



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Υπολογιστών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σχεδιασμός και υλοποίηση αυτόνομου συστήματος με
Μικρολεγκτές

Τσαχτσίρης Ν. Σταμάτιος

A.M.:71343875

Επιβλέπων: Δρ. Γιαννακόπουλος Ηρ. Παναγιώτης

Ακαδημαϊκό Έτος: 2020-2021

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σχεδιασμός και υλοποίηση αυτόνομου συστήματος με μικρολεγκτές

Τσαχτσίρης Ν. Σταμάτιος
Α.Μ.:71343875

Επιβλέπων:

Δρ. Γιαννακόπουλος Ηρ. Παναγιώτης

Εξεταστική Επιτροπή:

1 Δρ. Νικολόπουλος Δημήτριος

2 Δρ. Πρεζεράκος Γεώργιος

Ημερομηνία εξέτασης: 20/10/2021

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Σταμάτιος Τσαχτσίρης, Σεπτέμβριος, 2021

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τη συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Τσαχτσίρης Σταμάτιος του Νικολάου με αριθμό μητρώου 71343875 φοιτητής του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Υπολογιστών, της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές και τους εργαστηριακούς συνεργάτες του τμήματος για το όμορφο ταξίδι γνώσεων κατά την διάρκεια φοίτησης μου στο τμήμα, φέρνοντάς με σε επαφή με τα αντικείμενα των υπολογιστικών συστημάτων και της πληροφορικής, διαμορφώνοντας τον τρόπο σκέψης και αντίληψής μου στο πλαίσιο ενός μηχανικού.

Συγκεκριμένα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή μου, Δρ. Γιαννακόπουλο Παναγιώτη, για την υπομονή και τη διαρκή καθοδήγηση που μου πρόσφερε στο σύνολο της φοιτητικής μου πορείας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου, για την υπομονή, τη στήριξη και τη κατανόηση που έδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και ιδιαίτερος την περίοδο ανάπτυξης της παρούσας διπλωματικής.

Σας ευχαριστώ όλους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην σημερινή εποχή που οι έξυπνες συσκευές αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας των ανθρώπων, γίνεται επιτακτική η ανάγκη για την χαρτογράφηση του ανθρώπινου περιβάλλοντος, ώστε να πραγματοποιήσουν επιτυχώς τις προγραμματισμένες λειτουργίες τους. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι να μελετηθεί το παρόν πρόβλημα στα επίγεια αυτόνομα ρομποτικά αμαξώματα. Στα πλαίσια της, αναπτύχθηκε εξολοκλήρου από την αρχή μια αυτόνομη ρομποτική πλατφόρμα πραγματοποίησης διδιάστατης (2D) χαρτογράφησης περιβάλλοντα χώρου. Δόθηκε έμφαση στον σχεδιασμό των μηχανολογικών της εξαρτημάτων, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής τους από τρίτους, με την χρήση τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης (3D printing). Επιπλέον, για τον σχεδιασμό και τον προγραμματισμό των ηλεκτρονικών της πλατφόρμας, δόθηκε έμφαση στην χρήση ανοιχτών τεχνολογιών (αναπτυξιακών Arduino και ESP) για να υπάρχει η δυνατότητα ανακατασκευής της πλακέτας του συστήματος από τρίτους. Ο αλγόριθμος συμπεριφοράς του ρομπότ που αναπτύχθηκε ακολουθεί ευρετική προσέγγιση (Heuristic) και βασίζεται στις μετρήσεις του αισθητήρα LiDAR, μιας συστοιχίας αισθητήρων υπερήχων, πυξίδας και του συστήματος οδομετρίας για την επιτυχή του λειτουργία. Τέλος, οι πληροφορίες αποθηκεύονται σε μία κάρτα μνήμης, που με τη χρήση ειδικών προγραμμάτων, τα οποία αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της διπλωματικής, δημιουργείται η τελική απεικόνιση του χώρου.

Η πλατφόρμα που αναπτύχθηκε, εκτέλεσε επιτυχώς τον σκοπό της, καθώς κινήθηκε κατάλληλα εντός του καθορισμένου πειραματικού χώρου και συνέλεξε από τον αισθητήρα LiDAR τις μετρήσεις του χώρου. Οι χάρτες δημιουργήθηκαν επιτυχώς, έχοντας όμως ελάχιστο θόρυβο από τον τρόπο των μετρήσεων και την οδομετρία του συστήματος. Για τη περαιτέρω βελτίωση τους, προτείνεται η χρήση ενός εκτεταμένου φίλτρου Kalman, καθώς και η αλλαγή της θέσης του αισθητήρα LiDAR. Τέλος, η πλατφόρμα έχει την δυνατότητα να δεχθεί επεκτάσεις και να χρησιμοποιηθεί για διαφορετικούς σκοπούς, εκτός της χαρτογράφησης χώρου, καθώς υπήρξε πρόβλεψη για αυτό κατά την διάρκεια του σχεδιασμού της.

ABSTRACT

Nowadays smart devices are an integral part of people's everyday life, which makes necessary the need of these devices to map the human environment, in order to get along with their tasks. This thesis's goal was to study this problem on land autonomous moving vehicles. Following this, a robotic platform was developed from scratch in order to perform two-dimensional (2D) mapping of the robot's environment. The mechanical parts were designed in a way so third-party people could recreate them with use of 3D printing technology. Moreover, the same principle was in mind during the design and programming of the electronics components of the robot, where opensource and open-hardware technologies were used whenever was possible, such as Arduino and ESP, so third-party people could recreate the robot's board. The behavioral algorithm of the robot was developed using a heuristic approach and it depends on the measurements received by the LiDAR sensor, an ultrasonic sensor array, magnetic compass and odometry system, in order to perform its task successfully. The information generated by the robot in order to recreate the environment map is stored in a microSD card and with the software that was created among this thesis, it is able to recreate a visual of the environment map.

The robotic platform developed manage to perform its task successfully by navigating through the environment and got the measurements needed for the map creation, from the LiDAR sensor. The experimental environment maps were created successfully, having though a bit of noise due to the measurement technic used and the odometry system. To improve this, it is suggested the use of an external Kalman filter and changing the position of the LiDAR sensor on the robot chassis. Last but not least, the robotic platform was developed in order to be able to receive extensions, so it would have the ability to be used for different tasks, other than environment mapping.

Περιεχόμενα

.....	i
ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	v
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	vii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	ix
ABSTRACT	xi
Κατάλογος Εικόνων	xv
Κατάλογος Πινάκων	xvii
Κατάλογος Εξισώσεων	xix
Λίστα Συνομογραφιών	xxi
Λεξικό Ξένων Όρων	xxiii
1. Κεφάλαιο: Εισαγωγή	1
1.1. Ορισμός Προβλήματος	1
1.2 Σκοπός Διπλωματικής.....	1
1.3 Διάρθρωση Διατριβής.....	1
2. Κεφάλαιο: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	3
2.1. Εισαγωγή.....	3
2.1.1. Ιστορική Αναδρομή	3
2.1.2. Κανόνες Λειτουργίας Ρομποτικού Συστήματος	4
2.2. Αυτόνομα ρομποτικά οχήματα	5
2.2.1. Αισθητήρες.....	7
2.3. Αυτόνομη Πλοήγηση	9
2.3.1. Εντοπισμός Θέσης	11
2.3.2. Ρομποτική Χαρτογράφηση Χώρου	14
2.4. SLAM Αλγόριθμοι.....	16
3. Κεφάλαιο: Υλικά και Μέθοδοι	19
3.1. Εισαγωγή.....	19
3.2. Υλοποίηση	19
3.2.1. Σχεδιασμός Αμαξώματος.....	19
3.2.2. Σύστημα Κίνησης / Οδομετρία	28
3.2.3. Σύστημα Αισθητήρων	31
3.2.4. Σύστημα Επεξεργασίας / Μικρολεγκτές	39
3.2.5. Τροφοδοσία.....	41
3.2.6. Πλακέτα Συστήματος.....	41
3.2.7. Αλγόριθμος Συμπεριφοράς Ρομποτικού Συστήματος.....	45

3.2.8. Επεξεργασία δεδομένων από υπολογιστή.....	47
4. Κεφάλαιο: Πειραματική Μελέτη	55
4.1. Εισαγωγή.....	55
4.2. Πειραματικός Χώρος	55
4.3. Θέσεις και κίνηση	57
4.4. Αποτελέσματα.....	59
5. Κεφάλαιο: Συμπεράσματα – Μελλοντικές επεκτάσεις.....	63
5.1. Συμπεράσματα	63
5.2. Μελλοντικές επεκτάσεις	63
Παράρτημα Α: Προσομοιώσεις	65
Αναφορές	66

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2. 1: Ανακατασκευές, μουσείο αρχαίας Ελληνικής Τεχνολογίας Κοτσάνα. Αριστερά οδόμετρο του Ήρωνα, κέντρο υδραυλικό ρολόι του Κτησίβιου, δεξιά μηχανισμός Αντικυθήρων.....	3
Εικόνα 2. 2: Απεικόνισή Perseverance and Ingenuity.Ρομποτικά συστήματα εξερεύνησης του πλανήτη Άρη 2020 [7].....	5
Εικόνα 2. 3: Αυτόνομα πρότυπα ρομποτικά συστήματα που πήραν μέρος στο ARGOS challenge 2013-2017 [8].....	6
Εικόνα 2. 4: Αισθητήρες απόστασης: LiDAR αισθητήρες(α, β), αισθητήρες υπέρηχων (γ),επαγωγής (δ), VCSEL(ε), υπέρυθρων (στ).	7
Εικόνα 2. 5: Παραδείγματα αισθητήρων περιβάλλοντος, δύναμης, κίνησης, χρώματος, βιομετρικοί.....	8
Εικόνα 2. 6: Ρομποτική σκούπα σε λειτουργία [13].	9
Εικόνα 2. 7: Αυτόνομο όχημα της εταιρείας Tesla (αριστερά) [15]. Αυτόνομοι ρομποτικοί βραχίονες στην γραμμή παραγωγής της εταιρείας Nokia (δεξιά) [16].....	10
Εικόνα 2. 8: Συμπεριφορές για αυτόνομη πλοήγηση.....	11
Εικόνα 2. 9: Αργή επεξεργασία οδομετρίας.	12
Εικόνα 2. 10: Αλγοριθμική απεικόνιση Monte Carlo Localization [23].	13
Εικόνα 2. 11: Χάρτες δημιουργημένοι από ρομπότ. (α) εσωτερικού χώρου- ορόφου [28], (β) Εξωτερικού χώρου (μορφολογίας εδάφους) [29].	14
Εικόνα 2. 12: Μετρική και Τοπολογική απεικόνιση [31].	15
Εικόνα 2. 13: Σύνθετος χάρτης, με γκρι χρώμα είναι ο ελεύθερος χώρος (free space map), με μαύρο τα αντικείμενα εμπόδια (object map) [34].....	15
Εικόνα 2. 14: Παράδειγμα grid χάρτη [35].....	16
Εικόνα 2. 15: Επισκόπηση της διαδικασίας SLAM [36].	17
Εικόνα 2. 16: Παράδειγμα κίνησης ρομπότ με χρήση SLAM(Κινήσεις) [36].	18
Εικόνα 2. 17: Παράδειγμα κίνησης ρομπότ με χρήση SLAM(Τελική θέση) [36].....	18
Εικόνα 3. 1: Ρομποτικό Σύστημα Διπλωματικής. Αριστερά η κατασκευή, δεξιά σε 3D απεικόνιση.....	19
Εικόνα 3. 2: 3d Σχέδιο αμαξώματος. Αριστερά δεμένο, δεξιά σε explode view.	20
Εικόνα 3. 3: Επιμέρους υπο-συναρμολόγηση (subassembly).....	21
Εικόνα 3. 4: Επιμέρους εξαρτήματα συστήματος οδομετρίας.....	21
Εικόνα 3. 5: Επιμέρους εξαρτήματα αξόνων κίνησης.	22
Εικόνα 3. 6: Σασί.	23
Εικόνα 3. 7: Επιμέρους εξαρτήματα σασί.....	23
Εικόνα 3. 8: Μπροστινό καπάκι. Αριστερά χωρίς πλέγμα, δεξιά με πλέγμα.....	24
Εικόνα 3. 9: Σχεδιασμός πίσω καπάκι.	25
Εικόνα 3. 10: Βραχίονας αμαξώματος Δεξιά με τους άξονες κίνησης.	25
Εικόνα 3. 11: Επιμέρους εξαρτήματα βραχίονα.	26
Εικόνα 3. 12: Συναρμολόγηση προστασίας συστήματος LiDAR.....	26
Εικόνα 3. 13 Τομή σασί, (α) Θέση για μπαταρία, (β) ράφι 1, θέση για πλακέτα ηλεκτρονικών, (γ) ράφι 2, χώρος για αισθητήρες/ μελλοντική επέκταση.....	27
Εικόνα 3. 14: Αποτελέσματα προσομοίωσης ροής αέρα.	27
Εικόνα 3. 15: Μοτέρ αμαξώματος JGA25-37, δεξιά οι συνδέσεις [37].	28
Εικόνα 3. 16 Περίμετρος τροχού ισχύος.....	29
Εικόνα 3. 17: Διάγραμμα λειτουργίας μικροελεγκτή ελέγχου συστήματος κίνησης.	29
Εικόνα 3. 18: Προσομοίωση συστήματος κίνησης.....	30
Εικόνα 3. 19: Αισθητήρα LiDAR, λειτουργία [38].	32

Εικόνα 3. 20: Προσομοίωση συστήματος LiDAR.....	32
Εικόνα 3. 21: Διάγραμμα λειτουργίας LiDAR scan 360.....	33
Εικόνα 3. 22: Lidar Scan 360, οριζόντια κίνηση.	34
Εικόνα 3. 23: Lidar Scan 360, εναλλαγή από μπροστινή θέση scan σε πίσω.....	34
Εικόνα 3. 24: Θέση Αισθητήρων υπερήχων.	35
Εικόνα 3. 25: Αρχή λειτουργίας αισθητήρα υπερήχων [41].	35
Εικόνα 3. 26: Προσομοίωση συστήματος υπερήχων.....	36
Εικόνα 3. 27: Απλοποιημένο διάγραμμα λειτουργίας μικροελεγκτή ελέγχου αισθητήρων υπερήχων.	38
Εικόνα 3. 28: ESP8266 – Lolin NodeMCU V3 [43].	39
Εικόνα 3. 29: Arduino Nano [45].	40
Εικόνα 3. 30: Arduino Mega 2560 [46].	40
Εικόνα 3. 31: Αριστερά power bank της 4Smarts [47], δεξιά step-up converter MT3608 [48].	41
Εικόνα 3. 32: Πλακέτα πρώτης υλοποίησης (αριστερά), πλακέτα εντός του ρομπότ (δεξιά).	42
Εικόνα 3. 33: Πλακέτα πρώτης υλοποίησης.	42
Εικόνα 3. 34: Στοιχεία και συνδέσεις της πλακέτας.	43
Εικόνα 3. 35: Διάγραμμα συνδέσεων κυκλώματος, πλακέτα πρώτης υλοποίησης.	44
Εικόνα 3. 36: Διάγραμμα αναπαράστασης συμπεριφοράς λειτουργίας κεντρικού μικροελεγκτή.....	45
Εικόνα 3. 37: Διάγραμμα αναπαράστασης λειτουργίας «Ρουτίνα κίνηση προς Κατεύθυνση».	46
Εικόνα 3. 38: Αρχή λειτουργίας προγράμματος μετατροπής σε αρχείο συντεταγμένων.	48
Εικόνα 3. 39: Διαδικασία «Μετατροπή Δεδομένων από το σύστημα μοιρών του ρομπότ στο σύστημα του χάρτη».....	49
Εικόνα 3. 40: Αντιστοιχία μοιρών ρομπότ (Θr) με μοίρες καρτεσιανού συστήματος (Θ).	50
Εικόνα 3. 41: Θεωρητικές θέσεις του ρομπότ κατά την διαδικασία μετρήσεων. Με μπλε συμβολίζεται η διεύθυνση της μπροστινής όψης του σασί.	50
Εικόνα 3. 42: Διαδικασία «Προσαρμογή δεδομένων από τη φορά της μέτρησης στις πραγματικές μοίρες του χάρτη».	51
Εικόνα 3. 43: Οπτική απεικόνιση της διαδικασίας σύνθεσης συντεταγμένων.	52
Εικόνα 3. 44: Διαδικασία «Σύνθεση συντεταγμένων τελικού συνδυαστικού χάρτη».	53
Εικόνα 4. 1: Πειραματικός χώρος με καλυμμένες τις ανακλαστικές επιφάνειες.....	55
Εικόνα 4. 2: Απεικόνιση κάτοψης πειραματικού χώρου.	56
Εικόνα 4. 3: Απεικόνιση θέσεις πραγματοποίησης μετρήσεων του ρομπότ, εντός του πειραματικού χώρου.	57
Εικόνα 4. 4: Μετρήσεις ανά θέση. Πάνω αριστερά πρώτη θέση, πάνω δεξιά δεύτερη θέση, κάτω αριστερά τρίτη θέση, κάτω δεξιά τέταρτη θέση.	58
Εικόνα 4. 5: Συνδυαστικός χάρτης μετρήσεων.....	59
Εικόνα 4. 6: Μετρήσεις εντός πειραματικού χώρου. Αριστερά με καλυμμένες τις ανακλαστικές επιφάνειες. Δεξιά μη καλυμμένες οι ανακλαστικές επιφάνειες.	59
Εικόνα 4. 7: Συνδυαστικός χάρτης μετρήσεων.....	60
Εικόνα 4. 8: Συνδυαστικός χάρτης μετρήσεων εν σύγκριση με την κάτοψη.	61
Εικόνα 4. 9: Απόκλιση αισθητήρα LiDAR στο μήκος του βραχίονα.....	62
Εικόνα 5. 1: Open-Source 3D LiDAR sensor από «Charles Lab» [50].	64

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Δομή Ακολουθίας εντολών μικροελεγκτή κίνησης.	31
Πίνακας 2: Χαρακτήρες εντολών μικροελεγκτή κίνησης.	31
Πίνακας 3: Εντολές επικοινωνίας με μικροελεγκτή ελέγχου για το σύστημα αισθητήρων υπέρηχων.....	37
Πίνακας 4: Πίνακας σημείων ορίζοντα, μοιρών πυξίδας.....	38
Πίνακας 5: Δομή αρχείου αποθήκευσης μετρήσεων στην κάρτα microSD.	47

Κατάλογος Εξισώσεων

(2. 1).....	11
(2. 2).....	13
(2. 3).....	13
(3. 1).....	32
(3. 2).....	36
(3. 3).....	48
(3. 4).....	48
(3. 5).....	48

Λίστα Συντομογραφιών

LiDAR	Light Detection And Ranging
SD Card	Secure Digital Card
R.U.R	Rossumovi Univerzální Roboti
EPSRC	Engineering and Physical Sciences Research Council
AHRC	Arts and Humanities Research Council
UV	Unmanned Vehicles
VCSEL	Vertical-cavity surface-emitting laser
MCL	Monte Carlo Localization
EKF	Extended Kalman Filter
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
PET-G	Polyethylene terephthalate glycol
ABS	acrylonitrile-butadiene-styrene
PWM	Pulse-width modulation
RISC	Reduced Instruction Set Computer
USB	Universal Serial Bus
CSV	Comma Separated Values
NASA	National Aeronautics and Space Administration
GPS	Global Positioning System
Servo	Servomechanism
DC	Direct Current
I2C	Inter-integrated circuit
WIFI	Wireless Fidelity
IDE	Integrated Development Environment
SPI	Serial Peripheral Interface
PCB	Printed Circuit Board
MCU	Microcontroller unit
Char	Character

