η παραγωγή ενός ολοκληρωμένου, πλήρους και γεωαναφερμένου

τρισδιάστατου μοντέλου του αρχαιολογικού πάρκου, κατέστησε δυνατή την προσεκτική ενημέρωση του χάρτη μονοπατιών του πάρκου, που μέχρι τότε παρουσίαζε ελλείψεις. Η τεχνολογία SLAM χρησίμευσε στην συμπλήρωση των δεδομένων που συλλέχθηκαν με την αερομεταφερόμενη μέθοδο, καθώς κάποιες λεπτομέρειες του πάρκου δεν ήταν ορατές από αέρος. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το GeoSLAM ZEB Revo. Το όργανο αυτό χρησιμοποιήθηκε κατά μήκος ενός αρκετά δασώδους μονοπατιού του πάρκου. Η εφαρμογή αυτού του εργαλείου επέτρεψε την ενημέρωση της χαρτογραφίας του πάρκου και την γεωαναφορά των πολυάριθμων υπόγειων τάφων που βρέθηκαν κατά μήκος της διαδρομής. Οι επτά σαρώσεις που αποκτήθηκαν με το όργανο, συνενώθηκαν μεταξύ τους σε ένα τοπικό σύστημα αναφοράς, χάρη στις επικαλυπτόμενες περιοχές (περιοχές σύνδεσης κατά την διαδρομή σάρωσης) (Εικόνα 3.12). Σε δεύτερη φάση ολόκληρο το νέφος σημείων που προέκυψε με την τεχνολογία SLAM, γεωαναφέρθηκε βάσει δεδομένων που βασίζονται στην αερομεταφερόμενη μέθοδο. Τα ενσωματωμένα τρισδιάστατα δεδομένα βελτιστοποιήθηκαν, έτσι ώστε να είναι διαχειρίσιμα από τα εργαλεία GIS, προκειμένου να προστεθούν στην χαρτογράφηση του πάρκου και τα νέα αντικείμενα που αποτυπώθηκαν. Τα αντικείμενα αυτά αναπαρίστανται σε δύο και τρεις διαστάσεις, σε υψηλής λεπτομέρειας κλίμακες (1:200-1:500). Το τρισδιάστατο μοντέλο του σπηλαιίου της νεκρόπολης, αποκτήθηκε με την χρήση διαφορετικών μεθόδων, ανάμεσα στις οποίες και η τεχνολογία SLAM (Εικόνα 3.13) (Rabbia et al., 2020).



Εικόνα 3.12: Το νέφος σημείων που προέκυψε με την χρήση του οργάνου Zeb Revo που βασίζεται στην τεχνολογία SLAM, μετά την διαδικασία της συγχώνευσης (Rabbia et al., 2020)



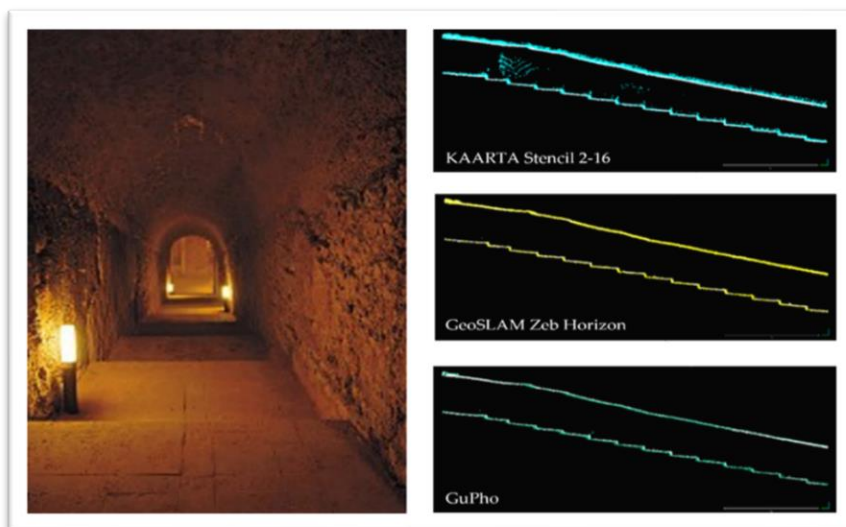
Εικόνα 3.13: Το τελικό μοντέλο του σπηλαίου της νεκρόπολης, το οποίο έχει προκύψει με την χρήση διαφορετικών μεθόδων, ανάμεσα στις οποίες και η τεχνολογία SLAM (Rabbia et al., 2020)

Το τέταρτο παράδειγμα αφορά την αποτύπωση μιας υπόγειας σπηλιάς που αποτελεί σύμβολο πολιτιστικής κληρονομιάς. Κατά τη χαρτογράφηση αυτών των περιβαλλόντων, για λόγους τεκμηρίωσης, η πρωταρχική ανάγκη είναι να επιτευχθεί μια πλήρης, αξιόπιστη και επαρκής αναπαράσταση των δομημένων χώρων και της γεωμετρίας τους. Η χρήση της τεχνολογίας SLAM σε τέτοια περιβάλλοντα, μειώνει τον χρόνο απόκτησης των δεδομένων. Η εφαρμογή πραγματοποιήθηκε στα σπήλαια Camerano στην Ιταλία, που χαρακτηρίζονται από κακές συνθήκες φωτισμού, δύσκολη προσβασιμότητα και περίπλοκες διαδρομές (στενά περάσματα). Η τρισδιάστατη ψηφιοποίηση της πολιτιστικής κληρονομιάς συντελεί στην τεκμηρίωση, διατήρηση, αξιοποίηση και οπτικοποίηση. Επιπλέον, βοηθά στην διάδοση των αντικειμένων και των μνημείων στις μελλοντικές γενιές και επιτρέπει την εικονική πραγματικότητα, αποτελεσματικό μέσο για την εξ' αποστάσεως περιήγηση στα μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν με την χρήση της τεχνολογίας SLAM, συγκρίθηκαν με τα δεδομένα που πάρθηκαν με την χρήση της στατικής επίγειας σάρωσης, που αποτέλεσε σημείο αναφοράς. Η μελέτη που εκπονήθηκε στοχεύει στην παροχή μιας επαρκούς πολιτιστικής, επιστημονικής και τεχνικής γνώσης αυτής της υπόγειας πολιτιστικής κληρονομιάς, για την αξιοποίησή της σε διάφορους τομείς όπως είναι η αρχαιολογία, η γεωτεχνική, η ιστορία, η πολεοδομία, η αρχιτεκτονική, η οικονομία, ο τουρισμός, κ.λπ. Κατά μήκος του υπόγειου σπηλαίου εντοπίζονται δεξαμενές νερού, χώροι αποθήκευσης τροφίμων, χώροι πολιτιστικής ή θρησκευτικής λειτουργίας και ορυχεία ή λατομεία. Πρόκειται για μία υπόγεια πόλη που εκτείνεται σε μήκος των 3km (Εικόνα 3.14). Οι σπηλιές και οι σήραγγες μέσα στην υπόγεια πόλη, χρησιμοποιούνταν κατά τον 19^ο αιώνα από οικογένειες ευγενών για συναντήσεις και τελετουργίες. Το 1944, το υπόγειο χρησιμοποιήθηκε ως καταφύγιο από τους βομβαρδισμούς του Β' Παγκοσμίου Πολέμου από περίπου 2000 άτομα. Για τους σκοπούς της χαρτογράφησης χρησιμοποιήθηκαν τρία όργανα που

βασίζονται στην τεχνολογία SLAM και είναι το KAARTA Stencil 2-16, το GeoSLAM Zeb Horizon και το GuPho. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν με καθένα από τα τρία διαφορετικά όργανα, αρχικά συνενώθηκαν με τα δεδομένα που συλλέχθηκαν με την επίγεια στατική μέθοδο σάρωσης, βάσει του αλγορίθμου ICP, προκειμένου να βρεθεί ο μετασχηματισμός μεταξύ του νέφους σημείων της μεθόδου αναφοράς (επίγεια στατική) και των τριών σαρώσεων που προέκυψαν με την χρήση της τεχνολογίας SLAM. Έπειτα υπολογίστηκαν οι αποστάσεις μεταξύ των νεφών και των πλεγμάτων καθενός από τα τρία όργανα σε σχέση με την επίγεια στατική μέθοδο (cloud to cloud distance και cloud to mesh distance), για ορισμένα επιλεγμένα τμήματα της υπόγειας πόλης (Εικόνα 3.15). Οι μετρήσεις και οι οπτικές αναλύσεις έδειξαν ότι όλα τα κινητά συστήματα χαρτογράφησης που σχετίζονταν με την τεχνολογία SLAM, μπόρεσαν να αποκτήσουν γρήγορα την κύρια γεωμετρία των σπηλαίων με σφάλματα που κυμαίνονται μεταξύ 1-3cm (Di Stefano et al., 2021).



Εικόνα 3.14: Υπέρθυση της υπόγειας σπηλιάς, μήκους περίπου 3km, πάνω στη πόλη Camerano στην Ιταλία (Di Stefano et al., 2021)



Εικόνα 3.15: Σύγκριση των νεφών σημείων που λαμβάνονται με την χρήση της τεχνολογίας SLAM και αυτών που λαμβάνονται με την επίγεια στατική μέθοδο σάρωσης, σε ένα τμήμα της υπόγειας σπηλιάς (Di Stefano et al., 2021)

Το πέμπτο παράδειγμα αφορά την αξιολόγηση της χρήσης ενός φορητού συστήματος χαρτογράφησης, που βασίζεται στην τεχνολογία SLAM, σε συνδυασμό με την χρήση ενός αερομεταφερόμενου κι ενός επίγειου στατικού σαρωτή, στο Palazzo Ducale, στην πόλη Gubbio, στην Ιταλία. Πρόκειται για ένα αξιόλογο παλάτι αναγεννησιακής αρχιτεκτονικής, που αποτελεί πλέον μουσείο. Το παλάτι χτίστηκε πάνω σε προϋπάρχοντα κτίρια της πόλης Gubbio, δωρήθηκε το 1480 σε μία οικογένεια αρχόντων και χρησιμοποιούταν ως εξοχική κατοικία. Το παλάτι είναι κτισμένο κοντά στο κέντρο της πόλης, ενώ σήμερα φιλοξενεί εκθέματα. Τον Σεπτέμβριο του 2018 μια ομάδα επιστημόνων από το πολυτεχνείο του Torino, πραγματοποίησε μια έρευνα με την χρήση διαφορετικών μεθόδων σάρωσης. Στόχος ήταν η τρισδιάστατη τεκμηρίωση του παλατιού, σε διαφορετικές κλίμακες. Ολόκληρο το παλάτι χαρτογραφήθηκε με την χρήση της τεχνολογίας SLAM. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε το όργανο ZEB Revo Real Time (RT). Το όργανο αυτό θεωρήθηκε το καταλληλότερο για την χαρτογράφηση αρχιτεκτονικά σύνθετων κατασκευών, όπως στην παρούσα περίπτωση. Χάρη στον αλγόριθμο SLAM, τη φορητότητα και την ικανότητα ελιγμών, το ZEB Revo RT αντιπροσωπεύει μια λύση γρήγορης χαρτογράφησης σε μεγάλους χώρους με δυσκολία πρόσβασης, όπως είναι το Palazzo Ducale. Η χαρτογράφηση του παλατιού περιλάμβανε πολλαπλές σαρώσεις, τόσο στους εσωτερικούς, όσο και στους εξωτερικούς χώρους για την απόκτηση των εσωτερικών σχημάτων και των πέντε ορόφων του, του μοναστηριού και των στενών χώρων. Μέρος των εξωτερικών τειχών του παλατιού, χαρακτηρίζεται από δυσκολία στην πρόσβαση, καθώς υπάρχουν στενά δρομάκια γύρω από αυτό, ενώ η περιοχή ανάμεσα στην είσοδο του μουσείου και την πρόσοψη του καθεδρικού ναού, είναι μικρή. Η χαρτογράφηση ολοκληρώθηκε με 15 σαρώσεις, συλλέγοντας συνολικά 333 εκατομμύρια σημεία, μέσα σε 4 ώρες και 20 λεπτά. Τα δεδομένα που ελήφθησαν με την χρήση της τεχνολογίας SLAM, επεξεργάστηκαν, μέσα από το λογισμικό Geoslam Hub (Εικόνα 3.16).

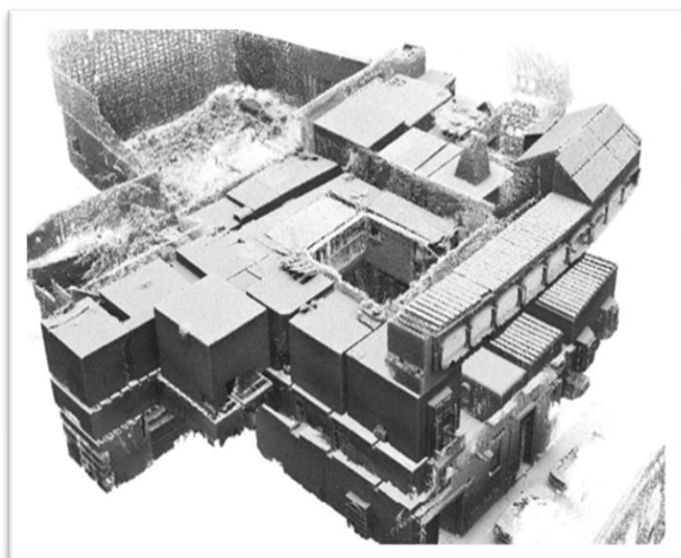
Το μοντέλο που προέκυψε παρουσίαζε ορισμένες παραμορφώσεις οι οποίες διορθώθηκαν. Η τεχνολογία SLAM κατάφερε εύκολα να καταγράψει όλες τις εσοχές του κτιρίου και των εσωτερικών χώρων, αλλά και στοιχεία στην οροφή. Ως προς την ακρίβεια, η τεχνολογία SLAM, παρουσίασε σφάλμα 2-4cm, για μια κλίμακα αποτύπωσης 1:200. Συμπερασματικά, το φορητό σύστημα σάρωσης που χρησιμοποιήθηκε και βασίζεται στην τεχνολογία SLAM, απεδείχθη, μία καλή και αξιόπιστη λύση για γρήγορη χαρτογράφηση (χάρη στην ταχύτητα απόκτησης των δεδομένων και την ευελιξία της) στην κλίμακα αποτύπωσης 1:200 (Patrucco et al., 2019).



Εικόνα 3.16: Τρισδιάστατη οπτικοποίηση και πλοήγηση στο νέφος σημείων του παλατιού, χρησιμοποιώντας το λογισμικό Geoslam Hub (Patrucco et al., 2019)

Το έκτο παράδειγμα αφορά την αξιολόγηση της καταλληλότητας ενός φορητού συστήματος χαρτογράφησης, για την ψηφιοποίηση ενός σύνθετου εσωτερικού περιβάλλοντος που ανήκει σε ένα κτίριο πολιτιστικής κληρονομιάς, καθώς και για την παραγωγή των χαρτογραφικών προϊόντων που απαιτούνται για τη διατήρηση και την αποκατάστασή του. Πρόκειται για ένα ερειπωμένο γοτθικό παλάτι που βρίσκεται στο αστικό κέντρο της Segovia στην Ισπανία. Το παλάτι ανεγέρθη τον 15^ο αιώνα, στα πλαίσια της προσπάθειας για την οικονομική επέκταση της πόλης, ακολουθώντας τις επιταγές της αρχιτεκτονικής του τότε αστικού κέντρου. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη, ήταν το ZEB Reno, το οποίο λειτουργεί βάσει της τεχνολογίας SLAM. Τα δεδομένα αποκτήθηκαν ακολουθώντας τέσσερις διαφορετικές διαδρομές. Η συνολική διάρκεια της σάρωσης ήταν περίπου 63 λεπτά. Η διαδικασία καταχώρισης των διαφορετικών μονοπατιών, η οποία χρησιμοποιεί σφαιρικούς κεντροειδείς στόχους, ως σημεία ελέγχου, έδωσε μέσο τετραγωνικό σφάλμα περίπου 3cm, συμβατό με την ακρίβεια του αναλυόμενου συστήματος. Η δυνατότητα αυτή επιβεβαιώνονται επίσης και μέσα από τη σύγκριση της τεχνολογίας SLAM με ένα εξωτερικό δίκτυο που έχει μετρηθεί από έναν επίγειο στατικό σαρωτή laser. Η ακρίβεια της τεχνολογίας SLAM, αξιολογήθηκε σε δύο διαφορετικές κλίμακες: στην τοπική κλίμακα, όπου εξήχθη ο μέσος όρος πέντε μετρήσεων απόστασης μεταξύ απέναντι τοίχων ή μεταξύ του δαπέδου και της οροφής,

ανάμεσα στα δύο διαφορετικά συστήματα σάρωσης (τεχνολογία SLAM και επίγειος στατικός σαρωτής) και υπολογίστηκε το σχετικό σφάλμα μέτρησης μήκους και η σχετική ακρίβεια μέτρησης μήκους και στην γενική κλίμακα, όπου χρησιμοποιήθηκε η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος μεταξύ των κεντροειδών που εντοπίστηκαν από κάθε σύστημα. Και στις δύο περιπτώσεις η ακρίβεια της τεχνολογίας SLAM εκτιμάται μεταξύ 1-3cm και είναι ίδια με αυτήν που δηλώνει ο κατασκευαστής. Η τεχνολογία SLAM ξεχώρισε για την ευελιξία της, σε σύγκριση με άλλες παραδοσιακές τεχνικές. Ο χρόνος απόκτησης των δεδομένων με την χρήση του φορητού συστήματος είναι περίπου ίσος με το 1/6 του χρόνου που απαιτείται από τον επίγειο στατικό σαρωτή laser, παρέχοντας τη σωστή ακρίβεια και πυκνότητα των δεδομένων, για την δημιουργία των σχεδίων για τα έργα αποκατάστασης. Η διαδικασία της επεξεργασίας των δεδομένων είναι περίπου πέντε φορές μικρότερη από την αντίστοιχη εγγραφή των επίγειων στατικών σαρώσεων (Di Filippo et al., 2018). Το τελικό νέφος σημείων που προέκυψε απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 3.17).



Εικόνα 3.17: Το τελικό νέφος σημείων του παλατιού που παράχθηκε, περιλαμβάνει περισσότερα από 100 εκατομμύρια σημεία (Di Filippo et al., 2018)

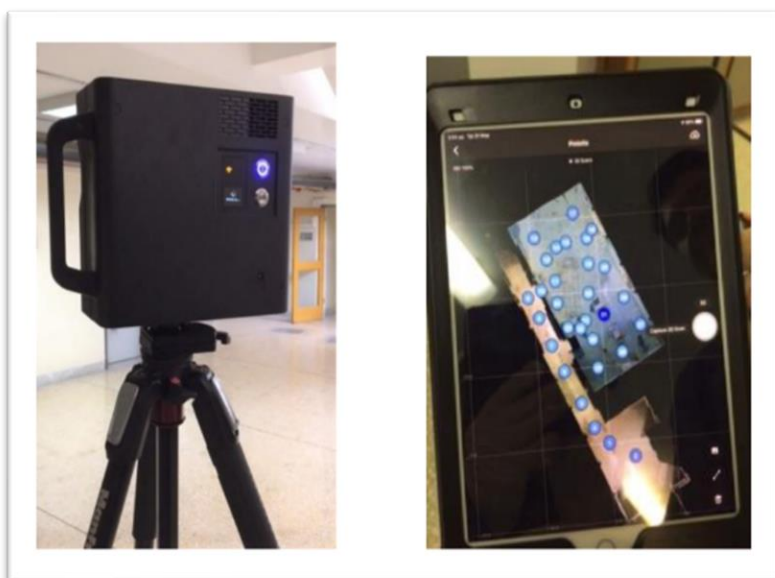
3.3 Matterport

Η κάμερα Matterport δημιουργεί την ψηφιακή απεικόνιση ενός χώρου, βοηθώντας στην κατανόησή του. Είναι εύχρηστη και γρήγορη, δημιουργώντας μια απλή διαδικασία που εξοικονομεί χρόνο και δίνοντας παράλληλα το υψηλότερο επίπεδο ακρίβειας. Τα μοντέλα που παράγονται, χαρακτηρίζονται από ακρίβεια και λεπτομέρεια, παρέχοντας μία ρεαλιστική εμπειρία στο περιβάλλον της ψηφιακής πραγματικότητας. Εντυπωσιακές τρισδιάστατες περιηγήσεις μπορούν να δημιουργηθούν από οποιονδήποτε, ανεξάρτητα από το επίπεδο εμπειρίας και τις δεξιότητές του. Τα μοντέλα που παράγονται μπορούν να διατηρηθούν ιδιωτικά, να κοινοποιηθούν δημόσια ή να μοιραστούν σε μια επιλεγμένη ομάδα συνεργατών. Μέσα από την εικονική περιήγηση που προσφέρει η κάμερα Matterport, μπορούν να αναδειχθούν βασικά σημεία ενός χώρου. Το εύρος των

εφαρμογών της κάμερας Matterport είναι μεγάλο. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην αγορά ακινήτων, καθώς αποτυπώνοντας τον χώρο, δίνεται η δυνατότητα στους ενδιαφερόμενους αγοραστές να περιηγηθούν εικονικά στο ακίνητο που τους ενδιαφέρει. Χρησιμοποιείται ακόμη για την δημιουργία εικονικών περιηγήσεων σε εμπορικά καταστήματα, χώρους πολιτιστικής κληρονομιάς, κ.λ.π.

Η κάμερα Matterport, αποτελεί ένα αυτοματοποιημένο σύστημα για την χαρτογράφηση εσωτερικών χώρων. Ο χρόνος που απαιτείται για μία μεμονωμένη σάρωση, είναι μικρότερος από αυτόν που απαιτείται για τα περισσότερα επίγεια στατικά όργανα σάρωσης. Οι μετρήσεις έχουν επίπεδο ακρίβειας ίσο με το 1% της πραγματικότητας, υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Για παράδειγμα, για μία απόσταση μήκους 3m, οι μετρήσεις μπορεί να διαφέρουν μέχρι 3cm από τις πραγματικές. Η αποβαθμονόμηση, οι ιδιαίτερες συνθήκες θερμοκρασίας και άλλοι παράγοντες μπορεί να οδηγήσουν σε μειωμένη ακρίβεια. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κάμερα Matterport, μπορεί να ικανοποιήσει ακραίες απαιτήσεις, εφόσον οι συνθήκες από άποψη αποστάσεων, θερμοκρασίας και φωτισμού είναι βέλτιστες.

Το σύστημα βασίζεται στην τεχνολογία του ταυτόχρονου εντοπισμού και χαρτογράφησης (SLAM) και λειτουργεί με πολλαπλές κάμερες δεκτών. Το SLAM στην συγκεκριμένη περίπτωση, χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της θέσης της συσκευής, σε σχέση με μια συγκεκριμένη σκηνή που βασίζεται σε εικόνες RGB-D. Πρόκειται για έναν συνδυασμό εικόνων RGB και εικόνων βάθους, όπου χρησιμοποιούνται SIFT (Scale Invariant Feature Transform) και SURF (Speed up Robust Feature) αλγόριθμοι για να βρεθούν τα αντίστοιχα σημεία. Η κάμερα είναι τοποθετημένη σε τρίποδα, ο οποίος μετακινείται σε κάθε στάση μέτρησης. Η διαχείριση της συσκευής γίνεται μέσω μιας εφαρμογής IOS που ονομάζεται Matterport Capture και επιτρέπει τον έλεγχο της κάμερας μέσω ασύρματης σύνδεσης Wi-Fi. Για κάθε νέα θέση του οργάνου, η εφαρμογή εμφανίζει μια πρώτη επεξεργασία του σχεδίου που επιτρέπει τη συνεχή επαλήθευση των περιοχών που αποκτώνται και τις σαρώσεις τους, προκειμένου να αποτυπωθούν και οι περιοχές που εμφανίζονται κενές, δηλαδή αυτές στις οποίες δεν έχουν ληφθεί επαρκή δεδομένα (Εικόνα 3.18). Η οπτικοποίηση κατά τη λήψη δεδομένων περιορίζεται οριζοντιογραφικά (σε δύο διαστάσεις x,y). Κατά τη λήψη δεδομένων, δεν υπάρχει απαίτηση για στόχους αναφοράς. Η κάμερα Matterport συνενώνει δεδομένα από δύο διαδοχικές θέσεις, βάσει ομόλογων σημείων στον χώρο. Ο αλγόριθμος ευθυγράμμισης χρησιμοποιεί στοιχεία από μία εικόνα, προσδιορίζοντας τόσο χωρικά δεδομένα όσο και τιμές RGB, ώστε να τοποθετήσει την επόμενη εικόνα και να ανακατασκευάσει σωστά τη γεωμετρία της χωρίς τη βοήθεια γνωστών σημείων. Ο αλγόριθμος μπορεί να επηρεαστεί από διακυμάνσεις στις συνθήκες φωτισμού και από την μετατόπιση των αντικειμένων μέσα στον χώρο. Για τα όργανα χαρτογράφησης που χρησιμοποιούνται σε εσωτερικούς χώρους, έχουν αναφερθεί προσπάθειες εφαρμογής τους και στους εξωτερικούς χώρους, παρά ορισμένες προκλήσεις, όπως είναι το χαμηλό εύρος απόκτησης, η έλλειψη επικάλυψης μεταξύ των διαφορετικών σταθμών μέτρησης και η επίδραση του φυσικού φωτός (Piniotis et al., 2020).



Εικόνα 3.18: Αριστερά η κάμερα Matterport Pro2 3D και δεξιά η εμφάνιση των δεδομένων στην εφαρμογή, κατά την διάρκεια της απόκτησής τους (Piniotis et al., 2020)

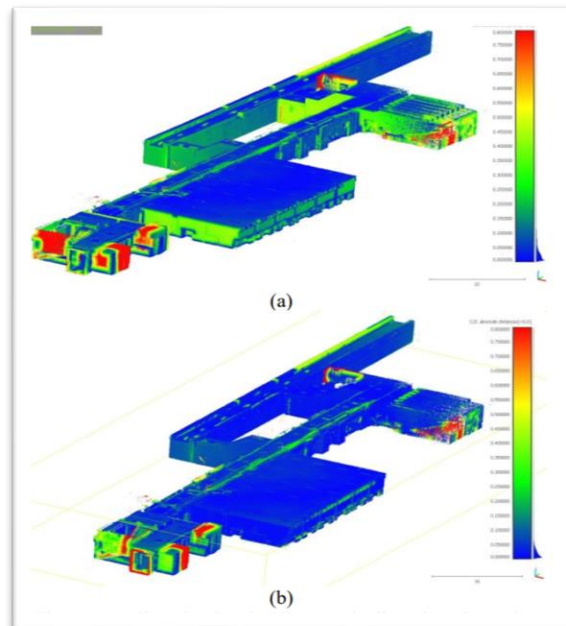
Όταν συλλεχθούν τα δεδομένα, ο χρήστης μπορεί να τα ανεβάσει στο Matterport Cloud, με την χρήση μιας συσκευής IOS. Μετά από λίγες ώρες ο χρήστης μπορεί να πάρει το τελικό προϊόν, που είναι ένα ενιαίο τρισδιάστατο αποτέλεσμα, που απαρτίζεται από το πολυγωνικό πλέγμα μαζί με ένα νέφος σημείων. Η τελική τρισδιάστατη ανακατασκευή του χώρου που μετράται, είναι ένα αποτέλεσμα συνδυασμού του αλγορίθμου χωρικής ευθυγράμμισης σε πραγματικό χρόνο και της τεχνητής νοημοσύνης του Matterport. Η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται με αυτόματο τρόπο και συγκεκριμένα μέσα από την πλατφόρμα Cortex AI (Artificial Intelligence) του Matterport. Πρόκειται για ένα νευρωνικό δίκτυο που αυτοματοποιεί πολλές από τις εργασίες που κανονικά θα έπρεπε να γίνουν με το χέρι και δημιουργεί την τρισδιάστατη ανακατασκευή του χώρου (Ales, 2021).

Ένα πρόβλημα που ενδέχεται να προκύψει κατά την συλλογή των δεδομένων, είναι η δυσκολία ευθυγράμμισης. Μπορεί παρά την προσεκτική αξιολόγηση των θέσεων σάρωσης, που υποστηρίζεται από την προεπισκόπηση προηγούμενων εικόνων μέσω της εφαρμογής Matterport Capture, το μοντέλο να ευθυγραμμίζει λάθος εικόνες. Αυτό οφείλεται κυρίως στις κακές συνθήκες φωτισμού, αλλά και στην ομοιομορφία του περιβάλλοντος και συγκεκριμένα στην έλλειψη χαρακτηριστικών σημείων ασυνέχειας. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην αναπροσαρμογή της θέσης του οργάνου και στην απόκτηση νέων δεδομένων, ώστε κατά την ευθυγράμμιση, αυτά να συνδεθούν με τα παλιά, αλλά και με τα νέα δεδομένα.

Σύμφωνα με τους Piniotis et al., (2020), μέσα από την σύγκριση ορισμένων τμημάτων των νεφών σημείων που προέκυψαν από ένα κινητό σύστημα χαρτογράφησης και από την κάμερα Matterport αντίστοιχα, παρατηρείται ότι το νέφος σημείων της κάμερας Matterport εμφανίζει διαφορές, παρ' όλο που ο κατασκευαστής δηλώνει ακρίβεια 99% (απόκλιση 1%). Η σύνδεση των δεδομένων απόκτησης οδηγεί σε μια σειρά σφαλμάτων

στις μεμονωμένες αποκτήσεις. Σε γενικές γραμμές, φαίνεται ότι η κάμερα Matterport παράγει μεγαλύτερα σφάλματα σε μεγάλες αλυσίδες δεδομένων (μεγάλες αποστάσεις). Το γεγονός αυτό προκαλεί προβλήματα όταν συλλέγονται δεδομένα σε μεγαλύτερα σύνολα, καθώς τα μοντέλα αυτά δεν μπορούν να ευθυγραμμιστούν πλήρως. Ακόμη βρέθηκαν σημαντικές τοπικές αποκλίσεις σε μικρές ορατές λεπτομέρειες. Σε ορισμένα μοντέλα η κάμερα Matterport, αλλάζει οπτικά την μορφή των γωνιών τους, με αποτέλεσμα αυτές να φαίνονται λιγότερο αιχμηρές και περισσότερο στρογγυλεμένες. Το ζήτημα αυτό είναι αρκετά πιο σοβαρό όταν τα μοντέλα καλύπτουν μεγαλύτερη έκταση. Συνεπώς, όπως γίνεται αντιληπτό τα δεδομένα της κάμερας Matterport έχουν ισχυρή συσχέτιση με την απόσταση, δηλαδή την παραμόρφωση λόγω κλίμακας (Piniotis et al., 2020).

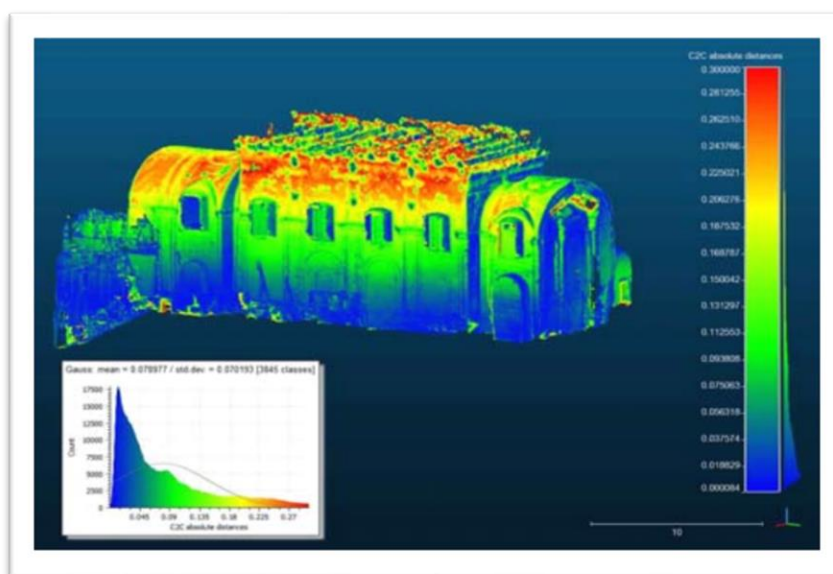
Όπως αναφέρουν οι Piniotis et al., (2020), τα δεδομένα που λαμβάνονται από την κάμερα Matterport, πρέπει να ελέγχονται διότι ενδέχεται να εμπεριέχουν συστηματικά σφάλματα, τα οποία αφορούν την παραμόρφωση λόγω κλίμακας. Για να ποσοτικοποιηθούν οι αποκλίσεις στις αποστάσεις, που προκαλεί η παραμόρφωση λόγω κλίμακας, θα πρέπει οι αποστάσεις που έχουν προκύψει μέσα από το νέφος της κάμερας Matterport, να συγκριθούν με γνωστές αποστάσεις, οι οποίες έχουν μετρηθεί με κάποιο άλλον τρόπο, όπως για παράδειγμα με έναν επίγειο στατικό σαρωτή. Με αυτό τον τρόπο υπολογίζεται ένας συντελεστής κλίμακας (στην συγκεκριμένη περίπτωση η τιμή υπολογίστηκε ίση με 0.997), ο οποίος λαμβάνεται υπόψη για την διόρθωση των δεδομένων που έχουν ληφθεί με την κάμερα Matterport (Εικόνα 3.19).



Εικόνα 3.19: Σύγκριση των ευθυγραμμισμένων νεφών σημείων μεταξύ των οργάνων BLK2GO και Matterport, όπου (α) είναι εμφανής η διαφορά στα δεδομένα λόγω της κλίμακας παραμόρφωσης της κάμερας Matterport και (β) η μείωση της διαφοράς αυτής με την εφαρμογή του συντελεστή κλίμακας (Piniotis et al., 2020)

Πριν από τη διόρθωση του συντελεστή κλίμακας, τα δύο νέφη σημείων (του φορητού συστήματος χαρτογράφησης και της κάμερας Matterport αντίστοιχα, είχαν αποκλίσεις στις εξωτερικές επιφάνειες, με μέσο όρο 0.081m και τυπική απόκλιση 0.113m (cloud to cloud distance). Όταν εφαρμόστηκε ο συντελεστής κλίμακας, ο μέσος όρος ισούνταν με 0.042m και η τυπική απόκλιση 0.077m (cloud to cloud distance). Μία δεύτερη σύγκριση μεταξύ τμημάτων των δύο νεφών σημείων, έχοντας εφαρμόσει την διόρθωση λόγω κλίμακας έδειξε διαφορές ως προς τον μέσο όρο ίσες με 0.002m και τυπική απόκλιση 0.012m.

Το γεγονός ότι το νέφος σημείων που αποκτάται με την κάμερα Matterport εμφανίζει διαφορές, παρ' όλο που ο κατασκευαστής δηλώνει ακρίβεια 99% (απόκλιση 1%), επιβεβαιώνεται και από τους [Pulcrano et al., \(2019\)](#). Η διαπίστωση αυτή προέκυψε από την σύγκριση του νέφους σημείων της κάμερας Matterport, με το νέφος σημείων που αποκτήθηκε από έναν επίγειο στατικό σαρωτή. Αρχικά πραγματοποιήθηκε ευθυγράμμιση του νέφους σημείων του επίγειου στατικού σαρωτή με το νέφος της κάμερας Matterport, αποφεύγοντας την αλλαγή κλίμακας στο δεύτερο. Μέσα από την εξαγωγή οριζόντιων και κάθετων τομών μεταξύ των δύο αυτών νεφών και την σύγκρισή τους, παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές της τάξεως των 0.07m οριζοντιογραφικά και 0.15m υψομετρικά. Για τον λόγο αυτό ήταν απαραίτητο να επαναληφθεί η διαδικασία της ευθυγράμμισης, αυτή τη φορά επιτρέποντας στο σύστημα να προσαρμόσει την κλίμακα του νέφους της κάμερας Matterport ([Εικόνα 3.20](#)). Η διαδικασία αυτή επιτρέπει την εύρεση μιας πιο σωστής αντιστοιχίας μεταξύ των δύο νεφών σημείων και μειώνει ως επί το πλείστον τις διαφορές οριζοντιογραφικά και υψομετρικά. Η σύνδεση των δεδομένων απόκτησης οδηγεί σε μια σειρά σφαλμάτων στις μεμονωμένες αποκτήσεις. Σημαντικές αποκλίσεις βρέθηκαν σε μικρά και σύνθετα στοιχεία. Αυτό οφείλεται στο περιορισμένο οπτικό πεδίο και στην απόσταση μεταξύ των διαφορετικών στάσεων μέτρησης.



Εικόνα 3.20: Αποτέλεσμα της σύγκρισης των νεφών σημείων του επίγειου στατικού σαρωτή και της κάμερας Matterport, με την εφαρμογή του συντελεστή κλίμακας, μέσα από το πρόγραμμα CloudCompare ([Pulcrano et al., 2019](#))

Οι [Shults et al., \(2019\)](#) προκειμένου να ελέγξουν την ύπαρξη συστηματικών σφαλμάτων στα δεδομένα της κάμερας Matterport, σύγκριναν κάποιες αποστάσεις ανάμεσα στο νέφος σημείων που προέκυψε από την χρήση ενός επίγειου στατικού σαρωτή και αυτού που προέκυψε από την κάμερα Matterport. Για την μέτρηση των αποστάσεων τοποθετήθηκαν στόχοι αναφοράς, οι οποίοι σαρώθηκαν και απεικονίζονται και στα δύο διαφορετικά συστήματα. Οι διαφορές που προέκυψαν είχαν μέσο όρο -0.022m και τυπική απόκλιση 0.014m . Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει την παραμόρφωση λόγω κλίμακας στα δεδομένα της κάμερας Matterport. Μέσα από τις διαφορές αυτές υπολογίστηκε η τιμή του συντελεστή κλίμακας, η οποία βρέθηκε ίση με 0.997 . Με την εφαρμογή του συντελεστή κλίμακας στα δεδομένα της κάμερας Matterport, οι διαφορές μεταξύ των δύο συστημάτων είχαν μέσο όρο -0.001m και τυπική απόκλιση -0.010m . Σε μία άλλη εφαρμογή, οι συγγραφείς προκειμένου να ελέγξουν την ύπαρξη συστηματικών σφαλμάτων στα δεδομένα της κάμερας Matterport, σύγκριναν κάποιες αποστάσεις ανάμεσα στο νέφος σημείων που προέκυψε από την κάμερα Matterport και από την χρήση μετροταινίας. Για την μέτρηση των αποστάσεων τοποθετήθηκαν στόχοι αναφοράς. Οι στόχοι αναφοράς καταγράφηκαν στο νέφος σημείων της κάμερας Matterport. Επομένως οι αποστάσεις μεταξύ των στόχων αναφοράς μετρήθηκαν τόσο πάνω στο νέφος της κάμερας Matterport, όσο και με την χρήση μετροταινίας. Ο συντελεστής κλίμακας που προέκυψε από τις διαφορές ήταν ίσος με 0.996 , ενώ με την εφαρμογή του ελήφθη ένα γεωμετρικά σωστό τρισδιάστατο μοντέλο.

Η ποιοτική αξιολόγηση των δεδομένων που λαμβάνονται με την κάμερα Matterport, αφορά την πληρότητα των νεφών σημείων και το επίπεδο λεπτομέρειάς τους, σχετικά με ορισμένα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Το επίπεδο λεπτομέρειας του μοντέλου εξαρτάται από το επίπεδο του θορύβου και την ανάλυση. Αναλυτικότερα το επίπεδο θορύβου εξαρτάται κυρίως από το σύστημα και από τους αλγόριθμους που εφαρμόζονται στην επεξεργασία δεδομένων, ενώ η ανάλυση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ταχύτητα απόκτησης των δεδομένων, από τις ξαφνικές στροφές κατά την διαδρομή αποτύπωσης και από υψομετρικές διαφορές που υπάρχουν στο έδαφος. Ορισμένα χαρακτηριστικά στα δύο νέφη σημείων (κινητό σύστημα χαρτογράφησης και κάμερα Matterport) αξιολογήθηκαν και συγκρίθηκαν βάσει της αναγνωρισιμότητάς τους. Η κάμερα Matterport παρήγαγε πιο πλήρη δεδομένα απ' ότι το κινητό σύστημα χαρτογράφησης, ωστόσο και στα δύο συστήματα τα αντικείμενα έχουν σωστά γεωμετρικά χαρακτηριστικά (σχήμα και μέγεθος) ([Piniotis et al., 2020](#)).

Η πλήρης απουσία ορισμένων τμημάτων ενός νέφους σημείων που αποκτάται με την κάμερα Matterport, πιθανότατα να οφείλεται στην αδυναμία επιλογής ανάλυσης, στην απόφραξη του οπτικού πεδίου και στο μέγιστο εύρος απόκτησης. Η τροχιά απόκτησης των δεδομένων και οι βρόγχοι θα πρέπει να σχεδιάζονται, ανάλογα με την διαμόρφωση του περιβάλλοντος που μελετάται. Αυτό είναι σημαντικό γιατί ένα σύστημα που λειτουργεί με την τεχνολογία SLAM, βασίζεται στην επαναληπτική ευθυγράμμιση των εξαγόμενων προφίλ, κι αυτό απαιτεί την αναγνώριση των χαρακτηριστικών του χώρου. Ο προγραμματισμός της έρευνας είναι απαραίτητος, ενώ ο χρόνος λήψης κι επεξεργασίας των δεδομένων μπορεί να αυξηθεί, ιδιαίτερα στους εσωτερικούς χώρους, όπου η μορφολογική και γεωμετρική πολυπλοκότητα και η μειωμένη επισκεψιμότητα

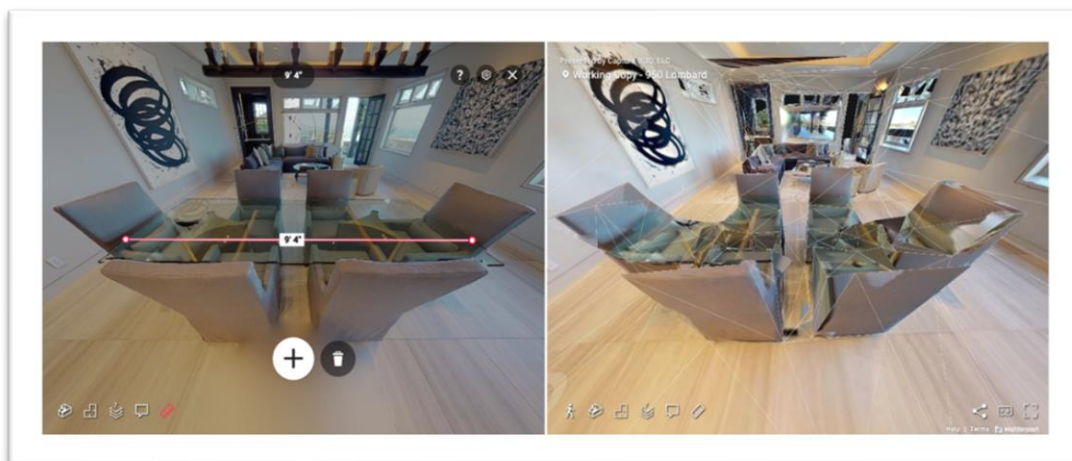
ορισμένων σημείων απαιτεί την αύξηση των σαρώσεων για την κάλυψη των κενών περιοχών. Η δυνατότητα διαχείρισης και επαλήθευσης των δεδομένων απόκτησης κατά την διάρκεια της συλλογής κι όχι μετά την επεξεργασία, για τη διόρθωση οποιουδήποτε σφάλματος ή κενής περιοχής, συντελούν στην βελτιστοποίηση του χρόνου και των αποτελεσμάτων. Με την μείωση της απόστασης μεταξύ των διαφορετικών στάσεων μέτρησης και την απόκτηση των δεδομένων ακολουθώντας κλειστή πορεία, η διάδοση του μετρητικού σφάλματος στα δεδομένα μειώνεται. Τα υψηλά επίπεδα αυτοματισμού στην όλη διαδικασία διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο για την ποιότητα του αποτελέσματος. Η αδυναμία καθορισμού των παραμέτρων και των διαδικασιών που θα χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία ενός νέφους σημείων οδηγεί στην ομογενοποίηση του αποτελέσματος, το οποίο δεν μπορεί να είναι απολύτως συνεπές με τους σκοπούς διαφόρων ερευνών. Παρ' όλα αυτά ο έλεγχος της συλλογής των δεδομένων, η ποιότητα των εικόνων RGB-D και η απόκτηση ακόμη και των πιο πολύπλοκων χώρων, χωρίς τη βοήθεια στόχων αναφοράς, καθιστούν την κάμερα Matterport εργαλείο γρήγορης οπτικοποίησης (Pulcrano et al., 2019).

Σύμφωνα με την εταιρία Matterport, πρέπει να γίνονται αρκετές σαρώσεις με την κάμερα Matterport για να καλυφθεί η περιοχή. Αυτό είναι γνωστό ως πυκνότητα σάρωσης. Γενικά η λήψη πρόσθετων δειγμάτων βοηθά στη βελτίωση της πιστότητας του μοντέλου και παρέχει πιο ακριβείς μετρήσεις πάνω σε αυτό. Ο όρος πυκνότητα σάρωσης, σημαίνει γενικά πόσες σαρώσεις υπάρχουν ανά περιοχή. Κάθε σάρωση δημιουργεί σημεία βάθους ως μετρήσεις των επιφανειών στο δωμάτιο, επομένως τεχνικά αυτό αναφέρεται με μεγαλύτερη ακρίβεια ως πυκνότητα νέφους σημείου ανά δωμάτιο. Γενικά, χρειάζεται ένας ελάχιστος αριθμός σαρώσεων για να προκύψει μια καλή αναπαράσταση του φυσικού χώρου. Ο αριθμός των σαρώσεων που απαιτούνται εξαρτάται από το εύρος και την ακρίβεια της πηγής λήψης (κάμερες) και το μέγεθος του δωματίου. Ως προς την ακρίβεια, πηγές λήψης με μικρότερα ή λιγότερο ακριβή δεδομένα θα πρέπει να έχουν περισσότερες σαρώσεις, μεγαλύτερη πυκνότητα σάρωσης, για να λάβουν περισσότερα δείγματα. Υπάρχει ένα σημείο φθίνουσας απόδοσης όπου οι πρόσθετες σαρώσεις δεν θα βελτιώσουν πραγματικά την ποιότητα του τρισδιάστατου μοντέλου.

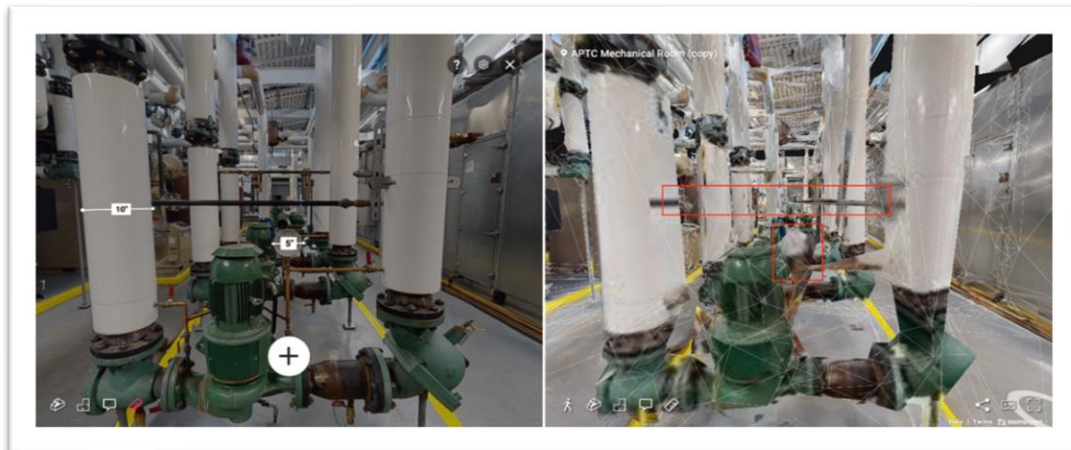
Τα δεδομένα κάθε σάρωσης ενδέχεται να έχουν μικρές διαφορές από την πραγματικότητα. Κάθε σάρωση ευθυγραμμίζεται με τα δεδομένα από άλλες κοντινές σαρώσεις, προσπαθώντας ουσιαστικά να αντιστοιχίσει δεδομένα από τις ίδιες επιφάνειες σε όλες τις σαρώσεις. Εάν το σφάλμα στα δεδομένα μιας μεμονωμένης σάρωσης είναι εντός (+/-) μιας ορισμένης ανοχής της πραγματικότητας, τότε αυτά τα σφάλματα μπορεί να αυξηθούν καθώς μεγαλύτερες αλυσίδες σαρώσεων ευθυγραμμίζονται μεταξύ τους. Η ίδια η διαδικασία ευθυγράμμισης μπορεί επίσης να εισάγει μικρά σφάλματα κατά την αντιστοίχιση δεδομένων σε όλες τις σαρώσεις. Όσο μεγαλύτερη είναι η ακολουθία των σαρώσεων σε μια αλυσίδα, τόσο μεγαλύτερη είναι η αβεβαιότητα γύρω από μεγαλύτερες μετρήσεις. Η λήψη πολλαπλών σαρώσεων από διαφορετικές θέσεις συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση του αντίκτυπου αυτών των σφαλμάτων στο τελικό τρισδιάστατο μοντέλο. Οι διαστάσεις από τοίχο σε τοίχο των δωματίων στο μέγεθος των τυπικών δωματίων κατοικιών, εμπίπτουν συνήθως στις οδηγίες ακρίβειας. Όσο μικρότερο είναι το αντικείμενο, τόσο πιο πιθανό είναι μια μέτρηση να έχει μεγάλα σφάλματα ή να μην είναι καν μετρήσιμη. Όσο μεγαλύτερη είναι

η διάσταση, τόσο μεγαλύτερο το απόλυτο σφάλμα που μπορεί να οφείλεται σε σφάλματα που συσσωρεύονται σε ευθυγραμμισμένες σαρώσεις.

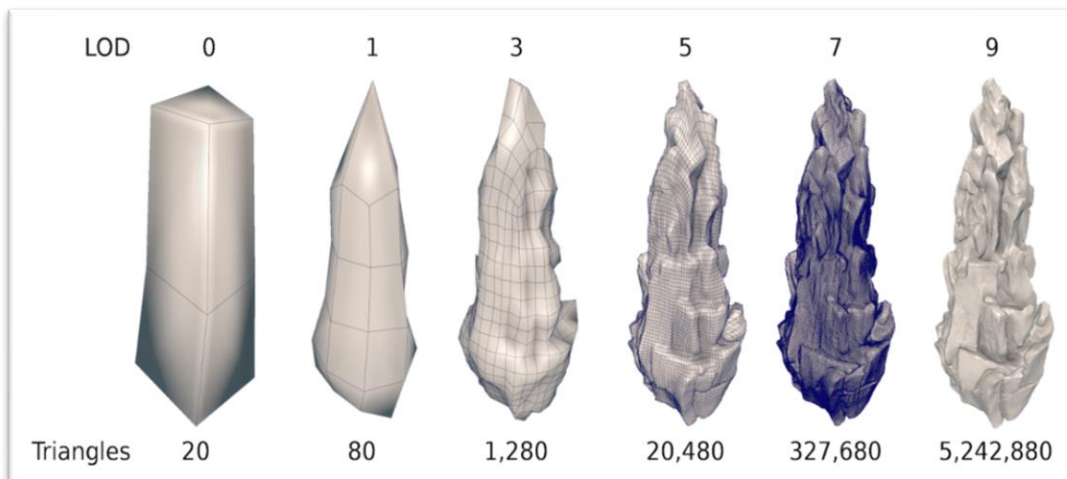
Οι ανακλαστικές επιφάνειες (γυαλί, καθρέπτες, νερό), είναι πιο δύσκολο να σαρωθούν συγκριτικά με άλλες, συνεπώς μπορεί να μην έχουν τρισδιάστατο πλέγμα και μπορεί να έχουν μεγάλα σφάλματα ή μπορεί να μην είναι μετρήσιμες. Οι ενεργοί αισθητήρες βάθους ενδέχεται να δυσκολεύονται να ανιχνεύσουν συγκεκριμένους τύπους υλικών. Συνεπώς δεν μπορεί να δημιουργηθεί τρισδιάστατο πλέγμα γι' αυτές τις οντότητες (Εικόνα 3.21). Ένα άλλο φαινόμενο που παρατηρείται στα αντικείμενα του μοντέλου Matterport, είναι ότι αυτά εμφανίζονται περισσότερο ογκώδη απ' ότι στην πραγματικότητα (Εικόνα 3.22). Η καλύτερη αναπαράσταση ενός αντικείμενου χρησιμοποιεί υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας (LoD-Level of Detail) για να απεικονίσει τις λεπτομέρειες της επιφάνειας. Η δημιουργία αυτού του επιπέδου λεπτομέρειας απαιτεί μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ. Αντιθέτως μία αναπαράσταση χαμηλής ανάλυσης είναι γρήγορη στον υπολογισμό, αλλά χάνονται πολλές λεπτομέρειες της επιφάνειας (Εικόνα 3.23). Το επίπεδο λεπτομέρειας είναι σημαντικό, καθώς ενδέχεται να μην μπορεί να μετρηθούν με ακρίβεια, ή ακόμα και καθόλου, λεπτά αντικείμενα ή άκρες σε ένα χώρο, μέσα από ένα πλέγμα χαμηλής ανάλυσης. Το επίπεδο λεπτομέρειας του υποκείμενου τρισδιάστατου πλέγματος είναι πιο σημαντικό για μικρότερα, λεπτότερα αντικείμενα. Η εικονική περιήγηση που δημιουργείται μέσα από το Matterport αποτελείται από πλέγμα χαμηλής ανάλυσης. Το τρισδιάστατο πλέγμα ενός μοντέλου είναι κατασκευασμένο από τα αρχικά νέφη σημείων και τις εικόνες που δημιουργούνται κατά τη σάρωση ενός φυσικού χώρου. Τα δεδομένα σάρωσης ενός νέφους σημείων είναι μια αραιή αναπαράσταση του πραγματικού κόσμου (X,Y,Z). Ως εκ τούτου, το πλέγμα που δημιουργείται από αυτά τα δεδομένα είναι επίσης μια απλοποιημένη αναπαράσταση του πραγματικού κόσμου (Matterport, 2022).



