



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Ανάπτυξη Συστήματος Μέτρησης για την 3-Διάστατη Καταγραφή Χώρου από Μη-επανδρωμένη Εναέρια Πλατφόρμα

Γεώργιος Λουκάς

Εξεταστική Επιτροπή

Κουτρούλης Ευτύχιος (Αναπλ. Καθηγητής, επιβλέπων)

Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος (Καθηγητής)

Παρτσινέβελος Παναγιώτης (Επικ. Καθηγητής, Σχολή Μηχ.Ο.Π)

Χανιά 2017

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας, σε συνδυασμό με την αναγκαιότητα για ασφαλέστερες συνθήκες εργασίας για τον άνθρωπο, κατέστησαν ακόμα πιο σημαντική τη χρήση των μη-επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAVs ή drones). Η χρήση τους συναντάται ολοένα και πιο συχνά και βρίσκει εφαρμογές σε διάφορους τομείς, όπως επιστημονικούς, στρατιωτικούς, εμπορικούς αλλά και ψυχαγωγικούς. Έναν από τους τομείς αυτούς, αποτελεί και ο τομέας της χαρτογράφησης. Η χρήση των UAVs στη χαρτογράφηση, αποτελεί μια οικονομική λύση τόσο για εταιρίες όσο και για ιδιώτες, οι οποίοι έχουν στόχο την αποτύπωση περιοχών και τη συχνή ανανέωση των δεδομένων τους. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου συστήματος μέτρησης, το οποίο αποτελείται από έναν αισθητήρα LiDAR (Light Detection And Ranging) χαμηλού κόστους ενσωματωμένο σε ένα UAV, προκειμένου να γίνει εφικτή η αποτύπωση του περιβάλλοντα χώρου. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δείχνουν ότι το σύστημα μέτρησης που αναπτύχθηκε είναι ικανό να αποτυπώσει τόσο εσωτερικούς, όσο και εξωτερικούς χώρους.

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Σκοπός και επιμέρους στόχοι της παρούσας διπλωματικής εργασίας.....	2
1.2 Οργάνωση της διπλωματικής εργασίας	5
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	6
2.1 Μη-επανδρωμένα εναέρια οχήματα	6
2.2 Χαρτογράφηση με χρήση UAVs.....	7
2.3 LiDAR	7
2.4 Σάρωση με χρήση Laser έναντι Φωτογραμμετρίας	8
2.4.1 Σάρωση με χρήση Laser	8
2.4.2 Φωτογραμμετρία.....	9
2.4.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των δύο μεθόδων	10
2.5 UAV Φωτογραμμετρία και Χαρτογράφηση με χρήση LiDAR	12
2.5.1 Τι είναι η UAV φωτογραμμετρία	13
2.5.2 UAV Χαρτογράφηση με χρήση LiDAR.....	13
2.5.3 Χρήση Φωτογραμμετρίας και LiDAR	14
2.6 Σχετικές εργασίες	15
2.6.1 3-Διάστατη απεικόνιση δέντρων με τη χρήση UAV φωτογραμμετρίας	15
2.6.2 3-Διάστατη απεικόνιση των καναλιών ενός ποταμού με την χρήση LiDAR και UAV – photography.....	17

2.6.3 Άλλες εργασίες.....	18
3. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ	21
3.1 Σχηματική Αναπαράσταση	21
Εικόνα 3.1: Το γενικό διάγραμμα του συστήματος μέτρησης που αναπτύχθηκε.	21
3.2 Τεχνικό Υλικό (Hardware).....	22
3.2.1 Μη-επανδρωμένο Εναέριο Όχημα (UAV)	22
3.2.2 MegaPirate Flight Controller	24
3.2.3 Raspberry Pi 2	26
3.2.4 LiDAR Hokuyo UTM-30LX-EW	27
3.2.5 Arduino UNO R3.....	29
3.2.6 Sonar HC-SR04	30
3.3 Προγράμματα, Λογισμικό και Περιβάλλον (Software)	31
3.3.1 PuTTY.....	32
3.3.2 Γλώσσα Προγραμματισμού C++	32
3.3.3 Πρωτόκολλο MAVLink	33
3.3.4 Περιβάλλον ROS.....	33
3.3.5 Περιβάλλον MATLAB	33
4. ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ	35
4.1 Εκτελέσιμο Πρόγραμμα στη C++	35
4.2 Επικοινωνία με το Raspberry Pi	35
4.3 Εκκίνηση περιβάλλοντος ROS.....	36
4.4 Εκκίνηση τμήματος λογισμικού urg_node.....	37
4.5 Επικοινωνία με τον Flight Controller.....	38

4.6	Επικοινωνία MAVLink & C++	39
4.7	Λήψη και αποθήκευση δεδομένων	39
4.8	Μετατροπή Συντεταγμένων	44
4.9	Αποτύπωση Δεδομένων	45
4.10	Απεικόνιση της διαδικασίας λήψεως μετρήσεων	46
5.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	48
5.1	Η λειτουργία του LiDAR σε απόσταση μικρότερη των 10m	48
5.2	Η λειτουργία του LiDAR σε απόσταση μεγαλύτερη των 10m.....	53
5.3	Η λειτουργία του LiDAR σε απόσταση μικρότερη των 10m με παρεμβολή εμποδίου 56	
5.4	Η λειτουργία του Sonar για τη λήψη δεδομένων σε χαμηλό ύψος	66
5.5	Έλεγχος λειτουργικότητας του συνολικού συστήματος μέτρησης που αναπτύχθηκε 70	
5.6	Ενσωμάτωση συστήματος μέτρησης στην εναέρια πλατφόρμα.....	72
5.7	Λήψη δεδομένων με την χρήση της εναέριας πλατφόρμας για εσωτερικό χώρο	73
5.8	Λήψη δεδομένων με την χρήση της εναέριας πλατφόρμας σε εξωτερικό χώρο	77
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ	82
6.1	Συμπεράσματα.....	82
6.2	Μελλοντικές επεκτάσεις	84

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	85
-----------------------------	-----------

1. Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας, σε συνδυασμό με την αναγκαιότητα για ασφαλέστερες συνθήκες εργασίας για τον άνθρωπο, κατέστησαν ακόμα πιο σημαντική τη χρήση των μη-επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (Unmanned Airborne Vehicles - UAVs). Τα UAVs είναι ιπτάμενα οχήματα χωρίς πιλότο. Η πτήση των UAVs ποικίλει σε βαθμούς αυτονομίας. Έτσι έχουμε τα πλήρως ελεγχόμενα από κάποιο χρήστη, ή τα πλήρως αυτόνομα ή ημιαυτόνομα, των οποίων ο έλεγχος γίνεται από ενσωματωμένους υπολογιστές [1]. Η χρήση τους συναντάται ολοένα και πιο συχνά και βρίσκει εφαρμογές σε διάφορους τομείς, όπως επιστημονικούς, στρατιωτικούς, εμπορικούς αλλά και ψυχαγωγικούς.

Έναν από τους τομείς αυτούς, αποτελεί και ο τομέας της χαρτογράφησης. Το κόστος που απαιτείται για την χαρτογράφηση μιας περιοχής με τη χρήση επανδρωμένου οχήματος, είναι μεγάλο, ενώ ο χρόνος που χρειάζεται για μια πλήρη αποτύπωση, εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα τόσο του τεχνικού υλικού, όσο και των πιλότων – χειριστών των οχημάτων. Σε αντίθεση με τα επανδρωμένα οχήματα, τα UAVs έχουν πολύ χαμηλότερο κόστος, καθιστώντας εφικτή την αγορά τους, τόσο από εταιρίες, όσο και από ιδιώτες. Επιπλέον, τα UAVs παρέχουν τη δυνατότητα για πολλές και συχνές λήψεις μετρήσεων, δίνοντας τη δυνατότητα για συχνή ανανέωση των δεδομένων, που έχουν ληφθεί για μια περιοχή.

Η χρήση των UAVs στη χαρτογράφηση, αποτελεί μια οικονομική λύση τόσο για εταιρίες όσο και για ιδιώτες, οι οποίοι έχουν στόχο την αποτύπωση περιοχών και τη συχνή ανανέωση των δεδομένων τους. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί από οργανισμούς χαρτογράφησης για την αποτύπωση χώρων απρόσιτων προς τον άνθρωπο, ή ακόμα και από αρχαιολογικές υπηρεσίες για την αποτύπωση

αρχαιολογικών χώρων. Σε γενικές γραμμές η χρήση των UAVs στο τομέα της χαρτογράφησης παρέχει αρκετές δυνατότητες με χαμηλό κόστος.

1.1 Σκοπός και επιμέρους στόχοι της παρούσας διπλωματικής εργασίας

Η συλλογή πληροφοριών με την χρήση των UAVs έχει ως αποτέλεσμα τη λήψη ακριβέστερων και αμεσότερων αποτελεσμάτων για τον περιβάλλοντα χώρο, καθιστώντας δυνατή και τη σάρωση δύσβατων για τον άνθρωπο περιοχών. Επίσης αποτελούν έναν οικονομικότερο και ασφαλέστερο τρόπο για την καταγραφή του χώρου, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί όσο συχνά θέλει ο χρήστης. Κύριος σκοπός λοιπόν της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός πρωτότυπου UAV για την αποτύπωση του χώρου με χρήση χαμηλού κόστους αισθητήρα τύπου LiDAR. Η ανάπτυξη του συστήματος αυτού υλοποιήθηκε σε τρεις άξονες:

1. *Διασύνδεση των επιμέρους διατάξεων μεταξύ του οχήματος και του hardware για την ορθή λειτουργία του συστήματος.* Σκοπός ήταν η ενσωμάτωση επάνω στο UAV, του ολοκληρωμένου συστήματος που είναι υπεύθυνο για την λήψη μετρήσεων. Επιπλέον, καθορίζεται ο τρόπος με τον οποίο θα γίνεται η παροχή ενέργειας στα ηλεκτρονικά κυκλώματα του συστήματος μέτρησης. Για το σκοπό αυτό γίνεται χρήση τριών μπαταριών, οι δύο απ' τις οποίες τροφοδοτούν το UAV, και η τρίτη το υπόλοιπο σύστημα μέτρησης.
2. *Υλοποίηση της επικοινωνίας μεταξύ των επιμέρους τμημάτων με τη χρήση software.* Το τμήμα αυτό αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο επικοινωνούν τα προγράμματα λογισμικού που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της πτήσης, τα οποία θα συλλέγουν και θα επεξεργάζονται κατάλληλα τη ληφθείσα πληροφορία για την τελική αποτύπωση του χώρου.
3. *Πραγματοποίηση πειραμάτων για την αξιολόγηση των μετρήσεων σε πρωτότυπο μη-επανδρωμένο εναέριο όχημα.* Στη φάση αυτή πραγματοποιήθηκε πειραματισμός για κάθε τμήμα που χρησιμοποιείται ξεχωριστά, προκειμένου να υπολογιστεί η αξιοπιστία του κάθε οργάνου, αλλά και συνολικά ώστε να γίνει αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συνολικού συστήματος.

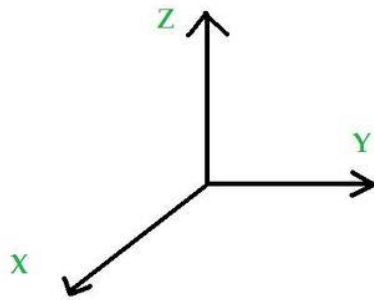
Για την επίτευξη των στόχων αυτών ενσωματώθηκε μια συσκευή LiDAR επάνω σε ένα UAV. Το LiDAR συλλέγει πληροφορίες για το επίπεδο, το υψόμετρο στο οποίο βρίσκεται και γι' αυτό με τη χρήση του UAV θα γίνει εφικτή η λήψη μετρήσεων για επίπεδα διαφορετικών υψομέτρων που θα οδηγήσουν στην τελική αποτύπωση του χώρου.

Το σύστημα που αναπτύχθηκε ακολουθεί τα εξής βήματα:

- Απογείωση και συλλογή δεδομένων, κινούμενο στον άξονα z (Εικόνα 1.1), έως ένα επιθυμητό ύψος,
- Περιστροφή του συστήματος κατά 180° και
- Προσγείωση και συλλογή δεδομένων, κινούμενο στον άξονα z.

Κατά τη διάρκεια της πτήσης, ο έλεγχος του εναέριου οχήματος γίνεται χειροκίνητα, ενώ η συλλογή δεδομένων αυτόματα. Η επεξεργασία των δεδομένων που συλλέγονται, πραγματοποιείται μετά το τέλος της κάθε πτήσης ξεχωριστά. Προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι ακριβή, θα πρέπει ο χώρος που σαρώνεται να μην απέχει απόσταση μεγαλύτερη των 30 m. Επίσης, συνίστανται ήπιες καιρικές συνθήκες, καθώς το UAV επηρεάζεται ως προς την σταθερότητα από την ύπαρξη έντασης αέρα ή βροχόπτωσης. Τέλος, θα πρέπει η ηλιακή ακτινοβολία να μην προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια της συσκευής LiDAR, διότι αλλοιώνει τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Το σύστημα παρέχει τη δυνατότητα σάρωσης τόσο εσωτερικών, όσο και εξωτερικών χώρων, με μόνη διαφορά τη χρήση Sonar, όταν πρόκειται για εσωτερικούς χώρους χαμηλού υψομέτρου.

Το σύστημα λήψεως μετρήσεων για την αποτύπωση χώρου, ενσωματωμένο σε εναέριο πλατφόρμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ευρέως σε αρκετούς τομείς. Βρίσκει εφαρμογή στη μελέτη της γεωμορφολογίας μετά από έντονα φυσικά φαινόμενα (όπως πχ. σεισμοί και κατολισθήσεις), καθώς και στη βιομηχανία για τεχνικά έργα, σήραγγες, ορυχεία και φράγματα. Επίσης, είναι χρήσιμο στην μελέτη μνημείων και σπηλαίων, καθώς και σε εκσκαφές ή ανασκαφές. Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη σάρωση γεωργικών και δασικών εκτάσεων.



Εικόνα 1.1: Απεικόνιση αξόνων x-y-z

(πηγή: <http://math.stackexchange.com/questions/311500/why-do-we-draw-the-xyz-coordinate-system-like-this>).

1.2 Οργάνωση της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από έξι ενότητες. Στη δεύτερη ενότητα παρουσιάζεται η βιβλιογραφία από την οποία αντλήθηκαν πληροφορίες για την διεκπεραίωση του τελικού στόχου (3-διάστατη αποτύπωση χώρου), καθώς και σχετικές εργασίες που έχουν γίνει με τη χρήση αισθητήρα LiDAR σε UAV. Στην τρίτη ενότητα, θα παρουσιαστεί η αρχιτεκτονική του συστήματος που αναπτύχθηκε. Στην τέταρτη ενότητα, θα αναλυθεί η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ενώ στην πέμπτη θα παρουσιαστούν τα πειράματα που διεξήχθησαν, καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Τέλος, στην έκτη ενότητα θα αναφερθούν τα συμπεράσματα στα οποία οδηγηθήκαμε, καθώς και μελλοντικές αλλαγές-προσθήκες που μπορούν να πραγματοποιηθούν για τη βελτίωση της ολικής συμπεριφοράς του συστήματος.

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Μη-επανδρωμένα εναέρια οχήματα

Τα μη επανδρωμένα οχήματα, γνωστά και ως UAVs, είναι αεροσκάφη χωρίς πιλότο. Η πτήση τους ποικίλει σε διάφορους βαθμούς αυτονομίας. Έτσι είτε χειρίζονται από κάποιο άτομο, είτε είναι πλήρως αυτόνομα και ο έλεγχος τους γίνεται από ενσωματωμένους υπολογιστές. Συγκριτικά με τα επανδρωμένα οχήματα, η χρήση τους προτιμάται σε αποστολές επαναλαμβανόμενες ή επικίνδυνες για τον άνθρωπο [1].

Η κατηγοριοποίηση τους - σύμφωνα με το τμήμα γεωγραφίας του Πανεπιστημίου Pennstate [2] και με βάση τα στοιχεία που τους παρέχει το Υπουργείο Άμυνας των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής [3] - ποικίλλει ανάλογα με το μέγεθος, την απόσταση που δύνανται να πετάξουν, καθώς και την διάρκεια της μπαταρίας που έχουν ενσωματωμένη.

Ειδικότερα, με βάση το μέγεθος, τα UAVs κατατάσσονται σε πολύ μικρά (30 - 50 cm), μικρά (50 cm – 2 m), μεσαίας κατηγορίας (5 – 10 m) ή μεγάλα (> 10 m). Τα μικρού μεγέθους συνήθως έχουν βάρος 0-25 kg, ενώ τα μεγαλύτερα ενδέχεται να υπερβούν και τα 500 kg. Το μέγεθος των UAVs καθορίζει συνήθως και το πόσο ψηλά έχει τη δυνατότητα να πετάξει το όχημα αλλά και κάτω από ποιες συνθήκες αντίστασης αέρα μπορεί να αντεπεξέλθει. Επομένως, τα μικρότερα UAVs δεν ξεπερνούν τα 365 m από το έδαφος και δεν ταξιδεύουν σε ταχύτητες αέρα μεγαλύτερες των 100 knots. Τα μεσαίου μεγέθους, από την άλλη, φτάνουν τα 1000 m ύψος πτήσης και αντεπεξέρχονται σε αντιστάσεις αέρα έως και 250 knots. Τέλος, τα μεγάλα ξεπερνούν σε ύψος τα 5500 m και ταξιδεύουν σε οποιεσδήποτε συνθήκες αντίστασης αέρα.

Τα UAVs κατατάσσονται, επιπρόσθετα, σε κατηγορίες με βάση την απόσταση πτήσης αλλά και τον χρόνο που δύνανται να ταξιδέψουν. Η μικρότερη κατηγορία είναι αυτή των UAVs χαμηλού κόστους και μικρής απόστασης, τα οποία ταξιδεύουν έως 5 km και η μπαταρία τους διαρκεί περίπου 20 έως 45 λεπτά. Υπάρχει ακόμη η

κατηγορία των UAV κοντινών αποστάσεων με εύρος πτήσης έως 50 km και διάρκεια της μπαταρίας από 1 έως 6 ώρες. Στη συνέχεια, συναντώνται τα UAV μικρών αποστάσεων με εύρος πτήσης μέχρι και 150 km και αντοχή της μπαταρίας από 8 έως και 12 ώρες. Τα UAVs κοντινών και μικρών αποστάσεων χρησιμοποιούνται από το στρατό συνήθως για αποστολές παρακολούθησης και αναγνώρισης. Έπειτα, υπάρχουν τα UAVs μεσαίας απόστασης, τα οποία είναι εξαιρετικά γρήγορα και έχουν εύρος πτήσης έως και 650 km τα οποία χρησιμοποιούνται τόσο για παρακολούθηση όσο και για συλλογή μετεωρολογικών δεδομένων. Τέλος, συναντώνται τα UAVs αντοχής τα οποία έχουν διάρκεια πτήσης έως και 36 ώρες με εμβέλεια 300 km και ύψος πτήσης που αγγίζει τα 9 km.

2.2 Χαρτογράφηση με χρήση UAVs

Η χρήση των UAVs αξιοποιείται επιτυχώς στον τομέα της χαρτογράφησης. Με την ενσωμάτωση ελαφρών φωτογραφικών μηχανών πάνω σε UAVs και τη συμβολή του GPS, καθίσταται δυνατή η συγκέντρωση πληροφορίας για μία περιοχή [4]. Η λήψη φωτογραφιών γίνεται σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα. Μετά την προσγείωση, ειδικοί επεξεργάζονται τις φωτογραφίες και λαμβάνοντας υπόψη την κλίμακα μέτρησης και τις σωστές γεωγραφικές συντεταγμένες σχηματίζουν εντέλει μια ολοκληρωμένη εικόνα της περιοχής.

Το γεγονός ότι δεν απαιτείται μετάδοση πληροφορίας σε πραγματικό χρόνο διευκολύνει το έργο των UAVs, καθώς δεν επιβαρύνονται με επιπλέον εξοπλισμό για την άμεση μετάδοση πληροφορίας. Κατά αυτό τον τρόπο τα UAVs παρέχουν μια πιο οικονομική λύση για χαρτογράφηση περιοχών, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν και από τις τοπικές αρχές χωρίς να εξαρτώνται από μεγάλες υπηρεσίες χαρτογράφησης.

2.3 LiDAR

Η τεχνική LiDAR (Light Detection And Ranging) αποτελεί μία πρωτοποριακή και ισχυρή μέθοδο παρατήρησης και αποτύπωσης του χώρου. Ο τρόπος λειτουργίας της τεχνικής αυτής στηρίζεται στην εκπομπή παλμών ακτινοβολίας laser στην ατμόσφαιρα και έπειτα στη συλλογή της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας. Η εν λόγω

ακτινοβολία συγκεντρώνεται σε ένα οπτικό τηλεσκόπιο από όπου μεταφέρεται στο σύστημα συλλογής δεδομένων που καταγράφει και αναλύει τα σήματα LiDAR. Με τη χρήση της τεχνικής αυτής εντοπίζονται και αποτυπώνονται τα εμπόδια-αντικείμενα στα οποία προσπίπτουν οι παλμοί ακτινοβολίας [5]. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται αποκλειστικά από τα laser scanners, τα οποία αποτελούν όργανα εκπομπής παλμών ακτινοβολίας laser, προκειμένου να καθορίσουν τις αποστάσεις των αντικειμένων που βρίσκονται γύρω τους και χρησιμοποιούνται συχνά σε περιπτώσεις αποτύπωσης σχημάτων κάποιου αντικειμένου, κτιρίου ή ακόμα και τοποθεσίας.

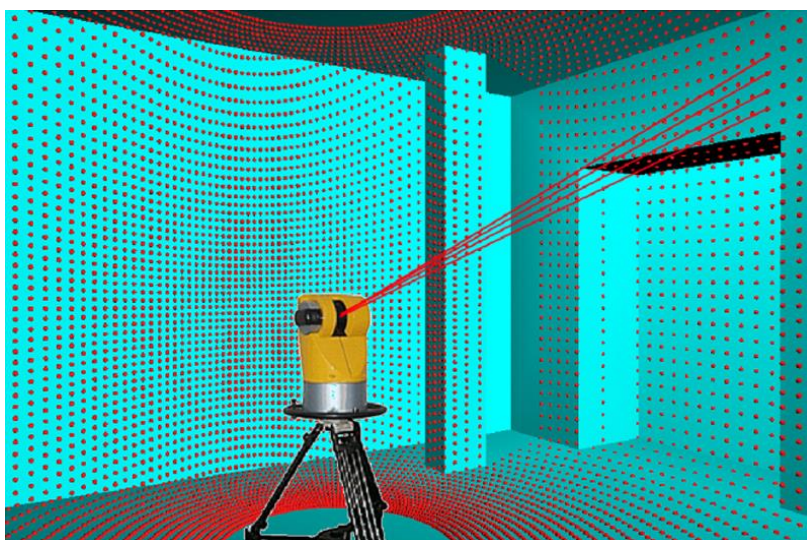
2.4 Σάρωση με χρήση Laser έναντι Φωτογραμμετρίας

Για την 3-διάστατη απεικόνιση ενός χώρου είναι αναγκαίο να γνωρίζει κανείς ποια μέθοδος είναι η καλύτερη, αφού λάβει υπ' όψη διάφορους παράγοντες. Τέτοιοι παράγοντες είναι η ακρίβεια, ο χώρος, ο χρόνος, το μέγεθος του αντικειμένου ή του χώρου, αλλά φυσικά και το κόστος. Σύμφωνα με το [6], για την 3-διάστατη απεικόνιση, δύο μέθοδοι έχουν τον κύριο λόγο: η χρήση laser για σάρωση (laser scanning) και η φωτογραμμετρία.

2.4.1 Σάρωση με χρήση Laser

Η σάρωση με τη χρήση laser είναι η πρώτη μέθοδος που χρησιμοποιείται, εδώ και μερικές δεκαετίες για την αποτύπωση του χώρου. Μετά από χρόνια πειραμάτων και βελτιώσεων, τα αποτελέσματα στους τομείς των κατασκευών, της αρχιτεκτονικής και της μηχανικής είναι εκπληκτικά ως προς την ακρίβεια και την ταχύτητα. Με τη χρήση των υπολογιστών, γίνεται επεξεργασία δεδομένων μεγάλου μεγέθους. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας επιστρέφονται σε μορφή point clouds (σύννεφα σημείων), τα οποία ουσιαστικά αναπαριστούν το χώρο με μορφή σημείων.

Η μέθοδος αυτή λειτουργεί με την αποστολή χιλιάδων παλμών οπτικής ακτινοβολίας και τη μέτρηση της απόστασης μεταξύ των τοποθεσιών και των αντικειμένων στα οποία προσπίπτει η οπτική ακτινοβολία, κάνοντας χρήση κάποιου laser scanner (Εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1: Μέθοδος Laser Scanning (πηγή:

<http://www.spatialhumanities.de/en/ibr/technology/terrestrial-laserscanning.html>).

2.4.2 Φωτογραμμετρία

Η δεύτερη μέθοδος είναι αυτή της φωτογραμμετρίας. Η μέθοδος αυτή προϋπήρχε της σάρωσης με laser για μεγάλο διάστημα. Με την απλή γνώση της τοποθεσίας όπου έχει ληφθεί η φωτογραφία και το μέγεθος του αντικειμένου που μελετάται – αποτυπώνεται, μπορεί με τη μέθοδο του τριγωνισμού να γίνει υπολογισμός της θέσης και του μεγέθους του αντικειμένου.

Η ψηφιακή φωτογραμμετρία λειτουργεί με τη λήψη φωτογραφιών του αντικειμένου ή του χώρου από πολλές και διαφορετικές τοποθεσίες (Εικόνα 2.2) με τη χρήση ψηφιακών καμερών ή ακόμα και smartphones. Έπειτα, γίνεται επεξεργασία των εικόνων αυτών με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού, ώστε να καθοριστούν οι ακριβείς τοποθεσίες από τις οποίες έγινε η λήψη των φωτογραφιών. Όταν υπολογιστούν οι τοποθεσίες, εξειδικευμένο λογισμικό ελέγχει για κοινά σημεία μεταξύ δύο ή και περισσότερων φωτογραφιών, ώστε να καθοριστεί που υπάρχουν τα αντικείμενα στον 3-διάστατο χώρο.



Εικόνα 2.2: Μέθοδος Φωτογραμμετρίας

(πηγή: <http://home.lagoa.com/2014/04/whats-the-right-3d-scanner-for-you/>).