Λεξικό Ξένων Όρων

Light Detection And Ranging	Ανίχνευση απόστασης με εκπομπή παλμικής ακτινοβολίας λέιζερ
Secure Digital Card	Κάρτα μνήμης τύπου SD
Unmanned Vehicles	Μη επανδρωμένα οχήματα
Vertical-cavity surface-emitting laser	Λέιζερ κάθετης κοιλότητας εκπεμπόμενης επιφάνειας
Simultaneous Localization and Mapping	Ταυτόχρονος εντοπισμός θέσης και χαρτογράφηση
Polyethylene terephthalate glycol acrylonitrile-butadiene-styrene	Τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο γλυκόλη (Υλικό)
	Συμπολυμερές ακρυλονιτριλίου-βουταδιενίου-στυρενίου (Υλικό)
Pulse-width modulation	Διαμόρφωση πλάτος παλμού
Reduced Instruction Set Computer	Υπολογιστής περιορισμένου συνόλου εντολών (είδος Αρχιτεκτονικής)
Universal Serial Bus	Παγκόσμιο Σειριακό Πρωτόκολλο
Comma Separated Values	Αρχείο τιμών χωρισμένων με κόμμα «,»
Inter-integrated circuit	Σειριακός δίαυλος επικοινωνίας με πρωτόκολλο I2C
Servomechanism	Σερβομηχανισμός
Direct Current	Συνεχές ρεύμα
Integrated Development Environment	Ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης
Serial Peripheral Interface	Σειριακή διεπαφή περιφερειακών (συσκευών)
Printed Circuit Board	Εκτυπωμένη πλακέτα κυκλώματος
Encoders	Κωδικοποιητές
Heuristic Approach	Ευρετική προσέγγιση (λύσης προβλήματος)
Optimal Approach	Βέλτιστη προσέγγιση (λύσης προβλήματος)
Perception	Αντίληψη (του ρομπότ)
Cognition	Γνωστική λειτουργία (του ρομπότ)
Motion control	Έλεγχος κίνησης (του ρομπότ)
Sensor Calibration	Βαθμονόμηση αισθητήρα
Probabilistic technics	Πιθανολογικές τεχνικές
Particle filter	Φίλτρο σωματιδίων
Monte Carlo Localization	Εντοπισμός θέσης με τη μέθοδο «Monte Carlo»
Extended Kalman Filter	Εκτεταμένο φίλτρο Kalman
Idiothetic	Ιδιοθετικές (πληροφορίες)
Allothetic	Αλλοθετικές (πληροφορίες)
Dead reckoning	Τεχνική κίνησης ρομποτικού οχήματος
Object map	Χάρτης αντικειμένων
Free space map	Χάρτης ελεύθερου χώρου
Grid map	Χάρτης πλέγματος
Planetary rovers	Οχήματα εξερεύνησης πλανητών
Landmark	Διακριτό σημείο (ορόσημο)
Landmark Extraction	Εξαγωγή των διακριτών σημείων
Data association	Συσχετισμός Δεδομένων
State Estimation	Εκτίμηση θέσης
State update	Ενημέρωση νέας θέσης
Landmark Update	Ενημέρωση διακριτών σημείων
Assembly	Συναρμολόγηση
Subassembly	Υπό-συναρμολόγηση
Mount	Προσάρτηση

Σχεδιασμός και υλοποίηση αυτόνομου συστήματος με μικρολεγκτές

Gearbox	Μειωτήρας
MCU	Μικροελεγκτής
Interrupt pin	Ακροδέκτης διακοπών
Byte	Ψηφιολέξη
Command	Εντολή (προς εκτέλεση)
Char	Χαρακτήρας αλφαριθμητικός
Unsigned Short	Τύπος δεδομένων γλώσσας C (μεγέθους 2 bytes)
Ultrasonic	Υπέρηχος
HIGH	Υψηλή τάση (ηλεκτρονικά κυκλώματα)
LOW	Χαμηλή τάση (ηλεκτρονικά κυκλώματα)
Step-Up converter	Μετατροπέας τάσης (σε υψηλότερη)
Logic Level Converter Bi-Directional	Μετατροπέας λογικής αμφίδρομης επικοινωνίας (ηλεκτρονικά, για I2C)
Community edition	Έκδοση κοινότητας
Opensource	Ανοιχτού λογισμικού
Openhardware	Ανοιχτού υλικού

1. Κεφάλαιο: Εισαγωγή

1.1.Ορισμός Προβλήματος

Στην σημερινή εποχή όπου οι έξυπνες συσκευές είναι αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας των ανθρώπων, γίνεται επιτακτική η ανάγκη για την χαρτογράφηση του ανθρώπινου περιβάλλοντος, με σκοπό την μελέτη του ή την εκτέλεση ενεργειών εντός αυτού από ρομποτικά συστήματα.

Το ανθρωπογενές περιβάλλον, αποτελεί μια μη στατική μορφή περιβάλλοντος, το οποίο όλο και μεταβάλλεται. Αυτή η συνεχής μεταβολή δυσκολεύει την μελέτη του, καθώς και την αξιοποίηση του από αυτοματοποιημένα ή έξυπνα συστήματα. Οπότε είναι επιτακτική η ανάγκη ανάπτυξης έξυπνων ρομποτικών εφαρμογών με την δυνατότητα δυναμικής χαρτογράφησης, καθώς και κίνησης εντός αυτού.

1.2 Σκοπός Διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε με σκοπό τον σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός αυτόνομου ρομποτικού συστήματος, με στόχο την αυτόματη χαρτογράφηση χώρου, ανεξαρτήτως αν είναι εσωτερικός χώρος ή εξωτερικός. Η συσκευή έχει τη δυνατότητα να κινείται με ασφάλεια στον χώρο όπου επιθυμείται να πραγματοποιηθεί χαρτογράφηση, συλλέγοντας δεδομένα από αισθητήρα απόστασης τύπου LiDAR(Light Detection And Ranging), όπου στη συνέχεια αποθηκεύονται σε αποθηκευτικό μέσο (SD Card), ώστε να πραγματοποιηθεί περαιτέρω επεξεργασία, καθώς και η δημιουργία της δυσδιάστατης απεικόνισης του ζητούμενου προς χαρτογράφηση χώρου..

1.3 Διάρθρωση Διατριβής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιείται αναφορά στον τρόπο λειτουργίας των αυτόνομων οχημάτων, στους αλγόριθμους και τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την κίνηση τους στο χώρο. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στις συμβατικές μεθόδους χαρτογράφησης χώρου από αυτόνομα συστήματα. Τέλος, θα αναφερθούν ορισμένες από τις εμπορικές εφαρμογές που κάνουν χρήση των προαναφερθέντων.

Στο τρίτο κεφάλαιο, αναλύεται ο τρόπος προσέγγισης του προβλήματος που πραγματοποιήθηκε από τη παρούσα διατριβή. Η φιλοσοφία σχεδιασμού του ρομποτικού οχήματος, το σύστημα κίνησης, οι αισθητήρες και ο σχεδιασμός της πλακέτας. Επιπρόσθετα, αναλύεται η αλγοριθμική λειτουργία των επιμέρους συστημάτων του ρομποτικού συστήματος. Τέλος, παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας των προγραμμάτων που αναπτύχθηκαν για την επεξεργασία των δεδομένων, καθώς και τη δημιουργία του δυσδιάστατου χάρτη απεικόνισης από υπολογιστικό σύστημα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για τα επιμέρους συστήματα του ρομπότ, ώστε να σχεδιαστεί και να αναπτυχθεί κατάλληλα. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι χάρτες που παράχθηκαν σε προκαθορισμένο χώρο, μελετώντας παράλληλα την ευαισθησία του παρόντα αισθητήρα LiDAR σε ανακλαστικές επιφάνειες.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο σχολιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων και η αποτελεσματικότητα του συστήματος. Επίσης, γίνεται αναφορά για μελλοντικές εφαρμογές και αναβαθμίσεις του ρομποτικού συστήματος και της υπολογιστικής επεξεργασίας των δεδομένων, της παρούσας διατριβής.

2. Κεφάλαιο: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1.Εισαγωγή

2.1.1.Ιστορική Αναδρομή

Ο όρος “Robot” προέκυψε από τον Τσέχο συγγραφέα Karel Čapek, ο οποίος στην παράσταση του “R.U.R.” Rossumoni Univerzální Roboti (μτφ Rossum's Universal Robots), όπου παρουσιάζονται στο κοινό ανδροειδή [1]. Παρ’ όλα αυτά, αναφορές σε ρομποτικά συστήματα συναντιούνται παλαιότερα και στην αρχαία ελληνική μυθολογία, όπως το ρομπότ «Τάλος», το οποίο κατασκευάστηκε από τον θεό Ήφαιστο με σκοπό να προστατεύει το νησί της Κρήτης [2].

Συναντιούνται αρκετές κατασκευές στην αρχαιότητα, με τον όρο «αυτόματα», που προέρχεται από την λέξη «αυτόματον», η οποία υποδηλώνει τη «δράση με τη δική του βούληση» ενός αντικειμένου. Τα αυτόματα αυτά, χρησιμοποιούνταν ως παιχνίδια, εργαλεία αλλά και θρησκευτικά αντικείμενα. Ορισμένοι γνωστοί εφευρέτες αυτόματων ήταν ο Κτησίβιος και ο Ήρωνας της Αλεξάνδρειας. Ως, γνωστός αυτόματος μηχανισμός της αρχαιότητας είναι ο μηχανισμός των Αντικυθήρων, που αποτελεί ένα πρώιμο αναλογικό υπολογιστικό σύστημα που προέβλεπε θέσεις ουράνιων σωμάτων και εκλείψεις [3]. Επιπλέον, συναντιούνται παρόμοιες κατασκευές στην αρχαία Αίγυπτο και Κίνα.



Εικόνα 2. 1: Ανακατασκευές, μουσείο αρχαίας Ελληνικής Τεχνολογίας Κοτσάνα. Αριστερά οδόμετρο του Ήρωνα, κέντρο υδραυλικό ρολόι του Κτησίβιου, δεξιά μηχανισμός Αντικυθήρων

Αυτόματες κατασκευές συναντιούνται και μετέπειτα. Στον μεσαίωνα, εντός της Βυζαντινής αυτοκρατορίας, στην Μέση Ανατολή από τον Άραβα εφευρέτη Al-Jazari [4], στην Αναγέννηση και στις αρχές τις μοντέρνας περιόδου.

2.1.2.Κανόνες Λειτουργίας Ρομποτικού Συστήματος

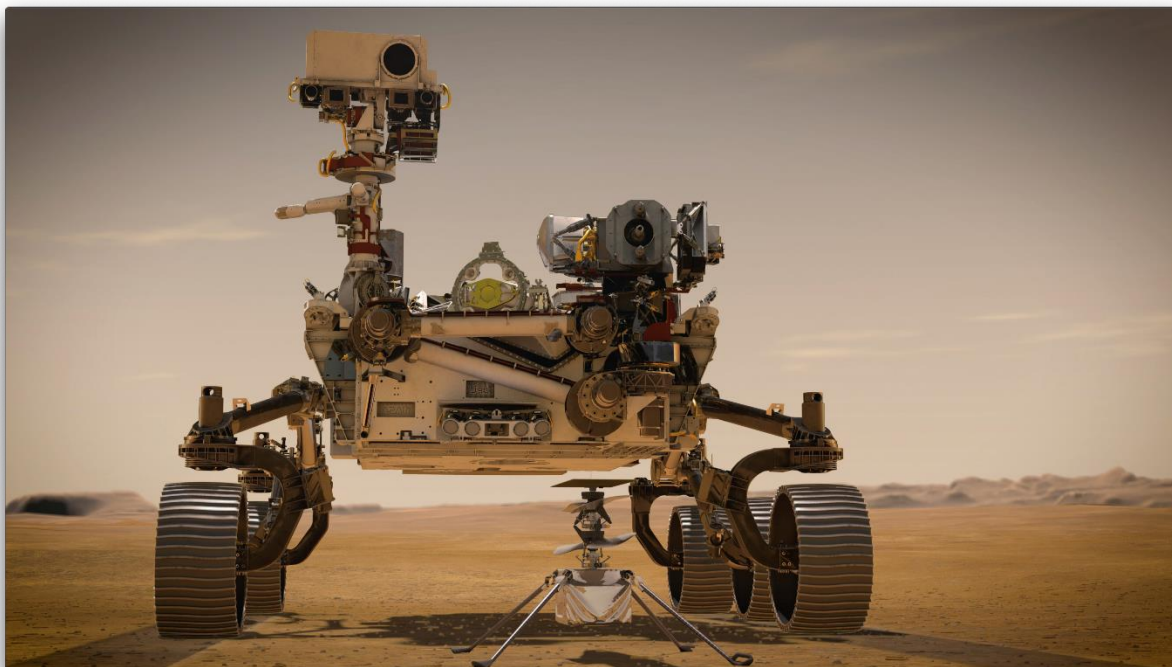
Η εξάπλωση των ρομποτικών συστημάτων στο ανθρώπινο περιβάλλον, δημιούργησε την ανάγκη θέσπισης κανόνων λειτουργίας για την ανάπτυξη των ρομποτικών συστημάτων. Αρκετοί κανόνες έχουν προταθεί από φορείς και ερευνητές του τομέα της ρομποτικής. Παρ' όλα αυτά, βασίζονται στους αρχικούς κανόνες που τέθηκαν από τον Isaac Asimov, στην ιστορία μικρού μήκους επιστημονικής φαντασίας «Runaround», που δημοσιεύθηκε το 1942 [5]. Αυτοί οι κανόνες είναι γνωστοί ως «Οι Τρεις Νόμοι της Ρομποτικής» (μτφ Three Laws of Robotics). Οι νόμοι ορίζονται ως εξής:

- I. Το ρομπότ δεν πρέπει να θέτει σε κίνδυνο άνθρωπο, ακόμα και σε κατάσταση αδράνειας.
- II. Το ρομπότ πρέπει να υπακούει τις ανθρώπινες εντολές, εκτός αν αυτές έρχονται σε αντίθεση με τον πρώτο νόμο.
- III. Το ρομπότ πρέπει να προστατεύει την ύπαρξη του, εφόσον δεν αντιτίθεται με το πρώτο και δεύτερο νόμο.

Γνωστές παραλλαγές έχουν προταθεί από την EPSRC (Engineering and Physical Sciences Research Council) & AHRC (Arts and Humanities Research Council) [5] του Ηνωμένου Βασιλείου, καθώς και του Γενικού διευθυντή της Microsoft Satya Nadella, για την ανάπτυξη τεχνίτης νοημοσύνης, το 2016 [6]. Οι κανόνες λειτουργίας και συμπεριφοράς ενός ρομποτικού συστήματος υπάγονται στα «Roboethics».

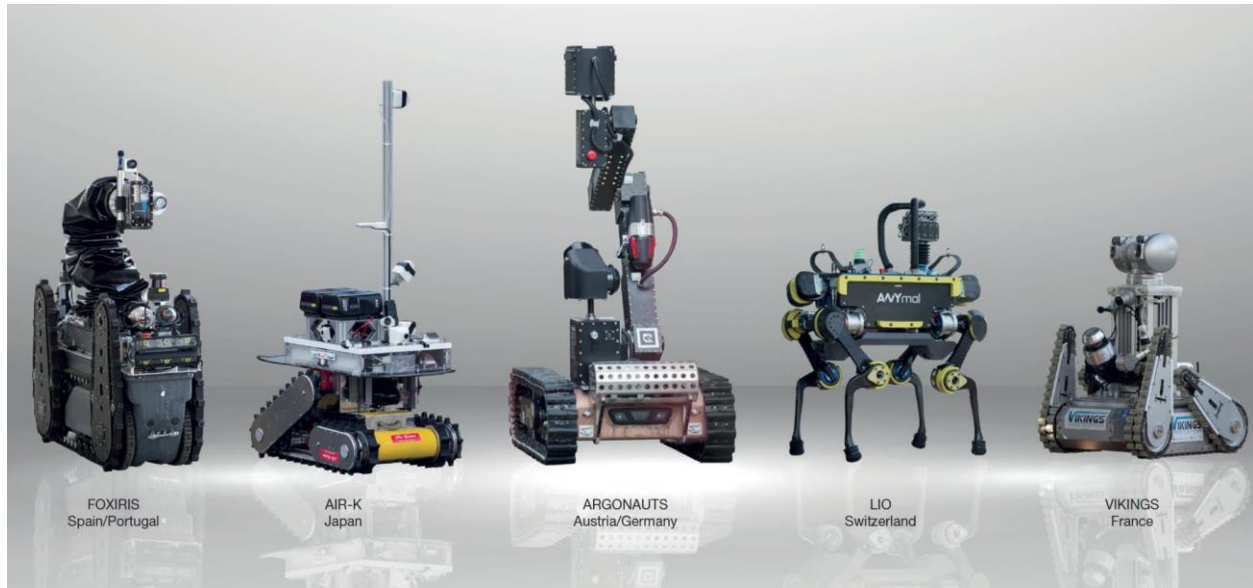
2.2. Αυτόνομα ρομποτικά οχήματα

Ως αυτόνομα ρομπότ, ρομποτικά οχήματα (UVs, Unmanned Vehicles) ορίζονται τα ρομπότ που έχουν τη δυνατότητα να εκτελέσουν τον σκοπό τους, με μεγάλο βαθμό αυτονομίας, δηλαδή χωρίς την επίδραση βοήθειας από τον άνθρωπο. Τα αυτόνομα ρομποτικά συστήματα αντικαθιστούν τον άνθρωπο σε επικίνδυνες και δύσκολες καταστάσεις, όπως σε διαστημικές αποστολές, σε συστήματα επεξεργασίας λυμάτων, σε μονάδες παραγωγής εργοστασίων. Επιπλέον, αντικαθιστούν τον άνθρωπο σε καθημερινές και φορτικές εργασίες, όπως στην συντήρηση και καθαρισμό νοικοκυριών, σε υπηρεσίες παράδοσης αγαθών ή στον τομέα παροχής υπηρεσιών.



Εικόνα 2. 2: Απεικόνισή Perseverance and Ingenuity. Ρομποτικά συστήματα εξερεύνησης του πλανήτη Άρη 2020 [7].

Ιδιαίτερα σημαντικό στον τομέα της ρομποτικής, είναι η δυνατότητα ανάπτυξης ρομποτικών συστημάτων, τα οποία να έχουν τη δυνατότητα να ανταπεξέρχονται δυναμικά στο περιβάλλον τους, είτε είναι επίγεια, υποθαλάσσια, αέρια ή διαστημικά ρομποτικά συστήματα. Η πολυπλοκότητα του περιβάλλοντος, παίζει διαρκή ρόλο στη συμπεριφορά και την ανάπτυξη του ρομπότ. Σε θεωρητικό επίπεδο, η ανάπτυξη ενός ρομποτικού συστήματος το οποίο θα λειτουργεί στο διάστημα ή στον αέρα, είναι απλούστερη, καθώς υπάρχει μικρότερο ποσοστό αβεβαιότητας να συναντήσει κάποιο άγνωστο αντικείμενο που να επηρεάσει την εκτέλεση της προκαθορισμένης του λειτουργίας, σε σχέση με τα επίγεια ή υποθαλάσσια ρομποτικά οχήματα.



Εικόνα 2. 3: Αυτόνομα πρότυπα ρομποτικά συστήματα που πήραν μέρος στο ARGOS challenge 2013-2017 [8].

Για να χαρακτηριστεί ένα ρομποτικό όχημα ως αυτόνομο, πρέπει να τηρούνται ορισμένα από τα ακόλουθα κριτήρια:

- I. Να λαμβάνει πληροφορίες από το άμεσο περιβάλλον του.
- II. Να έχει τη δυνατότητα να εκτελεί τις λειτουργίες του για μεγάλο χρονικό διάστημα, χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης.
- III. Να κινείται εντός του περιβάλλοντος του, χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης.
- IV. Να αποφεύγει καταστάσεις όπου μπορούν να βλάψουν άνθρωπο, ή και το ίδιο το σύστημα, σύμφωνα με τους κανόνες λειτουργίας ενός ρομπότ (ενότητα 2.1.2).