Εικόνα 3.21: Αδυναμία δημιουργίας τρισδιάστατου πλέγματος της κάμερας Matterport για την γυάλινη επιφάνεια του τραπεζιού (Matterport, 2022)



Εικόνα 3.22: Αύξηση του όγκου του μανομέτρου σε σχέση με την πραγματικότητα (Matterport, 2022)



Εικόνα 3.23: Αύξηση του επιπέδου λεπτομέρειας ενός αντικειμένου από αριστερά προς τα δεξιά (Matterport, 2022)

Σύμφωνα με τους [Sulaiman et al., \(2020\)](#), η εικονική περιήγηση που δημιουργείται από την κάμερα Matterport, προσφέρει στον χρήστη τα εξής:

➤ Προσβασιμότητα

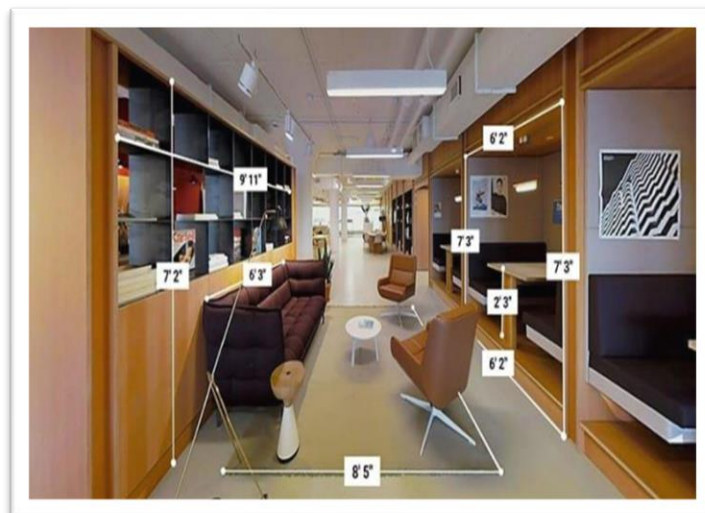
Το Matterport είναι μια διαδικτυακή πλατφόρμα τρισδιάστατης εικονικής περιήγησης που μετατρέπει τις φωτογραφίες 360°, σε μία τρισδιάστατη ψηφιακή, διαδραστική, δίδυμη αναπαράσταση του χώρου. Ο χρήστης μπορεί να μεταφερθεί στον χώρο που έχει αποτυπωθεί με την κάμερα Matterport, ανά πάσα στιγμή, χωρίς κόστος ή άλλη δέσμευση. Το Matterport διευκολύνει την πρόσβαση του χρήστη, επειδή είναι βελτιστοποιημένο για τις κινητές συσκευές. Δίνει επίσης τη δυνατότητα στον χρήστη να μοιράζεται το τρισδιάστατο μοντέλο οπουδήποτε και οποτεδήποτε.

➤ Εικονική καταγραφή

Η χρήση της προηγμένης τεχνολογίας φωτογραφίας στο Matterport επιτρέπει στο χρήστη να τραβήξει φωτογραφίες 360°. Εκτός αυτού, ο καθένας μπορεί επίσης να επεξεργαστεί τις εικόνες, μέσα από το Matterport, με την χρήση ενός έξυπνου τηλεφώνου.

➤ Λεπτομερείς πληροφορίες

Η εικονική τρισδιάστατη πραγματικότητα στο Matterport, συνοδεύεται από λεπτομερείς πληροφορίες, μέσα από την σήμανση ετικετών, οι οποίες περιγράφουν ένα σημείο του χώρου ή ένα αντικείμενο που έχει επιλεγεί από τον χρήστη. Οι πληροφορίες αυτές μπορεί να είναι εικόνες, ήχοι, βίντεο, έγγραφα, χάρτες Google, διαφάνειες παρουσίασης, δημοσκοπήσεις, κ.λπ. Ακόμη, δίνεται η δυνατότητα μέτρησης του χώρου και των αντικειμένων, ώστε οι χρήστες να έχουν μια ρεαλιστική αίσθηση όχι μόνο της εμφάνισης και της αίσθησης του χώρου, αλλά και των πραγματικών του διαστάσεων. (Εικόνα 3.24).



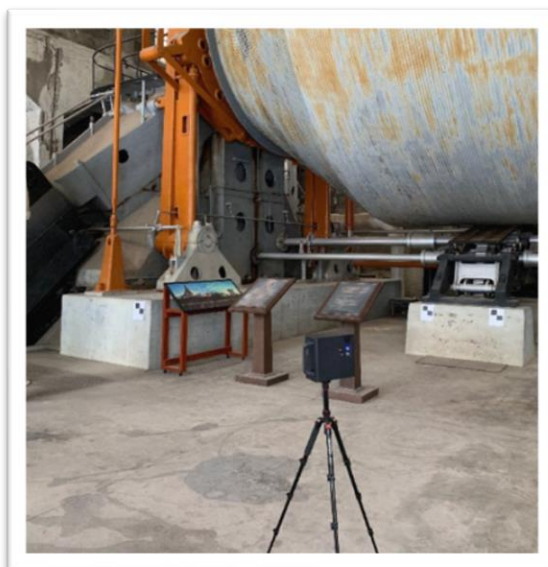
Εικόνα 3.24: Η δυνατότητα μέτρησης αποστάσεων μέσα από το Matterport (Sulaiman et al., 2020)

➤ Εικονική εμπειρία

Το Matterport προσφέρει την δυνατότητα της εικονικής πραγματικότητας (VR), δηλαδή την αίσθηση παρουσίας στον χώρο. Παρουσιάζει τον χώρο με διαδραστικό τρόπο, για να επιτευχθεί η μέγιστη εμπειρία εικονικής περιήγησης. Ο συνδυασμός της δισδιάστατης φωτογραφίας και της τρισδιάστατης ψηφιακής εικόνας, παρέχει μια πλήρη εμπειρία ξενάγησης, σαν τις πανοραμικές περιηγήσεις των 360°.

3.4 Εφαρμογές Matterport στην τεκμηρίωση της πολιτιστικής κληρονομιάς

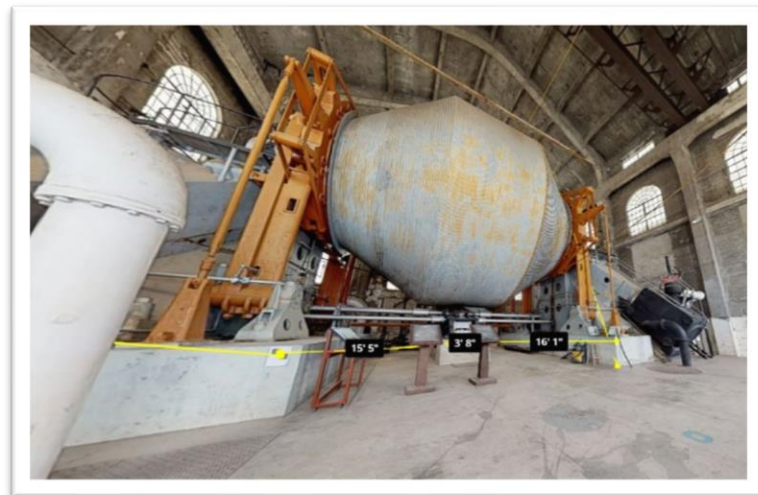
Ένα πρώτο παράδειγμα εφαρμογής της κάμερας Matterport στην πολιτιστική κληρονομιά, είναι το μεταλλείο Quincy Mine, που βρίσκεται στην πολιτεία του Michigan. Πρόκειται για έναν ιστορικό άξονα παραγωγής χαλκού. Το ορυχείο βρισκόταν σε λειτουργία για σχεδόν 100 χρόνια, από το 1846 έως το 1945 και σήμερα έχει μετατραπεί σε μουσείο, ενώ αποτελεί μέρος του Εθνικού Ιστορικού Πάρκου Keweenaw. Τα κτίρια και οι μηχανές του μεταλλείου, έχουν διατηρηθεί μέχρι σήμερα. Βασικό προϊόν της εργασίας που πραγματοποιήθηκε με την χρήση της κάμερας Matterport, ήταν η δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου και μιας εικονικής περιήγησης, μιας τεράστιας ατμοκίνητης ανυψωτικής μηχανής του μεταλλείου (Εικόνα 3.25). Το παράδειγμα αυτό ικανοποιεί ακραίες απαιτήσεις, καθώς υπάρχουν μεγάλες αποστάσεις και ιδιαίτερες συνθήκες φωτισμού και θερμοκρασίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι το κτίριο που αποτυπώθηκε, έχει ύψος πάνω από 12m και αποτελεί μια μεγάλη πρόκληση για την κάμερα Matterport. Άλλη μία δυσκολία κατά την διάρκεια της σάρωσης, ήταν οι συνθήκες θερμοκρασίας που επικρατούσαν. Αναλυτικότερα, η θερμοκρασία ήταν κάτω από 15°C. Ωστόσο η κάμερα απέδωσε αρκετά καλά στις δυσκολίες που προαναφέρθηκαν. Η σάρωση ολοκληρώθηκε, χρησιμοποιώντας οκτώ σταθμούς μέτρησης, ενώ το νέφος σημείων που δημιουργήθηκε αποτελούνταν από επτά εκατομμύρια σημεία. Προκειμένου να διαπιστωθεί ότι τα δεδομένα που συλλέχθηκαν είναι ορθά και δεν περιλαμβάνουν σφάλματα που προκαλούνται από την παραμόρφωση λόγω κλίμακας, τοποθετήθηκαν κάποια σημεία ελέγχου στο κτίριο. Με την χρήση του λογισμικού CloudCompare, μετρήθηκαν πάνω στο νέφος σημείων της κάμερας Matterport, οκτώ αποστάσεις μεταξύ αυτών των σημείων. Οι ίδιες αποστάσεις μετρήθηκαν και με την χρήση μετροταινίας. Καθώς σημειώθηκαν αποκλίσεις στις αποστάσεις που συγκρίθηκαν, υπολογίστηκε ο συντελεστής κλίμακας παραμόρφωσης, ο οποίος στην συνέχεια εφαρμόστηκε, προκειμένου να παραχθεί ένα γεωμετρικά σωστό τρισδιάστατο μοντέλο (Shults et al., 2019).



(α)



(β)



(γ)

Εικόνα 3.25: (α) Η απόκτηση των δεδομένων με την κάμερα Matterport, (β) Το νέφος σημείων της ατμοκίνητης ανυψωτικής μηχανής που προέκυψε με την κάμερα Matterport και (γ) Απόσπασμα της εικονικής περιήγησης (Shults et al., 2019)

Το δεύτερο παράδειγμα εφαρμογής της κάμερας Matterport, εφαρμόστηκε στην εκκλησία του Rosario di Palazzo. Πρόκειται για μία εκκλησία που χτίστηκε τον 17^ο αιώνα στην άκρη του ιστορικού κέντρου της Νάπολης. Σήμερα παρουσιάζει σοβαρές ζημιές στην κατασκευή της, που προκλήθηκαν από βόμβες κατά την διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Η μελέτη που εκπονήθηκε στοχεύει στην αξιολόγηση της μετρητικής αξιοπιστίας και του επιπέδου λεπτομέρειας που παρέχει η περιστρεφόμενη κάμερα Matterport Pro2 3D, τα αποτελέσματα της οποίας συγκρίθηκαν με νέφη σημείων που λαμβάνονται από διεργασίες που βασίζονται στην φωτογραμμετρική μέθοδο και στην επίγεια στατική σάρωση. Για όλη την εκκλησία χρειάστηκαν 40 συλλογές

δεδομένων, ακολουθώντας μία σχεδόν κλειστή πορεία. Ο πειραματισμός με την κάμερα Matterport Pro2 3D εστιάζει στην ανάλυση της μεθοδολογίας συλλογής των δεδομένων, με αναφορά στην διαμόρφωση της περιοχής που ερευνάται, αλλά και στην επαλήθευση της ακρίβειας των δεδομένων που συλλέγονται, σε σχέση με τους σκοπούς της έρευνας. Το νέφος σημείων που παράχθηκε, αποτελείται από 15 εκατομμύρια σημεία (Εικόνα 3.26) και δείχνει μία καλή τρισδιάστατη ανακατασκευή του ναού, με εξαίρεση ορισμένες περιοχές. Η απουσία ορισμένων τμημάτων, ή η παρουσία υψηλού θορύβου σε αυτά, εξαρτώνται από την παρεμπόδιση του οπτικού πεδίου και το μέγιστο εύρος απόκτησης (Εικόνα 3.27). Αντιθέτως, ως προς το πλέγμα, τα σημεία κατανέμονται παρόμοια με το πλέγμα που δίνει η έρευνα μέτρησης βάσει της επίγειας στατικής σάρωσης, αλλά με σημαντικά χαμηλότερη πυκνότητα σε σχέση με το πλέγμα που δίνουν οι μετρήσεις που βασίζονται σε εικόνα. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η σύγκριση των διαφορετικών τεχνολογιών που χρησιμοποιήθηκαν, ήταν απαραίτητη η ευθυγράμμιση του νέφους σημείων της κάμερας Matterport Pro2 3D με αυτό του επίγειου στατικού σαρωτή, προσδιορίζοντας με χειροκίνητο τρόπο παρόμοια σημεία μεταξύ των δύο μοντέλων. Τρία σημεία είναι επαρκή, ώστε να μπορεί το λογισμικό να περιστρέψει το ένα νέφος σημείων σε σχέση με το άλλο. Αναγνωρίστηκαν δέκα σημεία και ξεκίνησε η διαδικασία ευθυγράμμισης στο CloudCompare, αποφεύγοντας την αλλαγή του μεγέθους του νέφους σημείων της κάμερας Matterport Pro2 3D, σε σύγκριση με το νέφος σημείων του επίγειου στατικού σαρωτή, που ορίζεται ως αναφορά. Η ίδια διαδικασία ευθυγράμμισης πραγματοποιήθηκε και για το νέφος σημείων που προέκυψε μέσω φωτογραμμετρίας, αλλά σε αυτή την περίπτωση, ήταν απαραίτητη η αλλαγή του μεγέθους του μοντέλου από την αρχή, διότι αυτό δεν είχε τις πραγματικές του διαστάσεις. Η πρώτη σύγκριση μεταξύ μοντέλων έδειξε ότι το νέφος σημείων που προέκυψε από την κάμερα Matterport Pro2 3D έχει αποκλίσεις στις συνολικές του διαστάσεις, αν και ο κατασκευαστής εξασφαλίζει πολύ υψηλή αξιοπιστία μέτρησης (ακρίβεια 99%). Πραγματοποιώντας κάποιες τομές σε οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο, ήταν δυνατό να επαληθευτεί ότι το νέφος σημείων εμφανίζει σφάλμα περίπου 4cm στην εγκάρσια διεύθυνση, 7cm στην διαμήκη και 15cm υψομετρικά. Αντίθετα, η ευθυγράμμιση των νεφών που ελήφθησαν βάσει της φωτογραμμετρίας ήταν αναλογικά πιο σωστή, αν και εκεί υπήρχαν πολλές περιοχές που στερούνταν δεδομένων. Ως εκ τούτου, ήταν απαραίτητο να επαναληφθεί η ευθυγράμμιση, αυτή τη φορά επιτρέποντας στο σύστημα να αλλάξει την κλίμακα του νέφους σημείων που δημιουργήθηκε από την κάμερα Matterport Pro2 3D, προκειμένου να εκτιμηθούν οι συνολικές του διαστάσεις ανεξάρτητα από την αρχική κλίμακα. Η λεπτομερής ανάλυση των προφίλ των οριζόντιων τομών, έδειξε ότι η διαφορά μεγέθους οφείλεται πιθανώς στην διάδοση του σφάλματος μέτρησης του οργάνου στην κατεύθυνση σάρωσης. Τα δεδομένα που αποκτώνται, συνδέονται μεταξύ τους, και χαρακτηρίζονται από πληθώρα σφαλμάτων που προκαλούνται από κάθε μεμονωμένη απόκτηση δεδομένων. Για παράδειγμα ένα τμήμα του νέφους σημείων που αντιπροσωπεύει μία αίθουσα, δείχνει ότι το μήκος του (η κατεύθυνση που επιλέχθηκε για την απόκτηση των δεδομένων) παρουσίαζε ανεπαρκές μέγεθος, ενώ το πλάτος του ήταν μεγαλύτερο σύμφωνα με τα δεδομένα του σαρωτή laser. Σε δευτερεύουσες περιοχές, δεδομένου ότι η κατεύθυνση της σάρωσης έχει αλλάξει, η ανάλυση των ίδιων δεδομένων έδειξε ότι το πλάτος είναι μεγαλύτερο. Συνεπώς το νέφος σημείων παρουσίαζε λάθη και στις δύο διευθύνσεις. Τα περισσότερα από τα σφάλματα του

μοντέλου Matterport Pro2 3D οφείλονται στην μέθοδο συλλογής και επεξεργασίας των δεδομένων (αδυναμία επιλογής ανάλυσης, περιορισμένο οπτικό πεδίο, κ.λ.π.). Ένας άλλος παράγοντας που διακόπτει τη λήψη της κάμερας, προκύπτει από τη διαχείριση των σημείων που παράγονται στο πλέγμα. Στην τελική φάση κατασκευής πλέγματος, το λογισμικό της φωτογραμμετρίας τείνει να γεμίζει τα κενά στο νέφος σημείων, δημιουργώντας μια εξωπραγματική επιφάνεια. Με αυτόν τον τρόπο, η εικόνα δεν είναι συνεπής με αυτό που αντιπροσωπεύει και ο βαθμός σφάλματος που εμπεριέχει είναι ανάλογος με το μέγεθος του κενού χώρου (Pulcrano et al., 2019).



Εικόνα 3.26: Το νέφος σημείων της εκκλησίας, που αποκτήθηκε με την κάμερα Matterport Pro2 3D (Pulcrano et al., 2019)



Εικόνα 3.27: Απουσία τμημάτων στο νέφος σημείων της εκκλησίας που αποκτήθηκε με την κάμερα Matterport Pro2 3D (Pulcrano et al., 2019)

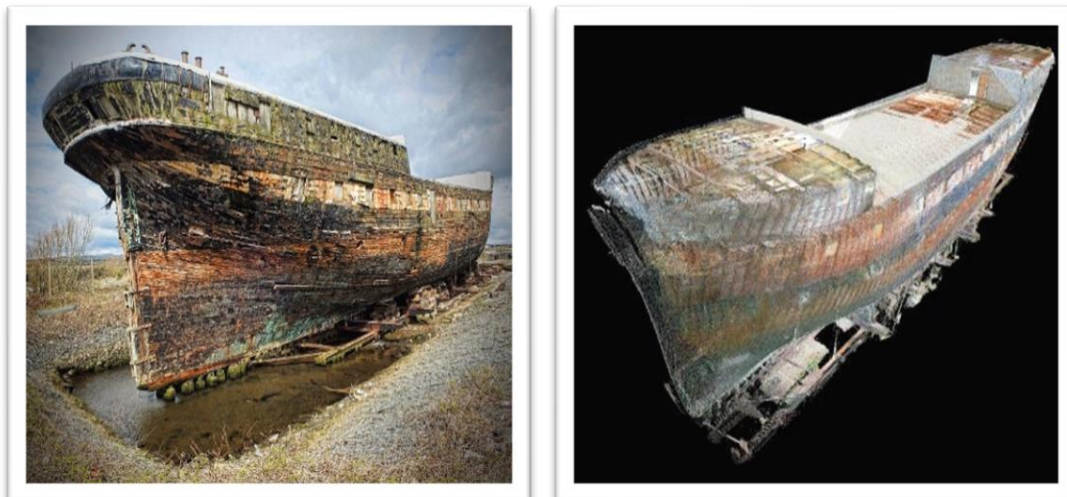
3.5 Αποτυπώσεις ιστορικών πλοίων

Τα τελευταία χρόνια, η ανάπτυξη των τεχνολογιών σάρωσης, έχει αναδείξει την αξία της εφαρμογής τους για την καταγραφή, τη διατήρηση και τη διαχείριση ιστορικών πλοίων όλων των μεγεθών. Παρακάτω αναφέρονται μερικά παραδείγματα, όπου έχουν εφαρμοστεί μέθοδοι σάρωσης, για την διατήρηση της ναυτικής πολιτιστικής κληρονομιάς (ScARF, n.d.). Όσον αφορά το εξωτερικό των ιστορικών πλοίων που αναφέρονται, όλες οι σαρώσεις έχουν πραγματοποιηθεί κυρίως με την χρήση της επίγειας στατικής σάρωσης με laser. Οι εσωτερικοί χώροι των ιστορικών πλοίων που αναφέρονται, έχουν αποτυπωθεί με την χρήση της κάμερας Matterport. Μέσα από την σφαιρική σάρωση σε 360° στον χώρο, η προαναφερθείσα τεχνολογία σάρωσης, δημιουργεί ένα ενημερωτικό και διαδραστικό ψηφιακό δίδυμο, που επιτρέπει την απομακρυσμένη, εικονική περιήγηση.

3.5.1 Εξωτερικό πλοίων

Το πρώτο παράδειγμα αφορά το ιστορικό πλοίο **Mary Rose**. Πρόκειται για ένα πολεμικό πλοίο που κατασκευάστηκε το 1511 για τον αγγλικό στόλο του βασιλιά Ερρίκου VIII. Υπηρέτησε για 33 χρόνια σε πολλούς πολέμους εναντίον της Γαλλίας, της Σκωτίας και της Βρετανίας. Το 1545 βυθίστηκε στο Solent, ένα στενό βόρεια του Isle of Wight, κατά την διάρκεια της μάχης με τον γαλλικό στόλο. Δεδομένου ότι το ναυάγιο είχε ανυψωθεί από τον πυθμένα του βυθού το 1982, το 2009 ζητήθηκε από μία ομάδα επιστημόνων να σαρώσει και να δημιουργήσει ένα τρισδιάστατο νέφος σημείων του πλοίου. Προκειμένου να παραχθεί ένα νέφος σημείων που θα παρέχει πλήρη κάλυψη του πλοίου, οι σαρωτές laser Leica HDS 6200, τοποθετήθηκαν σε έναν απομακρυσμένο βραχίονα και στην συνέχεια μετακινούνταν σε πολλές θέσεις εντός της ξύλινης δομής. Οι σαρωτές ελεγχόταν εξ αποστάσεως μέσω ασύρματης σύνδεσης δικτύου. Πραγματοποιήθηκαν 110 σαρώσεις με τον ρομποτικό βραχίονα να μετακινείται στη θέση του σε κάθε περίπτωση. Από τα δεδομένα των σαρώσεων προέκυψε το νέφος σημείων της απεικόνισης του ναυαγίου και παράχθηκε το σχετικό πλέγμα τριγώνων, δηλαδή το μοντέλο επιφανείας του (ABA Surveying, n.d.).

Το δεύτερο παράδειγμα αφορά το πλοίο **City of Adelaide**. Πρόκειται για ένα ταχύ ιστιοπλοϊκό, το οποίο καθελκύστηκε το 1864. Μέχρι το 1887 πραγματοποιούσε δρομολόγια για την μεταφορά επιβατών και εμπορευμάτων μεταξύ Βρετανίας και Αυστραλίας. Από το 1923 έως το 1948 περιήλθε στην υπηρεσία του Βασιλικού Ναυτικού του Ηνωμένου Βασιλείου με το όνομα HMS Carrick. Στα τέλη του 20^{ου} αιώνα χαρακτηρίστηκε ως ιστορικό πλοίο και το Σκωτσέζικο Ναυτικό Μουσείο ανέλαβε την συντήρησή του μέχρι το 2010, οπότε αποφασίστηκε η μεταφορά του στο λιμάνι της Αδελαΐδας στην Αυστραλία και η λειτουργία του εκεί ως μουσείου. Πριν το ενδεχόμενο της αποικοδόμησής του, πραγματοποιήθηκε η τρισδιάστατη σάρωσή του (Εικόνα 3.28). Ο σαρωτής laser συγκέντρωσε 3.5 δισεκατομμύρια σημεία σε ένα νέφος σημείων, που δημιουργεί την τρισδιάστατη εικόνα του αντικειμένου με ακρίβεια 2mm. Ακόμη πραγματοποιήθηκε επίθεση φωτογραφιών επί αυτού (ScARF, n.d.).



Εικόνα 3.28: Αριστερά το πλοίο *City of Adelaide* και δεξιά το τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο του (ScARF, n.d.)

Το τρίτο παράδειγμα αφορά το **RRS Discovery**, το διάσημο πλοίο της Βρετανικής Εθνικής Αποστολής Ανταρκτικής, που μετέφερε μερικούς από τους μεγαλύτερους εξερευνητές της ιστορίας, στην Ανταρκτική. Πλέον είναι ένα εξέχον τουριστικό αξιοθέατο στο Dundee της Σκωτίας. Το 2013 πραγματοποιήθηκε η πρώτη ψηφιακή καταγραφή του πλοίου (Εικόνα 3.29), με την χρήση της τρισδιάστατης τεχνολογίας σάρωσης με laser, χωρίς καν να εγκαταλείψει την αποβάθρα. Η σάρωση αυτή, παρήγαγε εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν για την συντήρησή του. Το αποτέλεσμα των εργασιών ήταν ένα φωτορεαλιστικό τρισδιάστατο μοντέλο του εξωτερικού κύτους, του άνω καταστρώματος, ένα τυπωμένο μοντέλο του πλοίου και μια διαδικτυακή εικονική περιήγηση (Urquhart, 2013).



Εικόνα 3.29: Αριστερά το πλοίο *RRS Discovery* (Newsroom, 2016) και δεξιά το τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο του (Urquhart, 2013)

Το τέταρτο παράδειγμα αφορά την τρισδιάστατη αποτύπωση του ιστορικού πλοίου **HMS Victory** με σύγχρονες τεχνικές χαρτογράφησης με laser. Το HMS Victory είναι ένα πλοίο πρώτης τάξεως του Βασιλικού Ναυτικού, παραγγέλθηκε το 1758, καταστράφηκε το 1759 και καθελκύστηκε το 1765. Είναι περισσότερο γνωστό για τον ρόλο του ως ναυαρχίδα του Λόρδου Νέλσον στη μάχη του Τραφάλγκαρ τον Οκτώβριο του 1805. Το 1922, μεταφέρθηκε σε μια αποβάθρα στο Πόρτσμουθ της Αγγλίας και διατηρήθηκε εκεί ως μουσείο. Κατά τις εργασίες αποτύπωσης, χρησιμοποιήθηκε ο σαρωτής Leica HDS6000, ο οποίος μπορεί να μετρά σημεία με πυκνότητα του 1mm. Πάνω από 90 δισεκατομμύρια μετρήσεις έγιναν κατά τη διάρκεια 850 σαρώσεων, διάρκειας τριάμισι λεπτών η καθεμία. Η τεχνολογία χαρτογράφησης laser κατέγραψε 50.000 μετρήσεις το δευτερόλεπτο. Χρησιμοποιήθηκαν επίσης κάμερες HDR Spheron που μπορούν να λάβουν πλήρεις, σφαιρικές εικόνες 360° σε υψηλή ευκρίνεια. Οι τρισδιάστατες σαρώσεις του πλοίου τοποθετήθηκαν δίπλα-δίπλα με τις αρχικές φωτογραφίες, για να βοηθήσουν τους επιστήμονες να χαρτογραφήσουν τα διάφορα σημεία. Αυτά τα σημεία αποτέλεσαν στη συνέχεια τη βάση για την κατασκευή των τρισδιάστατων μοντέλων. Οι ειδικοί μπόρεσαν επίσης να τα χρησιμοποιήσουν ως άξονες για την περιστροφή των σαρώσεων. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο, προκειμένου να δει κανείς το κάτω μέρος του πλοίου και να ελέγξει την ύπαρξη τυχόν ζημιών. Ακόμη δόθηκε η δυνατότητα για εικονική περιήγηση στο πλοίο. Ο τρισδιάστατος χάρτης υψηλής ευκρίνειας του HMS Victory που δημιουργήθηκε, δείχνει κάθε τελευταίο χιλιοστό της διάσημης ναυαρχίδας (Woollaston, 2013).

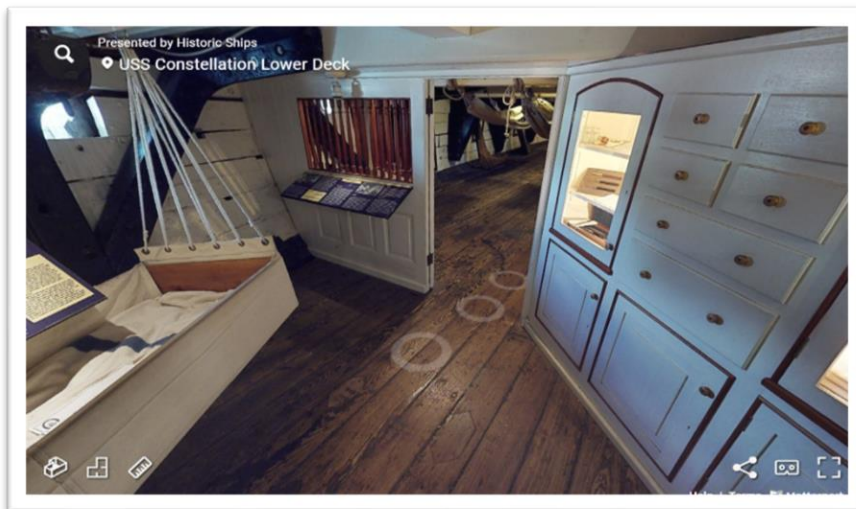
Το πέμπτο παράδειγμα αφορά την ψηφιακή σάρωση του εξωτερικού του πλοίου **USS Constitution**, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία LiDAR. Πρόκειται για ένα σημαντικό κομμάτι της αμερικανικής ιστορίας, δίνοντας μια βασική μάχη στον πόλεμο του 1812 και στεγάζοντας στρατιώτες της Ένωσης κατά τη διάρκεια του Εμφυλίου Πολέμου. Για να σαρωθεί ένα πλοίο αυτού του μεγέθους, τοποθετήθηκαν 12 εστιακές σφαίρες γύρω από το εξωτερικό του. Με την χρήση του σαρωτή laser FARO Focus3D, συλλέχθηκαν τα σημεία κατά τη διάρκεια της σάρωσης και δημιουργήθηκαν ψηφιακά δεδομένα. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά την διάρκεια της ημέρας, προκειμένου να είναι ακριβείς. Η διαδικασία απαιτούσε 12 λεπτά ανά σάρωση σε κάθε γωνία και ο σαρωτής έπρεπε να μπορεί να δει 3 εστιακές σφαίρες από κάθε θέση. Έτσι, χρειάστηκαν περίπου τέσσερις ώρες για να ολοκληρωθεί η ψηφιακή απεικόνιση του εξωτερικού του πλοίου. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν μπορούν να βοηθήσουν στις μελλοντικές επισκευές του USS Constitution και να παράγουν μια εικονική εμπειρία σε όσους δεν μπορούν να επισκεφθούν το ναυπηγείο Charlestown στη Βοστώνη (Kelsey, 2015).

Το έκτο παράδειγμα αφορά το πολεμικό πλοίο **USS Constellation**. Το πλοίο αυτό παραγγέλθηκε από το Πολεμικό Ναυτικό των ΗΠΑ το 1855, παροπλίστηκε 100 χρόνια αργότερα το 1955, χαρακτηρίστηκε Εθνικό Ιστορικό Ορόσημο το 1963 και σήμερα είναι μόνιμα ελλιμενισμένο στο Inner Harbor της Βαλτιμόρης. Το πλοίο είναι το τελευταίο εναπομείναν άθικτο ναυτικό σκάφος από την εποχή του Εμφυλίου Πολέμου. Ενώ βρισκόταν στην αποβάθρα για επισκευές το 2011 και το 2015, έγινε η προσπάθεια της ψηφιακής τεκμηρίωσής του. Κατά τη διάρκεια της αποτύπωσης του πλοίου, πραγματοποιήθηκαν δύο κύκλοι εργασιών το 2011 και το 2015, όπου ελήφθησαν περισσότερες από 225 σαρώσεις εντός και εκτός του πλοίου. Η αρχική σάρωση το 2011

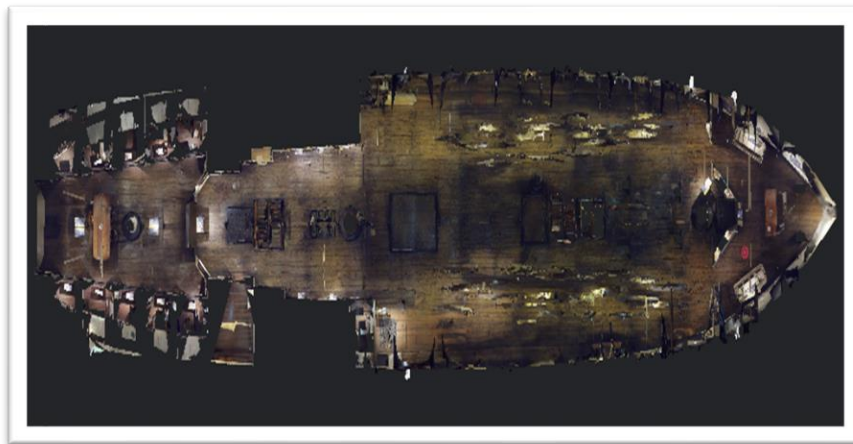
έγινε με έναν στατικό κι έναν φορητό σαρωτή laser. Το 2015 χρησιμοποιήθηκαν τρεις στατικοί σαρωτές και καταγράφηκαν και έγχρωμες σαρώσεις (Lidar Magazine, 2016).

3.5.2 Εσωτερικό πλοίων

Πρώτο παράδειγμα αποτελεί το ιστορικό πλοίο **USS Constellation**, το οποίο έχει αποτυπωθεί και εξωτερικά, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 3.30), παρουσιάζεται ένα κομμάτι από την τρισδιάστατη αποτύπωση του εσωτερικού του, με την χρήση της κάμερας Matterport Pro2 3D. Η περιήγηση χρησιμοποιεί φωτογραφική απεικόνιση και τεχνολογία σάρωσης 360°. Παράλληλα δίνεται η δυνατότητα μετακίνησης της εικόνας για πλήρη προβολή 360°, αλλά και η δυνατότητα μεγέθυνσης και σμίκρυνσης. Αξιοποιώντας τα εικονίδια που δίνονται, μπορεί κανείς να επιλέξει τον τρόπο προβολής και πλοήγησης. Ακόμη μπορεί να επιλέξει να ακολουθεί την κάμερα, όπως καθοδηγεί αυτή, ή να πάρει τον έλεγχο και να εξερευνήσει κάθε γωνιά του ιστορικού πλοίου. Το Matterport επιτρέπει στον χρήστη να δει το μοντέλο είτε σε κάτοψη, είτε τρισδιάστατα, να επιλέξει κάθε φορά το επίπεδο του πλοίου που επιθυμεί να δει, αλλά και να κάνει εναλλαγή μεταξύ των διαφορετικών επιπέδων. Τέλος το μοντέλο αυτό προσφέρει μια εμπειρία εικονικής πραγματικότητας (VR) χρησιμοποιώντας ειδικά γυαλιά, ενώ παρέχεται και η δυνατότητα μέτρησης των αντικειμένων, αλλά και γενικότερα των χώρων του ιστορικού αυτού πλοίου.



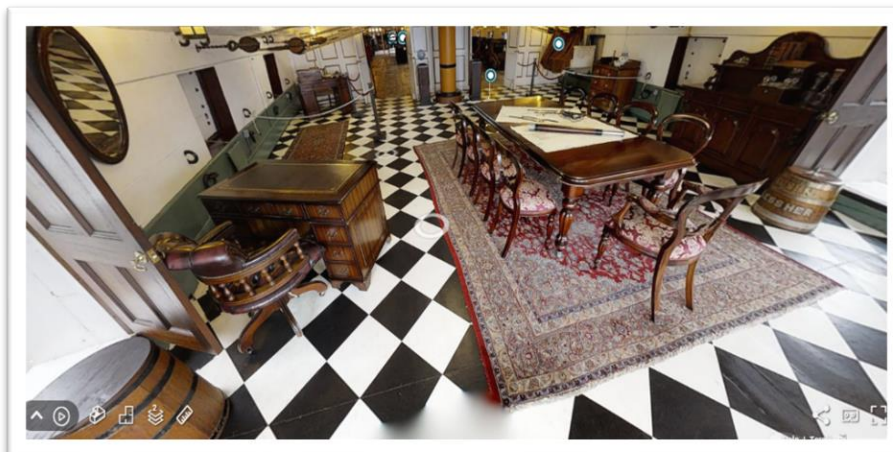
(α)



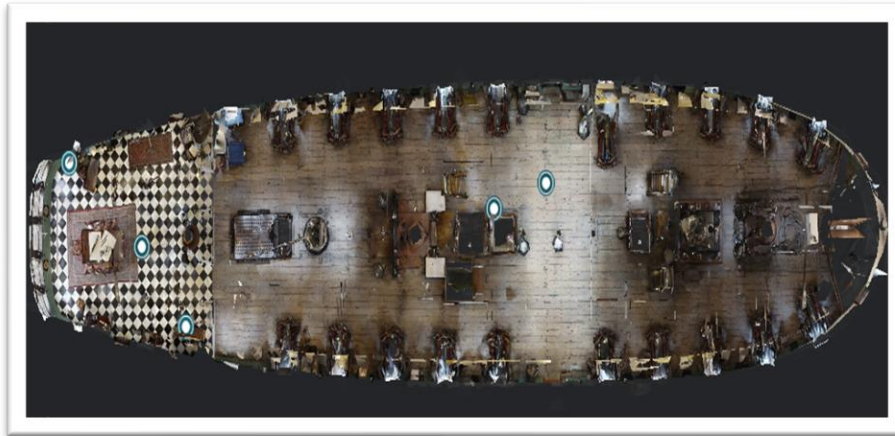
(β)

Εικόνα 3.30: (α) Εικονική περιήγηση στο εσωτερικό του χαμηλότερου επιπέδου του πλοίου USS Constellation, μέσα από το Matterport και (β) Κάτοψη του χαμηλότερου επιπέδου του εσωτερικού του πλοίου USS Constellation, μέσα από το Matterport (Matterport Discover, n.d.)

Δεύτερο παράδειγμα αποτελεί το ιστορικό πλοίο **HMS Trincomalee**. Πρόκειται για μια ιστιοπλοϊκή φρεγάτα που κατασκευάστηκε λίγο μετά το τέλος των Ναπολεόντειων πολέμων. Σήμερα αποτελεί πλωτό μουσείο στο Χάρτλπουλ της Αγγλίας και μέρος του Εθνικού Μουσείου του στόλου του Βασιλικού Ναυτικού. Η σάρωση του εσωτερικού του πλοίου, πραγματοποιήθηκε με την χρήση του Matterport Pro1 3D (Εικόνα 3.31). Οι δυνατότητες περιήγησης στο εσωτερικό του πλοίου, μέσα από το τρισδιάστατο μοντέλο απεικόνισης του Matterport, είναι ίδιες με αυτές που προαναφέρθηκαν και για το ιστορικό πλοίο USS Constellation, με την μόνη διαφορά ότι εδώ έχουν προστεθεί κατά την περιήγηση ορισμένα σημαντικά σημεία, στα οποία μπορεί να σταθεί κανείς. Τα σημεία αυτά συνοδεύονται από ετικέτες πληροφοριών, στις οποίες επισυνάπτονται κείμενα, σύνδεσμοι και περιεχόμενα πολυμέσων.



(α)



(β)

Εικόνα 3.31: (α) Εικονική περιήγηση στο εσωτερικό του δεύτερου επιπέδου του πλοίου HMS Trincomalee, μέσα από το Matterport και (β) Κάτοψη του δεύτερου επιπέδου του εσωτερικού του πλοίου HMS Trincomalee, μέσα από το Matterport (Matterport Discover, n.d.)



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Κεφάλαιο 4: Επεξεργασία τρισδιάστατων δεδομένων

4.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο γίνεται μία θεωρητική παρουσίαση ορισμένων βασικών διαδικασιών που ακολουθούνται για την επεξεργασία των τρισδιάστατων νεφών σημείων, ενώ αναλύεται και η χρησιμότητα, αλλά και ο τρόπος αξιοποίησης αυτών.

4.2 Διαδικασία επεξεργασίας νεφών σημείων

Τα τρισδιάστατα δεδομένα, ονομάζονται αλλιώς και νέφη σημείων. Αναλυτικότερα, ως νέφος σημείων ορίζεται:

Η απλούστερη μορφή ενός τρισδιάστατου μοντέλου. Πρόκειται για την συλλογή μεμονωμένων σημείων στον τρισδιάστατο χώρο, όπου καθένα από αυτά έχει συντεταγμένες X, Y, Z και ενδέχεται να λαμβάνει και χρωματικά δεδομένα RGB.

Ένα από τα βασικά βήματα της διαδικασίας αποτύπωσης μέσω της σάρωσης γίνεται μετά τις εργασίες στο πεδίο. Ο σαρωτής αποτυπώνει αρκετά εκατομμύρια σημεία, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η επεξεργασία τους με την βοήθεια εξειδικευμένων προγραμμάτων για την παραγωγή του τελικού αποτελέσματος (σημεία, επιφάνειες, τρισδιάστατο μοντέλο). Για τον σκοπό αυτό απαιτούνται συνήθως ειδικά λογισμικά επεξεργασίας νέφους σημείων. Φυσικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και απλά προγράμματα CAD με χαμηλότερο κόστος απόκτησης και ευκολία χρήσης. Ωστόσο βασικό μειονέκτημα των προγραμμάτων αυτών είναι ότι δεν μπορούν να επιτελέσουν όλες τις λειτουργίες ενός λογισμικού επεξεργασίας νέφους, ενώ παράλληλα υπάρχουν και ορισμένοι περιορισμοί σχετικά με τον αριθμό των σημείων που μπορούν να διαχειριστούν. Η διαδικασία που ακολουθείται σε γενικές γραμμές για την επεξεργασία ενός νέφους σημείων που παράγει ένας σαρωτής, είναι η εξής:

1. Φόρτωση
2. Συνένωση

Τα δεδομένα που συλλέγονται από ένα φορητό σύστημα χαρτογράφησης που κρατιέται στο χέρι, συνενώνονται αυτόματα. Ωστόσο εάν απαιτούνται περισσότερες από μία αποστολές σάρωσης, γίνεται μια διαδικασία ευθυγράμμισης και συνένωσης μεταξύ των διαφόρων νεφών σάρωσης για να ληφθεί το τελικό τρισδιάστατο μοντέλο. Κάθε νέφος σημείων βρίσκεται στο αυθαίρετο σύστημα αναφοράς του σαρωτή. Για την ορθή αναπαράσταση του συνόλου των νεφών, όλα αυτά τα τοπικά νέφη σημείων πρέπει να μετασχηματιστούν σε ένα ενιαίο-κοινό σύστημα συντεταγμένων. Η διαδικασία αυτή αναφέρεται συνήθως ως συνένωση (registration, alignment). Η συνένωση πραγματοποιείται με την ύπαρξη και αναγνώριση στοιχείων συνταύτισης (ομόλογων

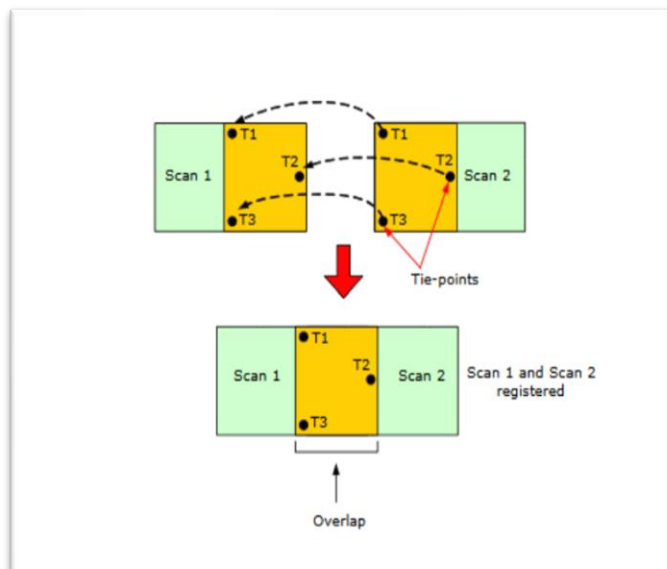
σημείων) στα διαφορετικά τοπικά συστήματα συντεταγμένων (δηλαδή στα διαφορετικά νέφη σημείων που πρόκειται να συνενωθούν). Τα στοιχεία αυτά μπορεί να είναι, είτε ειδικοί στόχοι, είτε φυσικά διακριτά σημεία. Εάν είναι γνωστές οι συντεταγμένες ενός σημείου στο σύστημα αναφοράς του εκάστοτε νέφους σημείων, μπορούν να υπολογιστούν οι παράμετροι του μετασχηματισμού, μεταξύ των διαφορετικών νεφών σημείων. Ο μετασχηματισμός συντεταγμένων είναι μια μαθηματική διαδικασία, η οποία μετασχηματίζει τις συντεταγμένες ενός σημείου από ένα σύστημα συντεταγμένων στις συντεταγμένες του ίδιου σημείου σε ένα δεύτερο σύστημα συντεταγμένων. Σε γενικές γραμμές, το αποτέλεσμα ενός μετασχηματισμού σε δισδιάστατο (2D) ή τρισδιάστατο (3D) αντικείμενο, μπορεί να ποικίλλει από μια απλή αλλαγή της θέσης και του προσανατολισμού, χωρίς αλλαγή στο σχήμα ή το μέγεθος, μέχρι ένα συντελεστή ενιαίας κλίμακας (δεν υπάρχει αλλαγή στο σχήμα), ή μέχρι και σε αλλαγές στο σχήμα και το μέγεθος. Υπάρχουν διάφορα είδη μετασχηματισμών στον τρισδιάστατο χώρο, ωστόσο αυτός που ενδιαφέρει ιδιαίτερα είναι ο τρισδιάστατος μετασχηματισμός στερεού σώματος, καθώς αποτελεί τη μαθηματική περιγραφή του μοντέλου της συνένωσης των νεφών σημείων (Πατιάς, 1991, Καρράς, 1998).

Ο προσδιορισμός της σχετικής θέσης δύο νεφών σημείων περιγράφεται μέσω του μαθηματικού μοντέλου του τρισδιάστατου μετασχηματισμού στερεού σώματος (3D rigid body transformation). Από την σάρωση του αντικειμένου σε δύο διαφορετικές θέσεις προκύπτουν δύο νέφη σημείων, κάθε ένα από τα οποία θεωρείται ως στερεό σώμα, δεδομένου ότι μετά τον μετασχηματισμό αυτά δεν μεταβάλλονται κατά σχήμα και μέγεθος (Κυπαρίσση, 2011). Γεωμετρικά το στερεό σώμα ορίζεται ως ένα τρισδιάστατο σημειοσύνολο XYZ, το οποίο μετασχηματιζόμενο, δεν μεταβάλλεται κατά σχήμα και μέγεθος (Καρράς, 1998). Υπό τον παραπάνω ορισμό το πρόβλημα της συνένωσης νεφών σημείων μπορεί να περιγραφεί με το μαθηματικό μοντέλο του τρισδιάστατου μετασχηματισμού στερεού σώματος. Έχοντας ένα τρισσορθογώνιο σύστημα με τους τρεις άξονες XYZ, ο μετασχηματισμός προκύπτει πως διαθέτει έξι (6) βαθμούς ελευθερίας εκφραζόμενους από έξι (6) παραμέτρους. Κάθε γνωστό σημείο και στα δυο συστήματα προσφέρει τρεις εξισώσεις, με αποτέλεσμα να χρειάζονται τουλάχιστον δύο σημεία για τον υπολογισμό των έξι συντελεστών του μετασχηματισμού που απαιτούνται. Παρ' όλ' αυτά δεν επαρκούν δύο σημεία για τον περαιτέρω υπολογισμό αλλά τρία σημεία κατ' ελάχιστο. Ο λόγος είναι πως με τη συμμετοχή στην επίλυση μόνο δύο σημείων παραμένει η στροφή περί την ευθεία που ορίζουν τα δύο σημεία που χρησιμοποιούνται, παραμένει δηλαδή ένας βαθμός ελευθερίας χωρίς δέσμευση (Κυπαρίσση, 2011). Τα σημεία μεταξύ των διαφορετικών σαρώσεων, θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να είναι ομόλογα.

Ο κυριότερος αλγόριθμος που χρησιμοποιείται σήμερα για την συνένωση νεφών σημείων, είναι αυτός του επαναληπτικά εγγύτερου σημείου (ICP-Iterative Closest Point). Ο αλγόριθμος αυτός, μετασχηματίζει το ένα νέφος σημείων έτσι ώστε να εφαρμόζει όσο το δυνατόν καλύτερα στο άλλο, ελαχιστοποιώντας τις αποστάσεις μεταξύ των σημείων του ενός νέφους και των σημείων του άλλου νέφους. Χρησιμοποιείται για την εύρεση και εξαγωγή των παραμέτρων του μετασχηματισμού μεταξύ δύο συνόλων σημείων (το σύνολο σημείων αναφοράς και το προς μετασχηματισμό σύνολο σημείων).

Ένας πρώτος τρόπος συνένωσης των νεφών σημείων είναι με την χρήση προσημασμένων στόχων (σφαίρες, τεχνητά πρότυπα). Πρόκειται για έναν τρόπο που

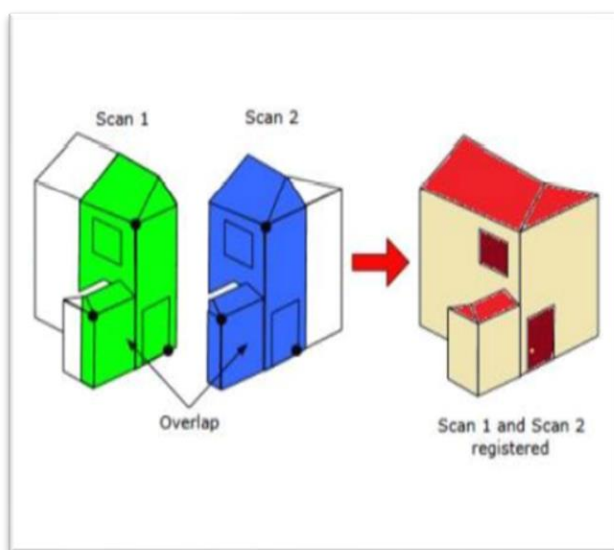
προσφέρει ακριβή αντιστοιχία σημείων. Για να γίνει η συνένωση απαιτούνται τουλάχιστον τρία σημεία (στόχοι) τα οποία θα πρέπει να βρίσκονται σε σημείο ορατό και από τις δύο σαρώσεις (overlap). Πρέπει να σημειωθεί ότι οι στόχοι δεν πρέπει να βρίσκονται στην ίδια ευθεία (Εικόνα 4.1) (Reshetyuk, 2009).