2.4.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των δύο μεθόδων

Εφόσον υπάρχει η δυνατότητα πραγματοποίησης μιας μέτρησης και με τους δύο τρόπους, καλό είναι να γίνει αρχικά έλεγχος του διαθέσιμου υλικού και έπειτα η κατάλληλη επιλογή του τρόπου που θα χρησιμοποιηθεί ανάλογα πάντα με τις ανάγκες της αποτύπωσης. Παρακάτω παρουσιάζονται τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των δύο μεθόδων [6]:

Σάρωση με χρήση Laser

Πλεονεκτήματα

- Υψηλή ακρίβεια σε βαθμό $\frac{1}{4}$ της μοίρας στις περισσότερες συσκευές
- Ακρίβεια σε μεγάλες περιοχές
- Ο ρυθμός σφάλματος μπορεί να διορθωθεί, αναλόγως των δυνατοτήτων του εξοπλισμού
- Χρήση αυτοματοποιημένων διαδικασιών, μόλις αρχίσει η σάρωση, με πολύ μικρές πιθανότητες παρουσίας σφάλματος από τον χρήστη
- Λιγότερος χρόνος πειραμάτων – μετρήσεων
- Δυνατότητα χρήσης λογισμικού αυτόματης δημιουργίας σύννεφων από σημεία (point clouds)

Μειονεκτήματα

- Ο εξοπλισμός ενδέχεται να κοστίζει ακριβά
- Συνήθως απαιτείται η αναβάθμιση του τεχνικού υλικού προκειμένου να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις της αποτύπωσης
- Εμφανίζονται θολά σύννεφα σημείων σε επιφάνειες υψηλής ευκρίνειας ή σε ανακλαστικές επιφάνειες

Φωτογραμμετρία

Πλεονεκτήματα

- Πολύ φθηνός εξοπλισμός
- Γίνονται περισσότερες αναβαθμίσεις στο λειτουργικό σύστημα, οπότε και δεν χρειάζεται καινούριος εξοπλισμός για να αντεπεξέλθει στις απαιτήσεις της αποτύπωσης
- Καλύτερη οπτική αναπαράσταση σε επιφάνειες υφής (textures)

Μειονεκτήματα

- Η ακρίβεια είναι μικρότερη από τις συσκευές laser σε μεγάλο χώρο
- Περιορισμοί ανάλυσης λόγω των φακών που χρησιμοποιούν οι κάμερες προκειμένου να διατηρήσουν την διαύγεια των αντικειμένων σε μεγάλες αποστάσεις
- Λιγότερες αυτοματοποιημένες διαδικασίες οδηγούν σε μεγαλύτερα σφάλματα μέτρησης. Καθώς γίνεται μεγαλύτερη επεξεργασία δεδομένων από τον χρήστη, απαιτείται μεγάλη εξειδίκευση για μικρότερα σφάλματα
- Απαιτείται περισσότερος χρόνος για να ληφθούν οι μετρήσεις στον χώρο
- Περιορισμένο λογισμικό για εξαγωγή δεδομένων
- Λάθη κατά την αποτύπωση ανακλαστικών – διάφανων επιφανειών

2.5 UAV Φωτογραμμετρία και Χαρτογράφηση με χρήση LiDAR

Σύμφωνα με το [7], η χρήση των μεθόδων φωτογραμμετρίας με τη βοήθεια UAVs και της μεθόδου LiDAR γίνεται όλο και πιο συχνή. Αυτό δεν αποτελεί έκπληξη, καθώς η ενσωμάτωση GPS σε UAVs καθιστά εφικτή την σάρωση περιοχών πολύ φθηνότερα, συγκριτικά με την χρήση κάποιου αεροσκάφους, που έχει

ενσωματωμένο τον απαραίτητο εξοπλισμό για την φωτογραμμετρία. Με αυτόν τον τρόπο, γίνεται δυνατή η σάρωση μεγάλων περιοχών με το ελάχιστο δυνατό κόστος.

2.5.1 Τι είναι η UAV φωτογραμμετρία

Η δημιουργία 3-διάστατων χαρτών με την χρήση της αέριας φωτογραμμετρίας, επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση της κάμερας στο UAV, με προσανατολισμό, συνήθως, κάθετα προς το έδαφος. Σε περιπτώσεις 3-διάστατης αποτύπωσης μνημείων ή αγαλμάτων, η κάμερα τοποθετείται οριζόντια στο UAV.

Στη μέθοδο αυτή, λαμβάνονται πολλαπλές επικαλυπτόμενες φωτογραφίες (80 έως 90% επικάλυψης) του εδάφους ή του μοντέλου από το UAV, σε σημεία αναφοράς τα οποία βρίσκονται πάνω σε μια προκαθορισμένη πορεία που ακολουθεί το UAV. Η πτήση είναι αυτόνομη, καθώς δεν θα ήταν δυνατή η επίτευξη τόσο υψηλών επίπεδων επικάλυψης σε αντίθετη περίπτωση. Το γεγονός αυτό είναι που καθιστά τελικώς απαραίτητη τη χρήση του UAV.

2.5.2 UAV Χαρτογράφηση με χρήση LiDAR

Η μέθοδος UAV LiDAR απαιτεί την τοποθέτηση ενός laser scanner στο UAV, προκειμένου να γίνει η μέτρηση του ύψους σε τοπία κάτω από το UAV. Οι συσκευές LiDAR δύνανται να σαρώσουν εκατοντάδες τετραγωνικά χιλιόμετρα στη διάρκεια μιας ημέρας. Με τη μέτρηση 10 - 80 σημείων ανά τετραγωνικό μέτρο, μπορεί να γίνει εφικτή η δημιουργία ενός λεπτομερούς ψηφιακού μοντέλου του τοπίου. Η ακρίβεια των μετρήσεων επιτρέπει τη δημιουργία 3-διάστατων μοντέλων που αξιοποιούνται στον σχεδιασμό και τη λήψη αποφάσεων σε διάφορες εργασίες. Τέλος, οι αισθητήρες LiDAR μπορούν να διαπεράσουν την πυκνή βλάστηση, καθιστώντας εφικτή την σάρωση της δομής του εδάφους, πράγμα αδύνατο από δορυφόρο.

2.5.3 Χρήση Φωτογραμμετρίας και LiDAR

Η χρήση της φωτογραμμετρίας και της μεθόδου LiDAR σε UAV έχει τη δυνατότητα να προσφέρει πληροφορίες για τη δημιουργία μοντέλων σε αρκετούς τομείς. Ειδικότερα, εφαρμόζεται σε:

- Μοντέλα εδάφους: DEM (Digital Elevation Model), για την υψομετρική απεικόνιση κάποιας επιφάνειας, DSM (Digital Surface Model) και DTM (Digital Terrain Model), για την 3-διάστατη απεικόνιση μιας περιοχής.
- Ορθοφωτογραφία (γεωμορφολογικά διορθωμένες εναέριες εικόνες).
- 3-διάστατα μοντέλα κτιρίων.
- Δημιουργία χαρτών με περιγράμματα.
- Δημιουργία χαρτών με στοιχεία σχετικά με τις άκρες δρόμων και τα ύψη τους, τις πινακίδες, αποτυπώματα κτιρίων, κ.α.
- 3-διάστατη αποτύπωση βλάστησης.
- 3-διάστατες αποτυπώσεις ερευνών.

Ακολουθούν ορισμένα σημαντικά παραδείγματα χρήσης της μεθόδου LiDAR και φωτογραμμετρίας. Όλες οι εφαρμογές που θα αναφερθούν, επωφελούνται από την ακρίβεια της 3-διάστατης αναπαράστασης χώρου που προσφέρουν οι παραπάνω δύο μέθοδοι. Επίσης, επωφελούνται ως προς την ακρίβεια και το συνολικό κόστος συγκριτικά με τη χρήση κάποιου αεροσκάφους. Τέτοια παραδείγματα είναι τα εξής:

- Διαχείριση δασών και αναδάσωση.
- Μοντελοποίηση πλημμύρας.
- Μοντελοποίηση ρύπων.
- Χαρτογράφηση.
- Πολεοδομία.
- Διαχείριση ακτογραμμών.
- Σχεδιασμός μεταφορών.
- Εξερεύνηση για πετρέλαιο και αέριο.
- Εξερευνήσεις ορυχείων και υπολογισμός διαθεσιμότητας ορυκτών πόρων.
- Αρχαιολογία.
- Σχεδιασμός δικτύων κινητής τηλεφωνίας.

2.6 Σχετικές εργασίες

Στο Υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται εν συντομία εργασίες, στις οποίες έγινε χρήση των μεθόδων της φωτογραμμετρίας και του laser scanning, με ενσωμάτωση τους σε UAV.

2.6.1 3-Διάστατη απεικόνιση δέντρων με τη χρήση UAV φωτογραμμετρίας

Στόχος της εργασίας, που πραγματοποιήθηκε από τους Fritz, Kattenborn και Koch [8], ήταν η 3-διάστατη απεικόνιση της θέσης των δέντρων (βελανιδιές) που υπήρχαν σε μια πειραματική περιοχή στο Freiburg της Γερμανίας. Ελήφθησαν περισσότερες από 1000 φωτογραφίες, σε πτήσεις που έγιναν στο ύψος των 55 μέτρων με κάμερα ανάλυσης 16.6 Megapixel, σε περίοδο που τα δέντρα δεν είχαν φύλλα. Οι φωτογραφίες πάρθηκαν από προκαθορισμένα σημεία για τον υπολογισμό των πραγματικών θέσεων των δέντρων, με τη χρήση της μεθόδου SFM (structure from motion). Έπειτα, τα συμπεράσματα συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα της μεθόδου

TLS (terrestrial laser scanner) για την ίδια περιοχή. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την επεξεργασία των εικόνων από το UAV ήταν τα εξής:

1. καθαρισμός των δεδομένων: απομάκρυνση των θολών σημείων
2. προσθήκη του SIFT operator [9]
3. ταυτοποίηση εικόνων
4. διόρθωση των ορίων
5. ομαδοποίηση
6. ανακατασκευή πυκνότητας

Η έρευνα έδειξε ότι η μέθοδος SFM (Εικόνα 2.3) ήταν λιγότερο ακριβής έναντι της TLS, καθώς μόνο μερικοί κορμοί αναπαραστάθηκαν πλήρως.



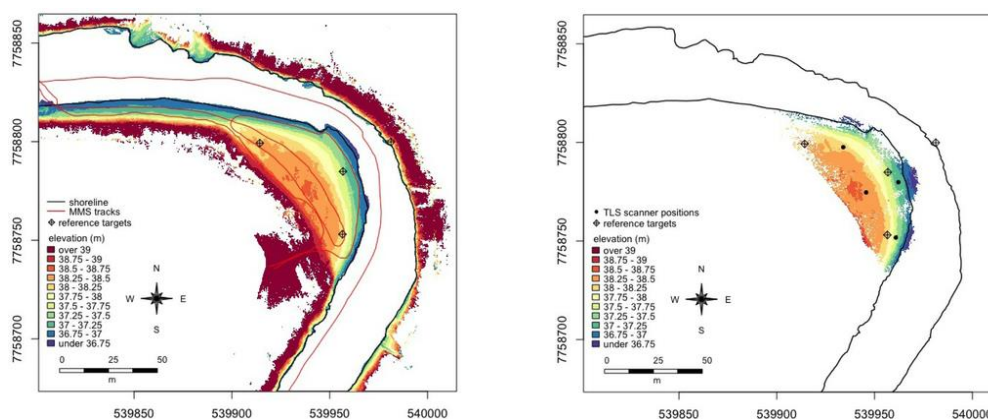
Εικόνα 2.3: Αναπαράσταση με την χρήση SFM-point cloud

(πηγή: <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-1-W2/141/2013/isprsarchives-XL-1-W2-141-2013.pdf>).

2.6.2 3-Διάστατη απεικόνιση των καναλιών ενός ποταμού με την χρήση LiDAR και UAV – photography

Σκοπός της εργασίας [10] ήταν η απεικόνιση των καναλιών ενός ποταμού με τη μέθοδο DTM (digital terrain model) καθώς και των περιοχών που πλημμυρίζουν. Έγινε χρήση κινητής σάρωσης με laser και φωτογραφίες από UAV σε χαμηλό ύψος πτήσης, για τη δημιουργία ψηφιακού βαθυμετρικού μοντέλου του καναλιού που πλημμυρίζει καθώς και ψηφιακό μοντέλο DTM ενός ελικοειδούς ποταμού. Αξιολογήθηκε η σάρωση laser και της UAV φωτογραμμετρίας έναντι επίγειων laser σαρώσεων και συνδυάστηκαν τα στοιχεία και των δύο μεθόδων για τη δημιουργία μοντέλων DTM για δύο διαφορετικές περιόδους μετρήσεων. Τέλος, έγινε σύγκριση των δύο μοντέλων για τον εντοπισμό αλλαγών στην περιοχή κατά τη διάρκεια ενός χρόνου. Οι μετρήσεις έγιναν για τον ποταμό Pulmanki βόρεια της Φινλανδίας.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την συλλογή δεδομένων ήταν το ROAMER, ένα κινητό σύστημα χαρτογράφησης του Φινλανδικού Ιδρύματος Γεωδαισίας, το οποίο έχει ενσωματωμένη συσκευή laser σάρωσης. Έπειτα, συνδυάστηκαν οι μετρήσεις που ελήφθησαν από το ROAMER με τις φωτογραφίες που ελήφθησαν από ένα UAV κατά τη διάρκεια χαμηλής πτήσης, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα βαθυμετρικό μοντέλο του ποταμού (Εικόνα 2.4).



Εικόνα 2.4: Απεικόνιση ποταμού με χρήση Mobile LiDAR (αριστερά) και TLS (δεξιά)

(πηγή: <http://www.mdpi.com/2072-4292/5/12/6382/htm>).

2.6.3 Άλλες εργασίες

Στην Παράγραφο αυτή, παρατίθενται συνοπτικά μερικές ακόμα εργασίες που έχουν γίνει, στις οποίες χρησιμοποιείται η μέθοδος LiDAR με τη βοήθεια UAV.

Αρχικώς, έχουν γίνει έρευνες όσον αφορά την προστασία του περιβάλλοντος και του θαλάσσιου χώρου, κάνοντας χρήση της μεθόδου LiDAR. Έτσι, στην εργασία [11] παρουσιάζεται η παρακολούθηση φυτοπλαγκτόν και οργανικής ύλης στις θάλασσες της Ευρώπης με τη χρήση LiDAR, συμπεραίνοντας ότι το LiDAR μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μελέτες, τόσο στη θάλασσα, όσο και σε παράκτιες περιοχές. Σε άλλη εργασία στην Ισλανδία [12], χαρτογραφήθηκε η επιφάνεια του Snaefellsjokull με τη χρήση LiDAR σε UAV. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με μια προηγούμενη σάρωση, που πραγματοποιήθηκε το 1999, δείχνοντας ότι η επιφάνεια πάγου μειώθηκε κατά 14 m περίπου, σε διάστημα 9 χρόνων. Το 2011 [13] κατασκευάστηκε ένα υδρογραφικό laser scanner, το οποίο εκπέμπει σε μεγαλύτερη συχνότητα από τα κοινά βαθυμετρικά συστήματα LiDAR. Η συσκευή αυτή χρησιμοποιήθηκε για τη σάρωση ρηχών υδάτων, όταν στο νερό δεν επικρατούσαν διαταραχές. Ωστόσο, η συσκευή αυτή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ποταμούς μεγάλου πλάτους. Στο [14] παρουσιάζεται η εργασία που έγινε το 1991, για τη

συλλογή πληροφορίας σχετικά με τη συγκέντρωση του όζοντος στη λίμνη του Michigan. Για το σκοπό αυτό, ενσωματώθηκε συσκευή LiDAR σε UAV, η οποία μετρούσε τη συγκέντρωση του όζοντος στον αέρα.

Επιπλέον, η μέθοδος LiDAR έχει χρησιμοποιηθεί και σε περιπτώσεις σεισμογενών περιοχών. Το 2000 η πόλη του Seattle και η περιοχή Puget Sound τέθηκαν υπό 5-ετή έρευνα λόγω πιθανού, αλλά αβέβαιου σεισμικού κινδύνου. Για την σάρωση των περιοχών και την εύρεση εδαφικών ανωμαλιών χρησιμοποιήθηκε LiDAR. Τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής [15] μπορούν να χρησιμοποιηθούν για υδρολογικά μοντέλα, παραποτάμιας περιοχές και μελέτες για πλημμύρες. Σε άλλη εργασία [16], μελετώνται οι εδαφικές ανωμαλίες που παρουσιάζονται σε ορεινές δασικές περιοχές στις Άλπεις της Σλοβενίας. Τα αποτελέσματα παρουσίασαν δύο μεγάλες εδαφικές ανωμαλίες στην περιοχή.

Ωστόσο, η ενσωμάτωση LiDAR σε UAV βρίσκει εφαρμογή και σε περιπτώσεις αστικών περιοχών. Στην εργασία [17] γίνεται αξιολόγηση της ικανότητας της μεθόδου LiDAR όσον αφορά την καταγραφή δρόμων και τον προσδιορισμό κατάλληλων μονοπατιών για την διευκόλυνση της συγκομιδής γεωργικών προϊόντων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση του LiDAR ήταν ικανοποιητική, εκτός από μερικές περιπτώσεις, στις οποίες η βλάστηση ήταν πολύ έντονη και το LiDAR δεν μπορούσε να διεισδύσει σε βαθύτερα επίπεδα. Σε άλλη εργασία [18], γίνεται ανακατασκευή προσόψεων κτιρίων με τη χρήση 3d point clouds (σύννεφα σημείων) από κινούμενη συσκευή laser, η οποία σαρώνει κτίρια με τραχιές επιφάνειες. Στο [19] στόχος είναι η χαρτογράφηση αστικών περιοχών σε σημεία μη προσβάσιμα από εναέρια οχήματα. Σε αυτό βοήθησε η κατασκευή του 'StreetMapper', που είναι επίγειο όχημα στο οποίο έχουν ενσωματωθεί 2 συσκευές LiDAR, καθώς και υψηλής ποιότητας GNSS σύστημα πλοήγησης.

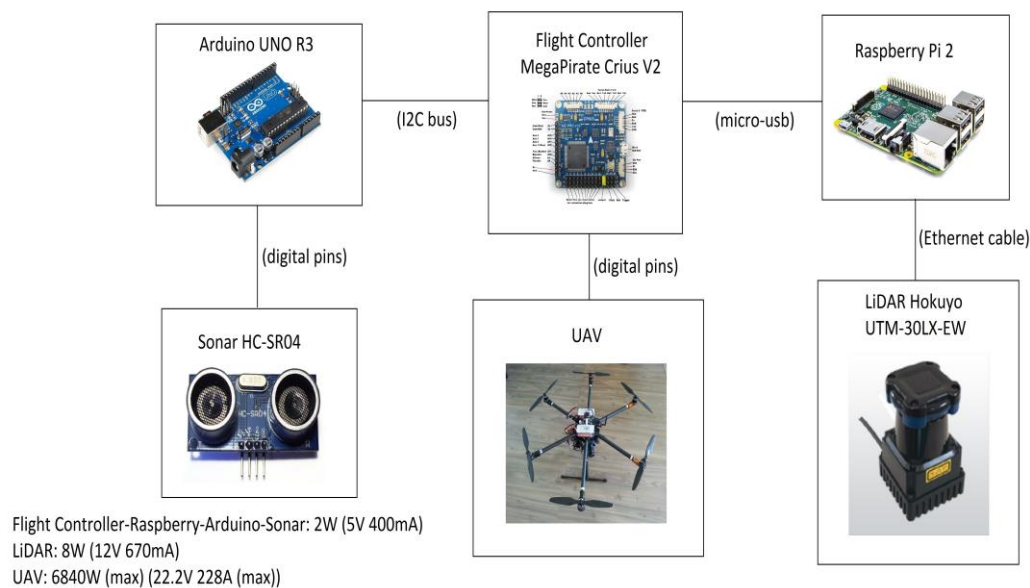
Εφαρμογή του LiDAR όμως έχουμε και σε άλλους τομείς. Το 2005 κατασκευάστηκε το Litemapper-5600, το οποίο είναι σύστημα LiDAR ενσωματωμένο σε UAV [20]. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του συστήματος αυτού είναι η ψηφιοποίηση της κάθε μέτρησης. Τα αποτελέσματα των δοκιμών του Litemapper-5600 έδειξαν ότι είναι το ίδιο αξιόπιστο όσο και τα απλά συστήματα LiDAR, ενώ προσφέρει δυνατότητα μεγαλύτερης ακρίβειας και πιο ανεπτυγμένη ανάλυση επιφάνειας. Τέλος στο [21] παρουσιάζεται η έρευνα που διεξήχθη το 2013 στην

περιοχή του Mayapan στο Μεξικό, για την αποτύπωση αρχαιολογικής περιοχής, η οποία καλυπτόταν από χαμηλή βλάστηση. Για την έρευνα αυτή, χρησιμοποιήθηκε high-density LiDAR. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με προηγούμενες χαρτογραφήσεις, καθώς και με παραδοσιακές αρχαιολογικές μεθόδους έρευνας.

3. Το σύστημα μέτρησης που αναπτύχθηκε

3.1 Σχηματική Αναπαράσταση

Ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται όλα τα τμήματα τόσο του τεχνικού υλικού όσο και του λογισμικού που χρησιμοποιείται φαίνεται στην Εικόνα 3.1. Σημειώνεται ότι η MATLAB δεν αναπαρίσταται, καθώς η απεικόνιση των τελικών συντεταγμένων δεν απαιτεί την άμεση επικοινωνία με το συνολικό σύστημα.



Εικόνα 3.1: Το γενικό διάγραμμα του συστήματος μέτρησης που αναπτύχθηκε.

3.2 Τεχνικό Υλικό (Hardware)

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η 3-διάστατη αποτύπωση του χώρου με τη χρήση μη επανδρωμένης εναέριας πλατφόρμας (UAV). Σκοπός του Κεφαλαίου αυτού είναι η παρουσίαση του υλικού που χρησιμοποιήθηκε για την επιτυχή λειτουργία του συνολικού συστήματος μέτρησης.

Το υλικό (hardware) του συστήματος που αναπτύχθηκε αποτελείται από ένα μη επανδρωμένο όχημα (UAV), πάνω στο οποίο θα τοποθετηθούν όλα τα κομμάτια που θα χρησιμοποιηθούν, ένας Flight Controller MegaPirate Crius (τόσο για τον χειρισμό του UAV αλλά και για την συλλογή πληροφοριών που χρειαζόμαστε), ένα Raspberry Pi 2, όπου θα γίνεται η συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων, το LiDAR Hokuyo UTM-30LX-EW, με το οποίο θα λαμβάνεται η κρίσιμη πληροφορία για την κατανομή του χώρου που περιβάλλει το σύστημα, ένα Sonar HC-SR04, για την ακριβή μέτρηση του υψομέτρου στο οποίο βρίσκεται το UAV και τέλος ένα Arduino UNO R3, το οποίο καθιστά εφικτή την επικοινωνία με το Sonar.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των υποσυστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν και τεκμηριώνεται η επιλογή τους για την εφαρμογή που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

3.2.1 Μη-επανδρωμένο Εναέριο Όχημα (UAV)

Το UAV που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί στις μετρήσεις είναι ένα εξακόπτερο, το οποίο κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο του SenseLab, του τμήματος Μηχ.Ο.Π στο Πολυτεχνείο Κρήτης (Εικόνα 3.2). Ο κύριος λόγος που επιλέχθηκε το συγκεκριμένο UAV είναι πως αποτελεί μια αξιόπιστη επιλογή για την σταθερή λήψη των δεδομένων, παράγοντας σημαντικός για όσο το δυνατόν καλύτερες μετρήσεις και αποτελέσματα. Επιπλέον, όταν γίνεται αναφορά για αποτύπωση εξωτερικού χώρου, το συγκεκριμένο UAV παρέχει σταθερότητα και σε περιπτώσεις μερικής αντίστασης αέρα. Τέλος, έχει τη δυνατότητα να φτάσει σε αρκετά μεγάλο υψόμετρο (έως και 100 m), παρέχοντας πληροφορία από σαρώσεις για μεγάλες επιφάνειες, ενώ η διάρκεια της πτήσης του φτάνει έως και τα 45 λεπτά.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του συγκεκριμένου εξακόπτερου είναι ο ακόλουθος. Ο κύριος σκελετός είναι ο Tarot T810A [22], ο οποίος είναι κατασκευασμένος από ανθρακόνημα, που τον κάνει αρκετά ανθεκτικό και στον οποίο μπορεί να ενσωματωθεί Gimbal. Στο Gimbal μπορεί να ενσωματωθεί GoPro Camera, η χρήση της οποίας θα παρείχε ακόμα καλύτερα αποτελέσματα αν συνδυαζόταν με τη συσκευή LiDAR, ενώ ζυγίζει μόλις 1020 g. Η στήριξη του εξακόπτερου στηρίζεται σε 2 πόδια Tarot TL65B44 Retractable Landing Skid Gear [23], τα οποία ζυγίζουν μόλις 78 g το καθένα. Τα μοτέρ που χρησιμοποιήθηκαν είναι 6 Tiger Motor Navigation Series MN3520 [24], τα οποία ζυγίζουν 194 g και απαιτούν ρεύμα 20 A, ενώ παρέχουν 7100 RPM. Τέλος, έχει 6 προπέλες διαμέτρου 12 ιντσών από ανθρακόνημα, 3 αριστερόστροφες και 3 δεξιόστροφες, και 3 μπαταρίες χωρητικότητας 10000 mAh και τύπου Lipo Battery, για την τροφοδοσία ολόκληρου του οχήματος και του επιμέρους εξοπλισμού.

Τα επιπλέον εργαλεία που είναι ενσωματωμένα για την επικοινωνία με τον χρήστη ή για μια αυτόνομη πτήση είναι τα ακόλουθα: ένας αναμεταδότης Futaba FUTK6110 6K 6 Channel 2.4 GHz, ο οποίος καθιστά εφικτή την επικοινωνία με το χειριστήριο Futaba R3006SB [25] στην περίπτωση χειροκίνητου ελέγχου του UAV. Η συσκευή του συστήματος που είναι υπεύθυνη για την συλλογή δεδομένων από απόσταση, είναι η 433MHz 3DR Telemetry [26], ενώ ο Flight Controller που χρησιμοποιείται είναι ο MegaPirate Crius V2, ο οποίος αναλύεται παρακάτω. Τέλος, στο εξακόπτερο είναι ενσωματωμένο το σύστημα Ublox GPS/MAG Module [27] για προσανατολισμό και εντοπισμό της θέσης και τέλος 6 μονάδες του τύπου 40A Electronic Speed Controller [28], τα οποία είναι ηλεκτρονικά κυκλώματα, με κύρια λειτουργία την μεταβολή της ταχύτητας των ηλεκτρονικών κινητήρων και του προσανατολισμού τους, ενώ μπορούν να δράσουν και ως φρένα [29].



Εικόνα 3.2: Εξακόπτερο του SenseLab.

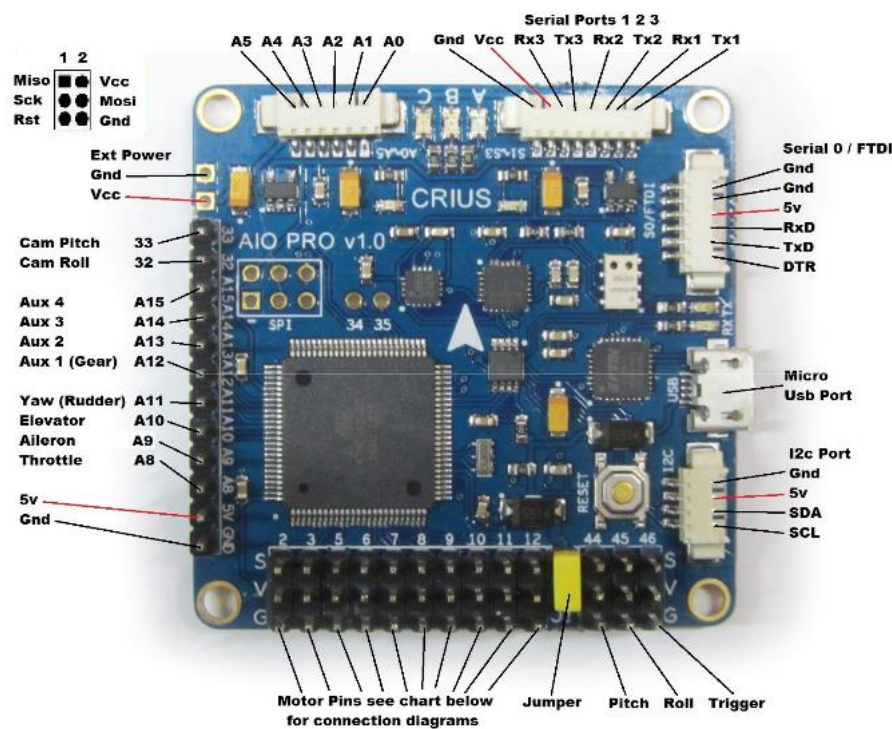
3.2.2 MegaPirate Flight Controller

Στην εφαρμογή που μελετάται σε αυτή τη διπλωματική εργασία, απαιτείται επικοινωνία του ολοκληρωμένου συστήματος που είναι υπεύθυνο για τη λήψη δεδομένων με το UAV καθώς και έλεγχος-χειρισμός του τελευταίου. Γι' αυτό, η χρήση του Flight Controller είναι αναγκαία. Ο Flight Controller είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα που διαβάζει τα δεδομένα των αισθητήρων που είναι ενσωματωμένοι πάνω του, καθώς και τις εντολές του χρήστη, και προσαρμόζει κατάλληλα την ταχύτητα του κινητήρα, προκειμένου να διατηρήσει την ευστάθεια του UAV κατά την διάρκεια της πτήσης [30]. Επιλέχθηκε ο controller της MegaPirate Crius V2 (Εικόνα 3.3) [31] καθώς είναι εύκολα προγραμματιζόμενος και περιέχει και αισθητήρες που χρειάζονται για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας (πυξίδα-βαρόμετρο). Άλλοι αισθητήρες ενσωματωμένοι στον Crius είναι επιταχυνσιόμετρο, γυροσκόπιο και μαγνητόμετρο, τα οποία είναι απαραίτητα για την σωστή διαχείριση του UAV κατά τη διάρκεια της πτήσης. Ακόμα ο Crius παρέχει

τη δυνατότητα ενσωμάτωσης GPS, που θα ήταν χρήσιμο κατά τη διάρκεια αποτύπωσης μιας ευρύτερης περιοχής, παρέχοντας έτσι πληροφορία για τη πραγματική θέση.