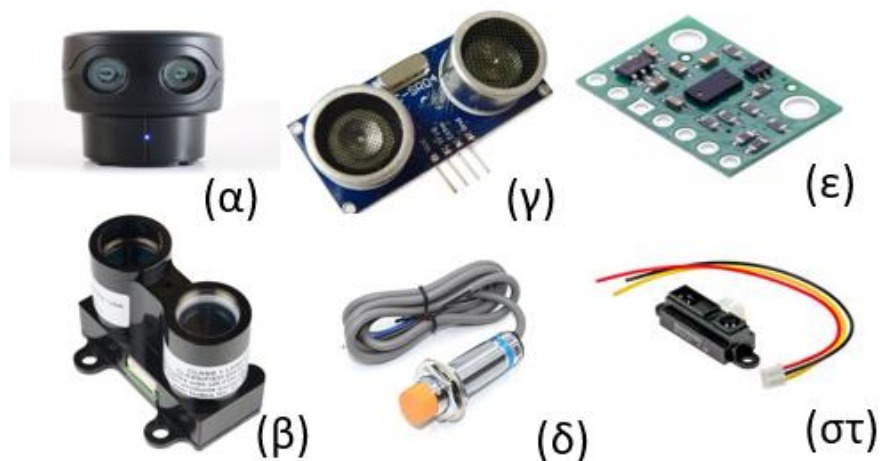
Παρόλα αυτά, ένα αυτόνομο ρομποτικό σύστημα χρίζει συντήρησης όπως κάθε άλλο μηχανικό σύστημα.

2.2.1. Αισθητήρες

Για την εκτέλεση των προγραμματισμένων λειτουργιών ενός ρομποτικού συστήματος, είναι αναγκαία η συλλογή και η επεξεργασία πληροφοριών από το περιβάλλον δράσης τους. Ως αισθητήρας ορίζεται η συσκευή η οποία παρέχει δεδομένα εισόδου σε μια ηλεκτρονική συσκευή από το φυσικό του περιβάλλον, σε μορφή ηλεκτρικού σήματος. Τα δεδομένα εισόδου δύναται να είναι υπό μορφή φωτός (ορατού ή μη), κίνηση, θερμοκρασία, πίεση, θέση κλπ. Με αυτόν τον τρόπο, το ρομπότ έχει τη δυνατότητα να γνωρίζει τη θέση του, την ταχύτητα, την απόσταση από στόχο, την κατάσταση, να πραγματοποιήσει μετρήσεις κλπ.

Οι αισθητήρες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση την είσοδο που παρέχουν σε ένα ρομποτικό σύστημα ως αναλογικοί ή ψηφιακοί [9]. Επιπλέον κατηγοριοποίηση προκύπτει με βάση την χρησιμότητα τους, που διακρίνεται σε:

- I. **Απόστασης/ Χώρου:** Αυτή η κατηγορία αισθητήρων παρέχει δεδομένα για τις αποστάσεις αντικειμένων στο περιβάλλον δράσης του ρομποτικού συστήματος. Εδώ συναντώνται αισθητήρες μαγνητικής επαγωγής, φωτός όπως αισθητήρες υπέρυθρων, laser, VCSEL (Vertical-cavity surface-emitting laser) και LiDAR. Επιπλέον, συναντιούνται αισθητήρες υπερήχων, ανίχνευσης κίνησης και επαφής (διακόπτες).



Εικόνα 2. 4: Αισθητήρες απόστασης: LiDAR αισθητήρες(α, β), αισθητήρες υπέρυθρων (γ),επαγωγής (δ), VCSEL(ε), υπέρυθρων (στ).

- II. **Περιβάλλοντος:** Χρησιμοποιούνται για τη συλλογή δεδομένων για την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το περιβάλλον δράσης τους. Διακρίνονται σε θερμοκρασίας, υγρασίας (εδάφους ή αέρα), βροχής, βαρομετρικής πίεσης, αερίων (όπως Co₂,LGP,Μεθανίου, Αλκοόλ), ταχύτητας ανέμου, σκόνης/σωματιδίων, ραδιενέργειας κλπ.
- III. **Δύναμης:** Ανιχνεύουν την ύπαρξη δύναμης στον αισθητήρα, όπως φορτίο, βάρος, τάση, πίεση, συμπίεση, μαγνητισμό, επιτάχυνση κλπ. Σε αυτή την κατηγορία εκπίπτουν οι αισθητήρες κλίσης, δόνησης (Piezo αισθητήρας), αντίστασης δύναμης, ευλυγισίας, φορτίου [10].
- IV. **Κίνησης:** Επιτρέπουν στο ρομπότ να ανιληφθεί την κίνηση του στον χώρο. Οι αισθητήρες αυτοί διακρίνονται σε επιταχυνσιόμετρο, γυροσκόπιο, μαγνητόμετρο, encoders (κωδικοποιητές) κινητήρων κλπ.

2.3. Αυτόνομη Πλοήγηση

Ως πλοήγηση ορίζεται η δυνατότητα καθορισμού της θέσης ενός οχήματος (ή ατόμου) εντός του περιβάλλοντα χώρο του, καθώς και εύρεση της ποιάς του προς τον επιθυμητό του στόχο. Η αυτόνομη πλοήγηση επιτυγχάνει τα προαναφερθέν για ένα ρομποτικό σύστημα, χωρίς την παρέμβαση του ανθρώπου [11]. Η αυτόματη πλοήγηση χρησιμοποιείται από τα αυτόνομα αυτοκίνητα για την κίνηση τους εντός οδικού δικτύου, διαστημικές συσκευές που κινούνται εντός του διαστήματος, αλλά και σε καθημερινές συσκευές όπως οι ρομποτικές σκούπες.

Η αυτονομία πλοήγησης ενός ρομποτικού συστήματος, μπορεί να είναι **μερική** ή **πλήρης**. *Μερική αυτονομία* υπάρχει όταν το σύστημα έχει την δυνατότητα να λάβει εντολές από έναν απομακρυσμένο χρήστη, ως προς την εκτέλεση μιας κίνησης, αλλά το ρομπότ έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων που έχει λάβει από τους αισθητήρες του, έχει την δυνατότητα να μην πραγματοποιεί την δοθείσα εντολή του χρήστη, λόγω πιθανής επικινδυνότητας της κίνησης για την ακεραιότητα ρομπότ (πχ εμπόδιο, στενό πέρασμα, γκρεμός κλπ.). *Πλήρης αυτονομία* υπάρχει όταν δεν λαμβάνει απομακρυσμένες εντολές από χρήστη και κινείται με βάση τον αλγόριθμο που έχει σχεδιαστεί. Η πλήρως αυτόνομη πλοήγηση μπορεί να χωριστεί σε υποκατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο προσέγγισης της, στην **ευρετική** (Heuristic) και στην **βέλτιστη** (Optimal) προσέγγιση.

Στην *ευρετική προσέγγιση* [12], το ρομποτικό σύστημα ακολουθεί πρακτικούς κανόνες και συμπεριφορές, χωρίς απαραίτητα μέσα από αυτές τις ενέργειες να προκύπτει βέλτιστη διαδρομή ως προς τον στόχο της πλοήγησης. Επιπλέον, σε αυτή την προσέγγιση δεν απαιτείται από το ρομποτικό σύστημα να έχει εκτενείς πληροφορίες για το περιβάλλον κίνησης του. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι απλές ρομποτικές σκούπες, ή οποίες όταν συναντάνε κάποιο εμπόδιο, γυρνάνε σε τυχαίο αριθμό μοιρών και συνεχίζουν την πορεία τους. Με αυτόν τον τρόπο και με την συνεχή επαναληψιμότητα, στατιστικά θα έχουν καθαρίσει το σύνολο του χώρου που βρίσκονται, πετυχαίνοντας τελικά τον στόχο τους.



Εικόνα 2. 6: Ρομποτική σκούπα σε λειτουργία [13].

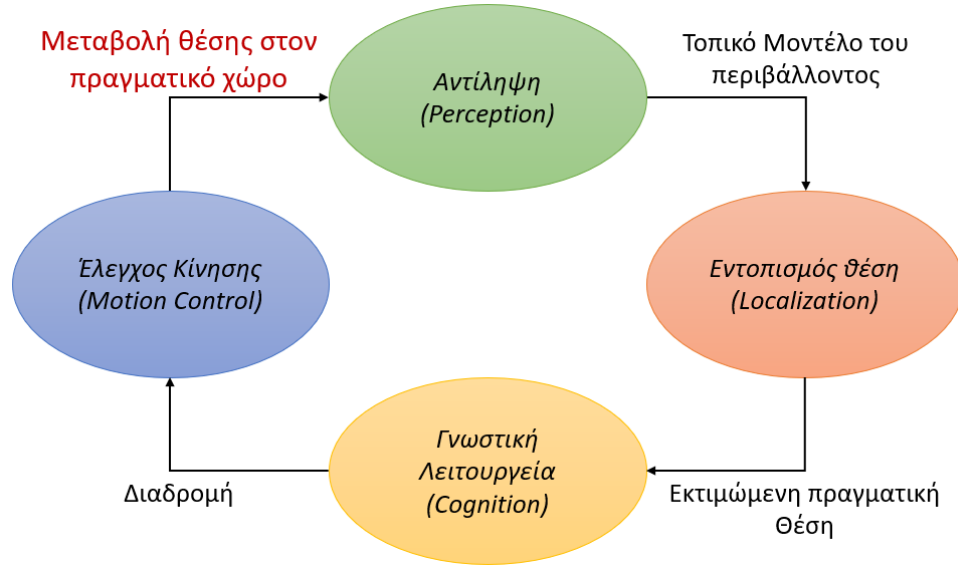
Σε βέλτιστη προσέγγιση [14], το ρομποτικό σύστημα κατασκευάζει ή ενημερώνει ένα μοντέλο του περιβάλλοντος του και στη συνέχεια αναζητά το βέλτιστο μονοπάτι ώστε να φτάσει στον στόχο του. Αυτή η προσέγγιση απαιτεί περισσότερες πληροφορίες για το περιβάλλον του ρομπότ, σε αντίθεση με την ευρετική προσέγγιση. Επιπλέον, η εύρεση του μονοπατιού προς τον στόχο προκύπτει έπειτα από βελτιστοποίηση, μέσω αλγορίθμων ή συμπεριφορών του συστήματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της βέλτιστης προσέγγισης είναι η αυτόνομη οδήγηση οχημάτων, που λόγω της πολυπλοκότητας και αβεβαιότητας που επικρατεί στο οδικό δίκτυο, δεν είναι δυνατή μια *ευρετική* προσέγγιση.



Εικόνα 2. 7: Αυτόνομο όχημα της εταιρείας Tesla (αριστερά) [15]. Αυτόνομοι ρομποτικοί βραχίονες στην γραμμή παραγωγής της εταιρείας Nokia (δεξιά) [16].

Παρ' όλα αυτά, δεν είναι αναγκαία η χρήση αποκλειστικά μόνο μίας εκ των μεθόδων προσέγγισης. Αρκετά συχνά απαιτείται ο συνδυασμός τους, ώστε να επιτευχθεί ο στόχος εντός προκαθορισμένων χρονικών ορίων, από ένα ρομποτικό σύστημα. Παράδειγμα αποτελεί ο τρόπος αλλαγής λωρίδας και προσπέρασης από ένα όχημα αυτόνομης οδήγησης. Σε ένα βέλτιστο σύστημα, απαιτούνται πληροφορίες για το περιβάλλον πέρα από το μπροστινό του αυτοκίνητο, κάτι που πιθανώς να μην είναι απολύτως εφικτό. [17]

Η αυτόνομη πλοήγηση αποτελεί μια εξαιρετικά πολύπλοκη συμπεριφορά για ανάπτυξη σε ένα αυτόνομο ρομποτικό σύστημα. Για την επιτυχή λειτουργία της πλοήγησης, είναι αναγκαία η ανάπτυξη της *αντίληψης* του ρομπότ (**perception**), δηλαδή η ικανότητα του να εκμαυεύει τα δεδομένα που του παρέχουν οι αισθητήρες του, με τρόπο που να επιτρέπει την περαιτέρω κίνηση του στον χώρο. Εξίσου σημαντική είναι και η ικανότητα *εντοπισμού της θέσης του* (**localization**), καθώς με αυτόν τον τρόπο έχει τη δυνατότητα να καθορίζει την θέση του στον περιβάλλοντα χώρο. Επίσης, αναγκαία είναι η ύπαρξη *γνωστικής λειτουργίας* (**cognition**), ώστε το ρομποτικό σύστημα να έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει αποφάσεις για να φτάσει τον στόχο του. Τέλος, απαιτείται ένα σύστημα *ελέγχου κίνησης* (**motion control**), ελέγχοντας κατάλληλα τους κινητήρες του, θέτοντας το σασί του ως προς την επιθυμητή του πορεία. [18]



Εικόνα 2. 8: Συμπεριφορές για αυτόνομη πλοήγηση.

2.3.1. Εντοπισμός Θέσης

Ως **εντοπισμός θέσης (localization)** ορίζεται η συμπεριφορά της θέσης ενός ρομποτικού συστήματος εντός του περιβάλλοντα χώρου του. Αποτελεί μια από τις βασικές λειτουργίες της αυτόνομης πλοήγησης, διότι έχει ζωτικό ρόλο στην διαδικασία λήψης απόφασης των κινήσεων του ρομπότ. Οι πληροφορίες τις οποίες λαμβάνει το ρομπότ από αυτήν τη συμπεριφορά αφορούν τη θέση του στο χώρο, τη διεύθυνση και την φορά του εντός αυτού. Επιπλέον, με βάση τις άνωθεν πληροφορίες, το σύστημα πρέπει να αντιμετωπίσει την αβεβαιότητα και το θόρυβο των μετρήσεων που προκύπτουν από το περιβάλλον [19]. Θόρυβος είναι πιθανό να προκύψει στο σύστημα οδομετρίας (πχ σπινάρισμα κινητήρα), στους αισθητήρες από την φύση των υλικών αντικειμένων στο περιβάλλον (πχ ανακλαστικές επιφάνειες, γυαλί), ακόμα και από το σύστημα επεξεργασίας (πχ ανάλυση από 8bit μικροελεγκτή).

2.3.1.1. Οδομετρία

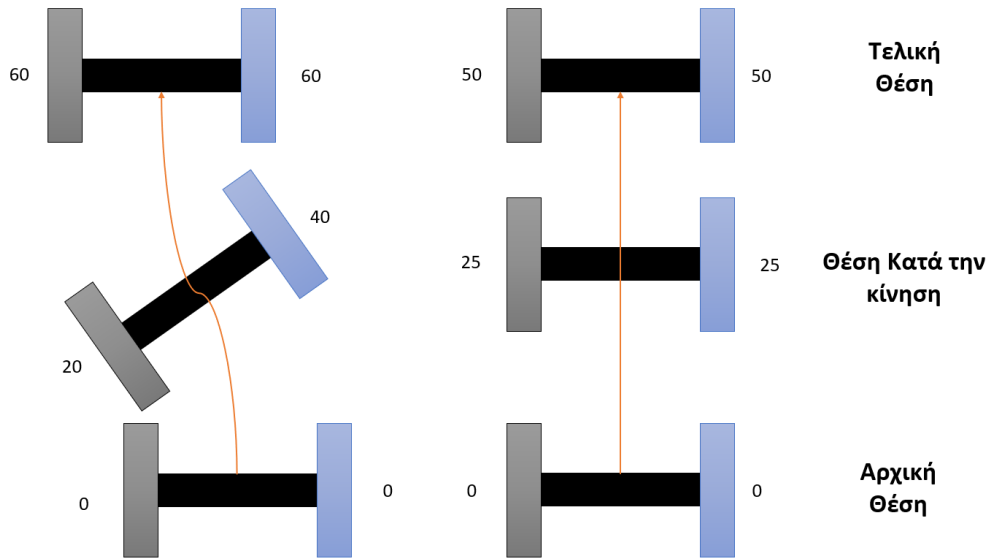
Οδομετρία [20] είναι η χρήση δεδομένων από αισθητήρες κίνησης, με σκοπό να καθοριστεί η θέση του ρομπότ σε σχέση με μία υπάρχουσα γνωστή θέση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αισθητήρα οδομετρίας, είναι οι κωδικοποιητές (encoders) στους κινητήρες. Αποτελεί τεχνική που είναι επιρρεπής σε σφάλματα, διότι βασίζεται στην συσσωρευτική συλλογή δεδομένων, όπως οι εναλλαγές κατάστασης ενός encoder. Λόγω της συσσώρευσης δεδομένων, οποίο σφάλμα δημιουργηθεί κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, θα ενισχύεται με την πάροδο του χρόνου. Χαρακτηριστικά σφάλματα οδομετρίας είναι:

- I. Ανακρίβεια στη μέτρηση της περιμέτρου της ρόδας. Η περίμετρος προκύπτει από τον τύπο 2.1, όπου το πλήθος των δεκαδικών ψηφίων του π στη μέτρηση επηρεάζουν σημαντικά την ακρίβεια.

$$C = 2\pi r \quad (2.1)$$

- II. Διαφορετικά μεγέθη ροδών σε οχήματα με πολλαπλές ρόδες.
- III. Λάθος στην μέτρηση των encoders (πχ σπινάρισμα ρόδας).

- IV. Αργή επεξεργασία των δεδομένων οδομετρίας. Σε συστήματα με πολλαπλούς κινητήρες, όταν η αρχιτεκτονική του ρομπότ δεν είναι σχεδιασμένη ώστε να εγγυάται ότι το σύστημα μπορεί να ταξιδέψει σε ευθεία πορεία. Στο παράδειγμα της εικόνας που ακολουθεί (εικόνα 2.9), παρόλο που οι μετρήσεις των encoders είναι οι ίδιες μεταξύ τους στο τέλος της κίνησης, η πορεία που ακολούθησαν είναι διαφορετική. Στα αριστερά το σύστημα πραγματοποίησε μια καμπύλη πορεία, ενώ στα δεξιά το ρομπότ πραγματοποίησε ευθεία πορεία. Η διαφορά στην κίνηση παρατηρείται στο πλήθος των περιστροφών από τους encoders.



Εικόνα 2. 9: Αργή επεξεργασία οδομετρίας.

Για την αποφυγή των προαναφερθέντων σφαλμάτων, ένα ρομποτικό σύστημα περιοδικά χρησιμοποιεί εναλλακτικούς τρόπους και αισθητήρες για να προσδιορίσει την θέση του, όπως με τα επιταχυνσιόμετρα, μετρήσεις απόστασης από προηγούμενως γνωστά αντικείμενα κλπ.

2.3.1.2. Θόρυβος μετρήσεων

Με τον όρο θόρυβος μετρήσεων εννοείται η μέτρηση που πάρθηκε από έναν αισθητήρα, η οποία έχει απόκλιση από την πραγματικότητα. Η μέτρηση αυτή μπορεί να έχει προκύψει από μη σωστή βαθμονόμηση του αισθητήρα (**Calibration**), από παράγοντες του περιβάλλοντος (πχ. Ανακλαστικές επιφάνειες, για αισθητήρα απόστασης), ακόμα και από φθορά του αισθητήρα(πχ. σε αισθητήρες μέτρησης υγρασίας εδάφους).

Για την μείωση της αβεβαιότητας των μετρήσεων, χρησιμοποιούνται *πιθανολογικές (probabilistic) τεχνικές επεξεργασίας* τους. Κοινές τεχνικές είναι η μέθοδος *Monte Carlo Localization (MCL)*, γνωστή και ως *φίλτρο σωματιδίων (Particle filter)* και το εκτεταμένο φίλτρο **Kalman (extended Kalman Filter, EKF)**.