Εικόνα 4.1: Συνένωση σαρώσεων με την χρήση στόχων (Reshetyuk, 2009)

Ένας δεύτερος τρόπος είναι με τον εντοπισμό φυσικών στοιχείων (ακμές κτιρίων, γωνίες παραθύρων, κ.λ.π.) στην περιοχή ή στο αντικείμενο αποτύπωσης. Αυτός ο τρόπος συνένωσης δύο νεφών σημείων προϋποθέτει την ύπαρξη επαρκούς επικάλυψης των νεφών. Αν τα δύο νέφη έχουν αρκετή επικάλυψη της τάξης του 30-40% τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος ICP για τη συνένωση των σετ των δεδομένων. Η τεχνική αυτή απαιτεί από το χρήστη να επιλέξει χειροκίνητα τουλάχιστον τρία ομόλογα σημεία στα προς συνένωση νέφη σημείων. Εφόσον τα σημεία αυτά ποτέ δεν θα είναι ακριβώς τα ίδια ο αλγόριθμος επαναληπτικά ελέγχει την απόσταση μεταξύ όλων των σημείων των νεφών και εκτιμά τον μετασχηματισμό έτσι ώστε να συνενώσει τα σύνολα των δεδομένων με το μικρότερο σφάλμα.

Ένας τρίτος τρόπος είναι η συνταύτιση των γεωμετρικών επιφανειών των δύο σαρώσεων, όπου πραγματοποιείται η μετακίνηση και η περιστροφή του ενός νέφους σημείων, ως προς το άλλο, στον τρισδιάστατο χώρο (Εικόνα 4.2).



Εικόνα 4.2: Συνένωση σαρώσεων με συνταύτιση γεωμετρικών επιφανειών (Reshetyuk, 2009)

Ένας τρόπος αυτόματης συνένωσης των νεφών σημείων που προκύπτουν χρησιμοποιώντας τα φορητά συστήματα χαρτογράφησης της εταιρίας GeoSLAM, είναι η χρήση ομόλογων σημείων μεταξύ των σαρώσεων. Αναλυτικότερα κατά την διάρκεια της σάρωσης, ο σαρωτής αφήνεται σε στατική θέση σε τέσσερα ή περισσότερα σημεία για περίπου 10 δευτερόλεπτα. Σε επόμενες σαρώσεις, ο σαρωτής θα πρέπει να τοποθετηθεί ακριβώς πάνω από τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν και στην πρώτη σάρωση (ομόλογα σημεία). Συνεπώς οι δύο σαρώσεις έχουν επικαλυπτόμενες περιοχές. Τα σημεία αναγνωρίζονται αυτόματα σε κάθε σάρωση. Ένας τρόπος χειροκίνητης συνένωσης των νεφών σημείων είναι με τον ορισμό του ενός ως νέφος αναφοράς και την μετακίνηση και περιστροφή του άλλου ως προς αυτό. Ακόμη η συνένωση μπορεί να πραγματοποιηθεί με την επιλογή ενός σημείου στο νέφος αναφοράς και την επιλογή του ίδιου σημείου στο άλλο νέφος (GeoSLAM, 2022).

3. Γεωαναφορά

Η διαδικασία της γεωαναφοράς συνίσταται στον προσανατολισμό του νέφους σημείων σε πραγματικές συντεταγμένες. Κατά τη σάρωση ενός αντικειμένου στο χώρο και την εισαγωγή του στον υπολογιστή δεν έχει τις πραγματικές του συντεταγμένες αλλά τις συντεταγμένες του σαρωτή. Γεωαναφορά είναι η διαδικασία κατά την οποία το αντικείμενο ενδιαφέροντος μεταφέρεται σε ένα γνωστό σύστημα συντεταγμένων, είτε εθνικό είτε τοπικό. Η αποτύπωση με την βοήθεια σαρωτών δίνει ένα σημαντικό πλεονέκτημα. Καθώς το τελικό προϊόν στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ένα μοντέλο στον υπολογιστή και όχι ένα προσανατολισμένο σχέδιο, φαίνεται να μην υπάρχει ανάγκη για ένταξη των μετρήσεων σε κάποιο σύστημα αναφοράς. Η σάρωση με την χρήση laser, χρησιμοποιεί ένα αποστασιόμετρο laser και δίνει τις πραγματικές διαστάσεις των αντικειμένων. Κατά συνέπεια, τα αντικείμενα αποτυπώνονται με το πραγματικό τους

μέγεθος, χωρίς να απαιτείται διόρθωση λόγω κλίμακας. Η τοποθέτηση του αντικειμένου στην σωστή θέση του στον χώρο, επιτυγχάνεται με την εύρεση των συντεταγμένων για τουλάχιστον τρία σημεία. Συνήθως χρησιμοποιούνται προσημασμένοι στόχοι, ή φυσικά στοιχεία. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν για την συνένωση των νεφών σημείων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την γεωαναφορά, εφόσον είναι γνωστές οι συντεταγμένες τους. Γενικά η εύρεση γνωστών συντεταγμένων επιτυγχάνεται είτε με τον εντοπισμό σημείων με ήδη γνωστές συντεταγμένες στον χώρο, είτε με την μέτρηση των συντεταγμένων κάποιων σημείων με την χρήση τοπογραφικών μεθόδων (GPS, total station, κ.λ.π.). Σε κάθε περίπτωση προκειμένου να πραγματοποιηθεί η γεωαναφορά ενός νέφους σημείων, πρέπει να είναι γνωστά τα σημεία στο σύστημα αναφοράς του σαρωτή, καθώς και στο επιθυμητό σύστημα συντεταγμένων (WGS' 84, ΕΓΣΑ' 87). Απαραίτητη είναι η επιλογή τουλάχιστον τριών σημείων. Τα σημεία στο σύστημα αναφοράς του σαρωτή, προκύπτουν είτε μέσα από την επιλογή τους, εφόσον έχουν σαρωθεί και απεικονίζονται πάνω στο νέφος σημείων, είτε κατά την λήψη τους σε ένα αρχείο κατά την διάρκεια των μετρήσεων.

Τα φορητά συστήματα χαρτογράφησης της εταιρίας GeoSLAM, που χρησιμοποιούνται και για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιούν μία βάση αναφοράς, που τοποθετείται πάνω από το κάθε επιθυμητό σημείο σε στατική θέση για περίπου 10 δευτερόλεπτα και μετρώνται οι συντεταγμένες του στο σύστημα αναφοράς του σαρωτή. Οι ίδιες συντεταγμένες μετρώνται και με κάποιο άλλον τρόπο (GPS, total station) στο επιθυμητό σύστημα αναφοράς. Από την στιγμή που είναι γνωστές οι συντεταγμένες των σημείων στα δύο συστήματα συντεταγμένων (σύστημα αναφοράς σαρωτή και επιθυμητό σύστημα συντεταγμένων), πραγματοποιείται μετασχηματισμός και το νέφος που προκύπτει είναι πια γεωαναφερμένο. Ένας άλλος τρόπος, ο οποίος βρίσκει εφαρμογή μόνο σε εξωτερικούς χώρους που υπάρχει ορατότητα με τους δορυφόρους, είναι με την χρήση ενός δέκτη GNSS. Ουσιαστικά ο μετασχηματισμός μετατρέπει τα αρχικά δεδομένα από το σύστημα (σύστημα συντεταγμένων του σαρωτή), σε ένα παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων, ευθυγραμμίζοντας την τροχιά του σαρωτή και του δέκτη GNSS (GeoSLAM, 2022).

4. Απαλοιφή θορύβου

Ως θόρυβος ορίζεται:

Η αποτύπωση λανθασμένων σημείων κατά την διάρκεια της σάρωσης, που αποτελούν περιττή πληροφορία, διαστρεβλώνουν την πραγματική εικόνα της οντότητας που αποτυπώνεται και συχνά αυξάνουν τον χρόνο της επεξεργασίας.

Ο θόρυβος προκαλείται είτε από την κίνηση των ανθρώπων και των οχημάτων στο πεδίο σάρωσης, όταν για παράδειγμα αποτυπώνονται οδικοί άξονες και αστικές περιοχές. Ακόμη μπορεί να προκληθεί από οντότητες που εμποδίζουν το πεδίο σάρωσης

(βλάβιση) και από επιφάνειες με υψηλή αντανάκλαση (γυαλιστερές επιφάνειες, νερό, κάτοπτρα). Τέλος μπορεί να προκληθεί από ακμές αντικειμένων που αντανακλούν μέρος της ακτίνας laser, σχηματίζοντας εικόνα για τα αντικείμενα από την πίσω πλευρά τους. Πρόκειται για το φαινόμενο ακμής (edge effect). Τα παραπάνω σφάλματα μπορούν να απαλειφθούν και να διορθωθούν μέσα από το λογισμικό επεξεργασίας του νέφους σημείων, είτε αυτόματα μέσω ειδικών αλγορίθμων, είτε χειροκίνητα μέσω της επιλογής και διαγραφής των σημείων. Πρακτικά πρώτα γίνεται ένας αυτόματος καθαρισμός και ακολουθεί η χειροκίνητη διαδικασία. Η διαγραφή των περιττών σημείων επιταχύνει την διαδικασία της επεξεργασίας. Ακόμη μπορεί να γίνει υποδειγματοληψία των σημείων του νέφους. Η πυκνότητα των σημείων μπορεί να υπερβαίνει την απαραίτητη για την δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου. Η υποδειγματοληψία γίνεται πάντα έως ότου να μην επηρεάζεται η τελική ακρίβεια και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Για τον συγκεκριμένο σκοπό χρησιμοποιούνται συνήθως εξειδικευμένα λογισμικά επεξεργασίας νέφους σημείων.

5. Δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου

Σχεδόν όλα τα προγράμματα επεξεργασίας νεφών σημείων, δίνουν την δυνατότητα στον χρήστη να δημιουργεί επιφάνειες από τα σημεία. Οι επιφάνειες αυτές κατασκευάζονται μέσω τρισδιάστατων τριγώνων που δημιουργούνται μεταξύ των σημείων του νέφους.

6. Εξαγωγή στοιχείων

Είναι δυνατή η εξαγωγή του τρισδιάστατου μοντέλου για επεξεργασία σε άλλα λογισμικά. Ο χρήστης μπορεί να σχεδιάσει μία γραμμή, ενώνοντας τα σημεία του νέφους που την ορίζουν. Αξίζει να σημειωθεί πως έχουν αναπτυχθεί λογισμικά που αυτοματοποιούν την διαδικασία της ψηφιοποίησης, ώστε να μην είναι απαραίτητη η χειροκίνητη επέμβαση του χρήστη. Τα προγράμματα επεξεργασίας νεφών σημείων, δίνουν την δυνατότητα στον χρήστη να δημιουργεί επιφάνειες από σημεία, μέσω τρισδιάστατων τριγώνων. Η εξαγωγή όγκων από τα νέφη είναι μία εύκολη διαδικασία, εφόσον μπορούν να οριστούν επιφάνειες που περικλείουν αυτούς τους όγκους. Η μέτρηση όγκων μέσα από ένα νέφος σημείων, μπορεί να παρέχει υψηλότερη ακρίβεια σε σχέση με άλλες συμβατικές μεθόδους, εφόσον το νέφος είναι αρκετά πυκνό. Ακόμη μπορούν να μετρηθούν αποστάσεις και γωνίες.

Τα παραπάνω βήματα αποτελούν την γενική διαδικασία επεξεργασίας ενός νέφους σημείων και εφαρμόζονται είτε όλα, είτε μέρος τους ανάλογα με τους σκοπούς της αποτύπωσης. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου μπορεί να απαιτηθεί και η χρωματική επεξεργασία του νέφους.

4.3 Χρησιμότητα νέφων σημείων

Τα νέφη σημείων προσφέρουν μία ακριβή και ολοκληρωμένη ψηφιακή εικόνα ενός χώρου, μιας επιφάνειας ή ενός αντικειμένου του πραγματικού κόσμου. Αυτό σημαίνει ότι βρίσκουν εφαρμογή σε ένα μεγάλο εύρος πεδίων.

Μπορούν να θεωρηθούν από μόνα τους μοντέλα, που απεικονίζουν ένα αντικείμενο, χώρο ή κατασκευή, όπως είναι στην πραγματικότητα. Ωστόσο, τις περισσότερες φορές, μέσα από την δημιουργία τριγωνικών πλεγμάτων σε αυτά, μετατρέπονται σε μοντέλα επιφανείας. Αυτό συμβαίνει επειδή με αυτά τα μοντέλα λειτουργούν τα περισσότερα προγράμματα.

Προσφέρουν την δυνατότητα γρήγορης δημιουργίας μιας κάτοψης για μια κατασκευή. Αυτή η μέθοδος είναι ταχύτερη και ακριβέστερη από την χρήση άλλων εργαλείων έρευνας, όπως είναι για παράδειγμα οι ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί. Ένας τρόπος δημιουργίας μιας κάτοψης από ένα νέφος σημείων, είναι με την προβολή αυτού και την σχεδίαση της κάτοψης με μη αυτόματο τρόπο, χρησιμοποιώντας ένα λογισμικό CAD, ή ένα λογισμικό σχεδίασης κατόψεων.

Ένας άλλος τρόπος αξιοποίησης ενός νέφους σημείων, είναι η δημιουργία ενός μοντέλου δομικών πληροφοριών (BIM-Building Information Model), ενός έργου. Το BIM είναι μια ψηφιακή αναπαράσταση των φυσικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών ενός έργου. Ένα μοντέλο BIM είναι ένας τρόπος γνώσης και πηγή πληροφοριών, σχετικά με ένα έργο, που αποτελεί μια αξιόπιστη βάση για αποφάσεις που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Υπάρχει από την πρώτη σύλληψη του έργου, μέχρι την κατεδάφιση. Εφόσον ένα νέφος σημείων αντικατοπτρίζει τις υπάρχουσες συνθήκες ενός έργου με ακρίβεια και περιεκτικότητα, αυτό σημαίνει ότι προσφέρει όλα τα ακατέργαστα χωρικά δεδομένα που χρειάζονται για να δημιουργηθεί ένα νέο μοντέλο πληροφοριών γι' αυτό ή την ενημέρωση ενός υπάρχοντος μοντέλου. Αυτό δίνει την δυνατότητα να συγκριθεί η υπάρχουσα κατάσταση του έργου, με τα σχέδια, προκειμένου να γίνει έλεγχος για υπάρχοντα σφάλματα. Για να δημιουργηθεί ένα μοντέλο δομικών πληροφοριών από ένα νέφος σημείων, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα εξειδικευμένο λογισμικό μοντελοποίησης, για να δημιουργηθεί το μοντέλο πάνω από τα δεδομένα του νέφους. Κάποια λογισμικά παρέχουν την δυνατότητα στο χρήστη να το κάνει αυτό χειροκίνητα, σχεδιάζοντας στοιχεία και κωδικοποιώντας πληροφορίες όπως για παράδειγμα το υλικό κατασκευής. Άλλα λογισμικά μπορούν να αυτοματοποιήσουν εν μέρει τη διαδικασία αναγνωρίζοντας επιφάνειες, αντικείμενα, ακόμη και μηχανολογικά, ηλεκτρολογικά και υδραυλικά στοιχεία, χρησιμοποιώντας τεχνητή νοημοσύνη για τη δημιουργία ενός μοντέλου. Αυτές οι ημιαυτόματες διαδικασίες μπορεί να είναι πολύ ακριβείς και πιο γρήγορες από την χειροκίνητη σχεδίαση, ωστόσο μπορεί να χάσουν κάποια στοιχεία. Συνεπώς θα πρέπει πάντα να ελέγχεται η διαδικασία και να γίνεται κάποια χειροκίνητη διόρθωση. Εάν καταγράφονται νέφη σημείων τακτικά ενώ προχωρά ένα έργο, αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση των εργασιών που ολοκληρώθηκαν, καθώς και το πότε αυτές ολοκληρώθηκαν, αλλά και που. Υπάρχουν μη αυτόματες μέθοδοι για την παρακολούθηση της προόδου ενός έργου σε ένα νέφος σημείων και προηγμένες αυτοματοποιημένες μέθοδοι. Μπορεί κανείς να μοιραστεί τα ακατέργαστα δεδομένα του νέφους σημείων με τους ενδιαφερόμενους, για να τους δώσει πρόσβαση σε μια γρήγορη, υψηλού επιπέδου επισκόπηση της προόδου του έργου σε

οποιοδήποτε σημείο από την έναρξή του. Ακόμη μπορεί να χρησιμοποιήσει αυτόματα εργαλεία για να παρέχει πιο αναλυτικές ενημερώσεις, όπως για παράδειγμα ένα λογισμικό που αναλύει αυτόματα το νέφος σημείων, για να αναγνωρίσει συγκεκριμένα αντικείμενα και φτάνει ακόμη και στην παρακολούθηση της εργασίας σε σχέση με συγκεκριμένες συναλλαγές, χρονοδιαγράμματα και προϋπολογισμούς.

Ένα νέφος σημείων μπορεί να χρησιμοποιηθεί, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα λειτουργικό τρισδιάστατο μοντέλο ενός στοιχείου, γνωστό ως ψηφιακό δίδυμο (digital twin). Σε ένα ιδανικό ψηφιακό δίδυμο, οποιεσδήποτε αλλαγές στο στοιχείο του πραγματικού κόσμου, αυτόματα μεταφέρονται στο ψηφιακό δίδυμο και αντίστροφα. Αυτό σημαίνει ότι τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως τα μοντέλα δομικών πληροφοριών, για την ανασκόπηση πληροφοριών σχετικά με το στοιχείο ή για την εκτέλεση προηγμένων εργασιών όπως η παρακολούθηση, η προσομοίωση, η ανάλυση και ο έλεγχος. Η δημιουργία ενός ψηφιακού δίδυμου είναι μια πολύπλοκη διαδικασία, γι' αυτό πολλές εταιρίες έχουν αναπτύξει διαδικασίες για την δημιουργία τους. Αναλυτικότερα καταγράφουν το στοιχείο, το ψηφιοποιούν και αναπτύσσουν ένα ψηφιακό δίδυμο που ταιριάζει στις προδιαγραφές και περιλαμβάνει τα δεδομένα που χρειάζεται ο χρήστης ζωντανά στο μοντέλο (γεωμετρικά δεδομένα, δεδομένα θερμοκρασίας κ.λπ.).

Το νέφος σημείων αλλά και το τρισδιάστατο μοντέλο που δημιουργείται από αυτό, προσφέρουν την δυνατότητα πραγματοποίησης επιμετρήσεων (αποστάσεις, εμβαδά, όγκοι) με ακρίβεια και στις τρεις διαστάσεις.

Χρησιμοποιείται επίσης για τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων CAD, για κατασκευασμένα εξαρτήματα στην βιομηχανία, για μετρολογία και επιθεώρηση ποιότητας και για μια πληθώρα εφαρμογών απεικόνισης και κινούμενων εικόνων. Αναλυτικότερα, μέρη και συστατικά στοιχεία ενός αντικειμένου μπορούν να σαρωθούν και να μετατραπούν σε τρισδιάστατα μοντέλα και έπειτα να εισαχθούν σε προγράμματα σχεδίασης CAD, όπου πραγματοποιείται ο χειρισμός της σχεδίασης του αντικειμένου.

Στα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών, τα νέφη σημείων είναι μία από τις πηγές που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων του εδάφους. Χρησιμοποιούνται επίσης για τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων πόλεων.

Στην διατήρηση της πολιτιστικής κληρονομιάς, τα δεδομένα του νέφους σημείων, μπορούν να παρέχουν ακριβή δεδομένα σχετικά με την υπάρχουσα κατάσταση ενός χώρου πολιτιστικής κληρονομιάς, για να βοηθήσουν στο σχεδιασμό της συντήρησης και της αποκατάστασής του. Το μοντέλο δομικών πληροφοριών σε εφαρμογές που αφορούν την πολιτιστική κληρονομιά (HBIM-Heritage Building Information Modelling), παρέχει την γεωμετρική γνώση και την ιστορία του κτιρίου, μέσω της αξιολόγησης της κατάστασης διατήρησης των υλικών, όπου αντιπροσωπεύει έναν τρισδιάστατο κατάλογο προσανατολισμένο στην τεκμηρίωση και τον προγραμματισμό των επεμβάσεων συντήρησης. Η δυνατότητα εφαρμογής της τεχνολογίας BIM στην ιστορική κληρονομιά, είναι μια ενδιαφέρουσα πρόκληση στον τομέα της τρισδιάστατης μοντελοποίησης. Αυτός ο όρος υποδηλώνει έναν νέο τρόπο μοντελοποίησης υπαρχόντων κτιρίων, χρησιμοποιώντας μια διαδικασία BIM που παράγει έξυπνα μοντέλα, τα οποία περιέχουν και διαχειρίζονται κάθε είδους πληροφορίες και μπορούν να ενημερωθούν, να



αντικατασταθούν και να προστεθούν. Τέτοια μοντέλα σχετίζονται με τα στοιχεία του χώρου πολιτιστικής κληρονομιάς και περιλαμβάνουν τις γεωμετρικές και αναγνωριστικές πληροφορίες τους, καθώς και όλες τις φυσικές ιδιότητες που τα περιγράφουν καλύτερα.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

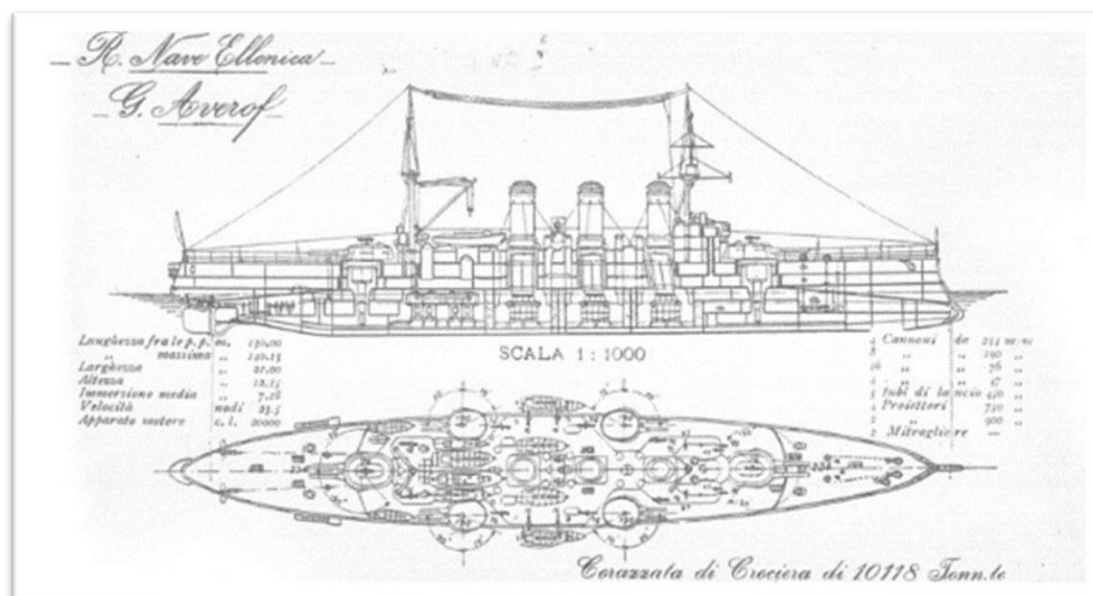
Κεφάλαιο 5: Το αντικείμενο μελέτης Θ/Κ «Γ.Αβέρωφ»

5.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, παρέχονται κάποιες ιστορικές και κατασκευαστικές πληροφορίες, του αντικειμένου μελέτης της παρούσας εργασίας, που είναι το Θ/Κ «Γ. Αβέρωφ», ενώ παράλληλα γίνεται μία γνωριμία με τους εσωτερικούς χώρους του πλοίου, όπου παρέχονται και ορισμένες κατόψεις, για την κατανόηση της διάταξής τους σε αυτό.

5.2 Ιστορικά στοιχεία

Το θωρακισμένο καταδρομικό «Γεώργιος Αβέρωφ» (Θ/Κ «Γ. Αβέρωφ»), επίσης κοινώς γνωστό ως «Θωρηκτό Αβέρωφ», αποτελεί ιστορικό πλοίο της νεότερης Ελλάδας. Παρά το γεγονός ότι αναφέρεται ως θωρηκτό, είναι θωρακισμένο καταδρομικό, κλάσης Pisa. Ναυπηγήθηκε κατά την περίοδο 1908-1911, στα ναυπηγεία του Ορλάντο, στο Λιβόρνο της Ιταλίας με βάση το σχέδιο του ναυπηγού Ιωσήφ Ορλάντο και εντάχθηκε στο τότε Ελληνικό Βασιλικό Ναυτικό (Εικόνα 5.1).

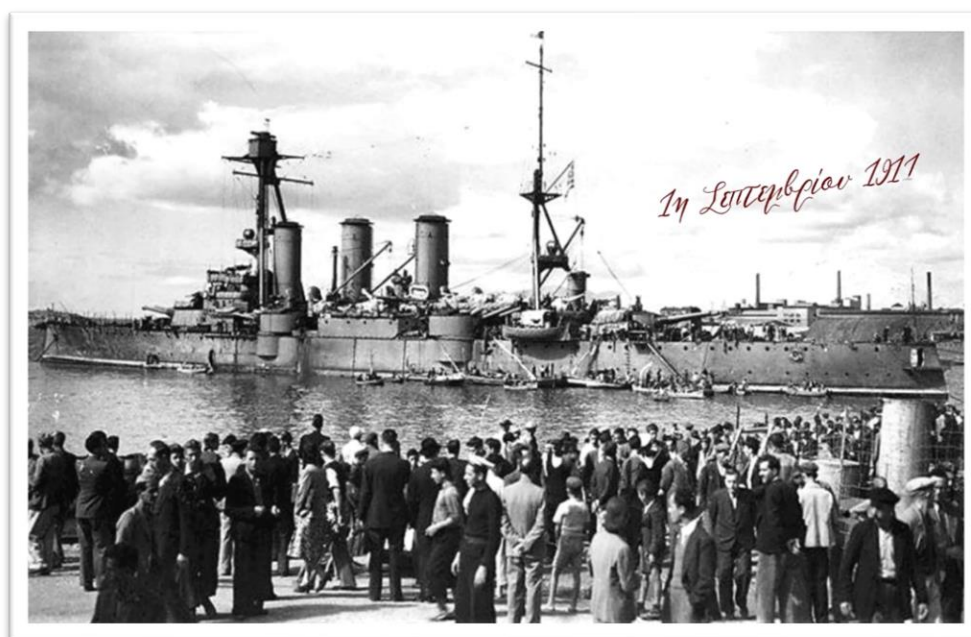


Εικόνα 5.1: Σχέδιο της μηκοτομής και της κάτοψης του Θ/Κ «Γ. Αβέρωφ», περί το 1905 (Γαρδίκη-Κατσιαδάκη & Χαρωνίτης, 2002)

Το πλοίο φέρει το όνομα του Έλληνα επιχειρηματία και ενός από τους μεγαλύτερους εθνικούς ευεργέτες, Γεωργίου Αβέρωφ, σύμφωνα με την διαθήκη του. Η τότε κυβέρνηση του Κυριακούλη Μαυρομιχάλη, δαπάνησε 23,650,000 χρυσές δραχμές για την απόκτησή του. Το ποσό της προκαταβολής (1/3 της τιμής) προήλθε από τη διαθήκη του Γεωργίου Αβέρωφ και ανέρχονταν σε 8,000,000 εκατομμύρια χρυσές δραχμές, ενώ το υπόλοιπο ποσό των 15,650,000 χρυσών δραχμών καλύφθηκε από το Ταμείο Εθνικού Στόλου (Τ.Ε.Σ.), στο οποίο συγκεντρώθηκε το ποσό από εράνους μεταξύ όλων των Ελλήνων,

όπου και αν βρίσκονταν ανά τον κόσμο. Η διαθήκη του Γεωργίου Αβέρωφ όριζε ότι το 1/5 της περιουσίας του (20 μερίδια) παραχωρείται για τη ναυπήγηση ενός ισχυρού καταδρομικού πλοίου που θα φέρει το όνομα του και θα είναι διασκευασμένο κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να χρησιμεύει ως εκπαιδευτικό πλοίο της Σχολής Ναυτικών Δοκίμων, προς την πρακτική και θεωρητική τελειοποίηση αυτών. Αξίζει να σημειωθεί ότι και οι Οθωμανοί είχαν ενδιαφερθεί για την αγορά του πλοίου.

Το πλοίο καθελκύστηκε τον Μάρτιο του 1910, ενώ έπειτα από δοκιμές διάρκειας ενός έτους παραλήφθηκε τον Μάιο του 1911 και απέπλευσε για την Αγγλία με κυβερνήτη τον πλοίαρχο Ιωάννη Δαμιανό, προκειμένου να λάβει μέρος στις γιορτές στέψης του Βασιλιά Γεωργίου Ε', αλλά και για να εφοδιασθεί με πυρομαχικά. Εκεί κατά μεθόρμιση, προσάραξε σε ύφαλο και χρειάστηκε να δεξαμενιστεί. Τότε σημειώθηκαν κάποια επεισόδια απειθαρχίας του πληρώματος, οπότε λίγες μέρες μετά, ο κυβερνήτης αντικαταστάθηκε από τον πλοίαρχο Παύλο Κουντουριώτη, που πέτυχε την αποκατάσταση της τάξης και την μέγιστη απόδοση του πλοίου. Τον Αύγουστο του 1911 απέπλευσε από την Αγγλία και τον Σεπτέμβριο του ίδιου χρόνου, κατέπλευσε στο Φάληρο, όπου έγινε δεκτό με ενθουσιασμό από την πολιτική και στρατιωτική ηγεσία, αλλά και πλήθος λαού (Εικόνα 5.2).



Εικόνα 5.2: Η άφιξη του Θ/Κ «Γ. Αβέρωφ» στα φαληρικά νερά, την 1η Σεπτεμβρίου του 1911 (Πλωτό Ναυτικό Μουσείο-Θωρηκτό "Γεώργιος Αβέρωφ")

Το πλοίο δεν άργησε να γνωρίσει το βάπτισμα του πυρός. Τον Οκτώβριο του 1912, με την έναρξη του Α' Βαλκανικού Πολέμου, το «Γ.Αβέρωφ», επικεφαλής του Στόλου του Αιγαίου υπό τον Ναύαρχο Παύλο Κουντουριώτη, απέπλευσε προς τα Δαρδανέλια. Κατέλαβε τη Λήμνο, ενώ στον όρμο του Μούδρου εγκαταστάθηκε το προχωρημένο αγκυροβόλιο του Στόλου. Ακολούθησε η κατάληψη του Αγίου Όρους και των νησιών του βορείου και ανατολικού Αιγαίου (Θάσος, Σαμοθράκη, Ίμβρος, Τένεδος, Αγ. Ευστράτιος, Μυτιλήνη, Χίος). Η σύγκρουση με τον τουρκικό στόλο ήταν πλέον αναπόφευκτη. Ο

ναύαρχος Κουντουριώτης έδωσε επιθετικό χαρακτήρα στον ελληνικό σχεδιασμό και προκάλεσε τον Τουρκικό στόλο να εξέλθει από τα Στενά για αναμέτρηση. Όταν ο οθωμανικός στόλος εμφανίσθηκε στην έξοδο των Στενών τις πρωινές ώρες της 3ης Δεκεμβρίου 1912, ο Κουντουριώτης απηύθυνε το περίφημο σήμα του, στα ελληνικά πλοία που συνέπλεαν με το «Γ. Αβέρωφ»:

ΝΑΥΤΙΚΟΝ ΣΗΜΑ

*“ΜΕ ΤΗ ΔΥΝΑΜΙΝ ΤΟΥ ΘΕΟΥ ΚΑΙ ΤΑΣ ΕΥΧΑΣ ΤΟΥ
ΒΑΣΙΛΕΩΣ ΚΑΙ ΕΝ ΟΝΟΜΑΤΙ ΤΟΥ ΔΙΚΑΙΟΥ, ΠΛΕΩ
ΜΕΘ’ ΟΡΜΗΣ ΑΚΑΘΕΚΤΟΥ ΚΑΙ ΜΕ ΤΗΝ ΠΕΠΟΙΘΗΣΙΝ
ΤΗΣ ΝΙΚΗΣ ΕΝΑΝΤΙΟΝ ΤΟΥ ΕΧΘΡΟΥ ΤΟΥ ΓΕΝΟΥΣ”*

ΚΟΥΝΤΟΥΡΙΩΤΗΣ

Η έκβαση των Ναυμαχιών της Έλλης (3 Δεκεμβρίου 1912) και της Λήμνου (5 Ιανουαρίου 1913) που ακολούθησαν, διέλυσε τις προσδοκίες του Σουλτάνου και της Υψηλής Πύλης για τον έλεγχο του Αιγαίου. Ο οθωμανικός στόλος δεν θα επιχειρούσε πια νέα έξοδο στο Αιγαίο.

Κατά το μεγαλύτερο μέρος του Α΄ Παγκοσμίου Πολέμου η Ελλάδα παρέμεινε ουδέτερη. Όμως, το 1917 η κυβέρνηση του Ε. Βενιζέλου αποφάσισε να συμμετάσχει στον πόλεμο, στο πλευρό των Συμμάχων. Με το τέλος της παγκόσμιας σύρραξης, τον Οκτώβριο του 1918, η Τουρκία συνθηκολόγησε (ανακωχή του Μούδρου) και η Ελλάδα βρέθηκε στην πλευρά των νικητών. Το «Γ. Αβέρωφ» κατέπλευσε στην Κωνσταντινούπολη επειδή η Ελλάδα ήταν μία από τις νικήτριες δυνάμεις του Μεγάλου Πολέμου. Η ελληνική σημαία κυμάτισε στο Βόσπορο, απέναντι από την Αγία Σοφία, κάνοντας να δακρύνουν χιλιάδες Έλληνες της Πόλης.

Μετά την υπογραφή των συνθηκών ειρήνης το «Γ. Αβέρωφ», μαζί με τον υπόλοιπο στόλο μετέφερε τα ελληνικά στρατεύματα στην Ιωνία και βοήθησε με βομβαρδισμούς την προώθηση των Ελληνικών Δυνάμεων. Οι εξελίξεις των επιχειρήσεων στη Μικρά Ασία διέγραψαν γρήγορα αρνητική πορεία που κατέληξε στην Καταστροφή του '22. Το «Γ. Αβέρωφ» βρέθηκε ξανά στα μικρασιατικά παράλια, αυτή τη φορά για να βοηθήσει στη μεταφορά των στρατευμάτων και του ξεριζωμένου ελληνικού στοιχείου.

Με την έναρξη του Β΄ Παγκόσμιου Πολέμου το θωρηκτό «Γ. Αβέρωφ» τέθηκε και πάλι επικεφαλής, ως ναυαρχίδα του ελληνικού πολεμικού στόλου. Κατά τη διάρκεια του Ελληνοϊταλικού Πολέμου, αγκυροβολημένο στον κόλπο τη Ελευσίνας, προστάτηψε αποτελεσματικά με τα αντιαεροπορικά του συστήματα, το αεροδρόμιο της Ελευσίνας και το ναύσταθμο της Σαλαμίνας. Ωστόσο μετά τη κατάρρευση του μετώπου, τον Απρίλιο του 1941, το Υπουργείο Ναυτικών διέταξε την αυτοβύθιση του θωρηκτού, προκειμένου να μην περιέλθει στα χέρια του εχθρού. Στην καρδιά και στο φρόνημα των ελληνικών πληρωμάτων, η αναχώρηση των εναπομείναντων πλοίων του στόλου στην Αλεξάνδρεια,

ήταν αδιανόητο να γίνει χωρίς την ασφαλή συντροφιά του ηρωικού Θωρηκτού «Γ. Αβέρωφ». Το πλήρωμα δεν εκτέλεσε τη διαταγή και απέπλευσε κρυφά το βράδυ της Μεγάλης Πέμπτης του 1941. Όταν το Αβέρωφ έφτασε έξω από το λιμάνι της Αλεξάνδρειας, τα Βρετανικά πολεμικά πλοία παραμέρισαν και το άφησαν να περάσει πρώτο. Όλα τα συμμαχικά πλοία, Βρετανικά και Γαλλικά, ήταν σημαιοστολισμένα, ενώ τα πληρώματα ήταν παρατεταγμένα επάνω στα καταστρώματα, αρχίζοντας να επευφημούν, καθώς οι μπάντες παιάνιζαν τον Ελληνικό Εθνικό Ύμνο, υποδεχόμενοι τον ελληνικό στόλο.

Μετά τον επιτυχή κατάπλου του θωρηκτού στην Αλεξάνδρεια, το πλοίο κατευθύνθηκε στη Βομβάη για γενική επισκευή και επιθεώρηση. Το «Γ. Αβέρωφ» δραστηριοποιήθηκε στον Ινδικό Ωκεανό, με αποστολή την προστασία νηοπομπών, που κατευθύνονταν από τη Βομβάη στο Άντεν. Στο τέλος του 1942 κατέπλευσε στο Πορτ Σάιντ, όπου συμμετείχε σε αποστολές προστασίας λιμένων. Με την αποχώρηση των γερμανικών στρατευμάτων κατοχής στα τέλη του Σεπτεμβρίου του 1944 και ύστερα από απουσία σχεδόν τεσσάρων ετών, ο ένδοξος «Γ. Αβέρωφ» επέστρεψε τον Οκτώβριο του 1944 στην Ελλάδα, φέρνοντας μαζί του την τότε εξόριστη ελληνική κυβέρνηση και αγκυροβόλησε πανηγυρικά στον φαληρικό όρμο.

Το 1945 ήταν το τελευταίο του ταξίδι στη Ρόδο όπου συμμετείχε στις εορταστικές εκδηλώσεις ενσωματώσεως των Δωδεκανήσων με τη Μητέρα Ελλάδα. Στο χρονικό διάστημα 1947 έως 1949 το Θωρηκτό έγινε έδρα του Αρχηγείου Στόλου στο Κερασίни. Όμως, το πλοίο είχε 'γεράσει' και το 1952 διατάχθηκε ο παροπλισμός του.

Από το 1957 μέχρι το 1983, το Θωρηκτό παρέμεινε πρυμνοδετημένο στον Πόρο. Το 1984 το Πολεμικό Ναυτικό αποφάσισε να το αναγεννήσει. Μετά από περίπου τριάντα χρόνια στο περιθώριο, το Θωρηκτό ξεκίνησε τη νέα του πορεία. Την ίδια χρονιά το πλοίο ρυμουλκήθηκε από τον Πόρο στο Φάληρο, όπου άρχισαν οι εργασίες αποκατάστασής του.

Σήμερα το πλοίο «Γ. Αβέρωφ» αποτελεί ιερό μνημείο που τιμούνται όλοι οι πεσόντες του Πολεμικού Ναυτικού που υπηρέτησαν για την πατρίδα. Έχει έδρα το Άλσος Ελληνικής Ναυτικής Παράδοσης στην τοποθεσία Τροκαντερό της Μαρίνας Φλοίσβου στο Φάληρο. Είναι ένα ζωντανό κειμήλιο, η Ναυαρχίδα όλων των Ελλήνων, που διδάσκει την ένδοξη Ελληνική Ναυτική Παράδοση, τον ηρωισμό και την αρχοντιά των Ελλήνων. Το Πλωτό Ναυτικό Μουσείο Θωρηκτό «Γ. Αβέρωφ» αποτελεί εδώ και χρόνια μια δραστήρια εκπαιδευτική κοινότητα με καθημερινές επισκέψεις σχολείων, ιδρυμάτων, οργανισμών, καθώς και πλήθους ιδιωτών. Με τις επισκέψεις αυτές πραγματοποιείται και η δεύτερη πτυχή του οράματος του δωρητή, που ήθελε το πλοίο, παράλληλα με τον εθνικό του σκοπό, να εκπληρώνει και εκπαιδευτική αποστολή.

Είναι το μοναδικό πλοίο που έχει συμμετάσχει και στους δύο Παγκοσμίους πολέμους. Είναι ζήτημα εάν στην παγκόσμια ιστορία θα μπορούσε κανείς να συναντήσει άλλο πολεμικό πλοίο που να συνδέθηκε για σχεδόν μισό αιώνα με την ιστορία και τα πεπραγμένα ενός έθνους. Το Θωρηκτό «Γ. Αβέρωφ», μοναδική ίσως εξαίρεση, μαζί με την προσωπικότητα και το πατριωτικό ήθος του Ναυάρχου Παύλου Κουντουριώτη, συνδέσει άρρηκτα το όνομά του με τη διαμόρφωση ιστορικών γεγονότων εθνικής εμβέλειας, χωρίς, ουδέποτε να γνωρίσει την ήττα και την ατίμωση και να υποστείει τη Σημαία έμπροσθεν του εχθρού (Πλωτό Ναυτικό Μουσείο-Θωρηκτό "Γεώργιος

Αβέρωφ”).

5.3 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και κύρια στοιχεία πλοίου

Το πλοίο Γεώργιος Αβέρωφ, ανήκει στην κατηγορία των θωρακισμένων καταδρομικών. Το θωρηκτό είναι της κλάσης Pisa με αδελφά πλοία τα Amalfi και Pisa, τα οποία υπηρέτησαν στο Ιταλικό Ναυτικό (Regia Marina).

Η σχεδίαση πολεμικών πλοίων στις αρχές του 20^{ου} αιώνα ήταν, όπως και σήμερα, μία επαναληπτική διεργασία, η οποία βασιζόταν σχεδόν πάντοτε σε μία προγενέστερη επιτυχημένη σχεδίαση. Το σημείο εκκίνησης ήταν ο οπλισμός που έπρεπε να φέρει το νέο πλοίο, δηλαδή κυρίως ο τύπος, το διαμέτρημα και ο αριθμός των πυροβόλων και ο οποίος αντιστοιχούσε σε ένα συγκεκριμένο βάρος. Η σχεδίαση της κλάσης Pisa βασίστηκε στην προγενέστερη σχεδίαση του θωρηκτού Regina Elena (Αλούρδας, 2014).

Τα χαρακτηριστικά του πλοίου παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.1).

Πίνακας 5.1: Τα χαρακτηριστικά του Θ/Κ «Γ. Αβέρωφ» (Πλωτό Ναυτικό Μουσείο-Θωρηκτό “Γεώργιος Αβέρωφ”)

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ Θ/Κ «Γ. ΑΒΕΡΩΦ»	
Μήκος πλοίου	140m
Μέγιστο πλάτος πλοίου	21.5m
Βύθισμα πλοίου (σε πλήρη φόρτο)	7.5m
Εκτόπισμα	10,200 τόνοι
Διάμετρος κάννης πλωραίου και πρυμναίου πυροβόλου	234mm
Διάμετρος κάννης πλευρικών πυροβόλων	190mm
Πλήρωμα σε καιρό ειρήνης	670 άτομα
Μέγιστο πλήρωμα σε πολεμικές επιχειρήσεις	1200 άτομα
Μέγιστη αναπτυσσόμενη ταχύτητα	23 κόμβοι

Το σχήμα του Αβέρωφ είναι χαρακτηριστικό της εποχής σχεδιάσής του. Διαθέτει εμβολοφόρο πλώρα, πρύμνη καταδρομικού και ελαφρά ελάττωση του πλάτους άνω της ισάλου γραμμής.

Το πλοίο είναι κατασκευασμένο από κοινό ναυπηγικό χάλυβα, πλην της θωράκισης. Από το τέλος της δεκαετίας του 1890, η θωράκιση των περισσότερων πλοίων γινόταν με χάλυβες που είχαν κατασκευασθεί με την μέθοδο Krupp. Οι χάλυβες Krupp ήταν δύο φορές πιο αποτελεσματικοί από τους κοινούς χάλυβες, δηλαδή είχαν την ίδια αντοχή σε διείσδυση με κοινούς χάλυβες διπλάσιου πάχους. Η θωράκιση του Αβέρωφ είναι από χάλυβα Krupp.



Στα κύρια στοιχεία της υπερκατασκευής του «Γ. Αβέρωφ» περιλαμβάνονται η γέφυρα, το πρόστεγο και το επίστεγο (αποθηκευτικοί χώροι επί του κυρίου καταστρώματος), το πρωαίο και το πρυμναίο κατάρτι και οι καπνοδόχοι (φουγάρα), τρεις στον αριθμό. Τα κύρια σημεία του εμφανούς οπλισμού του, τα οποία διατηρούνται μέχρι σήμερα, είναι τέσσερα πυροβόλα (23.4cm) σε δύο δίδυμους πύργους κατά μήκος και ανά ένας σε πλήρη και πρύμνη, μπροστά από το πρόστεγο και το επίστεγο αντίστοιχα, και οκτώ πυροβόλα (19.5cm) σε τέσσερις δίδυμους πύργους ανά δύο εκατέρωθεν των πλευρών της υπερκατασκευής και στο ύψος της μέσης (Εικόνα 5.3) (Αλούρδας, 2014).



Εικόνα 5.3: Πανοραμική άποψη του Θ/Κ «Γ. Αβέρωφ» από την αριστερή πρυμναία πλευρά του (Λάζαρης, 2020)

Το θωρηκτό Αβέρωφ στο εσωτερικό του, αποτελείται από το κύριο κατάστρωμα, το κατάστρωμα των λεμβών, το πρώτο και το δεύτερο υπόστρωμα. Οι χώροι που υπάρχουν σε κάθε επίπεδο, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.2).

Πίνακας 5.2: Οι χώροι του Θ/Κ «Γ. Αβέρωφ», ανά επίπεδο

ΟΙ ΧΩΡΟΙ ΤΟΥ Θ/Κ «Γ. ΑΒΕΡΩΦ»	
Κύριο κατάστρωμα	Παρεκκλήσι Αγ. Νικολάου, μαγειρείο πληρώματος, μαγειρείο ναυάρχου, μαγειρείο υπαξιωματικών, αριστερός και δεξιός εκθεσιακός χώρος, φούρνος
Κατάστρωμα λεμβών	Δωμάτιο κυβερνήτη εν πλω, γραφείο χαρτών, γέφυρα
	Υπνοδωμάτιο ναυάρχου, αίθουσα συσκέψεων, μπάνιο ναυάρχου, τραπεζαρία ναυάρχου, υπνοδωμάτιο κυβερνήτη, γραφείο κυβερνήτη,

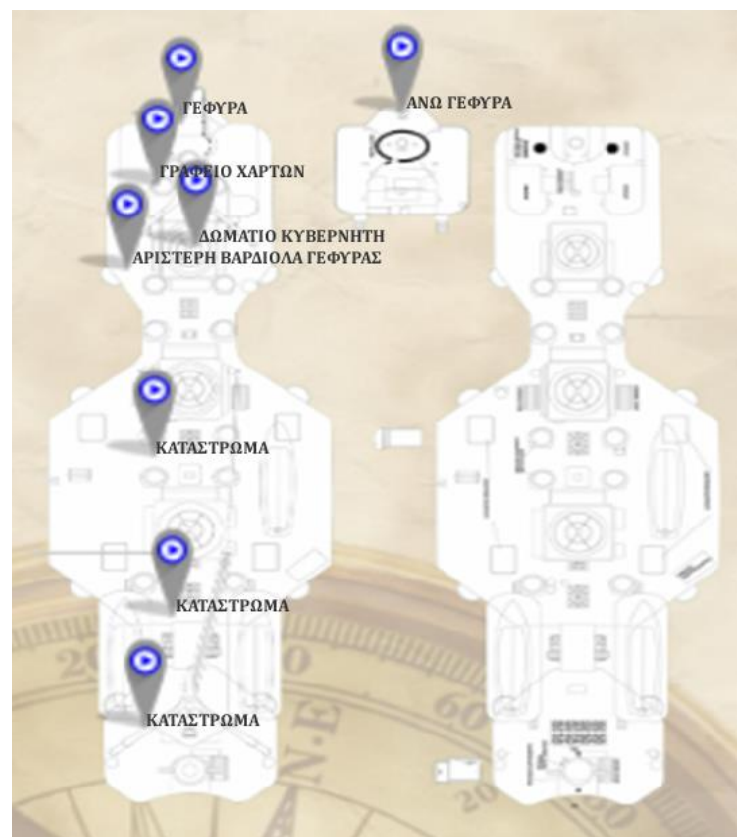


Πρώτο υπόστρωμα	γραφείο υπάρχου, δωμάτια επιτελών, καρέ αξιωματικών, υπνοδωμάτιο υπάρχου, κέντρο επιχειρήσεων, υπνοδωμάτιο Α' μηχανικού, λουτρό υπάρχου-Α' μηχανικού Γραφείο μηχανής, αίθουσα συνεργείου μηχανής, αίθουσα μπράντες, αίθουσα ανθράκευσης, αίθουσα Β' Παγκοσμίου πολέμου, αίθουσα Βαλκανικών πολέμων
Δεύτερο υπόστρωμα	Μηχανοστάσιο, λεβητοστάσιο, ηλεκτροστάσιο, ασύρματος

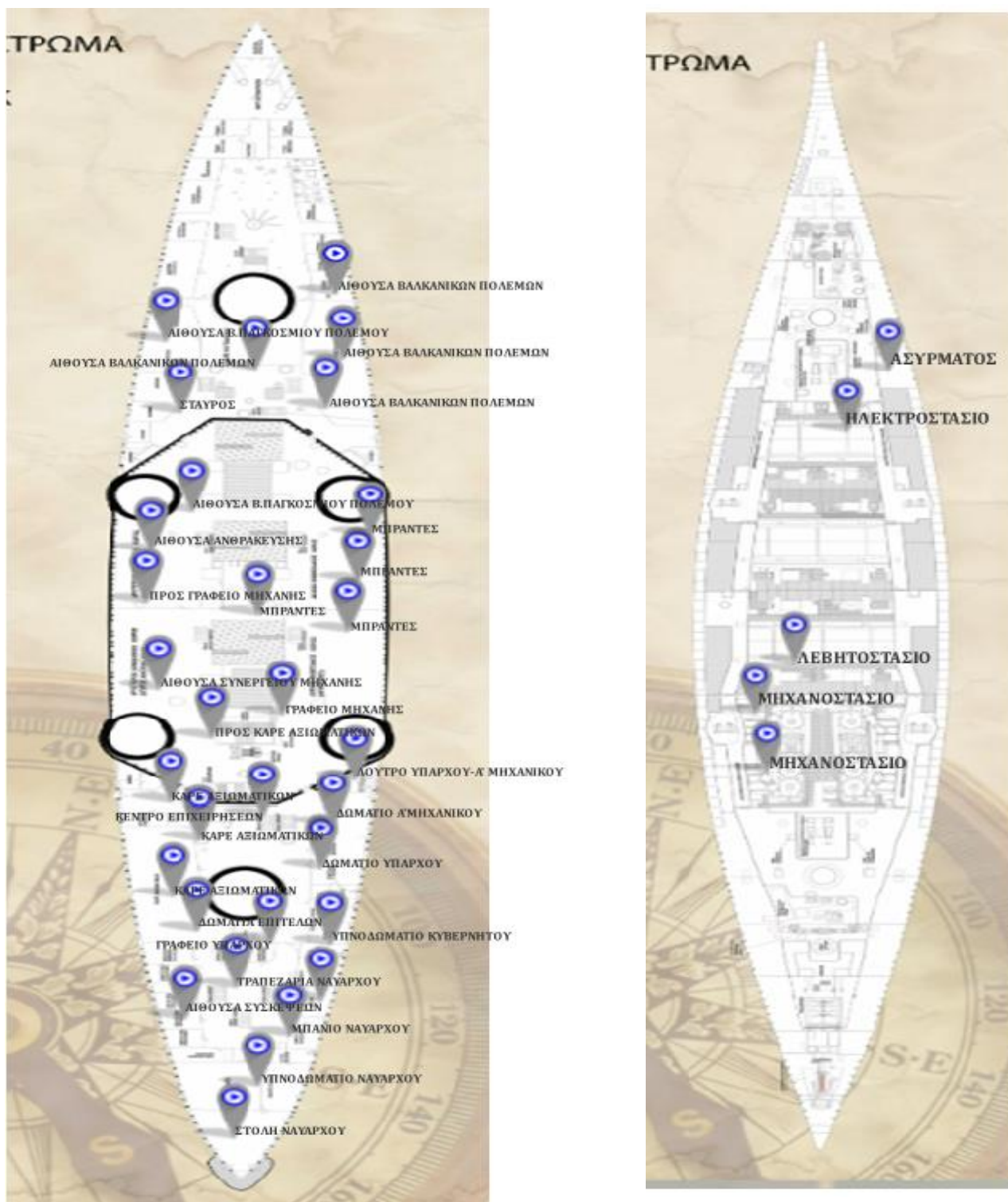
Αξίζει να σημειωθεί πως στον εκθεσιακό χώρο, στο εσωτερικό του πλοίου, φυλάσσονται προσωπικά αντικείμενα που έχουν προσφέρει στο πλοίο οι απόγονοι όσων υπηρέτησαν σε αυτό, κατά τους βαλκανικούς πολέμους, αλλά και κατά την διάρκεια των δύο παγκοσμίων πολέμων. Αναλυτικότερα στον εκθεσιακό χώρο φυλάσσονται ημερολόγια, φωτογραφίες, διπλώματα, στολές, ξίφη, παράσημα, κ.λ.π.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην μελέτη ορισμένων εσωτερικών χώρων του θωρηκτού Θ/Κ «Γ.Αβέρωφ». Οι χώροι αυτοί είναι το καρέ αξιωματικών και τα ναυαρχικά διαμερίσματα. Ειδικότερα το καρέ αξιωματικών είναι ο χώρος που ο Κυβερνήτης και οι Αξιωματικοί γευμάτιζαν, αναπαύονταν, έκαναν συσκέψεις και υποδέχονταν επισήμους. Στα ναυαρχικά διαμερίσματα περιλαμβάνεται η αίθουσα συσκέψεων, η τραπεζαρία, το υπνοδωμάτιο και το λουτρό του ναυάρχου. Υπάρχουν προθήκες με τις αυθεντικές στολές του Ναυάρχου Παύλου Κουντουριώτη, τα παράσημα και το σπαθί του. Ακόμη υπάρχει συλλογή από ασημένια σκεύη και ένα ραδιόφωνο της εποχής.