Ο Crius αποτελεί μια πολύ καλή επιλογή για το σύστημα που αναπτύσσεται σε αυτή την εργασία καθώς είναι πολύ ελαφρύς (14.2 g) και δεν επιβαρύνει το σύστημα, όσον αφορά το συνολικό βάρος, αλλά έχει και πολύ μικρή κατανάλωση ισχύος.

Τέλος, ο Crius έχει έξοδο micro-USB, η οποία καθιστά δυνατή την επικοινωνία με το σύστημα Raspberry Pi, στο οποίο γίνεται όλη η διαχείριση, συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων που συλλέγονται.



Εικόνα 3.3: Ο Flight Controller MegaPirate Crius V2

(πηγή: <http://fpvcentral.net/2013/03/crius-all-in-one-pro-review/>).

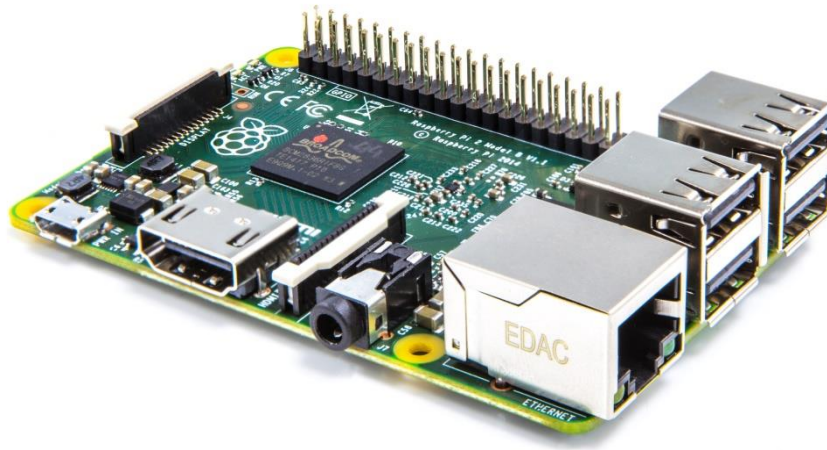
3.2.3 Raspberry Pi 2

Η υπολογιστική πλατφόρμα Raspberry Pi 2 (Εικόνα 3.4) [32] στην παρούσα διπλωματική εργασία θα αποτελέσει τον υπολογιστή, στον οποίο θα γίνεται η συλλογή και η επεξεργασία όλων των δεδομένων που συλλέγονται κατά τη διάρκεια της πτήσης. Αποτελεί την ιδανική λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα, καθώς είναι υπολογιστής μικρού μεγέθους, καθιστώντας εφικτή την ενσωμάτωση του στο υπόλοιπο σύστημα μέτρησης με τη μικρότερη δυνατή πολυπλοκότητα και υποστηρίζει όλες τις απαραίτητες λειτουργίες που θα χρειαζόταν να εκτελέσει ένας υπολογιστής για την περάτωση της εργασίας αυτής.

Το λειτουργικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το Raspbian, το οποίο επιτρέπει την εκτέλεση οποιασδήποτε εντολής που θα έτρεχε σε λειτουργικό σύστημα Linux. Αυτό καθιστά εφικτό τον προγραμματισμό σε C++, που είναι η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη διπλωματική εργασία, αλλά παράλληλα μπορεί να εκτελέσει και άλλες εντολές αρχείων, όπως η `manproxy.py` (python), που καθιστά δυνατή την επικοινωνία με τον FFlight Controller. Τέλος, το Raspberry μπορεί να υποστηρίξει το περιβάλλον ROS που είναι απαραίτητο για την επικοινωνία με τη συσκευή LiDAR.

Το Raspberry Pi 2 υποστηρίζει 4 θύρες USB, εκ των οποίων χρειάζονται οι 2, η μία για τον Flight Controller και η άλλη για μια κεραία για ασύρματη σύνδεση (Wi-Fi), ένα Ethernet port, το οποίο είναι απαραίτητο για την επικοινωνία με τη συσκευή LiDAR, και ένα Micro SD card slot, όπου χρησιμοποιείται μια Micro SD card που περιέχει το λειτουργικό σύστημα, αλλά γίνεται και η αποθήκευση των δεδομένων. Να τονιστεί ότι το Raspberry περιέχει έναν μικροεπεξεργαστή 900 MHz quad-core ARM Cortex-A7 και μνήμη 1 GB RAM, τα οποία συμβάλλουν στην γρήγορη επεξεργασία των δεδομένων που συλλέγονται από το σύστημα μέτρησης.

Η τροφοδοσία του Raspberry επιτυγχάνεται μέσω μιας θύρας micro-USB. Για την ορθή λειτουργία του απαιτείται μία ελάχιστη τροφοδοσία των 700 mA στα 5 V. Το συνολικό του βάρος δεν ξεπερνά τα 80 g.



Εικόνα 3.4: Raspberry Pi 2

(πηγή: <https://www.raspberrypi.org/blog/raspberry-pi-2-on-sale/>).

3.2.4 LiDAR Hokuyo UTM-30LX-EW

Για το σύστημα που αναπτύχθηκε χρειάζεται ένας εξοπλισμός ο οποίος θα είναι υπεύθυνος για την συλλογή πληροφορίας σχετικά με τον χώρο. Το πρόβλημα αυτό έρχεται να λύσει το LiDAR Hokuyo UTM-30LX-EW (Εικόνα 3.5) [33].

Το συγκεκριμένο LiDAR περιλαμβάνει laser με μήκος κύματος εκπεμπόμενης ακτινοβολίας $\lambda = 905 \text{ nm}$ και μπορεί να πάρει μετρήσεις σε γωνία 270° στον χώρο (Εικόνα 3.6). Έχει πολύ μεγάλη ακρίβεια καθώς παίρνει μέτρηση για κάθε 0.25° επιστρέφοντας συνολικά 1080 ($4 \times 270^\circ$) μετρήσεις στον χώρο, παρέχοντας έτσι την δυνατότητα συλλογής μεγάλης πληροφορίας για κάθε επίπεδο που σαρώνεται. Επιπλέον, η μέγιστη απόσταση για την οποία μπορεί να πάρει μέτρηση αξιόπιστα είναι τα 30 m , μήκος αρκετά ικανοποιητικό για το σκοπό που χρησιμοποιείται.

Ο χρόνος που χρειάζεται για μία ολοκληρωμένη σάρωση είναι ίσος με 25 ms , καθιστώντας έτσι δυνατές πολλαπλές μετρήσεις σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Για κάθε μία από τις σαρώσεις το LiDAR Hokuyo επιστρέφει δύο τιμές για κάθε 0.25° . Η πρώτη δείχνει την απόσταση του αντικειμένου από το σημείο στο οποίο εκπέμπει η συσκευή LiDAR και η δεύτερη είναι η ένταση της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας που δίνει πληροφορία για την απορροφητικότητα του αντικειμένου που σαρώθηκε. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα γίνει χρήση μόνο της απόλυτης

απόστασης από το αντικείμενο. Στη συνέχεια, με γνώση της γωνίας για την οποία επεστράφη η τιμή αυτή, μπορεί να υπολογιστεί η θέση του αντικειμένου στο καρτεσιανό επίπεδο.

Η επικοινωνία με τον υπολογιστή (Raspberry) γίνεται με καλώδιο Ethernet και η σχέση που αναπτύσσεται είναι τύπου request-response, καθώς ο υπολογιστής ζητάει δεδομένα από τη LiDAR συσκευή και εκείνη ανταποκρίνεται επιστρέφοντας τις δύο μετρήσεις που προαναφέρθηκαν.

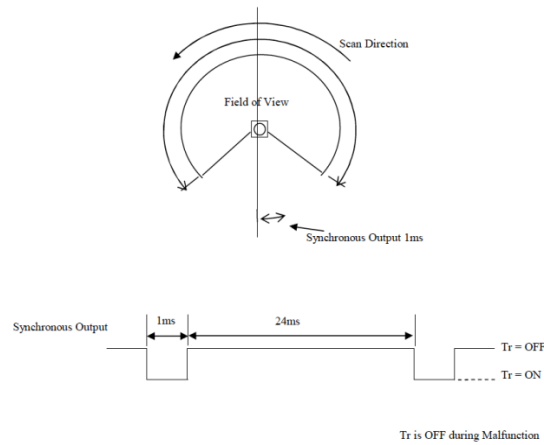
Το συγκεκριμένο μοντέλο LiDAR της εταιρίας Hokuyo επιλέχθηκε για την υψηλή ακρίβεια του, αλλά και για την ταχύτητα με την οποία ολοκληρώνει τις σαρώσεις. Στα υπέρ της συσκευής μπορεί να συνυπολογιστεί και η χαμηλή κατανάλωση της σε ρεύμα (1 A max), ενώ ζυγίζει μόλις 210 g. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι εφόσον πραγματοποιείται χρήση laser κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, η συσκευή αυτή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την σάρωση ανθρώπων.



Εικόνα 3.5: Hokuyo LiDAR

(πηγή: <http://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/download/products/utm-30lx-ew/>).

Control Signal
Synchronous Output (UTM-30LX)
 1 pulse is approximately 1 ms. Output signal Synchronization timing chart is shown below (Figure 3).



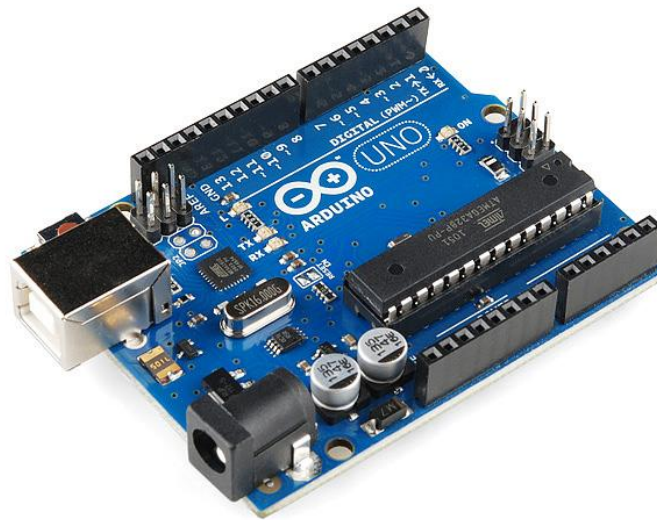
Εικόνα 3.6: Σάρωση του αισθητήρα LiDAR κατά 270° σε διάστημα χρόνου 1 ms

(πηγή: <http://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/download/products/utm-30lx-ew/>).

3.2.5 Arduino UNO R3

Στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση ενός Sonar, για τον υπολογισμό του υψομέτρου στο οποίο βρίσκεται το UAV κατά τη διάρκεια της πτήσης. Για να γίνει εφικτή η επικοινωνία του συστήματος με το Sonar γίνεται χρήση του Arduino UNO R3 (Εικόνα 3.7) [34], το οποίο επικοινωνεί με τον Flight Controller ενημερώνοντας τον για τη μέτρηση του υψομέτρου που πραγματοποίησε το Sonar.

Το Arduino ουσιαστικά είναι ένας μικροελεγκτής με open-source λογισμικό, εύκολα προγραμματιζόμενο για οποιαδήποτε λήψη πληροφορίας από διάφορους αισθητήρες και συστήματα. Αποτελείται από έναν μικροεπεξεργαστή ATmega328P και έχει 6 εξόδους PWM, 6 αναλογικές εισόδους, έναν κρύσταλλο χαλαζία των 16 MHz, μία θύρα USB, μια κεφαλή ICSP (In Circuit Serial Programming) και ένα κουμπί reset. Είναι πολύ ελαφρύ καθώς ζυγίζει μόλις 25 g.



Εικόνα 3.7: Arduino UNO R3

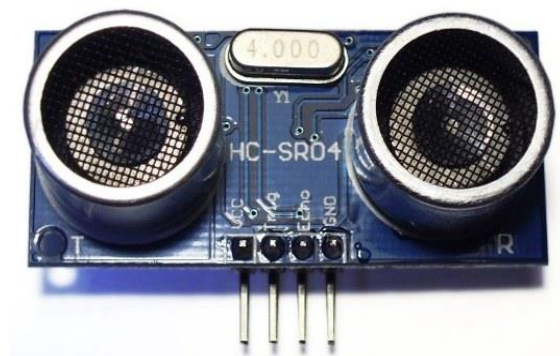
(πηγή: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>).

3.2.6 Sonar HC-SR04

Ο Flight Controller που χρησιμοποιείται, έχει τη δυνατότητα υπολογισμού υψομέτρου, καθώς έχει πάνω του ενσωματωμένο βαρόμετρο. Ωστόσο, δεν λαμβάνονται αξιόπιστες μετρήσεις για το ύψος, επειδή ο θόρυβος που παράγεται από το συνολικό σύστημα καθώς και η οπτική ακτινοβολία που πέφτει επάνω του καθιστούν αδύνατη τη λήψη ακριβούς μέτρησης του υψομέτρου. Η λήψη τέτοιας πληροφορίας από τον Flight Controller μόνο, θα ήταν δυνατή όπου το υψόμετρο δεν θα κυμαινόταν σε χαμηλές τιμές (< 4 m). Στην παρούσα εργασία ωστόσο, επειδή απαιτείται και σάρωση σε χαμηλά υψόμετρα, καθίσταται αναγκαία η εύρεση μιας άλλης λύσης. Το πρόβλημα αυτό λοιπόν έρχεται να λύσει το Sonar HC-SR04 (Εικόνα 3.8) [35].

Ο τρόπος λειτουργίας του βασίζεται στη διάδοση 8 παλμών υπερήχων συχνότητας 40 kHz, την ανίχνευση των επιστρεφόμενων σημάτων και τον υπολογισμό του χρόνου που χρειάστηκαν τα σήματα αυτά για να επιστρέψουν. Κατά αυτό τον τρόπο μπορεί να υπολογίσει την απόσταση από το έδαφος.

Το συγκεκριμένο Sonar έχει μεγάλη ακρίβεια, με σφάλμα μέτρησης μόλις 3 mm. Καταναλώνει ελάχιστο ρεύμα (15 mA) και είναι υπερβολικά ελαφρύ (8 g), γεγονός πολύ σημαντικό για την ελάχιστη επιβάρυνση του συνολικού συστήματος μέτρησης.



Εικόνα 3.8: Το Sonar HC-SR04

(πηγή: <http://projectsfromtech.blogspot.gr/2013/08/serial-sonar-sensor-attiny85-hc-sr04.html>).

3.3 Προγράμματα, Λογισμικό και Περιβάλλον (Software)

Για την ορθή λειτουργία και επικοινωνία των τμημάτων του συστήματος μέτρησης που αναπτύχθηκε, χρησιμοποιήθηκαν ορισμένα προγράμματα για την απομακρυσμένη επικοινωνία με το συνολικό σύστημα μέτρησης, για την ορθή λειτουργία του, καθώς και τη λήψη και την επεξεργασία των δεδομένων. Συγκεκριμένα, για την απομακρυσμένη επικοινωνία με το σύστημα μέτρησης, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό PuTTY. Για τη λήψη και επεξεργασία των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού C++. Για την απεικόνιση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον που παρέχει η MATLAB. Για την επικοινωνία με τον Flight Controller χρησιμοποιήθηκε το MAVLink και τέλος για την ορθή λειτουργία και λήψη δεδομένων από το LiDAR έγινε χρήση του περιβάλλοντος ROS.

3.3.1 PuTTY

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό PuTTY, ώστε να γίνει εφικτή η απομακρυσμένη σύνδεση με το συνολικό σύστημα, εφόσον γίνεται χρήση εναέριας πλατφόρμας. Με αυτό ο χρήστης, μπορεί να επικοινωνεί από ένα επίγειο τερματικό με το συνολικό σύστημα που έχει ενσωματωθεί στο UAV.

Το PuTTY [36] είναι ένα δωρεάν λογισμικό επικοινωνίας ανοιχτού κώδικα, που υποστηρίζει κάποια πρωτόκολλα δικτύου, όπως αυτά των SCP, SSH, Telnet, rlogin, καθώς και raw socket connection. Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται χρήση του πρωτοκόλλου SSH, κάνοντας εφικτή την απομακρυσμένη σύνδεση του τερματικού με την εναέρια πλατφόρμα.

3.3.2 Γλώσσα Προγραμματισμού C++

Η C++ είναι η γλώσσα που επιλέχθηκε για τον προγραμματισμό των υπολογιστικών υποσυστημάτων που πραγματοποιούν τη λήψη και επεξεργασία των δεδομένων. Ο λόγος που επιλέχθηκε έναντι άλλων γλωσσών προγραμματισμού είναι ότι μας παρέχει τη δυνατότητα εκτέλεσης άλλων προγραμμάτων κατά την διάρκεια της λήψης δεδομένων, όπως είναι το manproxy, το οποίο είναι το εκτελέσιμο που χρησιμοποιείται για την επικοινωνία με τον Flight Controller. Κατά την διάρκεια της επικοινωνίας αυτής δημιουργείται μια επικοινωνία ερωταποκρίσεων, όπου ζητείται πληροφορία από τον Flight Controller σχετικά με το ύψος και τον προσανατολισμό του UAV. Για να επιτευχθεί όμως αυτή η επικοινωνία χρησιμοποιείται η μέθοδος piping, την οποία παρέχει η C++. Επιπλέον, είναι μια πολύ “ελαφριά” γλώσσα, γεγονός που μεταφράζεται σε χαμηλότερη υπολογιστική επιβάρυνση της διαδικασίας επεξεργασίας των δεδομένων σε σχέση με την υπολογιστική ισχύ και τον χρόνο που αυτή χρειάζεται για να ολοκληρωθεί. Τέλος, είναι διαθέσιμη δωρεάν και παρέχει μια πληθώρα βιβλιοθηκών, χρήσιμων για την εκτέλεση των λειτουργιών που απαιτεί το σύστημα μέτρησης που αναπτύχθηκε.

3.3.3 Πρωτόκολλο MAVLink

Το MAVLink (Micro Air Vehicle Link) [37] είναι ένα πρωτόκολλο για επικοινωνία με μικρά UAVs. Χρησιμοποιείται κυρίως για την ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ του οχήματος και ενός σταθμού ελέγχου (Ground Control Station – GCS). Τα μηνύματα που συνήθως ανταλλάσσονται είναι σχετικά με τον προσανατολισμό, την τοποθεσία και την ταχύτητα του UAV. Επιστρέφει ακόμη πληροφορία σχετική με την κατάσταση του συνολικού συστήματος.

Η χρήση του MAVLink στην εργασία αυτή είναι απαραίτητη, καθώς η εναέρια πλατφόρμα παρέχει χρήσιμη πληροφορία σχετική με το υψόμετρο, αλλά και τον προσανατολισμό του συνολικού συστήματος.

3.3.4 Περιβάλλον ROS

Το ROS είναι ένα λειτουργικό σύστημα ανοικτού κώδικα, το οποίο χρησιμοποιείται για την δημιουργία λογισμικού για ρομπότ. Αποτελείται από μια συλλογή εργαλείων και βιβλιοθηκών που στόχο έχουν να απλοποιήσουν τη δημιουργία πολύπλοκων συστημάτων ρομπότ [38].

Η χρήση του περιβάλλοντος ROS είναι επιτακτική στην παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς καθιστά εφικτή την επικοινωνία και λήψη δεδομένων από τη συσκευή LiDAR παρέχοντας τις απαραίτητες βιβλιοθήκες για τη διασύνδεση με αυτό.

3.3.5 Περιβάλλον MATLAB

Η Matlab αποτελεί μια γλώσσα προγραμματισμού 4^{ης} γενιάς [39]. Παρέχει τη δυνατότητα επεξεργασίας πινάκων, την απεικόνιση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από συναρτήσεις και δεδομένα, την εκτέλεση αλγορίθμων, καθώς και τη δημιουργία περιβάλλοντων εργασίας για το χρήστη. Αν και προορίζεται κυρίως για αριθμητικούς υπολογισμούς, είναι ικανή, με τη χρήση του πρόσθετου πακέτου Simulink, να αποτυπώσει με γραφικό τρόπο τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση συστημάτων, τόσο δυναμικών, όσο και ενσωματωμένων. Η χρήση του περιβάλλοντος αυτού έχει στόχο την αναπαράσταση των δεδομένων που

συλλέχθηκαν σε καρτεσιανό επίπεδο, παρέχοντας τις απαραίτητες συναρτήσεις για την αποτύπωση του χώρου.

4. Το λογισμικό που αναπτύχθηκε

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναλυτικά η περιγραφή των βημάτων που ακολουθούνται για την λήψη, αποθήκευση και επεξεργασία των δεδομένων, όπως επίσης και για τον τρόπο που επιτυγχάνεται η επικοινωνία των επιμέρους τμημάτων, αλλά και η ανάλυση του πως λειτουργεί το κάθε τμήμα.

4.1 Εκτελέσιμο Πρόγραμμα στη C++

Το εκτελέσιμο πρόγραμμα που υλοποιήθηκε στη C++ είναι υπεύθυνο για την εκκίνηση της διαδικασίας λήψεως μετρήσεων από όλο το σύστημα που υλοποιήθηκε, για την επεξεργασία των δεδομένων που λαμβάνονται, για την αποθήκευση τους, καθώς και για την επίτευξη επικοινωνίας με το πρωτόκολλο MAVLink.

Κατά την εκκίνηση του αρχικό στόχο έχει την εκτέλεση του πρωτοκόλλου MAVLink με το οποίο επιτυγχάνεται μια συνεχής επικοινωνία με τον Flight Controller, και με τον οποίο ανταλλάσσει μηνύματα σχετικά με τον προσανατολισμό και το υψόμετρο του συνολικού συστήματος.

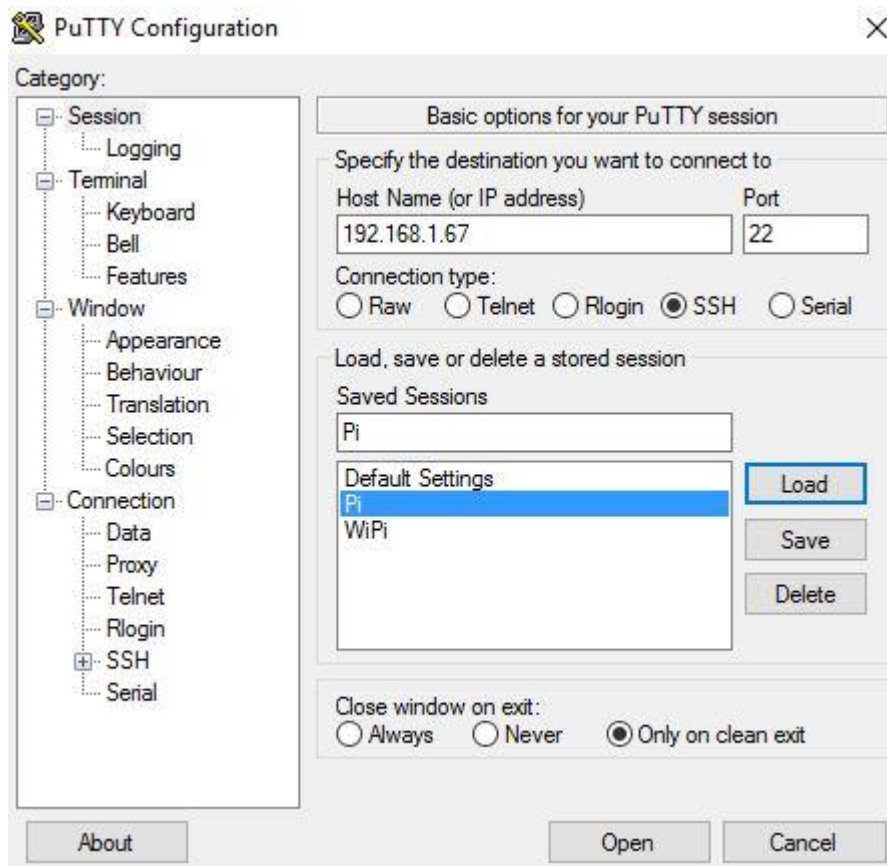
Έπειτα δημιουργεί μια συνεχή επικοινωνία με το περιβάλλον ROS, με το οποίο ανταλλάσσει μηνύματα με τη συσκευή LiDAR όσον αφορά τη σάρωση του χώρου. Η επικοινωνία αυτή γίνεται με τη μέθοδο “pipe” (σωλήνα), όπως περιγράφεται παρακάτω.

Μετά τη λήψη και επεξεργασία των δεδομένων, το εκτελέσιμο πρόγραμμα είναι υπεύθυνο για την αποθήκευση τους σε ένα αρχείο, και τέλος μέσω αυτού γίνεται ο τερματισμός της λήψης μετρήσεων από το συνολικό σύστημα.

4.2 Επικοινωνία με το Raspberry Pi

Η απομακρυσμένη επικοινωνία με το σύστημα μέτρησης επιτυγχάνεται με SSH σύνδεση μέσω του προγράμματος Putty. Η πλατφόρμα Raspberry είναι συνδεδεμένη σε ένα προκαθορισμένο ασύρματο τοπικό δίκτυο, με διευθύνσεις IP οι οποίες έχουν δηλωθεί εξ αρχής από τον χρήστη, στο οποίο είναι συνδεδεμένο και το επίγειο

τερματικό που χρησιμοποιείται από τον χρήστη για την έναρξη λήψεως δεδομένων. Στο Putty εισάγεται η IP διεύθυνση του Raspberry (Εικόνα 4.1), η οποία είναι ήδη γνωστή, και κατά αυτό τον τρόπο αποκτάται πρόσβαση στο σύστημα μέτρησης. Να σημειωθεί ότι για την ασύρματη σύνδεση του Raspberry Pi στο ασύρματο δίκτυο χρησιμοποιήθηκε ο ασύρματος δέκτης Odroid.

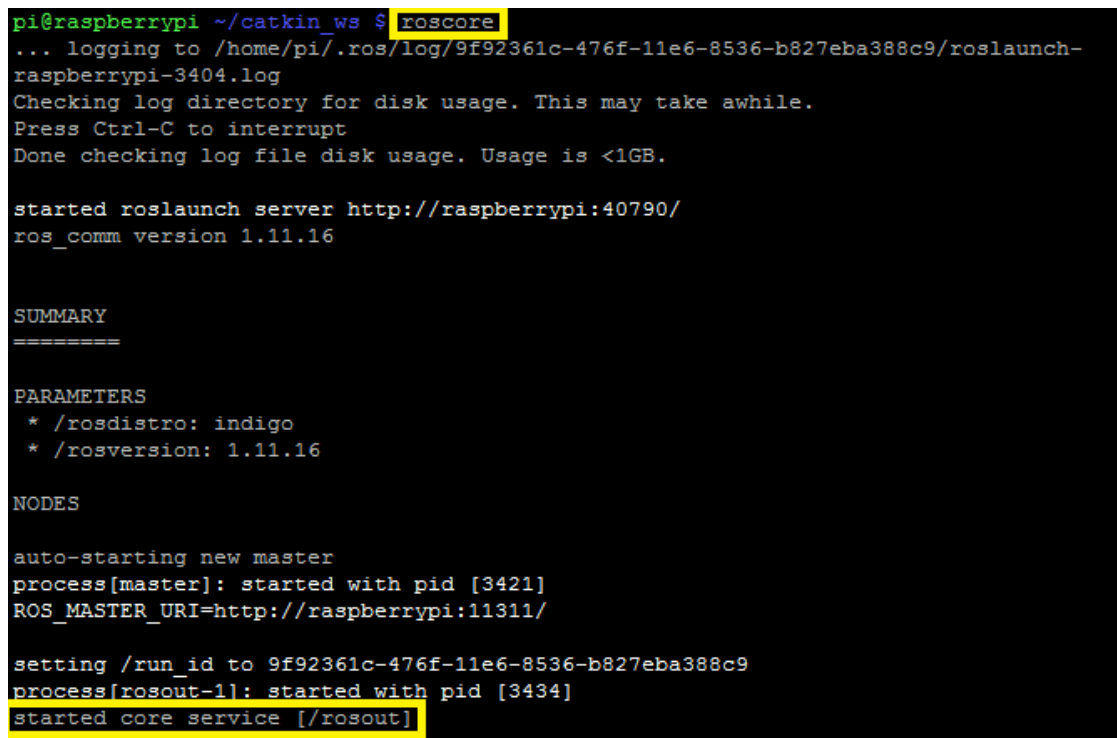


Εικόνα 4.1: Απομακρυσμένη σύνδεση με το σύστημα μέτρησης που αναπτύχθηκε με την χρήση του εργαλείου Putty.