Στη μέθοδο του *φίλτρου σωματιδίων* [21] [22], το ρομποτικό σύστημα προσπαθεί να υπολογίσει τη θέση και τη φορά του σε έναν χάρτη που του έχει δοθεί ως είσοδος εξαρχής, πραγματοποιώντας διαδοχικές κινήσεις και μετρήσεις από τους αισθητήρες. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί στοιχειώδεις δομές, τα *σωματίδια (particles)*, τα οποία απεικονίζουν την πιθανή θέση του ρομπότ. Σε κάθε σωματίδιο, ανατίθεται μια τιμή βάρους, η οποία υποδηλώνει την πιθανότητα του σωματιδίου να είναι η πραγματική θέση του

ρομπότ. Με διαδοχικές μετρήσεις και κινήσεις εντός του χώρου, αυξάνει το βάρος στα σωματίδια όπου οι υπολογισμοί της μετατόπισης τους ανταποκρίνονται στις μετρήσεις του ρομπότ, ενώ αντίθετα μειώνει το βάρος ή εξαλείφει τα σωματίδια, για τα οποία ο υπολογισμός των μετατοπίσεων τους δεν ανταποκρίνεται σε αυτές. Με διαδοχικές εκτελέσεις της άνωθεν διαδικασίας, προκύπτει η τελική θέση του ρομπότ. Ακολουθεί αλγοριθμική απεικόνιση της μεθόδου στην εικόνα 2.10, όπου \mathbf{x} είναι τα σωματίδια, \mathbf{t} ο χρόνος μέτρησης, \mathbf{u} η εντολή, \mathbf{z} τα δεδομένα από τους αισθητήρες και \mathbf{X} οι πιθανές θέσεις.

```

Algorithm ParticleFilterMCL( $X_{t-1}, u_t, z_t$ )
 $\bar{X}_t = 0$ 
 $X_t = 0$ 
 $m = 1$ 
For  $m$  to  $M$ :
     $x_t^{[m]} = \text{Motion\_Update}(u_t, x_{t-1}^{[m]})$ 
     $w_t^{[m]} = \text{Sensor\_Update}(z_t, x_t^{[m]})$ 
     $\bar{X}_t = \bar{X}_t + \{x_t^{[m]}, w_t^{[m]}\}$ 
EndFor
 $m = 1$ 
For  $m$  to  $M$ :
    Draw  $x_t^{[m]}$  from  $\bar{X}_t$  with probability  $\propto w_t^{[m]}$ 
     $X_t = X_t + x_t^{[m]}$ 
EndFor
return  $X_t$ 
    
```

Εικόνα 2. 10: Αλγοριθμική απεικόνιση Monte Carlo Localization [23].

Τα φίλτρα *Kalman* [24] αποτελούν έναν από τους πιο χρησιμοποιημένους αλγορίθμους στον τομέα της μηχανικής. Χρησιμοποιούνται στη συγχώνευση των μετρήσεων από τους αισθητήρες ενός ρομποτικού συστήματος, με σκοπό να εξομαλύνει τον θόρυβο από αυτές, ώστε να βρεθεί η πραγματική θέση του ρομπότ. Ο αλγόριθμος προτάθηκε το 1960 από τον Ούγγρο-Αμερικάνο μηχανικό και μαθηματικό *émigré Rudolf E. Kálmán* [25]. Το φίλτρο χρησιμοποιήθηκε στο σύστημα πλοήγησης των διαστημικών αποστολών **Apollo** της *Nasa* και είχε ζωτικό ρόλο στην επιτυχία τους. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το **Extended Kalman Filter (EKF)**, καθώς έχει τη δυνατότητα να λειτουργήσει σε μη γραμμικά συστήματα. Το EKF χρησιμοποιείται στα ρομποτικά συστήματα για τη συγχώνευση των μετρήσεων οδομετρίας, lidar, GPS κλπ. Ακολουθούν οι εξισώσεις του φίλτρου EKF (2.2),(2.3), όπου στην πρώτη το θεωρητικό μοντέλο του φίλτρου υπολογίζει τη θέση του ρομπότ σε σχέση με την προηγούμενη θέση του, ενώ η δεύτερη όπου πραγματοποιείται η μοντελοποίηση της μέτρησης του αισθητήρα [26] [27].

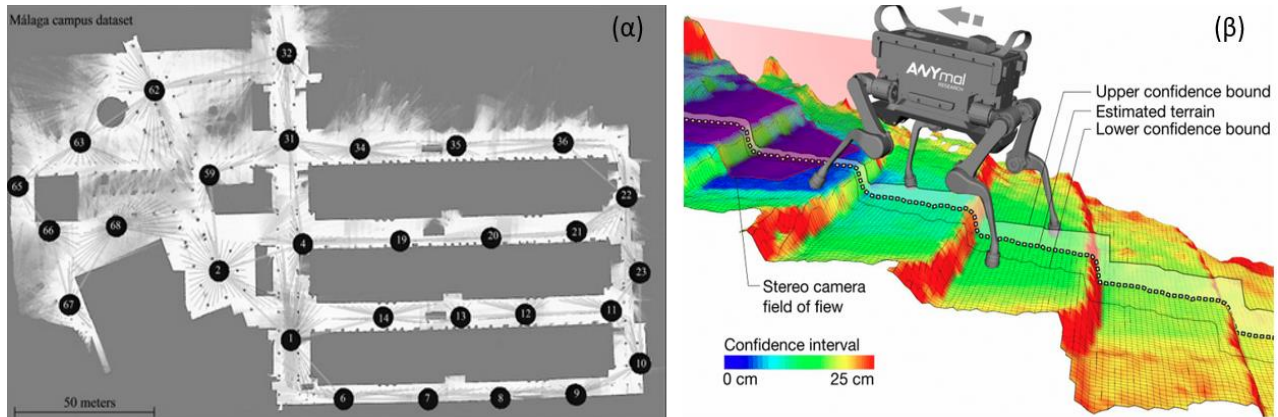
$$X_k = f(X_{k-1}, u_k) + W_k \quad (2.2)$$

$$z_k = h(x_k) + u_k \quad (2.3)$$

Όπου X_k είναι η θέση του ρομπότ, z_k το μοντέλο των μετρήσεων, W_k, u_k είναι ο θόρυβος του μοντέλου και των μετρήσεων.

2.3.2. Ρομποτική Χαρτογράφηση Χώρου

Η ρομποτική χαρτογράφηση [28] χώρου ασχολείται με τη δυνατότητα δημιουργίας και χρήσης ενός χάρτη του περιβάλλοντος, στον οποίο το ρομποτικό σύστημα έχει τη δυνατότητα να προσδιορίσει την θέση του εντός αυτού, πραγματοποιώντας τη λειτουργία στόχο του. Οι χάρτες διακρίνονται σε χάρτες εξωτερικού χώρου, όπως οι χάρτες μορφολογίας εδάφους και σε χάρτες εσωτερικού χώρου, όπως οι κατόψεις κτιρίων, ορόφων κλπ.

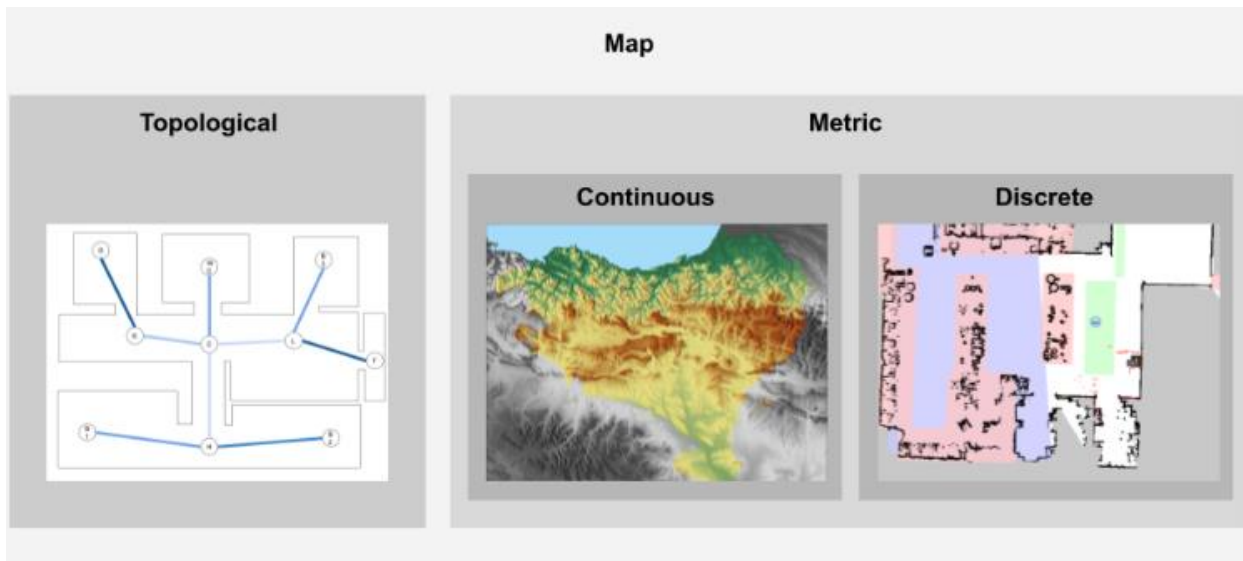


Εικόνα 2. 11: Χάρτες δημιουργημένοι από ρομπότ. (α) εσωτερικού χώρου- ορόφου [28], (β) Εξωτερικού χώρου (μορφολογίας εδάφους) [29].

Οι πληροφορίες που λαμβάνει το ρομπότ για τη δημιουργία ή την πλοήγηση εντός του περιβάλλοντος του, διακρίνονται σε *ιδιοθητικές (idiothetic)* και σε *αλλοθητικές (allothetic)*. Οι ιδιοθητικές πληροφορίες, αποτελούν τις πληροφορίες που λαμβάνει το ρομποτικό σύστημα από τη δική του κίνηση εντός του χώρου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ιδιοθητικής πληροφορίας είναι οι μετρήσεις του συστήματος οδομετρίας. Οι αλλοθητικές πληροφορίες, αποτελούν τις πληροφορίες που λαμβάνει το ρομπότ για τη θέση του από το περιβάλλον του. Παράδειγμα αποτελούν οι αισθητήρες μέτρησης απόστασης, όπως το σύστημα LiDAR, sonar κλπ.

Η πλοήγηση εντός του περιβάλλοντος και ο υπολογισμός της τρέχουσας θέσης του ρομπότ, με τη χρήση της αρχικής του θέσης ή ενός *γνωστού σημείου (landmark)*, σε συνδυασμό με τις μετρήσεις οδομετρίας (ταχύτητα, περιστροφές κινητήρα κλπ.), ονομάζεται **dead reckoning** [30]. Αποτελεί τεχνική που βασίζεται σε ιδιοθητικές πληροφορίες και χρησιμοποιείται λόγω της απλότητας της συνήθως σε συστήματα χαμηλής επεξεργαστικής ισχύς. Επιπλέον, χρησιμοποιείται συχνά σε συνδυασμό και με άλλες τεχνικές πλοήγησης. Καθώς βασίζεται στην οδομετρία, είναι τεχνική που είναι επιρρεπής σε ανακρίβειες, ειδικά όταν χρησιμοποιείται για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς την χρήση μεθόδων αποσφαλμάτωσης.

Η δομή του χάρτη που χρησιμοποιεί το ρομπότ, μπορεί να είναι *μετρική* ή *τοπολογική* [31] [32]. Στη **μετρική**, τα αντικείμενα τοποθετούνται με βάση τις συντεταγμένες τους εντός του δυσδιάστατου χώρου. Όμως, η δομή αυτή είναι επιρρεπής σε ανακρίβειες, καθώς υπάρχουν περιορισμοί και δυσκολίες στην ακρίβεια του υπολογισμού των αποστάσεων από αυτήν. Η **τοπολογική** δομή, βασίζεται στις θέσεις που έχει λάβει το ρομπότ, αποθηκεύοντας συνήθως τις αποστάσεις αυτών. Ο χάρτης σε αυτή την περίπτωση, αποτελείται από ένα γράφημα με κόμβους, όπου οι κόμβοι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις και οι γραμμές τα μονοπάτια.



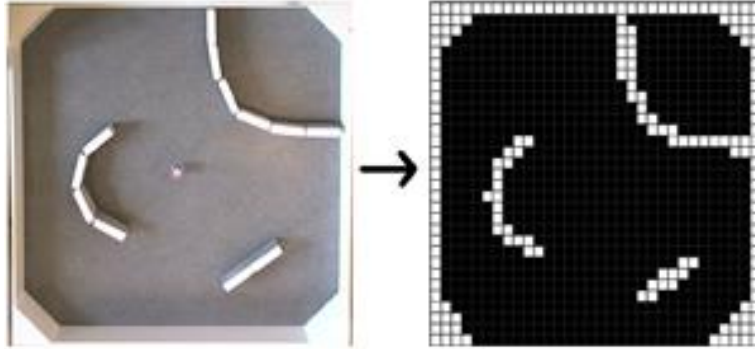
Εικόνα 2. 12: Μετρική και Τοπολογική απεικόνιση [31].

Ως προς την αναπαράσταση, οι χάρτες διακρίνονται σε *χάρτες αντικειμένων*, *ελεύθερου χώρου* και στους *σύνθετους* [33]. Οι χάρτες **αντικειμένων** (object map) αποτελούν τους χάρτες που αποθηκεύουν και αναπαριστούν τις θέσεις των αντικειμένων/ εμποδίων, όπου δεν έχει πρόσβαση το ρομπότ. Οι χάρτες **ελεύθερου χώρου** (free space), σε αντίθεση με τους χάρτες αντικειμένων, αποθηκεύουν τις θέσεις που μπορεί να κινηθεί το ρομποτικό σύστημα. Οι **σύνθετοι** χάρτες αποτελούν συνδυασμό των δύο προαναφερθεισών χαρτών.



Εικόνα 2. 13: Σύνθετος χάρτης, με γκρι χρώμα είναι ο ελεύθερος χώρος (free space map), με μαύρο τα αντικείμενα εμπόδια (object map) [34].

Οι άνωθεν χάρτες ανήκουν στην κατηγορία των ογκομετρικών χαρτών. Συχνά σε αυτούς πραγματοποιείται συγχώνευση των μετρήσεων και δημιουργία *χαρτών πλέγματος* (**grid maps**) [35] με σκοπό την μείωση του θορύβου από τις μετρήσεις, της αβεβαιότητας της θέση του ρομπότ, καθώς και τη μείωση μη απαραίτητων δεδομένων για επεξεργασία από το ρομποτικό σύστημα, ώστε να κινηθεί εντός αυτού. Το μέγεθος του κάθε πλέγματος (grid) καθορίζει την ανάλυση του χάρτη.



Εικόνα 2. 14: Παράδειγμα grid χάρτη [35].

2.4. SLAM Αλγόριθμοι

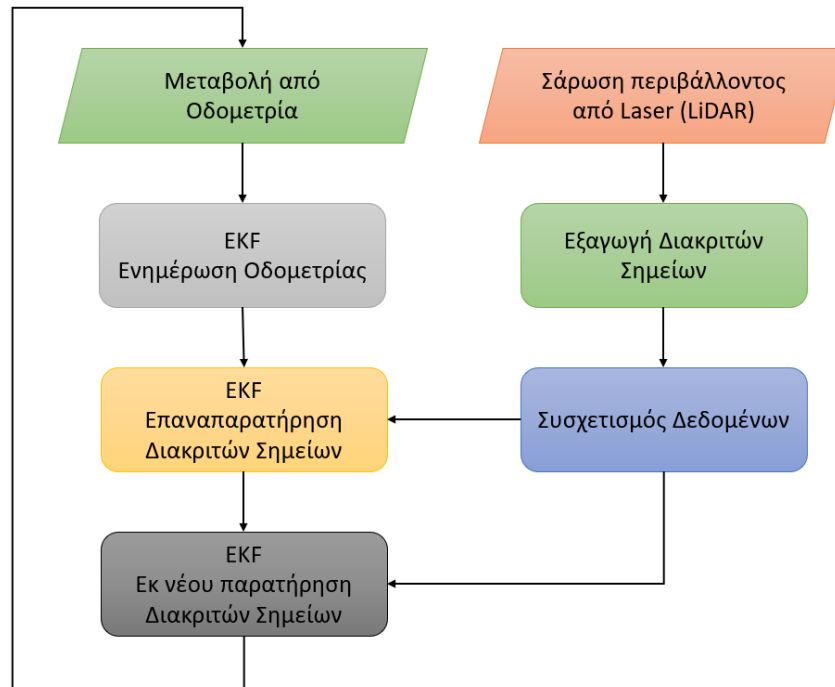
Οι αλγόριθμοι **SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)** [36], δημιουργήθηκαν με σκοπό να λύσουν το υπολογιστικό πρόβλημα των ρομποτικών συστημάτων ως προς την κατασκευή και ανανέωση των χαρτών που δημιουργούν, καθώς και της τοποθέτησης τους εντός αυτού (Localization). Αναπτύχθηκαν αρχικά από τους Hugh Durrant-Whyte και John J. Leonard. Χρησιμοποιούνται συχνά από τα αυτοκινούμενα οχήματα, UAVs, από τα οχήματα εξερεύνησης άλλων πλανητών (planetary rovers), ρομποτικές σκούπες κλπ. Υπάρχουν πολλαπλές υλοποιήσεις αλγόριθμων τύπου SLAM, καθώς εστιάζουν κυρίως στην λειτουργικότητα σε κάθε περίπτωση.

Οι αλγόριθμοι SLAM, ώστε να λειτουργήσουν σωστά, πραγματοποιούν τα ακόλουθα:

- I. Εξαγωγή των διακριτών σημείων (**Landmark Extraction**).
- II. Συσχετισμό Δεδομένων (**Data association**).
- III. Εκτίμηση θέσης (**State Estimation**).
- IV. Ενημέρωση νέας θέσης (**State update**).
- V. Ενημέρωση των διακριτών σημείων (**Landmark Update**).

Η τμηματοποίηση των άνωθεν βημάτων, καθιστά ευκολότερη την αντιμετώπιση τους. Οι αλγόριθμοι αυτού του είδους μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκτός από δυσδιάστατο και σε τρισδιάστατο περιβάλλον κίνησης.

Ως **διακριτά σημεία** [36] εννοούνται χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος που μπορούν να παρατηρηθούν ξανά με ευκολία και ξεχωρίζουν από το υπόλοιπο περιβάλλον κίνησης, χωρίς η παρατήρησή τους να επηρεάζεται από τη θέση και τη φορά του ρομπότ. Επιπλέον, τα διακριτά σημεία πρέπει να υπάρχουν σε πληθώρα εντός του περιβάλλοντος και να είναι εύκολα ευδιάκριτα μεταξύ τους, ώστε όταν το ρομπότ τα ξανά παρατηρήσει, να καταφέρει να τα ξεχωρίσει. Τέλος, τα διακριτά σημεία πρέπει να είναι στάσιμα, καθώς αν κινούνται θα επηρεάζουν την εκτιμώμενη θέση του ρομποτικού συστήματος. Παράδειγμα ενός κινούμενου, αρά και μη θεμιτού διακριτού σημείου, είναι η θέση ενός ανθρώπου εντός του περιβάλλοντος. Σε έναν εσωτερικό χώρο, ως διακριτά σημεία μπορούν να τεθούν οι γωνίες ενός δωματίου, καθώς και οι τοίχοι μεταξύ αυτών, διότι στον χάρτη του ρομποτικού συστήματος, αποτελούν ευθείες γραμμές και καλά ορισμένες κάθετες γωνίες.

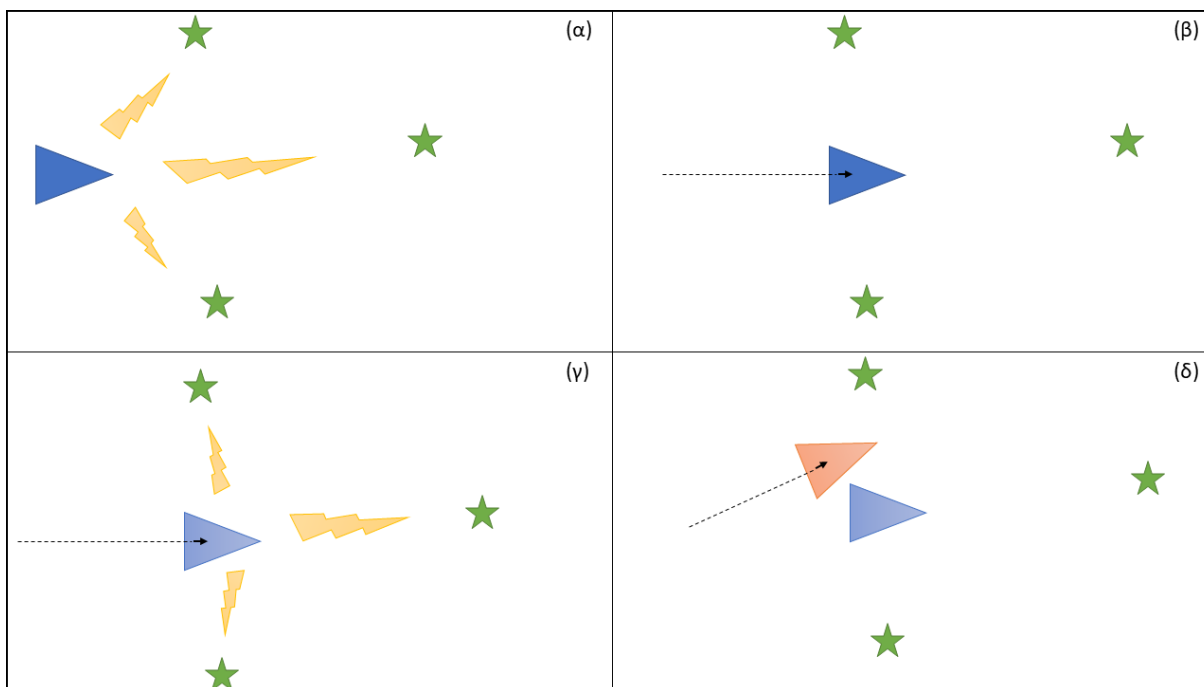


Εικόνα 2. 15: Επισκόπηση της διαδικασίας SLAM [36].