Η διάταξη ορισμένων από τους χώρους που προαναφέρθηκαν, απεικονίζεται στις παρακάτω κατόψεις του πλοίου (Εικόνες 5.4, 5.5). Οι κατόψεις παρουσιάζονται από το ανώτερο επίπεδο του πλοίου, προς το κατώτερο.



Εικόνα 5.4: Αριστερά η κάτοψη του κύριου καταστρώματος και δεξιά η κάτοψη του καταστρώματος λεμβών



Εικόνα 5.5: Αριστερά η κάτοψη του πρώτου υποστρώματος και δεξιά η κάτοψη του δεύτερου υποστρώματος



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Κεφάλαιο 6: Συλλογή δεδομένων

6.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο, επεξηγείται ο λόγος για τον οποίο προτιμήθηκε η χρήση των οργάνων που επιλέχθηκαν, περιγράφονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, ενώ στην συνέχεια αναφέρονται αναλυτικά οι εργασίες πεδίου που πραγματοποιήθηκαν με καθένα από αυτά.

6.2 Η μεθοδολογία αποτύπωσης του Θ/Κ «Γ. Αβέρωφ»

Το περιβάλλον αποτύπωσης στο εσωτερικό του Θ/Κ «Γ. Αβέρωφ», χαρακτηρίζεται από πολυπλοκότητα ως προς την γεωμετρία του και από περιορισμένο οπτικό πεδίο. Σε εσωτερικούς χώρους και σε κλειστά περιβάλλοντα, όπως στην συγκεκριμένη περίπτωση, οι δορυφορικοί δέκτες (GPS), δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν, καθώς χρειάζονται οπτική επαφή με τους δορυφόρους. Αξίζει να σημειωθεί πως η χρήση των παραδοσιακών τοπογραφικών οργάνων (μετροταινίες, αποστασιόμετρα, ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί) είναι πολύ χρονοβόρα και δεν μπορούν να αποτυπώσουν μεγάλο αριθμό σημείων σε τρισδιάστατες συντεταγμένες. Ομοίως, οι στατικοί σαρωτές laser, απαιτούν την ίδρυση πολλών στάσεων για την εξάλειψη των τυφλών σημείων, ενώ τα κινητά συστήματα χαρτογράφησης με σακίδιο είναι πολύπλοκα και βαριά. Στην συγκεκριμένη περίπτωση ο χρόνος παραμονής στο πεδίο των μετρήσεων ήταν περιορισμένος, ενώ η συνολική έκταση των χώρων που έπρεπε να αποτυπωθούν ήταν αρκετά μεγάλη. Οι τρισδιάστατοι σαρωτές laser που λειτουργούν με την τεχνολογία SLAM προτιμήθηκαν, καθώς είναι απλοί ως προς την χρήση τους, γρήγοροι, ενώ η χαρτογράφηση εν κινήσει γίνεται έως και 20 φορές γρηγορότερα από τις παραδοσιακές τεχνικές. Οι συγκεκριμένοι σαρωτές, χρησιμοποιώντας τους αλγορίθμους του ταυτόχρονου εντοπισμού και χαρτογράφησης, λύνουν το πρόβλημα της απώλειας GPS, καθιστώντας εφικτή την αποτύπωση εσωτερικών χώρων, όπως στην συγκεκριμένη περίπτωση. Τέλος χρησιμοποιήθηκε και η κάμερα Matterport, η οποία βασίζεται επίσης στην τεχνολογία SLAM.

6.3 Όργανα μέτρησης

Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων στο εσωτερικό του Θ/Κ «Γ. Αβέρωφ», χρησιμοποιήθηκαν δύο φορητοί τρισδιάστατοι σαρωτές laser με την χρήση της τεχνολογίας SLAM και συγκεκριμένα το ZEB Revo και το ZEB Horizon, αλλά και η κάμερα Matterport Pro2 3D που επίσης βασίζεται στην τεχνολογία SLAM. Ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιήθηκαν δύο φορητοί σαρωτές τεχνολογίας SLAM, είναι επειδή ο ένας (ZEB Revo) παράγει μη έγχρωμα δεδομένα, ενώ ο άλλος (ZEB Horizon), με την προσθήκη της κάμερας ZEB Vision, παράγει έγχρωμα δεδομένα RGB και κατά συνέπεια ένα πιο ρεαλιστικό αποτέλεσμα. Αξίζει να σημειωθεί πως στο όργανο ZEB Revo δεν είναι εφικτή η προσθήκη της κάμερας. Ακόμη ο σαρωτής ZEB Horizon μετράει αρκετά περισσότερα

σημεία το δευτερόλεπτο από τον σαρωτή ZEB Revo, ενώ έχει και μεγαλύτερο εύρος μέτρησης.

Τόσο το ZEB Revo, όσο και το ZEB Horizon, αποτελούνται από έναν δισδιάστατο σαρωτή εύρους laser, που βασίζεται στην αρχή του χρόνου πτήσης που είναι συνδεδεμένος με μία αδρανειακή μονάδα μέτρησης IMU. Η κίνηση της κεφαλής σάρωσης, παρέχει την τρίτη διάσταση που απαιτείται για τη δημιουργία τρισδιάστατων πληροφοριών. Ένας τρισδιάστατος αλγόριθμος του ταυτόχρονου εντοπισμού και χαρτογράφησης (SLAM), χρησιμοποιείται για να συνδυάσει τα δισδιάστατα δεδομένα σάρωσης laser, με τα δεδομένα IMU για να δημιουργήσει ακριβή τρισδιάστατα νέφη σημείων. Για κάθε θέση χρονικά, το σύστημα καταγράφει έναν τρισδιάστατο χάρτη του άμεσου περιβάλλοντός του. Καθώς ο σαρωτής κινείται, χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος για την συγχώνευση των διαδοχικών επικαλυπτόμενων χαρτών, χρησιμοποιώντας διακριτά χαρακτηριστικά, όπως ακμές για την εύρεση των αντιστοιχιών σε κάθε χάρτη. Καθώς ο σαρωτής μετακινείται και αποκτά τους χάρτες, οι αλγόριθμοι χρησιμοποιούν μετρήσεις αισθητήρων για να χαρτογραφήσουν το περιβάλλον και να εντοπίσουν τον σαρωτή μέσα σε αυτόν τον χάρτη. Η διαδικασία ανάλυσης των δεδομένων εύρους για την δημιουργία ενός χάρτη και τον προσδιορισμό της θέσης είναι γνωστή ως ταυτόχρονος εντοπισμός και χαρτογράφηση. Τόσο το ZEB Revo, όσο και το ZEB Horizon, καταγράφουν ακατέργαστα δεδομένα μέτρησης εύρους laser και αδρανειακά δεδομένα.

6.3.1 ZEB Revo

Πρόκειται για έναν ελαφρύ και εύκολο στη χρήση σαρωτή laser (Εικόνα 6.1), που επιτρέπει την δημιουργία γρήγορων τρισδιάστατων μοντέλων υψηλής ακρίβειας μέσα σε λίγα λεπτά, εν κινήσει. Ο συγκεκριμένος σαρωτής μπορεί να συλλέξει έως και 43,000 σημεία ανά δευτερόλεπτο, καθιστώντας γρήγορη την εργασία στο πεδίο, σαρώνοντας τόσο απλά, όσο και σύνθετα περιβάλλοντα, με την πραγματοποίηση σαρώσεων υψηλής ποιότητας σε λιγότερο χρόνο. Το ZEB Revo, παρέχει τρισδιάστατη σάρωση με σχετική ακρίβεια έως και 6mm, ανάλογα με το περιβάλλον, δίνοντας ακριβείς σαρώσεις, με μεγάλο βαθμό λεπτομέρειας. Το εύρος μέτρησης είναι 30m για εσωτερικούς χώρους και 15m για εξωτερικούς. Είναι ελαφρύς και φορητός, ενώ ο χρήστης μπορεί να μετακινηθεί ελεύθερα ενώ χρησιμοποιεί αυτήν τη συσκευή. Διαθέτει έναν περιστρεφόμενο αισθητήρα LiDAR για το ευρύτερο οπτικό πεδίο. Το συμπαγές μέγεθος και ο εργονομικός σχεδιασμός του, το καθιστούν ευχάριστο στη χρήση. Η φορητότητά του είναι ιδανική λύση για μικρότερους χώρους, σάρωση αντικειμένων, δυσπρόσιτες περιοχές, ακόμη και υπόγειες. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών όπως είναι η αρχιτεκτονική, τα μοντέλα δομικών πληροφοριών, οι κατόψεις και η διαχείριση εγκαταστάσεων. Η λήψη τρισδιάστατων σαρώσεων με την χρήση της τεχνολογίας φωτός είναι ένας ακριβής και γρήγορος τρόπος λήψης δεδομένων υψηλής ποιότητας. Το ZEB Revo, σε αντίθεση με τους επίγειους στατικούς σαρωτές, δεν χρειάζεται να είναι ακίνητο κατά τη διάρκεια της σάρωσης, αλλά κρατώντας το στο χέρι μπορεί κανείς να περπατήσει μέσα στο χώρο και να μετρήσει ακόμα και τα πιο απόκρυφα σημεία. Χωρίς την ανάγκη για χρήση στόχων, οι αλγόριθμοι SLAM επεξεργάζονται τα δεδομένα των μετρήσεων του laser, μαζί με τα δεδομένα θέσης της μονάδας αδρανειακής μέτρησης και

εφαρμόζουν μεθόδους αναγνώρισης των χαρακτηριστικών, για να εκτελέσουν το cloud-to-cloud registration, αυτόματα και με υψηλό επίπεδο ακρίβειας, στα δεδομένα των μετρήσεων (Landmark, n.d.). Η ακρίβεια που δίνει ο συγκεκριμένος σαρωτής είναι περίπου στα 1-3cm. Μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιαδήποτε κινητή πλατφόρμα, όπως σε ένα όχημα ή ένα drone. Με την τεχνολογία SLAM στον πυρήνα του, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές με ελάχιστη ή ανύπαρκτη λήψη GPS, όπως σε εσωτερικούς χώρους, υπόγειους, ορυχεία και γενικότερα κλειστούς χώρους. Σε όλες τις προαναφερθείσες περιπτώσεις υπάρχει απώλεια της ορατότητας του οργάνου με τους δορυφόρους (GeoSLAM, n.d.).



Εικόνα 6.1: Ο σαρωτής GeoSLAM ZEB Revo (GeoSLAM, n.d.)

6.3.2 ZEB Horizon

Το όργανο αυτό (Εικόνα 6.2), συγκριτικά με το ZEB Revo, συλλέγει περισσότερα σημεία ανά δευτερόλεπτο και έχει μεγαλύτερο εύρος αποτύπωσης. Είναι το τελευταίο τρισδιάστατο φορητό laser scanner μοντέλο, της εταιρίας GeoSLAM. Πρόκειται για έναν τρισδιάστατο φορητό σαρωτή με περιστρεφόμενο LiDAR, το οποίο μπορεί να τοποθετηθεί σε ένα drone, σακίδιο, ή όχημα, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εξωτερικούς χώρους (συμπεριλαμβανομένων και των χώρων όπου τα χαρακτηριστικά είναι τοποθετημένα πιο μακριά), εσωτερικούς και υπόγειους. Με την δυνατότητα συλλογής έως και 300,000 σημείων ανά δευτερόλεπτο, η εργασία στο πεδίο μπορεί να γίνει γρήγορη, σαρώνοντας τόσο απλά, όσο και σύνθετα περιβάλλοντα. Συνεπώς με την χρήση αυτού του οργάνου μπορεί κανείς να πραγματοποιήσει σαρώσεις υψηλής ποιότητας σε λιγότερο χρόνο. Αυτό το ισχυρό εργαλείο κάνει την διαδικασία χαρτογράφησης απλή. Με εμβέλεια 100m, ο ZEB Horizon είναι ο πιο ευέλικτος τρισδιάστατος σαρωτής μέχρι σήμερα, εξαιρετικός για χρήση στους εξωτερικούς χώρους. Η ελαφριά και μικρών διαστάσεων σχεδίασή του, επιτρέπει στον χειριστή να κινείται ελεύθερα στον χώρο, ενώ χρησιμοποιεί αυτή την συσκευή, καθιστώντας το ιδανικό για χρήση στους εσωτερικούς χώρους. Το ZEB Horizon παρέχει τρισδιάστατη

σάρωση με σχετική ακρίβεια έως και 6mm, ανάλογα πάντα με το περιβάλλον που αποτυπώνεται. Αυτό δίνει ακριβείς σαρώσεις με μεγάλη λεπτομέρεια (GeoSLAM, n.d.). Γενικά η ακρίβεια που πετυχαίνει το ZEB Horizon είναι συνήθως της τάξης των 1-3cm. Το όργανο αυτό είναι ένα εργαλείο για την μέτρηση, την επεξεργασία και την κατανόηση του κόσμου. Είναι απλό στη χρήση, γρήγορο στη μέτρηση και εύκολο στην επεξεργασία. Με την τεχνολογία SLAM στον πυρήνα του, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές με ελάχιστη ή ανύπαρκτη λήψη GPS, όπως σε εσωτερικούς χώρους, υπόγειους, ορυχεία και γενικότερα κλειστούς χώρους. Σε όλες τις προαναφερθείσες περιπτώσεις υπάρχει απώλεια της ορατότητας του οργάνου με τους δορυφόρους. Το ZEB Horizon σε αντίθεση με τους επίγειους στατικούς σαρωτές, δεν χρειάζεται να είναι ακίνητο κατά τη διάρκεια της σάρωσης, αλλά κρατώντας το στο χέρι μπορεί κανείς να περπατήσει μέσα στο χώρο και να μετρήσει ακόμα και τα πιο απόκρυφα σημεία. Χωρίς την ανάγκη για χρήση στόχων, οι αλγόριθμοι SLAM επεξεργάζονται τα δεδομένα των μετρήσεων του laser, μαζί με τα δεδομένα θέσης της μονάδας αδρανειακής μέτρησης και εφαρμόζουν μεθόδους αναγνώρισης των χαρακτηριστικών, για να εκτελέσουν το cloud-to-cloud registration, αυτόματα και με υψηλό επίπεδο ακρίβειας, στα δεδομένα των μετρήσεων. Έτσι εκμηδενίζεται η δουλειά γραφείου για την παραγωγή του συνολικού νέφους σημείων (Landmark, n.d.).

Το όργανο GeoSLAM ZEB Horizon αποτελείται από 16 αισθητήρες. Μία κάμερα ZEB Vision, μπορεί να προστεθεί στο ZEB Horizon, προκειμένου να κάνει λήψη έγχρωμων δεδομένων και πανοραμικών εικόνων 360° μέσα σε λίγα λεπτά. Η ανάλυση 4K αυξάνει τον ορισμό χαρακτηριστικών των αντικειμένων εντός του νέφους σημείων, επιτρέποντας μια νέα προοπτική στα δεδομένα, μέσω της πλοήγησης σε μια εικονική αναπαράσταση ενός περιβάλλοντος. Οι εικόνες καταγράφονται ταυτόχρονα κατά τη διάρκεια μιας σάρωσης. Αναλυτικότερα η κάμερα κάνει λήψη δύο εικόνων το δευτερόλεπτο (μία από την μπροστινή κάμερα και μία από την πίσω κάμερα). Ο χρονικός συγχρονισμός μεταξύ των εικόνων και των δεδομένων LiDAR στο ZEB Vision είναι ακριβής σε <100ο του δευτερολέπτου, δίνοντας εξαιρετική ευθυγράμμιση μεταξύ του νέφους σημείων και των εικόνων. Το αποτέλεσμα είναι ένα λεπτομερές νέφος σημείων με χρώμα RGB, δηλαδή μία πιστή αναπαράσταση της πραγματικότητας. Η κάμερα ZEB Vision μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία CAD και BIM μοντέλων στην αρχιτεκτονική, στις κατασκευές και στην διαχείριση των περιουσιακών στοιχείων (Εικόνα 6.3) (GeoSLAM, n.d.). Η κάμερα μπορεί να προστεθεί μόνο στο ZEB Horizon, καθώς το ZEB Revo δεν την υποστηρίζει. Κατά συνέπεια μόνο το ZEB Horizon μπορεί να απεικονίσει τα δεδομένα όπως είναι στην πραγματικότητα (με τιμές RGB που προέρχονται από την κάμερα).



Εικόνα 6.2: Ο σαρωτής GeoSLAM ZEB Horizon, με την προσθήκη της κάμερας ZEB Vision στο επάνω μέρος του (GeoSLAM, n.d.)



Εικόνα 6.3: Χρωματισμένο νέφος σημείων των κεντρικών γραφείων της εταιρίας GeoSLAM, που καταγράφηκε με την χρήση της κάμερα ZEB Vision (GeoSLAM, n.d.)

Στον παρακάτω πίνακα συγκρίνονται τα χαρακτηριστικά των δύο φορητών τρισδιάστατων σαρωτών GeoSLAM ZEB Reno και ZEB Horizon, προκειμένου να γίνουν κατανοητές οι δυνατότητες του καθενός από αυτά (Πίνακας 6.1).

Πίνακας 6.1: Σύγκριση των χαρακτηριστικών των σαρωτών GeoSLAM ZEB Revo και ZEB Horizon

Σαρωτής SLAM	Zeb Revo	Zeb Horizon
Αριθμός σημείων που συλλέγονται ανά δευτερόλεπτο	43,000	300,000
Εύρος μέτρησης	30m για εσωτερικούς χώρους και 15m για εξωτερικούς	100m
Χρήση κάμερας ZEB Vision	Όχι	Ναι
Ακρίβεια	1-3cm	1-3cm

6.3.3 Matterport Pro2 3D

Το σύστημα βασίζεται στην τεχνολογία του ταυτόχρονου εντοπισμού και χαρτογράφησης (SLAM) και λειτουργεί με πολλαπλές κάμερες δεκτών. Το SLAM στην συγκεκριμένη περίπτωση, χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της θέσης της συσκευής, σε σχέση με μια συγκεκριμένη σκηνή που βασίζεται σε εικόνες RGB-D. Πρόκειται για έναν συνδυασμό εικόνων RGB και εικόνων βάθους, όπου χρησιμοποιούνται SIFT (Scale Invariant Feature Transform) και SURF (Speed up Robust Feature) αλγόριθμοι για να βρεθούν τα αντίστοιχα σημεία. Το σύστημα χρησιμοποιεί επίσης έναν 3D αισθητήρα δομημένου φωτός (υπέρυθρο), με χρόνο λήψης ίσο με 20 δευτερόλεπτα ανά σάρωση, με μέγιστη απόσταση λειτουργίας τα 4.50m και επικάλυψη μεταξύ των διαφορετικών στάσεων μέτρησης 1.00m για τοπογραφικές εργασίες που πραγματοποιούνται σε εξωτερικούς χώρους και 2.50m γι' αυτές που πραγματοποιούνται σε εσωτερικούς. Η κάμερα της συσκευής απαρτίζεται από τρεις διαφορετικούς φακούς, δηλαδή μια φωτογραφική μηχανή, μια θερμική κάμερα υπέρυθρων και μία κάμερα βάθους. Τα παραπάνω επιτρέπουν την λήψη εικόνων σε HDR (High Dynamic Range) και τρισδιάστατων δεδομένων, επιτρέποντας την λήψη ενός μόνο τρισδιάστατου αποτελέσματος (πολυγωνικό πλέγμα). Εκτός από το πλέγμα, η επεξεργασία των δεδομένων μέσω ενός εξωτερικού διακομιστή, δίνει μια ίσα ορθογώνια φωτογραφία 134.2MP (της οποίας οι διαστάσεις είναι 1280x1024pixel), που σχηματίζεται από 18 εικόνες. Οι κάμερες (συνολικά 9 σε αριθμό, 3 για κάθε είδος φακού), είναι οριζόντια προσανατολισμένες και ελαφρώς κεκλιμένες προς τα πάνω και προς τα κάτω, έτσι ώστε τα τρία κέντρα προβολής να συγκλίνουν σε ένα μόνο σημείο. Η λήψη των δεδομένων πραγματοποιείται μέσω μιας πλήρους περιστροφής στο οριζόντιο επίπεδο, χωρισμένο σε έξι στάδια όπου τα καρέ από κάθε στάδιο σχηματίζουν την τελική εικόνα. Το τυπικό οπτικό πεδίο είναι οριζόντια στις 360° και κατακόρυφα περιορισμένο στις 300° (Piniotis et al., 2020). Το όργανο είναι τοποθετημένο σε τρίποδα (Εικόνα 6.4), ο οποίος μετακινείται σε κάθε στάση μέτρησης.



Εικόνα 6.4: Η κάμερα Matterport Pro2 3D

6.4 Εργασίες πεδίου

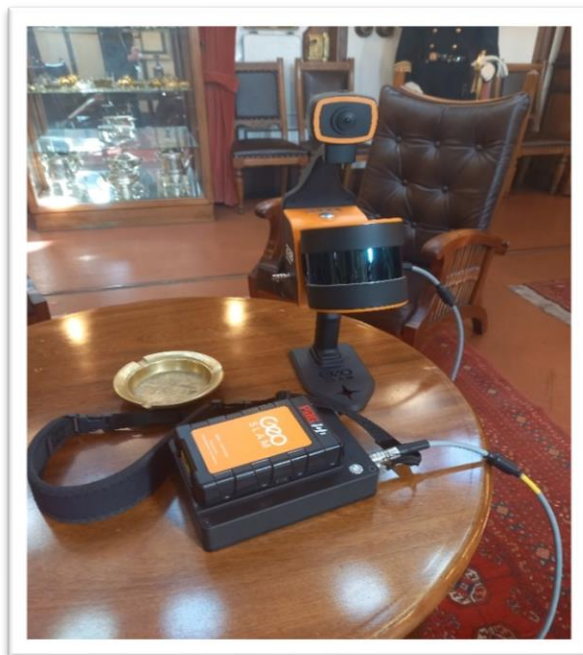
Οι εργασίες πεδίου στο εσωτερικό του Θ/Κ «Γ. Αβέρωφ», διεξήχθησαν σε δύο χρονικές περιόδους. Το πλοίο ήταν ελλιμενισμένο στην Μαρίνα Φλοίσβου, στην τοποθεσία Τροκαντερό, στο Παλαιό Φάληρο. Οι φορητοί σαρωτές laser GeosLAM ZEB Revo και ZEB Horizon, αλλά και η κάμερα Matterport Pro2 3D, χρησιμοποιήθηκαν για την αποτύπωση του καρέ αξιωματικών και των ναυαρχικών διαμερισμάτων. Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά οι εργασίες πεδίου που πραγματοποιήθηκαν με την χρήση και των τριών οργάνων.

6.4.1 Εργασίες με τα όργανα ZEB Revo και ZEB Horizon

Πριν από την απόκτηση των δεδομένων, με την χρήση των φορητών συστημάτων σάρωσης της εταιρίας GeosLAM, πραγματοποιήθηκε μία εκ των προτέρων επιθεώρηση στην περιοχή ενδιαφέροντος, ώστε να εντοπιστούν πιθανά εμπόδια. Για παράδειγμα ελέγχθηκε εάν οι πόρτες μεταξύ των διαφορετικών δωματίων είναι ανοιχτές, ώστε να είναι εύκολη η μετάβαση από το ένα δωμάτιο στο άλλο. Ακόμη σχεδιάστηκαν οι διαδρομές έρευνας. Δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στο κλείσιμο βρόγχου, ακολουθώντας κλειστές διαδρομές σε καθεμία από τις τέσσερις αποστολές σάρωσης (δύο για κάθε σαρωτή-μία για το καρέ αξιωματικών και μία για τα ναυαρχικά διαμερίσματα). Ο αλγόριθμος SLAM που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των ακατέργαστων δεδομένων σάρωσης και την δημιουργία ενός νέφους σημείων, χρησιμοποιεί μια προηγούμενη γνωστή θέση, για τον προσδιορισμό της τρέχουσας θέσης του. Αυτή η μέθοδος μπορεί να οδηγήσει στην εμφάνιση οποιουδήποτε σφάλματος που προκαλεί την μετατόπιση της μετρημένης θέσης κάθε φορά. Μέσα από την τεχνική κλεισίματος του

βρόγχου, επανεξετάζεται μια γνωστή θέση, έτσι ώστε το σφάλμα να εξαπλωθεί γύρω από τον βρόχο. Συνεπώς δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή, ώστε το σημείο εκκίνησης και τερματισμού των μετρήσεων να γίνεται ίδια θέση, για να εξασφαλιστεί τουλάχιστον ένα κλείσιμο βρόχου. Γενικότερα συνιστάται όπου είναι δυνατόν, το κλείσιμο του βρόγχου να γίνεται όσο το δυνατόν συχνότερα, για να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα και να βελτιωθεί η ακρίβεια του νέφους σημείων που προκύπτει. Σε γενικές γραμμές, είναι καλύτερο να εκτελεί κανείς κυκλικούς βρόχους, καθώς όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος σάρωσης χωρίς κλείσιμο βρόχου, τόσο περισσότερο απόλυτο σφάλμα δημιουργείται. Μία ανοιχτή διαδρομή διαφέρει από την κλειστή στην ακρίβεια, στην λεπτομέρεια και στον θόρυβο των νεφών που προκύπτουν. Είναι σημαντικό να σαρωθούν προσεκτικά οι περιοχές κλειστού βρόγχου, προκειμένου να είναι βέβαιο, ότι τα βασικά χαρακτηριστικά είναι σαρωμένα από παρόμοια οπτική γωνία. Είναι καλό να επιστρέφει κανείς στην ίδια περιοχή από διαφορετική κατεύθυνση.

Για να λειτουργήσει ο σαρωτής αρχικά αυτός συνδέεται με το καταγραφικό δεδομένων, ενώ η κάμερα συνδέεται με τον σαρωτή και τοποθετείται σε μία επίπεδη σταθερή επιφάνεια, από όπου και ξεκινάει η σάρωση. Έπειτα ο χρήστης κρατώντας τον σαρωτή περνάει από όλες τις περιοχές που επιθυμεί να αποτυπώσει κι επιστρέφει τελικά στο σημείο που ξεκίνησε, αφήνοντας τον σαρωτή στην ίδια επίπεδη επιφάνεια που ήταν και κατά την έναρξη, έως ότου τον απενεργοποιήσει και αποθηκευτούν τα δεδομένα που συνέλεξε (Εικόνα 6.5).



Εικόνα 6.5: Επίπεδη σταθερή επιφάνεια εκκίνησης και τερματισμού λειτουργίας του σαρωτή GeoSLAM ZEB Horizon (Προσωπικό αρχείο)

Ο αλγόριθμος SLAM που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των ακατέργαστων δεδομένων σάρωσης laser σε ένα τρισδιάστατο νέφος σημείων, βασίζεται σε υπάρχοντα χαρακτηριστικά στο περιβάλλον που σαρώνονται επανειλημμένα, καθώς ο χρήστης

διέρχεται από αυτό. Για να είναι ένα χαρακτηριστικό σημαντικό, θα πρέπει να έχει ένα συγκεκριμένο μέγεθος.

Παράλληλα δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή κατά τη μετάβαση μεταξύ των διαφορετικών δωμάτων (περάσματα από πόρτες), προκειμένου να αποφευχθεί η εισαγωγή σφαλμάτων. Κατά τη μετάβαση μεταξύ διαφορετικών περιβαλλόντων η τοπική προβολή μπορεί αλλάξει απότομα και ο αλγόριθμος SLAM μπορεί να δυσκολευτεί να τοποθετήσει το νέο περιβάλλον σε σχέση με το προηγούμενο. Αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τα δωμάτια και στις δύο πλευρές μιας πόρτας να είναι ελαφρώς εσφαλμένα ευθυγραμμισμένα. Για τον λόγο αυτό η μετάβαση μέσα από τις πόρτες ήταν αργή, ενώ βεβαιώθηκε ότι υπήρχε διάστημα, κατά το οποίο ο σαρωτής μπορούσε να δει χαρακτηριστικά και στις δύο πλευρές της πόρτας (δηλαδή και στα δύο δωμάτια).

Το βάδισμα κατά την σάρωση ήταν αργό, προκειμένου να επιτευχθεί καλή κάλυψη και να προκύψουν δεδομένα υψηλής ανάλυσης. Αν η κίνηση προς τα εμπρός είναι πολύ γρήγορη, ενδέχεται να μην υπάρχουν αρκετές επαναλαμβανόμενες σαρώσεις των χαρακτηριστικών για τον αλγόριθμο SLAM, για την επεξεργασία των ακατέργαστων δεδομένων laser σε ένα νέφος σημείων.

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε και στο εύρος μέτρησης. Τα δεδομένα με μικρή τιμή εύρους μέτρησης, δεν υποβάλλονται σε επεξεργασία (από προεπιλογή) για την εξάλειψη δεδομένων από τον χρήστη του σαρωτή, που περιλαμβάνεται στο τελικό νέφος σημείων. Για τον λόγο αυτό αποφεύχθηκε η κοντινή απόσταση από τοίχους και ορόφους.

Για πολύ μεγάλες έρευνες, το έργο πρέπει να αναλυθεί σε περισσότερες από μία αποστολές σάρωσης. Αυτό γίνεται για να αποφευχθούν τα πολύ μεγάλα μεγέθη αρχείων, αλλά και να μειωθεί το τυχόν σφάλμα μετατόπισης που μπορεί να δημιουργηθεί στα δεδομένα. Συνιστάται κάθε έρευνα να περιορίζεται σε 30 λεπτά. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η διάρκεια όλων των σαρώσεων ήταν μικρότερη των 30 λεπτών, οπότε καθεμιά από αυτές ολοκληρώθηκε σε μία αποστολή.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο αλγόριθμος SLAM είναι σε θέση να χειριστεί κινούμενα αντικείμενα στο περιβάλλον. Για να εκτιμήσει την κίνηση του σαρωτή, ο αλγόριθμος πρέπει να θεωρήσει ένα μεγάλο ποσοστό του περιβάλλοντος στατικό. Για τον λόγο αυτό τα κινούμενα αντικείμενα αποφεύχθηκαν, ειδικά κατά τη μετάβαση από τις πόρτες. Γενικά είναι βέλτιστη πρακτική να μην υπάρχουν άλλα άτομα που να συνοδεύουν στενά τον χρήστη κατά τη διάρκεια της απόκτησης των δεδομένων, καθώς θα σαρωθούν σε όλο τον χάρτη αφήνοντας λωρίδες δεδομένων. Εάν απαιτούνται άτομα για να ακολουθήσουν τον χρήστη θα πρέπει ιδανικά να διατηρούν απόσταση κάποιων μέτρων από αυτόν (GeoSLAM, 2020).

Τέλος δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στο γυαλί και στους καθρέπτες που υπήρχαν σε μερικούς από τους χώρους που αποτυπώθηκαν με την χρήση των συγκεκριμένων οργάνων. Τα αντικείμενα αυτά αποτυπώθηκαν με τον σαρωτή να είναι πλάτη σε αυτά. Καθώς χρησιμοποιείται η τεχνολογία σάρωσης LiDAR, τέτοιες επιφάνειες προκαλούν προβλήματα, δίνοντας εσφαλμένα δεδομένα εύρους στο ανακλώμενο εμπόδιο. Ακόμη δημιουργούνται λάθος ανακλώμενα σημεία, τα οποία προκαλούν σφάλματα στους χάρτες που δημιουργούνται από έναν αλγόριθμο SLAM.

Αξίζει να σημειωθεί πως και με τους δύο σαρωτές δημιουργήθηκαν δύο διαφορετικά αρχεία δεδομένων (.geoslam), ένα για το καρέ αξιωματικών κι ένα για τα ναυαρχικά διαμερίσματα. Η λήψη των αρχείων από το καταγραφικό δεδομένων του οργάνου πραγματοποιήθηκε από την εταιρία, συνδέοντας ένα USB στικάκι στην υποδοχή θύρας USB του καταγραφικού δεδομένων.

6.4.2 Εργασίες με την κάμερα Matterport Pro2 3D

Αρχικά η κάμερα Matterport Pro2 3D τοποθετήθηκε πάνω στον τρίποδα στην πρώτη θέση σάρωσης (Εικόνα 6.6). Το ύψος του οργάνου ρυθμίστηκε και διατηρήθηκε όσο το δυνατόν πιο σταθερό, καθ' όλη την διάρκεια της σάρωσης. Σε κάθε θέση η κάμερα οριζοντιώθηκε. Πατήθηκε το πλήκτρο λειτουργίας, οπότε ενεργοποιήθηκε το δίκτυο Wi-fi της κάμερας. Έπειτα συνδέθηκε στο δίκτυο αυτό η συσκευή IOS, στην οποία είναι εγκατεστημένη και η εφαρμογή Matterport Capture. Με το άνοιγμα της εφαρμογής επιλέχθηκε η προσθήκη μιας νέας εργασίας και δόθηκε όνομα σε αυτήν. Πατήθηκε το κουμπί έναρξης σάρωσης μέσα από την εφαρμογή και η κάμερα ξεκίνησε να περιστρέφεται 360°, κάνοντας λήψη διαδοχικών καρέ εικόνων. Κατά την διάρκεια αυτή, δεν έπρεπε να εμφανίζονται άνθρωποι και κινούμενα αντικείμενα μπροστά στην κάμερα. Επομένως κατά την περιστροφή της κάμερας 360° σε κάθε σάρωση, μετακινούνταν και ο χρήστης πίσω από αυτήν. Μόλις ολοκληρωθεί η περιστροφή, η κάμερα μεταφέρει αυτόματα τα δεδομένα σάρωσης στην εφαρμογή, οπότε αυτά ήταν ορατά στην οθόνη της συσκευής IOS (προεπισκόπηση). Η προεπισκόπηση αυτή απεικονίζει την σάρωση που πάρθηκε, μαζί με τον αριθμό της θέσης, από την οποία πάρθηκε η σάρωση αυτή. Έπειτα η κάμερα τοποθετήθηκε σε επόμενη θέση. Κάθε επόμενη θέση απέχει από την προηγούμενη περίπου 2.00m. Όπως έχει αναφερθεί η απόσταση μεταξύ διαδοχικών θέσεων πρέπει να είναι το πολύ 2.50m. Αυτό συμβαίνει επειδή οι διαδοχικές σαρώσεις πρέπει να έχουν κοινά χαρακτηριστικά σημεία και κατά συνέπεια επικαλυπτόμενα μέρη, τα οποία χρησιμοποιεί η κάμερα για να ευθυγραμμίσει σωστά την νέα σάρωση σε σχέση με την προηγούμενη. Το τελικό μοντέλο που δημιουργείται είναι ένα σετ από σαρώσεις. Κάθε σάρωση περιλαμβάνει δεδομένα που έχουν ληφθεί από μία θέση. Τα δεδομένα αυτά ευθυγραμμίζονται για να δημιουργηθεί ένα ολοκληρωμένο τρισδιάστατο μοντέλο. Τα δεδομένα στο καρέ αξιωματικών και στα ναυαρχικά διαμερίσματα, ελήφθησαν από 14 και από 21 διαφορετικές στάσεις μέτρησης αντίστοιχα.

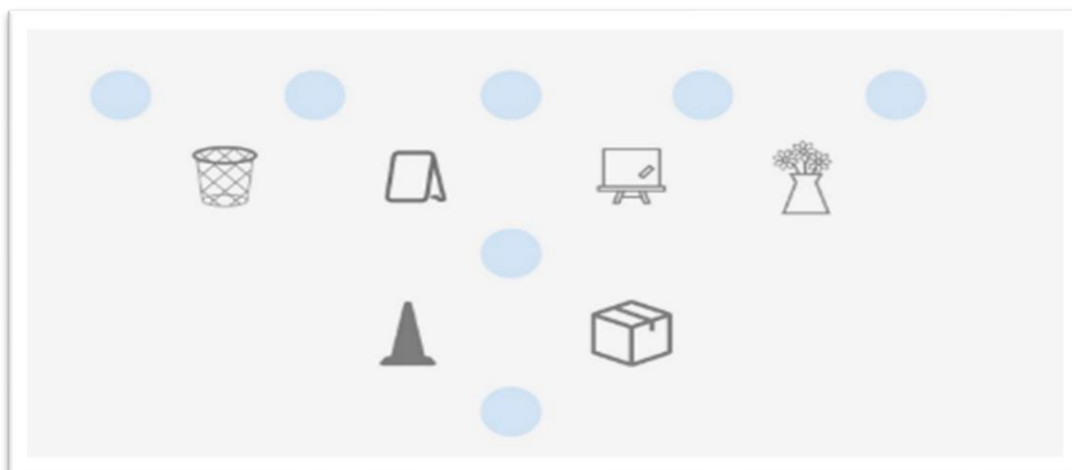


Εικόνα 6.6: Η κάμερα Matterport Pro2 3D, πάνω σε τρίποδα, στην πρώτη θέση σάρωσης (Προσωπικό αρχείο)

Κατά την διάρκεια των μετρήσεων δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή, ώστε οι διαδοχικές σαρώσεις να μην πραγματοποιούνται σε ένα μοτίβο ζικ-ζακ, καθώς κάτι τέτοιο θα είχε ως αποτέλεσμα μια κακή ευθυγράμμιση στο κέντρο του χώρου. Οι διαδοχικές στάσεις για την πραγματοποίηση των σαρώσεων, έγιναν στην περίμετρο του χώρου, όσο το δυνατόν πιο παράλληλα με τους τοίχους και με κάποια οπτική γωνία η μία σε σχέση με την άλλη (Εικόνα 6.7). Έπειτα πάρθηκαν σαρώσεις από κάποιες στάσεις που δημιουργήθηκαν στο κέντρο του χώρου, φροντίζοντας να απέχουν περίπου 2.00m από κάποια άλλη στάση (Εικόνα 6.8).

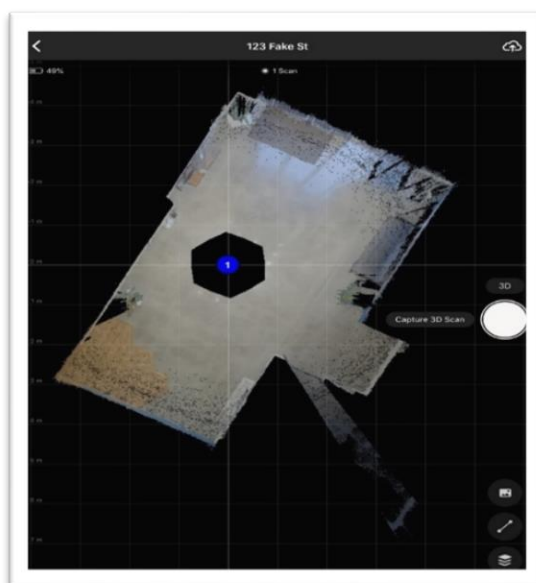


Εικόνα 6.7: Αριστερά η διαδρομή λήψης των δεδομένων με την κάμερα Matterport Pro2 3D που πρέπει να αποφεύγεται και δεξιά η διαδρομή που συνίσταται (Matterport, 2020)



Εικόνα 6.8: Λήψη δεδομένων με την κάμερα Matterport Pro2 3D, στο κέντρο του χώρου και υπό κάποια απόσταση μεταξύ των θέσεων σάρωσης (Matterport, 2020)

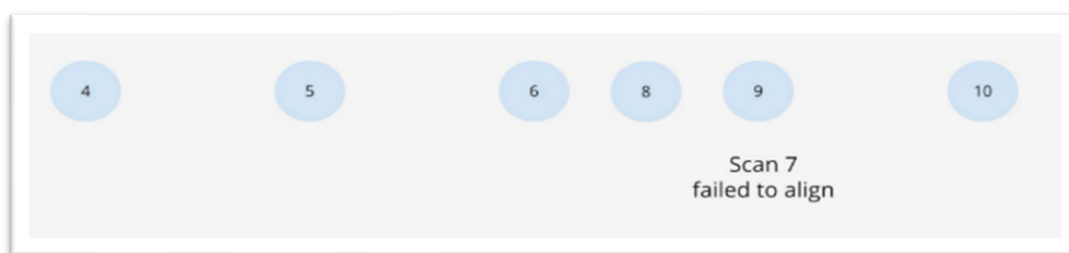
Οι σκούρες μαύρες περιοχές στο παράθυρο προεπισκόπησης (Εικόνα 6.9), υποδεικνύουν τμήματα του τρισδιάστατου χώρου που δεν καταγράφηκαν από την σάρωση (αυτός είναι ο λόγος που παρατηρείται πάντα ένα μαύρο εξάγωνο γύρω από τις θέσεις σάρωσης). Η κάμερα δεν σαρώνει μέχρι το πάτωμα (για να αποφευχθεί η σάρωση των ποδιών του τρίποδου). Γι' αυτό ο χρήστης πρέπει να μετακινήσει την κάμερα κοντά στις μαύρες περιοχές, αλλά όχι πάνω τους, προκειμένου αυτές να καλυφθούν από δεδομένα. Κάθε νέα σάρωση θα πρέπει να βρίσκεται σε οπτική γωνία με την προηγούμενη σάρωση, προκειμένου να γίνει σωστή ευθυγράμμιση. Κατά την διάρκεια της σάρωσης δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή κατά την μετάβαση από τις πόρτες, ώστε οι θέσεις σάρωσης να μην βρίσκονται μέσα στα πλαίσιά τους, αλλά μπροστά ή πίσω από αυτές.



Εικόνα 6.9: Τμήμα του τρισδιάστατου χώρου που δεν καταγράφηκε από την σάρωση με την κάμερα Matterport Pro2 3D (Matterport, 2023)

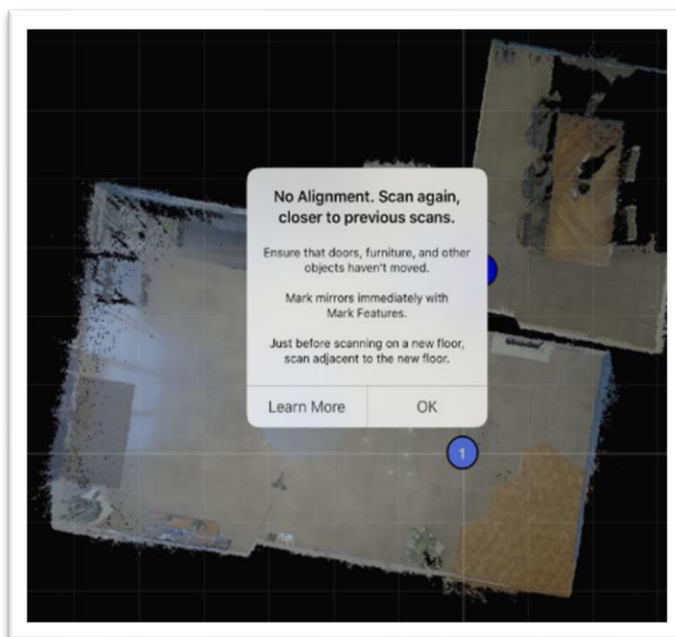
Κάθε φορά που ευθυγραμμίζονταν τα προηγούμενα δεδομένα σάρωσης με τα επόμενα, γινόταν έλεγχος κακής ευθυγράμμισης. Αναλυτικότερα έπειτα από κάθε σάρωση γινόταν έλεγχος από το παράθυρο προεπισκόπησης, για το εάν η θέση σάρωσης ήταν ίδια στο λογισμικό, με αυτή στην πραγματικότητα. Μία σάρωση που είναι σωστά ευθυγραμμισμένη σημαίνει ότι βρίσκεται στην ίδια θέση στο λογισμικό και στην πραγματικότητα. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος πρέπει να διαγραφεί η σάρωση αυτή. Η απόσταση μειώνεται στο μισό σε σχέση με την προηγούμενη σάρωση και πραγματοποιείται ξανά. Έπειτα η σάρωση συνεχίζει με το σταθερό βήμα που έχει επιλέξει ο χρήστης. Η εφαρμογή δεν ειδοποιεί με μήνυμα λάθους τις κακές ευθυγραμμίσεις, επομένως ο χρήστης είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο αυτών. Καθ' όλη την διάρκεια της σάρωσης δεν υπήρξε κακή ευθυγράμμιση.

Ακόμη μπορεί οι σαρώσεις να χάνονται (Εικόνα 6.10). Αυτό συμβαίνει όταν κανείς σαρώνει για αρκετή ώρα. Γι' αυτό ο χρήστης πρέπει να κοιτάει την εφαρμογή μετά από κάθε σάρωση για να βεβαιωθεί ότι αυτή έχει τοποθετηθεί στην προεπισκόπηση της σάρωσης. Το πρόβλημα αυτό συναντήθηκε κατά την διάρκεια των σαρώσεων.



Εικόνα 6.10: Απώλεια σάρωσης, κατά την συλλογή των δεδομένων με την κάμερα Matterport Pro2 3D (Matterport, 2020)

Κατά την διάρκεια της σάρωσης, δημιουργήθηκε και σφάλμα ευθυγράμμισης. Αναλυτικότερα, το σφάλμα αυτό προκύπτει όταν η εφαρμογή δεν μπορεί να συνενώσει την τελευταία σάρωση με καθεμιά από τις προηγούμενες κι εμφανίζει μήνυμα στην οθόνη (Εικόνα 6.11). Το Matterport Capture πραγματοποιεί την ευθυγράμμιση επικαλύπτοντας τα δεδομένα, αναζητώντας περιοχές υψηλής ομοιότητας. Αν δεν υπάρχουν επικαλυπτόμενα δεδομένα προκαλείται σφάλμα ευθυγράμμισης. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, πρέπει να μειωθεί η απόσταση από μία προηγούμενη ολοκληρωμένη σάρωση στο μισό και να σαρωθεί ξανά. Αν αυτό δεν λειτουργήσει, τότε διαγράφεται η πιο πρόσφατα ολοκληρωμένη σάρωση και πραγματοποιείται ξανά. Απ' την άλλη πλευρά, εάν υπάρχει πολύ επικάλυψη ή λανθασμένη επικάλυψη, προκαλείται κακή ευθυγράμμιση.



Εικόνα 6.11: Σφάλμα ευθυγράμμισης που εμφανίστηκε κατά την διάρκεια της σάρωσης με την κάμερα Matterport Pro2 3D (Matterport, 2020)

Η κάμερα Matterport επηρεάζεται από τις συνθήκες φωτισμού, οι οποίες δημιουργούν κακή ευθυγράμμιση στα δεδομένα. Γι' αυτό ο χώρος στον οποίο πραγματοποιούνται οι μετρήσεις δεν θα πρέπει να είναι πολύ σκοτεινός, αλλά ούτε και να εισέρχεται πολύ φως.

Η δημιουργία κακής ευθυγράμμισης αλλά και το σφάλμα ευθυγράμμισης οφείλονται στην ομοιομορφία του περιβάλλοντος και στην έλλειψη χαρακτηριστικών σημείων, στις κακές συνθήκες φωτισμού, στις μετακινήσεις αντικειμένων στην σκηνή και στην επικάλυψη μεταξύ των διαδοχικών εικόνων που λαμβάνονται από τις διαδοχικές στάσεις μέτρησης του οργάνου. Η λύση βρίσκεται στην μείωση της απόστασης μεταξύ των διαδοχικών στάσεων του οργάνου.

Μόλις ολοκληρώθηκε η σάρωση, η συσκευή IOS αποσυνδέθηκε από το δίκτυο Wi-fi της κάμερας και συνδέθηκε σε ένα εξωτερικό δίκτυο Wi-fi. Μέσα από την εφαρμογή, έγινε η μεταφόρτωση της σάρωσης στο Matterport Cloud. Αυτό επεξεργάζεται τις σαρώσεις σε ένα πλήρες τρισδιάστατο μοντέλο. Ο χρόνος επεξεργασίας αυξάνεται με τον αριθμό των σαρώσεων, την πολυπλοκότητα του μοντέλου, κ.λπ. Μόλις το τρισδιάστατο μοντέλο ήταν έτοιμο, ελήφθη ένα e-mail με έναν σύνδεσμο. Εάν πρόκειται να πραγματοποιηθούν αλλαγές στο μοντέλο σάρωσης, τότε αυτό μεταφορτώνεται ξανά στο Matterport Cloud προκειμένου να δημιουργηθεί ένα νέο τρισδιάστατο μοντέλο αυτόματα.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Κεφάλαιο 7: Επεξεργασία δεδομένων & Αποτελέσματα

7.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρέχονται κάποιες πληροφορίες σχετικά με το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την μερική επεξεργασία των νεφών σημείων που αποκτήθηκαν με την χρήση των τριών οργάνων. Ακόμη αναλύεται η συνολική επεξεργασία που πραγματοποιήθηκε στα νέφη σημείων του εκάστοτε οργάνου μέτρησης και γίνεται τόσο ποιοτική, όσο και μετρητική σύγκριση τελικών νεφών που προέκυψαν.

7.2 Το λογισμικό CloudCompare

Το λογισμικό CloudCompare, χρησιμοποιήθηκε για την μερική επεξεργασία των νεφών σημείων που αποκτήθηκαν με τους σαρωτές GeoSLAM ZEB Revo και ZEB Horizon. Αναλυτικότερα το λογισμικό αυτό χρησιμοποιείται για την διαχείριση και την σύγκριση των τρισδιάστατων νεφών σημείων, αλλά και των μοντέλων επιφανείας. Αρχικά δημιουργήθηκε κατά τη διάρκεια μιας συνεργασίας μεταξύ της Telecom ParisTech και του τμήματος E&A της EDF. Το έργο CloudCompare ξεκίνησε το 2003 με το διδακτορικό του Daniel Girardeau-Montaut σχετικά με την ανίχνευση αλλαγών σε τρισδιάστατα γεωμετρικά δεδομένα. Εκείνη την εποχή, ο κύριος σκοπός του ήταν να ανιχνεύσει γρήγορα αλλαγές σε τρισδιάστατα νέφη σημείων υψηλής πυκνότητας που αποκτήθηκαν με σαρωτές laser σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις (όπως σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής) ή εργοτάξια. Στη συνέχεια εξελίχθηκε προς ένα πιο γενικό και προηγμένο λογισμικό επεξεργασίας τρισδιάστατων δεδομένων. Είναι πλέον ένα ανεξάρτητο έργο ανοιχτού κώδικα και ένα ελεύθερο λογισμικό.