4.3 Εκκίνηση περιβάλλοντος ROS

Απαραίτητη προϋπόθεση για τη μετάδοση δεδομένων από τη συσκευή LiDAR είναι η εκτέλεση του περιβάλλοντος ROS. Ο λόγος που χρειάζεται να εκτελεστεί είναι ότι παρέχει τις απαραίτητες βιβλιοθήκες για την λειτουργία της συσκευής LiDAR αλλά και για την επικοινωνία με αυτή, καθιστώντας εφικτή τη λήψη δεδομένων.

Το περιβάλλον ROS έχει προεγκατασταθεί στην πλατφόρμα Raspberry με όλες τις απαραίτητες βιβλιοθήκες για τη LiDAR συσκευή και επιπλέον κάποιοι απαραίτητοι κόμβοι για την ορθή λήψη δεδομένων. Η εκτέλεση του περιβάλλοντος γίνεται με την απλή εντολή `roscore` (Εικόνα 4.2) η οποία πληκτρολογείται στο τερματικό. Εφόσον ολοκληρωθεί επιτυχώς η εκκίνηση του ROS, μπορεί να προχωρήσει η διαδικασία εκκίνησης του τμήματος λογισμικού `urg_node`, η οποία περιγράφεται παρακάτω.



```
pi@raspberrypi ~/catkin_ws $ roscore
... logging to /home/pi/.ros/log/9f92361c-476f-11e6-8536-b827eba388c9/roslaunch-
raspberrypi-3404.log
Checking log directory for disk usage. This may take awhile.
Press Ctrl-C to interrupt
Done checking log file disk usage. Usage is <1GB.

started roslaunch server http://raspberrypi:40790/
ros_comm version 1.11.16

SUMMARY
=====

PARAMETERS
* /rostdistro: indigo
* /rosversion: 1.11.16

NODES

auto-starting new master
process[master]: started with pid [3421]
ROS_MASTER_URI=http://raspberrypi:11311/

setting /run_id to 9f92361c-476f-11e6-8536-b827eba388c9
process[rosout-1]: started with pid [3434]
started core service [/rosout]
```

Εικόνα 4.2: Εκκίνηση του περιβάλλοντος ROS.

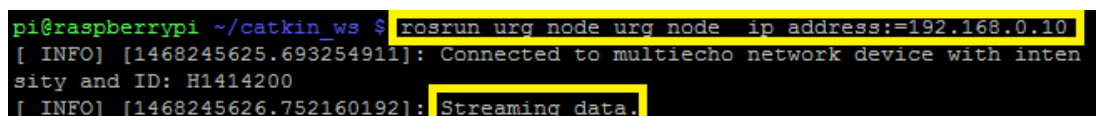
4.4 Εκκίνηση τμήματος λογισμικού `urg_node`

Για να λειτουργήσει σωστά η λήψη δεδομένων από την LiDAR συσκευή, είναι απαραίτητη η εγκατάσταση κάποιων περαιτέρω κόμβων πέρα από το βασικό περιβάλλον ROS. Ένας τέτοιος κόμβος είναι ο `urg_node`, ο οποίος παρέχει τα απαραίτητα πακέτα και βιβλιοθήκες που χρειάζεται το περιβάλλον ROS, ώστε να γίνει εφικτή η επικοινωνία με το LiDAR, αλλά και η ανταλλαγή μηνυμάτων με αυτό, που οδηγεί στη λήψη δεδομένων. Απαραίτητη προϋπόθεση και εδώ είναι η εκτέλεση

του συγκεκριμένου κόμβου. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται αυτό είναι κάνοντας χρήση της εξής εντολής:

```
roslaunch urg_node urg_node _ip_address:=198.168.0.10
```

στην οποία ουσιαστικά δίνουμε εντολή στο περιβάλλον ROS να εκτελέσει ότι περιέχει ο κόμβος `urg_node` που βρίσκεται στο πακέτο `urg_node` και σαν όρισμα δίνεται η IP διεύθυνση στην οποία στέλνει δεδομένα η LiDAR συσκευή, που στην προκειμένη περίπτωση είναι η 192.168.0.10, όπως καθορίζεται εκ των προτέρων στο εγχειρίδιο της εταιρίας Hokuyo. Εφόσον όλα τρέξουν σωστά, θα λάβουμε μια ενημέρωση στο τερματικό μας ότι η συσκευή LiDAR έχει αρχίσει τη μετάδοση δεδομένων (data streaming) (Εικόνα 4.3).



```
pi@raspberrypi ~/catkin_ws $ roslaunch urg_node urg_node _ip_address:=192.168.0.10
[ INFO] [1468245625.693254911]: Connected to multiecho network device with inten
sity and ID: H1414200
[ INFO] [1468245626.752160192]: Streaming data.
```

Εικόνα 4.3: Μετάδοση δεδομένων από τη συσκευή LiDAR.

4.5 Επικοινωνία με τον Flight Controller

Μετά την επικοινωνία με το LiDAR η διαδικασία προχωράει στον Flight Controller, ο οποίος όπως προαναφέρθηκε σε άλλη ενότητα, πέραν του ότι είναι απαραίτητος για την πτήση της εναέριας πλατφόρμας, είναι χρήσιμος και στην παροχή πληροφορίας σχετικής με το υψόμετρο και τον προσανατολισμό του συνολικού συστήματος.

Για να γίνει εφικτή η επικοινωνία με τον Flight Controller, γίνεται χρήση της εξής εντολής:

```
Mavproxy.py --master=/dev/ttyUSB0, 115200
```

η οποία εκκινεί το πρωτόκολλο MAVLink, το οποίο ανταλλάσσει πακέτα με το πρόγραμμα, το οποίο είναι υπεύθυνο για την επεξεργασία των δεδομένων, που περιέχουν πληροφορία σχετική με την κατάσταση της εναέριας πλατφόρμας. Κατά την εκτέλεση της παραπάνω εντολής χρειάζεται η περάτωση ενός χρονικού διαστήματος περίπου 30~40 δευτερολέπτων προκειμένου να γίνει ο έλεγχος ορθής

λειτουργίας όλων των υποσυστημάτων του UAV. Εφόσον ο έλεγχος τερματιστεί με επιτυχία, έχει γίνει εφικτή μια συνεχής επικοινωνία του συστήματος με τον Flight Controller, παρέχοντας τη δυνατότητα λήψης χρήσιμης πληροφορίας, σχετικά με το υψόμετρο που βρίσκεται το LiDAR καθώς και τον προσανατολισμό του, οποιαδήποτε στιγμή κατά την διάρκεια της διαδικασίας λήψης δεδομένων.

4.6 Επικοινωνία MAVLink & C++

Επειδή χρησιμοποιείται ως γλώσσα προγραμματισμού η C++ και η εντολή έναρξης του MAVLink οδηγεί σε ένα νέο πρόγραμμα διαφορετικό από αυτό του εκτελέσιμου προγράμματος σε C++, πρέπει να γίνει μια εκ νέου επικοινωνία μεταξύ του MAVLink και του προγράμματος σε C++. Αυτό γίνεται εφικτό με τη μέθοδο “pipe” που παρέχει η γλώσσα προγραμματισμού C++.

Η μέθοδος pipe είναι ουσιαστικά ένας μηχανισμός για την επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών διεργασιών, που εκτελούνται παράλληλα στο σύστημα. Τα δεδομένα που γράφονται στο pipe (σωλήνα) από τη μια διεργασία μπορούν να διαβαστούν από την άλλη και αντίστροφα. Έχοντας έτσι πολλαπλές διαδικασίες να τρέχουν, γίνεται εφικτή η μεταξύ τους επικοινωνία με την παραπάνω μέθοδο.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία οι διεργασίες που επικοινωνούν μεταξύ τους είναι το MAVLink, που παρέχει ότι χρειάζεται σε πληροφορία για το UAV, και το εκτελέσιμο πρόγραμμα στη C++. Έτσι, ουσιαστικά από το εκτελέσιμο της C++ στέλνεται η εντολή status, της οποίας εκτενέστερη αναφορά θα γίνει παρακάτω, και λαμβάνεται η απάντηση από το MAVLink, που θα αφορά την παραπάνω εντολή.

4.7 Λήψη και αποθήκευση δεδομένων

Μόλις επιτευχθεί επιτυχώς και η επικοινωνία με τον Flight Controller το σύστημα είναι έτοιμο να προχωρήσει στη λήψη δεδομένων με τη χρήση της εντολής status από το εκτελέσιμο προς το πρωτόκολλο MAVLink. Η εντολή status ουσιαστικά επιστρέφει τα τελευταία πακέτα που έχουν ληφθεί από τον Flight Controller με μια λεπτομερή αναφορά, σχετική με τις ενδείξεις και την κατάσταση του UAV. Μερικές από αυτές είναι: ο προσανατολισμός του συστήματος με βάση τον μαγνητικό βορρά,

το υψόμετρο στο οποίο βρίσκεται η πλατφόρμα, η κατάσταση πτήσης στην οποία βρίσκεται το UAV, η ατμοσφαιρική πίεση που μετριέται από το βαρόμετρο, η σχετική θέση με την χρήση του GPS και η κλίση του αεροσκάφους. Από τα προαναφερθέντα, στην εργασία αυτή χρειάζονται το υψόμετρο και ο προσανατολισμός του συστήματος.

Προκειμένου να ληφθούν οι μετρήσεις που αναφέρθηκαν, αποθηκεύεται προσωρινά η συμβολοσειρά που επιστρέφεται από την εντολή status και το πρόγραμμα ανατρέχει στις γραμμές που περιέχουν τη χρήσιμη πληροφορία.

Εφόσον εντοπιστεί η σωστή γραμμή που περιέχει την πληροφορία για το υψόμετρο (alt), εξάγεται η τιμή του “alt” από την γραμμή, έπειτα μετατρέπεται από string σε double και στη συνέχεια καταχωρείται σε μια προσωρινή μεταβλητή. Σημειώνεται ότι εφόσον ο στόχος είναι η αποτύπωση χώρου, η τιμή του υψομέτρου δεν μπορεί να είναι αρνητική, καθώς το UAV ξεκινάει την πτήση του από το έδαφος. Επιπλέον, για χαμηλές τιμές ύψους (< 4 m) υπενθυμίζεται ότι χρησιμοποιείται η συσκευή Sonar, της οποίας η σύνδεση με τον Flight Controller γίνεται με την χρήση της πλατφόρμας Arduino.

Παρόμοια διαδικασία ακολουθείται και για την λήψη πληροφορίας σχετικά με τον προσανατολισμό του συστήματος. Εντοπίζεται η κατάλληλη γραμμή που περιέχει την πληροφορία προσανατολισμού (yaw), εξάγεται η τιμή που υποδηλώνει το yaw, στη συνέχεια μετατρέπεται από string σε double και έπειτα καταχωρείται σε μια προσωρινή μεταβλητή. Είναι χρήσιμο να σημειωθεί ότι η τιμή που επιστρέφεται και η οποία αντιστοιχεί στο yaw βρίσκεται στο διάστημα $[-\pi, \pi]$ και όχι στο διάστημα $[0, 2\pi]$. Έπειτα είναι απαραίτητη η μετατροπή της τιμής που επιστρέφεται σε μοίρες. Για να επιτευχθεί αυτό γίνεται χρήση της εξίσωσης (1):

$$degrees = (rads \times 180) / \pi \quad (1)$$

Η τιμή που προκύπτει είναι αυτή που καταχωρείται στην αντίστοιχη μεταβλητή και που χρησιμοποιείται αργότερα για αποθήκευση.

Μόλις γίνει λήψη των παραπάνω πληροφοριών (προσανατολισμός - υψόμετρο) και η καταχώρησης τους στις αντίστοιχες μεταβλητές, το σύστημα είναι έτοιμο να λάβει πληροφορία για την αποτύπωση του γύρω χώρου. Ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται αυτό έχει ως εξής. Όπως προαναφέρθηκε στις προηγούμενες ενότητες,

έχει γίνει εκτέλεση του περιβάλλοντος ROS και του `urg_node`, με τα οποία έχει επιτευχθεί μια συνεχής μετάδοση δεδομένων από τη συσκευή LiDAR. Στο σημείο αυτό το πρόγραμμα πραγματοποιεί μια σύνδεση - επικοινωνία με τη συσκευή LiDAR, από την οποία ζητάει δεδομένα. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η σύνδεση αυτή στηρίζεται στη μέθοδο Publisher – Subscriber που παρέχει η γλώσσα C++ σε συνδυασμό με το περιβάλλον ROS. Αυτό που ουσιαστικά γίνεται είναι η συσκευή LiDAR να ανοίγει ένα μόνιμο διάυλο επικοινωνίας μέσα από τον οποίο γίνεται μια συνεχής μετάδοση δεδομένων, που λαμβάνονται κατά την διάρκεια μιας αποτύπωσης (publishing data). Προκειμένου το πρόγραμμα να μπορέσει να δει τα δεδομένα αυτά θα πρέπει να «εγγραφεί» (subscribe) στο διάυλο που μεταδίδει δεδομένα η LiDAR συσκευή. Μόλις γίνει αυτή η εγγραφή, το πρόγραμμα «βλέπει» τι μεταδίδεται στο διάυλο παρέχοντας τη δυνατότητα λήψης και επεξεργασίας των δεδομένων αυτών.

Μόλις ολοκληρωθεί η λήψη των δεδομένων για μια αποτύπωση, που αποτελείται από 1080 μετρήσεις απόστασης, γίνεται η αποθήκευσή τους. Ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται αυτό, είναι με τη δημιουργία ενός κενού αρχείου κειμένου (text document), μέσα στο οποίο γίνεται καταγραφή των πληροφοριών που έχουν συλλεχθεί, με βάση τη διακριτική ικανότητα της συσκευής LiDAR (0.25°). Η γωνία σάρωσης της συσκευής LiDAR είναι 270° , οπότε συνολικά λαμβάνεται πληροφορία για 1080 σημεία. Οι πληροφορίες αυτές, συνιστούν το μήκος της απόστασης που υπολογίστηκε από την LiDAR συσκευή, το υψόμετρο και τον προσανατολισμό του συστήματος, τη στιγμή που έγινε η αποτύπωση (χρήση των προσωρινών μεταβλητών που αναφέρθηκαν παραπάνω). Μόλις γίνει η αποθήκευση των μετρήσεων αυτών, το σύστημα προχωράει στην λήψη νέων δεδομένων σχετικά με το ύψος, τον προσανατολισμό και τον χώρο, τα οποία θα αποθηκεύσει εκ νέου στο αρχείο των μετρήσεων. Ο χρόνος δειγματοληψίας του συστήματος είναι 500 msec, προκειμένου το σύστημα να μπορέσει να λάβει και να επεξεργαστεί με επιτυχία όλα τα δεδομένα για κάθε αποτύπωση. Μόλις ολοκληρωθεί η συνολική διαδικασία λήψης των δεδομένων για τον χώρο (η διαδικασία αυτή αποτελείται από τις εξής φάσεις: απογείωση – άνοδος μέχρι ένα επιθυμητό υψόμετρο – περιστροφή του ολικού συστήματος κατά 180° – προσγείωση), το σύστημα τερματίζει με εντολή διακοπής που δίνεται από τον χρήστη στο εγκάρσιο τερματικό.

Στην Εικόνα 4.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που βλέπει ο χρήστης στην οθόνη του από το απομακρυσμένο τερματικό. Τα αποτελέσματα αυτά είναι ουσιαστικά τα δεδομένα που επιστρέφονται από την εντολή status, η οποία παρέχεται από το πρωτόκολλο MAVLink. Από αυτά εξάγονται, όπως προαναφέρθηκε, το ύψος και η τιμή yaw, και προβάλλονται στο κάτω μέρος της οθόνης, έτσι ώστε ο χρήστης να έχει επίγνωση του προσανατολισμού και του υψομέτρου στο οποίο λαμβάνονται μετρήσεις. Σημειώνεται ότι η μέτρηση που απεικονίζεται στην οθόνη, για το υψόμετρο, μετράται σε εκατοστά (cm).


```

STABILIZE> Counters: Slave:0 MasterIn:[2549] FGearOut:0 FGearIn:0 MasterOut:27
MAV Errors: 234
None
61: AHRS {omegaIx : 1.44117202581e-05, omegaIy : -0.000109411848825, omegaIz : -
0.000107779036625, accel_weight : 1.0, renorm_val : 0.0, error_rp : 0.0012169129
9137, error_yaw : 0.00173923792318}
61: ATTITUDE {time_boot_ms : 32312, roll : 0.00336946290918, pitch : -0.02137742
00529, yaw : -1.83664894104, rollspeed : 0.00105889944825, pitchspeed : -0.00126
107782125, yawspeed : -0.00019820407033}
1312: BAD_DATA {Bad prefix, data:['20']}
62: GLOBAL_POSITION_INT {time_boot_ms : 32548, lat : 0, lon : 0, alt : 0, relati
ve_alt : 3200, vx : 0, vy : 0, vz : 0, hdg : 0}
62: GPS_RAW_INT {time_usec : 0, fix_type : 0, lat : 0, lon : 0, alt : 0, eph : 0
, epv : 65535, vel : 0, cog : 0, satellites_visible : 0}
31: HEARTBEAT {type : 2, autopilot : 3, base_mode : 81, custom_mode : 0, system
status : 4, mavlink_version : 3}
61: HWSTATUS {Vcc : 4417, I2Cerr : 0}
62: MISSION_CURRENT {seq : 0}
62: NAV_CONTROLLER_OUTPUT {nav_roll : 0.0, nav_pitch : 0.0, nav_bearing : 0, tar
get_bearing : 0, wp_dist : 0, alt_error : 0.0, aspd_error : 0.0, xtrack_error :
0.0}
272: PARAM_VALUE {param_id : MOT_TCRV_MAXPCT, param_value : 93.0, param_type : 2
, param_count : 272, param_index : 271}
62: RAW_IMU {time_usec : 32538044, xacc : -23, yacc : -5, zacc : -1117, xgyro :
0, ygyro : 0, zgyro : 0, xmag : -63, ymag : 248, zmag : 197}
61: RC_CHANNELS_RAW {time_boot_ms : 32311, port : 0, chan1_raw : 0, chan2_raw :
0, chan3_raw : 0, chan4_raw : 0, chan5_raw : 0, chan6_raw : 0, chan7_raw : 0, ch
an8_raw : 0, rssi : 0}
61: RC_CHANNELS_SCALED {time_boot_ms : 32310, port : 0, chan1_scaled : -13, chan
2_scaled : 83, chan3_scaled : 0, chan4_scaled : 0, chan5_scaled : 28036, chan6_s
caled : 28036, chan7_scaled : 28036, chan8_scaled : 28036, rssi : 0}
62: SCALED_PRESSURE {time_boot_ms : 32537, press_abs : 997.189697266, press_diff
: -0.013203125447, temperature : 3078}
62: SENSOR_OFFSETS {mag_ofs_x : 0, mag_ofs_y : 0, mag_ofs_z : 0, mag_declination
: 0.0, raw_press : 8361537, raw_temp : 8457361, gyro_cal_x : -0.00105889944825,
gyro_cal_y : -0.0402434840798, gyro_cal_z : -0.00831555202603, accel_cal_x : 0.
0, accel_cal_y : 0.0, accel_cal_z : 0.0}
61: SERVO_OUTPUT_RAW {time_usec : 32311416, port : 0, servo1_raw : 1100, servo2_
raw : 1100, servo3_raw : 1100, servo4_raw : 1100, servo5_raw : 0, servo6_raw : 0
, servo7_raw : 0, servo8_raw : 0}
4: STATUSTEXT {severity : 1, text : Initialising APM...}
69: SYS_STATUS {onboard_control_sensors_present : 4294966287, onboard_control_se
nsors_enabled : 4294945807, onboard_control_sensors_health : 4294966287, load :
0, voltage_battery : 11025, current_battery : -1, battery_remaining : -1, drop_r
ate_comm : 0, errors_comm : 0, errors_count1 : 0, errors_count2 : 0, errors_coun
t3 : 0, errors_count4 : 0}
61: VFR_HUD {airspeed : 0.0, groundspeed : 0.0, heading : 254, throttle : 0, alt
: 72.0, climb : 1.23000001907}
STABILIZES 零/三
alt: 72.000000
yaw: -1.836649

```

Εικόνα 4.4: Δεδομένα που επιστρέφονται με την εντολή status.

4.8 Μετατροπή Συντεταγμένων

Μετά την περάτωση μιας ολοκληρωμένης πτήσης και τη συλλογή δεδομένων, σειρά έχει η επεξεργασία τους. Σκοπός της διαδικασίας αυτής είναι η μετατροπή των πολικών συντεταγμένων σε καρτεσιανές.

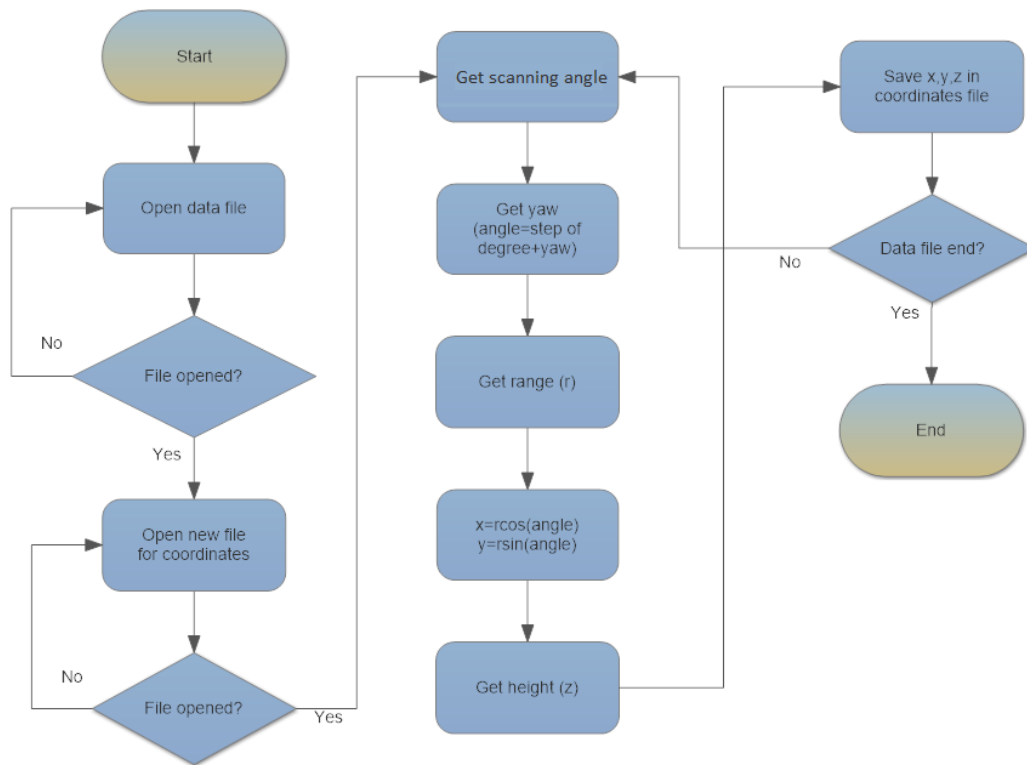
Αρχικά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.5, γίνεται άνοιγμα και ανάγνωση του αρχείου στο οποίο έχουν αποθηκευτεί οι μετρήσεις και διαβάζονται σειρά - σειρά οι καταχωρήσεις. Ο τρόπος που αποθηκεύτηκαν έχει ως εξής: αριθμός μοίρας (1 - 1080), όπου αντιστοιχίζεται από -135° έως 135° με βήμα $\frac{1}{4}$ της μοίρας. Έπειτα, προσπελάσσεται η τιμή που υποδηλώνει την περιστροφή του συστήματος (yaw) και προστίθεται στην τιμή της μοίρας που αντιστοιχίστηκε νωρίτερα, ώστε να προκύπτει ο τελικός προσανατολισμός στο χώρο. Μετά τον προσδιορισμό του σωστού προσανατολισμού, διαβάζεται η επόμενη τιμή που αντιστοιχεί στη μέτρηση του μήκους για την προαναφερθείσα μοίρα. Χρησιμοποιώντας τις τριγωνομετρικές εξισώσεις (2) και (3):

$$x=r\cos\theta \quad (2)$$

$$y=r\sin\theta \quad (3)$$

όπου r είναι το μήκος που καταχωρήθηκε για την υπολογισθείσα μοίρα και θ η ίδια η μοίρα, υπολογίζονται οι x και y συντεταγμένες του σημείου στο χώρο για την μοίρα που μετρήθηκε αρχικώς. Τέλος, διαβάζεται η τελευταία τιμή της σειράς του αρχείου, η οποία αφορά το ύψος και αντιστοιχίζεται στη συντεταγμένη του z .

Όταν γίνουν όλες οι απαραίτητες μετατροπές και υπολογισμοί για τον προσδιορισμό των τριών συντεταγμένων (x,y,z), οι τιμές που υπολογίσθηκαν αποθηκεύονται σε ένα νέο αρχείο που θα αποτελέσει και την τελική καταχώρηση δεδομένων για την αποτύπωση του χώρου.



Εικόνα 4.5: Διαδικασία μετατροπής συντεταγμένων.

4.9 Αποτύπωση Δεδομένων

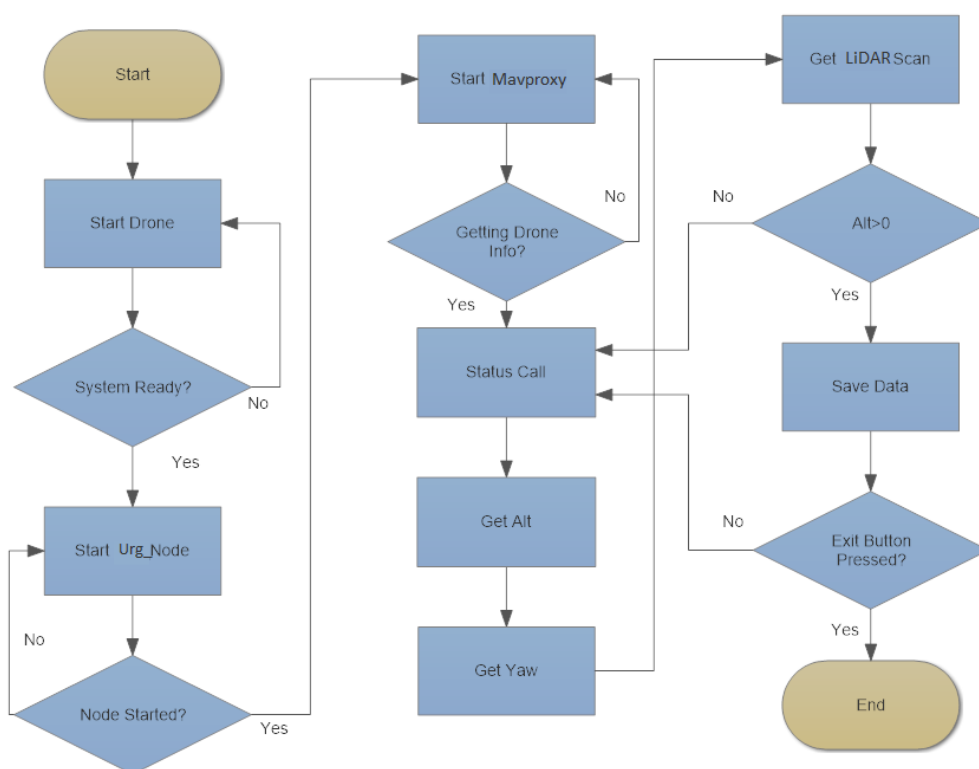
Όταν γίνει και η τελική καταχώρηση των συντεταγμένων, σειρά έχει η απεικόνιση τους. Το εργαλείο που χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό είναι η πλατφόρμα MATLAB, καθώς είναι ένα πολύ αξιόπιστο μαθηματικό εργαλείο, το οποίο παρέχει ακριβείς συναρτήσεις για την 3-διάστατη αναπαράσταση συντεταγμένων στον χώρο.