Σύμφωνα με την εικόνα 2.15, ακολουθεί γενική περιγραφή της διαδικασίας SLAM. Σκοπός είναι να χρησιμοποιηθεί το περιβάλλον ώστε να ενημερωθεί το ρομποτικό σύστημα για τη θέση του, καθώς η οδομετρία είναι επιρρεπής σε σφάλματα. Στην διαδικασία SLAM γίνεται εκτεταμένη χρήση των Extended Kalman Filter (EKF). Χρησιμοποιούνται ώστε το ρομποτικό σύστημα να ενημερώνει τη θέση που βρίσκεται σε σχέση με τα διακριτά σημεία. Επιπλέον, το EKF πραγματοποιεί εκτίμηση της αβεβαιότητας της θέσης του ρομπότ, αλλά και των διακριτών σημείων.

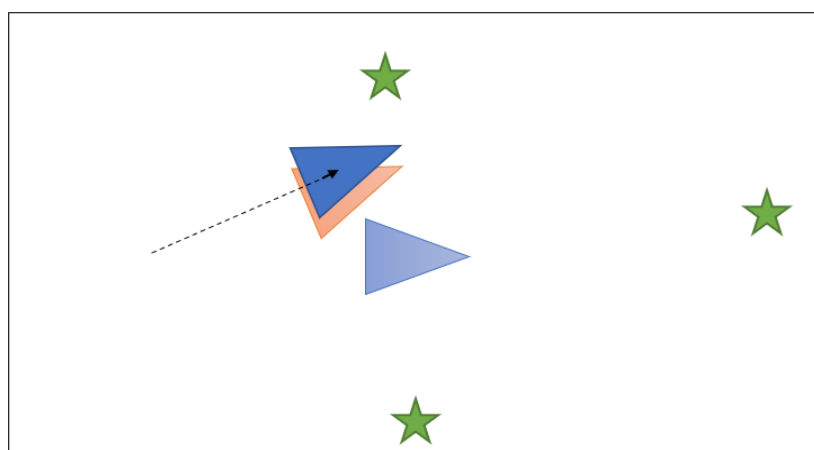
Όταν υπάρξει αλλαγή στην οδομετρία λόγω κίνησης του ρομπότ, η αβεβαιότητα που προκύπτει από αυτήν την κίνηση, ενημερώνεται με την χρήση του EKF στο στάδιο ενημέρωσης της οδομετρίας. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται σάρωση από αισθητήρες μέτρησης απόστασης στο περιβάλλον, συνήθως Laser (LiDAR). Έπειτα, γίνεται εξαγωγή των διακριτών σημείων από τη νέα θέση, καθώς και ο συσχετισμός τους με τα ήδη υπάρχοντα δεδομένα διακριτών σημείων. Τα διακριτά σημεία που έχουν ξανά παρατηρηθεί, χρησιμοποιούνται για την ενημέρωση της θέσης του με τη χρήση στο EKF. Τέλος, τα νέα διακριτά σημεία που προέκυψαν, εισάγονται στο EKF ως νέα δεδομένα για χρήση σε μελλοντική επαναπαρατήρηση του περιβάλλοντα χώρου.

Στις εικόνες που ακολουθούν, περιγράφεται και σχηματικά η παραπάνω διαδικασία. Η θέση του ρομπότ απεικονίζεται με μπλε τρίγωνο, τα διακριτά σημεία με αστέρια και οι μετρήσεις από τον αισθητήρα απόστασης με κεραυνούς. Επίσης, με ημιδιαφανές μπλε απεικονίζεται η εκτιμώμενη θέση του ρομπότ από το σύστημα οδομετρίας και με ημιδιαφανές πορτοκάλι η εκτιμώμενη θέση του από τους αισθητήρες.



Εικόνα 2. 16: Παράδειγμα κίνησης ρομπότ με χρήση SLAM(Κινήσεις) [36].

Αρχικά (εικόνα 2.16(α)), το ρομποτικό σύστημα έχει σαρώσει το περιβάλλοντα χώρο με τον αισθητήρα απόστασης και έχει εξάγει διακριτά σημεία. Έπειτα (εικόνα 2.16(β)), πραγματοποιείται κίνηση από το ρομπότ εντός τους χώρου, βασιζόμενη στις μετρήσεις οδομετρίας. Στη συνέχεια (εικόνα 2.16(γ)), πραγματοποιεί σάρωση του περιβάλλοντος, εξαγωγή διακριτών σημείων και παρατηρεί ότι δεν αντιστοιχούν στη θέση που θα αντιστοιχούσαν, διότι το ρομπότ δεν βρίσκεται πραγματικά στη θέση που έχει υπολογίσει. Καθώς το ρομπότ δίνει μεγαλύτερη βάση στις μετρήσεις των αισθητήρων του από ότι στο σύστημα οδομετρίας, υπολογίζει εκ νέου τη θέση του (εικόνα 2.16(δ)). Τέλος, καθώς οι αισθητήρες του ρομποτικού συστήματος είναι επιρρεπείς σε σφάλματα, ξανά η εκτεινόμενη θέση του δεν είναι η πραγματική, όμως είναι αρκετά πιο κοντά σε αυτή, από το να βασιζόταν μόνο στο σύστημα οδομετρίας (εικόνα 2.17).



Εικόνα 2. 17: Παράδειγμα κίνησης ρομπότ με χρήση SLAM(Τελική θέση) [36].

3. Κεφάλαιο: Υλικά και Μέθοδοι

3.1.Εισαγωγή

Στα πλαίσια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, σχεδιαστηκε και αναπτύχθηκε μια ρομποτική πλατφόρμα χαρτογράφησης χώρου. Αποτελεί μια πλατφόρμα εδάφους τύπου rover, ικανή να κινηθεί εντός εσωτερικού αλλά και εξωτερικού χώρου. Για την κίνηση και εύρεση της θέσης του στον χώρο, χρησιμοποιεί σύστημα από αισθητήρες υπερήχων, LiDAR και τις μετρήσεις οδομετρίας.



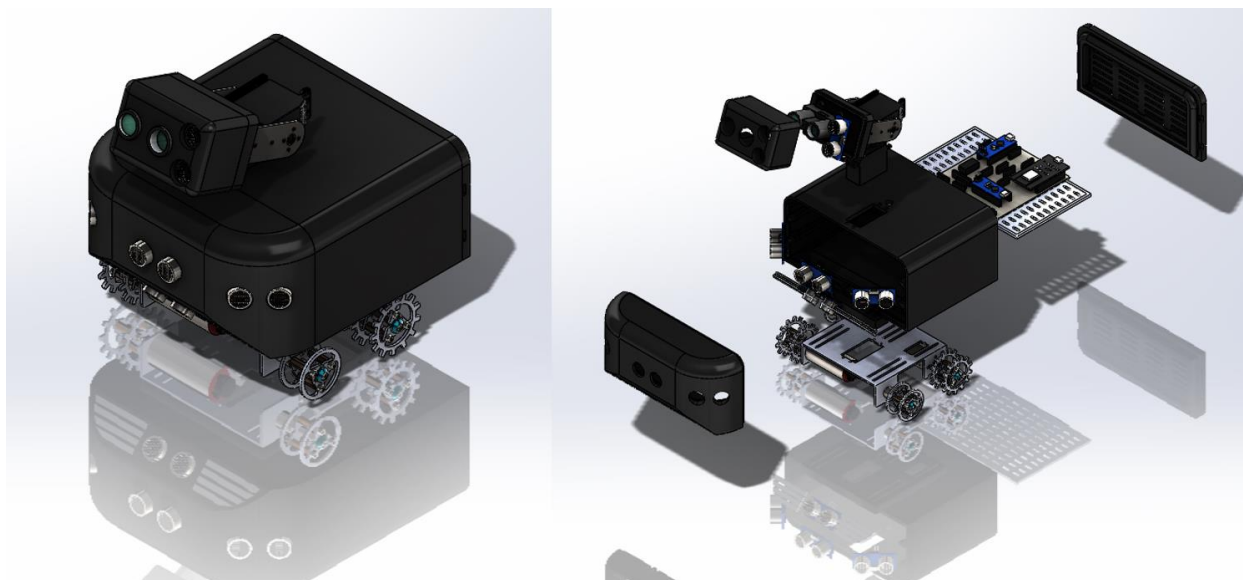
Εικόνα 3. 1: Ρομποτικό Σύστημα Διπλωματικής. Αριστερά η κατασκευή, δεξιά σε 3D απεικόνιση.

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί ή διαδικασία σχεδιασμού του αμαξώματος, ο τρόπος λειτουργίας των αισθητήρων και της οδομετρίας. Έπειτα, θα γίνει αναφορά στο σύστημα μικροελεγκτών που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της πλατφόρμας, καθώς και για τις δύο διαφορετικές εκδόσεις της πλακέτας του συστήματος. Επίσης, θα πραγματοποιηθεί σύντομη αναφορά στην επιλογή του συστήματος τροφοδοσίας του ρομπότ. Τέλος, θα γίνει ανάλυση του αλγόριθμου συμπεριφοράς του ρομπότ, καθώς και θα αναλυθεί ο τρόπος επεξεργασίας των δεδομένων που προκύπτουν από την πλατφόρμα, μέσω υπολογιστικού συστήματος.

3.2.Υλοποίηση

3.2.1.Σχεδιασμός Αμαξώματος

Το αμάξωμα της διπλωματικής εργασίας, αναπτύχθηκε με σκοπό να έχει τη δυνατότητα κίνησης σε εσωτερικό αλλά και εξωτερικό περιβάλλοντα χώρο. Σκοπός είναι η επίτευξη δυσδιάστατης χαρτογράφησης χώρου ενώ κινείται αυτόνομα εντός του χώρου, αποφεύγοντας φυσικά ή τεχνητά εμπόδια. Για την επίτευξη της αποφυγής εμποδίων, το αμάξωμα είναι εφοδιασμένο με πληθώρα αισθητήρων υπερήχων, κατάλληλα τοποθετημένων στο σασί και στον βραχίονα, ώστε να παρέχουν κατάλληλες μετρήσεις απόστασης υπό διαφορετικές γωνίες για την επιτυχή αποφυγή εμποδίων και επικίνδυνων κοιλωμάτων στο έδαφος.



Εικόνα 3. 2: 3d Σχέδιο αμαξώματος. Αριστερά δεμένο, δεξιά σε explode view.

Το αμάξωμα αποτελείται από μηχανολογικά εξαρτήματα που έχουν τη δυνατότητα να παραχθούν με τη διαδικασία της 3d εκτύπωσης, καθώς και ηλεκτρονικά εξαρτήματα όπως servo κινητήρες, αισθητήρες απόστασης, πλακέτα, μοτέρ κλπ. Η δομή του αμαξώματος χωρίζεται σε τρία κυρίως υποσυστήματα. Τα υποσυστήματα είναι:

- I. **Βραχίονας:** Είναι το σύστημα που είναι υπεύθυνο για τη σωστή τοποθέτηση του αισθητήρα LiDAR, εντός του περιβάλλοντα χώρου. Βρίσκεται πάνω από το σασί και πραγματοποιεί την περιστροφή 360ο μοιρών του αισθητήρα.
- II. **Σασί:** Είναι το σύστημα που περιβάλλει τα ηλεκτρονικά κυκλώματα του αμαξώματος, προστατεύοντας τα από εξωτερικές φθορές. Περιέχει την τροφοδοσία, τις πλακέτες και τους αισθητήρες υπερήχων που ελέγχουν για τυχών εμπόδια και κοιλότητες στο έδαφος που πρόκειται να προχωρήσει το ρομπότ.
- III. **Οδομετρία:** Είναι το σύστημα που πραγματοποιεί την κίνηση του αμαξώματος εντός του χώρου. Βρίσκεται κάτω στο κάτω μέρος του σασί.

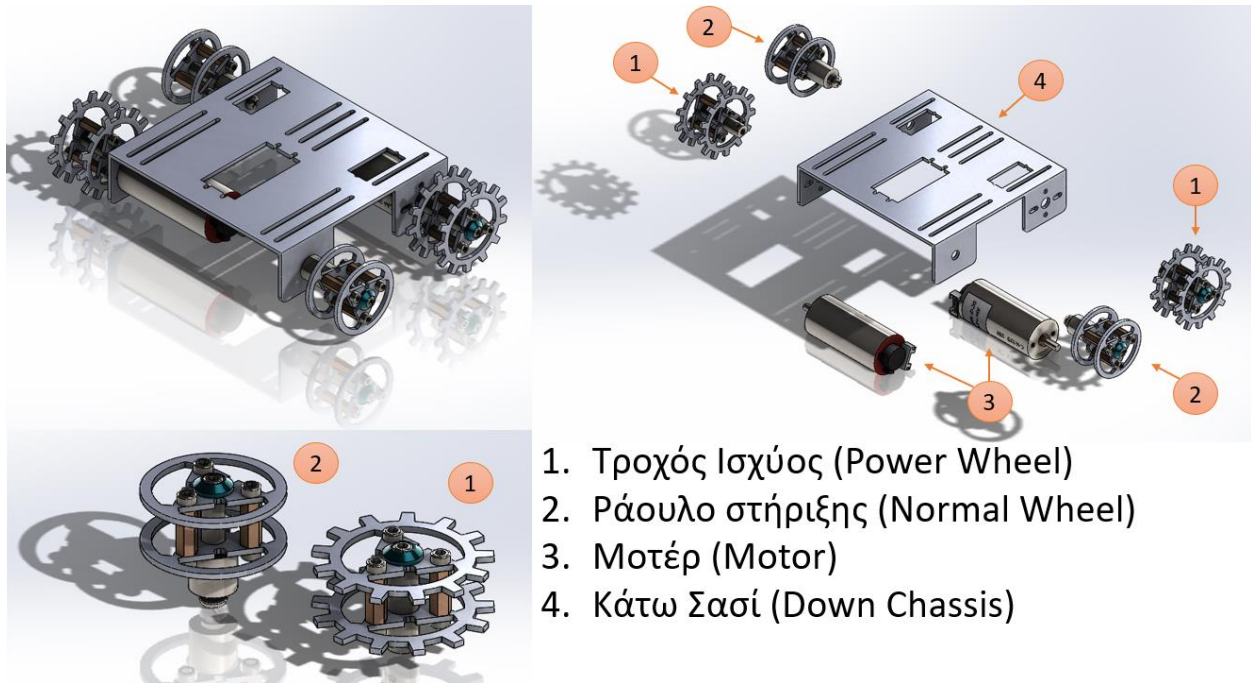
Τα άνωθεν απεικονίζονται στην εικόνα που ακολουθεί. Στη συνέχεια ακολουθεί η ανάλυση της φιλοσοφίας σχεδιασμού και λειτουργίας του κάθε υποσυστήματος το αμαξώματος.

Σχεδιασμός και υλοποίηση αυτόνομου συστήματος με μικρολεγκτές



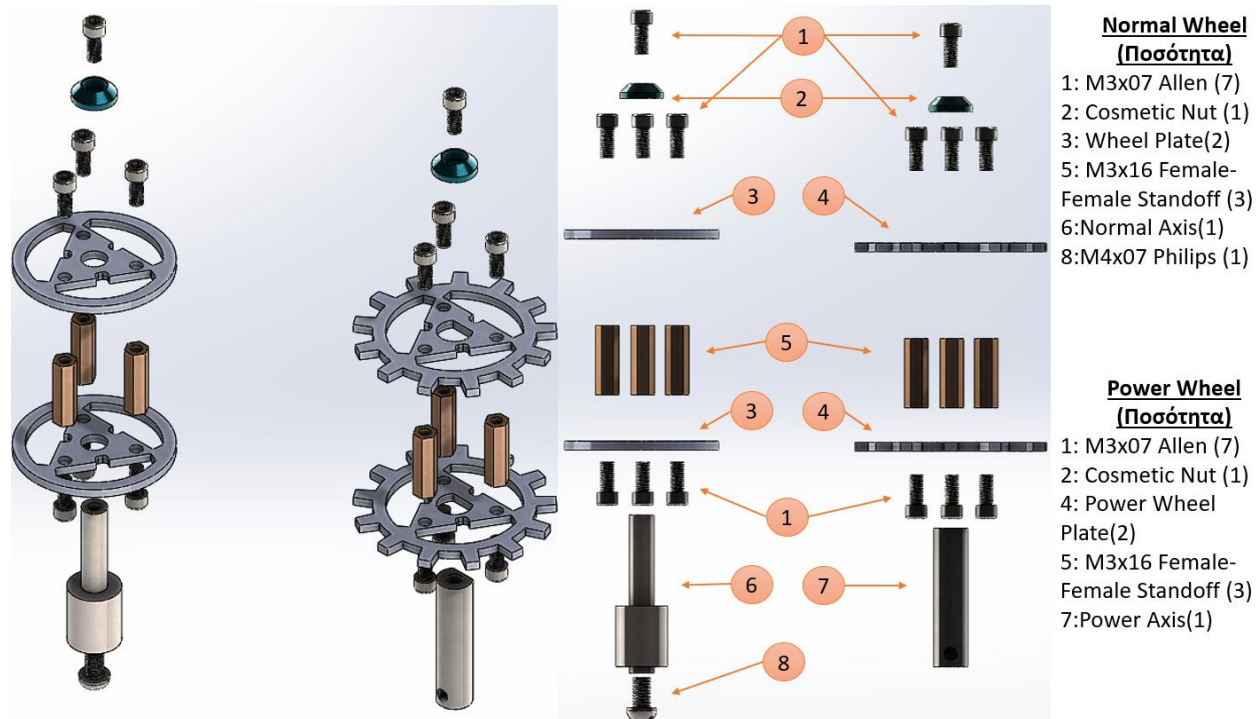
Εικόνα 3. 3: Επιμέρους υπο-συναρμολόγηση (subassembly).

Η οδομετρία του αμαξώματος είναι εμπνευσμένη από τα ερπυστριοφόρα οχήματα, καθώς έχουν τη δυνατότητα κίνησης σε δύσβατα εδάφη, γεγονός που τα καθιστά ιδανικά για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Ακολουθεί εικόνα που απεικονίζει τα επιμέρους εξαρτήματα του συστήματος οδομετρίας.



Εικόνα 3. 4: Επιμέρους εξαρτήματα συστήματος οδομετρίας.

Το σώμα του κάτω σασί (εικόνα 3.4,4) αποτελείται από διαμορφωμένο κομμάτι αλουμινίου πάχους 2mm. Η επιλογή του αλουμινίου έγινε λόγω του χαμηλού του βάρους, αλλά και της ανοχής του σε σχέση με κάποιο πλαστικό. Στα σχέδια που κατατίθενται στην παρούσα διπλωματική υπάρχει και έκδοσή του εξαρτήματος με την δυνατότητα εκτύπωσης σε 3D εκτυπωτή. Για την εκτυπώσιμη έκδοση, συνιστάται η χρήση υλικού τύπου **PET-G** (Polyethylene terephthalate glycol), λόγω της μηχανικής του ανοχής και ελαστικότητας. Εναλλακτικά συνιστάται η χρήση υλικού **ABS**(acrylonitrile-butadiene-styrene). Επιπλέον, αποτελείται από 2 μοτέρ κίνησης τα οποία θα αναλυθούν σε επόμενη ενότητα. Τέλος, αποτελείται από δυο τροχούς ισχύος και δυο απλούς τροχούς.