Το λογισμικό μεταξύ άλλων μπορεί:

- Να υπολογίζει τις αποστάσεις μεταξύ δύο πυκνών νεφών σημείων
- Να απομακρύνει τον θόρυβο που προκύπτει από τις μετρήσεις των σαρωτών laser και να αναγνωρίζει τις διαφορές
- Να αναγνωρίζει μεμονωμένα αντικείμενα ή μέρη αυτών που διαφέρουν μεταξύ δύο συνόλων δεδομένων

Το CloudCompare παρέχει ένα σύνολο βασικών εργαλείων για την χειροκίνητη επεξεργασία και την απόδοση των τρισδιάστατων νεφών σημείων και τριγωνικών πλεγμάτων. Προσφέρει επίσης διάφορους προηγμένους αλγόριθμους επεξεργασίας, μεταξύ των οποίων και μεθόδους για την εκτέλεση:

- Προβολών (με βάση τον άξονα, κυλινδρική, κωνική, ...)
- Συνένωσης νεφών σημείων (ICP, ...)
- Υπολογισμών απόστασης (από νέφος σημείων σε νέφος σημείων, από νέφος σημείων σε πλέγμα, απόσταση του πλησιέστερου γείτονα, ...)
- Υπολογισμών στατιστικών στοιχείων (κατανομή X^2 , ...)
- Κατάτμησης

- Εκτίμησης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών (πυκνότητα, καμπυλότητα, τραχύτητα, προσανατολισμός γεωλογικού επιπέδου, ...)

Το CloudCompare μπορεί να χειριστεί πολλά βαθμωτά πεδία ανά νέφος σημείων, στο οποίο μπορούν να εφαρμοστούν διάφοροι αλγόριθμοι (εξομάλυνση, αξιολόγηση κλίσης, στατιστικά στοιχεία, κ.λ.π.). Ένα σύστημα δυναμικής απόδοσης χρωμάτων βοηθά τον χρήστη να οπτικοποιήσει τα βαθμωτά πεδία ανά σημείο, με αποτελεσματικό τρόπο.

Ο χρήστης μπορεί να τμηματοποιήσει τις τρισδιάστατες οντότητες (με την σχεδίαση μίας δισδιάστατης γραμμής στην οθόνη), να περιστρέψει μία ή περισσότερες οντότητες σε σχέση με άλλες, να επιλέξει μεμονωμένα σημεία ή ζεύγη σημείων (προκειμένου να παρθεί το αντίστοιχο μήκος τμήματος) ή τριπλέτες σημείων (προκειμένου να παρθεί η αντίστοιχη γωνία και το κανονικό επίπεδο) (Damien, n.d.).

Το CloudCompare επιτρέπει την εισαγωγή, την εξαγωγή, αλλά και την μετατροπή των αρχείων σε πολλούς και διαφορετικούς τύπους (format). Ακόμη μπορεί να μετατρέπει τα τριγωνικά πλέγματα σε νέφη σημείων. Παράλληλα το πρόγραμμα παρέχει μετρητική πληροφορία. Κάθε σημείο που υπάρχει στο νέφος υποστηρίζεται από μία ετικέτα δεδομένων, η οποία παρέχει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με αυτό. Κατά την διάρκεια της επεξεργασίας ενός νέφους σημείων μπορεί να πραγματοποιηθεί η αποκοπή ενός τμήματος από αυτό, ή σημείων που δεν χρειάζονται και φέρουν περιττή πληροφορία. Ακόμη μπορεί να δημιουργηθεί μία τομή στο νέφος σημείων. Άλλη μία σημαντική δυνατότητα που προσφέρει το λογισμικό είναι η μείωση του αριθμού των σημείων που υπάρχουν σε ένα πυκνό νέφος μέσα από διαφορετικές μεθόδους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του ίδιου του μεγέθους του αρχείου, ώστε να είναι ευκολότερα επεξεργάσιμο. Επιπροσθέτως το λογισμικό μέσα από την συνένωση και την ευθυγράμμιση είτε δύο νεφών σημείων, είτε ενός νέφους σημείων κι ενός πλέγματος, μπορεί να δείξει τις ομοιότητες και τις διαφορές μεταξύ τους, σε περίπτωση που αυτά έχουν παρθεί σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Με αυτό τον τρόπο, το πρόγραμμα μπορεί να δείξει τις μετακινήσεις που έχουν συμβεί σε μία οντότητα με την πάροδο του χρόνου, μέσα από την σύγκριση δύο νεφών σημείων που έχουν παρθεί διαφορετικές χρονικές στιγμές. Τέλος το CloudCompare, προσφέρει την δυνατότητα οπτικοποίησης της οντότητας που μελετάται, μέσα από την δημιουργία ενός βίντεο κινούμενης σχεδίασης, όπου δημιουργούνται πολλά σημεία θέασης, στα οποία ο χρήστης δίνει την κατάλληλη κίνηση και στην συνέχεια αυτά συνενώνονται αυτόματα από το πρόγραμμα, προκειμένου να δημιουργηθεί το τελικό βίντεο.

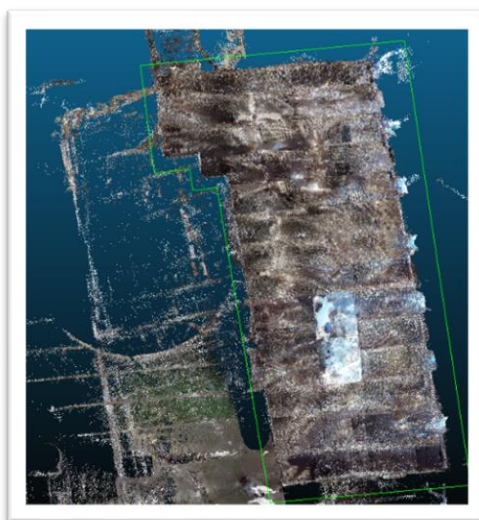
7.3 Επεξεργασία δεδομένων

Στόχος της επεξεργασίας των δεδομένων που ελήφθησαν με την χρήση των τριών διαφορετικών οργάνων, είναι η τελική παρουσίαση και η οπτικοποίησή τους, αλλά και η αξιολόγηση της μετρητικής τους αξιοπιστίας. Αναλυτικότερα, δημιουργήθηκαν εικονικές περιηγήσεις των τρισδιάστατων νεφών, για τους χώρους που μελετήθηκαν (καρέ αξιωματικών και ναυαρχικά διαμερίσματα) από κάθε όργανο, αποσπάσματα των οποίων απεικονίζονται παρακάτω. Παράλληλα τα τρία όργανα μέτρησης συγκρίθηκαν μεταξύ τους, προκειμένου να βρεθεί η μετρητική αξιοπιστία τους.

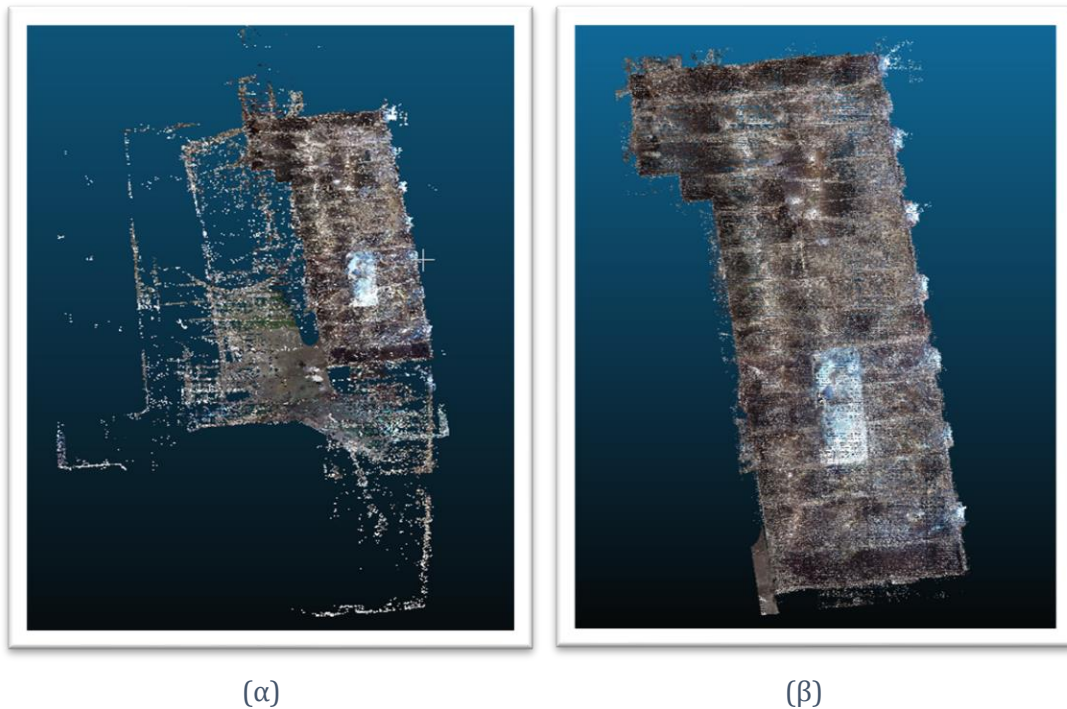
7.3.1 Επεξεργασία δεδομένων σαρωτή GeoSLAM ZEB Rev0

Η αρχική επεξεργασία των δεδομένων που ελήφθησαν με τον σαρωτή ZEB Rev0, πραγματοποιήθηκε από την εταιρία μέσω του προγράμματος GeoSLAM Connect. Αναλυτικότερα το κάθε αρχείο που προκύπτει με την λήψη των δεδομένων από τον σαρωτή (δύο σε αριθμό-ένα για το καρέ αξιωματικών κι ένα για τα ναυαρχικά διαμερίσματα), είναι της μορφής .geoslam και περιέχει τα πρωτογενή του δεδομένα, τα οποία δεν είναι επεξεργάσιμα με κάποιον τρόπο. Για τον λόγο αυτό απαιτείται η μετατροπή των ακατέργαστων δεδομένων που συλλέχθηκαν (.geoslam), σε ομογενή τρισδιάστατα νέφη σημείων (.laz), χρησιμοποιώντας τον τρισδιάστατο αλγόριθμο SLAM. Έπειτα από την αρχική επεξεργασία της εταιρίας, όπου έχουν δημιουργηθεί τα δύο νέφη σημείων για τους επιθυμητούς χώρους, πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή αυτών στο λογισμικό CloudCompare για περαιτέρω επεξεργασία. Η αναλυτική περιγραφή της επεξεργασίας των δεδομένων για την δημιουργία της εικονικής περιήγησης, θα πραγματοποιηθεί για το νέφος σημείων που αναφέρεται στο καρέ αξιωματικών. Ομοίως πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία και για το νέφος σημείων των ναυαρχικών διαμερισμάτων.

Αρχικά εισήχθη στο πρόγραμμα το νέφος σημείων, μέσα από την εντολή **File > Open**. Αξίζει να σημειωθεί πως το αρχείο είχε την μορφή .laz. Μέσα από την επιλογή **Tools > Segment**, έγινε αποκοπή του μεγαλύτερου μέρους της περιττής πληροφορίας, ώστε να μείνει μόνο ο χώρος ενδιαφέροντος (Εικόνες 7.1, 7.2). Αναλυτικότερα, αυτό το εργαλείο επιτρέπει στον χρήστη να τμηματοποιήσει ή να αποκόψει διαδραστικά τις επιλεγμένες οντότητες, ορίζοντας ένα δισδιάστατο πολύγωνο στην οθόνη. Η δημιουργία του πολυγώνου ολοκληρώνεται πατώντας δεξί κλικ στο ποντίκι. Στην συνέχεια ο χρήστης μπορεί να αποφασίσει να διατηρήσει τα σημεία (ή τα τρίγωνα) που εμπίπτουν εντός ή εκτός του περιγράμματος του πολυγώνου. Στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε να διατηρηθούν τα σημεία που εμπίπτουν εντός του περιγράμματος του πολυγώνου (**Segment In**) και αποτελούν τον χώρο ενδιαφέροντος. Με την επιλογή **Confirm Segmentation (Enter)**, δημιουργείται το θεματικό επίπεδο με τα σημεία που διατηρήθηκαν, δηλαδή αυτά εντός του πολυγώνου (χώρος ενδιαφέροντος).

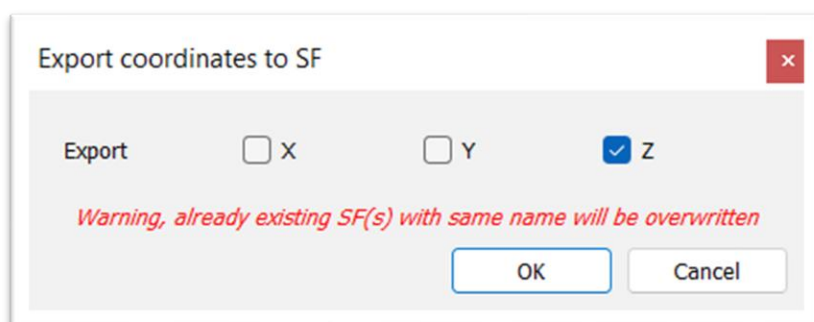


Εικόνα 7.1: Αποκοπή της περιττής πληροφορίας, γύρω από τον χώρο ενδιαφέροντος

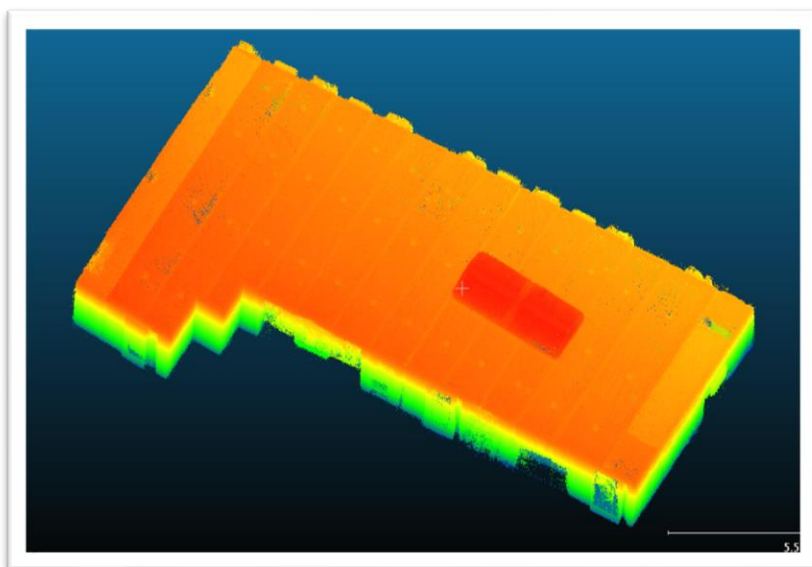


Εικόνα 7.2: (α) Το αρχικό νέφος σημείων με την περιττή πληροφορία γύρω από τον χώρο ενδιαφέροντος και (β) Το αποτέλεσμα της αποκοπής

Οι συντεταγμένες των σημείων εξήχθησαν σε βαθμωτά πεδία, βάσει της συντεταγμένης Z, δηλαδή βάσει των υψομέτρων, μέσα από το εργαλείο **Tools > Projection > Export Coordinate(s) to SF(s)** (Εικόνα 7.3), προκειμένου το νέφος να είναι καλύτερο οπτικά. Τα σημεία που βρίσκονται σε χαμηλότερα υψόμετρα χρωματίζονται μπλε, ενώ όσο το υψόμετρο αυξάνεται η διαβάθμιση γίνεται πράσινη-κίτρινη, με τα σημεία που βρίσκονται σε μεγαλύτερο υψόμετρο να χρωματίζονται πορτοκαλί (Εικόνα 7.4).

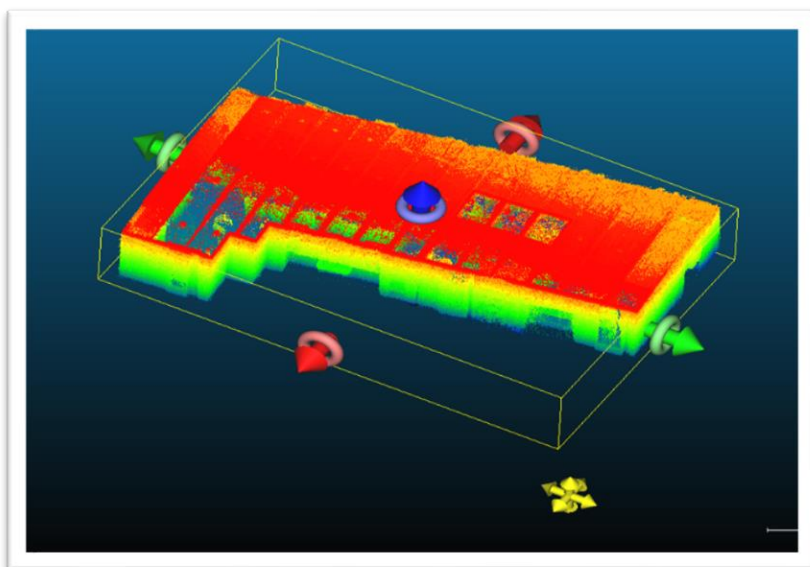


Εικόνα 7.3: Παράθυρο εξαγωγής των σημείων του νέφους σε βαθμωτά πεδία, βάσει των υψομέτρων



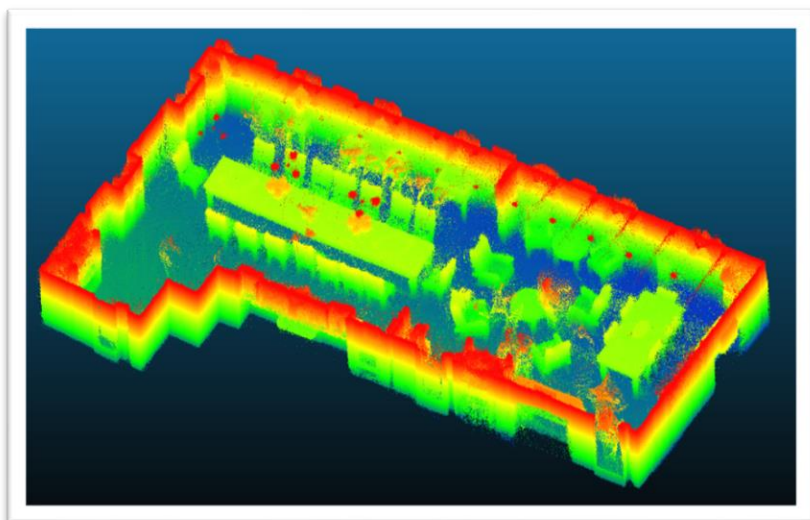
Εικόνα 7.4: Τα σημεία του νέφους σε βαθμωτά πεδία, βάσει των υψομέτρων

Προκειμένου να είναι ορατό το εσωτερικό του καρέ αξιωματικών έπρεπε να απομονωθεί η οροφή του. Για τον λόγο αυτό δημιουργήθηκε μία τομή στο νέφος σημείων (Εικόνα 7.5), με την επιλογή **Tools > Segmentation > Cross Section**. Το εργαλείο αυτό δημιουργεί τομές σε μία οντότητα σε οποιοδήποτε από τα τρία επίπεδα, (X, Y, Z). Αναλυτικότερα επιτρέπει στον χρήστη να ορίσει ένα πλαίσιο αποκοπής γύρω από μία ή περισσότερες οντότητες. Η έκταση και ο προσανατολισμός του πλαισίου μπορούν να ρυθμιστούν χειροκίνητα και απαιτεί από τον χρήστη να σύρει τα μεγάλα κόκκινα, πράσινα και μπλε βέλη, έτσι ώστε να μετακινήσει τα όρια του πλαισίου αποκοπής απευθείας στην τρισδιάστατη προβολή. Οι άκρες του κάθε βέλους χρησιμοποιούνται για την ώθηση και το τράβηγμα των όψεων του πλαισίου αποκοπής. Ακόμη δίνεται η δυνατότητα περιστροφής του πλαισίου αποκοπής στις τρεις διαστάσεις. Η όψη της τρισδιάστατης προβολής μπορεί να αλλάξει κατά την αποκοπή. Με την επιλογή **Export Selection as new entities**, εξήχθη το θεματικό επίπεδο της τομής που δημιουργήθηκε (CloudCompareWiki).



Εικόνα 7.5: Πραγματοποίηση τομής στο νέφος σημείων, για την απομόνωση της οροφής

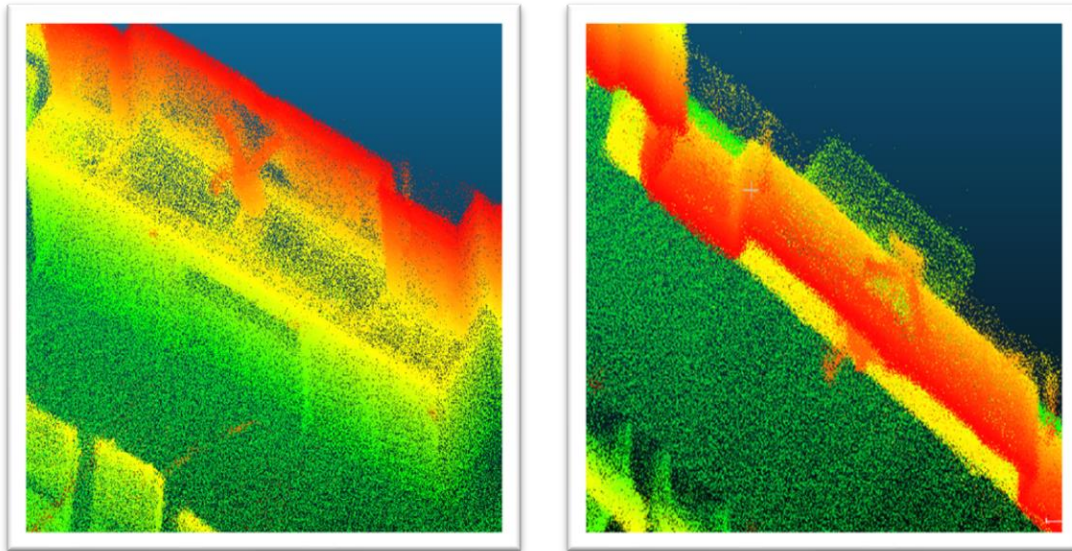
Με την δημιουργία της τομής, παρατηρείται ότι το νέφος σημείων στο εσωτερικό του χαρακτηρίζεται από αρκετό θόρυβο καθώς υπάρχουν αρκετά ανεπιθύμητα σημεία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα σημεία που βρίσκονται στον αέρα (Εικόνα 7.6) και δεν αποτελούν χρήσιμη πληροφορία, καθώς δεν περιγράφουν την γεωμετρία κάποιου αντικειμένου ή του χώρου γενικότερα. Συνεπώς τέτοια σημεία πρέπει να αφαιρεθούν.



Εικόνα 7.6: Θορυβώδη δεδομένα στο εσωτερικό του νέφους σημείων

Αξίζει να σημειωθεί πως ο χώρος που μελετάται, αποτελείται από πολλές γυάλινες επιφάνειες και καθρέπτες και αυτός είναι ένας λόγος για τον οποίο υπάρχει αρκετός θόρυβος στο νέφος σημείων. Καθώς χρησιμοποιείται η τεχνολογία σάρωσης LiDAR, τέτοιες επιφάνειες προκαλούν προβλήματα, δίνοντας εσφαλμένα δεδομένα εύρους στο

ανακλώμενο εμπόδιο. Ακόμη δημιουργούνται λάθος ανακλώμενα σημεία, τα οποία προκαλούν σφάλματα στους χάρτες που δημιουργούνται από έναν αλγόριθμο SLAM. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το αγαλαμάτιδιο που απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα, το οποίο βρίσκεται μπροστά από έναν καθρέπτη. Η ανάκλαση της δέσμης laser πάνω στον καθρέπτη, έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία του ειδώλου του αγαλαματιδίου πίσω από αυτόν στο νέφος σημείων (Εικόνα 7.7).



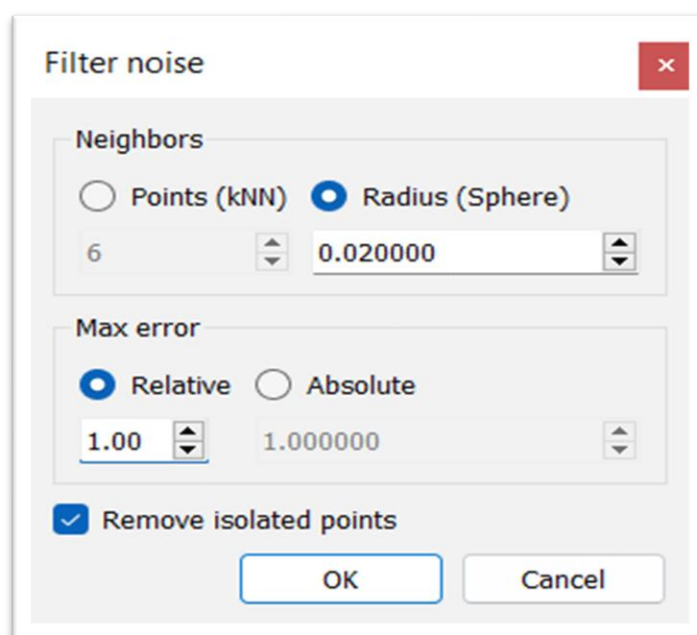
Εικόνα 7.7: Δημιουργία του ειδώλου του αγαλαματιδίου πίσω από τον καθρέπτη

Προκειμένου να απομακρυνθεί ο θόρυβος από το νέφος σημείων, αρχικά έγινε εφαρμογή ενός φίλτρου καθαρισμού με την επιλογή **Tools > Clean > Noise filter**, προκειμένου να αφαιρεθεί το μεγαλύτερο μέρος της περιττής πληροφορίας. Το εργαλείο αυτό δημιουργεί τοπικά ένα επίπεδο γύρω από κάθε σημείο του νέφους κι έπειτα αφαιρεί όποιο σημείο είναι μακριά από αυτό το προσαρμοσμένο επίπεδο. Το φίλτρο αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως φίλτρο χαμηλής διέλευσης. Για να εκτιμήσει την επίπεδη επιφάνεια, ο χρήστης μπορεί να ορίσει μια ακτίνα ή έναν (σταθερό) αριθμό γειτόνων. Κατά την εκτέλεση της εντολής ο χρήστης πρέπει μεταξύ άλλων:

- Να επιλέξει είτε να εξάγει έναν δεδομένο αριθμό γειτόνων γύρω από κάθε σημείο (η επιλογή αυτή είναι κατάλληλη μόνο για νέφη σημείων με σταθερή πυκνότητα), είτε να καθορίσει μια σφαιρική ακτίνα (η σφαίρα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη και να περιλαμβάνει τουλάχιστον έξι σημεία)
- Να εισάγει ένα μέγιστο σφάλμα (απόσταση του σημείου από το προσαρμοσμένο επίπεδο), ώστε ο αλγόριθμος να αποφασίσει εάν ένα σημείο θα απορριφθεί ή όχι. Το σφάλμα μπορεί να είναι είτε σχετικό (ως παράγοντας του σφάλματος επαναπροβολής των γειτόνων στο προσαρμοσμένο επίπεδο), είτε απόλυτο.

Τέλος δίνεται η επιλογή στον χρήστη να αφαιρέσει τα απομονωμένα σημεία, δηλαδή σημεία που έχουν λιγότερους από τρεις γείτονες.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση προτιμήθηκε η απαλοιφή του θορύβου να γίνει με τον ορισμό μιας σφαιρικής ακτίνας, έναντι της επιλογής ενός συγκεκριμένου αριθμού γειτόνων, καθώς το νέφος σημείων είναι ανομοιόμορφο. Κατά την απαλοιφή του θορύβου εφαρμόστηκαν διάφορες σφαιρικές ακτίνες. Παρατηρήθηκε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ακτίνα, τόσο καλύτερα απαλείφεται ο θόρυβος στους τοίχους, ωστόσο δεν συμβαίνει το ίδιο με τα αντικείμενα, στα οποία ο θόρυβος παραμένει. Αντιθέτως εφαρμόζοντας μικρότερη ακτίνα παρατηρήθηκε ότι οι τοίχοι εμφανίζουν κενά, ενώ μειώνεται σε ικανοποιητικό βαθμό ο θόρυβος για κάποια αντικείμενα, αλλά παράλληλα χάνονται κομμάτια σε κάποια άλλα. Για τον λόγο αυτό εφαρμόστηκε μία ενδιάμεση ακτίνα. Αξίζει να σημειωθεί πως όλος ο χώρος δεν έχει την ίδια πυκνότητα σημείων. Οι σαρώσεις που πραγματοποιήθηκαν με την χρήση του σαρωτή ZEB Revo, στόχευαν στην αποτύπωση των τοίχων του χώρου, κι επομένως δεν δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην σάρωση των αντικειμένων και των λεπτομερειών τους. Κατά συνέπεια ορισμένα αντικείμενα δεν είναι πλήρη. Για παράδειγμα δεν έχουν συλλεχθεί αρκετά δεδομένα στα καθίσματα των καρεκλών. Όταν ένα νέφος σημείων παρουσιάζει ασυνέχειες σε ορισμένα σημεία του (ελλιπή σημεία), είναι λογικό κατά την απαλοιφή του θορύβου στις περιοχές αυτές το νέφος να εμφανίζεται ακόμα πιο κενό. Παρακάτω απεικονίζεται το παράθυρο που εμφανίζεται κατά την εκτέλεση της εντολής για την απαλοιφή του θορύβου (Εικόνα 7.8). Η ακτίνα της σφαίρας ορίστηκε ίση με 0.02, ενώ το σχετικό σφάλμα ορίστηκε ίσο με 1.00. Παράλληλα επιλέχθηκε να αφαιρεθούν τα απομακρυσμένα σημεία.



Εικόνα 7.8: Παράθυρο επιλογής των κατάλληλων παραμέτρων για την απαλοιφή του θορύβου στο νέφος σημείων, μέσα από το πρόγραμμα CloudCompare

Έπειτα από την απαλοιφή του μεγαλύτερου μέρους του θορύβου, διαγράφηκαν χειροκίνητα κάποια περιττά σημεία που είχαν απομείνει γύρω από τους τοίχους του επιθυμητού χώρου. Το νέφος σημείων χωρίστηκε σε μικρότερα τμήματα μέσα από το



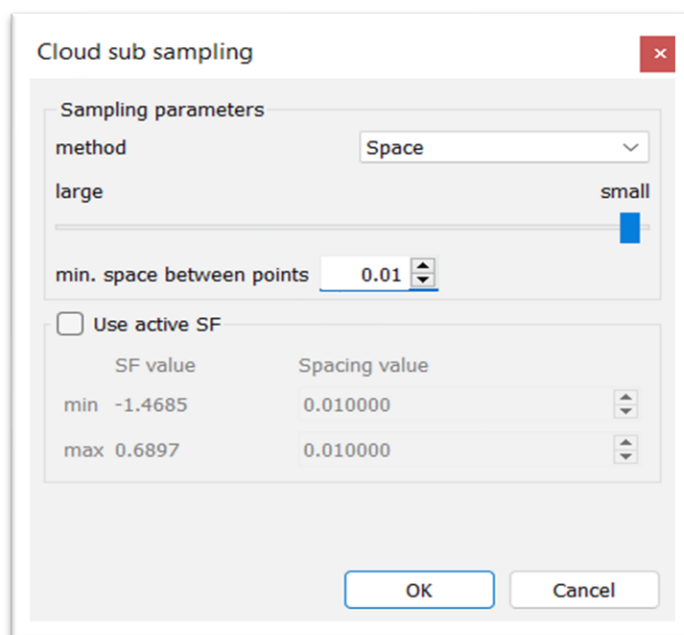
εργαλείο **Segment**, προκειμένου να είναι πιο εύκολη η χειροκίνητη απαλοιφή του εναπομείναντος θορύβου στο εσωτερικό του. Η δυσκολία στην συγκεκριμένη διαδικασία έγκειται στην απαραίτητη προσοχή, ώστε να μην διαγραφεί χρήσιμη πληροφορία. Σκοπός του χειροκίνητου καθαρισμού είναι η ευκολότερη διαχείριση των νεφών (ταχύτητα επεξεργασίας) και η αναγνώριση των αντικειμένων. Αφού αφαιρέθηκε ο θόρυβος χειροκίνητα σε κάθε τμήμα, στην συνέχεια αυτά συνενώθηκαν με την εντολή **Merge multiple clouds**. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7.1) φαίνεται ο αρχικός και ο τελικός αριθμός των σημείων στο νέφος του καρέ αξιωματικών και των ναυαρχικών διαμερισμάτων αντίστοιχα.

Πίνακας 7.1: Αρχικός και τελικός αριθμός σημείων στα νέφη του σαρωτή ZEB Revo

	ZEB Revo	
	Αρχικό νέφος (σημεία)	Τελικό νέφος (σημεία)
Καρέ αξιωματικών	15,052,970	10,400,833
Ναυαρχικά διαμερίσματα	24,339,091	6,250,010

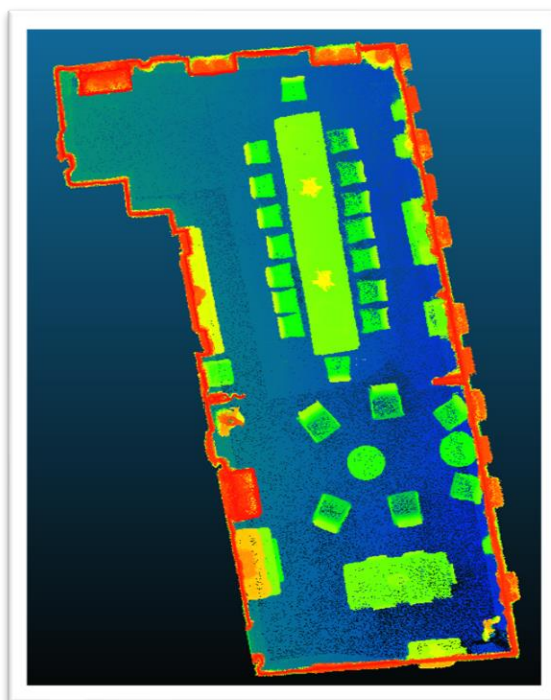
Προκειμένου το αποτέλεσμα να είναι καλύτερο οπτικά, έγινε μείωση του αριθμού των σημείων στο νέφος, με την επιλογή **Edit > Subsample**. Το εργαλείο αυτό δίνει τρεις διαφορετικές επιλογές για την μείωση του αριθμού των σημείων του νέφους. Για παράδειγμα ο χρήστης μπορεί να επιλέξει και να διαγράψει έναν καθορισμένο αριθμό σημείων με τυχαίο τρόπο. Στην χωρική επιλογή, ο χρήστης πρέπει να ορίσει μια ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο σημείων. Στη συνέχεια, το πρόγραμμα θα επιλέξει σημεία από το αρχικό νέφος, έτσι ώστε κανένα σημείο του νέφους εξόδου να μην είναι πιο κοντά σε ένα άλλο σημείο, από την καθορισμένη τιμή. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της ελάχιστης απόστασης μεταξύ των σημείων, τόσο λιγότερα σημεία θα παραμείνουν στο νέφος και το αντίστροφο. Τέλος η λειτουργία octree επιτρέπει στον χρήστη να επιλέξει ένα επίπεδο υποδιαίρεσης των οκτάδων, στο οποίο θα απλοποιηθεί το νέφος. Σε κάθε κελί της οκτάδας, διατηρείται το πλησιέστερο σημείο στο κέντρο των κυψελών της οκτάδας. Όσο μεγαλύτερο είναι το επίπεδο της υποδιαίρεσης, τόσο περισσότερα σημεία παραμένουν στο νέφος και το αντίστροφο. Η καταμέτρηση των σημείων του νέφους είναι ορατή στο παράθυρο Properties, στην κάτω αριστερή πλευρά της οθόνης. Η συγκεκριμένη λειτουργία, ταυτόχρονα με την διατήρηση των ελάχιστων απαραίτητων σημείων για την αναγνώριση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των αντικειμένων και την απλοποίηση των επιφανειών, καθιστά το νέφος πιο εύκολα διαχειρίσιμο εντός του περιβάλλοντος του λογισμικού ([CloudCompareWiki](#)).

Στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε η μείωση του αριθμού των σημείων για το νέφος, να γίνει βάσει της χωρικής επιλογής. Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των σημείων, έπειτα από πειραματισμούς ορίστηκε ίση με 0.01 (Εικόνα 7.9), καθώς αυτή η τιμή έδινε ένα καλό οπτικά αποτέλεσμα στο τρισδιάστατο νέφος.

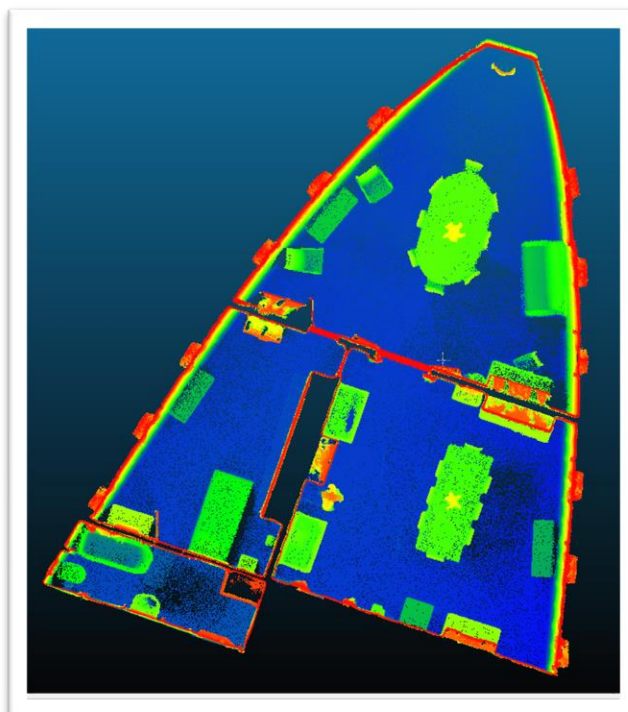


Εικόνα 7.9: Παράθυρο επιλογής των κατάλληλων παραμέτρων για την μείωση του αριθμού των σημείων στο νέφος, μέσα από το πρόγραμμα CloudCompare

Παρακάτω παρατίθενται ορισμένα στιγμιότυπα των εικονικών περιηγήσεων των τρισδιάστατων νεφών σημείων που δημιουργήθηκαν, μέσα από το πρόγραμμα CloudCompare (Εικόνες 7.10, 7.11). Για την δημιουργία μιας εικονικής περιήγησης, επιλέχθηκαν πολλά σημεία θέασης, στα οποία ο χρήστης έδωσε την κατάλληλη κίνηση και στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε η αυτόματη συνένωση αυτών από το πρόγραμμα. Περισσότερα στιγμιότυπα από τις εικονικές περιηγήσεις που δημιουργήθηκαν, απεικονίζονται στο [Παράρτημα Α](#).



Εικόνα 7.10: Κάτοψη με τομή από την οροφή, του τρισδιάστατου νέφους σημείων του καρέ αξιωματικών που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Reno, στιγμιότυπο της εικονικής περιήγησης



Εικόνα 7.11: Κάτοψη με τομή από την οροφή, του τρισδιάστατου νέφους σημείων των ναυαρχικών διαμερισμάτων που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Reno, στιγμιότυπο της εικονικής περιήγησης



7.3.2 Επεξεργασία δεδομένων σαρωτή GeoSLAM ZEB Horizon

Η αρχική επεξεργασία των δεδομένων που ελήφθησαν με τον σαρωτή ZEB Horizon, πραγματοποιήθηκε από την εταιρία μέσω του προγράμματος GeoSLAM Connect. Αναλυτικότερα το κάθε αρχείο που προκύπτει με την λήψη των δεδομένων από τον σαρωτή (δύο σε αριθμό-ένα για το καρέ αξιωματικών κι ένα για τα ναυαρχικά διαμερίσματα), είναι της μορφής .geoslam και περιέχει τα πρωτογενή του δεδομένα, τα οποία δεν είναι επεξεργάσιμα με κάποιον τρόπο. Για τον λόγο αυτό απαιτείται η μετατροπή των ακατέργαστων δεδομένων που συλλέχθηκαν (.geoslam), σε ομογενή τρισδιάστατα νέφη σημείων (.laz), χρησιμοποιώντας τον τρισδιάστατο αλγόριθμο SLAM. Στην περίπτωση του ZEB Horizon, σε αντίθεση με τον σαρωτή ZEB Revo, χρησιμοποιήθηκε και κάμερα για τον χρωματισμό του νέφους. Επομένως μαζί με τα πρωτογενή δεδομένα του σαρωτή έγινε λήψη κι ενός φακέλου με εικόνες, για κάθε αρχείο.

Έπειτα από την μετατροπή των πρωτογενών δεδομένων του σαρωτή σε νέφη σημείων, πραγματοποιήθηκε πειραματισμός με διάφορα φίλτρα καθαρισμού του θορύβου σε αυτά. Το φίλτρο που έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα και εφαρμόστηκε ονομάζεται transient. Πρόκειται για ένα φίλτρο που ταξινομεί τα σημεία που είναι προσωρινά. Αναλυτικότερα το φίλτρο αυτό αντιλαμβάνεται κάποιες οντότητες που βλέπει σε μία χρονική στιγμή. Ωστόσο εάν σε επόμενη χρονική στιγμή δεν παρατηρήσει ξανά αυτές τις οντότητες, τις αντιλαμβάνεται ως κινούμενες (όχι στατικές) και τις αφαιρεί. Αξίζει να σημειωθεί πως το φίλτρο αυτό δεν αναφέρεται στον θόρυβο που προκαλείται από τον χρήστη του σαρωτή, καθώς ακολουθείται άλλη διαδικασία για την απαλοιφή αυτού. Το φίλτρο αυτό αναφέρεται σε κινούμενες οντότητες, όπως είναι για παράδειγμα οι άνθρωποι που ακολουθούν τον χρήστη κατά την διάρκεια της σάρωσης, τα οχήματα, κ.λ.π., που μετακινούνται κοντά στον σαρωτή κατά την διάρκεια της σάρωσης. Η διαδικασία απαλοιφής του θορύβου που προκύπτει από τον χρήστη, αναφέρεται στον ορισμό ενός πλαισίου συγκεκριμένων διαστάσεων γύρω από τον σαρωτή. Ότι βρίσκεται μέσα στο πλαίσιο αυτό αφαιρείται. Η διαδικασία απαλοιφής του μεγαλύτερου μέρους του θορύβου, μέσα από το πρόγραμμα GeoSLAM Connect, πραγματοποιήθηκε από την εταιρία.

Από την εταιρία πραγματοποιήθηκε και ο χρωματισμός του κάθε νέφους σημείων, ακολουθώντας τρία βήματα. Αρχικά παράγεται ένα σύνολο ίσων και ορθογώνιων (πανοραμικών) εικόνων που δημιουργούνται από τα ζεύγη εικόνων που αποκτήθηκαν από την κάμερα (ένα καρέ ανά δευτερόλεπτο). Παράγεται επίσης ένα αρχείο που περιέχει το όνομα (και τη διαδρομή) της κάθε εικόνας, αλλά και τον χρόνο απόκτησής της. Για να δημιουργηθούν οι ίσες και ορθογώνιες εικόνες, η εικόνα από κάθε αισθητήρα (κυκλική fisheye εικόνα), μετατρέπεται πρώτα σε ορθογώνια εικόνα εφαρμόζοντας τις παραμέτρους του μοντέλου παραμόρφωσης φακού που ορίζονται στο αρχείο βαθμονόμησης της κάμερας (camera_cal.json). Στη συνέχεια, οι δύο ορθογώνιες εικόνες ενώνονται και πάλι, χρησιμοποιώντας τις καθορισμένες παραμέτρους στο αρχείο βαθμονόμησης της κάμερας. Προκειμένου να ευθυγραμμιστούν τα δεδομένα του νέφους με τις εικόνες, απαιτείται η γνώση της ακριβούς θέσης και του προσανατολισμού (πόζας) της κάμερας, την στιγμή λήψης της εκάστοτε εικόνας. Η πόζα της κάμερας υπολογίζεται από την πόζα του σαρωτή. Ο χρόνος λήψης της εικόνας αντιστοιχίζεται με το αρχείο

τροχιάς του σαρωτή. Εφαρμόζονται οι σχετικές θέσεις και οι μετατοπίσεις μεταξύ των αξόνων περιστροφής της κάμερας και του σαρωτή. Οι πληροφορίες πόζας της εικόνας εξάγονται σε ένα αρχείο (*.gs-vision). Αυτό το αρχείο μπορεί να φορτωθεί στο πρόγραμμα, για να επιτραπεί η ταυτόχρονη εμφάνιση του νέφους σημείου και των δεδομένων εικόνας.

Τέλος εξάγονται πληροφορίες χρώματος (τιμές RGB), από τις ίσες και ορθογώνιες εικόνες και εφαρμόζονται στα δεδομένα του νέφους σημείων (GeoSLAM, 2022).

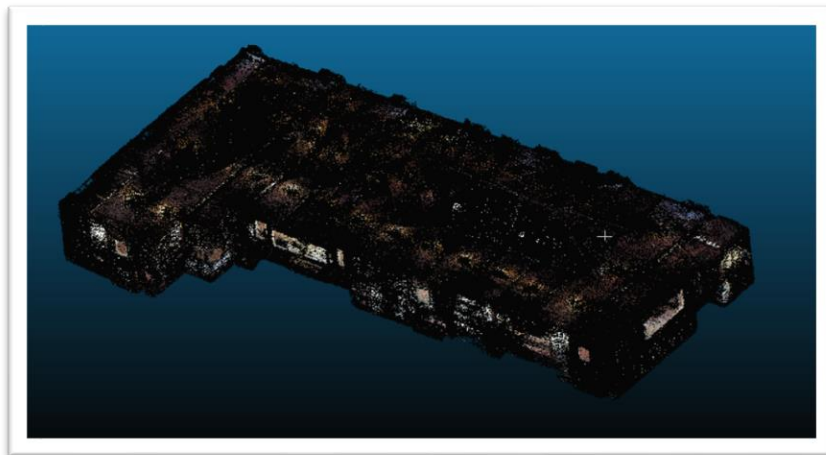
Έπειτα από την αρχική επεξεργασία της εταιρίας, όπου έχουν δημιουργηθεί τα χρωματισμένα και μερικώς καθαρισμένα νέφη σημείων για τους επιθυμητούς χώρους, πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή αυτών στο λογισμικό CloudCompare για περαιτέρω επεξεργασία. Αναλυτικότερα η επεξεργασία που ακολουθήθηκε στα δύο νέφη σημείων που προέκυψαν με την χρήση του σαρωτή ZEB Horizon, μέσα από το πρόγραμμα CloudCompare είναι ίδια με αυτήν που ακολουθήθηκε και για τον σαρωτή ZEB Revo. Αρχικά απομονώθηκαν τα περιττά σημεία γύρω από τους επιθυμητούς χώρους κάθε νέφους και στην συνέχεια εφαρμόστηκε το φίλτρο καθαρισμού βάσει ακτίνας. Η τιμή που ορίστηκε στην ακτίνα ήταν και για τα δύο νέφη ίση με 0.02m. Έπειτα έγινε ένας χειροκίνητος καθαρισμός του εναπομείναντος θορύβου μόνο γύρω από τους επιθυμητούς χώρους του κάθε νέφους, καθώς στο εσωτερικό του το νέφος είχε καθαριστεί καλά με την εφαρμογή του φίλτρου καθαρισμού βάσει της ακτίνας. Σε γενικές γραμμές τα νέφη σημείων του σαρωτή ZEB Horizon δεν ήταν τόσο θορυβώδη σε σχέση με αυτά του ZEB Revo. Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στο γεγονός ότι στα νέφη του σαρωτή ZEB Horizon πραγματοποιήθηκε ένας αρχικός καθαρισμός από την εταιρία, μέσω του προγράμματος GeoSLAM Connect. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7.2) φαίνεται ο αρχικός και ο τελικός αριθμός των σημείων στο νέφος του καρέ αξιωματικών και των ναυαρχικών διαμερισμάτων αντίστοιχα.

Πίνακας 7.2: Αρχικός και τελικός αριθμός σημείων στα νέφη του σαρωτή ZEB Horizon

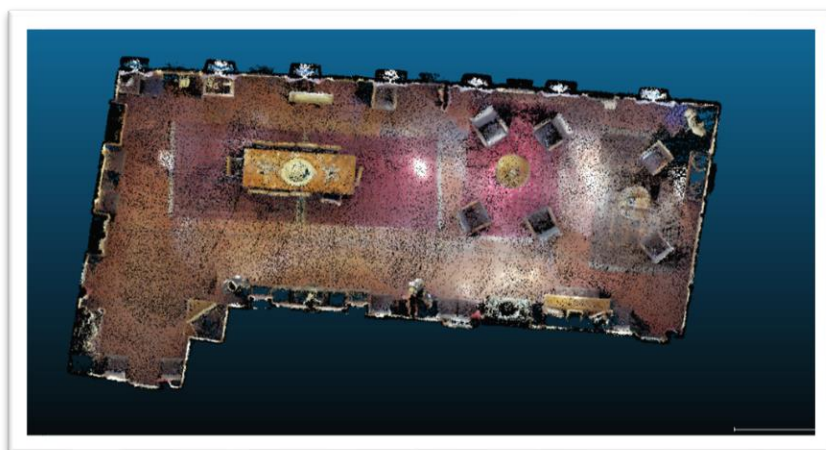
	ZEB Horizon	
	Αρχικό νέφος (σημεία)	Τελικό νέφος (σημεία)
Καρέ αξιωματικών	35,191,246	7,851,376
Ναυαρχικά διαμερίσματα	59,407,210	20,137,387

Στην συγκεκριμένη περίπτωση σε αντίθεση με τα νέφη του σαρωτή ZEB Revo, όπου για την δημιουργία των εικονικών περιηγήσεων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα CloudCompare, προτιμήθηκε να χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα Nubigon. Η διαφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι το Nubigon δημιουργεί εικονικές περιηγήσεις επιτρέποντας στον χρήστη να εισέλθει μέσα στο νέφος, κάτι που δεν υποστηρίζει το CloudCompare. Πριν την δημιουργία των περιηγήσεων εφαρμόστηκε το φίλτρο x-ray σε κάθε νέφος. Παρακάτω παρατίθενται ορισμένες εικόνες των τρισδιάστατων νεφών σημείων (Εικόνες 7.12, 7.13, 7.14, 7.15), αλλά και ορισμένα στιγμιότυπα των εικονικών περιηγήσεων που

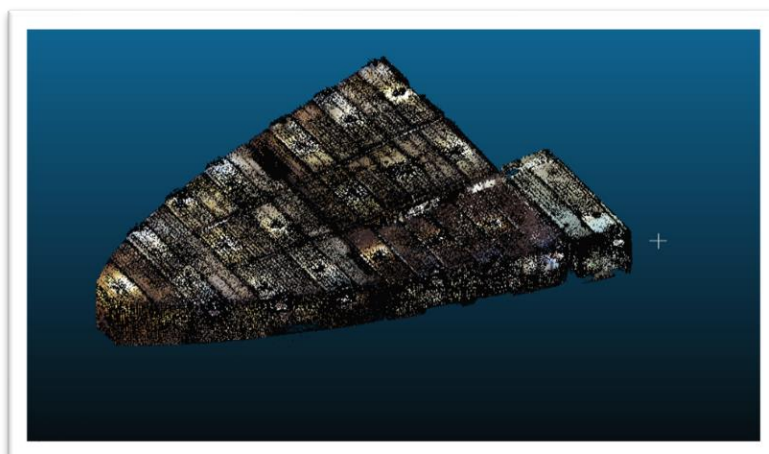
δημιουργήθηκαν, μέσα από το πρόγραμμα Nubigon (Εικόνες 7.16, 7.17). Περισσότερες εικόνες των τρισδιάστατων νεφών σημείων και στιγμιότυπα από τις εικονικές περιηγήσεις που δημιουργήθηκαν, απεικονίζονται στο Παράρτημα Α.