Αρχικά, φορτώνεται στη MATLAB το αρχείο που περιέχει τις συντεταγμένες που προορίζονται για αποτύπωση. Έπειτα, ανατρέχεται το αρχείο κατά στήλη και φορτώνονται οι τιμές που διαβάζονται σε 3 πίνακες αριθμών που αντιστοιχούν στις τιμές X , Y και Z για κάθε μέτρηση που έχει ληφθεί. Τέλος, με τη χρήση της συνάρτησης “scatter3”, που δέχεται σαν ορίσματα τους προαναφερθέντες 3 πίνακες, γίνεται η τελική αναπαράσταση του προς αποτύπωση χώρου με την μορφή τελειών.

Η 3-διάστατη αποτύπωση που επιστρέφεται από τη MATLAB έχει τη δυνατότητα περιστροφής της με αποτέλεσμα να γίνεται μια πιο κατανοητή, ως προς τον θεατή, απεικόνιση με μια λεπτομερή αναπαράσταση των εμποδίων ή των τοιχωμάτων του χώρου.

4.10 Απεικόνιση της διαδικασίας λήψεως μετρήσεων

Στο διάγραμμα ροής που ακολουθεί (Εικόνα 4.6), απεικονίζεται η διαδικασία που ακολουθείται στην παρούσα διπλωματική εργασία για την αποτύπωση του χώρου από τη στιγμή απογείωσης της εναέριας πλατφόρμας έως τη στιγμή προσγείωσής της.



Εικόνα 4.6: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας λήψεως δεδομένων.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.6, με την εκκίνηση της διαδικασίας γίνεται έλεγχος των συστημάτων του UAV, ο οποίος πραγματοποιείται από το ίδιο το UAV. Εφόσον, όλα τα συστήματα της εναέριας πλατφόρμας δουλεύουν σωστά (System

Ready) γίνεται εκκίνηση του κόμβου Urg_Node, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη λήψη δεδομένων από τη LiDAR συσκευή. Αν η εκκίνηση είναι επιτυχής, η διαδικασία προχωράει στην εκτέλεση του Manproxy, διαφορετικά επανεκκινείται ο κόμβος Urg_Node. Το Manproxy, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο Κεφάλαιο, επιστρέφει πληροφορίες που λαμβάνει από τον Flight Controller του UAV, σχετικές με το υψόμετρο και τον προσανατολισμό του συνολικού συστήματος. Αν η συγκεκριμένη ενέργεια αποτύχει, γίνεται επανεκκίνηση του Manproxy, διαφορετικά, η διαδικασία προχωράει στη λήψη δεδομένων για τον χώρο. Αρχικά λαμβάνεται πληροφορία, με την εντολή status, για το υψόμετρο, έπειτα για τον προσανατολισμό και τέλος, από τη συσκευή LiDAR, για το χώρο. Αν η τιμή του υψομέτρου είναι θετική, γίνεται αποθήκευση των τιμών που λήφθηκαν και στη συνέχεια, γίνεται έλεγχος για το αν έχει δοθεί εντολή για τερματισμό της διαδικασίας. Αν το υψόμετρο είναι αρνητικό, γίνεται έλεγχος για τερματισμό της διαδικασίας, χωρίς να γίνει αποθήκευση των δεδομένων. Τέλος, εφόσον δοθεί εντολή για τερματισμό της διαδικασίας, η λήψη δεδομένων τερματίζεται, διαφορετικά, δίνεται νέα εντολή status, για λήψη νέων δεδομένων.

5. Πειραματικά αποτελέσματα

Προκειμένου να διερευνηθεί η λειτουργία του συστήματος μέτρησης που αναπτύχθηκε, πραγματοποιήθηκαν πειράματα που είχαν ως στόχο να επιβεβαιωθεί η ορθή του λειτουργία και να υπολογιστεί η ακρίβεια των μετρήσεων που λαμβάνονται.

5.1 Η λειτουργία του LiDAR σε απόσταση μικρότερη των 10 m

Σύμφωνα με τον κατασκευαστή του LiDAR Hokuyo UTM-30LX-EW, η ακρίβεια του σε αποστάσεις μικρότερες των 10 m και σε επιφάνεια White Kent Sheet (λευκή επιφάνεια χαρτιού διαστάσεων 16.2 cm x 21.6 cm) είναι ± 30 mm.

Προκειμένου να εξακριβωθεί η παραπάνω πληροφορία πραγματοποιήθηκαν στο χώρο του Εργαστηρίου τα εξής πειράματα: τοποθετήθηκε το LiDAR στο έδαφος και έπειτα διαιρέθηκε μια απόσταση 5 m σε 5 τμήματα με σχετική απόσταση 1 m μεταξύ τους. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε μια λευκή επιφάνεια, διαστάσεων 55 cm x 55 cm, η οποία τοποθετήθηκε στις αποστάσεις που προαναφέρθηκαν (Εικόνα 5.1). Έπειτα γινόταν σάρωση της επιφάνειας 1000 φορές. Επιπλέον μεταξύ της συσκευής LiDAR και της επιφάνειας τοποθετήθηκε μια μετροταινία, που χρησιμοποιήθηκε ως σημείο αναφοράς για την ακρίβεια του οργάνου. Ακολούθως έγινε επεξεργασία των μετρήσεων που ελήφθησαν.

Η επεξεργασία που έγινε είναι η ακόλουθη: από το σύνολο των 1000 σαρώσεων, που πραγματοποιήθηκαν, υπολογίστηκε αρχικά ο μέσος όρος των τιμών αυτών προβάλλοντας έτσι την μέση απόσταση του αντικειμένου από το LiDAR. Έπειτα, έγινε υπολογισμός της τυπικής απόκλισης των μετρήσεων ώστε να έχουμε μια εικόνα της απόκλισης των μετρήσεων που λαμβάνονται από τη συσκευή σε σχέση με την μέση απόσταση του αντικειμένου, που υπολογίστηκε και τέλος έγινε σύγκριση των τιμών αυτών με τις προδιαγραφές που καθορίζει ο κατασκευαστής.

Στον Πίνακα 5.1 παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων. Αποδίδονται δύο τιμές για κάθε μέτρηση, μια για

κεντρικές τιμές και μια για μετρήσεις στα άκρα των επιφανειών. Στις επιμέρους γραμμές της αριστερής στήλης αναφέρεται η απόσταση της επιφάνειας από το LiDAR και το γεγονός αν αναφερόμαστε σε κεντρικές τιμές ή στα άκρα (σημειώνονται ως “center” και “edge”, αντίστοιχα).



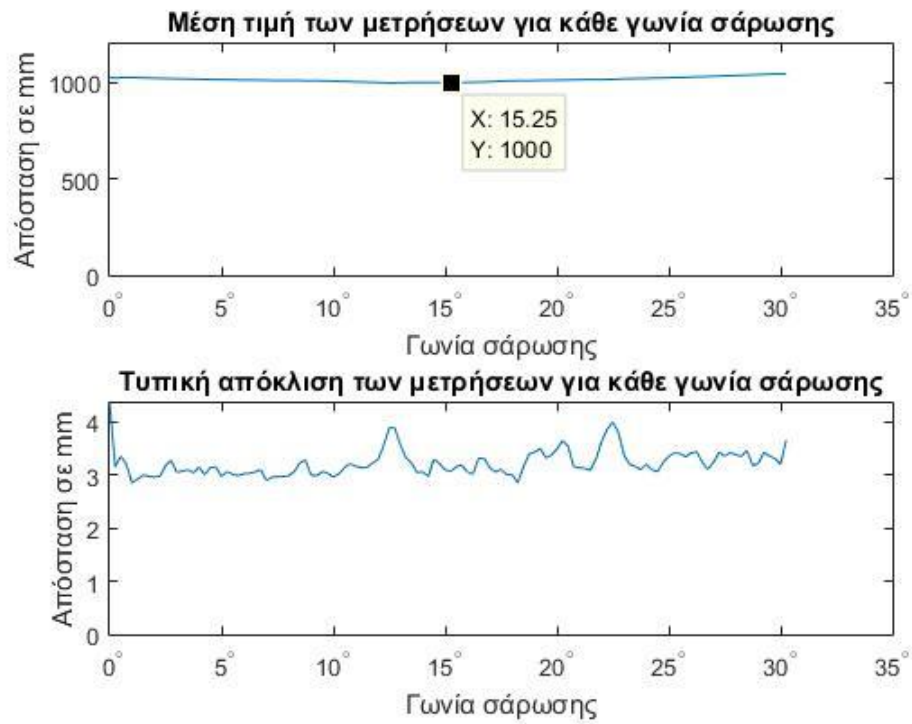
Εικόνα 5.1 Η διάταξη μετρήσεων με το LiDAR.

Πίνακας 5.1: Μετρήσεις με το LiDAR για αποστάσεις μικρότερες των 10m.

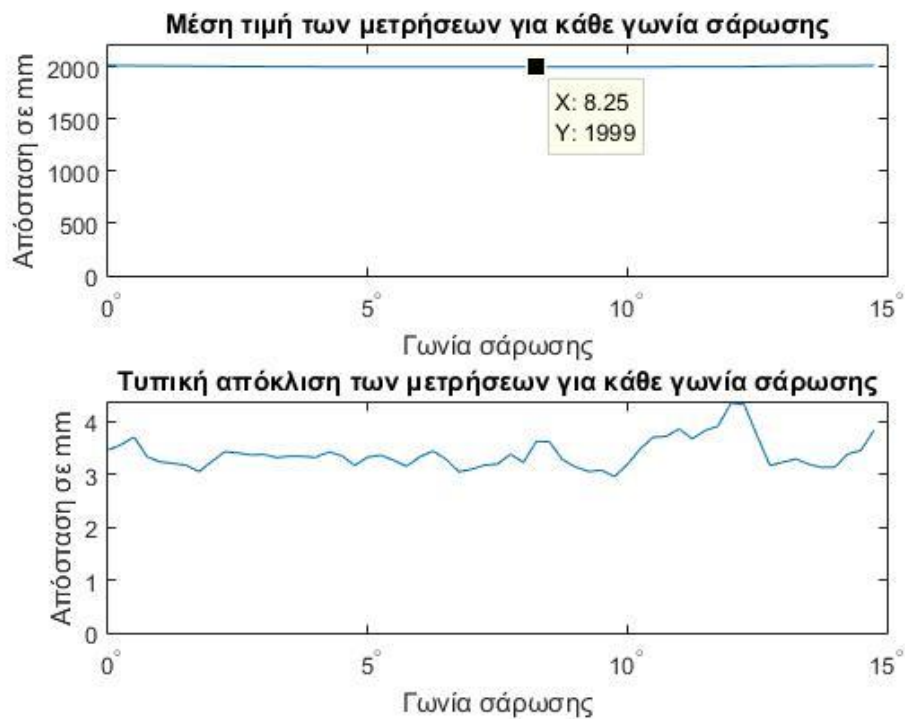
	Μέτρηση μετροταινίας (mm)	Μέση τιμή (mm)	Τυπική απόκλιση (mm)	Μέγιστη τιμή (mm)	Ελάχιστη τιμή (mm)
1 m edge	1000	1017.4	3.0974	1032	1014
1 m center	1000	1000.5	2.8522	1011	991
2 m edge	2000	2007.9	3.2362	2018	2000
2 m center	2000	1998.3	3.1948	2009	1986
3 m edge	3000	3005.4	3.5181	3017	3003
3 m center	3000	3001.8	3.3564	3013	2991
4 m edge	4000	4000.2	3.7227	4011	3995
4m center	4000	3997.4	3.9382	4008	3992
5 m edge	5000	5002.6	3.7286	5017	4994
5 m center	5000	4999.7	3.5038	5009	4990

Υπενθυμίζεται ότι τα αποτελέσματα προέκυψαν από ένα σύνολο 1000 σαρώσεων στο κάθε πείραμα. Επιπλέον, οι συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα είναι σε φωτισμό δωματίου με χαμηλή επίδραση εξωτερικής οπτικής ακτινοβολίας, μη επηρεάζοντας κατά αυτό τον τρόπο έντονα τα αποτελέσματα.

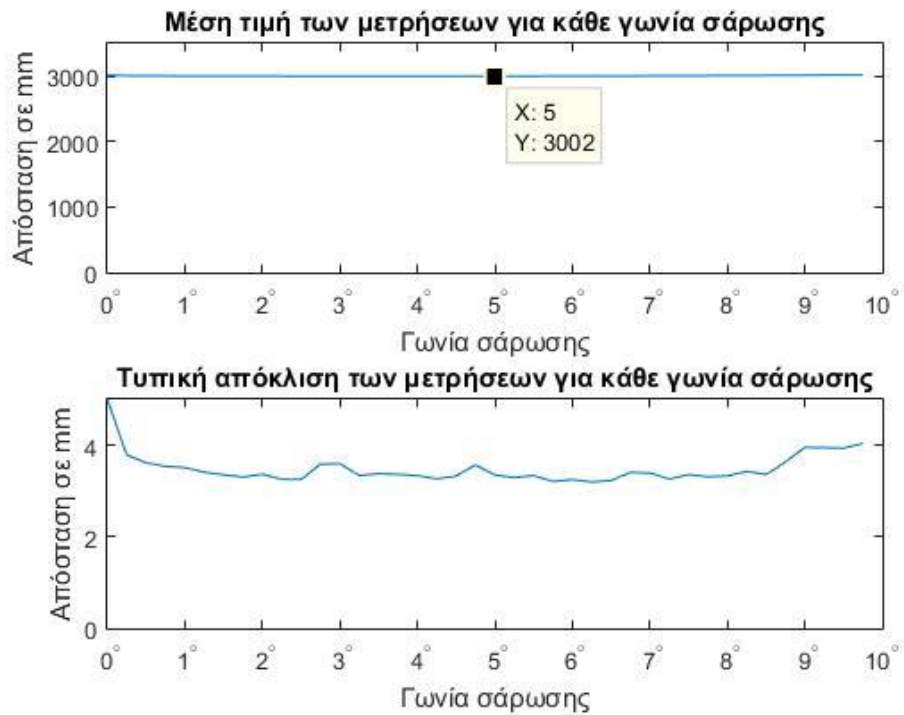
Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις με τις μέσες τιμές των αποστάσεων και τις τυπικές τους αποκλίσεις για τις μετρήσεις που έχουν ληφθεί (Εικόνες 5.2 – 5.6). Σημειώνεται ότι ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει την γωνία σάρωσης για την οποία έχει ληφθεί η μέτρηση (λαμβάνονται μετρήσεις για 270° με διακριτική ικανότητα 0.25°), ενώ προβάλλονται ενδεικτικά και κάποιες τιμές στη γραφική παράσταση της μέσης τιμής προκειμένου να εξακριβωθεί η ακρίβεια του οργάνου. Σημειώνεται ότι ένας μεγάλος αριθμός μετρήσεων δεν έχει αποτυπωθεί, καθώς λήφθηκε πληροφορία μόνο για τις μοίρες που συντελλούν στην αποτύπωση της επιφάνειας.



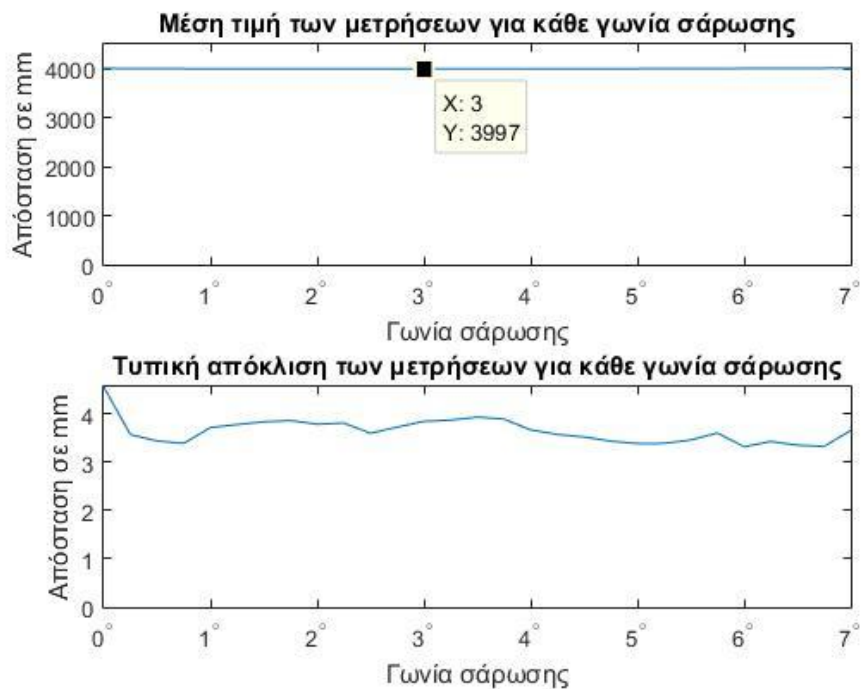
Εικόνα 5.2: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση μετρήσεων σε απόσταση 1 m.



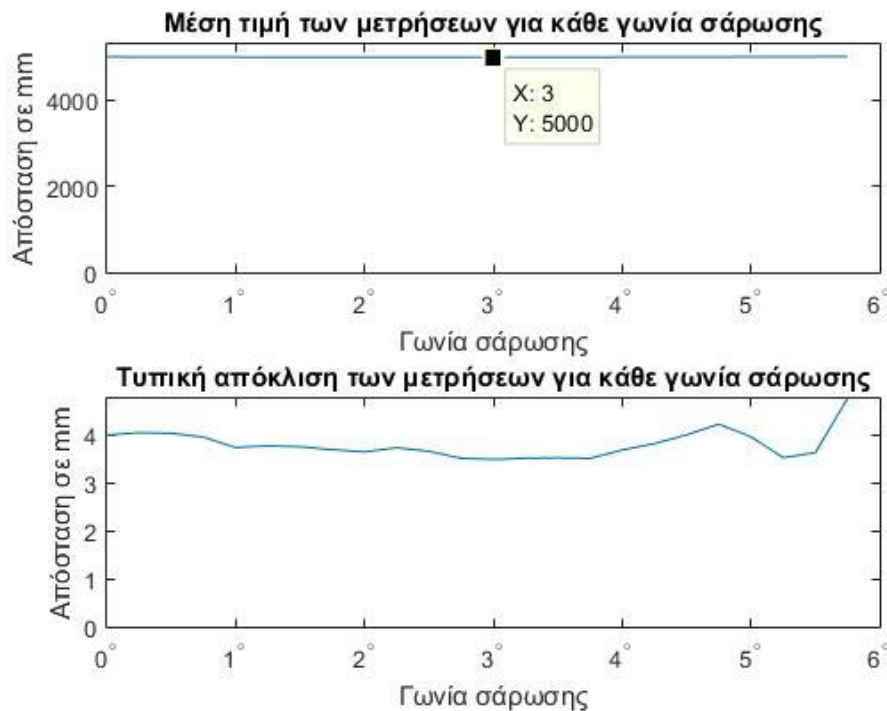
Εικόνα 5.3: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση μετρήσεων σε απόσταση 2 m.



Εικόνα 5.4: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση μετρήσεων σε απόσταση 3 m.



Εικόνα 5.5: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση μετρήσεων σε απόσταση 4 m.



Εικόνα 5.6: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση μετρήσεων σε απόσταση 5 m.

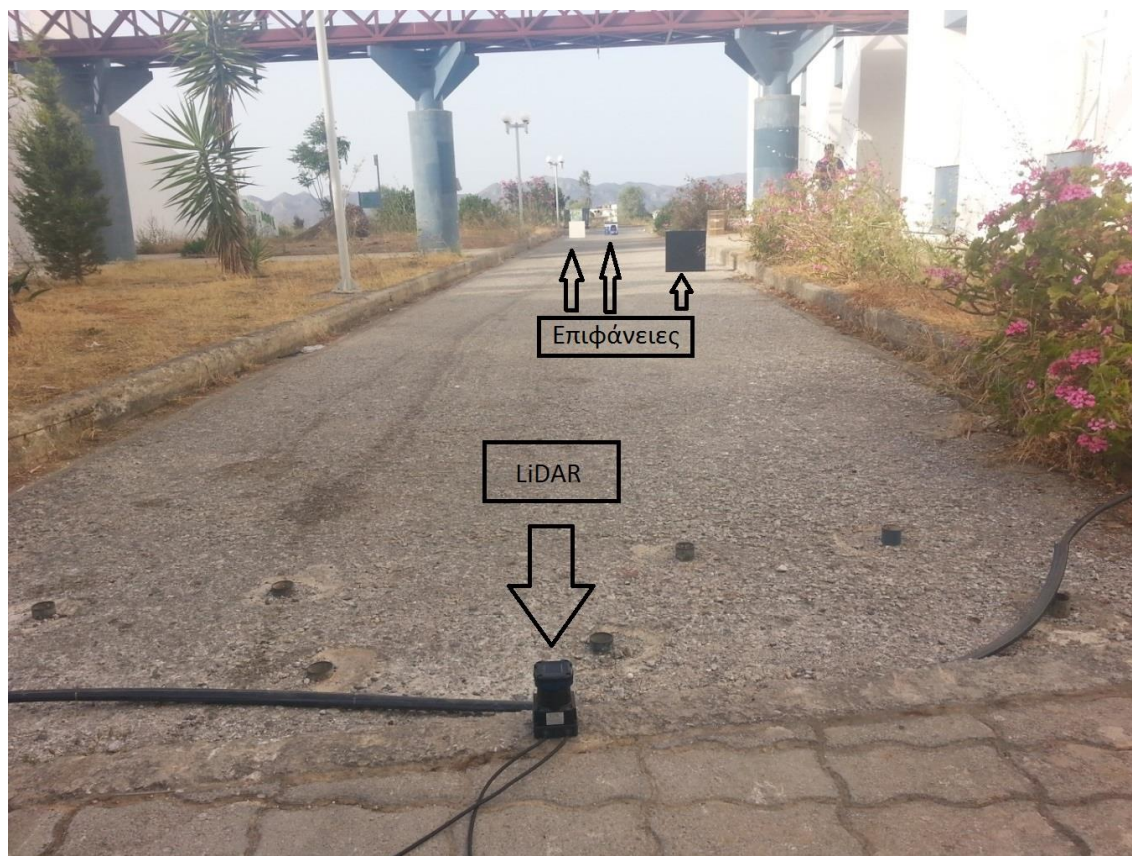
Όπως προκύπτει τόσο από τον Πίνακα 5.1, όσο και από τα τις γραφικές παραστάσεις των Εικόνων 5.2 – 5.6, το όργανο είναι αρκετά ακριβές με μέγιστη απόκλιση, σε κεντρική τιμή, 2.6 mm από την πραγματική απόσταση (για απόσταση μετροταινίας: 4000 mm – μέση τιμή οργάνου: 3997.4) , όπως αυτή μετρήθηκε με τη χρήση της μετροταινίας. Επιπλέον η τυπική απόκλιση των τιμών είναι μικρότερη των 5 mm, επιστρέφοντας μετρήσεις εντός των ορίων που παρέχει ο κατασκευαστής για καλές μετρήσεις (αποστάσεις 0.1 m – 10 m : $\sigma < 10$ mm).

5.2 Η λειτουργία του LiDAR σε απόσταση μεγαλύτερη των 10 m

Για αποστάσεις μεγαλύτερες των 10 m η κατασκευάστρια εταιρία του LiDAR δίνει απόκλιση μετρήσεων μέχρι τα 30 m, περίπου 50 mm για ιδανική επιφάνεια τύπου White Kent Sheet. Προκειμένου να υπολογιστεί η απόκλιση του LiDAR σε αυτές τις αποστάσεις πραγματοποιήθηκαν τα εξής πειράματα. Τοποθετήθηκε το LiDAR στο έδαφος και έπειτα τοποθετούνταν μπροστά του διάφορες επιφάνειες και υπολογιζόταν η μέγιστη απόσταση στην οποία γινόταν ορατό το αντικείμενο από το

σαρωτή (Εικόνα 5.7). Οι συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα ήταν κατά την διάρκεια απογευματινών ωρών, με αρκετή σχετικά φωτεινότητα, και οι επιφάνειες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν δύο επιφάνειες διαστάσεων 55 cm x 55 cm (μία λευκή και μία μαύρη), αλλά και δύο επιπλέον: μία καφέ και μία μπλε έντονα ανακλαστική, προκειμένου να παρατηρηθεί πόσο εύκολα γίνεται ο εντοπισμός των αντικειμένων αυτών. Ο χρόνος σάρωσης του κάθε πειράματος ήταν 15 sec.

Στον Πίνακα 5.2 παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων. Στον Πίνακα 5.2 αναφέρονται επίσης οι επιφάνειες που χρησιμοποιήθηκαν, οι μέγιστες αποστάσεις στις οποίες εντοπίστηκαν, οι τυπικές αποκλίσεις τους σε αυτές, καθώς και οι ώρες που πραγματοποιήθηκαν οι εκάστοτε μετρήσεις.



Εικόνα 5.7: Εντοπισμός επιφανειών σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 10 m χρησιμοποιώντας το LiDAR.

Πίνακας 5.2: Μετρήσεις με το LiDAR για αποστάσεις μεγαλύτερες των 10 m.

	Μέγιστη απόσταση (mm)	Τυπική απόκλιση (mm)	Μέγιστη τιμή (mm)	Ελάχιστη τιμή (mm)	Ωρα
black	9962.5	5.1329	10105	9256	17:00
white	9855.9	8.0057	9889	9828	17:00
white	12026	8.8429	12056	11990	17:30
black	12661	11.019	12703	12625	18:15
white	28235	10.921	28864	27715	18:15
white	31690	7.9282	31718	31662	19:00
brown	22877	8.245	22910	22846	19:00
black	11854	7.3523	11879	11823	19:00
white	31688	8.9506	31718	31659	19:10
reflective blu	34422	9.9686	34463	34379	19:10
black	11853	7.8341	11878	11829	19:10
white	35173	11.467	35210	35086	19:30
reflective blu	33385	6.9376	33412	33354	19:30
black	14020	9.3358	14072	13986	19:30

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.2 παρατηρείται ότι η μέγιστη απόσταση εντοπισμού η οποία μετρήθηκε, αυξάνεται με το πέρας της ώρας για όλες τις επιφάνειες. Αυτό συμβαίνει γιατί η επίδραση της φωτεινότητας που οφείλεται στο ηλιακό φως γίνεται όλο και μικρότερη, παρέχοντας έτσι μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα στις μετρήσεις. Έτσι, παρατηρούμε ότι η άσπρη επιφάνεια σε έντονη επιρροή του ηλιακού φωτός (17:00) εντοπίζεται μόλις στα 9.9 m, ενώ μετά τη δύση

του Ήλιου η απόσταση εντοπισμού φτάνει τα 35 m (19:30). Επίσης, και η τυπική απόκλιση σε παρόμοιες αποστάσεις διαφοροποιείται προς θετικές τιμές όσο περνάει η ώρα. Η μαύρη επιφάνεια λόγω έντονης απορροφητικότητας εντοπίστηκε αρχικά στα 9.9 m καταλήγοντας τελικά στα 11.8 m, με πολύ μικρές διαφοροποιήσεις στην τιμή της τυπικής απόκλισης. Όσον αφορά την καφέ επιφάνεια, που είναι ένα ενδιάμεσο χρώμα μεταξύ άσπρου και μαύρου με χαμηλή σχετικά απορροφητικότητα, εντοπίζεται με μία απόκλιση 8 mm σε απόσταση 22.8 m, τιμή κατά πολύ μεγαλύτερη αυτής της μαύρης επιφάνειας (11.8 m) και αρκετά κοντά στην άσπρη (31.6 m). Τέλος, παρατηρείται ότι για την ανακλαστική μπλε επιφάνεια, ο εντοπισμός της πλησιάζει αρκετά την απόσταση της άσπρης επιφάνειας, με τυπικές αποκλίσεις πολύ καλές όσο μειώνεται ο φωτισμός (6.93 mm).