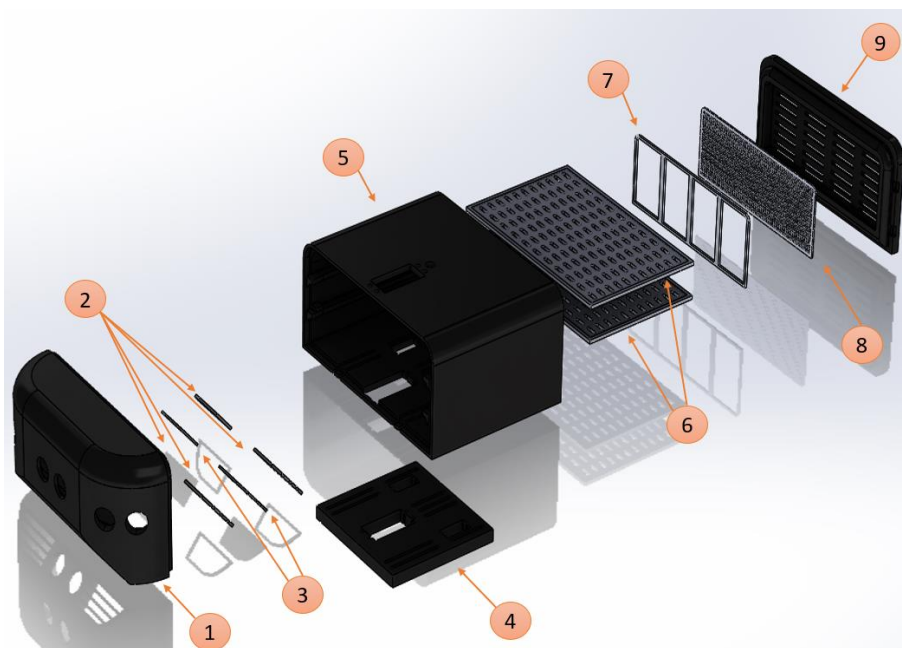
Εικόνα 3. 5: Επιμέρους εξαρτήματα αξόνων κίνησης.

Οι **τροχοί ισχύος**, έχουν διαφορετική δομή από τα ράουλα στήριξης, καθώς μέσω αυτών μεταφέρεται η περιστροφική κίνηση των μοτέρ στις ερπύστριες του αμαξώματος. Η βασική διαφορά βρίσκεται στις αυλακώσεις που υπάρχουν πάνω στην πλάκα του τροχού, καθώς υπάρχουν για να μεταφέρουν την κίνηση στην ερπύστρια (εικόνα 3.5,4). Επιπλέον διαφορά παρατηρείται στην σύζευξη των μοτέρ με τους τροχούς (εικόνα 3.5,7). Τα **ράουλα στήριξης** επιτρέπουν στην ερπύστρια να γλιστράει γύρω από αυτά, κρατώντας την στο επιθυμητό της σχήμα και θέση. Για αυτόν τον λόγο δεν υπάρχουν αυλακώσεις πάνω στις πλάκες τους (εικόνα 3.5,3), καθώς αυτές αγκαλιάζουν τις εσωτερικές αυλακώσεις της ερπύστριας, κρατώντας την πορεία κίνησης της σταθερή. Επίσης, διαφορά έχει ο σύνδεσμος σύζευξης του ράουλου με το κάτω σασί, καθώς έχει υποστηρικτικό ρόλο και κρατείται από μία βίδα M4 (εικόνα 3.5,6),(εικόνα 3.5,8). Τέλος, οι πλάκες των τροχών είναι κατασκευασμένες από αλουμίνιο πάχους 2mm, λόγω του μικρού βάρους και της μηχανικής ανοχής του υλικού. Υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής τους με χρήση 3D εκτύπωσης. Για την επιλογή του υλικού, συνιστάται η χρήση πλαστικού **PET-G** ή **ABS**, όπως αναλύθηκε παραπάνω για το κομμάτι του «κάτω σασί».



Εικόνα 3. 6: Σασί.

Το σασί του αμαξώματος έχει σχεδιαστεί με σκοπό να παρέχει ασφάλεια στα ηλεκτρονικά συστήματα του ρομπότ από το εξωτερικό περιβάλλον. Ο σχεδιασμός του είναι εμπνευσμένος από τις οικιακές ρομποτικές σκούπες έχοντας μια ελκυστική εμφάνιση, ώστε να μην προκαλεί αποσυντονισμό στα άτομα που υπάρχουν στον περιβάλλοντα χώρο δράσης του ρομποτικού συστήματος. Επιπλέον, αντλεί έμπνευση και από την αρτοβιομηχανία, καθώς έχει κατάλληλα διαμορφωμένες κοιλότητες και εσοχές, ώστε κατά την λειτουργία του να υπάρχει ροή αέρα στο εσωτερικό της κατασκευής για την ψύξη των ηλεκτρονικών του ρομπότ χωρίς να τα θέτει σε κίνδυνο από εξωτερικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η σκόνη και το νερό.



Σασί (Ποσότητα Εξαρτήματος)

1. Μπροστινό Καπάκι(1)
2. Frame μπροστινού μεταλλικού πλέγματος (4)
3. Μπροστινό μεταλλικό πλέγμα(2)
4. Αποστάτης Σασί(1)
5. Σώμα Σασί(1)
6. Ράφια (2)
7. Frame μεταλλικού πλέγματος (1)
8. Πίσω μεταλλικό πλέγμα(1)
9. Πίσω Καπάκι(1)

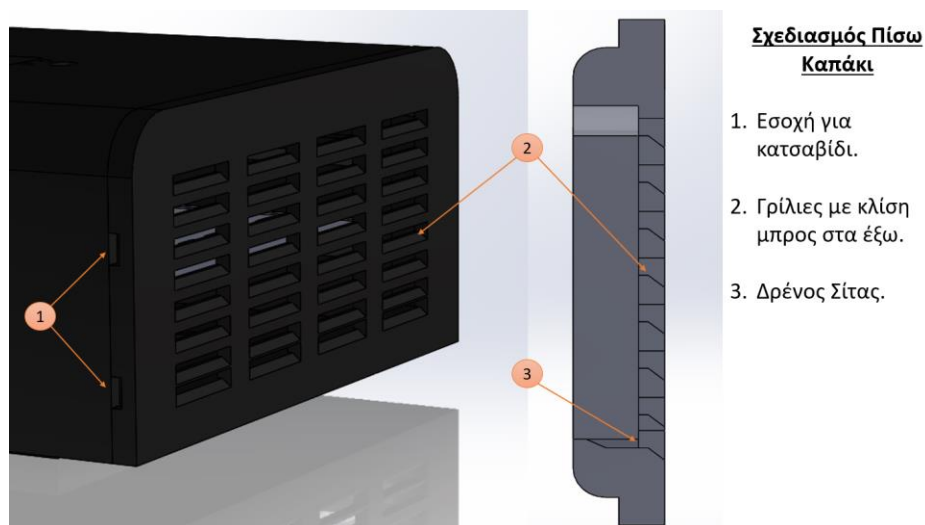
Εικόνα 3. 7: Επιμέρους εξαρτήματα σασί.

Το σασί αποτελείται από το κυρίως σώμα (εικόνα3.7,5) πάνω στο οποίο δένουν τα υπόλοιπα εξαρτήματα. Συγκεκριμένα, εντός αυτού βρίσκονται δύο διάτρητα ράφια (εικόνα3.7,6) που έχουν την δυνατότητα να δεχθούν ηλεκτρονικά, αισθητήρες και το σύστημα τροφοδοσίας ρεύματος του ρομπότ. Από κάτω από το σασί, κουμπώνει ο αποστάτης του σασί (εικόνα3.7,4), καθώς είναι αναγκαίος για να δώσει απόσταση από το κάτω σασί, ώστε η ερπίστρια να κινείται ανεμπόδιστα, ακόμα και σε περίπτωση που έχει παρασύρει υλικά από το περιβάλλον που μπορούν να διακόψουν αυτή την ομαλή κίνηση όπως λάσπη, μικρά κλαδιά κ.α. Μπροστά από το σασί κουμπώνει το μπροστινό καπάκι (εικόνα3.7,1). Στο μπροστινό καπάκι βρίσκονται οι αισθητήρες υπερήχων που διασφαλίζουν την ασφαλή κατεύθυνσή του ρομπότ. Επιπλέον, πάνω σε αυτό βρίσκονται δύο μεταλλικά πλέγματα (εικόνα3.7,3), με σκοπό να συνεισφέρουν στην περαιτέρω στεγανοποίηση του σασί από την είσοδο σκόνης και νερού στα ηλεκτρονικά συστήματα του ρομπότ. Εμπρός και πίσω από το πλέγμα βρίσκονται από δύο στηρίγματα της (εικόνα3.7,2) ώστε να παραμένει εντός της κοιλότητας τοποθέτησης του. (εικόνα3.8).



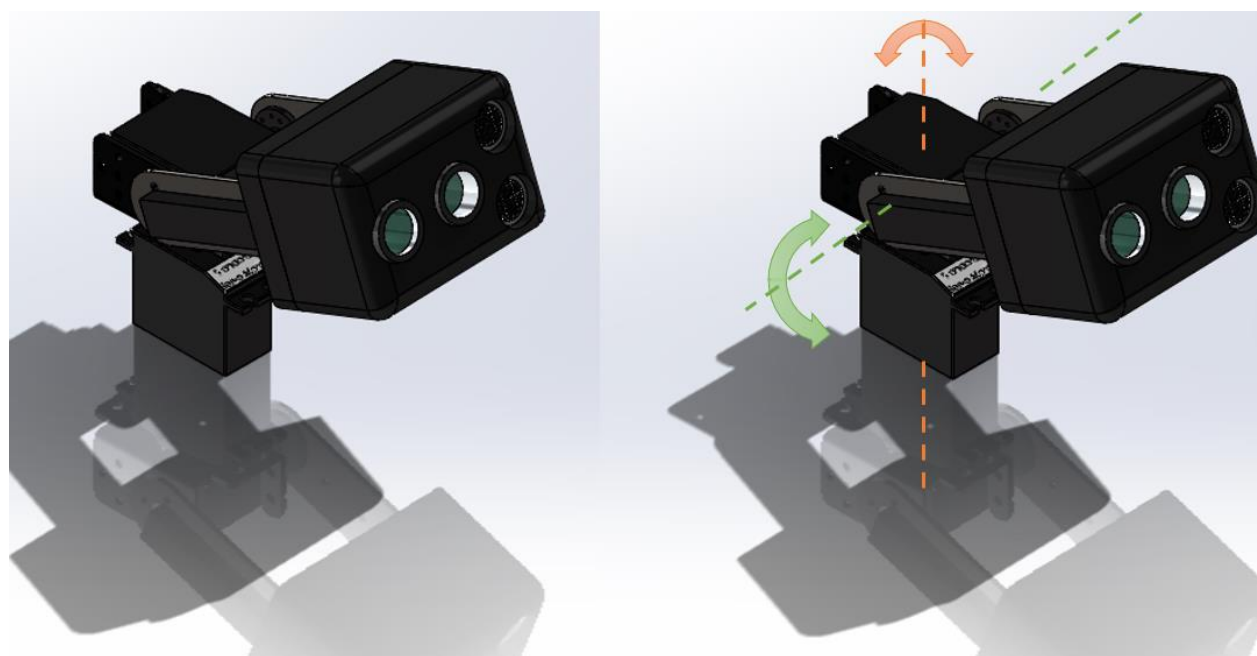
Εικόνα 3. 8: Μπροστινό καπάκι. Αριστερά χωρίς πλέγμα, δεξιά με πλέγμα.

Το πίσω καπάκι έχει σχεδιαστεί με σκοπό να λειτουργεί σαν πορτάκι, ώστε ο χρήστης να μπορεί να αφαιρεί με ευκολία τα ράφια στο εσωτερικό, προσθαφαιρώντας αισθητήρες και πραγματοποιώντας με ευκολία την εσωτερική καλωδίωση στην πλακέτα του συστήματος. Έχει εσοχές στα πλαϊνά (εικόνα 3.9,1) ώστε να υπάρχει η δυνατότητα να τοποθετηθεί ίσιο κατσαβίδι εντός αυτών και πραγματοποιώντας μοχλό να ανοίξει το καπάκι, το οποίο είναι σφηνωμένο πάνω στο σασί. Επιπλέον, σε αυτό υπάρχουν γρίλιες με κλίση προς τα έξω, ώστε να αποτρέπουν σταγόνες νερού να εισέλθουν στο σασί, αλλά παράλληλα να μην διακόπτουν την ροή αέρα από το εσωτερικό του σασί. περαιτέρω προστασία στο νερό και την σκόνη παρέχει το πίσω μεταλλικό πλέγμα (εικόνα 3.7,8) που είναι τοποθετημένο εντός της εσωτερικής κοιλότητας του καπακιού, κάτω από το κατάλληλα διαμορφωμένο κάλυμμα(εικόνα 3.7,7). Τέλος, στο κάτω μέρος του πίσω καπακιού, υπάρχει ειδικά διαμορφωμένη κοιλότητα που δρα ως δρένος για τα υγρά που λόγω της επιφανειακής τάσης έχουν προσκολληθεί και ολισθαίνουν πάνω στο μεταλλικό πλέγμα. Όλο τα εξαρτήματα που περιεγράφηκαν, έχουν τη δυνατότητα παραγωγής με χρήση 3d εκτυπωτή, με τη χρήση των υλικών που περιεγράφηκαν προηγουμένως (PET-G,ABS), με εξαίρεση τα μεταλλικά πλέγματα.

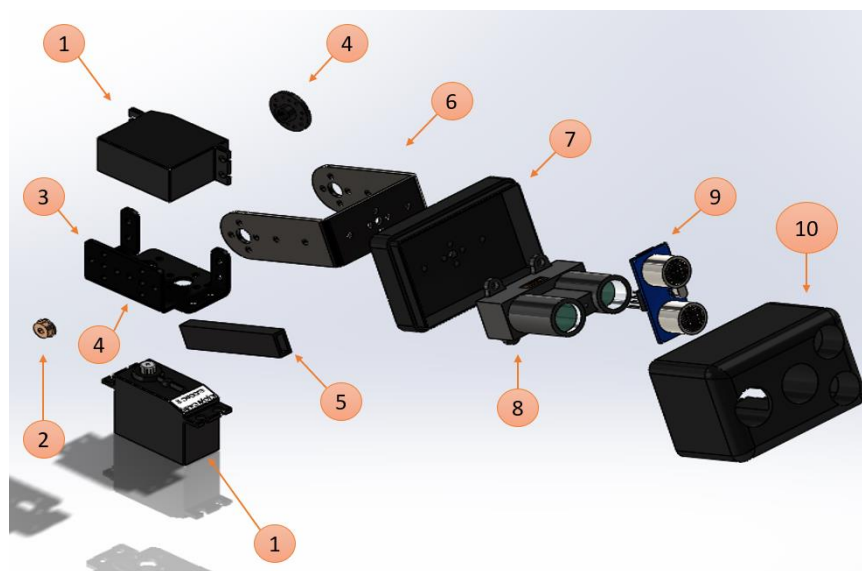


Εικόνα 3. 9: Σχεδιασμός πίσω καπάκι.

Το σύστημα του βραχίονα, τοποθετείται στην ειδικά διαμορφωμένη κοιλότητα στο πάνω μέρος του σασί, όπου χωνεύεται ο κάτω servo κινητήρας εντός του σασί και βιδώνεται. Ο βραχίονας έχει δύο άξονες κίνησης και τρεις (3) βαθμούς ελευθερίας, έχοντας τη δυνατότητα να τοποθετήσει τον αισθητήρα LiDAR προς οποιαδήποτε διεύθυνση εντός του τρισδιάστατου χώρου. Ο κάθε κινητήρας Servo έχει δυνατότητα να πραγματοποιήσει περιστροφή 180° στον άξονα περιστροφής του. Σε συνδυασμό επιτυγχάνουν κάλυψη 360° στον δυσδιάστατο χώρο κίνησης(X,Y). Συγκεκριμένα, οι κυρίως κινήσεις πραγματοποιούνται από τον κάθετο servo κινητήρα (εικόνα 3.10, πορτοκαλί χρώμα), ενώ ο οριζόντιος servo κινητήρας επανατοποθετεί τον αισθητήρα LiDAR στο πίσω μέρος του αμαξώματος. Στην παρούσα διπλωματική, παρόλο που υπάρχει η δυνατότητα από τον σχεδιασμό, δεν πραγματοποιείται τρισδιάστατη χαρτογράφηση του χώρου, καθώς αυξάνει την πολυπλοκότητα και την ανάγκη του ρομπότ για περαιτέρω επεξεργαστική ισχύ.



Εικόνα 3. 10: Βραχίονας αμαξώματος Δεξιά με τους άξονες κίνησης.

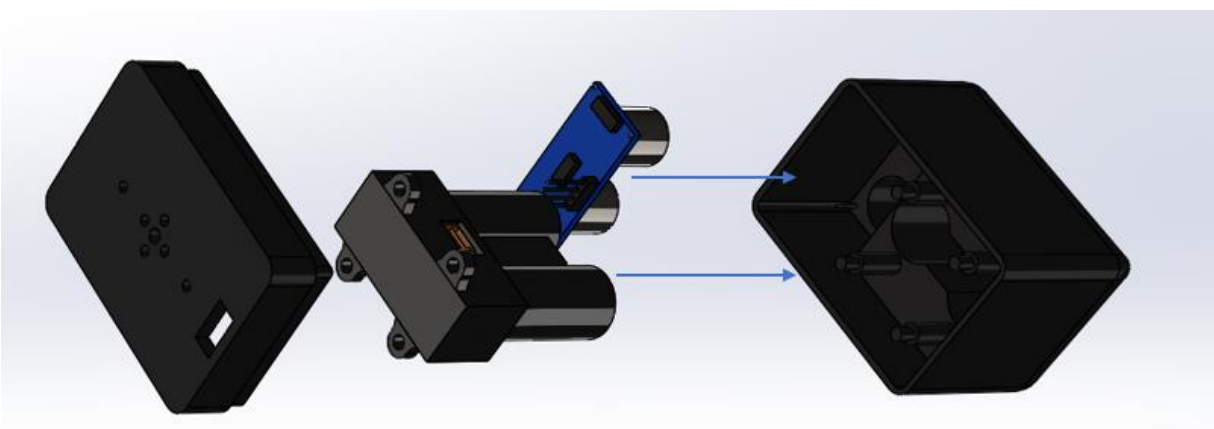


Βραχίονας (Ποσότητα Εξαρτημάτων)

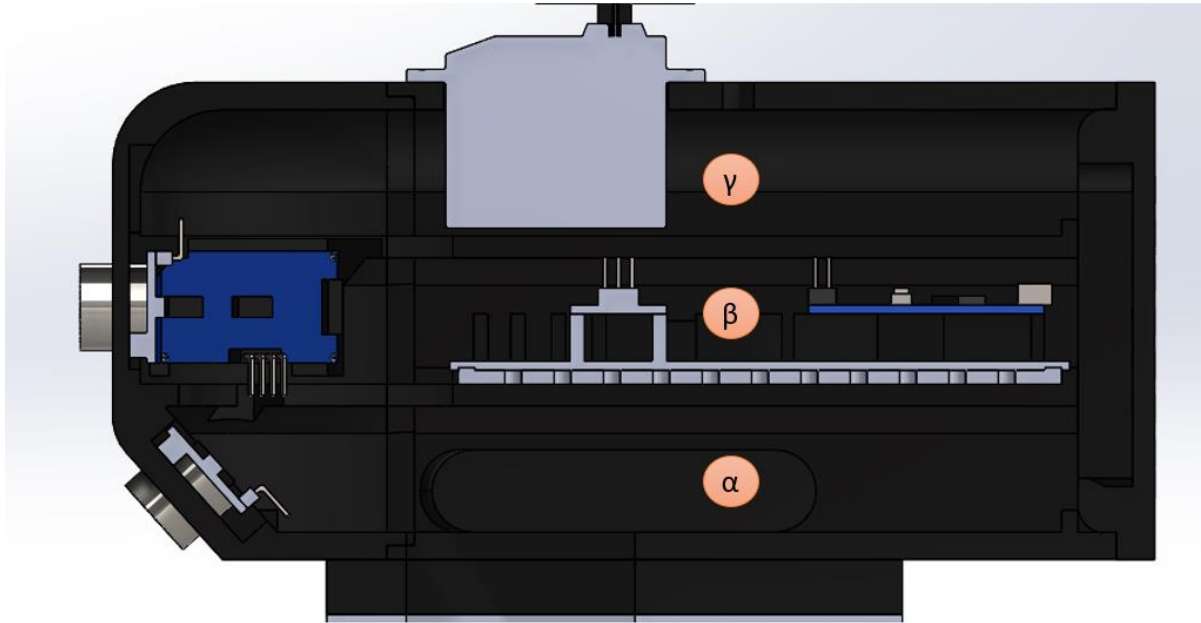
1. Standard Servo Motor(2)
2. Joint Bearing(1)
3. Servo PTZ mount(1)
4. Servo Mount cap (2, υπάρχει ένα βιδωμένο κάτω από το εξάρτημα «3»).
5. Cable cover(1, προαιρετικό)
6. Servo U shape mount(1)
7. Καπάκι Lidar Πίσω(1)
8. Αισθητήρας Lidar Gramlin_LidarV3 (1)
9. Αισθητήρας υπερήχων HCSR04(1)
10. Καπάκι Lidar μπροστά.