Εικόνα 7.12: Το τρισδιάστατο νέφος σημείων του καρέ αξιωματικών, που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Horizon



Εικόνα 7.13: Κάτοψη με τομή από την οροφή, του τρισδιάστατου νέφους σημείων του καρέ αξιωματικών, που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Horizon



Εικόνα 7.14: Το τρισδιάστατο νέφος σημείων των ναυαρχικών διαμερισμάτων, που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Horizon



Εικόνα 7.15: Κάτοψη με τομή από την οροφή, του τρισδιάστατου νέφους σημείων των ναυαρχικών διαμερισμάτων, που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Horizon



Εικόνα 7.16: Στιγμιότυπο της εικονικής περιήγησης, μέσα στο τρισδιάστατο νέφος σημείων του καρέ αξιωματικών, που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Horizon



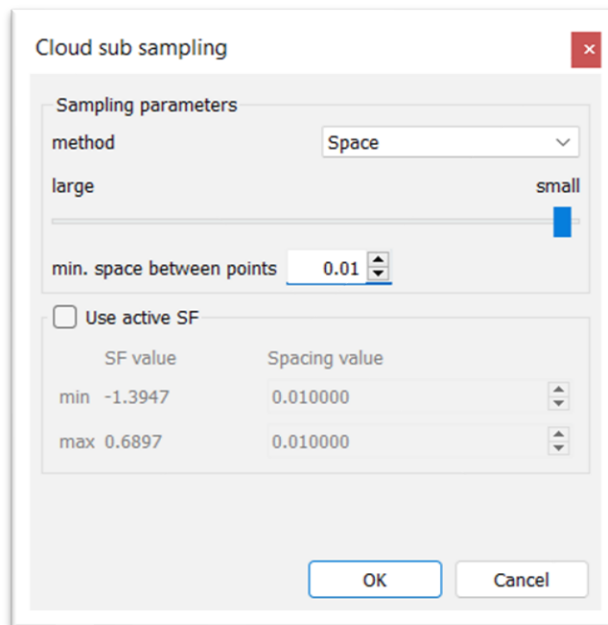
Εικόνα 7.17: Στιγμιότυπο της εικονικής περιήγησης, μέσα στο τρισδιάστατο νέφος σημείων των ναυαρχικών διαμερισμάτων, που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Horizon

7.3.3 Δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων από τα δεδομένα των σαρωτών GeoSLAM ZEB Revo και ZEB Horizon

Πέρα από τα τελικά νέφη σημείων που προέκυψαν από τους σαρωτές GeoSLAM ZEB Revo και ZEB Horizon, δημιουργήθηκαν και ορισμένα τρισδιάστατα μοντέλα επιφανείας γι' αυτά. Τα μοντέλα αυτά δημιουργήθηκαν ενδεικτικά από τα νέφη σημείων του ZEB Revo, καθώς το ZEB Horizon δίνει τα ίδια αποτελέσματα. Η δημιουργία των τρισδιάστατων μοντέλων επιφανείας για κάθε χώρο δεν έδινε ένα καλό οπτικό αποτέλεσμα, καθώς όπως έχει προαναφερθεί τόσο ο ίδιος ο χώρος όσο και τα μεμονωμένα αντικείμενα δεν έχουν την ίδια πυκνότητα σημείων. Συνεπώς σε περιοχές με ασυνέχειες, το μοντέλο επιφανείας εμφανίζεται κενό. Για τον λόγο αυτό αποφασίστηκε να δημιουργηθούν τα τρισδιάστατα μοντέλα επιφανείας ορισμένων μεμονωμένων αντικειμένων των χώρων που μελετώνται. Για τον σκοπό αυτό, τα αντικείμενα αυτά απομονώθηκαν με την χρήση του εργαλείου **Segment**.

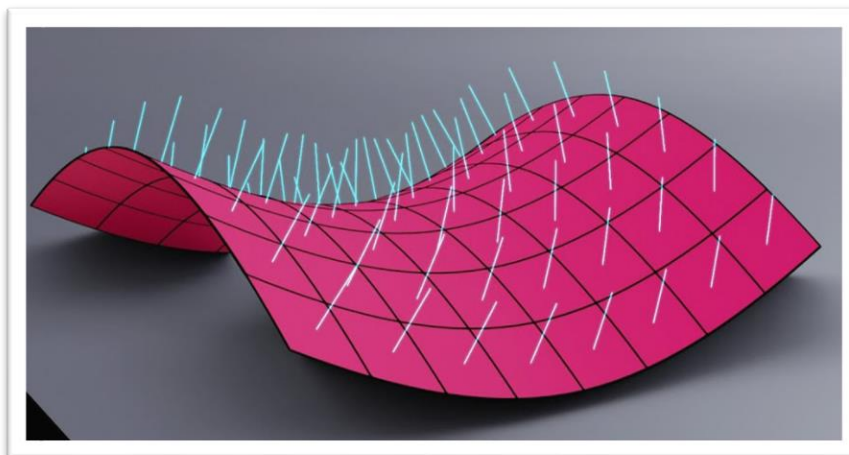
Κάθε αντικείμενο αποτελούνταν από πολλά σημεία, γεγονός που δεν έδινε ένα καλό οπτικά τρισδιάστατο μοντέλο επιφανείας. Συνεπώς αποφασίστηκε να μειωθεί ο αριθμός των σημείων του εκάστοτε αντικειμένου, ώστε να μειωθεί και το πλήθος των πολυγώνων που θα δημιουργηθούν στο τρισδιάστατο μοντέλο επιφανείας. Η μείωση του αριθμού των σημείων στο εκάστοτε αντικείμενο, πραγματοποιήθηκε με την επιλογή **Edit > Subsample**. Το εργαλείο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί και στην υποενότητα 7.3.1. Στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε η μείωση του αριθμού των σημείων για το νέφος του εκάστοτε αντικειμένου, να γίνει βάσει της χωρικής επιλογής. Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των σημείων, έπειτα από πειραματισμούς ορίστηκε ίση με 0.01 (Εικόνα 7.18), καθώς αυτή η τιμή έδινε ένα καλό οπτικά αποτέλεσμα στο τρισδιάστατο μοντέλο επιφανείας που δημιουργήθηκε στην συνέχεια για το κάθε αντικείμενο. Αξίζει να σημειωθεί πως η επιλογή του αριθμού των σημείων που θα μειώσει ο χρήστης, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον χρόνο που είναι διατεθειμένος να περιμένει, προκειμένου να μετατραπεί το νέφος σημείων σε πλέγμα. Όσο περισσότερα σημεία έχει ένα νέφος, τόσο

περισσότερος χρόνος χρειάζεται για να υπολογιστούν τα κανονικά διανύσματα και να δημιουργηθεί το πλέγμα.



Εικόνα 7.18: Παράθυρο επιλογής των κατάλληλων παραμέτρων για την μείωση του αριθμού των σημείων του νέφους, μέσα από το πρόγραμμα CloudCompare

Πριν από την δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου επιφάνειας, χρειάζεται να δημιουργηθεί ένα πολυγωνικό πλέγμα στο νέφος σημείων. Για τον λόγο αυτό χρειάζεται να υπολογιστούν τα κανονικά διανύσματα. Αναλυτικότερα το κανονικό διάνυσμα, είναι ένα διάνυσμα κάθετο σε μια επιφάνεια, σε ένα συγκεκριμένο σημείο και δείχνει την κατεύθυνση που βλέπει αυτή η επιφάνεια (Εικόνα 7.19). Όταν εξετάζονται τα κανονικά διανύσματα σε κλειστές επιφάνειες, συνήθως διακρίνονται σε αυτά που δείχνουν προς το εσωτερικό της επιφάνειας και σε αυτά που δείχνουν προς το εξωτερικό της επιφάνειας.

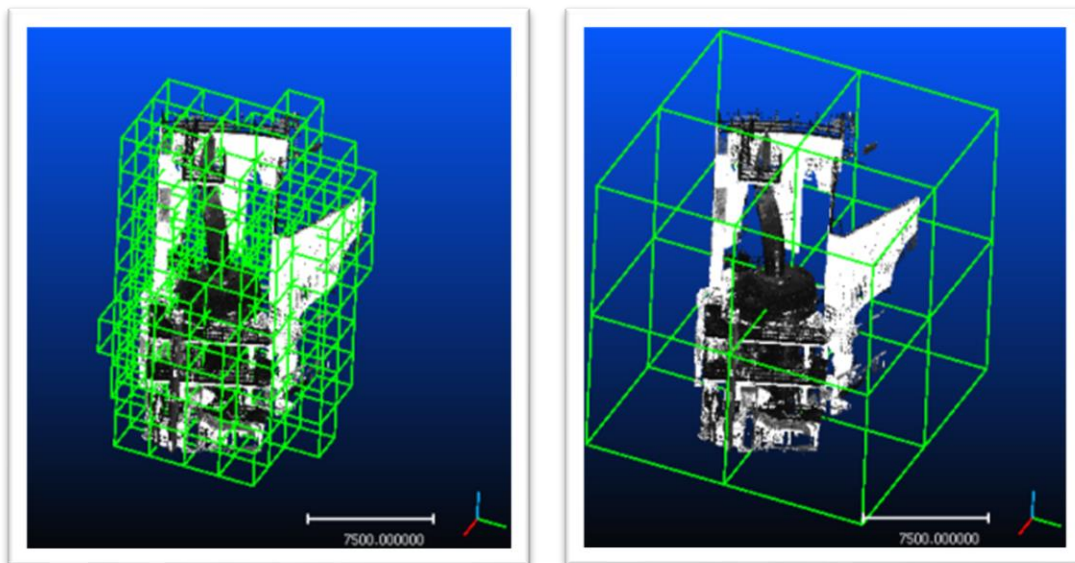


Εικόνα 7.19: Κανονικά διανύσματα επιφάνειας (CG Masters, 2020)

Ο υπολογισμός των κανονικών διανυσμάτων μέσα στο περιβάλλον του CloudCompare, πραγματοποιήθηκε με την επιλογή **Edit > Normals > Compute**. Για τον υπολογισμό των κανονικών διανυσμάτων, είναι απαραίτητο να εκτιμηθεί η τοπική επιφάνεια, που αντιπροσωπεύεται από ένα σημείο και τα γειτονικά του. Όπως γίνεται αντιληπτό το επίπεδο θορύβου, αλλά και ο αριθμός ή η απόσταση των γειτονικών σημείων θα αλλάξουν την εμφάνιση αυτής της επιφάνειας. Κατά την εκτέλεση της εντολής που προαναφέρθηκε, ο χρήστης πρέπει να διαλέξει ανάμεσα στα εξής τοπικά μοντέλα επιφανείας:

- Επίπεδο: δίνει καλά αποτελέσματα ακόμα και με την ύπαρξη θορύβου στο νέφος σημείων, αλλά δεν δίνει καλά αποτελέσματα στις αιχμηρές άκρες και στις γωνίες
- Δισδιάστατος τριγωνισμός: δεν δίνει καλά αποτελέσματα ακόμα και με την ύπαρξη θορύβου στο νέφος σημείων, αλλά δίνει καλά αποτελέσματα στις αιχμηρές άκρες
- Τετραγωνικό: δίνει καλά αποτελέσματα στις καμπύλες επιφάνειες

Στην συνέχεια, ο χρήστης πρέπει να ορίσει τον τρόπο με τον οποίο θα επιλεγούν οι τοπικοί γείτονες. Η προεπιλεγμένη διαδικασία εξαγωγής γείτονα βασίζεται σε μια δομή octree. Ένα οκτάδιο αντιστοιχεί στο αναδρομικό διαμέρισμα ενός κυβικού όγκου χώρου. Από έναν αρχικό κύβο, σχηματίζονται οκταδικά κύτταρα με διαίρεση του κύβου αυτού σε οκτώ ισοδύναμους κύβους (Εικόνα 7.20). Από προεπιλογή, η υποδιαίρεση του οκταδίου ξεκινά από το τετραγωνικό πλαίσιο οριοθέτησης ενός νέφους, αλλά μπορεί επίσης να υπολογιστεί από έναν αυθαίρετο κύβο στο διάστημα. Η δομή octree που χρησιμοποιείται στο CloudCompare έχει τη μορφή λίστας αριθμητικών τιμών (μία ανά σημείο) που κωδικοποιούν την απόλυτη θέση ενός σημείου για όλα τα επίπεδα υποδιαίρεσης. Δύο σημεία που βρίσκονται στο ίδιο κελί, σε ένα δεδομένο επίπεδο υποδιαίρεσης έχουν τον ίδιο κωδικό. Το μέγεθος της οκτάδας στη μνήμη είναι επίσης σταθερό. Ο κώδικας σχηματίζεται με τη συνένωση συνόλων των 3 bit (0...7) που κωδικοποιούν τη σχετική θέση του κελιού για κάθε επίπεδο υποδιαίρεσης. Το κελί στο πρώτο επίπεδο υποδιαίρεσης αντιστοιχεί στα πιο σημαντικά bit και το βαθύτερο επίπεδο αντιστοιχεί στα λιγότερο σημαντικά bit. Στη συνέχεια, οι κωδικοί ταξινομούνται για να επιτραπεί η γρήγορη δυαδική αναζήτηση καθώς και η χωρική σάρωση του νέφους (τα γειτονικά κελιά βρίσκονται το ένα δίπλα στο άλλο στην ταξινομημένη λίστα). Το μέγιστο βάθος οκτράδων στην τυπική έκδοση CloudCompare είναι 10. Σε αυτήν την έκδοση, οι κωδικοί κωδικοποιούνται σε 32 bit και σχετίζονται με μια τιμή δείκτη 32 bit.



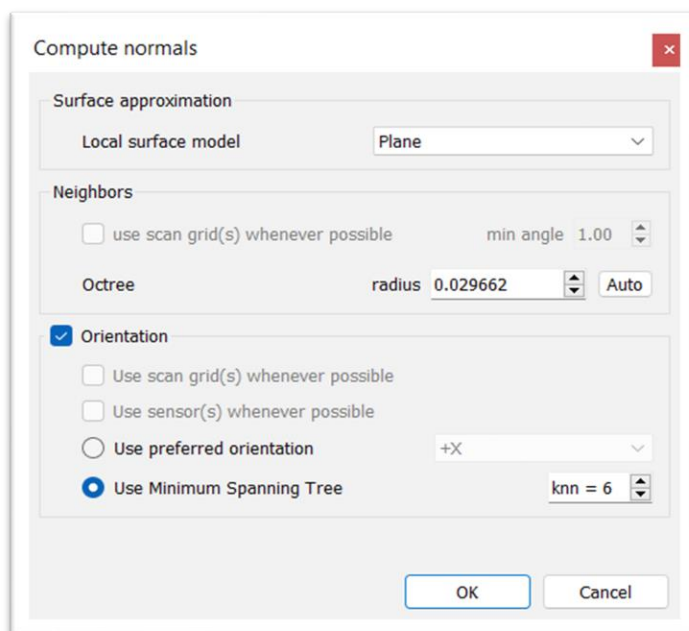
Εικόνα 7.20: Δομή octree (CloudCompareWiki)

Κατά την εκτέλεση της εντολής δημιουργίας των κανονικών διανυσμάτων, ο χρήστης πρέπει να επιλέξει την ακτίνα γειτονιάς. Όσο μεγαλύτερη είναι η ακτίνα, τόσο περισσότερα σημεία θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του μοντέλου τοπικής επιφάνειας, με αποτέλεσμα γενικά πιο ομαλά κανονικά διανύσματα αλλά και πιο χρονοβόρα διαδικασία. Εάν η ακτίνα είναι πολύ μικρή, τότε το μοντέλο δεν θα είναι έγκυρο και ορισμένα ή όλα τα κανονικά διανύσματα δεν θα είναι έγκυρα (τα αντίστοιχα σημεία θα εμφανίζονται με μαύρο χρώμα ανεξάρτητα από τον προσανατολισμό της κάμερας). Κατά την εκτέλεση της εντολής υπολογισμού των κανονικών διανυσμάτων, υπάρχει η επιλογή Auto, που υπολογίζει μία καλή αρχική τιμή για την ακτίνα των γειτονικών σημείων. Η τιμή αυτή μπορεί να αλλάξει από τον χρήστη. Κατά την τοποθέτηση ενός τοπικού μοντέλου, μπορεί να υπολογιστεί η κατεύθυνση του κανονικού διανύσματος. Παράλληλα πρέπει να προσδιοριστεί και ο κανονικός προσανατολισμός (δηλαδή εάν το κανονικό διάνυσμα δείχνει προς την έξω ή την μέσα πλευρά του αντικειμένου). Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει διάφορους τρόπους για να το κάνει αυτό:

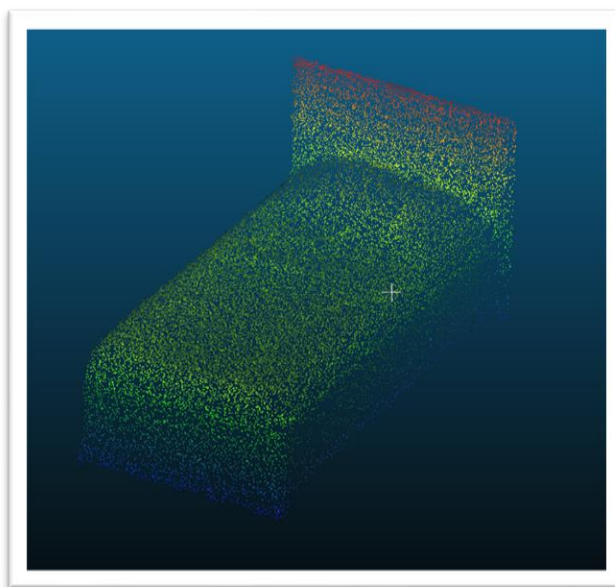
- Να αφήσει τα κανονικά διανύσματα όπως υπολογίζονται (δηλαδή με έναν τυχαίο προσανατολισμό), απλώς καταργώντας την επιλογή του πλαισίου ελέγχου «Προσανατολισμός».
- Να χρησιμοποιήσει έναν «προτιμώμενο προσανατολισμό», ο οποίος μπορεί να είναι όσο το δυνατόν παράλληλος σε έναν από τους κύριους άξονες (X, Y ή Z), κάθε φορά στη θετική ή αρνητική κατεύθυνση (-X/+X, -Y/+Y, -Z/+Z). Ακόμη μπορεί να είναι όσο το δυνατόν παράλληλος με ένα διάνυσμα που προέρχεται από το βαρύκεντρο του νέφους και διέρχεται από το σημείο ή το αντίθετο (+/- Βαρύκεντρο). Τέλος μπορεί να είναι όσο το δυνατόν παράλληλος με ένα διάνυσμα που προέρχεται από την αρχή των αξόνων (0,0,0) και διέρχεται από το σημείο ή το αντίθετο (+/- (0,0,0))

- Να προκύπτει από το δέντρο επικάλυψης χαμηλού κόστους. Αυτή η μέθοδος επιχειρεί να επαναπροσανατολίσει όλα τα κανονικά διανύσματα ενός νέφους με συνεπή τρόπο. Ξεκινά από ένα τυχαίο σημείο και διαδίδει τον κανονικό προσανατολισμό από τον ένα γείτονα στον άλλο. Ο πολλαπλασιασμός γίνεται με τη βοήθεια ενός Minimum Spanning Tree. Επομένως, ο χρήστης πρέπει να καθορίσει τον μέγιστο αριθμό γειτόνων που συνδέονται σε κάθε κόμβο (όσο περισσότεροι γείτονες, τόσο πιο μεγαλύτερη ακρίβεια, αλλά και τόσο περισσότερη μνήμη και τόσο περισσότερος χρόνος θα χρειαστεί). Ένα δέντρο επικάλυψης χαμηλού κόστους είναι ένα υποσύνολο των άκρων ενός συνδεδεμένου, μη κατευθυνόμενου γραφήματος με στάθμιση των ακμών που συνδέει όλες τις κορυφές μεταξύ τους, με το ελάχιστο δυνατό συνολικό βάρος ακμής. Δηλαδή, είναι ένα δέντρο του οποίου το άθροισμα των βαρών των ακμών είναι όσο το δυνατόν μικρότερο.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, για τον υπολογισμό των κανονικών διανυσμάτων, αναφέρεται ως παράδειγμα το κρεβάτι στο υπνοδωμάτιο του ναυάρχου, στα ναυαρχικά διαμερίσματα. Για την δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου επιφανείας του, επιλέχθηκε ως τοπικό μοντέλο επιφανείας το επίπεδο (Plane). Η ακτίνα γειτονιάς ορίστηκε αυτόματα μέσα από το πρόγραμμα με την επιλογή Auto. Τέλος ο προσανατολισμός των κανονικών διανυσμάτων αποφασίστηκε να γίνει βάσει του δέντρου επικάλυψης χαμηλού κόστους (Εικόνα 7.21). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται παρακάτω (Εικόνα 7.22). Αξίζει να σημειωθεί πως και για την μπανιέρα στο λουτρό ναυάρχου, στα ναυαρχικά διαμερίσματα, επιλέχθηκαν οι ίδιες παράμετροι, με εξαίρεση την ακτίνα γειτονιάς, όπου ήταν διαφορετική.

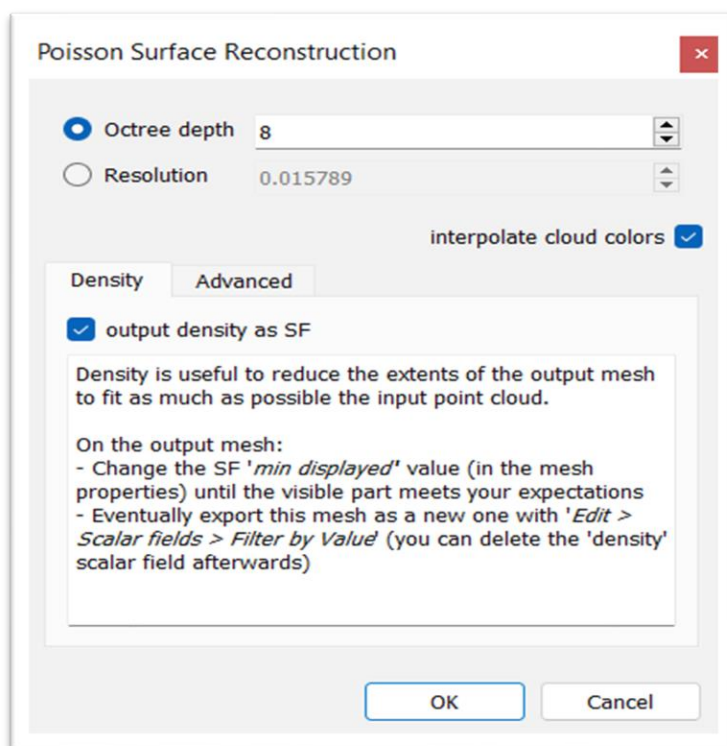


Εικόνα 7.21: Παράθυρο επιλογής των κατάλληλων παραμέτρων για την δημιουργία των κανονικών διανυσμάτων στο νέφος σημείων, μέσα από το πρόγραμμα CloudCompare



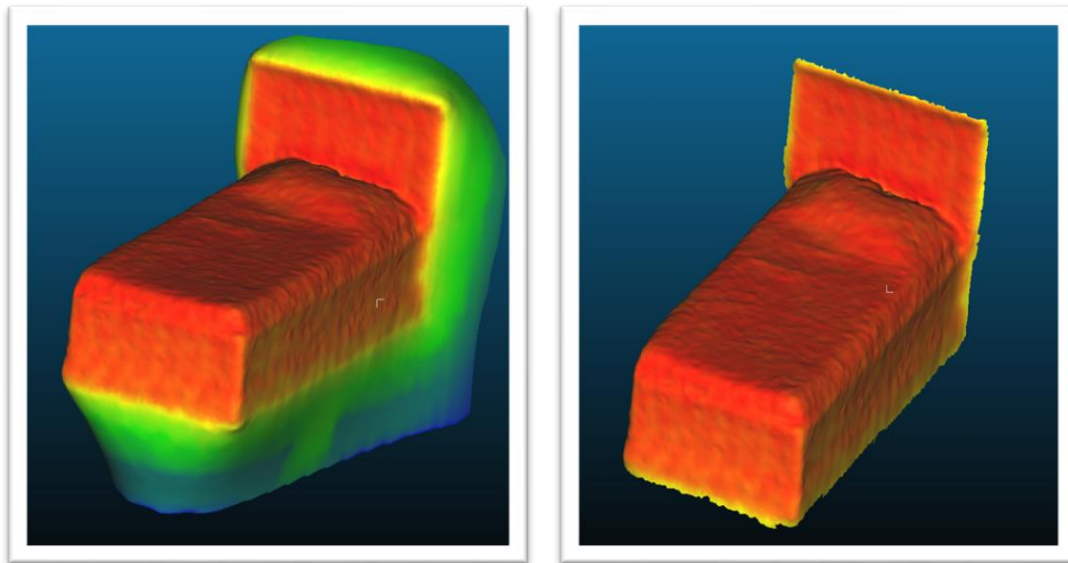
Εικόνα 7.22: Δημιουργία των κανονικών διανυσμάτων στο νέφος σημείων

Έπειτα από τον υπολογισμό των κανονικών διανυσμάτων, δημιουργήθηκε το μοντέλο επιφανείας του κρεβατιού, με την επιλογή **Plugins > PoissonRecon (Poisson Surface Reconstruction)**. Το συγκεκριμένο εργαλείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο εφόσον έχουν δημιουργηθεί τα κανονικά διανύσματα στο νέφος σημείων. Για να επιτευχθούν καλά αποτελέσματα, τα κανονικά διανύσματα του νέφους θα πρέπει να είναι καθαρά (δηλαδή ο προσανατολισμός όλων των κανονικών διανυσμάτων πρέπει να είναι σωστός/συνεπής και όχι πολύ θορυβώδης). Από προεπιλογή, ο αλγόριθμος θα πρέπει να εφαρμόζεται σε κλειστά τρισδιάστατα σχήματα, αλλά μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει τις πληροφορίες πυκνότητας εξόδου για να αποκτήσει ένα έγκυρο πλέγμα ακόμη και σε ένα ανοιχτό τρισδιάστατο σχήμα. Η κύρια παράμετρος που πρέπει να οριστεί είναι το *octree depth*. Όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή της συγκεκριμένης παραμέτρου, τόσο πιο λεπτό θα είναι το αποτέλεσμα, καθώς τόσα περισσότερα πολύγωνα δημιουργούνται, αλλά και τόσο περισσότερος χρόνος και μνήμη απαιτείται. Με την επιλογή *output density as SF*, δημιουργείται ένα βαθμωτό πεδίο, μέσα από το οποίο μπορεί κανείς να μειώσει τις εκτάσεις πλέγματος εξόδου, ώστε να ταιριάζει όσο το δυνατόν καλύτερα τις εκτάσεις του νέφους εισόδου. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, για την δημιουργία του μοντέλου επιφανείας του κρεβατιού, η τιμή του *octree depth* ορίστηκε ίση με 8, ενώ επιλέχθηκε και το *output density as SF*, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα βαθμωτό πεδίο (Εικόνα 7.23). Οι ίδιες επιλογές έγιναν και για την δημιουργία του μοντέλου επιφανείας και της μπανιέρας.



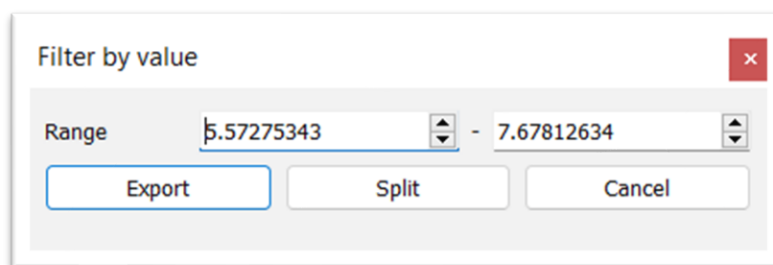
Εικόνα 7.23: Παράθυρο επιλογής των κατάλληλων παραμέτρων για την δημιουργία του μοντέλου επιφανείας, μέσα από το πρόγραμμα CloudCompare

Μετά την ανακατασκευή, ο χρήστης μπορεί να δει τον αριθμό των πολυγώνων (Faces) στο παράθυρο Properties του πλέγματος. Μόλις ολοκληρωθεί ο υπολογισμός, ο χρήστης πρέπει να κλείσει το παράθυρο της εντολής, να επιλέξει το πλέγμα εξόδου και να κυλήσει προς τα κάτω τις ιδιότητές του, που βρίσκονται αριστερά, μέχρι να δει την ενότητα «Παράμετροι εμφάνισης SF». Η διαβάθμιση των χρωμάτων δείχνει την πυκνότητα των τριγώνων. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τον αριστερό λευκό κύκλο (που αντιστοιχεί στην ελάχιστη εμφανιζόμενη τιμή) και να τον σύρει δεξιά, μέχρι να αποκρύψει διαδραστικά, τα τρίγωνα με κορυφές που έχουν τις χαμηλότερες τιμές πυκνότητας, δηλαδή αυτά που είναι πιο μακριά από το νέφος εισόδου, ώστε να γίνει εμφανές το σχήμα του μοντέλου. Αν ο χρήστης σύρει πολύ τον κύκλο, θα συρρικνωθεί και το ίδιο το μοντέλο. Το πρόγραμμα δημιουργεί πολύγωνα, ακόμα κι εκεί που δεν υπάρχουν σημεία, επομένως με την διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω, αφαιρούνται τα περιττά πολύγωνα και μένουν μόνο αυτά που αναδεικνύουν το νέφος σημείων και κατά συνέπεια το σωστό σχήμα του μοντέλου (Εικόνα 7.24).

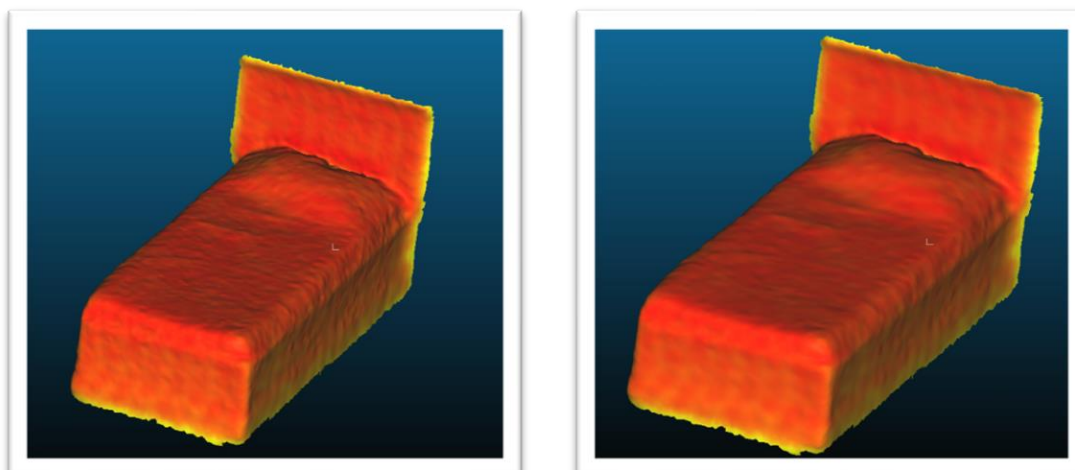


Εικόνα 7.24: Αριστερά η δημιουργία περιττών πολυγώνων από το πρόγραμμα και δεξιά η αφαίρεσή τους για την ανάδειξη του σωστού σχήματος του μοντέλου

Ωστόσο, τα περιττά πολύγωνα παραμένουν απλώς κρυμμένα και συνεπώς πρέπει να αφαιρεθούν. Για να γίνει αυτό θα πρέπει ο χρήστης να μεταβεί στο **Edit > Scalar fields > Filter By Value**. Εμφανίζεται ένα παράθυρο διαλόγου με τις Range τιμές που εισάγονται αυτόματα, με βάση το εύρος που έχει επιλέξει ο χρήστης στο SF display params. Πατώντας την εξαγωγή (Εικόνα 7.25), εξάγεται το πλέγμα εντός αυτού του εύρους, δηλαδή τα ορατά κι επιθυμητά πολύγωνα. Στο τελικό επιθυμητό πλέγμα που εξάγεται, πραγματοποιείται εξομάλυνση μέσα από την επιλογή **Edit > Mesh > Smooth (Laplacian)**. Με τον τρόπο αυτό γίνεται πιο ομαλή η επιφάνεια του αντικειμένου (Εικόνα 7.26) (CloudCompareWiki). Τα τρισδιάστατα μοντέλα επιφανείας των αντικειμένων που δημιουργήθηκαν παρουσιάζονται παρακάτω (Εικόνα 7.27).



Εικόνα 7.25: Εξαγωγή των επιθυμητών πολυγώνων του αντικειμένου



Εικόνα 7.26: Πραγματοποίηση εξομάλυνσης μετά την εξαγωγή του τελικού επιθυμητού πλέγματος



Εικόνα 7.27: Αριστερά τα αντικείμενα ως έχουν στην πραγματικότητα και δεξιά τα τρισδιάστατα μοντέλα επιφανείας τους



7.3.4 Επεξεργασία δεδομένων κάμερας Matterport Pro2 3D

Τα νέφη σημείων της κάμερας Matterport, δημιουργήθηκαν αυτόματα, βάσει των δεδομένων που είχαν ληφθεί για καθέναν από τους δύο επιθυμητούς χώρους (καρέ αξιωματικών και ναυαρχικά διαμερίσματα), μέσα από το Matterport Cloud με το εργαλείο MatterPak. Αναλυτικότερα το πακέτο MatterPak που λαμβάνεται περιέχει διάφορα αρχεία, ανάμεσα στα οποία και ένα έγχρωμο νέφος σημείων χαμηλής ανάλυσης, της μορφής .XYZ. Συνεπώς προέκυψαν δύο νέφη σημείων. Τα δύο αυτά νέφη δεν εμφανίζουν πολύ θόρυβο, σε σχέση με τα νέφη των σαρωτών GeoSLAM ZEB Revo και ZEB Horizon. Ο καθαρισμός τους πραγματοποιήθηκε χειροκίνητα, μέσα από το πρόγραμμα CloudCompare, με την αφαίρεση των περιττών σημείων γύρω από τους επιθυμητούς χώρους κάθε νέφους, με την χρήση του εργαλείου **Segment**. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7.3) φαίνεται ο αρχικός και ο τελικός αριθμός των σημείων στο νέφος του καρέ αξιωματικών και των ναυαρχικών διαμερισμάτων αντίστοιχα.

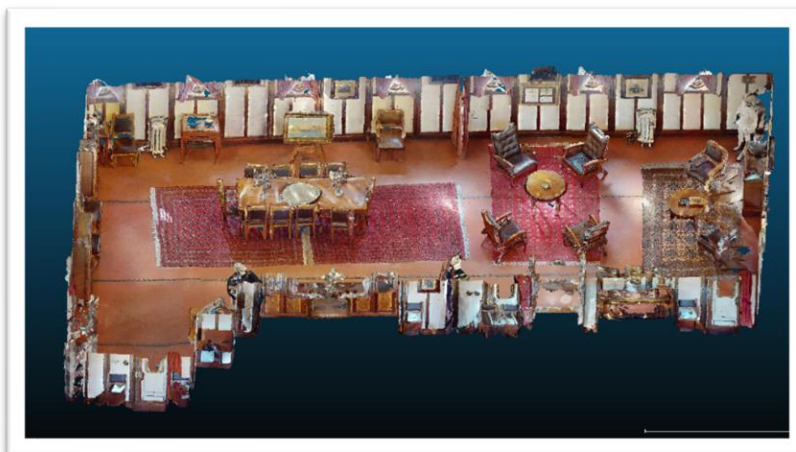
Πίνακας 7.3: Αρχικός και τελικός αριθμός σημείων στα νέφη της κάμερας Matterport

	Matterport	
	Αρχικό νέφος (σημεία)	Τελικό νέφος (σημεία)
Καρέ αξιωματικών	4,550,190	3,807,043
Ναυαρχικά διαμερίσματα	6,338,138	5,858,888

Τα νέφη σημείων της κάμερας Matterport Pro2 3D απεικονίζονται παρακάτω (Εικόνες 7.28, 7.29, 7.30, 7.31).



Εικόνα 7.28: Το τρισδιάστατο νέφος σημείων του καρέ αξιωματικών, που αποκτήθηκε με την κάμερα Matterport Pro2 3D



Εικόνα 7.29: Πλάγια όψη με τομή από την οροφή, του τρισδιάστατου νέφους σημείων του καρέ αξιωματικών, που αποκτήθηκε με την κάμερα Matterport Pro2 3D



Εικόνα 7.30: Το τρισδιάστατο νέφος σημείων των ναυαρχικών διαμερισμάτων, που αποκτήθηκε με την κάμερα Matterport Pro2 3D

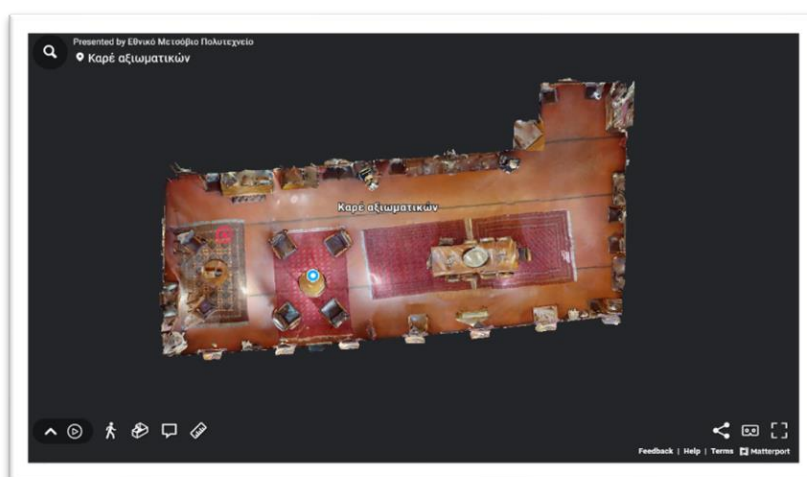


Εικόνα 7.31: Πλάγια όψη με τομή από την οροφή, του τρισδιάστατου νέφους σημείων των ναυαρχικών διαμερισμάτων, που αποκτήθηκε με την κάμερα Matterport Pro2 3D

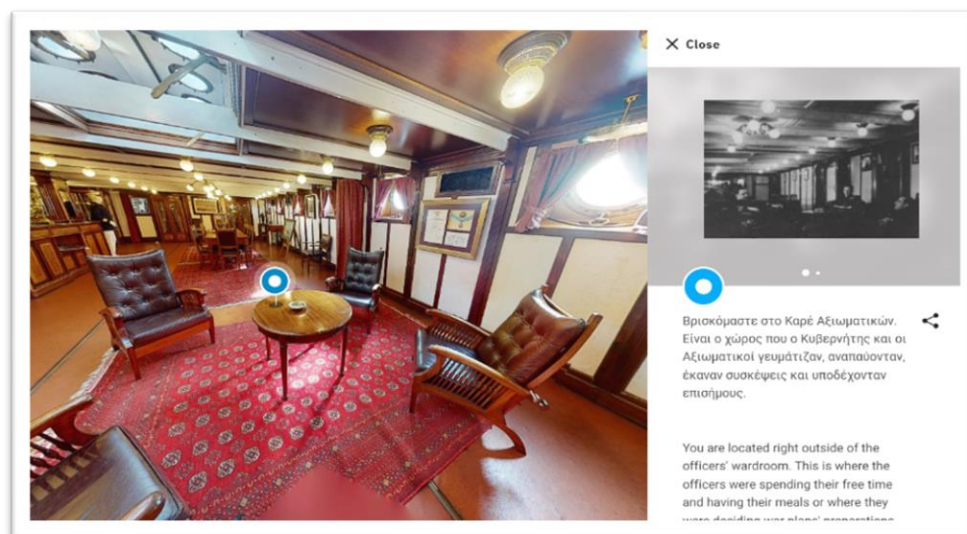


7.3.5 Δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων από τα δεδομένα της κάμερας Matterport Pro2 3D

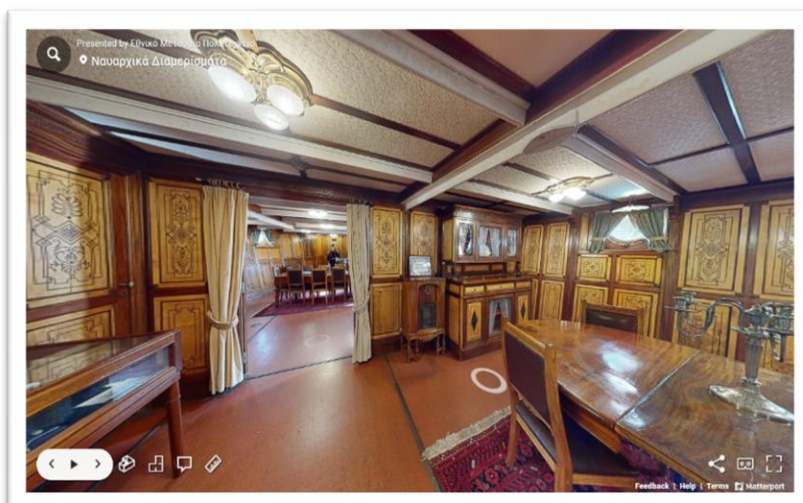
Πέρα από τα νέφη σημείων, μέσα από την εφαρμογή Matterport Cloud, δημιουργήθηκε αυτόματα και το τρισδιάστατο μοντέλο για καθέναν από τους δύο χώρους (καρέ αξιωματικών και ναυαρχικά διαμερίσματα), όπου έπειτα ήταν η εφικτή η επεξεργασία του. Ειδικότερα, η επεξεργασία αφορά την προσθήκη των λεπτομερειών του μοντέλου, την προσθήκη του σημείου απ' το οποίο θα ξεκινάει ο χρήστης να περιηγείται στο μοντέλο, την προσθήκη της ονομασίας του κάθε χώρου κατά την προβολή της κάτοψης (Εικόνα 7.32), την προσθήκη ετικετών με πληροφορίες για τους χώρους (Εικόνα 7.33), την απόκρυψη των ανεπιθύμητων θέσεων μέτρησης από το μοντέλο, την περικοπή των περιττών πληροφοριών και την δημιουργία εικονικής περιήγησης (Εικόνα 7.34). Μέσα στο μοντέλο είναι εφικτή και η μέτρηση των αποστάσεων (Εικόνα 7.35). Έπειτα έγινε η αντιγραφή της διεύθυνσης του συνδέσμου για κάθε μοντέλο, ο οποίος μπορεί δοθεί σε άλλους χρήστες, προκειμένου αυτοί να περιηγηθούν σε καθένα από αυτά.



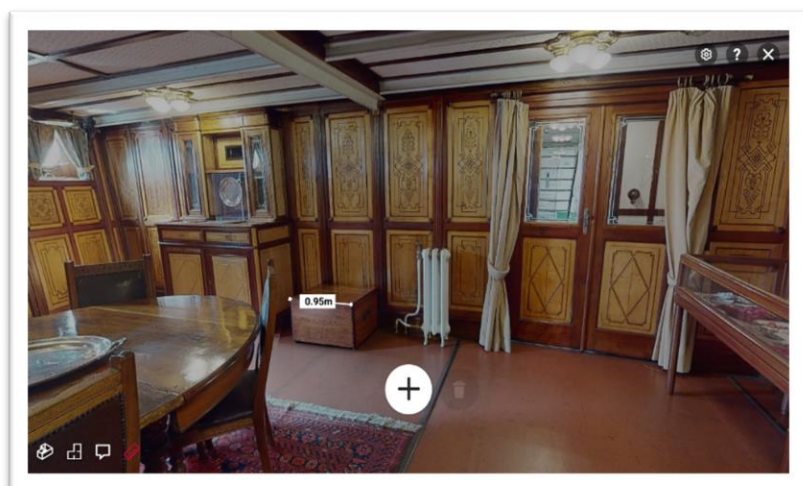
Εικόνα 7.32: Κάτοψη του μοντέλου του καρέ αξιωματικών, που δημιουργήθηκε αυτόματα μέσα από το Matterport Cloud



Εικόνα 7.33: Ετικέτα πληροφοριών μέσα στο μοντέλο του Matterport



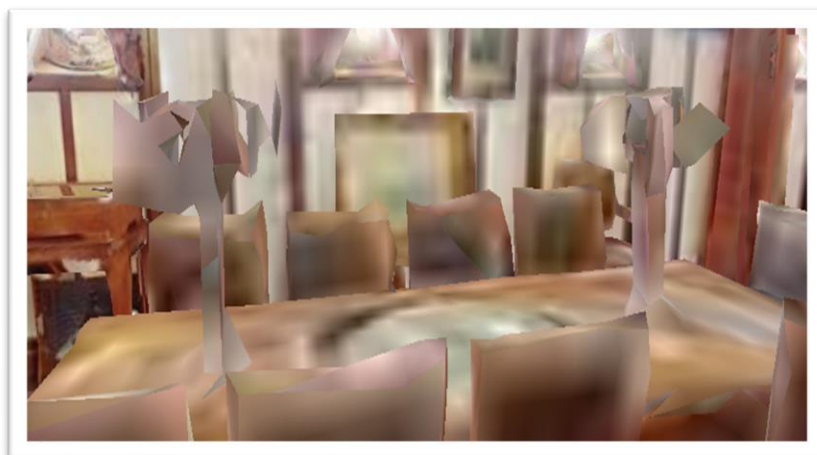
Εικόνα 7.34: Απόσπασμα της εικονικής περιήγησης του Matterport, μέσα στα ναυαρχικά διαμερίσματα



Εικόνα 7.35: Μέτρηση αποστάσεων μέσα στο μοντέλο του Matterport

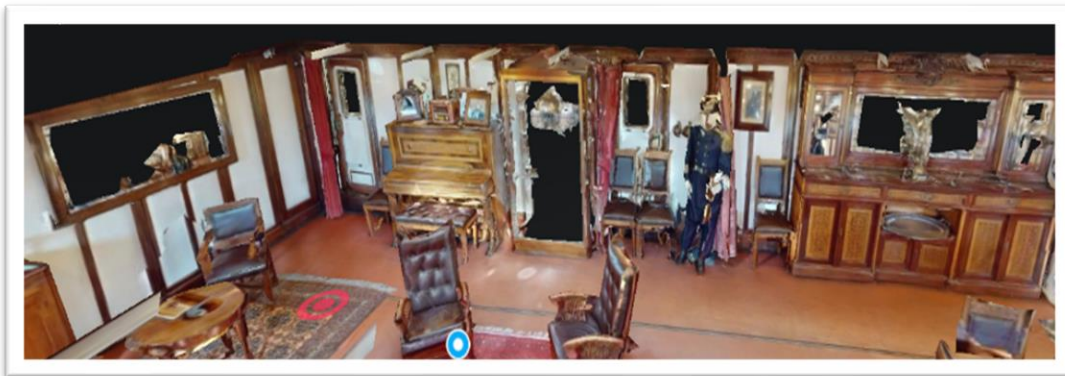
Το επίπεδο λεπτομέρειας του υποκείμενου τρισδιάστατου πλέγματος είναι πιο σημαντικό για μικρότερα, λεπτότερα αντικείμενα. Στο μοντέλο του Matterport παρατηρείται ότι αρκετά αντικείμενα εμφανίζονται πιο ογκώδη σε σχέση με την πραγματικότητα (Εικόνα 7.36). Το πλέγμα που δημιουργείται δεν είναι τόσο καλό για αντικείμενα με περίπλοκη γεωμετρία, σε σχέση με αυτά που έχουν πιο απλή γεωμετρία. Τα παραπάνω συμβαίνουν, επειδή τα τρίγωνα που δημιουργούνται στο πλέγμα δεν είναι τόσα πολλά σε αριθμό, ώστε να μπορούν να αναπαραστήσουν με λεπτομέρεια ένα αντικείμενο. Αυτό επιβεβαιώνεται και από την ίδια την Matterport, σύμφωνα με την οποία η καλύτερη αναπαράσταση ενός αντικειμένου χρησιμοποιεί υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας (LoD-Level of Detail) για να απεικονίσει τις λεπτομέρειες της επιφάνειας. Αντιθέτως με μία αναπαράσταση χαμηλής ανάλυσης χάνονται πολλές λεπτομέρειες της επιφάνειας. Στην συγκεκριμένη περίπτωση το πλέγμα χαρακτηρίζεται χαμηλής

ανάλυσης από την ίδια την Matterport. Το επίπεδο λεπτομέρειας είναι σημαντικό, καθώς μέσα από ένα πλέγμα χαμηλής ανάλυσης ενδέχεται να μην μπορεί να μετρηθούν με ακρίβεια, ή ακόμα και καθόλου, λεπτά αντικείμενα ή άκρες σε ένα χώρο.



Εικόνα 7.36: Αύξηση του όγκου των αντικειμένων στο μοντέλο του Matterport

Ακόμη στο μοντέλο του Matterport παρατηρείται ότι ορισμένες επιφάνειες, όπως για παράδειγμα το γυαλί και οι καθρέπτες απεικονίζονται κενές (Εικόνα 7.37). Αυτό επιβεβαιώνεται και από την Matterport, η οποία αναφέρει ότι ενεργοί αισθητήρες βάθους ενδέχεται να δυσκολεύονται να ανιχνεύσουν συγκεκριμένους τύπους υλικών. Συνεπώς δεν μπορεί να δημιουργηθεί τρισδιάστατο πλέγμα γι' αυτές τις οντότητες. Οι ανακλαστικές επιφάνειες μπορεί να μην έχουν τρισδιάστατο πλέγμα και μπορεί να έχουν μεγάλα σφάλματα ή να μην είναι μετρήσιμες.



Εικόνα 7.37: Αδυναμία αποτύπωσης των γυάλινων επιφανειών και των καθρεπτών. Οι επιφάνειες αυτές εμφανίζονται χωρίς τρισδιάστατο πλέγμα (μαύρες)

Σημαντικές τοπικές αποκλίσεις βρέθηκαν σε μικρού μεγέθους αντικείμενα. Αυτό οφείλεται στο περιορισμένο οπτικό πεδίο και στην απόσταση μεταξύ των διαφορετικών στάσεων μέτρησης. Αντίστοιχα μετρώντας τις διαστάσεις μεγαλύτερων οντοτήτων (μεγαλύτερες αποστάσεις-τοίχοι), βρέθηκε ότι αυτές βρίσκονται εντός της τυπικής απόκλισης 1% που δίνει ο κατασκευαστής. Αυτό επιβεβαιώνεται και από την βιβλιογραφία, καθώς σύμφωνα με την ίδια την Matterport, οι διαστάσεις από τοίχο σε τοίχο των δωματίων στο μέγεθος των τυπικών δωματίων, εμπίπτουν συνήθως στις οδηγίες ακρίβειας. Όσο μικρότερο είναι το αντικείμενο, τόσο πιο πιθανό είναι μια μέτρηση να έχει μεγάλα σφάλματα ή να μην είναι καν μετρήσιμο. Όσο μεγαλύτερη είναι η διάσταση, τόσο μεγαλύτερο το απόλυτο σφάλμα που μπορεί να οφείλεται σε σφάλματα που συσσωρεύονται σε ευθυγραμμισμένες σαρώσεις. Τα παραπάνω επιβεβαιώνονται και από σχετική βιβλιογραφία που παρατίθενται στην [ενότητα 3.3](#).

7.4 Ποιοτική σύγκριση αποτελεσμάτων

Η ποιοτική αξιολόγηση αφορά την πληρότητα των τελικών νεφών σημείων και το επίπεδο λεπτομέρειάς τους σχετικά με ορισμένα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Αρκετά χαρακτηριστικά στα τρία νέφη αξιολογήθηκαν και συγκρίθηκαν ως προς την αναγνωρισιμότητά τους.

Στα νέφη σημείων που προέκυψαν με την χρήση των τριών οργάνων, είναι ορατή και σωστή η γεωμετρία των αντικειμένων (σχήμα και μέγεθος), ενώ μπορεί κανείς να τα αναγνωρίσει εύκολα. Παρ' όλα αυτά δεν είναι ορατές οι λεπτομέρειες των αντικειμένων. Ακόμη στα νέφη σημείων των σαρωτών GeoSLAM ZEB Revo και ZEB Horizon, παρατηρούνται ορισμένες κενές περιοχές. Αυτό συμβαίνει για δύο λόγους. Πρώτον επειδή σε αυτές τις περιοχές οι σαρωτές δεν μπορούσαν να έχουν ορατότητα, ώστε να λάβουν σημεία. Με λίγα λόγια οι σαρωτές αυτοί έχουν ορατότητα σε ό,τι βλέπει και ο χρήστης. Περιοχές που δεν είναι ορατές απαιτούν ελιγμούς του χρήστη, ώστε να παρθούν σημεία. Δεύτερον επειδή ο σαρωτής αυτοί στο πίσω μέρος τους έχουν περιορισμένο οπτικό πεδίο, γεγονός που σε συνδυασμό με γωνιακές περιοχές έχει ως αποτέλεσμα να μην έχουν παρθεί σημεία σε αυτές. Η βελτίωση του επίπεδου λεπτομέρειας μπορεί να επιτευχθεί με την επιβράδυνση της ταχύτητας κίνησης κοντά σε αντικείμενα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος. Η πλήρης απουσία ορισμένων τμημάτων των νεφών του Matterport, οφείλεται στην παρεμπόδιση του οπτικού πεδίου και στο μέγιστο εύρος κατά την συλλογή των δεδομένων. Επιπροσθέτως η πυκνότητα στα νέφη σημείων δεν είναι ομοιόμορφη. Η πυκνότητα των σημείων που προκύπτει, εξαρτάται από τον χρόνο που βλέπει ο σαρωτής μία συγκεκριμένη περιοχή, από την απόσταση και την γωνία σάρωσης, καθώς και από την ταχύτητα του χρήστη. Η κάμερα Matterport εμφανίζει μεγαλύτερη πυκνότητα σημείων, σε σύγκριση με τους σαρωτές ZEB Revo και ZEB Horizon, όπου τα δεδομένα είναι πιο αραιά (μικρότερη πυκνότητα σημείων).