Συνοψίζοντας, για αποστάσεις μεγαλύτερες των 10 m και σε συνθήκες όπου υπάρχει επίδραση εξωτερικής οπτικής ακτινοβολίας, η συσκευή LiDAR εντόπισε τις επιφάνειες επιτυχώς σε μεγάλες αποστάσεις, με τυπικές αποκλίσεις 5 mm ~ 11 mm (ο κατασκευαστής δίνει τυπική απόκλιση $\sigma < 50$ mm για αποστάσεις 10 m – 30 m) καθιστώντας έτσι εφικτό τον εντοπισμό επιφανειών σε μεγάλες αποστάσεις.

5.3 Η λειτουργία του LiDAR σε απόσταση μικρότερη των 10 m με παρεμβολή εμποδίου

Προκειμένου να γίνει αξιολόγηση της ακρίβειας του LiDAR για θέσεις αντικειμένων και εμποδίων σε διαφορετικό βάθος, πραγματοποιήθηκαν κάποια πειράματα. Σκοπός των πειραμάτων αυτών είναι να γίνει έλεγχος του πόσο επηρεάζονται οι μετρήσεις των μακρινών επιφανειών, όταν σε κοντινότερη απόσταση παρεμβάλλονται άλλες επιφάνειες ή εμποδία, όπως κολώνες ή τοιχία. Στο εν λόγω πείραμα, μεταξύ της λευκής επιφάνειας 55 cm x 55 cm τοποθετούνταν ένα αντικείμενο σε κοντινότερη απόσταση (Εικόνα 5.8).

Και σε αυτή την περίπτωση τοποθετήθηκε στο έδαφος, στο χώρο του εργαστηρίου, η συσκευή LiDAR, καθώς και η μετροταινία, και στις αποστάσεις στο διάστημα των 5 μέτρων, τοποθετούνταν η επιφάνεια σε κάποια απόσταση και σε μια κοντινότερη το αντικείμενο (ένα κυλινδρικό κουτί). Έπειτα, πραγματοποιείτο 1000 σαρώσεις με το LiDAR..

Μετά την επεξεργασία των μετρήσεων προέκυψε ο Πίνακας 5.3, όπου παρουσιάζονται ως κεντρικές τιμές (center), τα αποτελέσματα της σάρωσης σχετικά με το αντικείμενο – εμπόδιο, ενώ ως ακραίες (edge), τα αποτελέσματα της σάρωσης σχετικά με την επιφάνεια. Να σημειωθεί ότι στα αριστερά του πίνακα παρουσιάζεται η θέση της επιφάνειας (σε m) που χρησιμοποιείται και γίνεται διάκριση των αποτελεσμάτων με το διακριτικό «center», όταν πρόκειται για το αντικείμενο – εμπόδιο, και «edge», όταν πρόκειται για την επιφάνεια. Επιπλέον στη στήλη «Μέτρηση μετροταινίας» η τιμή πριν το διαχωριστικό «\» υποδηλώνει την απόσταση της επιφάνειας (σε mm) όπως αυτή μετρήθηκε από τη μετροταινία, ενώ η τιμή μετά το διαχωριστικό «\» υποδηλώνει την απόσταση του αντικειμένου (σε mm), όπως αυτή μετρήθηκε επίσης από τη μετροταινία.

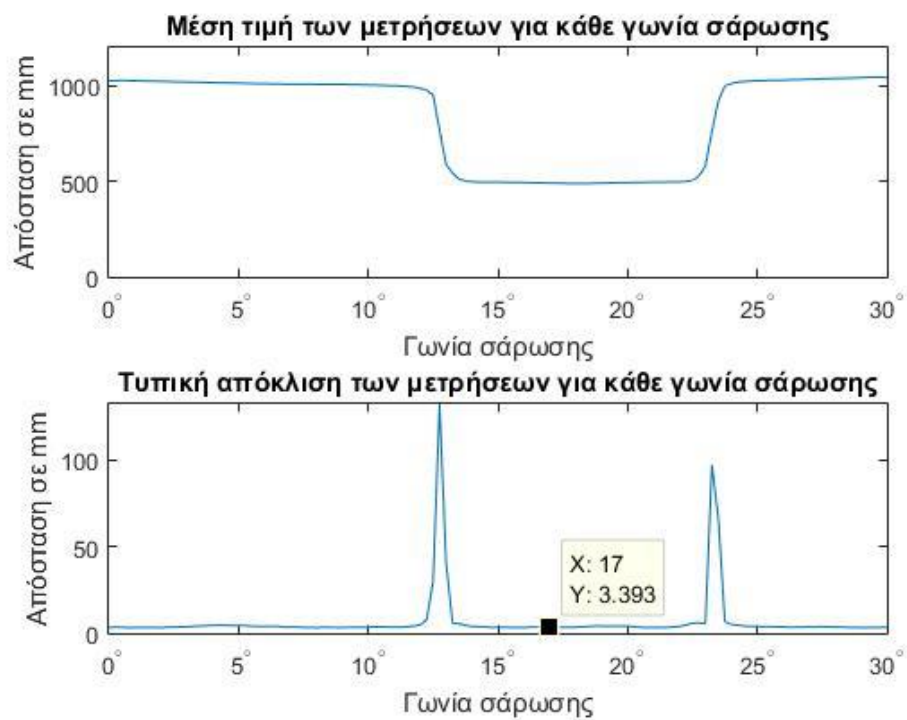


Εικόνα 5.8: Η διάταξη μετρήσεων με το LiDAR με την παρεμβολή εμποδίου.

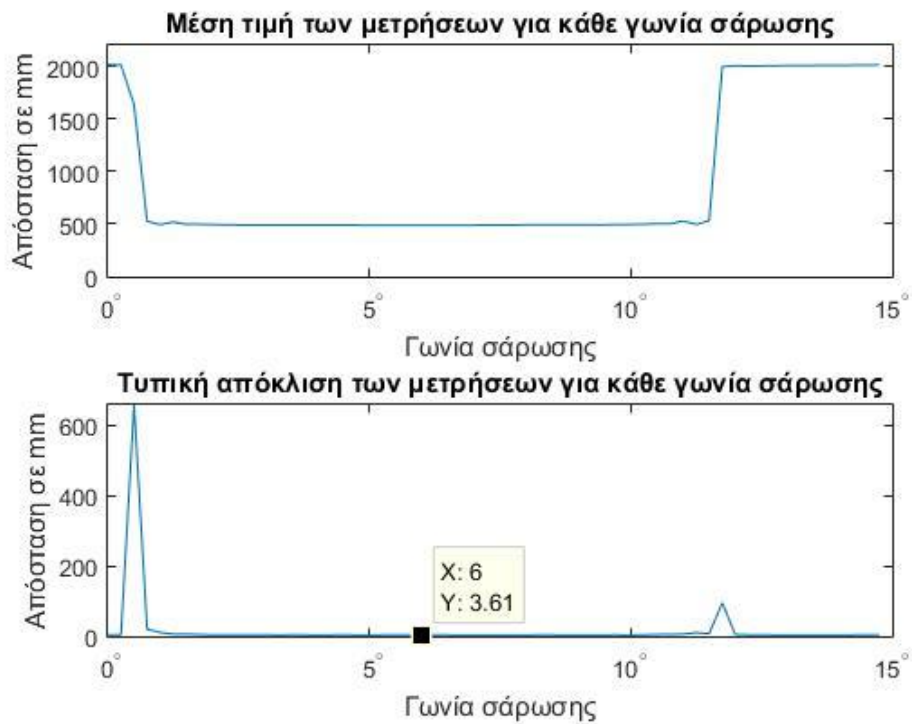
Πίνακας 5.3: Μετρήσεις με το LiDAR και με την παρεμβολή εμποδίου.

	Μέτρηση μετροταινίας (mm)	Μέση τιμή (mm)	Τυπική απόκλιση (mm)	Μέγιστη τιμή (mm)	Ελάχιστη τιμή (mm)
1 m center	1000/500	498.5	3.3257	507	487
1 m edge	1000/500	1026.7	3.1379	1037	1016
2 m center	2000/500	498.6	3.2372	502	489
2 m edge	2000/500	2008.3	3.1477	2018	1997
2 m center	2000/1000	1002.2	3.2040	1011	992
2 m edge	2000/1000	2007.6	3.4171	2017	2000
3 m center	3000/1000	1000.1	3.3232	1010	990
3 m edge	3000/1000	3005.3	3.5812	3016	2998
3 m center	3000/2000	1999	3.5504	2016	1987
3 m edge	3000/2000	3005.1	3.0141	3025	2996
4 m center	4000/1000	998.8	3.4632	1010	988
4 m edge	4000/1000	4007.9	3.6729	4026	4002
4 m center	4000/2000	2003.9	4.2873	2016	1995
4 m edge	4000/2000	4004.6	4.4175	4018	3989
4 m center	4000/3000	3005.1	4.61	3023	2997
4 m edge	4000/3000	4000.4	3.7193	4014	3997
5 m center	5000/2000	2005.5	4.0340	2020	1992
5 m edge	5000/2000	5002.4	4.0129	5015	4990
5 m center	5000/3000	3004.8	4.0567	3027	2993
5 m edge	5000/3000	5002.8	3.8874	5016	4996

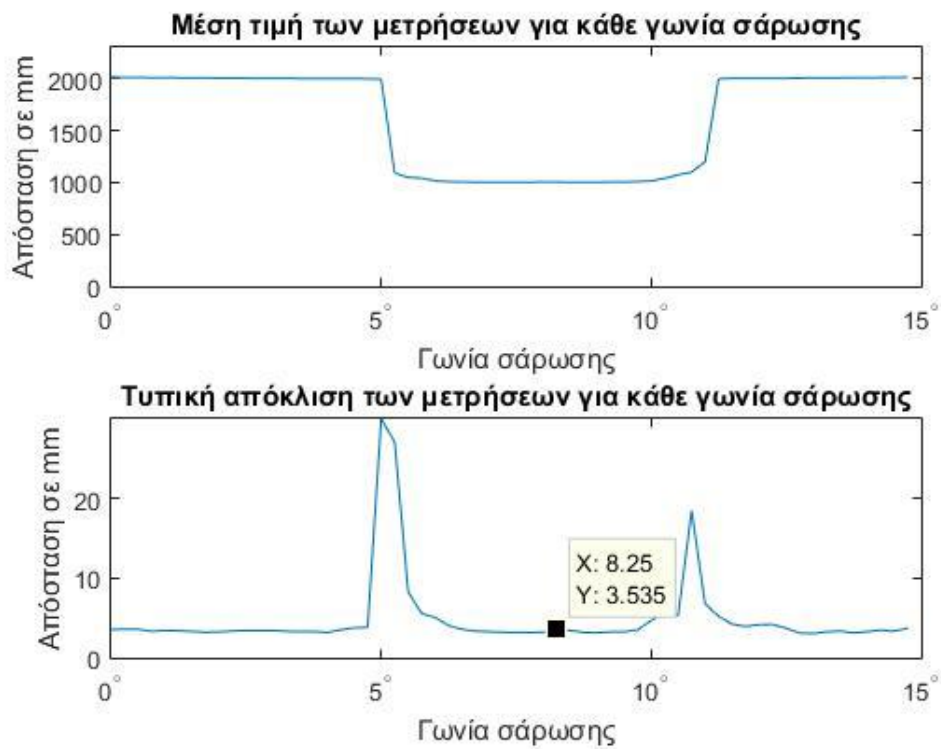
Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από τα αποτελέσματα (Εικόνες 5.9 – 5.18). Η πρώτη γραφική παράσταση δείχνει τη μέση τιμή των αποτελεσμάτων, ενώ η δεύτερη την τυπική απόκλιση των μετρήσεων. Δηλώνεται πως και σε αυτό το πείραμα δεν λήφθηκαν μετρήσεις για όλες τις μοίρες, ενώ υπενθυμίζεται ότι ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει τις τιμές της γωνίας σάρωσης, για την οποία λήφθηκε μέτρηση, με διακριτική ικανότητα 0.25° .



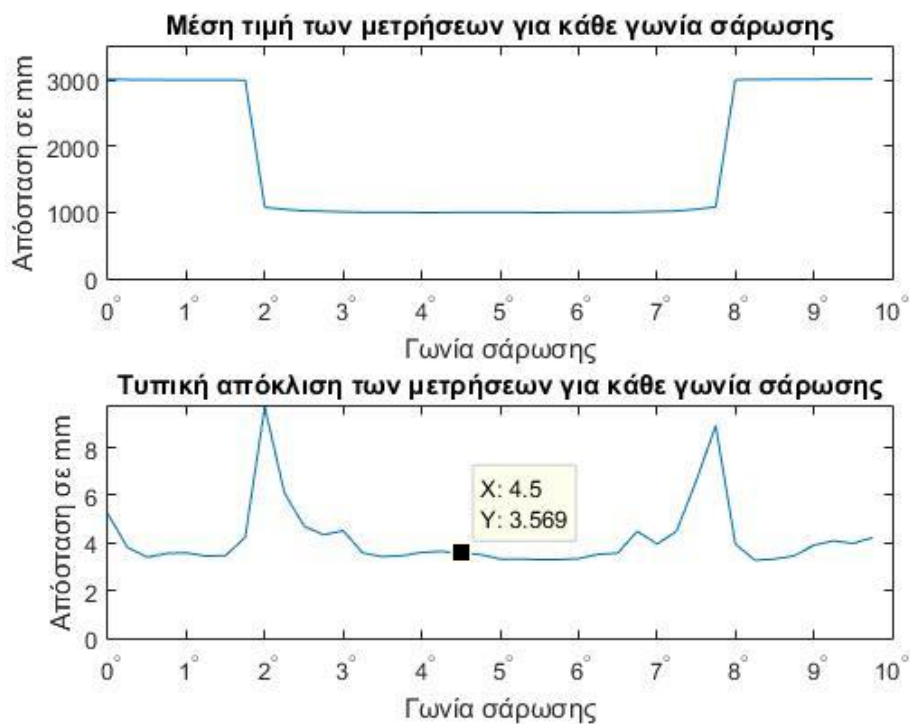
Εικόνα 5.9: Επιφάνεια σε απόσταση 1 m και αντικείμενο σε απόσταση 0.5 m.



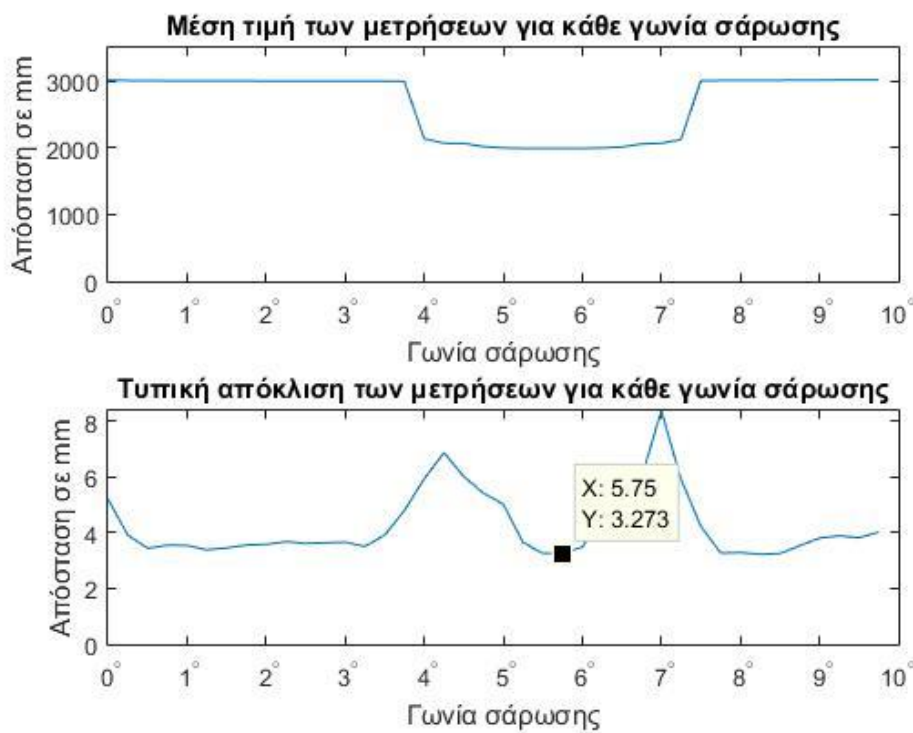
Εικόνα 5.10: Επιφάνεια σε απόσταση 2 m και αντικείμενο σε απόσταση 0.5 m.



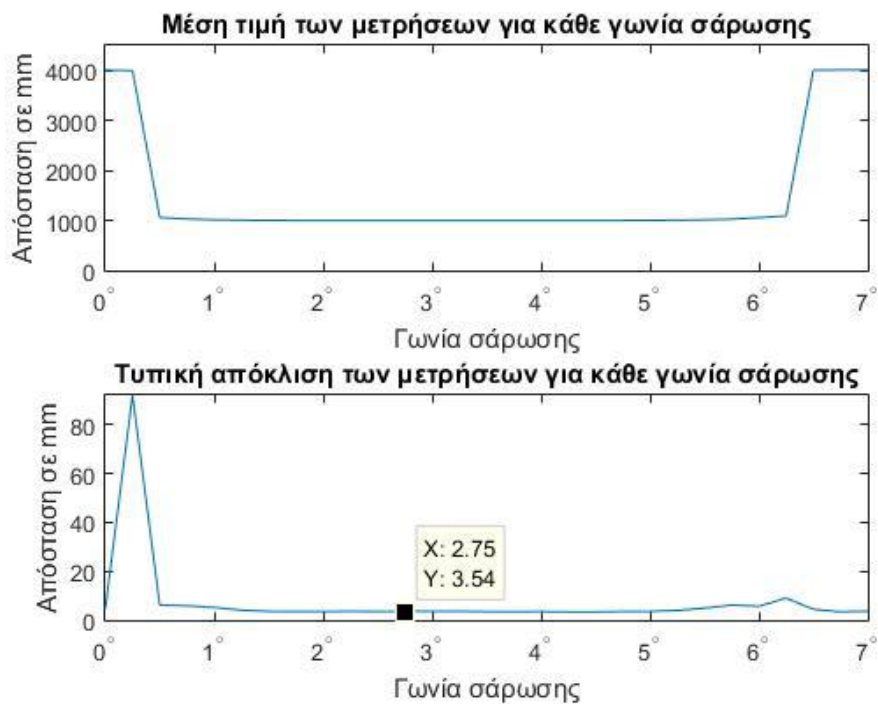
Εικόνα 5.11: Επιφάνεια σε απόσταση 2 m και αντικείμενο σε απόσταση 1 m.



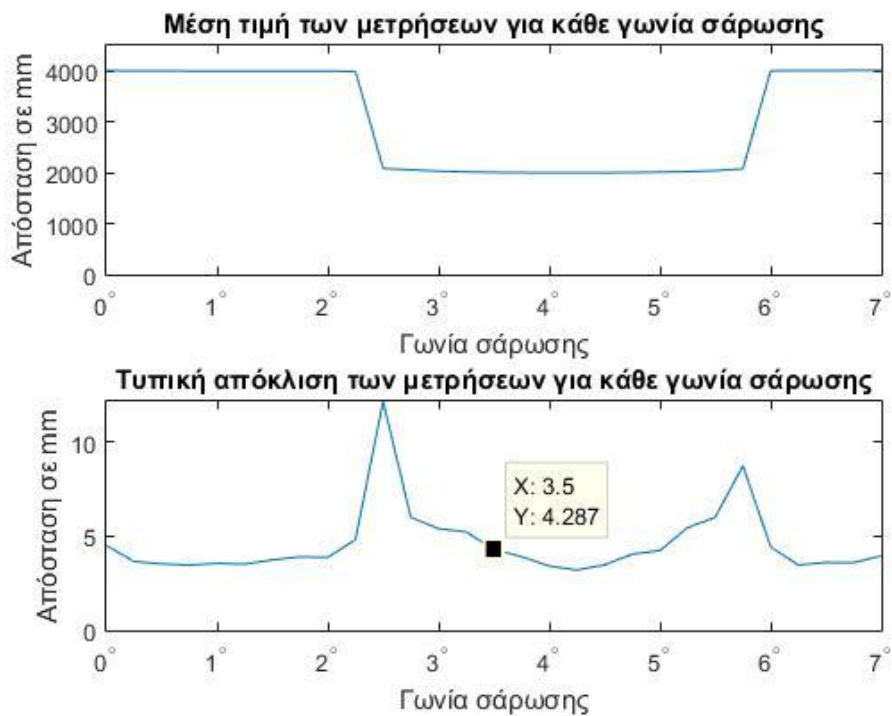
Εικόνα 5.12: Επιφάνεια σε απόσταση 3 m και αντικείμενο σε απόσταση 1 m.



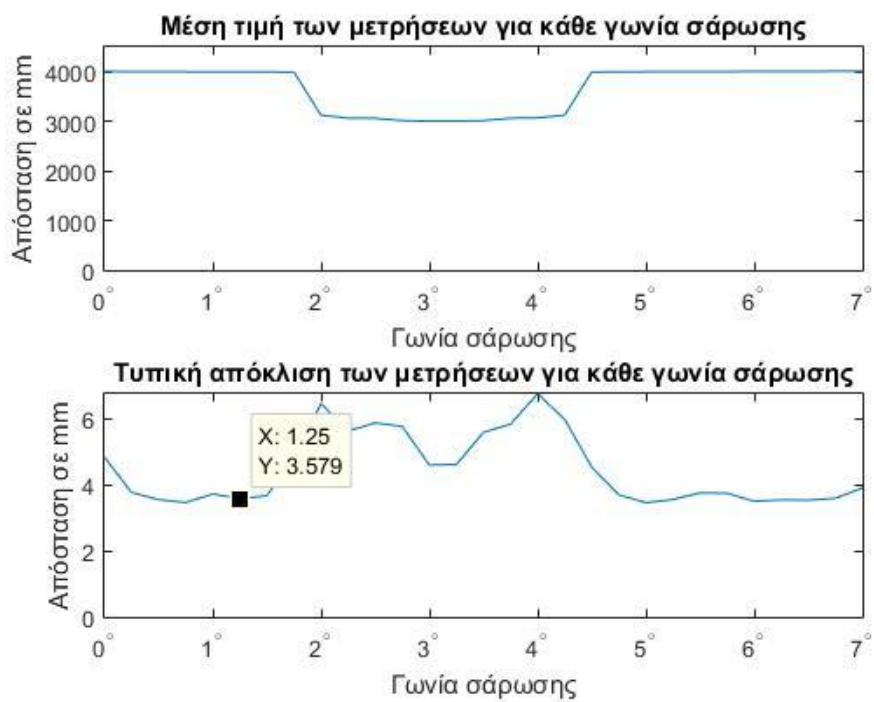
Εικόνα 5.13: Επιφάνεια σε απόσταση 3 m και αντικείμενο σε απόσταση 2 m.



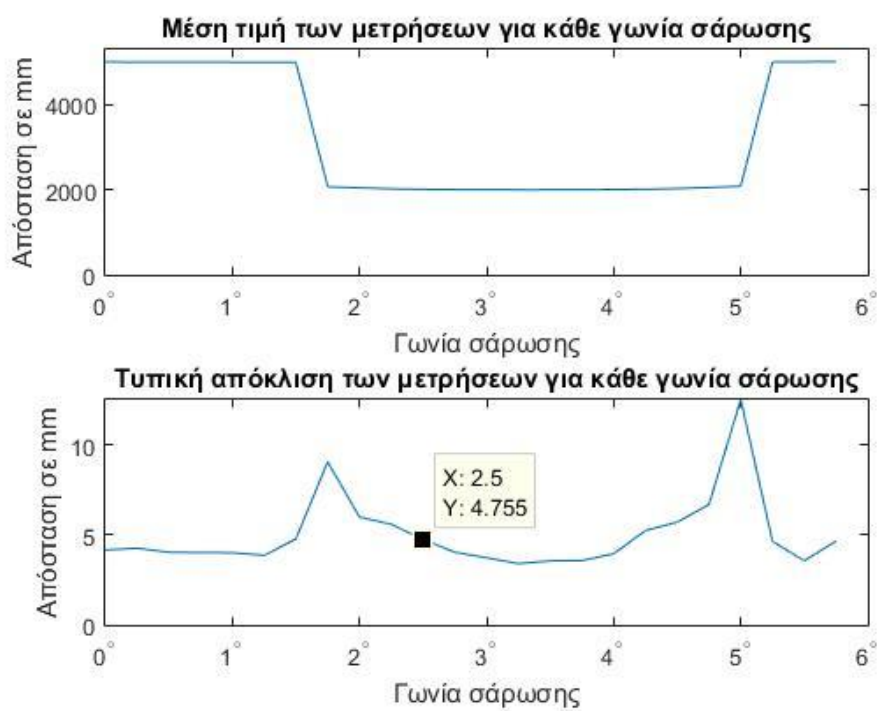
Εικόνα 5.14: Επιφάνεια σε απόσταση 4 m και αντικείμενο σε απόσταση 1 m.



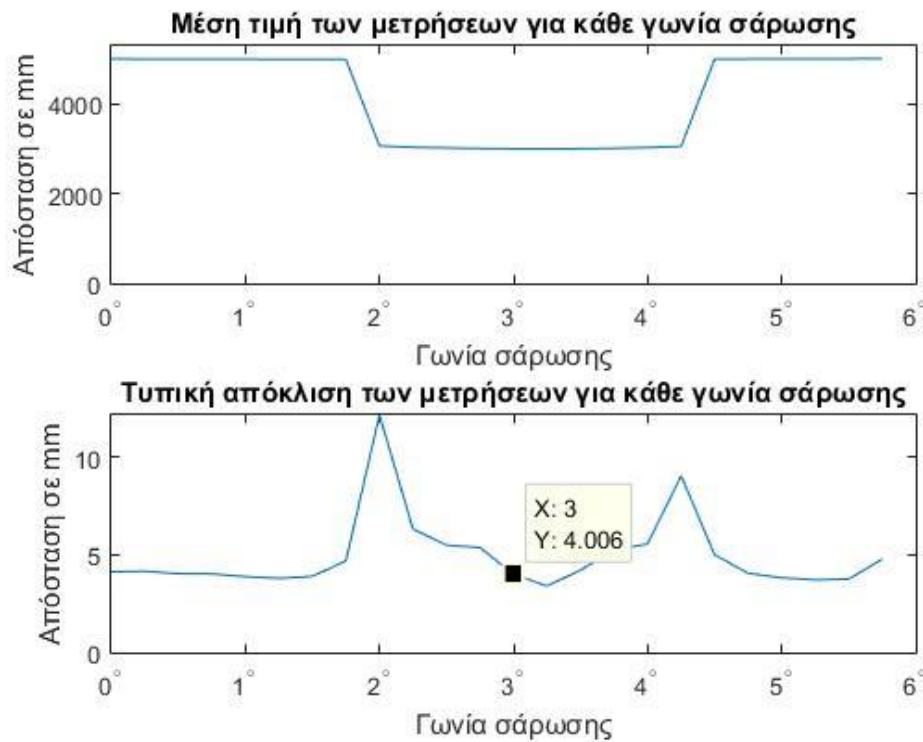
Εικόνα 5.15: Επιφάνεια σε απόσταση 4 m και αντικείμενο σε απόσταση 2 m.



Εικόνα 5.16: Επιφάνεια σε απόσταση 4 m και αντικείμενο σε απόσταση 3 m.