Εικόνα 3. 11: Επιμέρους εξαρτήματα βραχίονα.

Επάνω στον servo του κάθετου άξονα κίνησης τοποθετείται ο δεύτερος *servo* κινητήρας, που συγκρατείται με ένα *servo mount cap* εξάρτημα, (εικόνα.11,4) που είναι βιδωμένο πάνω στο *servo mount PTZ*(εικόνα 3.11,3). Πάνω στο servo κινητήρα, τοποθετείται με την χρήση του εξαρτήματος *servo mount cap* (εικόνα 3.11,4) το *servo U shape mount*(εικόνα 3.11,6). Μεταξύ του *servo U shape mount* και του *servo mount PTZ* τοποθετείται ένα ρουλεμάν για την σταθεροποίηση του άξονα κίνησης του οριζοντιοποιημένου *servo* (εικόνα 3.11,2). Πάνω στο *servo U shape mount* βιδώνεται το πίσω μέρος του *κουτιού προστασίας του LiDAR* (εικόνα 3.11,7). Σε αυτό βρίσκονται τοποθετημένα στις κατάλληλες κοιλότητες, ο αισθητήρας LiDAR και ένας αισθητήρας υπερήχων (εικόνα 3.12). Να σημειωθεί πως ο αισθητήρας υπερήχων είναι τοποθετημένος για τον εντοπισμό αντικειμένων που δεν παρέχουν ανακλαστικές επιφάνειες για το LiDAR, όπως τα τζάμια, ώστε να έχει την δυνατότητα να κινηθεί με ασφάλεια το ρομπότ. Όλο τα εξαρτήματα που περιεγράφηκαν, έχουν την δυνατότητα παραγωγής με χρήση 3d εκτυπωτή, με την χρήση των υλικών που περιεγράφηκαν προηγουμένως (PET-G,ABS), με εξαίρεση τους αισθητήρες.

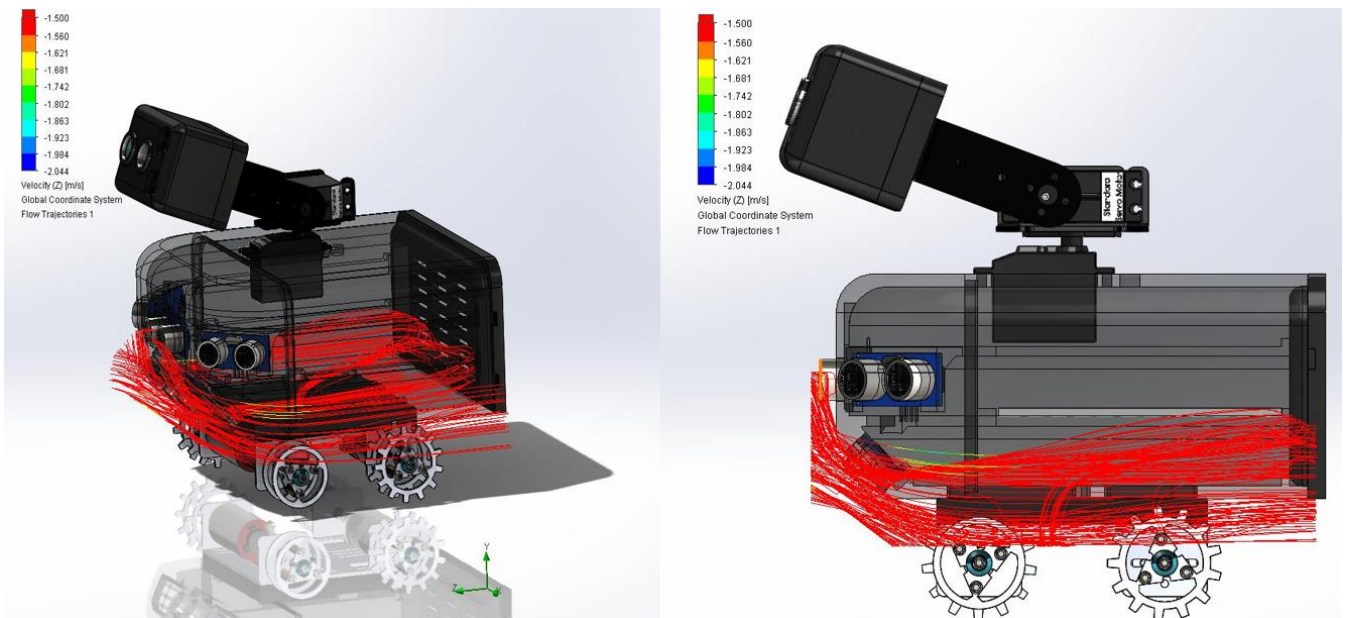


Εικόνα 3. 12: Συναρμολόγηση προστασίας συστήματος LiDAR.



Εικόνα 3. 13 Τομή σασί, (α) Θέση για μπαταρία, (β) ράφι 1, θέση για πλακέτα ηλεκτρονικών, (γ) ράφι 2, χώρος για αισθητήρες/μελλοντική επέκταση.

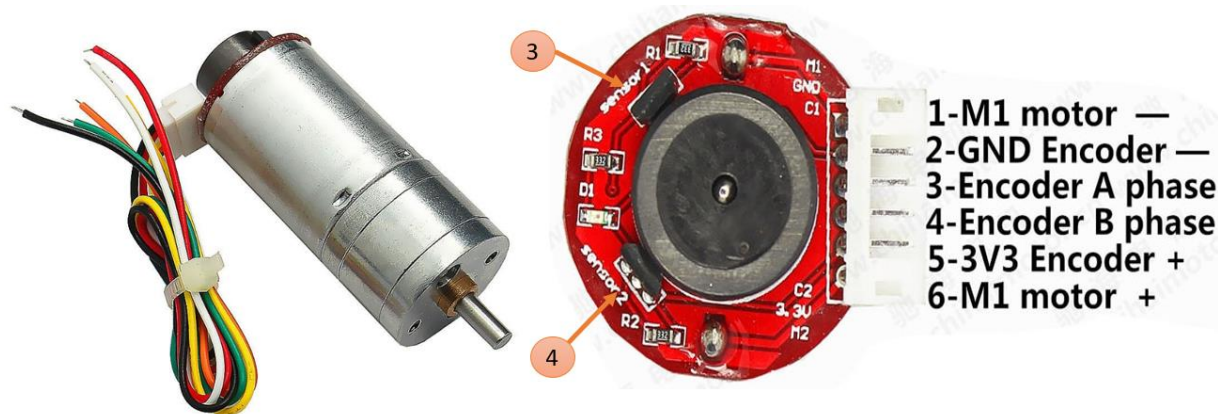
Τέλος, στη εικόνα 3.13 παρατίθεται μια τομή του σασί, με σκοπό την επίδειξη της κατανομής των εξαρτημάτων εντός του. Σύμφωνα και με την εικόνα από την προσομοίωση ροής αέρα που ακολουθεί, στο κάτω μέρος επιλέχθηκε να τοποθετηθεί το σύστημα τροφοδοσίας ρεύματος του ρομπότ, καθώς υπάρχει αρκετή ροή αέρα ώστε να μην αναπτυχθεί θερμοκρασία (εικόνα 3.13,α). Επιπλέον, με αυτόν τον τρόπο παραμένει σε χαμηλό σημείο το κέντρο βάρους του αμαξώματος. Έπειτα στο πρώτο ράφι (εικόνα 3.13,β), τοποθετούνται τα ηλεκτρονικά, ώστε να πραγματοποιείται ψύξη τους από την ροή αέρα που δημιουργείται κατά την κίνηση. Το τρίτο ράφι (εικόνα 3.13,γ) παραμένει κενό για μελλοντική χρήση.



Εικόνα 3. 14: Αποτελέσματα προσομοίωσης ροής αέρα.

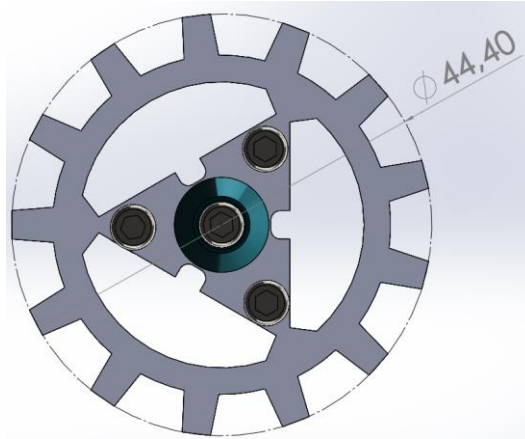
3.2.2. Σύστημα Κίνησης / Οδομετρία

Το σύστημα κίνησης, αποτελεί βασικό υποσύστημα του ρομποτικού συστήματος, καθώς του επιτρέπει να κινηθεί εντός του περιβάλλοντα χώρου του. Στην καρδιά του βρίσκεται ένας μικροελεγκτής *Atmel 328*, ο οποίος εναλλάσσει κατάλληλα τις εισόδους σε μια γέφυρα *L293D*, ώστε να οδηγήσει τα *DC* μοτέρ του αμαξώματος. Επιπλέον, λαμβάνει και επεξεργάζεται κατάλληλα τα σήματα που παράγουν οι *encoders* των μοτέρ, λαμβάνει σήμα τύπου *interrupt* για την άμεση διακοπή της κίνησης του αμαξώματος σε περίπτωση ανάγκης από τους υπόλοιπους μικροελεγκτές του συστήματος. Επιπρόσθετα, λαμβάνει κατάλληλα διαμορφωμένες εντολές από την κύρια μονάδα επεξεργασίας του συστήματος (Master MCU).



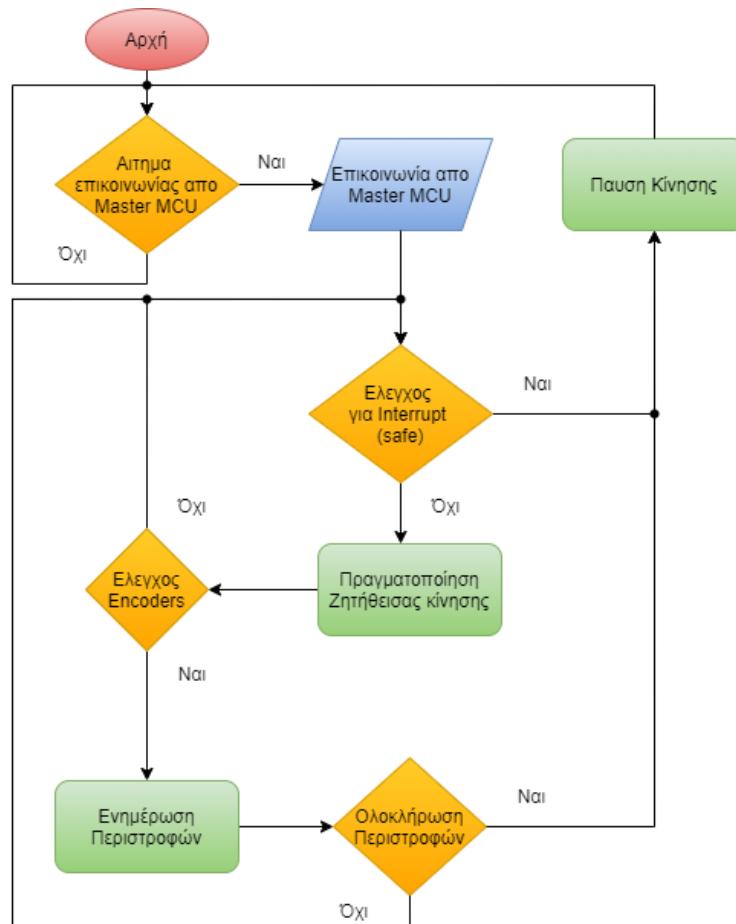
Εικόνα 3. 15: Μοτέρ αμαξώματος JGA25-37, δεξιά οι συνδέσεις [37].

Τα μοτέρ που επιλέχθηκαν είναι τα JGA25-370 6V DC. Είναι μοτέρ με τάση λειτουργίας τα 6V και ταχύτητα περιστροφής 100RPM. Σε μέγιστη ισχύ (2.8W) δίνουν ροπή 0.2942Nm με συνδυαστική ισχύ των δύο μοτέρ τα 6kg.cm, η οποία είναι αρκετή για την παρούσα διπλωματική. Επιπλέον, το γεγονός ότι είναι ενσωματωμένα τα encoders πάνω τους, ήταν ένας επιπλέον λόγος για την επιλογή τους. Τα encoders δίνουν μετρήσεις ανά περιστροφή 90° μοιρών του άξονα κίνησης. Η ενσωματωμένη ακολουθία μειωτήρων (Gearbox), προσφέρει μείωση της τάξης του 1:75, καθώς για μια περιστροφή του άξονα του μειωτή χρειάζονται 75 περιστροφές του μοτέρ. Με χρήση του μαθηματικού τύπου 2.1 (Ενότητα 2.3.1.1: Οδομετρία) και της περιμέτρου του τροχού ισχύος (εικόνα 3.16), προκύπτει πώς σε μία ολόκληρη περιστροφή της ακολουθίας των μειωτήρων θα πραγματοποιηθεί απόσταση περίπου ίση με 139.416 cm, θέτοντας το $\pi=3.14$. Διαιρώντας με την τάξη της μείωσης της ακολουθίας των μειωτήρων, προκύπτει πως σε μια περιστροφή πραγματοποιείται κίνηση απόστασης 1.86 cm. Περαιτέρω ακρίβεια στην κίνηση επιτυγχάνεται αν παρθεί υπόψιν πως οι δύο αισθητήρες hall του encoder δίνουν σήμα σε κάθε περιστροφή 90ο μοιρών, πραγματοποιώντας θεωρητική κίνηση απόστασης 4.6 mm. Στην παρούσα διπλωματική θα λαμβάνεται υπόψιν η περιστροφή που προκύπτει από ολόκληρο τον άξονα του μοτέρ (1.86cm), καθώς απλοποιεί αρκετά τον υπολογισμό της απόστασης σε κάθε κίνηση. Επιπλέον, δεν θεωρήθηκε αναγκαία η ακρίβεια για το σύστημα οδομετρίας λόγω του ότι είναι μέθοδος επιρρεπής σε ανακρίβειες (Ενότητα 2.3.1.1: Οδομετρία).



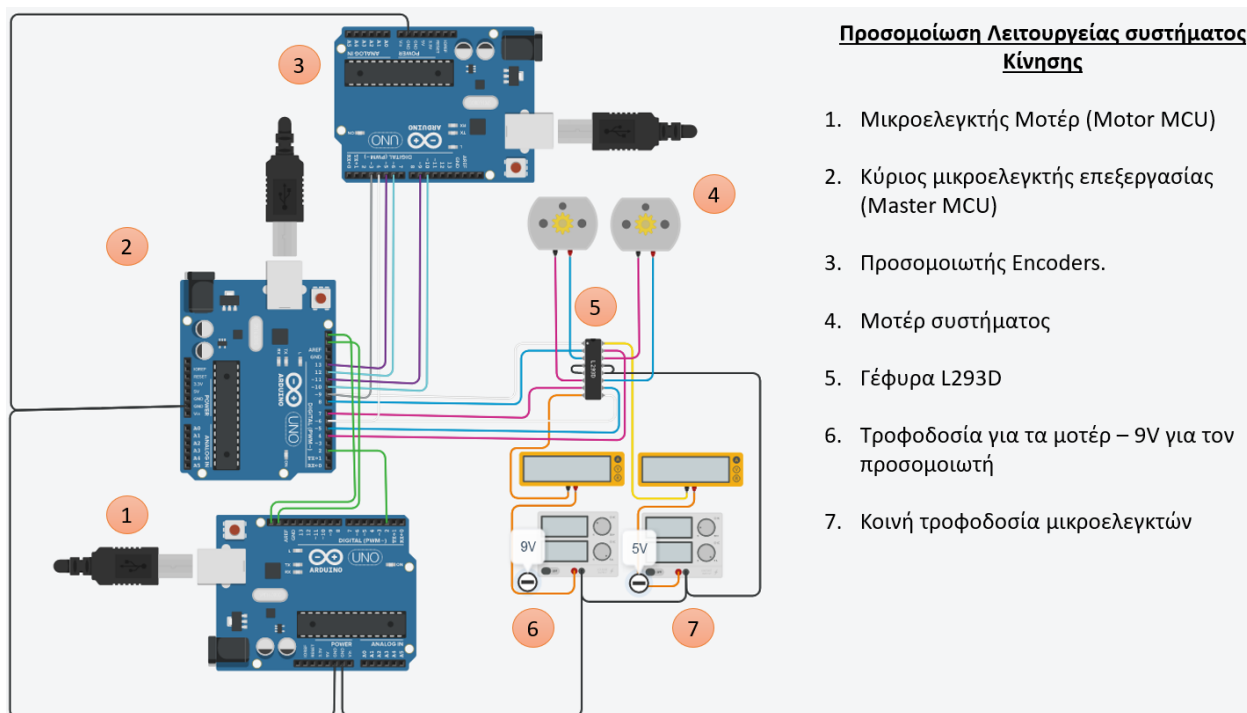
Εικόνα 3. 16 Περίμετρος τροχού ισχύος.

Ακολουθεί διαγραμματική απεικόνιση της λειτουργίας του μικροελεγκτή ελέγχου του συστήματος κίνησης. Πρόκειται για έναν ατέρμονα βρόχο καθώς είναι λειτουργίες που εκτελούνται συνεχώς κατά την λειτουργία του συστήματος. Ο μικροελεγκτής κίνησης αναμένει επικοινωνία από τον κύριο μικροελεγκτή επεξεργασίας του ρομποτικού συστήματος. Η επικοινωνία πραγματοποιείται με την χρήση του πρωτοκόλλου I2C. Ο τρόπος επικοινωνίας καθώς και οι εντολές αναλύονται στην συνέχεια.



Εικόνα 3. 17: Διάγραμμα λειτουργίας μικροελεγκτή ελέγχου συστήματος κίνησης.

Εφόσον λάβει αίτημα επικοινωνίας, καταγράφει τα δεδομένα που του αποστέλλει ο κεντρικός μικροελεγκτής, διερμηνεύοντας κατάλληλα την επιθυμητή κίνηση. Εφόσον ερμηνευτεί η κίνηση επιτυχώς, πραγματοποιείται έλεγχος της κατάστασης του interrupt pin του μικροελεγκτή. Το Interrupt pin είναι συνδεδεμένο σε έναν δίαυλο όπου οι υπόλοιποι μικροελεγκτές του συστήματος έχουν την δυνατότητα αλλάζοντας την τάση σε «HIGH» να δώσουν σήμα στον μικροελεγκτή κίνησης για άμεση διακοπή της κίνησης του ρομπότ. Εφόσον βρίσκεται σε κατάσταση «LOW», πραγματοποιούνται οι κατάλληλες αλλαγές στη γέφυρα L293D ώστε να πραγματοποιηθεί η εκάστοτε κίνηση. Σε όλη τη διάρκεια της κίνησης γίνεται έλεγχος στην είσοδο του Interrupt pin. Επιπλέον, γίνεται έλεγχος για την αλλαγή της κατάστασης από τα σήματα των Encoders, πραγματοποιώντας κατάλληλες μετατροπές στους εκάστοτε μετρητές στροφών. Εφόσον ολοκληρωθούν οι αναγκαίες περιστροφές χωρίς την ύπαρξη διακοπής, πραγματοποιείται παύση της κίνησης και ο μικροελεγκτής κίνησης αναμένει την επόμενη εντολή από τον κεντρικό μικροελεγκτή του συστήματος.