Η λήψη έγχρωμων εικόνων με τον σαρωτή ZEB Horizon και την κάμερα Matterport Pro2 3D, δίνει υφή στα αντικείμενα και στους χώρους και κατά συνέπεια τα νέφη σημείων που προκύπτουν από τα συγκεκριμένα όργανα προσεγγίζουν σε μεγάλο βαθμό την πραγματικότητα, σε σχέση με τα νέφη σημείων που πάρθηκαν από τον σαρωτή ZEB Revo. Στα νέφη του σαρωτή ZEB Horizon, πέρα από τις περιοχές στις οποίες δεν έχουν παρθεί καθόλου σημεία, εμφανίζονται και κάποιες μαύρες περιοχές. Ουσιαστικά πρόκειται για περιοχές στις οποίες να μην έχουν ληφθεί σημεία, ωστόσο γι' αυτά δεν υπάρχουν τιμές RGB. Αυτό οφείλεται στην κάμερα, η οποία είτε δεν μπόρεσε να πάρει εικόνες σε αυτές τις περιοχές, είτε δεν μπόρεσε να χρησιμοποιήσει αυτές που είχε πάρει.

Εμφανές είναι το πρόβλημα στρογγύλευσης των γωνιών στα νέφη σημείων της κάμερας Matterport. Ορισμένες επιφάνειες όπως για παράδειγμα το γυαλί και οι καθρέπτες απεικονίζονται κενές. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τον κατασκευαστή, σύμφωνα με τον οποίο, ορισμένες επιφάνειες είναι πιο δύσκολο να σαρωθούν από άλλες, όπως για παράδειγμα οι γυαλιστερές επιφάνειες (γυαλί, καθρέπτες, νερό). Οι ενεργοί αισθητήρες βάθους ενδέχεται να δυσκολεύονται να ανιχνεύσουν συγκεκριμένους τύπους υλικών (Matterport, 2022).

7.5 Μετρητική σύγκριση αποτελεσμάτων

Η ακρίβεια των σαρωτών ZEB Revo και ZEB Horizon, εξαρτάται από το περιβάλλον το οποίο αποτυπώνεται. Χώροι πλούσιοι σε χαρακτηριστικά συνήθως δίνουν νέφη σημείων καλύτερης ακρίβειας. Αυτό συμβαίνει διότι όσα περισσότερα αντικείμενα βρίσκει κοινά ο σαρωτής, τόσο καλύτερα προσδιορίζει την θέση του. Συνεπώς σε περιβάλλοντα με φτωχά χαρακτηριστικά, ενδέχεται ο σαρωτής να μην μπορεί να προσδιορίσει σωστά την



θέση του κι αυτό συνεπάγεται μειωμένη ακρίβεια. Ακόμη η ακρίβεια των συγκεκριμένων σαρωτών εξαρτάται από την πορεία που ακολουθεί ο χρήστης. Γενικά πρέπει να ακολουθείται κλειστή διαδρομή, καθώς με αυτό τον τρόπο περιορίζεται το σφάλμα μετατόπισης που δημιουργείται. Όσο ο χρήστης περνάει ξανά από τις ίδιες περιοχές, τόσο το καλύτερο για τον σαρωτή, ώστε να τις αναγνωρίσει και να βελτιώσει την εκτίμηση της θέσης του. Ομοίως η ακρίβεια της κάμερας Matterport εξαρτάται από το πόσο καλά θα ευθυγραμμιστούν τα δεδομένα από κάθε στάση μέτρησης. Δηλαδή εξαρτάται από το πόσο καλά θα συνδεθούν τα κοινά σημεία κάθε σάρωσης. Αυτό με την σειρά του εξαρτάται από την ύπαρξη αντικειμένων στον χώρο, ώστε να αναγνωριστούν κάποια χαρακτηριστικά σημεία σε αυτά, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η ευθυγράμμιση. Τέλος εξαρτάται από την διαδρομή που θα ακολουθηθεί (κλειστή πορεία).

Για να ελεγχθεί η συνολική μετρητική ποιότητα των νεφών σημείων, η αξιοπιστία τους εξετάστηκε αρχικά ξεχωριστά για το καθένα. Ορισμένες οριζόντιες αποστάσεις που προέρχονται από ένα άλλο σύστημα μέτρησης (μετροταινία), θεωρήθηκαν ως αναφορά για την αξιολόγηση των διαφορών των νεφών που μελετώνται. Συνεπώς πραγματοποιήθηκε σύγκριση κάποιων οριζόντιων αποστάσεων που είχαν παρθεί με την χρήση μετροταινίας και αυτών που μετρήθηκαν πάνω στα νέφη σημείων καθενός από τα τρία διαφορετικά όργανα μέτρησης, με την επιλογή **Tools > Point Picking**. Οι αποστάσεις που επιλέχθηκαν για την σύγκριση αφορούν τόσο το καρέ αξιωματικών, όσο και τα ναυαρχικά διαμερίσματα. Οι μέσες διαφορές και οι τυπικές αποκλίσεις των τριών οργάνων συγκριτικά με την μετροταινία παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7.1).

Πίνακας 7.4: Τα στατιστικά των συγκρίσεων αποστάσεων που πραγματοποιήθηκαν μεταξύ των τριών οργάνων μέτρησης και της μετροταινίας

Revo		Horizon		Matterport	
Mean	Std.dev.	Mean	Std.dev.	Mean	Std.dev.
0.017m	0.018m	0.017m	0.018m	0.022m	0.022m

Παρατηρείται ότι οι σαρωτές GeoSLAM ZEB Revo και ZEB Horizon εμφανίζουν μικρότερες μέσες διαφορές και τυπικές αποκλίσεις στις μετρημένες οριζόντιες αποστάσεις συγκριτικά με την μετροταινία που θεωρείται αναφορά. Αντιθέτως το Matterport εμφανίζει μεγαλύτερη μέση διαφορά και τυπική απόκλιση στις μετρημένες οριζόντιες αποστάσεις συγκριτικά με την μετροταινία. Η ακρίβεια που δίνουν οι σαρωτές ZEB Revo και ZEB Horizon είναι εντός της ακρίβειας που δίνει ο κατασκευαστής (1-3cm). Ακόμη η ακρίβεια που υπολογίστηκε για τα δύο αυτά όργανα μέτρησης συμφωνεί με τα αποτελέσματα έχουν βρεθεί σε σχετική βιβλιογραφία, όπου σε κάθε περίπτωση η ακρίβεια κυμαίνεται μεταξύ 1-3cm (Υποενότητα 3.2.5). Το Matterport έχει μειωμένη ακρίβεια σε σχέση με τα άλλα δύο όργανα μέτρησης.

Προκειμένου να ελεγχθεί ο παράγοντας κλίμακας που υπάρχει στα νέφη σημείων της κάμερας Matterport σύμφωνα με την βιβλιογραφία, πραγματοποιήθηκε η σύγκρισή τους

με τα νέφη σημείων του σαρωτή ZEB Horizon. Ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκαν τα νέφη του σαρωτή ZEB Horizon για την σύγκριση και όχι του ZEB Revo, είναι επειδή τα νέφη του τελευταίου, παρουσιάζουν αρκετές διαφορές σε σχέση με τα νέφη της κάμερας Matterport. Ειδικότερα, τα νέφη του σαρωτή ZEB Revo έχουν παρθεί διαφορετική χρονική στιγμή σε σχέση με τα νέφη της κάμερας Matterport, επομένως σημειώνονται σημαντικές διαφορές, που αφορούν την αλλαγή της διάταξης των επίπλων στους χώρους ενδιαφέροντος. Συνεπώς, συγκρίθηκαν κάποιες αποστάσεις μεταξύ των νεφών σημείων των δύο διαφορετικών οργάνων μέτρησης (ZEB Horizon και Matterport Pro2 3D), τόσο στο καρέ αξιωματικών, όσο και στα ναυαρχικά διαμερίσματα (Πίνακες 7.2, 7.3). Τα αποτελέσματα της σύγκρισης έδειξαν ότι τα νέφη της κάμερας Matterport έχουν αποκλίσεις στις αποστάσεις που σε κάθε περίπτωση είναι εντός του 1%, που δηλώνει ο κατασκευαστής. Ο συντελεστής κλίμακας που υπολογίστηκε για κάθε νέφος της κάμερας Matterport είναι 1.000.

Πίνακας 7.5: Ο συντελεστής κλίμακας και οι αποκλίσεις μεταξύ των νεφών σημείων του σαρωτή ZEB Horizon και της κάμερας Matterport, που αναφέρονται στο καρέ αξιωματικών

ΚΑΡΕ ΑΞΙΩΜΑΤΙΚΩΝ		
Horizon (m)	Matterport (m)	Διαφορά (m)
2.583	2.585	-0.002
1.383	1.385	-0.002
2.379	2.381	-0.002
12.907	12.906	0.001
4.936	4.936	0.000
9.809	9.807	0.002
0.753	0.753	0.000
	Mean (m)	0.000
	Std.dev. (m)	0.002
	Συντελεστής κλίμακας	1.000

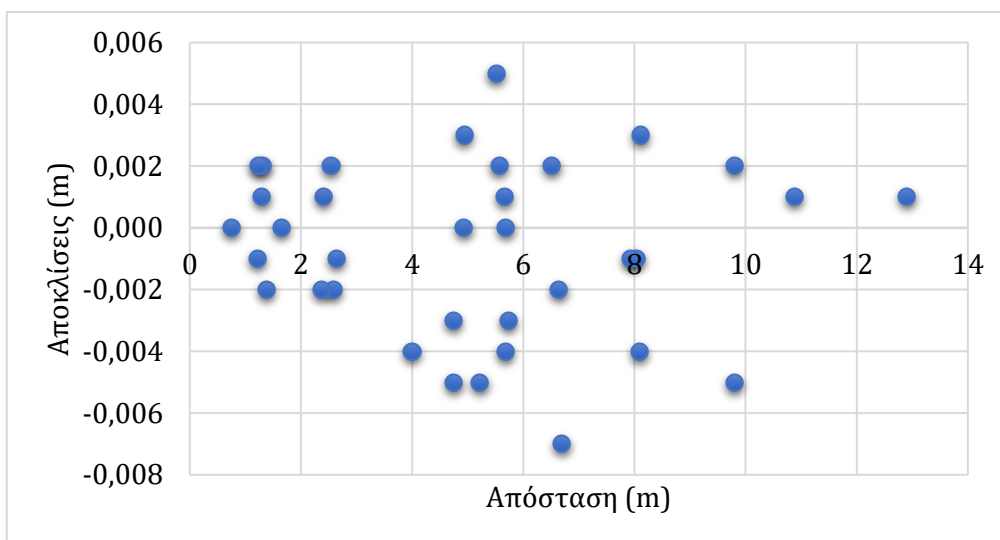
Πίνακας 7.6: Ο συντελεστής κλίμακας και οι αποκλίσεις μεταξύ των νεφών σημείων του σαρωτή ZEB Horizon και της κάμερας Matterport, που αναφέρονται στα ναυαρχικά διαμερίσματα

ΝΑΥΑΡΧΙΚΑ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΑ		
Horizon (m)	Matterport (m)	Διαφορά (m)
4.750	4.755	-0.005
6.691	6.698	-0.007
1.304	1.303	0.001



1.319	1.317	0.002
1.232	1.230	0.002
1.219	1.220	-0.001
9.794	9.799	-0.005
Mean (m)		0.000
Std.dev. (m)		0.004
Συντελεστής κλίμακας		1.000

Λαμβάνοντας κι άλλες διαφορές και τοποθετώντας αυτές σε ένα διάγραμμα σε συνάρτηση με την απόσταση, φαίνεται ότι η μέση τιμή είναι γύρω στα -0.001m και η τυπική απόκλιση γύρω στα 0.003m . Δεν φαίνεται να υπάρχει κάποια μορφή συστηματικού σφάλματος, που να υποδηλώνει παραμόρφωση λόγω κλίμακας σε μεγάλες αποστάσεις, καθώς οι αποκλίσεις δεν αυξάνονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις (Διάγραμμα 7.1).



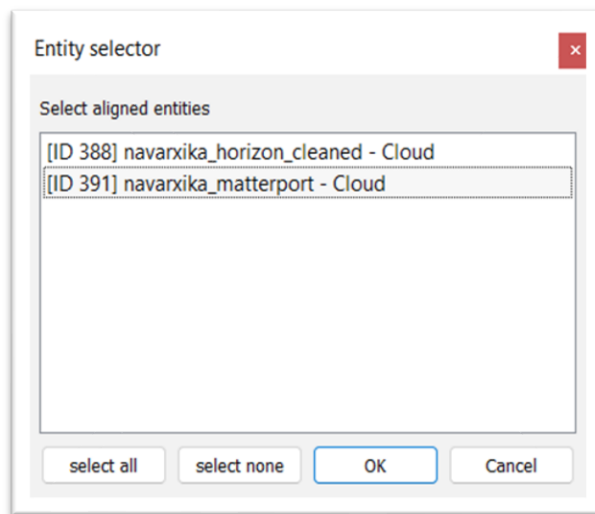
Διάγραμμα 7.1: Έλεγχος συστηματικού σφάλματος στα δεδομένα της κάμερας Matterport σε συνάρτηση με την απόσταση

Οι Piniotis et al., (2020), Pulcrano et al., (2019) και Shults et al., (2019), βρίσκουν σημαντικές τοπικές αποκλίσεις, που σε κάθε περίπτωση ξεπερνούν την απόκλιση 1% που δίνει ο κατασκευαστής, ενώ διαπιστώνουν μία διαφορά ως προς την κλίμακα του νέφους σημείων της κάμερας Matterport, σε σχέση με τις μετρήσεις ενός άλλου συστήματος και υπολογίζουν την τιμή του συντελεστή κλίμακας, οποίος σε κάθε περίπτωση έχει τιμή 0.996 ή 0.997. Αναφέρουν ότι οι αποκλίσεις cloud to cloud distance μεταξύ ενός άλλου συστήματος και της κάμερας Matterport, μειώνονται με την εφαρμογή του συντελεστή κλίμακας.

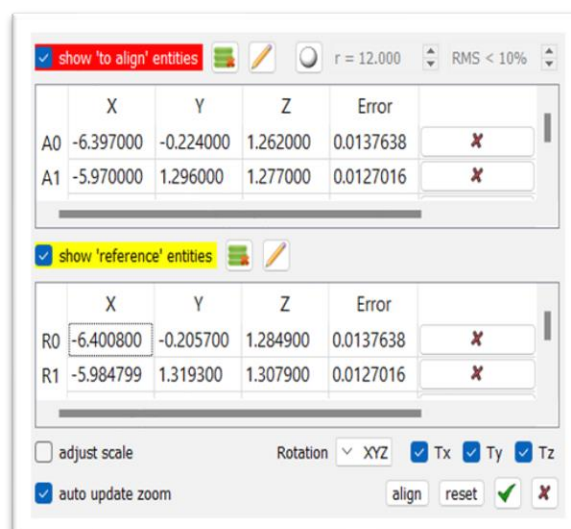
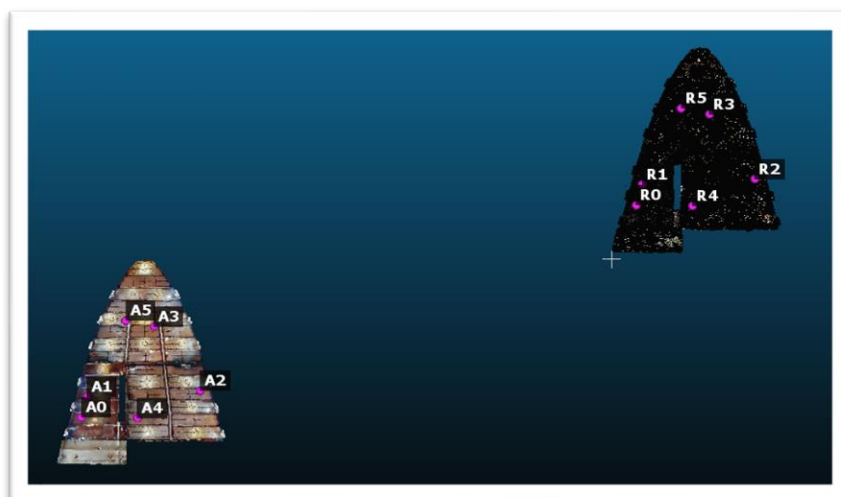
Προκειμένου να είναι βέβαιο ότι το δείγμα που πάρθηκε σε κάθε νέφος είναι αντιπροσωπευτικό και οι μετρήσεις που έγιναν σε καθένα από αυτά δεν είναι κατά κάποιο τρόπο τοπικές αλλά ισχύουν για όλη την έκτασή τους και κατά συνέπεια δεν

απαιτείται διόρθωση λόγω κλίμακας, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποστάσεων μεταξύ των νεφών του σαρωτή ZEB Horizon και της κάμερας Matterport, μέσα από το πρόγραμμα CloudCompare, με το εργαλείο cloud to cloud distance. Αναλυτικότερα, πραγματοποιήθηκαν δύο συγκρίσεις, όπου την πρώτη φορά δεν έγινε εφαρμογή του συντελεστή κλίμακας, ενώ την δεύτερη φορά επετράπη στο σύστημα να προσαρμόσει την κλίμακα του νέφους της κάμερας Matterport, σε σχέση με το νέφος του σαρωτή ZEB Horizon. Τα νέφη του σαρωτή ZEB Horizon χρησιμοποιήθηκαν ως αναφορά.

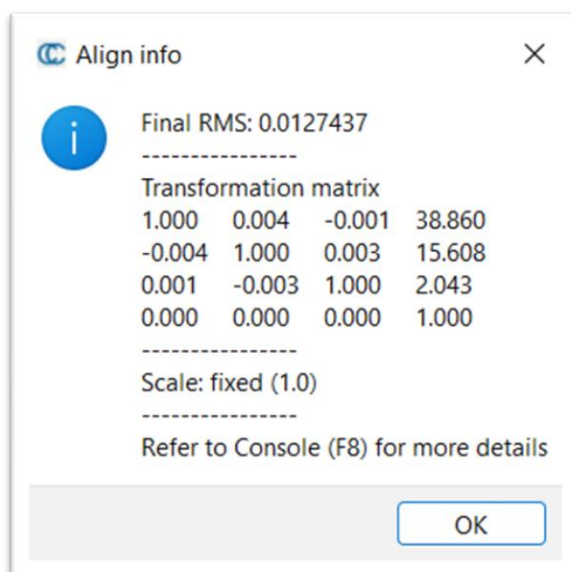
Τα νέφη σημείων του σαρωτή ZEB Horizon και της κάμερας Matterport βρίσκονται σε ένα διαφορετικό αυθαίρετο σύστημα αναφοράς (σύστημα αναφοράς του εκάστοτε οργάνου μέτρησης). Για τον λόγο αυτό απαιτείται η ένταξή τους στο ίδιο σύστημα αναφοράς. Αρχικά πραγματοποιήθηκε μία πρόχειρη ευθυγράμμιση μεταξύ των νεφών σημείων ορίζοντας κατάλληλα έξι αντίστοιχα σημεία σε αυτά. Το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για την ευθυγράμμιση των δύο νεφών μέσω κοινών σημείων, απαιτεί την επιλογή τουλάχιστον τριών. Τα σημεία επιλέχθηκαν να είναι μακριά το ένα από το άλλο και να καλύπτουν όλη την έκταση της περιοχής μελέτης. Αρχικά επιλέχθηκε ποιο σημείο θα χρησιμοποιεί ως αναφορά, δηλαδή δεν θα μετακινηθεί (νέφος σημείων Horizon) και ποιο θα ευθυγραμμιστεί, δηλαδή θα μετακινηθεί σε σχέση με το νέφος αναφοράς (νέφος σημείων Matterport) (Εικόνα 7.38). Μόλις γίνει αυτό, οι δύο επιλεγμένες οντότητες εμφανίζονται σε τρισδιάστατη προβολή, ενώ εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο διαλόγου στην επάνω δεξιά γωνία της οθόνης. Μέσα από αυτό το παράθυρο επιλέχθηκαν τα έξι σημεία απευθείας στο νέφος που πρόκειται να ευθυγραμμιστεί κι έπειτα επιλέχθηκαν τα ομόλογα σημεία με τον ίδιο τρόπο στο νέφος αναφοράς (Εικόνα 7.39). Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, ο χρήστης μπορεί να αποκρύψει είτε το νέφος αναφοράς, είτε το νέφος που πρόκειται να ευθυγραμμιστεί με τα ειδικά πλαίσια ελέγχου. Ο χρήστης μπορεί να περιστρέψει και να μετακινήσει ελεύθερα το σημείο προβολής, να κάνει μεγέθυνση ή σμίκρυνση, κ.λ.π. Κάθε φορά που ο χρήστης επιλέγει ένα σημείο, εμφανίζεται μια νέα καταχώριση στον αντίστοιχο πίνακα (του νέφους αναφοράς ή του νέφους που πρόκειται να ευθυγραμμιστεί), καθώς και ένας δείκτης στην τρισδιάστατη προβολή (οι δείκτες στο νέφος που πρόκειται να ευθυγραμμιστεί αρχίζουν με «A» και οι δείκτες του νέφους αναφοράς αρχίζουν με ... «R»). Μόλις επιλεχθούν τουλάχιστον τρία ή περισσότερα ζεύγη σημείων (πρέπει να έχει επιλεχθεί ακριβώς ο ίδιος αριθμός σημείων σε κάθε νέφος), το πρόγραμμα θα εμφανίσει το προκύπτον RMS και ο χρήστης μπορεί να κάνει προεπισκόπηση του αποτελέσματος πατώντας το κουμπί «ευθυγράμμιση». Ο χρήστης μπορεί να δει επίσης τη συνεισφορά σφάλματος για κάθε ζεύγος δίπλα σε κάθε σημείο του πίνακα (έτσι ώστε να αφαιρέσει και να επιλέξει ξανά τα χειρότερα ζεύγη). Ακόμη είναι εφικτή η προσθήκη παραπάνω σημείων, ή η διαγραφή ήδη υπάρχοντων. Κατά την επικύρωση της τρέχουσας διαδικασίας συνένωσης, το πρόγραμμα εμφανίζει μία αναφορά (το ίδιο σύνολο πληροφοριών εμφανίζεται στην κονσόλα με αυξημένη ακρίβεια ψηφίων). Συνεπώς, με αυτό τον τρόπο τα νέφη σημείων που προκύπτουν είναι χονδρικά προ-ευθυγραμμισμένα. Το RMS που προέκυψε στην συγκεκριμένη περίπτωση ήταν 1.3cm (Εικόνα 7.40).



Εικόνα 7.38: Παράθυρο επιλογής του νέφους σημείων που πρόκειται να ευθυγραμμιστεί σε σχέση με το νέφος αναφοράς

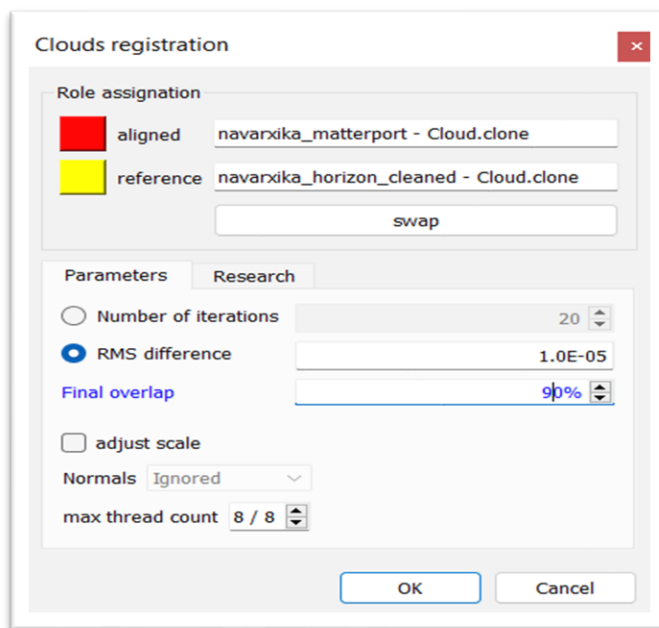


Εικόνα 7.39: Επιλογή ομόλογων σημείων στα δύο νέφη σημείων (νέφος αναφοράς και νέφος που πρόκειται να ευθυγραμμιστεί)

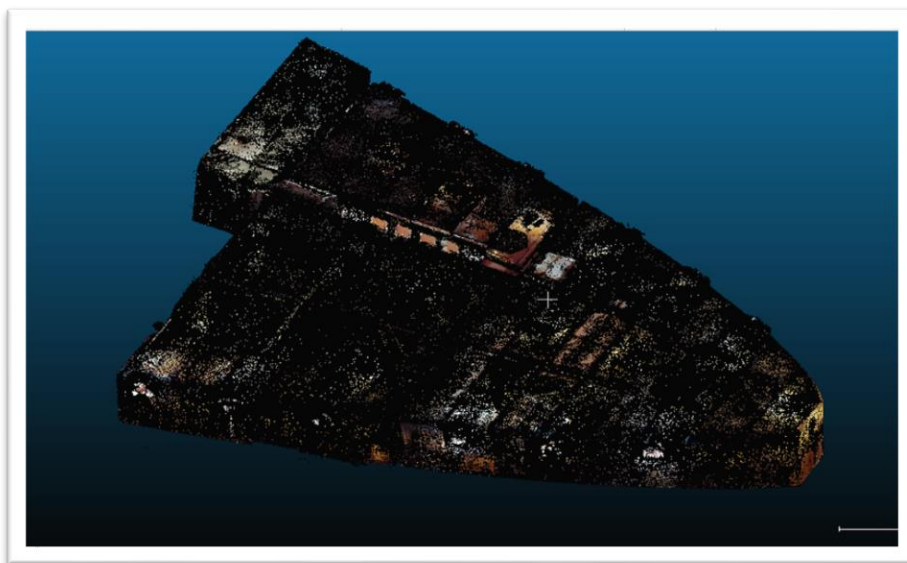


Εικόνα 7.40: Το προκύπτον σφάλμα της αρχικής ευθυγράμμισης

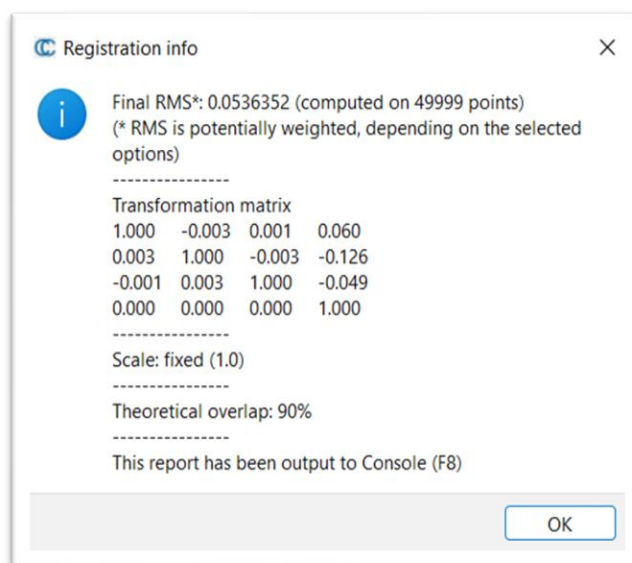
Η τελική βελτίωση, ελήφθη πραγματοποιώντας ευθυγράμμιση βάσει του αλγορίθμου ICP. Με το εργαλείο αυτό υπολογίζεται για κάθε σημείο του συγκριτικού νέφους, το πλησιέστερο σημείο σε σχέση με το νέφος αναφοράς. Το εργαλείο αυτόματης ευθυγράμμισης δύο νεφών σημείων με την χρήση του αλγορίθμου ICP, απαιτεί και οι δύο οντότητες να έχουν ήδη εγγραφεί κατά προσέγγιση (με άλλες μεθόδους ευθυγράμμισης), ενώ τα δύο νέφη σημείων πρέπει να αντιπροσωπεύουν το ίδιο αντικείμενο ή να έχουν το ίδιο σχήμα (τουλάχιστον στα επικαλυπτόμενα μέρη τους). Στην συγκεκριμένη περίπτωση είχε ήδη πραγματοποιηθεί μία αρχική ευθυγράμμιση των δύο νεφών, με την επιλογή κοινών σημείων. Αρχικά επιλέχθηκαν τα δύο νέφη που πρόκειται να ευθυγραμμιστούν. Στο παράθυρο διαλόγου που εμφανίστηκε, ορίστηκε ποιο νέφος θα ευθυγραμμιστεί σε σχέση με το άλλο, δηλαδή ποιο θα μετακινηθεί σε σχέση με το άλλο (το νέφος αυτό χρωματίζεται με κόκκινο χρώμα κατά την επιλογή) και ποιο θα αποτελέσει το νέφος αναφοράς, δηλαδή δεν θα μετακινηθεί (το νέφος αυτό χρωματίζεται με κίτρινο χρώμα κατά την επιλογή). Στην συγκεκριμένη περίπτωση, ορίστηκε ως νέφος που πρόκειται να ευθυγραμμιστεί αυτό της κάμερας Matterport και ως νέφος αναφοράς αυτό του σαρωτή ZEB Horizon. Έπειτα ορίστηκε το πραγματικό τμήμα του νέφους που πρόκειται να ευθυγραμμιστεί, δηλαδή αυτό που επικαλύπτει πραγματικά το μοντέλο του νέφους αναφοράς. Η τιμή αυτή ορίστηκε ίση με 90%, καθώς τα δύο νέφη δεν είναι τελείως όμοια και έχουν κενές περιοχές (Εικόνα 7.41). Το αποτέλεσμα ήταν τα νέφη να ευθυγραμμιστούν καλύτερα, σε σχέση με την αρχική ευθυγράμμιση (Εικόνα 7.42). Η τιμή του RMS που προέκυψε ήταν 5.4cm (Εικόνα 7.43).



Εικόνα 7.41: Παράθυρο επιλογής των παραμέτρων της τελικής ευθυγράμμισης

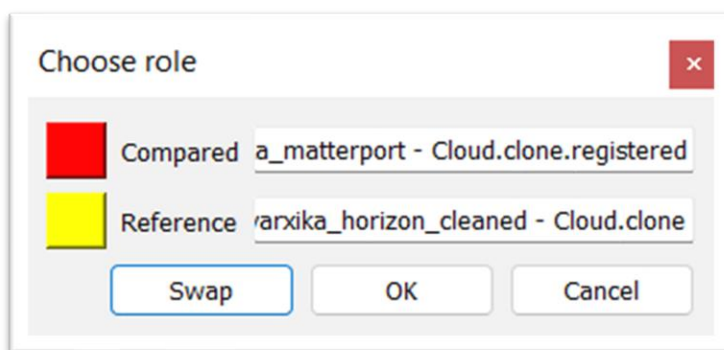


Εικόνα 7.42: Το αποτέλεσμα της τελικής ευθυγράμμισης των δύο νεφών

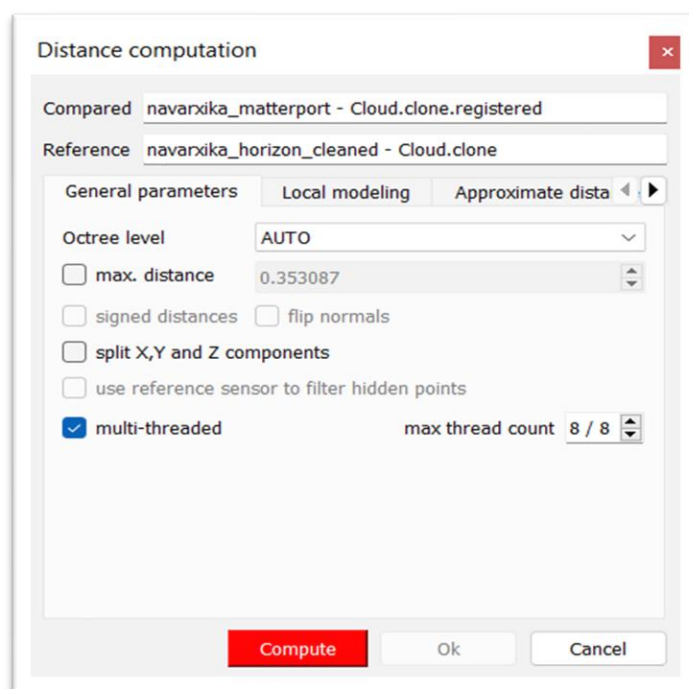


Εικόνα 7.43: Το προκύπτον σφάλμα της τελικής ευθυγράμμισης

Έπειτα υπολογίστηκε η απόσταση μεταξύ των δύο νεφών. Πρώτα επιλέχθηκαν τα δύο νέφη που θα συγκριθούν. Στο πρώτο παράθυρο διαλόγου που εμφανίστηκε, ορίστηκε ποιο νέφος θα είναι το συγκριτικό, δηλαδή αυτό στο οποίο θα υπολογιστούν οι αποστάσεις. Το πρόγραμμα υπολογίζει τις αποστάσεις κάθε σημείου του σε σχέση με το νέφος αναφοράς. Το παραγόμενο βαθμωτό πεδίο φιλοξενείται από το συγκριτικό νέφος. Ακόμη ορίστηκε το νέφος αναφοράς, δηλαδή αυτό που θα χρησιμοποιηθεί ως αναφορά. Οι αποστάσεις υπολογίζονται σε σχέση με τα σημεία του. Στην συγκεκριμένη περίπτωση ορίστηκε ως συγκριτικό νέφος αυτό της κάμερας Matterport και ως αναφορά αυτό του σαρωτή ZEB Horizon (Εικόνα 7.44). Στην συνέχεια εμφανίστηκε ένα δεύτερο παράθυρο διαλόγου, αυτό του υπολογισμού απόστασης Cloud to Cloud. Το πρόγραμμα υπολογίζει πρώτα κατά προσέγγιση τις αποστάσεις (οι οποίες χρησιμοποιούνται εσωτερικά για να ορίσουν αυτόματα το καλύτερο επίπεδο οκταδόνων στο οποίο θα εκτελεστούν οι υπολογισμοί των πραγματικών αποστάσεων). Ο χρήστης πρέπει να υπολογίσει τις πραγματικές αποστάσεις, πατώντας το κόκκινο κουμπί του υπολογισμού (Εικόνα 7.45). Μόλις ολοκληρωθεί ο υπολογισμός, ο χρήστης μπορεί να κλείσει το παράθυρο διαλόγου. Για να εμφανιστεί η χρωματική κλίμακα του βαθμωτού πεδίου που προκύπτει, πρέπει να επιλεγεί το συγκριτικό νέφος και στη συνέχεια το πλαίσιο ελέγχου «Ορατό» της ενότητας «Χρωματική κλίμακα» των ιδιοτήτων του (CloudCompareWiki).

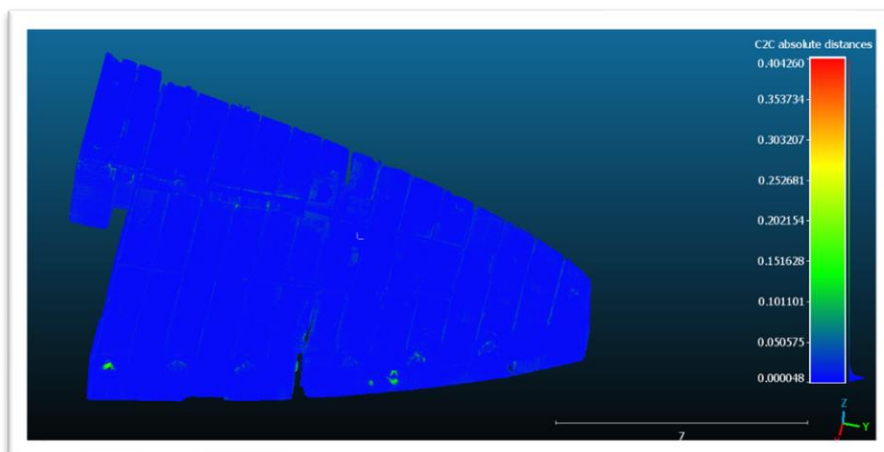


Εικόνα 7.44: Παράθυρο επιλογής του συγκριτικού νέφους και του νέφους αναφοράς

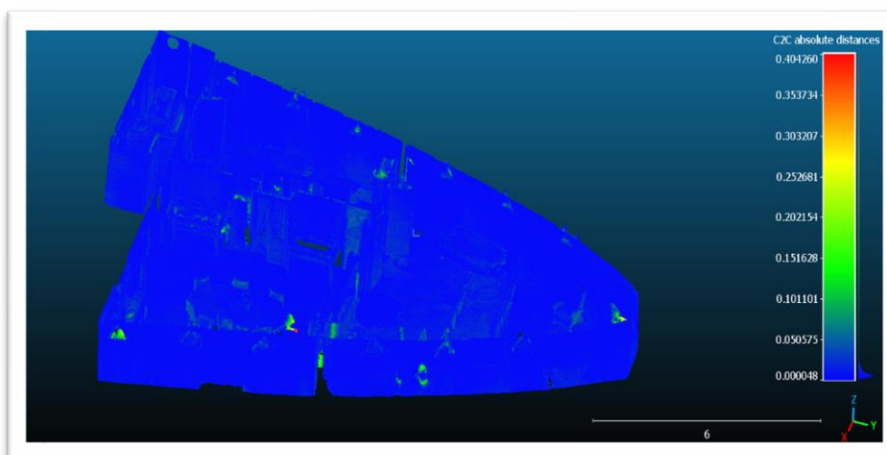


Εικόνα 7.45: Παράθυρο επιλογής των κατάλληλων παραμέτρων για τον υπολογισμό των αποστάσεων μεταξύ των δύο νεφών σημείων

Η μέση διαφορά και η τυπική απόκλιση των δύο νεφών είναι 1.2cm και 1.4cm αντίστοιχα. Οι διαφορές που εντοπίζονται αναφέρονται σε αυτές του νέφους της κάμερας Matterport, σε σχέση με το νέφος του σαρωτή ZEB Horizon (νέφος αναφοράς). Οι μεγαλύτερες τιμές των διαφορών ανάμεσα στα δύο νέφη, εμφανίζονται κυρίως σε περιοχές που υπάρχει θόρυβος λόγω των ανακλαστικών επιφανειών (καθρέπτες) στο νέφος σημείων της κάμερας Matterport (Εικόνα 7.46). Οι περισσότερες διαφορές που υπολογίστηκαν ως προς τις αποστάσεις, είναι της τάξεως των 0.006m (Εικόνα 7.47).

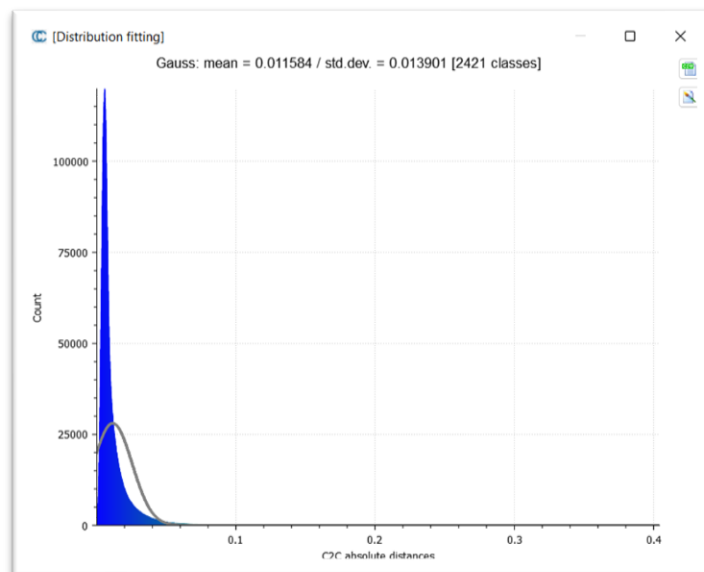


(α)



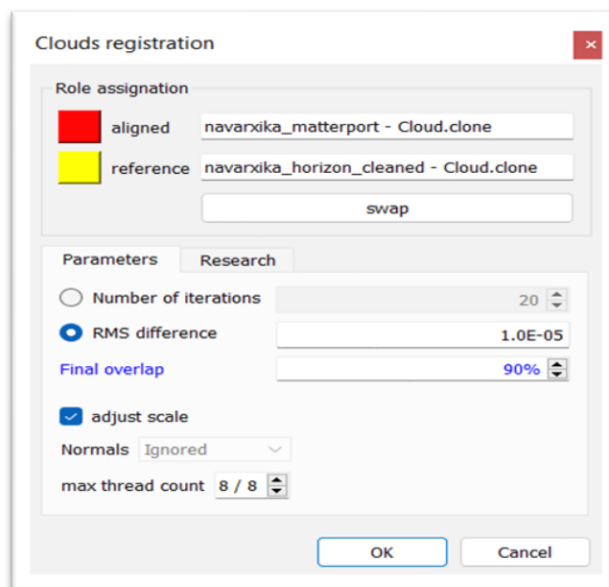
(β)

Εικόνα 7.46: Οι υπολογισμένες αποστάσεις μεταξύ των νεφών σημείων του σαρωτή ZEB Horizon και της κάμερας Matterport, που αναφέρονται στα ναυαρχικά διαμερίσματα

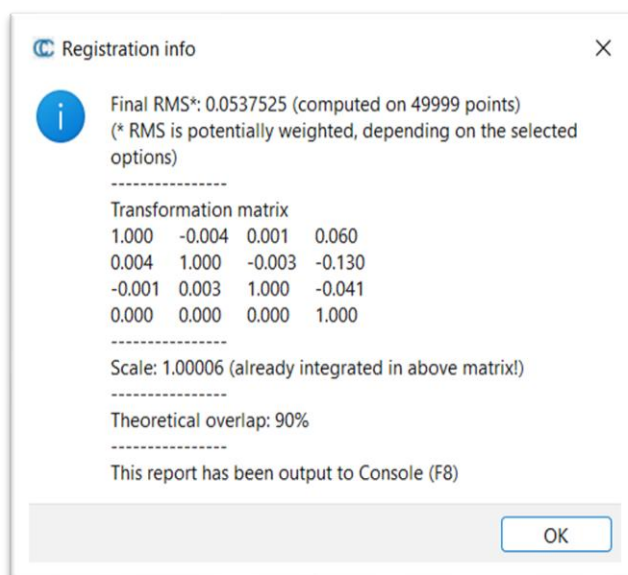


Εικόνα 7.47: Διάγραμμα των υπολογισμένων αποστάσεων μεταξύ των νεφών σημείων του σαρωτή ZEB Horizon και της κάμερας Matterport, που αναφέρονται στα ναυαρχικά διαμερίσματα

Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε, επιλέγοντας την προσαρμογή κλίμακας στο νέφος σημείων της κάμερας Matterport και υπολογίζοντας ξανά τις αποστάσεις μεταξύ των νεφών αυτής και του σαρωτή ZEB Horizon (Εικόνα 7.48). Η τιμή του συντελεστή κλίμακας υπολογίστηκε αυτόματα από το πρόγραμμα και είχε τιμή 1.000 (Εικόνα 7.49), ενώ με την εφαρμογή του δεν παρατηρήθηκε κάποια αλλαγή στην μέση διαφορά και την τυπική απόκλιση μεταξύ των νεφών.

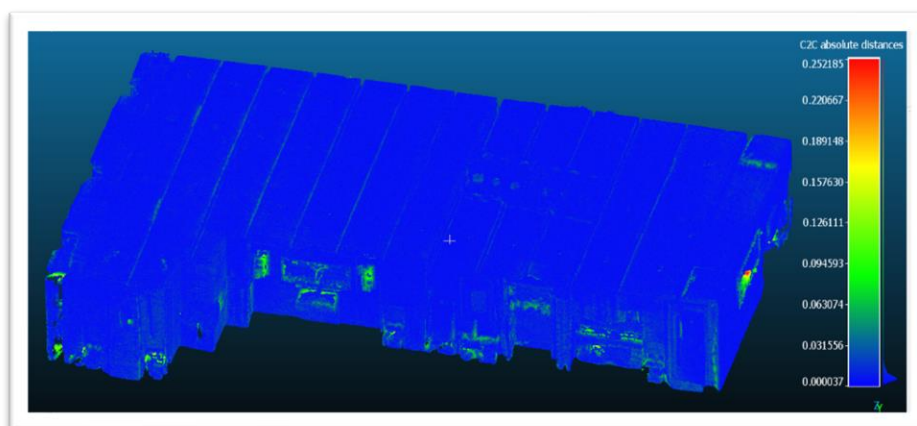


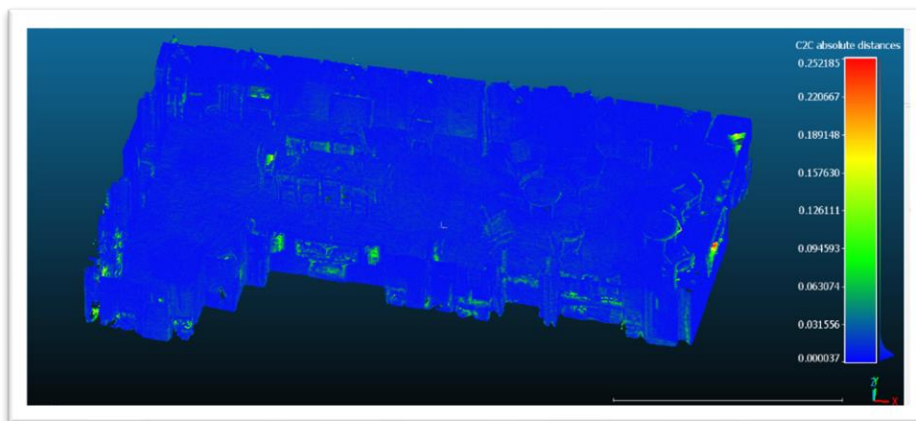
Εικόνα 7.48: Παράθυρο επιλογής των παραμέτρων της τελικής ευθυγράμμισης, με εφαρμογή του συντελεστή κλίμακας



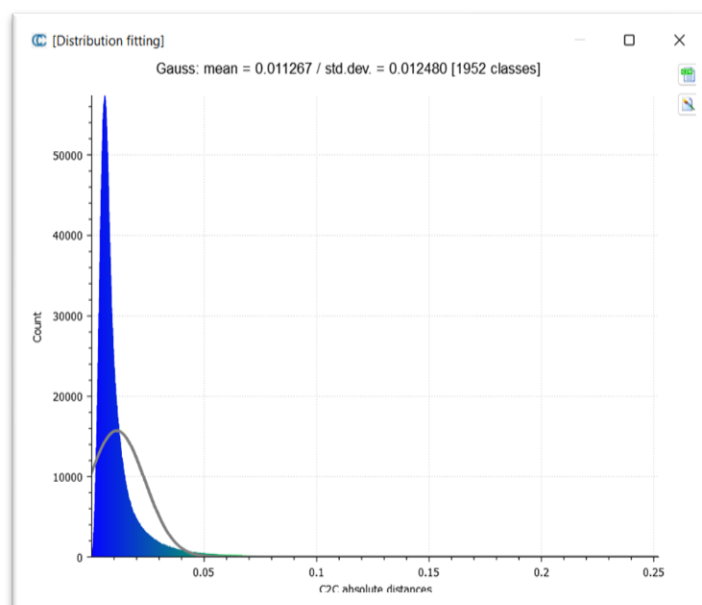
Εικόνα 7.49: Το προκύπτον σφάλμα της τελικής ευθυγράμμισης, με την εφαρμογή του συντελεστή κλίμακας

Με τον ίδιο τρόπο πραγματοποιήθηκε η ευθυγράμμιση των νεφών και για το καρέ αξιωματικών. Στην αρχική ευθυγράμμιση επιλέχθηκαν τέσσερα σημεία και το RMS που προέκυψε είχε τιμή 1.2cm. Στην τελική ευθυγράμμιση το RMS είχε τιμή 4.5cm. Η μέση διαφορά και η τυπική απόκλιση των δύο νεφών είναι 1.1cm και 1.2cm αντίστοιχα. Και στην συγκεκριμένη περίπτωση οι μεγαλύτερες τιμές των διαφορών ανάμεσα στα δύο νέφη, εμφανίζονται κυρίως σε περιοχές που υπάρχει θόρυβος λόγω των ανακλαστικών επιφανειών (καθρέπτες) στο νέφος σημείων της κάμερας Matterport (Εικόνα 7.50). Οι περισσότερες διαφορές που υπολογίστηκαν ως προς τις αποστάσεις, είναι της τάξεως των 0.006m (Εικόνα 7.51). Η εφαρμογή του συντελεστή κλίμακας που υπολογίστηκε αυτόματα από το πρόγραμμα και είχε τιμή 1.000, δεν έδωσε κάποια αλλαγή στην μέση διαφορά και την τυπική απόκλιση μεταξύ των νεφών.





Εικόνα 7.50: Οι υπολογισμένες αποστάσεις μεταξύ των νεφών σημείων του σαρωτή ZEB Horizon και της κάμερας Matterport, που αναφέρονται στο καρτέ αξιωματικών



Εικόνα 7.51: Διάγραμμα των υπολογισμένων αποστάσεων μεταξύ των νεφών σημείων του σαρωτή ZEB Horizon και της κάμερας Matterport, που αναφέρονται στο καρτέ αξιωματικών

Συμπερασματικά δεν παρατηρείται παραμόρφωση λόγω κλίμακας στα νέφη σημείων της κάμερας Matterport, καθώς η κλίμακα που υπολογίστηκε μεταξύ των νεφών έχει την τιμή 1.000 και κατά την εφαρμογή της δεν αλλάζουν οι αποκλίσεις στις αποστάσεις μεταξύ των νεφών.

Ο λόγος για τον οποίον σε σχετική βιβλιογραφία υπάρχει συστηματικό σφάλμα λόγω κλίμακας, ενώ στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν φαίνεται να συμβαίνει κάτι τέτοιο, είναι λόγω του μεγέθους της οντότητας που μελετάται κάθε φορά. Στο Matterport, παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος μιας απόστασης, τόσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά της σε σχέση με την πραγματικότητα. Αυτό έχει παρατηρηθεί και από τους



Piniotis et al., (2020), οι οποίοι υποστηρίζουν ότι αυτό προκαλεί σημαντικές αναντιστοιχίες σε μεγαλύτερα σύνολα δεδομένων όταν αυτά δεν μπορούν πλέον να ευθυγραμμιστούν πλήρως. Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος, τόσο μεγαλύτερο το απόλυτο σφάλμα που μπορεί να οφείλεται σε σφάλματα που συσσωρεύονται σε ευθυγραμμισμένες σαρώσεις. Εάν το σφάλμα στα δεδομένα μιας μεμονωμένης σάρωσης είναι εντός μιας ορισμένης ανοχής της πραγματικότητας, τότε αυτά τα σφάλματα μπορεί να αυξηθούν καθώς οι μεγαλύτερες αλυσίδες σαρώσεων ευθυγραμμίζονται μεταξύ τους. Η ίδια η διαδικασία ευθυγράμμισης μπορεί επίσης να εισάγει μικρά σφάλματα κατά την αντιστοίχιση δεδομένων σε όλες τις σαρώσεις. Συνεπώς όσο μεγαλύτερη είναι η ακολουθία των σαρώσεων σε μια αλυσίδα, τόσο μεγαλύτερη είναι η αβεβαιότητα γύρω από μεγαλύτερες μετρήσεις.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση οι χώροι που εξετάστηκαν είναι μικροί σε μέγεθος και όχι επιμήκεις όπως στην περίπτωση των Piniotis et al., (2020), όπου οι χώροι που εξετάζονται αποτελούνται από επιμήκεις διαδρόμους. Επομένως στην συγκεκριμένη περίπτωση ακολουθήθηκε ένας πιο κλειστός βρόγχος για κάθε μεμονωμένο δωμάτιο, και όχι μια επιμήκης διαδρομή. Ακολουθώντας μία κλειστή διαδρομή, υπάρχουν μεγαλύτερες πιθανότητες η κάμερα να κάνει λήψη πολλαπλών σαρώσεων από διαφορετικές θέσεις, βελτιώνοντας την ακρίβεια των ευθυγραμμίσεων και κατά συνέπεια του τελικού παραγόμενου μοντέλου. Συνεπώς η λήψη πολλαπλών σαρώσεων από διαφορετικές θέσεις συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση του αντίκτυπου αυτών των σφαλμάτων στο τελικό τρισδιάστατο μοντέλο. Ακόμη η συνολική έκταση των χώρων που αποτυπώθηκαν στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με την συνολική έκταση της οντότητας που μελετούν οι Pulcrano et al., (2019).