Εικόνα 5.17: Επιφάνεια σε απόσταση 5 m και αντικείμενο σε απόσταση 2 m.



Εικόνα 5.18: Επιφάνεια σε απόσταση 5 m και αντικείμενο σε απόσταση 3 m.

Πριν γίνει μελέτη των αποτελεσμάτων να σημειωθεί ότι τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες δωματίου με όχι ιδιαίτερα υψηλό φωτισμό και με ελάχιστη επιρροή από το εξωτερικό περιβάλλον, προκειμένου να γίνει καλύτερη αξιολόγηση των μετρήσεων.

Όσον αφορά την ακρίβεια του οργάνου γίνεται σύγκριση μεταξύ των τιμών που επιστρέφει το LiDAR με αυτές τις μετροταινίας. Όπως φαίνεται, η μέγιστη απόκλιση από την πραγματική τιμή είναι 5.5 mm (για επιφάνεια σε απόσταση 5 m και αντικείμενο σε απόσταση 2 m), καθιστώντας το LiDAR αρκετά ακριβές για το σκοπό της παρούσας εργασίας (ο κατασκευαστής δίνει ακρίβεια ± 30 mm για αποστάσεις < 10 m). Παρατηρώντας τις τυπικές αποκλίσεις των μετρήσεων, προκύπτει το συμπέρασμα ότι τόσο για το αντικείμενο όσο και για τις επιφάνειες, οι αποκλίσεις σε οποιαδήποτε απόσταση αντικειμένου ή επιφάνειας είναι μικρότερες των 5.5 mm (ο κατασκευαστής δίνει $\sigma < 10$ mm για αποστάσεις μικρότερες των 10 m) εκτός από τα σημεία τα οποία βρίσκονται τα άκρα του αντικειμένου. Στην περίπτωση αυτή, λόγω

του γεγονότος ότι κάποιες ακτίνες laser φτάνουν μέχρι το αντικείμενο, ενώ άλλες φτάνουν μέχρι την επιφάνεια, καθιστούν ανακριβή την μέτρηση στα σημεία αυτά. Επιπλέον, και οι τιμές για τη μέση τιμή στα σημεία αυτά δεν είναι αξιόπιστες, εφόσον άλλοτε υπολογίζεται απόσταση έως το εμπόδιο και άλλοτε έως την επιφάνεια. Ωστόσο αυτό παρουσιάζεται μόνο σε περιπτώσεις έντονης διαφοράς βάθους και επηρεάζει μικρό αριθμό σημείων (1 – 2 σημεία) επηρεάζοντας ελάχιστα το τελικό αποτέλεσμα.

Συμπερασματικά, για όλα τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με τη συσκευή LiDAR προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

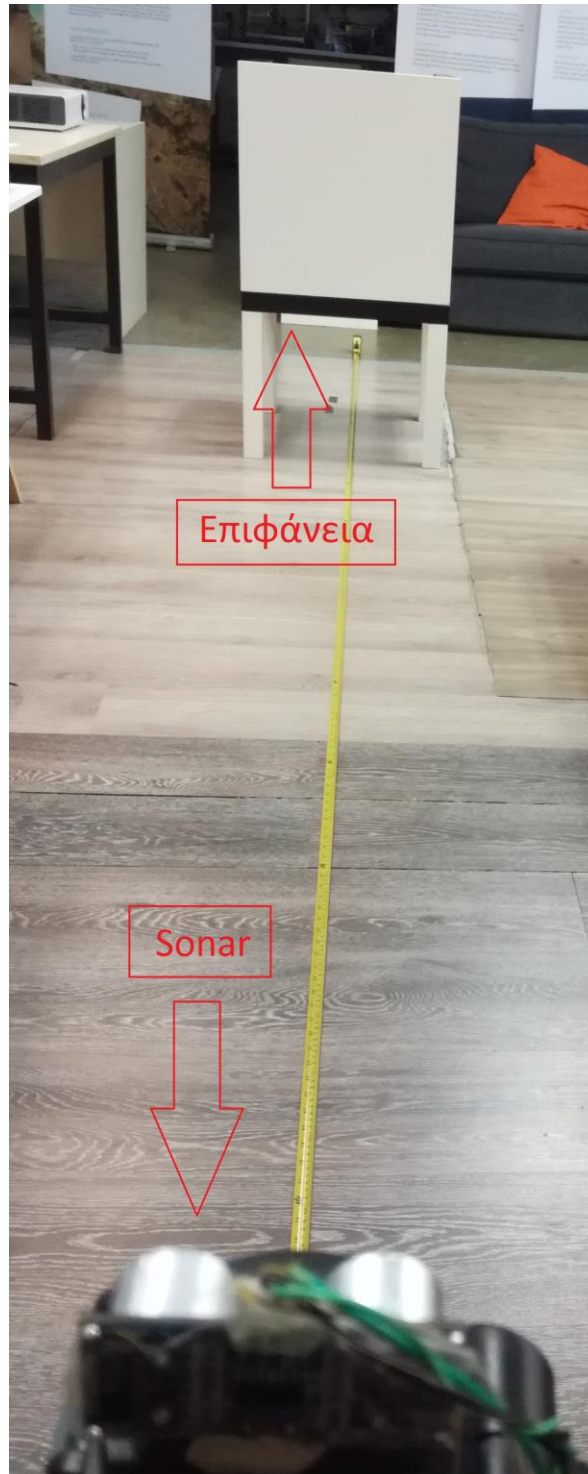
- Όσο πιο ανοιχτόχρωμη είναι η επιφάνεια, τόσο πιο ακριβή είναι τα αποτελέσματα, λόγω μεγαλύτερης ανακλαστικότητας του υλικού. Όσο πιο έντονη η επιρροή από εξωτερικό φωτισμό τόσο μειώνεται η ακρίβεια των μετρήσεων, εφόσον η λειτουργία του LiDAR στηρίζεται στη μέτρηση οπτικής ακτινοβολίας.
- Όσο μεγαλύτερη ανακλαστικότητα διαθέτει η επιφάνεια, τόσο πιο ακριβείς είναι οι μετρήσεις, καθώς αντανakλά πιο έντονα την οπτική ακτινοβολία που εκπέμπεται από το LiDAR.

5.4 Η λειτουργία του Sonar για τη λήψη δεδομένων σε χαμηλό ύψος

Όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3, στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται χρήση Sonar για την λήψη δεδομένων σχετικά με το ύψος, καθώς σε σχετικά χαμηλό υψόμετρο (< 4 m), ο Flight Controller δεν επιστρέφει αξιόπιστες τιμές. Για την αξιολόγηση του Sonar HC-SR04, πραγματοποιήθηκε το ακόλουθο πείραμα.

Στο χώρο του εργαστηρίου, τοποθετήθηκε το Sonar επάνω στη βάση μιας φωτογραφικής μηχανής. Έπειτα, τοποθετήθηκε στο έδαφος ένας μετρητής μήκους (μετροταινία) για τον εντοπισμό της πραγματικής απόστασης από το Sonar. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκε μια λευκή επιφάνεια απέναντι από το Sonar, η οποία απομακρυνόταν σταδιακά από το Sonar, προκειμένου να εντοπιστεί μια ασφαλής απόσταση για ακριβείς μετρήσεις (Εικόνα 5.19). Καθ'όλη τη διάρκεια του πειράματος γινόταν σύγκριση των αποτελεσμάτων που επέστρεφε το Sonar με αυτά της μετροταινίας στο πάτωμα (Εικόνα 5.20).

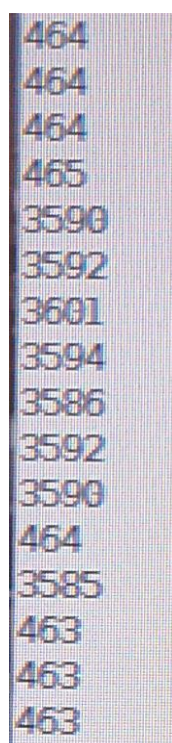
Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από το πείραμα αυτό, είναι πως το Sonar HC-SR04 μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις, όπου το υψόμετρο του χώρου προς σάρωση δεν ξεπερνά τα 4.5 m (Εικόνα 5.21), ενώ για μεγαλύτερα ύψη, δεν μπορεί να επιστρέψει ορθά αποτελέσματα, οπότε και συνίσταται η χρήση των μετρήσεων που επιστρέφει ο Flight Controller. Επιπλέον, προέκυψε ότι η απόκλιση των μετρήσεων που επέστρεφε το Sonar σε σχέση με αυτές που μετριόνταν από την μετροταινία, είναι μόλις 1 cm (Εικόνα 5.20).



Εικόνα 5.19: Πειραματική διάταξη Sonar – μετακινούμενης επιφάνειας.



Εικόνα 5.20: Σύγκριση αποτελεσμάτων Sonar – μετροταινίας.

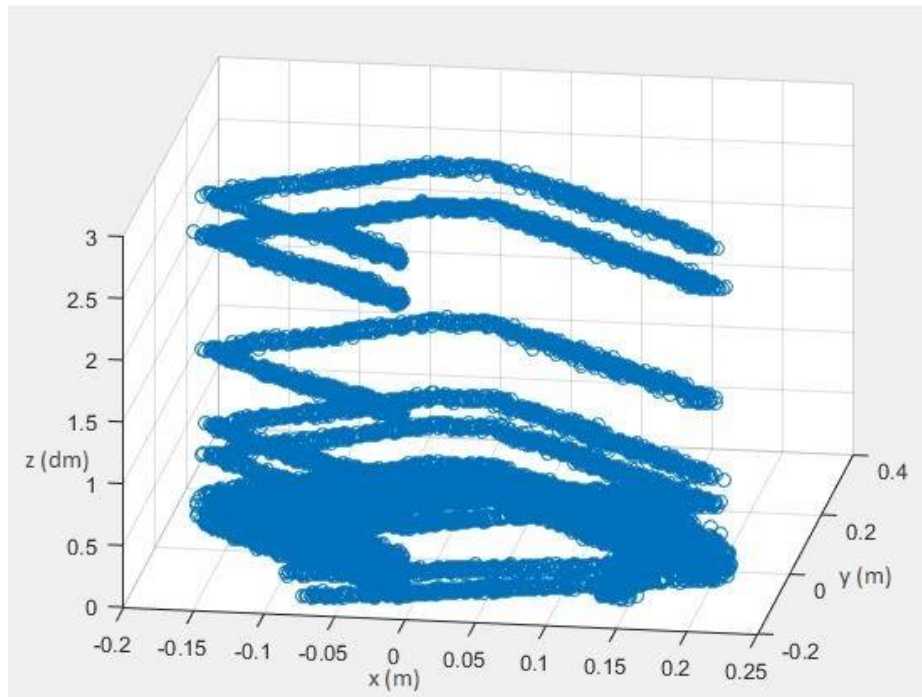


Εικόνα 5.21: Ασταθείς μετρήσεις του Sonar σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 5 m.

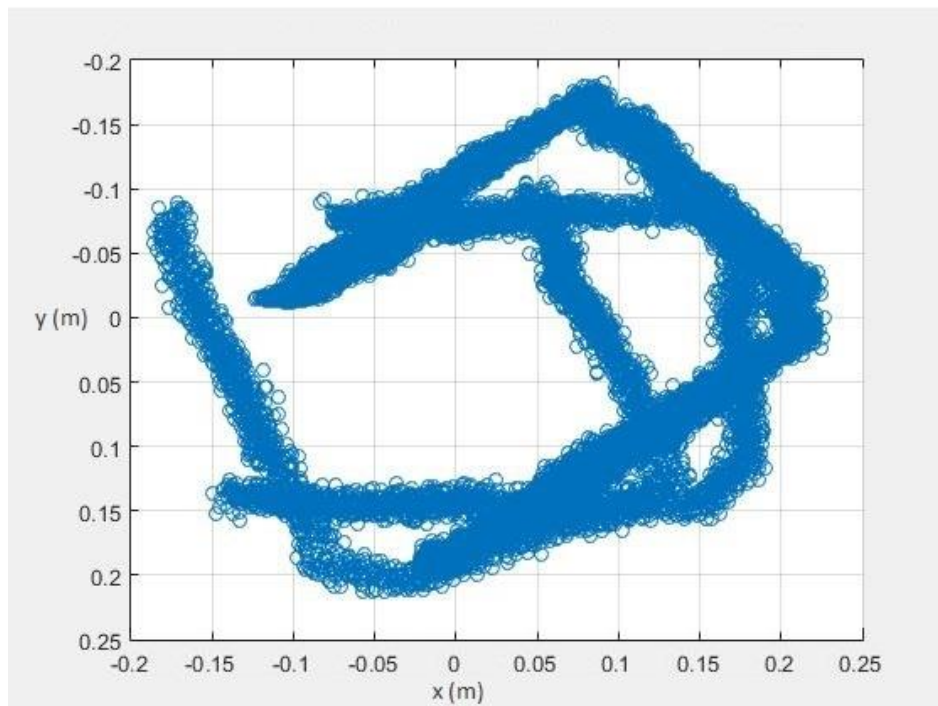
5.5 Έλεγχος λειτουργικότητας του συνολικού συστήματος μέτρησης που αναπτύχθηκε

Μετά την διεξαγωγή των μεμονωμένων πειραμάτων για την μελέτη της ακρίβειας των μετρήσεων του LiDAR, πραγματοποιήθηκαν κάποια πειράματα για τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας και επικοινωνίας των επιμέρους τμημάτων του συνολικού συστήματος μέτρησης.

Το πείραμα που διεξήχθη είναι το ακόλουθο. Τοποθετήθηκε το LiDAR στο έδαφος και έπειτα καλύφθηκε με ένα κουτί έτσι ώστε να έχουμε μια σταθερή επιφάνεια σάρωσης, της οποίας το σχήμα δεν θα μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του πειράματος. Έπειτα, τέθηκε σε λειτουργία το συνολικό σύστημα για την σάρωση της εσωτερικής επιφάνειας του κουτιού και τη λήψη μετρήσεων. Μετά την έναρξη της διαδικασίας λήψεως μετρήσεων και αφού ελήφθησαν επιτυχώς οι πρώτες μετρήσεις, ελέγχθηκε ότι είναι εφικτή η λήψη μετρήσεων κατά την αλλαγή υψομέτρου, καθώς και η λήψη μετρήσεων όταν το σύστημα έχει διαφορετικό προσανατολισμό από αυτόν όπου ξεκίνησε η σάρωση. Για τον λόγο αυτό, έγινε διαφοροποίηση του υψομέτρου με τη χρήση ενός λευκού χαρτιού, το οποίο προσέγγιζε το Sonar και έπειτα απομακρυνόταν, καθιστώντας έτσι εφικτή τη λήψη τιμών για διάφορες τιμές ύψους. Επιπλέον, προκειμένου να ληφθούν διαφορετικές τιμές για τον προσανατολισμό του συστήματος, έγινε περιστροφή του Flight Controller, στον οποίο είναι ενσωματωμένη η πυξίδα του συστήματος. Κατά αυτό τον τρόπο έγινε λήψη και αποθήκευση των δεδομένων της σάρωσης με στόχο την διαφοροποίηση υψομέτρου (Εικόνα 5.22) και προσανατολισμού (Εικόνα 5.23). Τονίζεται ότι καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος το LiDAR και το κουτί που το κάλυπτε παρέμειναν αμετακίνητα.



Εικόνα 5.22: Υψομετρική διαφοροποίηση στη λήψη δεδομένων.



Εικόνα 5.23: Διαφοροποίηση προσανατολισμού στη λήψη δεδομένων.

Όπως φαίνεται από τις Εικόνες 5.22 και 5.23, η επικοινωνία, η λήψη και η επεξεργασία των δεδομένων μεταξύ των διαφορετικών υποσυστημάτων είναι επιτυχής, εφόσον έχουμε σταθερή επιφάνεια σάρωσης με διαφορετικές τιμές υψομέτρου, που οφείλονται στο Sonar, και διαφορετικές τιμές προσανατολισμού, που οφείλονται στην πυξίδα του Flight Controller.

5.6 Ενσωμάτωση συστήματος μέτρησης στην εναέρια πλατφόρμα

Στην Παράγραφο αυτή παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο έχει ενσωματωθεί το σύστημα μέτρησης που αναπτύχθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, επάνω στην εναέρια πλατφόρμα. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.24, η συσκευή LiDAR έχει ενσωματωθεί στο ψηλότερο τμήμα της πλατφόρμας, ώστε να μην έχει παρεμβολές από τους έλικες ή από τις βάσεις στήριξης του UAV. Ο Flight Controller βρίσκεται μεταξύ των δύο μπαταριών που τροφοδοτούν το σύστημα, όπως φαίνεται και στην εικόνα, ενώ πάνω στην αριστερή μπαταρία, όπως απεικονίζεται, έχει τοποθετηθεί η πυξίδα που χρησιμοποιείται για τον προσανατολισμό. Στο κάτω τμήμα του συστήματος έχει τοποθετηθεί ένα ασύρματο Router, στο οποίο έχουμε πρόσβαση από τον επίγειο υπολογιστή, ώστε να γίνεται η επικοινωνία του χρήστη με το σύστημα. Στην κάτω πλευρά του Router έχει τοποθετηθεί το Raspberry Pi 2, το Arduino UNO R3 και το Sonar HC-SR04. Τέλος, στην δεξιά βάση στήριξης του UAV έχει τοποθετηθεί η συσκευή που είναι υπεύθυνη για την συλλογή δεδομένων από απόσταση.



Εικόνα 5.24: Το σύστημα μέτρησης ενσωματωμένο στην εναέρια πλατφόρμα.

5.7 Λήψη δεδομένων με την χρήση της εναέριας πλατφόρμας για εσωτερικό χώρο

Προκειμένου να ελεγχθεί η ορθή λειτουργικότητα του συνολικού συστήματος μέτρησης όταν έχει ενσωματωθεί σε εναέρια πλατφόρμα (Εικόνα 5.25), πραγματοποιήθηκε το ακόλουθο πείραμα: σε ένα κλειστό χώρο έγιναν μετρήσεις για την αποτύπωση μιας εσωτερικής σκάλας και μιας κολώνας που υπήρχε δίπλα (Εικόνα 5.26). Αρχικά το UAV, που περιελάμβανε και το σύστημα μέτρησης που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας, τοποθετήθηκε στο έδαφος και αφού τέθηκε σε λειτουργία το ολοκληρωμένο σύστημα για την λήψη μετρήσεων, απογειώθηκε ελάχιστα από το έδαφος. Ο έλεγχος της λήψης μετρήσεων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση laptop, στο οποίο στελνόταν σήμα για το πότε ακριβώς ολοκληρωνόταν και καταγραφόταν μία σάρωση. Για την καλύτερη αποτύπωση των μετρήσεων, τέθηκε ως μέγιστη απόσταση εντοπισμού επιφάνειας αυτή των 2 m, ενώ τιμές που ξεπερνούσαν την απόσταση αυτή δεν καταγράφονταν. Μετά την αποθήκευση της σάρωσης το UAV ανέβαινε σε ύψος μερικών εκατοστών. Όταν έφτασε στο τέλος των σκαλοπατιών, το πείραμα τερματίστηκε. Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 40 σαρώσεις, η επεξεργασία των οποίων έγινε έπειτα ξεχωριστά και τα αποτελέσματα απεικονίζονται στις Εικόνες 5.27-5.30. Όπως

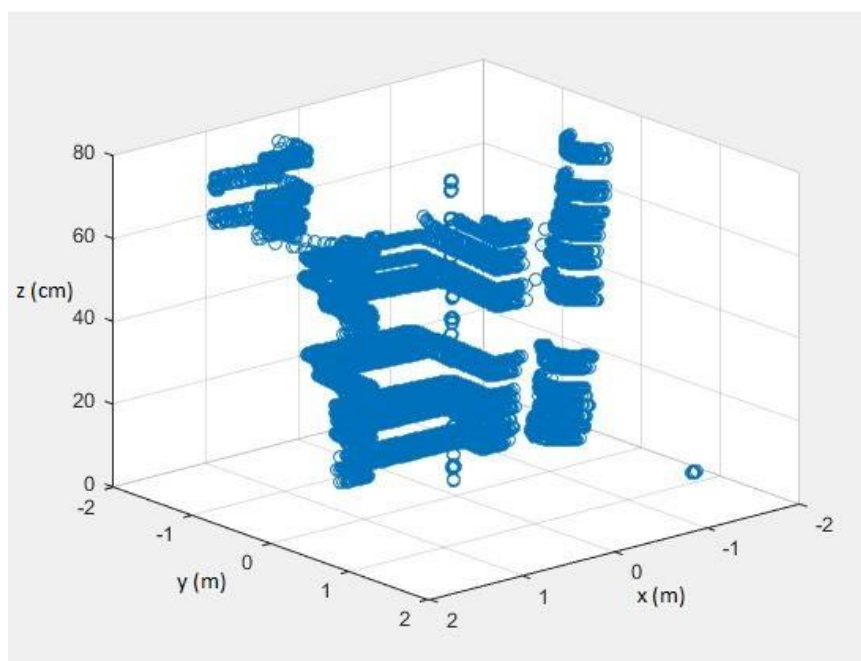
προαναφέρθηκε, η Εικόνα 5.26 απεικονίζει τον χώρο που σαρώθηκε. Στην Εικόνα 5.27 φαίνεται ο χώρος που σαρώθηκε σε μορφή σύννεφων σημείων. Στο κέντρο της εικόνας αναπαριστώνται οι αποστάσεις των σκαλοπατιών, όπως λήφθηκαν από τη συσκευή LiDAR, ενώ στα δεξιά της Εικόνας 5.27 απεικονίζεται η κολώνα. Η Εικόνα 5.28 απεικονίζει τις μετρήσεις με φορά κάθετη στον άξονα x . Στην Εικόνα 5.29 παρατηρείται η σάρωση κάθετα στο επίπεδο που δημιουργούν οι άξονες x και y , δίνοντας μια πιο σαφή εικόνα των αποστάσεων των σκαλοπατιών από τη συσκευή LiDAR. Τέλος στην Εικόνα 5.30 απεικονίζονται οι μετρήσεις στο επίπεδο που δημιουργείται από τους άξονες y και z , παρέχοντας επίσης μια εικόνα για τις αποστάσεις των σκαλοπατιών.



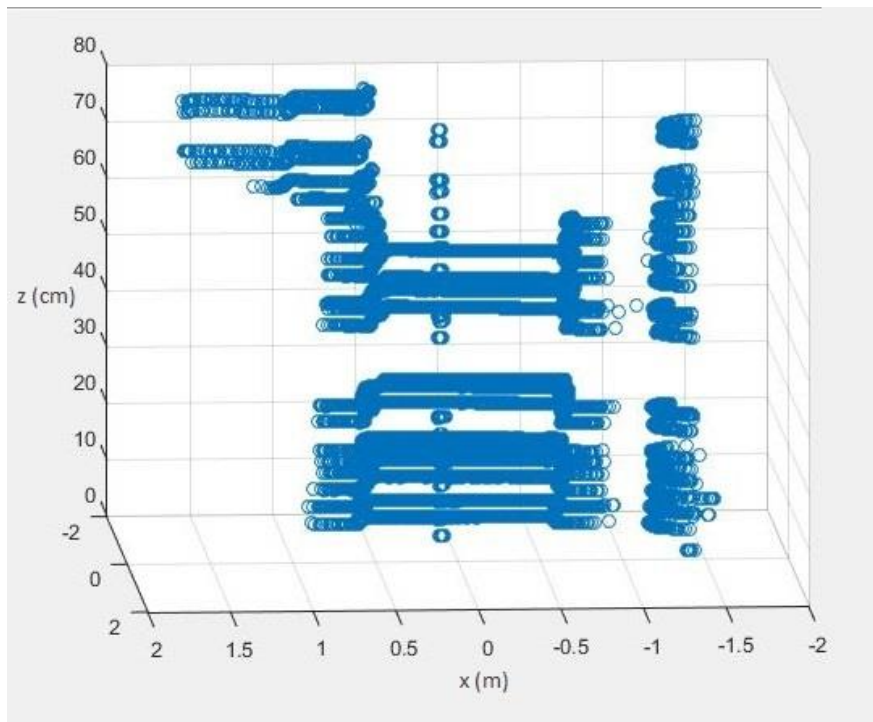
Εικόνα 5.25: Χρήση συσκευής LiDAR ενσωματωμένη σε UAV για την αποτύπωση εσωτερικού χώρου.



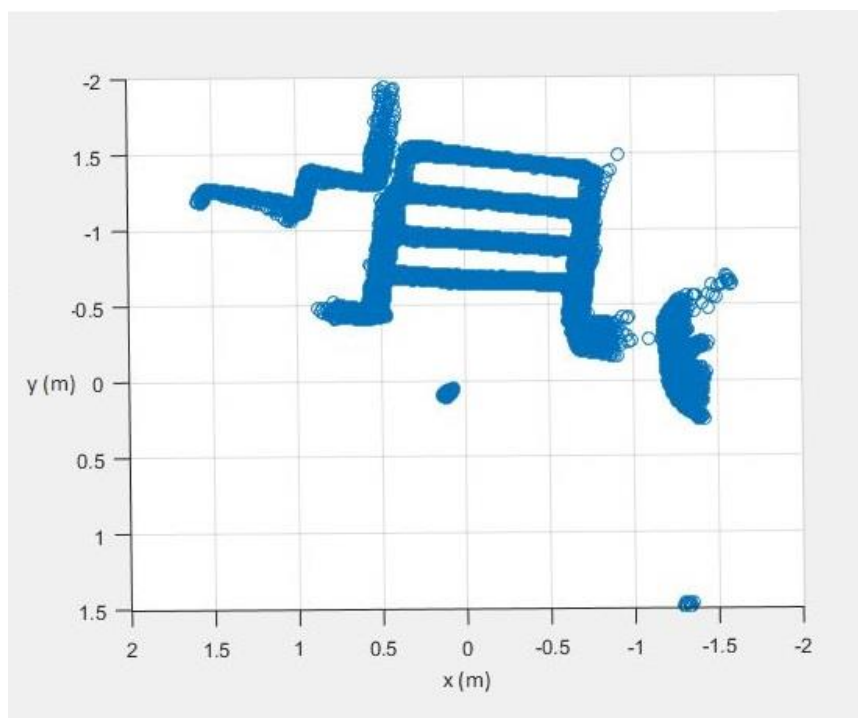
Εικόνα 5.26: Ο χώρος που σαρώθηκε κατά την διάρκεια της πτήσης του UAV.



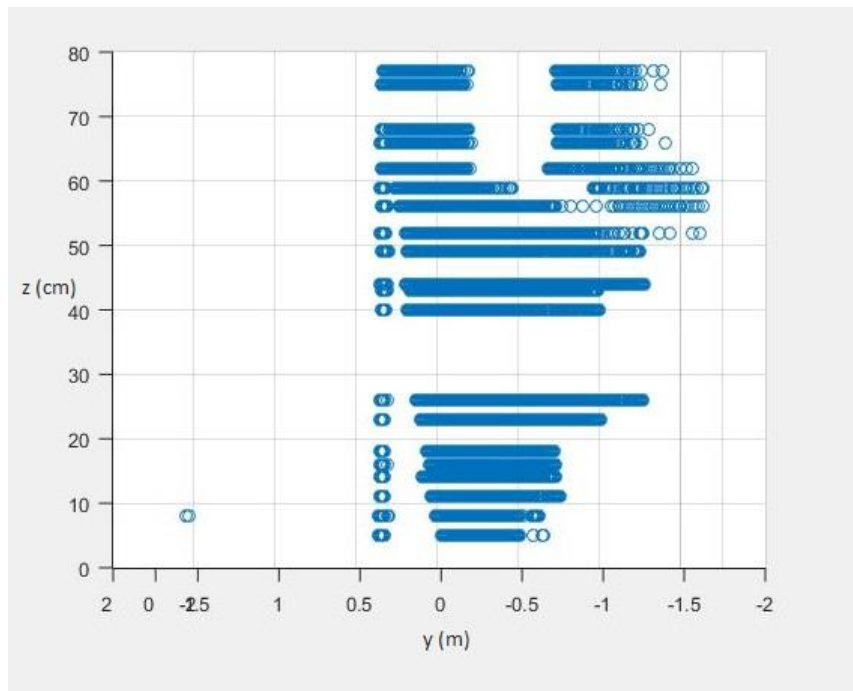
Εικόνα 5.27: Απεικόνιση του χώρου της σάρωσης μετά την επεξεργασία των δεδομένων.



Εικόνα 5.28: Απεικόνιση των μετρήσεων στο επίπεδο των αξόνων x και z .



Εικόνα 5.29: Απεικόνιση μετρήσεων στο επίπεδο των αξόνων x και y .



Εικόνα 5.30: Απεικόνιση μετρήσεων στο επίπεδο των αξόνων y και z .

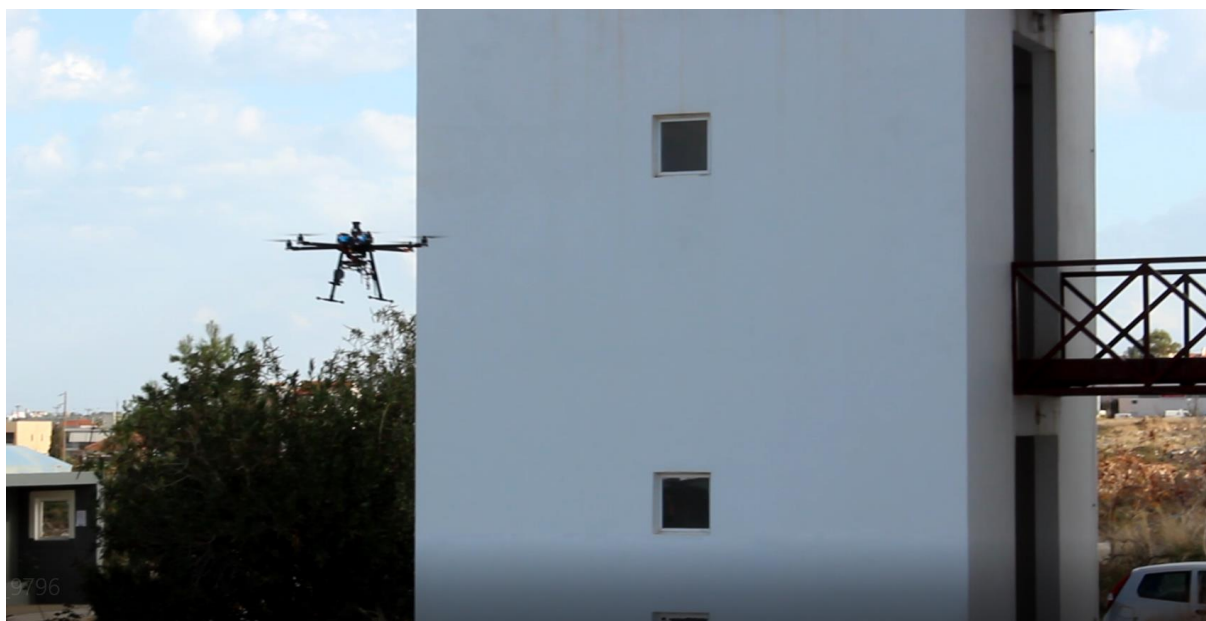
Να σημειωθεί ότι οι μετρήσεις στους άξονες x και y αντιστοιχούν σε μέτρα, ενώ αυτές του άξονα z (και επομένως το ύψος του UAV) αντιστοιχούν σε εκατοστά (cm). Μετά και την επεξεργασία των δεδομένων προκύπτει ότι το σύστημα που αναπτύχθηκε μπορεί να αντεπεξέλθει με επιτυχία στην καταγραφή και αποτύπωση κάποιου εσωτερικού χώρου, καθώς τα αποτελέσματα που φαίνονται στις Εικόνες 5.27 – 5.30, προσεγγίζουν σε μεγάλο βαθμό το χώρο που αναπαριστάται στην Εικόνα 5.26. Επίσης, λόγω του γεγονότος ότι η εναέρια πλατφόρμα δεν είναι απόλυτα σταθερή κατά την αιώρηση της, η ακρίβεια των μετρήσεων επηρεάζεται ως προς τον άξονα που κινήθηκε το UAV.

5.8 Λήψη δεδομένων με την χρήση της εναέριας πλατφόρμας σε εξωτερικό χώρο

Για τον έλεγχο της λειτουργικότητας του συνολικού συστήματος, το οποίο είναι ενσωματωμένο σε εναέρια πλατφόρμα, σε εξωτερικό χώρο πραγματοποιήθηκε το ακόλουθο πείραμα. Τοποθετήθηκε η εναέρια πλατφόρμα, στην οποία ενσωματώθηκε το σύστημα μέτρησης, μπροστά από δύο τοίχους. Ο ένας εξ' αυτών βρισκόταν

μπροστά από το συνολικό σύστημα, ενώ ο δεύτερος στα δεξιά του συστήματος. Όπως φαίνεται και στις Εικόνες 5.31 και 5.32, ο πρώτος τοίχος περιέχει μικρά παράθυρα, ενώ ο δεύτερος όχι. Για την λήψη ακριβέστερων μετρήσεων, ορίστηκε ως μέγιστη απόσταση εντοπισμού σημείων τα 7 μέτρα, ενώ αποστάσεις μεγαλύτερες των 7 μέτρων δεν καταγράφονταν. Κατά την έναρξη του πειράματος, γίνεται έλεγχος, από τον Flight Controller του UAV για την ορθή λειτουργία των επιμέρους τμημάτων του συστήματος (σωστή τροφοδοσία του συστήματος μετρήσεων, καθώς και έλεγχος της ορθής λειτουργίας των επιμέρους τμημάτων της εναέριας πλατφόρμας). Εφόσον ο έλεγχος είναι επιτυχής, η διαδικασία προχωράει στη φάση λήψης μετρήσεων. Αρχικά, γίνεται στον υπολογιστή εκκίνηση των απαραίτητων κόμβων, όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 4 (roscore, Urg_node), και εφόσον είναι επιτυχής η εκκίνηση τους, γίνεται εκκίνηση του εκτελέσιμου προγράμματος που αναφέρθηκε στην Παράγραφο 4.1.

Μόλις αρχίσει η λήψη μετρήσεων από το σύστημα που υλοποιήθηκε, γίνεται η απογείωση της εναέριας πλατφόρμας. Στο συγκεκριμένο πείραμα δεν έγινε χρήση του Sonar, καθώς η απόσταση στην οποία έφτασε το συνολικό σύστημα ήταν αυτή των 6 μέτρων, επομένως έγινε χρήση του ενσωματωμένου αισθητήρα που υπάρχει στον Flight Controller. Η πορεία που ακολούθησε η εναέρια πλατφόρμα ήταν κάθετη προς την αρχική θέση, στην οποία έγινε η τοποθέτηση της, με ελάχιστες αποκλίσεις προς τα δεξιά ή τα αριστερά λόγω επιρροής του αέρα και των διορθώσεων που προσπάθησε να κάνει το UAV. Όταν το σύστημα έφτασε στα 6 μέτρα, περιστράφηκε κατά 90° , προκειμένου να λάβει μετρήσεις και για τον χώρο που βρισκόταν πίσω από το σύστημα λήψεως μετρήσεων, σε σχέση με την αρχική θέση τοποθέτησης του. Μετά την περιστροφή άρχισε η κάθοδος του UAV, χωρίς όμως να σταματήσει η λήψη μετρήσεων. Όταν το σύστημα προσγειώθηκε, έγινε τερματισμός της λειτουργίας λήψης μετρήσεων.



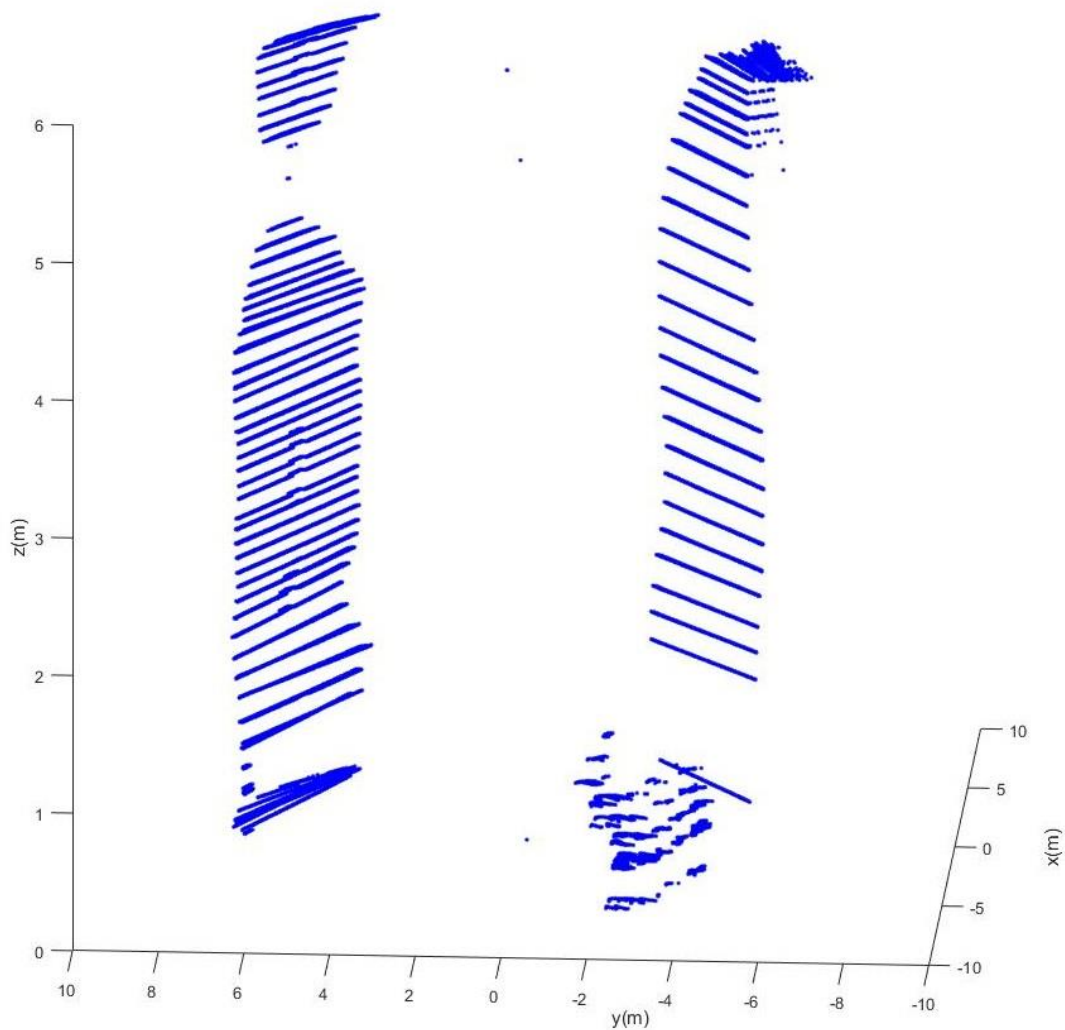
Εικόνα 5.31: Λήψη μετρήσεων σε εξωτερικό χώρο.



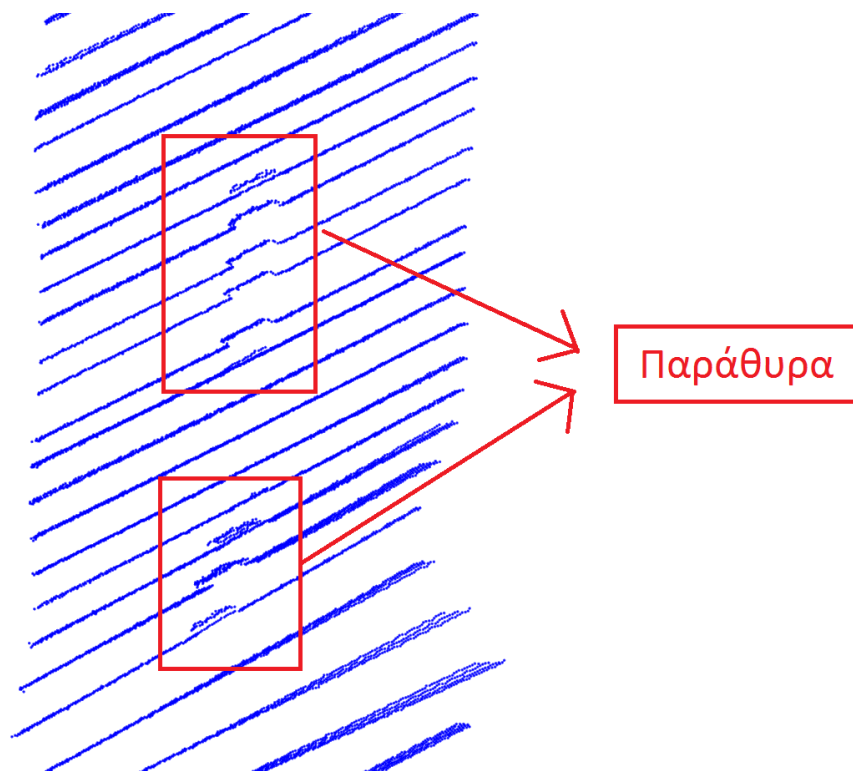
Εικόνα 5.32: Οι επιφάνειες που σαρώθηκαν (μπροστά: τοίχος με παράθυρα και δεξιά: κενός τοίχος).

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά την επεξεργασία των μετρήσεων, αποτυπώνονται στις Εικόνες 5.33 και 5.34. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.33, οι επιφάνειες που σαρώθηκαν αποτυπώθηκαν επιτυχώς. Ωστόσο, παρουσιάζεται μια

ελαφρώς καμπυλοειδής απεικόνιση των τοίχων, που οφείλεται στην επίδραση του αέρα που προκαλεί μικρή παρέκκλιση του UAV, και κατ'έκταση του συνολικού συστήματος λήψης μετρήσεων, από την πορεία κίνησης του. Επιπλέον, στην Εικόνα 5.34 φαίνεται ξεκάθαρα ο εντοπισμός και η αποτύπωση των παραθύρων, γεγονός που υποδηλώνει την ικανότητα εντοπισμού λεπτομερειών στις επιφάνειες.



Εικόνα 5.33: Αποτελέσματα σάρωσης μετά την επεξεργασία των μετρήσεων.



Εικόνα 5.34: Εντοπισμός παραθύρων στον μπροστινό τοίχο κατά τη σάρωση.

6. Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις

6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, υλοποιήθηκε ένα σύστημα λήψης μετρήσεων για την 3-διάστατη αποτύπωση χώρου, ενσωματωμένο σε εναέριο πλατφόρμα. Στο UAV που κατασκευάστηκε στο χώρο του Εργαστηρίου SenseLab (Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης) ενσωματώθηκε μια συσκευή LiDAR, ένα Raspberry Pi, ένα Arduino και μια συσκευή Sonar, ενώ έγινε χρήση και των μετρήσεων που επέστρεφε ο Flight Controller που είναι ενσωματωμένος στο UAV. Παρουσιάστηκαν τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας τόσο ολόκληρου του συστήματος, όσο και των επιμέρους τμημάτων αυτού. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δείχνουν ότι το σύστημα μέτρησης που αναπτύχθηκε είναι ικανό να αποτυπώσει τόσο εσωτερικούς, όσο και εξωτερικούς χώρους.

Διαπιστώθηκε ότι η συσκευή LiDAR που χρησιμοποιήθηκε είναι ακριβής με ελάχιστες αποκλίσεις, μόλις μερικών χιλιοστών (2 mm – 6 mm), ενώ το σύστημα μπορεί να εντοπίσει ευκρινώς και επιφάνειες σε αποστάσεις μέχρι και 30 m.

Οι περιορισμοί του συστήματος που αναπτύχθηκε, σχετικά με τη λήψη μετρήσεων με ακρίβεια, οφείλονται τόσο στον τρόπο συμπεριφοράς της συσκευής LiDAR, όσο και στα υπόλοιπα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν. Οι βασικότεροι από αυτούς, όπως προέκυψαν από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν αλλά και από τα [33] και [40], είναι οι ακόλουθοι:

- Θα πρέπει ο περιβάλλον χώρος να μην αποτελείται από πολλές σκουρόχρωμες επιφάνειες, καθώς η οπτική ακτινοβολία που εκπέμπει το LiDAR απορροφάται από αυτές, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ακρίβεια των μετρήσεων.
- Θα πρέπει ο φωτισμός του χώρου να μην είναι έντονος, καθώς η ηλιακή ακτινοβολία ή οποιαδήποτε άλλη πηγή οπτικής ακτινοβολίας μπορεί να μειώσει την ακρίβεια των μετρήσεων που λαμβάνονται, ειδικά όταν αυτή προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια εκπομπής Laser του LiDAR.
- Οι επιφάνειες που αποτυπώνονται θα πρέπει να μην απέχουν αποστάσεις μεγαλύτερες από αυτές που συνιστούν οι κατασκευαστές για τη συσκευή LiDAR, καθώς μπορεί να μην γίνει ακριβής εντοπισμός τους. Για την παρούσα διπλωματική εργασία η μέγιστη απόσταση σάρωσης είναι τα 30 m.
- Κατά τη διάρκεια λήψεως μετρήσεων για την αποτύπωση χώρου, θα πρέπει να επικρατούν ήπιες καιρικές συνθήκες, τόσο βροχόπτωσης όσο και έντασης αέρα. Στην πρώτη περίπτωση, υπάρχει ο κίνδυνος διακοπής της λειτουργίας κάποιου από τα ηλεκτρονικά συστήματα που χρησιμοποιούνται, καθώς δεν συνίσταται η επαφή τους με το νερό. Στην δεύτερη περίπτωση επηρεάζεται η σταθερότητα του συνολικού συστήματος, με αποτέλεσμα τη λήψη λανθασμένων μετρήσεων.
- Περιορισμό αποτελεί επίσης και το υψόμετρο στο οποίο πρόκειται να ανέλθει το συνολικό σύστημα μέτρησης. Έτσι, στην περίπτωση πτήσης σε υψόμετρο χαμηλότερο των 4 m γίνεται χρήση των μετρήσεων που επιστρέφει η συσκευή Sonar, ενώ στην αντίθετη περίπτωση γίνεται χρήση των μετρήσεων που επιστρέφει ο Flight Controller.

Γενικά, η χρήση συσκευής LiDAR σε UAV δύναται να αποφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα για την αποτύπωση χώρου, όταν οι μετρήσεις επιστρέφονται σε μορφή σύννεφων σημείων. Η μέθοδος αυτή μπορεί να είναι πιο ακριβή σε κόστος έναντι αυτή της φωτογραμμετρίας, ωστόσο αποτελεί μια λιγότερο χρονοβόρα μέθοδο, με μικρότερη πολυπλοκότητα επεξεργασίας των μετρήσεων, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε χώρους που δεν μπορούν να αποτυπωθούν με ευκρίνεια από

τις φωτογραφίες, οι οποίες θα λαμβάνονταν προκειμένου να γίνει χρήση της μεθόδου της φωτογραμμετρίας.

6.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Η χρήση των UAV με την ενσωμάτωση συσκευής LiDAR μπορεί να φανεί χρήσιμη για αποτυπώσεις χώρων. Η παρούσα διπλωματική προσέφερε μια ικανοποιητική πτυχή της αποτύπωσης αυτής. Ωστόσο, μελλοντικά κάποιες αλλαγές θα μπορούσαν να εξελίξουν την όλη διαδικασία, αποδίδοντας ακόμα καλύτερα αποτελέσματα. Τέτοιου είδους αλλαγές είναι οι ακόλουθες:

- Ενσωμάτωση GPS ή χρήση κάποιας διαφορετικής μεθόδου για καταγραφή της (απόλυτης) θέσης του συστήματος στον χώρο, καθιστώντας εφικτή την περιφορά του UAV στο χώρο, σαρώνοντας αποτελεσματικότερα τα αντικείμενα ή τα τοιχώματα ενός χώρου.
- Ανάπτυξη λογισμικού για την γραφική απεικόνιση του χώρου σε πραγματικό χρόνο με τα έως την κάθε χρονική στιγμή συλλεχθέντα δεδομένα.
- Χρήση της μεθόδου της φωτογραμμετρίας για τη λήψη φωτογραφιών που σε συνδυασμό με το point cloud της συσκευής LiDAR, να δίνουν τη δυνατότητα παραγωγής ενός πιστού 3-διάστατου μοντέλου του χώρου ή του αντικειμένου που αποτυπώνεται, το οποίο θα απεικονίζει το χώρο-αντικείμενο στην πραγματική του μορφή και όχι ως σύννεφο σημείων.
- Χρήση της πληροφορίας των τιμών pitch και roll, που επιστρέφει η εντολή status η οποία παρέχεται από το πρωτόκολλο MAVLink , για την λήψη πληροφορίας σχετικής με την κλίση του συνολικού συστήματος, για την περίπτωση που αυτό περιφέρεται στο χώρο. Η τιμή pitch αντιστοιχεί στην εμπρός-πίσω κλίση του συστήματος, ενώ η τιμή roll σε πλάγια κλίση. Στην παρούσα διπλωματική εργασία το συνολικό σύστημα κινήθηκε κάθετα στο χώρο, οπότε και δεν χρειάστηκε να γίνει χρήση των παραπάνω τιμών.

7. Βιβλιογραφία

- [1] ICAO, “Unmanned Aircraft Systems (UAS) - Section Glossary,” International Civil Aviation Organization, 2011.
http://www.icao.int/Meetings/UAS/Documents/Circular%20328_en.pdf
- [2] A.Q. Abdullah, “1.4 Classification of the Unmanned Aerial Systems,” 2014.
<https://www.e-education.psu.edu/geog892/node/5>
- [3] F. Rucker, “Eyes of the Army - U.S. Army Roadmap for UAS 2010-2035,” U.S Army, 2010.
<http://www.rucker.army.mil/usaace/uas/US%20Army%20UAS%20RoadMap%202010%202035.pdf>
- [4] F. Greenwood, “Drones And Aerial Observation: New Technologies For Property Rights, Human Rights, And Global Development A Primer – Section How to Make Maps With Drones,” pp. 35, New America, July 2015
<http://drones.newamerica.org/primer/DronesAndAerialObservation.pdf>
- [5] <https://el.wikipedia.org/wiki/LIDAR>
- [6] M. Leonova, “Laser Scanner vs. Photogrammetry,” November 2014.
<http://lanmarservices.com/2014/11/07/laser-scanning-vs-photogrammetry/>
- [7] F. Corrigan, “Introduction To UAV Photogrammetry And Lidar Mapping Basics,” April 2016.
<https://www.dronezon.com/learn-about-drones-quadcopters/introduction-to-uav-photogrammetry-and-lidar-mapping-basics/>
- [8] A. Fritz, T. Kattenborn and B. Koch, “UAV-Based Photogrammetric Point Clouds – Tree Stem Mapping in Open Stands in Comparison to Terrestrial Laser Scanner Point Clouds,” International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, pp. 141-146 September 2013.

<http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-1-W2/141/2013/isprsarchives-XL-1-W2-141-2013.pdf>

[9] D. G. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," *International journal of computer vision*, vol. 60, no. 2, pp. 91-110, January 2004.
<http://www.cs.ubc.ca/~lowe/papers/ijcv04.pdf>

[10] C. Flener, M. Vaaja, A. Jaakkola, A. Krooks, H. Kaartinen, A. Kukko, E. Kasvi, H. Hyypä, J. Hyypä and P. Alho, "Seamless Mapping of River Channels at High Resolution Using Mobile LiDAR and UAV-Photography," *Remote Sensing*, vol. 5, no. 12, pp. 6382-6407, November 2013.
<http://www.mdpi.com/2072-4292/5/12/6382/htm>

[11] A. M. Chekalyuk, A. A. Demidov, V. V. Fadeev and M. Yu. Gorbunov, "Lidar monitoring of phytoplankton and organic matter in the inner seas of Europe," *EARSel advances in remote sensing*, vol. 3, no. 3, pp. 131-139, 1995.
http://www.earsel.org/Advances/3-3-1995/3-3_14_Chekalyuk.pdf

[12] T. Johannesson, H. Björnsson, F. Pálsson, O. Sigurosson and P. Þorsteinsson, "LiDAR mapping of the Snaefellsjökull ice cap, western Iceland," *Jökull*, vol. 61, pp. 19-32, 2011.
<http://www.vedur.is/media/vedurstofan/utgafa/hlidarefni/J61-Johannessonetal.pdf>

[13] G. Mandlbauer, M. Pfenningbauer, F. Steinbacher and N. Pfeifer, "Airborne Hydrographic LiDAR Mapping - Potential of a new technique for capturing shallow water bodies," 19th International Congress on Modelling and Simulation, pp. 2416-2422, December 2011.

[14] E. E. Uthe, J. M. Livingston and N. B. Nielsen, "Airborne Lidar Mapping of Ozone Concentrations During the Lake Michigan Ozone Study," *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 42, no. 10, pp. 1313-1318, March 2012.
<http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/10473289.1992.10467078?needAccess=true>

-
- [15] D. J. Harding and G. S. Berghoff, "Fault Scarp Detection beneath dense vegetation cover: Airborne LiDAR Mapping of the Seattle fault zone Bainbridge Island, Washington State," Proceedings of the American Society of Photogrammetry and Remote Sensing Annual Conference, pp. 1-11, May 2000.
- [16] D. Cunningham, S. Grebby, K. Tansey, A. Gosar and V. Kastelic, "Application of airborne LiDAR to mapping seismogenic faults in forested mountainous terrain, southeastern Alps, Slovenia," Geophysical Research Letters, vol. 33, no. 20, pp. 1-5, October 2006.
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2006GL027014/full>
- [17] P. Shiess and F. T. O. Krogstad, "LiDAR-based topographic maps improve agreement between office-designed and field-verified road locations," Proceedings of the 26th Annual Meeting of the Council on Forest Engineering, pp. 1-6, September 2003.
- [18] S. Becker and N. Haala, "Grammar Supported façade reconstruction from mobile LiDAR Mapping," CMRT09, pp. 229-234, September 2009.
http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/3-W4/pub/CMRT09_229.pdf
- [19] N. Haala, M. Peter, J. Kremer and G. Hunter, "Mobile LiDAR Mapping for 3D point cloud collection in urban areas – a performance test," The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVII Part B5, pp. 1119-1124, July 2008.
http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/Streetmapper_ISPRS2008.pdf
- [20] C. Hug, A. Ulrich and A. Grimm, "Litemapper-5600 - A waveform-digitizing LiDAR terrain and vegetation mapping system," The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVI-8/W2, pp. 24-29, Oct. 2004.
- [21] T. Hare, M. Masson and B. Russell, "High-Density LiDAR Mapping of the Ancient City of Mayapan," Remote Sensing, vol. 6, no. 9, pp. 9064-9085, September 2014. <http://www.mdpi.com/2072-4292/6/9/9064/htm>

-
- [22] http://www.tarot-rc.com/index.php?main_page=product_info&products_id=1007
- [23] <http://www.banggood.com/Tarot-TL65B44-Small-Electric-Retractable-Landing-Gear-Set-p-961964.html>
- [24] http://www.rctigermotor.com/html/2013/Navigator_1019/99.html
- [25] <http://www.futabarc.com/systems/futk6100.html>
- [26] <https://www.unmannedtechshop.co.uk/ardupilot-3dr-radio-telemetry-kit-433mhz/>
- [27] <https://store.3dr.com/products/3dr-gps-ublox-with-compass>
- [28] http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_11430_HobbyKing_40A_Blue_Series_Brushless_Speed_Controller.html
- [29] https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_speed_control
- [30] <https://oscarliang.com/best-flight-controller-quad-hex-copter/>
- [31] http://rctimer.com/download/Crius_AIOP_Manual_MWC.pdf
- [32] <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-2-model-b/>
- [33] http://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/download/pdf/UTM-30LX-EW_spec_en.pdf
- [34] <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>
- [35] <http://www.micropik.com/PDF/HCSR04.pdf>
- [36] <https://en.wikipedia.org/wiki/PuTTY>
- [37] <https://en.wikipedia.org/wiki/MAVLink>
- [38] <http://www.ros.org/about-ros/>
- [39] <https://en.wikipedia.org/wiki/MATLAB>
- [40] <http://www.templateons.com/brad/robocars/cameras-lasers.html>