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα-Προτάσεις

8.1 Εισαγωγή

Στο όγδοο και τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της τεχνολογίας SLAM για την τρισδιάστατη σάρωση των εσωτερικών χώρων του θωρηκτού Θ/Κ «Γ. Αβέρωφ», καθώς και ενδιαφέρουσες προτάσεις για την συνέχιση της έρευνας στο αντικείμενο της εργασίας αυτής, στο μέλλον. Τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξε η εργασία ομαδοποιούνται στις ενότητες συλλογής των δεδομένων και της επεξεργασίας-αποτελεσμάτων.

8.2 Συμπεράσματα

A) Συλλογή δεδομένων

Τα συμπεράσματα σχετικά με την συλλογή των δεδομένων της τρισδιάστατης σάρωσης είναι τα εξής:

- Πριν από την απόκτηση των δεδομένων, με την χρήση των φορητών συστημάτων σάρωσης, πρέπει να πραγματοποιείται μία εκ των προτέρων επιθεώρηση στην περιοχή ενδιαφέροντος, ώστε να εντοπιστούν πιθανά εμπόδια. Ακόμη πρέπει να σχεδιάζονται οι διαδρομές που πρόκειται να ακολουθηθούν κατά τη συλλογή των δεδομένων και να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στο κλείσιμο βρόγχου, ακολουθώντας κλειστές διαδρομές.
- Κατά την χρήση των σαρωτών GeoSLAM ZEB Revo και ZEB Horizon, πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή κατά τη μετάβαση μεταξύ των διαφορετικών δωματίων (περάσματα από πόρτες), προκειμένου να αποφευχθεί η εισαγωγή σφαλμάτων.
- Κατά την χρήση της κάμερας Matterport Pro2 3D, η απόσταση μεταξύ διαδοχικών θέσεων μέτρησης πρέπει να είναι το πολύ 2.50m. Αυτό συμβαίνει επειδή οι διαδοχικές σαρώσεις πρέπει να έχουν ικανοποιητικό αριθμό κοινών χαρακτηριστικών σημείων και κατά συνέπεια επικαλυπτόμενα μέρη, τα οποία χρησιμοποιεί η κάμερα για να ευθυγραμμίσει σωστά την νέα σάρωση σε σχέση με την προηγούμενη.
- Κατά την χρήση της κάμερας Matterport Pro2 3D, οι διαδοχικές στάσεις για την πραγματοποίηση των σαρώσεων, πρέπει να λαμβάνονται στην περίμετρο του χώρου, όσο το δυνατόν πιο παράλληλα με τους τοίχους και με κάποια οπτική γωνία η μία σε σχέση με την άλλη. Έπειτα πρέπει να λαμβάνονται σαρώσεις από κάποιες στάσεις που δημιουργούνται στο κέντρο του χώρου και σε ορισμένη απόσταση η μία με την άλλη.
- Κατά την χρήση της κάμερας Matterport Pro2 3D, μπορεί οι σαρώσεις να χάνονται. Αυτό συμβαίνει όταν σαρώνει κανείς για αρκετή ώρα. Γι' αυτό ο

χρήστης πρέπει να κοιτάει την εφαρμογή μετά από κάθε σάρωση, για να βεβαιωθεί ότι αυτή έχει τοποθετηθεί στην προεπισκόπηση της σάρωσης.

- Κατά την χρήση της κάμερας Matterport Pro2 3D, δημιουργείται σφάλμα ευθυγράμμισης. Αναλυτικότερα, το σφάλμα αυτό προκύπτει όταν η εφαρμογή δεν μπορεί να συνενώσει την τελευταία σάρωση με καθεμιά από τις προηγούμενες κι εμφανίζει μήνυμα στην οθόνη. Το Matterport Capture πραγματοποιεί την ευθυγράμμιση επικαλύπτοντας τα δεδομένα, αναζητώντας περιοχές υψηλής ομοιότητας. Αν δεν υπάρχουν επικαλυπτόμενα δεδομένα προκαλείται σφάλμα ευθυγράμμισης. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, πρέπει να μειωθεί η απόσταση από μία προηγούμενη ολοκληρωμένη σάρωση στο μισό και να σαρωθεί ξανά. Αν αυτό δεν λειτουργήσει, τότε διαγράφεται η πιο πρόσφατα ολοκληρωμένη σάρωση και πραγματοποιείται εκ νέου.
- Κατά την χρήση της κάμερας Matterport Pro2 3D, η μορφολογική και γεωμετρική πολυπλοκότητα των εσωτερικών χώρων όπως στην συγκεκριμένη εφαρμογή και η μειωμένη επισκεψιμότητα σε κάποιες περιοχές αυτών, απαιτούσε την αύξηση των σαρώσεων για την κάλυψη των κενών περιοχών.
- Η κάμερα Matterport επηρεάζεται από τις συνθήκες φωτισμού, οι οποίες δημιουργούν κακή ευθυγράμμιση στα δεδομένα. Γι' αυτό ο χώρος στον οποίο πραγματοποιούνται οι μετρήσεις δεν θα πρέπει να είναι πολύ σκοτεινός, αλλά ούτε και να εισέρχεται πολύ φως.
- Η κάμερα Matterport σε σχέση με τα όργανα ZEB Revo και ZEB Horizon παρέχει την δυνατότητα ελέγχου των μετρήσεων που αποκτώνται κατά την φάση της συλλογής τους, διορθώνοντας οποιοδήποτε σφάλμα ή κενή περιοχή και συντελώντας στην βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων.
- Και τα τρία όργανα απαιτούν λιγότερο χρόνο ως προς την συλλογή των δεδομένων συγκριτικά με άλλες συμβατικές μεθόδους, αποτυπώνοντας χώρους με πολύπλοκη γεωμετρία, χωρίς την ανάγκη χρήσης στόχων.

B) Λογισμικό

Τα συμπεράσματα που αφορούν στην επεξεργασία και στα αποτελέσματα των τρισδιάστατων δεδομένων είναι τα ακόλουθα:

- Η χρήση και των τριών οργάνων απαιτεί τον προγραμματισμό της έρευνας και αρκετό χρόνο για την επεξεργασία των δεδομένων.
- Τα εργαλεία του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκαν κυρίως, ήταν τα αυτά της αποκοπής, του καθαρισμού θορύβου, της υποδειγματοληψίας, της κλωνοποίησης, της δημιουργίας τομής, της δημιουργίας εικονικής περιήγησης, της συνένωσης βάσει σημείων, της συνένωσης βάσει του αλγορίθμου ICP, της μέτρησης της απόστασης μεταξύ δύο νεφών και της μέτρησης αποστάσεων σε κάθε νέφος.
- Παρά την δυνατότητα που παρέχει το λογισμικό για την εκτέλεση αυτόματων ή ημιαυτόματων εργασιών, είναι καθοριστική η παρέμβαση του χρήστη στον ορισμό των παραμέτρων εκτέλεσης. Τα εργαλεία καθαρισμού του θορύβου,

υποδειγματοληψίας και συνένωσης βάσει του αλγορίθμου ICP, απαιτούσαν τον καθορισμό τέτοιων παραμέτρων. Οι τιμές των παραμέτρων αυτών καθορίστηκαν μέσα από πειραματισμούς και την επιλογή του βέλτιστου αποτελέσματος.

- Τα νέφη σημείων είχαν αρκετό θόρυβο, λόγω της ύπαρξης ανακλαστικών επιφανειών (καθρέπτες, γυαλί) στους χώρους που μελετήθηκαν, συνεπώς ήταν απαραίτητος ο καθαρισμός τους. Για την απαλοιφή του μεγαλύτερου μέρους του θορύβου στα νέφη σημείων, εφαρμόστηκαν φίλτρα καθαρισμού, ενώ κατά την χειροκίνητη απαλοιφή πρέπει να υπάρχει απαραίτητη προσοχή, ώστε να μην διαγραφεί χρήσιμη πληροφορία.
- Σε γενικές γραμμές τα νέφη σημείων του σαρωτή ZEB Horizon δεν ήταν τόσο θορυβώδη σε σχέση με αυτά του ZEB Revo. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στα νέφη του σαρωτή ZEB Horizon πραγματοποιήθηκε ένας αρχικός καθαρισμός από την εταιρία, μέσω του προγράμματος GeoSLAM Connect.
- Ο χρωματισμός των νεφών του σαρωτή ZEB Horizon, ο οποίος υποστηρίζει την προσθήκη κάμερας σε αντίθεση με τον σαρωτή ZEB Revo, έγινε κατά το στάδιο της επεξεργασίας.
- Ως προς τις εικονικές περιηγήσεις, το πρόγραμμα Nubigon επιτρέπει στον χρήστη να εισέλθει μέσα στο νέφος, κάτι που δεν υποστηρίζει το πρόγραμμα CloudCompare.
- Πριν από την δημιουργία οποιουδήποτε τρισδιάστατου μοντέλου επιφανείας στο λογισμικό CloudCompare, χρειάζεται να υπολογιστούν τα κανονικά διανύσματα.
- Στο Matterport τα υψηλά επίπεδα αυτοματισμού στην όλη διαδικασία διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο για την ποιότητα του αποτελέσματος. Η αδυναμία καθορισμού των παραμέτρων και των διαδικασιών που θα χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία ενός νέφους σημείων οδηγεί στην ομογενοποίηση του αποτελέσματος, το οποίο δεν μπορεί να είναι απολύτως συνεπές με τους σκοπούς διαφόρων ερευνών.

Γ) Αποτελέσματα

- Ο έλεγχος της συλλογής των δεδομένων, η ποιότητα των εικόνων RGB-D και η απόκτηση ακόμη και των πιο πολύπλοκων χώρων, χωρίς τη βοήθεια στόχων αναφοράς, καθιστούν την κάμερα Matterport εργαλείο γρήγορης οπτικοποίησης.
- Στο μοντέλο του Matterport παρατηρείται ότι τα αντικείμενα εμφανίζονται πιο ογκώδη σε σχέση με την πραγματικότητα. Το πλέγμα που δημιουργείται δεν είναι τόσο καλό για αντικείμενα με περίπλοκη γεωμετρία, σε σχέση με αυτά που έχουν πιο απλή γεωμετρία. Τα παραπάνω συμβαίνουν, επειδή τα τρίγωνα που δημιουργούνται στο πλέγμα δεν είναι τόσα πολλά σε αριθμό, ώστε να μπορούν να αναπαραστήσουν με λεπτομέρεια ένα αντικείμενο (πλέγμα χαμηλής ανάλυσης).
- Στο μοντέλο του Matterport παρατηρείται ότι ορισμένες επιφάνειες όπως για παράδειγμα το γυαλί και οι καθρέπτες απεικονίζονται κενές. Οι ενεργοί αισθητήρες βάθους δυσκολεύονται να ανιχνεύσουν αυτούς τους τύπους υλικών.

Συνεπώς δεν μπορεί να δημιουργηθεί τρισδιάστατο πλέγμα γι' αυτές τις οντότητες.

- Στα νέφη σημείων που προέκυψαν με την χρήση των τριών οργάνων, είναι ορατή και σωστή η γεωμετρία των αντικειμένων (σχήμα και μέγεθος), ενώ μπορεί κανείς να τα αναγνωρίσει εύκολα. Παρ' όλα αυτά δεν είναι ορατές οι λεπτομέρειες των αντικειμένων.
- Στα νέφη σημείων των τριών οργάνων, παρατηρούνται ορισμένες κενές περιοχές. Αυτό οφείλεται κυρίως στην απόφραξη του οπτικού πεδίου.
- Η πυκνότητα στα νέφη σημείων των τριών οργάνων δεν είναι ομοιόμορφη. Η πυκνότητα των σημείων που προκύπτει εξαρτάται από τον χρόνο που βλέπει ο σαρωτής μία συγκεκριμένη περιοχή, από την απόσταση και την γωνία σάρωσης, καθώς και από την ταχύτητα του χρήστη.
- Η κάμερα Matterport εμφανίζει μεγαλύτερη πυκνότητα δεδομένων, σε σχέση με τους σαρωτές ZEB Revo και ZEB Horizon, όπου τα δεδομένα είναι πιο αραιά (μικρότερη πυκνότητα σημείων).
- Η λήψη έγχρωμων δεδομένων με τα όργανα ZEB Horizon και Matterport Pro2 3D, δίνει υφή στα αντικείμενα και στους χώρους και κατά συνέπεια νέφη σημείων που προσεγγίζουν σε μεγάλο βαθμό την πραγματικότητα, σε σχέση με τα νέφη σημείων που πάρθηκαν από τον σαρωτή ZEB Revo.
- Στα νέφη του σαρωτή ZEB Horizon, εμφανίζονται κάποιες μαύρες περιοχές. Ουσιαστικά πρόκειται για περιοχές στις οποίες να μην έχουν ληφθεί σημεία, ωστόσο γι' αυτά δεν υπάρχουν τιμές RGB. Αυτό οφείλεται στην κάμερα, η οποία είτε δεν μπόρεσε να πάρει εικόνες σε αυτές τις περιοχές, είτε δεν μπόρεσε να χρησιμοποιήσει αυτές που είχε πάρει.
- Εμφανές είναι το πρόβλημα στρογγύλευσης των γωνιών στα νέφη σημείων της κάμερας Matterport.
- Ορισμένες επιφάνειες στα νέφη σημείων της κάμερας Matterport, όπως για παράδειγμα το γυαλί και οι καθρέπτες απεικονίζονται κενές, λόγω της αδυναμίας των ενεργών αισθητήρων βάθους να ανιχνεύσουν συγκεκριμένους τύπους υλικών.
- Η ακρίβεια των τριών οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν εξαρτάται από το περιβάλλον που αποτυπώνεται (χώροι πλούσιοι σε χαρακτηριστικά) κι από την διαδρομή που ακολουθείται (κλειστοί βρόγχοι).
- Οι σαρωτές GeoSLAM ZEB Revo και ZEB Horizon εμφανίζουν μικρότερες μέσες διαφορές και τυπικές αποκλίσεις στις μετρημένες οριζόντιες αποστάσεις συγκριτικά με την μετροταινία που θεωρείται αναφορά. Η ακρίβεια που δίνουν οι συγκεκριμένοι σαρωτές είναι εντός της ακρίβειας που δίνει ο κατασκευαστής (1-3cm). Αντιθέτως το Matterport εμφανίζει μεγαλύτερη μέση διαφορά και τυπική απόκλιση στις μετρημένες οριζόντιες αποστάσεις συγκριτικά με την μετροταινία. Συνεπώς έχει μειωμένη ακρίβεια σε σχέση με τα άλλα δύο όργανα μέτρησης.
- Τα αποτελέσματα της σύγκρισης των αποστάσεων ανάμεσα στα νέφη του σαρωτή ZEB Horizon και της κάμερας Matterport, έδειξαν ότι τα νέφη της τελευταίας έχουν αποκλίσεις στις αποστάσεις που σε κάθε περίπτωση είναι εντός

του 1%, που δηλώνει ο κατασκευαστής. Η κλίμακα ανάμεσα στα νέφη των δύο διαφορετικών οργάνων έχει τιμή 1.000.

- Η παραπάνω διαπίστωση συμφωνεί εν γένει με σχετική βιβλιογραφία, στην οποία βρίσκονται τοπικές αποκλίσεις που μπορεί να ξεπεράσουν την απόκλιση 1% κυρίως σε χώρους με μεγάλη διάσταση κατά την μία πλευρά (τούνελ), ενώ οι αποκλίσεις cloud to cloud distance μεταξύ ενός άλλου συστήματος και της κάμερας Matterport, μειώνονται με την εφαρμογή του συντελεστή κλίμακας.
- Η αρχική ευθυγράμμιση των νεφών του σαρωτή ZEB Horizon και της κάμερας Matterport για τα ναυαρχικά διαμερίσματα έδωσε μέσο τετραγωνικό σφάλμα 1.3cm. Η αντίστοιχη ευθυγράμμιση για το καρέ αξιωματικών έδωσε μέσο τετραγωνικό σφάλμα 1.2cm.
- Η τελική ευθυγράμμιση των νεφών του σαρωτή ZEB Horizon και της κάμερας Matterport για τα ναυαρχικά διαμερίσματα έδωσε μέσο τετραγωνικό σφάλμα 5.4cm. Η αντίστοιχη ευθυγράμμιση για το καρέ αξιωματικών έδωσε μέσο τετραγωνικό σφάλμα 4.5cm.
- Η μέση διαφορά και η τυπική απόκλιση των νεφών του σαρωτή ZEB Horizon και της κάμερας Matterport για τα ναυαρχικά διαμερίσματα προέκυψε ίση με 1.2cm και 1.4cm αντίστοιχα. Οι αντίστοιχες τιμές για το καρέ αξιωματικών είναι 1.1cm και 1.2cm.
- Οι μεγαλύτερες τιμές των διαφορών ανάμεσα στα νέφη του σαρωτή ZEB Horizon και της κάμερας Matterport τόσο για τα ναυαρχικά διαμερίσματα, όσο και για το καρέ αξιωματικών, εμφανίζονται κυρίως σε περιοχές που υπάρχει θόρυβος στο νέφος σημείων της κάμερας Matterport, λόγω των ανακλαστικών επιφανειών (καθρέπτες, γυαλί). Οι περισσότερες διαφορές που υπολογίστηκαν ως προς τις αποστάσεις, είναι της τάξεως των 0.006m.
- Η διαδικασία τελικής ευθυγράμμισης των νεφών τόσο του καρέ αξιωματικών όσο και των ναυαρχικών διαμερισμάτων επαναλήφθηκε, επιλέγοντας κάθε φορά την προσαρμογή κλίμακας στο νέφος σημείων της κάμερας Matterport και υπολογίζοντας ξανά τις αποστάσεις μεταξύ των νεφών αυτής και του σαρωτή ZEB Horizon. Η τιμή του συντελεστή κλίμακας υπολογίστηκε αυτόματα από το πρόγραμμα και είχε τιμή 1.000, ενώ με την εφαρμογή του δεν παρατηρήθηκε κάποια αλλαγή στην μέση διαφορά και την τυπική απόκλιση μεταξύ των νεφών.
- Δεν παρατηρείται παραμόρφωση λόγω κλίμακας στα νέφη σημείων της κάμερας Matterport, καθώς η κλίμακα που υπολογίστηκε μεταξύ των νεφών έχει την τιμή 1.000 και κατά την εφαρμογή της δεν αλλάζουν οι αποκλίσεις στις αποστάσεις μεταξύ των νεφών.
- Ο λόγος για τον οποίον δεν απαιτείται διόρθωση λόγω κλίμακας αφορά το μικρό μέγεθος των χώρων που εξετάζονται και την πορεία που ακολουθήθηκε για την συλλογή των δεδομένων (κλειστή διαδρομή).
- Οι σαρωτές ZEB Revo και ZEB Horizon είναι πιο αξιόπιστοι μετρητικά, σε σχέση με την κάμερα Matterport, ενώ η τελευταία παράγει ένα πιο φωτορεαλιστικό αποτέλεσμα, σε σχέση με τους προαναφερθέντες σαρωτές.
- Σε κάθε περίπτωση τα τρισδιάστατα νέφη σημείων που παράγονται, αποτελούν μία ψηφιακή τρισδιάστατη απεικόνιση των εσωτερικών χώρων θωρηκτού, που

παρέχουν την δυνατότητα εξαγωγής μετρητικής πληροφορίας και οπτικής περιήγησης.

- Η χρήση και της τεχνολογίας SLAM για την ψηφιακή τρισδιάστατη τεκμηρίωση χώρων πολιτιστικής κληρονομιάς αποτελεί αδιαμφισβήτητη μέθοδο προς εφαρμογή.

8.3 Προτάσεις

Ενδιαφέρουσες προτάσεις για μελλοντική έρευνα αποτελούν:

- Η δυνατότητα να βλέπει ο χρήστης τα δεδομένα που συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο, κατά την χρήση των σαρωτών ZEB Revo και ZEB Horizon. Προς αυτή την κατεύθυνση είναι προσανατολισμένα τα νέα όργανα της εταιρίας GeoSLAM, ZEB Revo RT και ZEB Horizon RT.
- Ο αυτόματος χρωματισμός των νεφών σημείων που λαμβάνονται από τους φορητούς σαρωτές, συγχρονίζοντας την διαδρομή απόκτησης με βίντεο που θα λαμβάνονται και την επακόλουθη προβολή των καρτέ στο ίδιο το νέφος. Αναλυτικότερα η έλλειψη ραδιομετρικών πληροφοριών υψηλής ποιότητας εξακολουθεί να είναι ένα άλυτο ζήτημα για συστήματα που βασίζονται στην τεχνολογία LiDAR. Οι εικόνες μπορούν να προβληθούν στα σημεία των επιφανειών μόνο κατά την επεξεργασία των νεφών σημείων (χρωματισμός νέφους).
- Η αξιοποίηση των νεφών σημείων που δημιουργούνται από τους φορητούς σαρωτές, για την δημιουργία μοντέλων δομικών πληροφοριών για την πολιτιστική κληρονομιά (HBIM).
- Η κάλυψη των κενών περιοχών στα νέφη σημείων με την χρήση drone εσωτερικών χώρων.
- Η δημιουργία του μοντέλου επιφανείας των χώρων που μελετήθηκαν για την περιήγηση σε περιβάλλον εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας (VR και AR).
- Η δημιουργία μιας ψηφιακής βιβλιοθήκης ιστορικών πλοίων και υποβρυχίων σε εθνικό επίπεδο, προκειμένου να μπορούν να έχουν όλοι πρόσβαση σε αυτήν.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλιογραφία

Αγγλική βιβλιογραφία

Barba, S., Ferreyra, C., Cotella, VA., & Di Filippo, A. (2021). A SLAM Integrated Approach for Digital Heritage Documentation. *Proceedings 9th International Conference in Interactive Cultural Heritage and Arts, 24-29 July, pages 27-39.*

https://doi.org/10.1007/978-3-030-77411-0_3

Di Filippo, A., Sánchez-Aparicio, LG., Barba, S., Martín-Jiménez, JA., Mora, R., & Aguilera, DG. (2018). Use of a Wearable Mobile Laser System in Seamless Indoor 3D Mapping of a Complex Historical Site. *Remote sensing, 10* (12), 1-19.

<https://doi.org/10.3390/rs10121897>

Di Stefano, F., Torresani, A., Farella, EM., Pierdicca, R., Menna, F., & Remondino, F. (2021). 3D Surveying of Underground Built Heritage: Opportunities and Challenges of Mobile Technologies. *Sustainability, 13* (23), 1-18.

<https://doi.org/10.3390/su132313289>

Doaa, M., Abdel-Megeed, MS., Ramadan, H., & Roushdy, M. (2014). 3D Graph-based Vision-SLAM Registration and Optimization. *INTERNATIONAL JOURNAL OF CIRCUITS, SYSTEMS AND SIGNAL PROCESSING, 8*, 123-130.

Elhashash, M., Albanwan, H., & Qin, R. (2022). A Review of Mobile Mapping Systems: From Sensors to Applications. *Sensors, 22* (11), 1-26.

<https://doi.org/10.3390/s22114262>

Hess, M., & Ferreyra, C. (2021). RECORDING AND COMPARING HISTORIC GARDEN ARCHITECTURE. VALUE OF SLAM-BASED RECORDING FOR RESEARCH ON CULTURAL LANDSCAPES IN CONNECTION WITH HERITAGE CONSERVATION. *28th CIPA Symposium "Great Learning & Digital Emotion", 28 August–1 September, Beijing, China, pages 301-308.*

<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-M-1-2021-301-2021>

Jang, W., & Kim, T. (2021). iSAM2 using CUR matrix decomposition for data compression and analysis. *Journal of Computational Design and Engineering, 8*(3), 855–870.

<https://doi.org/10.1093/jcde/qwab019>

Medić, T., Holst, C., & Kuhlmann, H. (2017). Towards System Calibration of Panoramic Laser Scanners from a Single Station. *Sensors, 17* (5), 1-25.

<https://doi.org/10.3390/s17051145>

Patrucco, G., Rinaudo, F., & Spreafico, A. (2019). MULTI-SOURCE APPROACHES FOR COMPLEX ARCHITECTURE DOCUMENTATION: THE "PALAZZO DUCALE" IN GUBBIO

(PERUGIA, ITALY). *2nd International Conference of Geomatics and Restoration, 8–10 May, Milan, Italy, pages 953-960.*

<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-953-2019>

Petrie, G. (2009). Current Developments in Airborne Laser Scanning Technologies. *IX International Scientific & Technical Conference "From Imagery to Map: Digital Photogrammetric Technologies", 5-8 October, Athens, Greece, pages 1-21.*

Piniotis, G., Soile, S., Bourexis, F., Tsakiri, M., & Ioannidis, C. (2020). EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF 3D NARROW SPACE MAPPING TECHNOLOGIES. *ISPRS, 43, 149-156.*

<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-149-2020>

Puente, I., González-Jorge, H., Martínez-Sánchez, J., & Arias, P. (2013). Review of mobile mapping and surveying technologies. *Journal of the International Measurement Confederation, 46 (7), 2127-2145.*

<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.03.006>

Pulcrano, M., Scandurra, S., Minin, G., & Di Luggo, A. (2019). 3D CAMERAS ACQUISITIONS FOR THE DOCUMENTATION OF CULTURAL HERITAGE. *8th Intl. Workshop 3D-ARCH "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures", 6–8 February, Bergamo, Italy, pages 639-646.*

<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-639-2019>

Rabbia, A., Sammartano, G., & Spanò, A. (2020). Fostering Etruscan heritage with effective integration of UAV, TLS and SLAM-based methods. *International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage, 22-24 October, Trento, Italy, pages 322-327.*

Reshetyuk, Y. (2009). *Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning* (Doctoral thesis, Royal Institute of Technology (KTH)). KTH Library.

<http://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A139761&dswid=9522>

Shults, R., Levin, E., Habibi, R., Shenoy, S., Honcheruk, O., Hart, T., et al. (2019). CAPABILITY OF MATTERPORT 3D CAMERA FOR INDUSTRIAL ARCHAEOLOGY SITES INVENTORY. *2nd International Conference of Geomatics and Restoration, 8–10 May 2019, Milan, Italy, pages 1059-1064.*

<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-1059-2019>

Sulaiman, M., Mohd-Nasiruddin, AA., Mohd-Haidar, AB., Nur, AH., & Azuddin, MA. (2020). Matterport: Virtual Tour as A New Marketing Approach in Real Estate Business During Pandemic COVID-19. *Proceedings of the International Conference of Innovation in Media and Visual Design (IMDES 2020), 10-11 November, Tangerang, Indonesia, pages 221-226.*

<https://doi.org/10.2991/assehr.k.201202.079>

Ελληνική βιβλιογραφία

Γαρδίκια-Κατσιαδάκη, Ε., & Χαρωνίτης, Γ. (2002). *Το Θωρηκτό Γεώργιος Αβέρωφ κατά τους Βαλκανικούς Πολέμους 1912-1913*. Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών και Μελετών «Ελευθέριος Κ. Βενιζέλος» - Ελληνικό Λογοτεχνικό και Ιστορικό Αρχείο - Μουσείο Μπενάκη.

Καρράς, Γ. (1998). *Γραμμικοί Μετασχηματισμοί Συντεταγμένων στην Φωτογραμμετρία* (Σπουδαστικές Σημειώσεις, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο).

<https://docplayer.gr/31229762-Grauuikoi-metashiuatisuoi-syntetaguenon-stin-fotograuuetria.html>

Κόρδιτς, Β. (2017). *Διερεύνηση και Υλοποίηση Μεθόδου Χαρτογράφησης και Εντοπισμού Θέσης από οπτικά δεδομένα Αυτόνομου Υποβρύχιου Οχήματος* (Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο). Ψηφιακό Αποθετήριο Ε.Μ.Π.

<https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/45041>

Κοψιάυτης, Γ. (2016). *Προγραμματισμός Σαρωτών Λείζερ για τον Έλεγχο της Κατάστασης Εσωτερικών Επιφανειών Σηράγγων* (Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο). Ψηφιακό Αποθετήριο Ε.Μ.Π.

<https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/43514>

Κυπαρίσση, Β. (2011). *Συνένωση Νεφών Σημείων από Ομολογίες Εικόνων* (Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο). Ψηφιακό Αποθετήριο Ε.Μ.Π.

<https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/3804>

Μπότσης, Ν. (2019). *Χαρτογράφηση Χώρου με Χρήση Κινούμενου Ρομποτικού Οχήματος* (Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών). Νημερτής.

<https://nemertes.library.upatras.gr/items/50e2d9b8-21c9-4e9c-a5e7-5fb33de48083>

Πατιάς, Π. (1993). *Εισαγωγή στη Φωτογραμμετρία*. Εκδόσεις Ζήτη.

Συμεωνίδης, Π. (2007). *Σαρωτές Laser. Τεχνολογία, τεχνικές και εφαρμογές*. Τμήμα Γεωπληροφορικής και Τοπογραφίας, Τ.Ε.Ι. Σερρών, Σέρρες, 2007.

<http://civilgeo.teicm.gr/userfiles/files/geo/sarotes Laser.pdf>

Διαδικτυακοί τόποι

Advantages of 3D Terrestrial Laser Scanners. HIVE VIRTUAL PLANT. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://hivevp.com/advantages-of-3d-terrestrial-laser-scanners/>

[Τελευταία πρόσβαση: 24/01/2023].

Ales, M. (2021, October 21). *How Does Matterport Work?* HOMETRACK REAL ESTATE MARKETING. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.hometrack.net/blog/how-does-matterport-work>

[Τελευταία πρόσβαση: 24/01/2023].

An Evaluation of Bathymetric LiDAR Systems. INFOMAR. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

https://www.infomar.ie/sites/default/files/pdfs/An%20Evaluation%20of%20Bathymetric%20LiDAR%20Systems_0.pdf

[Τελευταία πρόσβαση: 24/01/2023].

Case Study: Laser Scan Survey and Historic Vessels. ScARF. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://scarf.scot/thematic/scarf-marine-maritime-panel-report/maritime-case-studies/case-study-laser-scan-survey-and-historic-vessels/>

[Τελευταία πρόσβαση: 19/01/2023].

CG Masters. (2020, July 16). *3D Basics - What are Normals?* [Video]. YouTube [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=hkTjreiookM>

[Τελευταία πρόσβαση: 25/01/2023].

CloudCompare wiki. [Ηλεκτρονικό]

Available at: http://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Main_Page

[Τελευταία πρόσβαση: 24/01/2023].

Damien, A. (n.d.). *CloudCompare, a 3D point cloud and mesh editing software.* UbuLog. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://ubunlog.com/el/cloudcompare-software-procesamiento-malla-y-nube-puntos/>

[Τελευταία πρόσβαση: 24/01/2023].

Documenting Historic Naval Architecture with 3D Laser Scanning. LIDAR MAGAZINE. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://lidarmag.com/2016/01/31/documenting-historic-naval-architecture-with-3d-laser-scanning/>

[Τελευταία πρόσβαση: 19/01/2023].

Fresh hope as 1940s ad found for Dundee RRS Discovery's missing engine. THE SCOTSMAN. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.scotsman.com/whats-on/arts-and-entertainment/fresh-hope-1940s-ad-found-dundee-rrs-discoverys-missing-engine-1477511>

[Τελευταία πρόσβαση: 24/01/2023].

GeoSLAM CONNECT. Software Guide Instruction for software configuration and operation (2022). GeoSLAM Product Team.

GeoSLAM ZEB-HORIZON. Landmark. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.landmark.com.gr/product-detail/geoslam-zeb-horizon/>

[Τελευταία πρόσβαση: 02/11/2022].

GeoSLAM ZEB-REVO. Landmark. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.landmark.com.gr/product-detail/geoslam-zeb-revo/>

[Τελευταία πρόσβαση: 08/11/2022].

Golubeva, S. (2022, January 24). *What is laser 3D scanning?* Artec3D. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.artec3d.com/learning-center/laser-3d-scanning>

[Τελευταία πρόσβαση: 19/01/2023].

Higgins, S. (2020, July 21). *How SLAM affects the accuracy of your scan (and how to improve it)*. NAVVIS. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.navvis.com/blog/how-slam-affects-the-accuracy-of-your-scan-and-howto-improve-it>

[Τελευταία πρόσβαση: 20/12/2022].

Kelsey, P. (2015, June 5). *Analyzing "Old Ironsides"*. Carahsoft. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.carahsoft.com/community/analyzing-old-ironsides>

[Τελευταία πρόσβαση: 26/01/2023].

Leica Geosystems AG. (2012, November 21). *Laser scanning: Chapter 2 of 3 - How It All Works* [Video]. YouTube. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=1lDO1UevAJI>

[Τελευταία πρόσβαση: 25/01/2023].

MARY ROSE TRUST. ABA Surveying. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.abasurveying.co.uk/portfolio-items/mary-rose-trust/>

[Τελευταία πρόσβαση: 19/01/2023].

MATLAB. (2020, August 28). *Autonomous Navigation, Part 3: Understanding SLAM Using Pose Graph Optimization* [Video]. YouTube [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=saVZtgPyyJQ>

[Τελευταία πρόσβαση: 25/01/2023].

Measurement Accuracy in Matterport Spaces. Matterport. [Ηλεκτρονικό]

Available at: https://support.matterport.com/s/article/How-accurate-are-dimensions-in-Matterport-Spaces?language=en_US

[Τελευταία πρόσβαση: 13/11/2022].

Scan a Space: Matterport Pro Camera and Matterport Capture. Matterport. [Ηλεκτρονικό]

Available at: https://support.matterport.com/s/article/Scan-a-Space-Matterport-Pro-Camera-and-Matterport-Capture?language=en_US

[Τελευταία πρόσβαση: 25/01/2023].

Scan a Space: Matterport Pro Camera and Matterport Capture (2023). Matterport. [Ηλεκτρονικό]

Available at: https://support.matterport.com/s/article/Scan-a-Space-Matterport-Pro-Camera-and-Matterport-Capture?language=en_US

[Τελευταία πρόσβαση: 30/01/2023].

The National Museum of the Royal Navy: HMS Trincomalee. Matterport DISCOVER. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://matterport.com/discover/space/national-museum-royal-navy-hms-trincomalee>

[Τελευταία πρόσβαση: 25/01/2023].

Types of lidar. ArcGIS Desktop. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/types-of-lidar.htm>

[Τελευταία πρόσβαση: 27/10/2022].

Urquhart, F. (2013, November 14). *Antarctic ship RSS Discovery scanned by 3D laser*. The SCOTSMAN. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.scotsman.com/news/antarctic-ship-rss-discovery-scanned-3d-laser-1553256>

[Τελευταία πρόσβαση: 19/01/2023].

USS Constellation. Matterport DISCOVER. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://matterport.com/discover/space/RT5TXuzLgFV>

[Τελευταία πρόσβαση: 25/01/2023].

What is SLAM Algorithm and Why SLAM Matters? GIS Resources. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.gisresources.com/what-is-slam-algorithm-and-why-slam-matters/>

[Τελευταία πρόσβαση: 24/01/2023].

What Is SLAM? 3 things you need to know. MathWorks. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://nl.mathworks.com/discovery/slam.html>

[Τελευταία πρόσβαση: 19/12/2022].

Woollaston, V. (2013, June 4). *HMS Victory as you've never seen it before: The amazing 3D map of Nelson's battleship created by lasers in a bid to help restore it.* MailOnline.

[Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2335458/HMS-Victory-youve-seen-The-amazing-3D-map-Nelsons-battleship-created-lasers-bid-help-restore-it.html>

[Τελευταία πρόσβαση: 19/01/2023].

ZEB HORIZON. The ultimate mobile mapping solution. Your versatile tool to capture, process and understand the world around you. GeoSLAM. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://geoslam.com/solutions/zeb-horizon/>

[Τελευταία πρόσβαση: 30/11/2022].

ZEB-HORIZON User's Manual. GeoSLAM. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://geoslam.com/wp-content/uploads/2021/02/ZEB-Horizon-User-Manual-v1.3.pdf>

[Τελευταία πρόσβαση: 22/11/2022].

ZEB REVO RT. Scan, process and track your progress as you go. View point cloud data in real-time. GeoSLAM. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://geoslam.com/solutions/zeb-revo-rt/>

[Τελευταία πρόσβαση: 03/01/2023].

Αλούρδας, Γ. (2014, Απρίλιος 4). *Τα ναυπηγικά χαρακτηριστικά του «Γ. Αβέρωφ».* Ελεύθερη Ζώνη. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <http://www.elzoni.gr/html/ent/789/ent.43789.asp>

[Τελευταία πρόσβαση: 24/01/2023].

Λάζαρης, Θ. (2020, Μάιος 25). *«Θωρηκτό Αβέρωφ: Ο Θρύλος του Πολεμικού μας Ναυτικού».* Spartorama. [Ηλεκτρονικό]

Διαθέσιμο στο: <https://spartorama.gr/articles/37512/>

[Τελευταία πρόσβαση: 25/01/2023].

Πλωτό Ναυτικό Μουσείο Θωρηκτό "Γ. Αβέρωφ". [Ηλεκτρονικό]

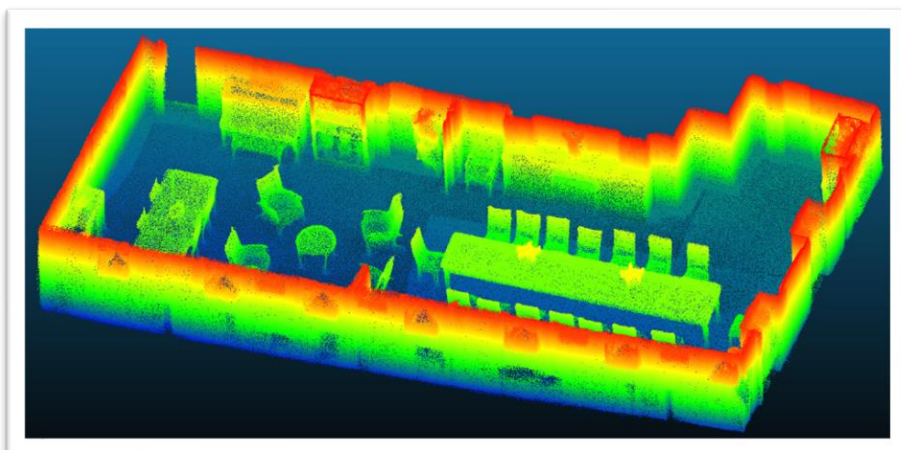
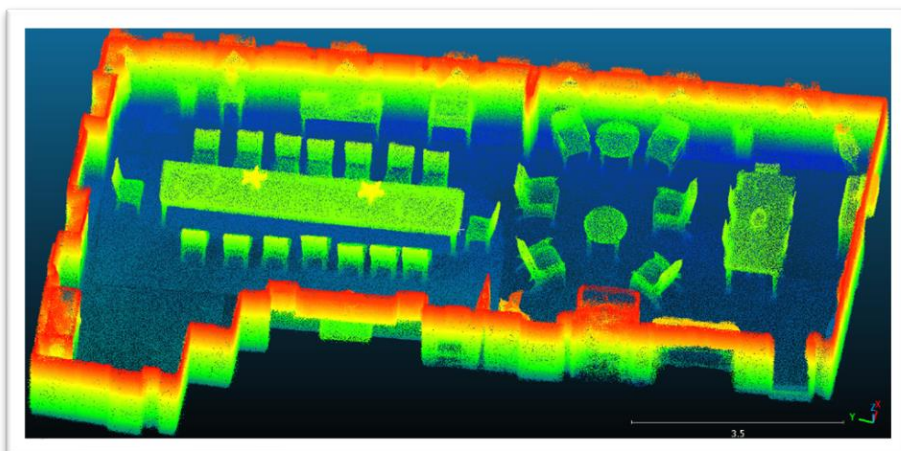
Διαθέσιμο στο: <http://averof.mil.gr/>

[Τελευταία πρόσβαση: 24/01/2023].

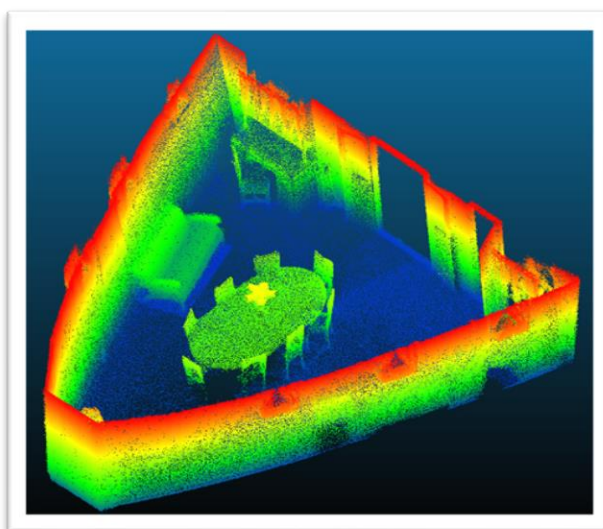


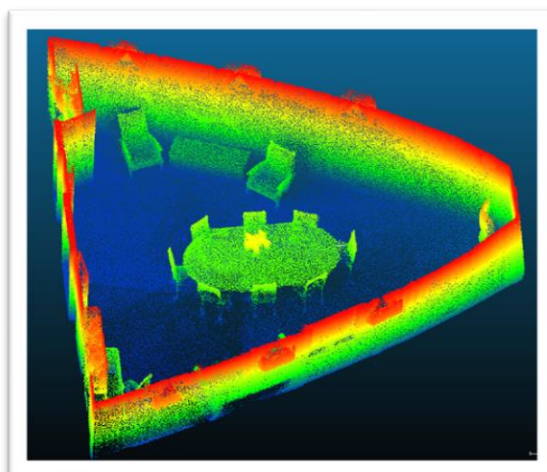
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Παράρτημα Α: Αποσπάσματα εικονικών περιηγήσεων

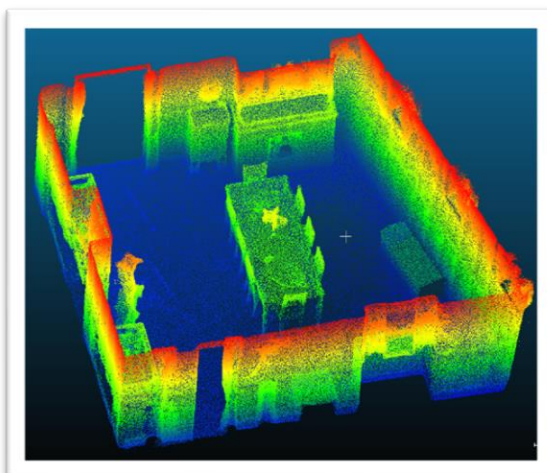
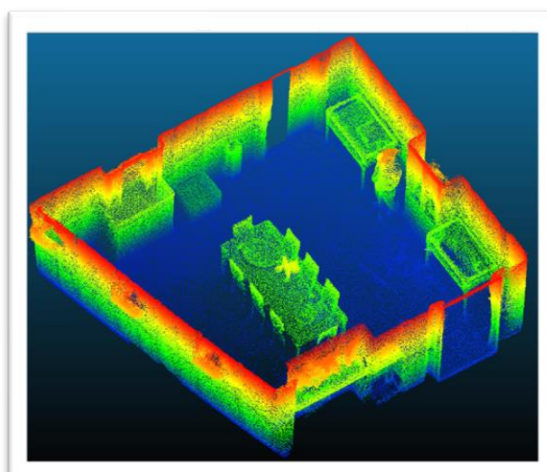


Εικόνα Α.1: Πλάγιες όψεις με τομή από την οροφή, στιγμιότυπα της εικονικής περιήγησης του τρισδιάστατου νέφους σημείων του καρέ αξιωματικών που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Revo

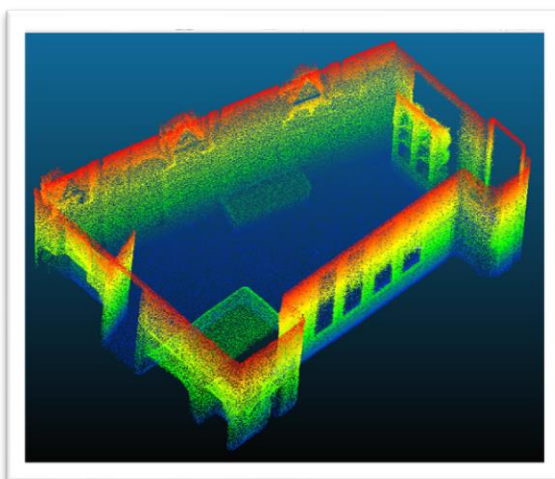
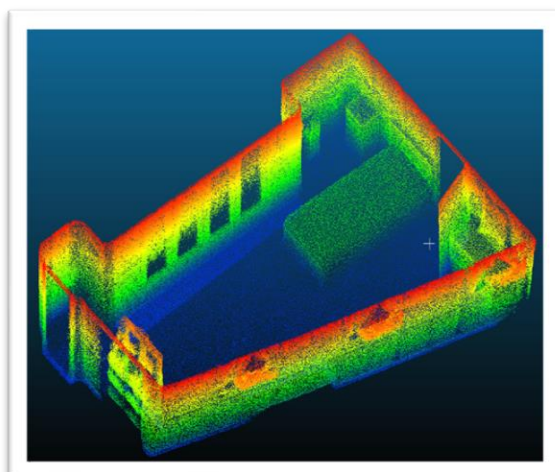




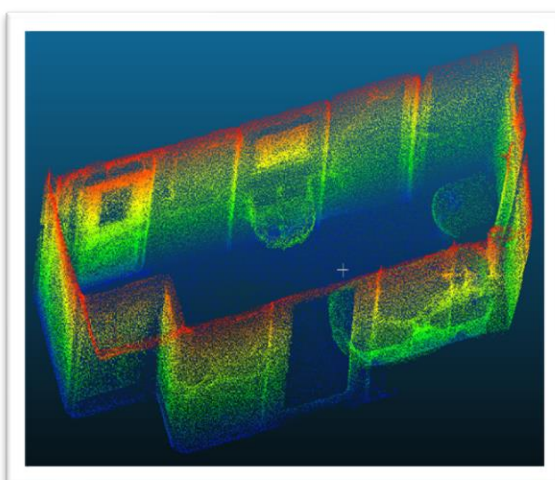
Εικόνα Α.2: Πλάγιες όψεις με τομή από την οροφή, στιγμιότυπα της εικονικής περιήγησης του τρισδιάστατου νέφους σημείων της αίθουσας συσκέψεων (ναυαρχικά διαμερίσματα) που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Revo

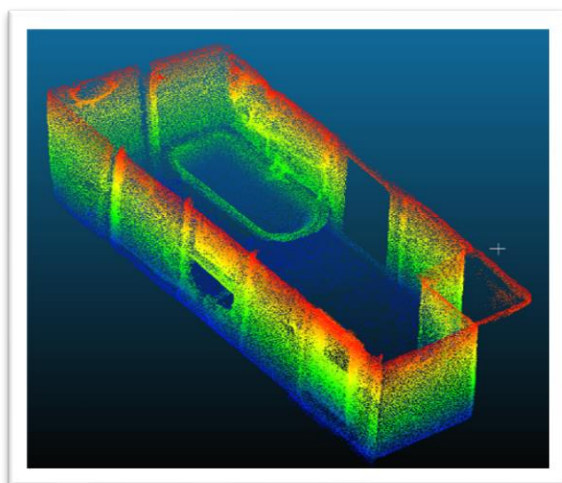


Εικόνα Α.3: Πλάγιες όψεις με τομή από την οροφή, στιγμιότυπα της εικονικής περιήγησης του τρισδιάστατου νέφους σημείων της τραπεζαρίας ναυάρχου (ναυαρχικά διαμερίσματα) που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Revo



Εικόνα Α.4: Πλάγιες όψεις με τομή από την οροφή, στιγμιότυπα της εικονικής περιήγησης του τρισδιάστατου νέφους σημείων του υπνοδωματίου ναυάρχου (ναυαρχικά διαμερίσματα) που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Revo

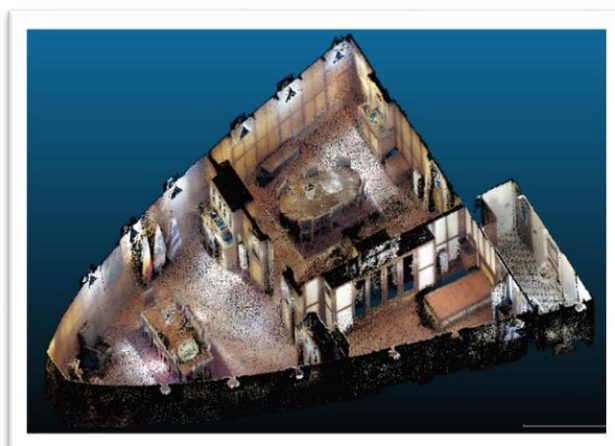




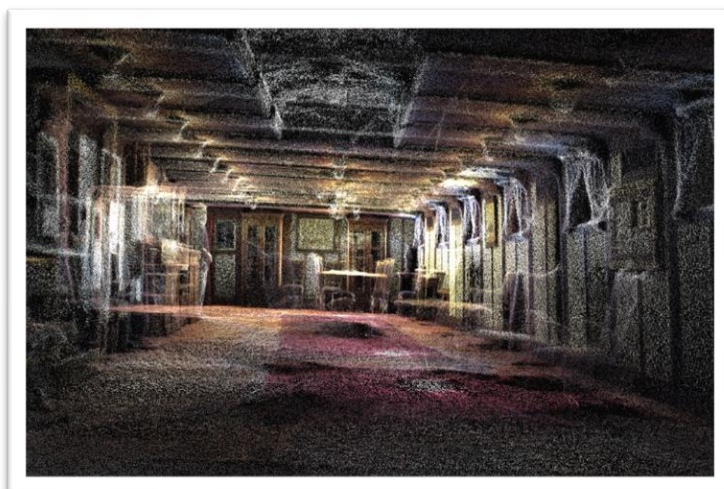
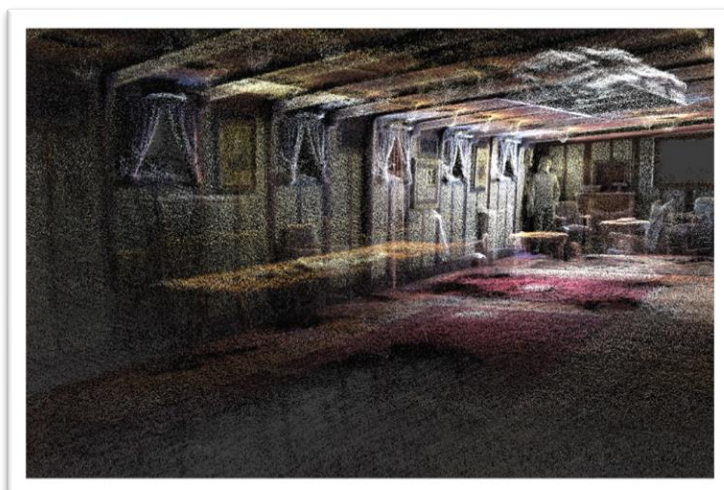
Εικόνα Α.5: Πλάγιες όψεις με τομή από την οροφή, στιγμιότυπα της εικονικής περιήγησης του τρισδιάστατου νέφους σημείων του λουτρού ναυάρχου (ναυαρχικά διαμερίσματα) που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Revo



Εικόνα Α.6: Πλάγια όψη με τομή από την οροφή, του τρισδιάστατου νέφους σημείων του καρέ αξιωματικών, που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Horizon



Εικόνα Α.7: Πλάγια όψη με τομή από την οροφή, του τρισδιάστατου νέφους σημείων των ναυαρχικών διαμερισμάτων, που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Horizon



Εικόνα Α.8: Στιγμιότυπα της εικονικής περιήγησης, μέσα στο τρισδιάστατο νέφος σημείων του καρέ αξιωματικών, που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Horizon





Εικόνα Α.9: Στιγμιότυπα της εικονικής περιήγησης, μέσα στο τρισδιάστατο νέφος σημείων των ναυαρχικών διαμερισμάτων, που αποκτήθηκε με τον σαρωτή ZEB Horizon