Εικόνα 3. 18: Προσομοίωση συστήματος κίνησης.

Η λειτουργία του συστήματος κίνησης προσομοιώθηκε μέσω της ελεύθερης πλατφόρμας της *Autodesk Tinkercad*. Η πλατφόρμα επιλέχθηκε λόγω της δυνατότητας ελεύθερης χρήσης, καθώς και της αξιοπιστίας της έναντι των υπολοίπων ελεύθερων πλατφόρμων προσομοίωσης. Στον ρόλο των μικροελεγκτών χρησιμοποιήθηκε το αναπτυξιακό Arduino UNO. Για τις εναλλαγές των καταστάσεων των encoders χρησιμοποιήθηκε ένας μικροελεγκτής (εικόνα 3.18,3), καθώς δεν υπήρχε ικανοποιητικό εξάρτημα στην βιβλιοθήκη της πλατφόρμας που να είχε την κατάλληλη λειτουργία. Επιπλέον, για τις ανάγκες της προσομοίωσης η τάση λειτουργίας των μοτέρ είναι 9V (εικόνα 3.18,6).

Ο προσομοιωτής του κεντρικού μικροελεγκτή επεξεργασίας, λαμβάνει μέσω σειριακής επικοινωνίας τις εντολές που θέλει ο χρήστης να στείλει στον μικροελεγκτή κίνησης. Η ακολουθία της εκάστοτε εντολής αποτελείται από τέσσερα (4) Bytes. Το πρώτο Byte, καθορίζει τη φύση της κίνησης, δηλαδή αν το ρομπότ θα κινηθεί μπροστά, αριστερά, δεξιά, πίσω ή θα πραγματοποιήσει παύση κίνησης. Η κίνηση αυτή καθορίζεται από την αποστολή του κατάλληλου χαρακτήρα, όπως απεικονίζεται στους πίνακες που

ακολουθούν. Τα επόμενα 2 Bytes καθορίζουν το πλήθος των επιθυμητών περιστροφών που πρέπει να πραγματοποιηθούν από τους Encoders. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, οι περιστροφές μετρούνται μόνο από τον ένα Encoder. Μέγιστος αριθμός περιστροφών είναι το 65535. Το τελευταίο byte έχει τον ρόλο checksum ώστε να διαπιστωθεί αν έχει παραλάβει σωστά την ακολουθία ο μικροελεγκτής. Σε περίπτωση που δεν έφτασε σωστά πραγματοποιεί παύση της κίνησης εφόσον εκτελείται μία, και αναμένει νέα εντολή.

Πίνακας 1: Δομή Ακολουθίας εντολών μικροελεγκτή κίνησης.

Bytes	Used for	Edit as Data Type	Values
COMBytes[0]	Commands	char	'F','L','R','B','S','K',
COMBytes[1]	Value	Unsigned Short	Unsigned Short int Big Endian
COMBytes[2]	Value	Unsigned Short	Unsigned Short int Low Endian
COMBytes[3]	Checksum	Byte	Byte

Πίνακας 2: Χαρακτήρες εντολών μικροελεγκτή κίνησης.

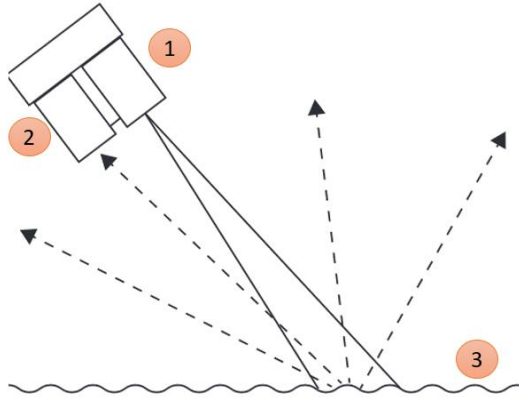
Value	Command
F	Move Forward
L	Turn Left
R	Turn Right
B	Move Backwards (Reverse)
S	Stop Movement
K	Successful Movement
E	Unsuccessful Movement (Error)
U	Ultrasonic MCU Interrupt

3.2.3. Σύστημα Αισθητήρων

Η πλατφόρμα για την ασφάλει της κίνηση εντός του περιβάλλοντα χώρου, πέρα από το σύστημα οδομετρίας, βασίζεται σε συστήματα αισθητήρων ώστε να πραγματοποιήσει τις επιθυμητές συμπεριφορές στο χώρο. Τα συστήματα αυτά είναι:

- I. Σύστημα LiDAR.
- II. Σύστημα αισθητήρων υπέρηχων.
- III. Πυξίδα.

Στην καρδιά του συστήματος LiDAR βρίσκεται ο αισθητήρας της εταιρείας Garmin LiDAR-Lite v3. Ο αισθητήρας έχει μικρό μέγεθος (20x48x40 mm) και μέγιστη απόσταση λειτουργίας τα 40m. Η ακρίβεια της μέτρησης του σε αποστάσεις μεγαλύτερες του 1m, κυμαίνονται στα +/- 2.5cm. Επιπλέον, έχει χαμηλή κατανάλωση ισχύος κατά τη λειτουργία του(1.3w). Υπάρχει η δυνατότητα μεταβολής του ρυθμού λήψης μετρήσεων, καθώς και δυνατότητα βαθμονόμησης του αισθητήρα κατά τη λειτουργία του. Επιπρόσθετα, υπάρχει η δυνατότητα επικοινωνίας με τον αισθητήρα μέσω του πρωτοκόλλου I2C και με παλμούς PWM(Pulse-width modulation). Η τάση λειτουργίας του αισθητήρα είναι στα 3.3V ή στα 5V. Η λειτουργία του βασίζεται στην ανίχνευση της ανάκλασης της δέσμης που στέλνει ο εκπομπός του αισθητήρα, όπως απεικονίζεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Λειτουργία LiDAR

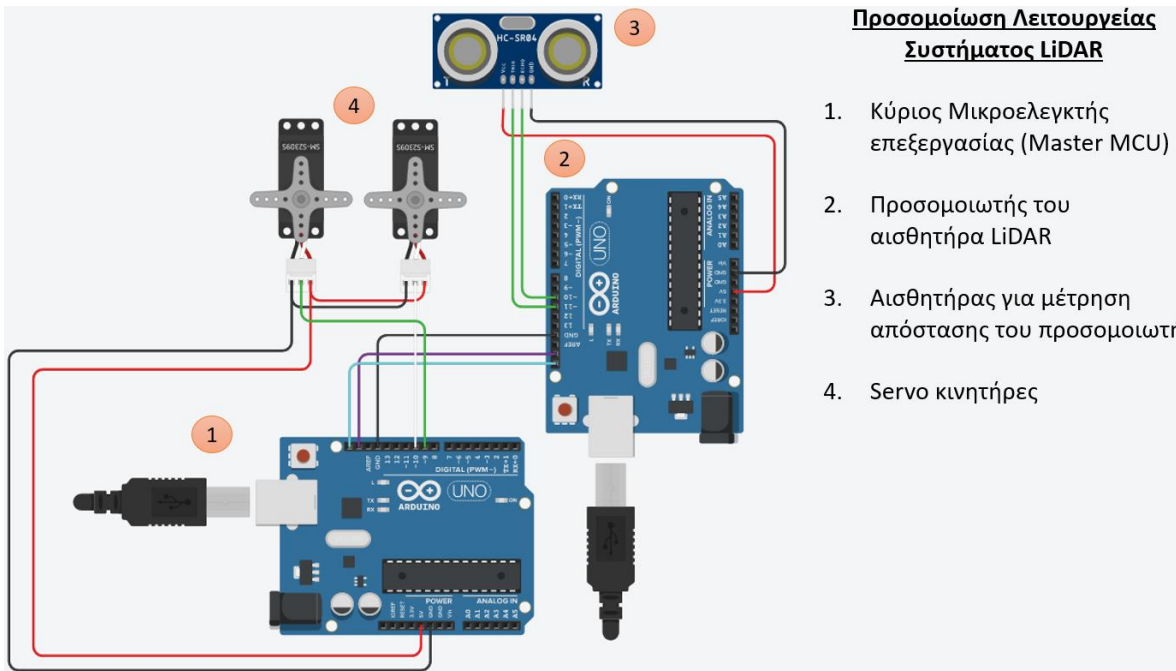
1. Εκπομπός Δέσμης LiDAR
2. Δέκτης αισθητήρα LiDAR
3. Επιφάνεια ανάκλασης

Εικόνα 3. 19: Αισθητήρα LiDAR, λειτουργία [38].

Αρχικά, ο αισθητήρας μηδενίζει έναν εσωτερικό μετρητή και εκπέμπει μια δέσμη μήκους κύματος 905nm. Κατά την εκπομπής της δέσμης ξεκινάει ο μετρητής να αυξάνει. Όταν ο δέκτης λάβει την δέσμη του συγκεκριμένου μήκους κύματος σταματάει η προσαύξηση του μετρητή. Έπειτα, με τη χρήση του μετρητή του εσωτερικού ρολογιού του αισθητήρα και της ταχύτητας του φωτός, προκύπτει η απόσταση της μέτρησης. Ακολουθεί ο γενικός μαθηματικός τύπος καθορισμού απόστασης με χρήση Laser.

$$R = c \frac{t}{2} \tag{3.1}$$

Όπου **R** είναι η απόσταση, **c** η ταχύτητα του φωτός (~299.792.458 m/s) και **t** ο χρόνος επιστροφής του παλμού laser [39]. Στην εικόνα που ακολουθεί η προσομοίωση του συστήματος με χρήση *Tinkercad*.



Προσομοίωση Λειτουργίας Συστήματος LiDAR

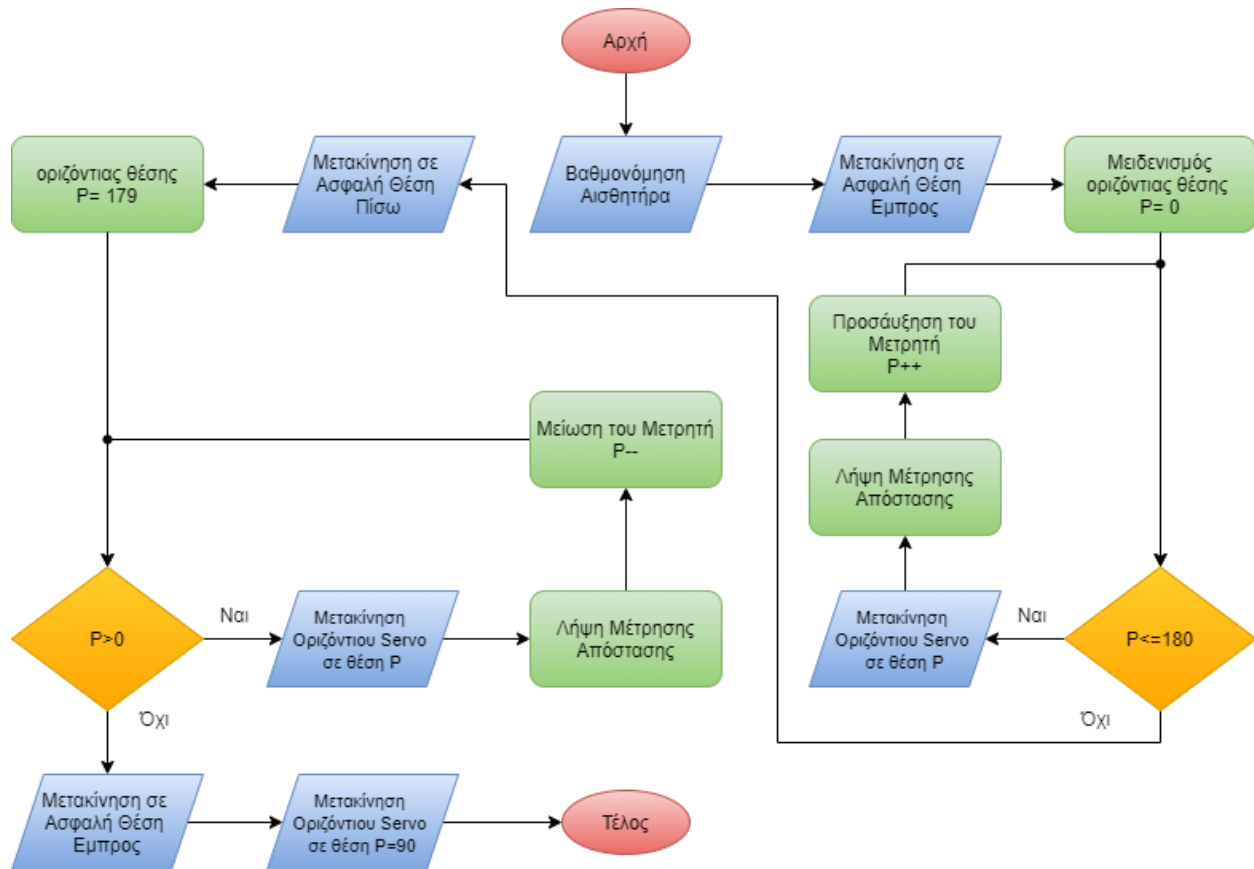
1. Κύριος Μικροελεγκτής επεξεργασίας (Master MCU)
2. Προσομοιωτής του αισθητήρα LiDAR
3. Αισθητήρας για μέτρηση απόστασης του προσομοιωτή
4. Servo κινητήρες

Εικόνα 3. 20: Προσομοίωση συστήματος LiDAR.

Για την προσομοίωση του αισθητήρα χρησιμοποιήθηκε ένα ειδώλιο *Arduino uno* (εικόνα 3.20,2), καθώς και για τη θέση της επιθυμητής απόστασης ένα ειδώλιο αισθητήρα υπερήχων (εικόνα 3.20,3). Ο βασικός μικροελεγκτής επεξεργασίας (εικόνα 3.20,1) λαμβάνει τις μετρήσεις μέσω του *Arduino uno* προσομοιωτή

με τη χρήση του **I2C** πρωτοκόλλου. Έπειτα από κάθε μέτρηση πραγματοποιεί κατάλληλες αλλαγές στη θέση του εκάστοτε κινητήρα *Servo* (εικόνα 3.20,4). Στο τέλος τυπώνει τα αποτελέσματα των μετρήσεων στην σειριακή οθόνη. Αξίζει να σημειωθεί πως στην κατασκευή χρησιμοποιήθηκε η έτοιμη βιβλιοθήκη της εταιρείας *Garmin* [40] για την επικοινωνία και τη λήψη των μετρήσεων από τον αισθητήρα.

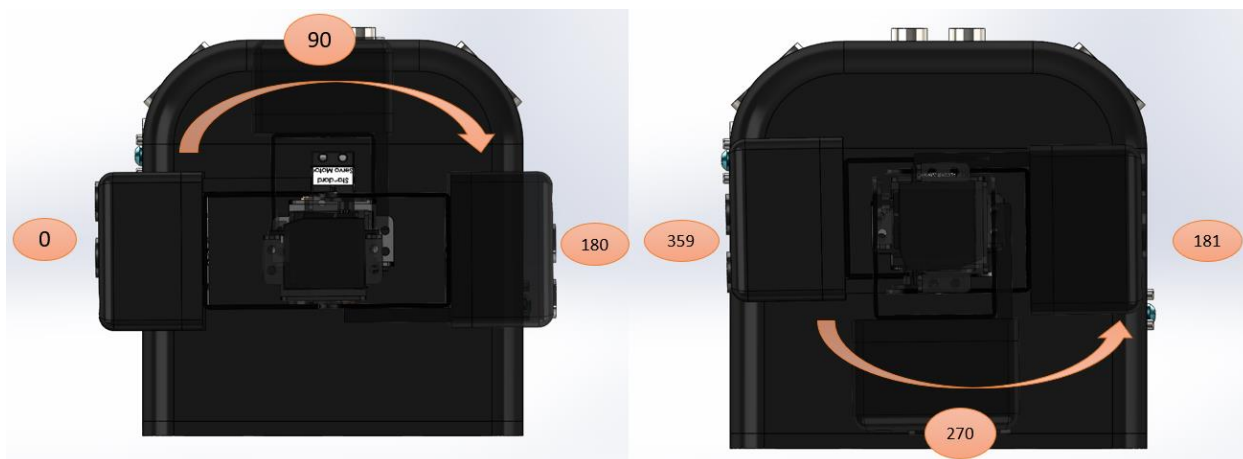
Η λειτουργία που προσομοιώνεται ονομάζεται *LiDAR 360 Scan* και αναλύεται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Εικόνα 3. 21: Διάγραμμα λειτουργίας LiDAR scan 360.

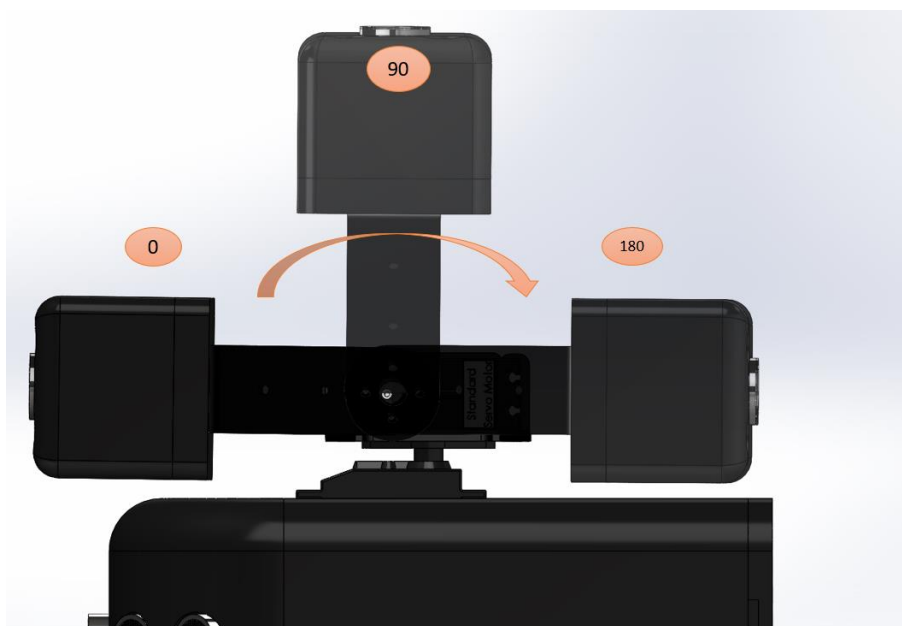
Αρχικά πραγματοποιείται βαθμονόμηση του αισθητήρα και τοποθέτηση του στην ασφαλή μπροστινή θέση. Ως ασφαλή μπροστινή θέση ορίζεται η θέση όπου ο servo κίνησης του κάθετου άξονα (εικόνα 3.22) και του servo κίνησης του οριζόντιου άξονα (εικόνα 3.23) βρίσκονται στις **0° μοίρες**. Άξιο αναφοράς είναι πως στο κάθετο άξονα περιστροφής το ρομπότ ορίζει τις 0ο μοίρες στα αριστερά και τις προσαυξάνει σύμφωνα με τη φορά του ρολογιού (εικόνα 3.22). Επιπλέον, στον οριζόντιο άξονα περιστροφής πραγματοποιείται κίνηση μόνο μεταξύ των 0- 180° μοιρών (εικόνα 2.23), με τις 0° μοίρες να ορίζονται στο μπροστινό μέρος του αμαξώματος.

Έπειτα, μηδενίζεται ο μετρητής θέσης και ο αισθητήρας LiDAR περιστρέφεται γύρω από τον κάθετο άξονα, λαμβάνοντας μετρήσεις απόστασης για κάθε μοίρα, προσαυξάνοντας κατάλληλα τον μετρητή και τη θέση του servo κινητήρα. Όταν έχουν ολοκληρωθεί οι μετρήσεις μέχρι τις 180 μοίρες, πραγματοποιείται η κίνηση του αισθητήρα στην *Ασφαλή Θέση Πίσω*. Ως ασφαλή πίσω θέση, ορίζεται η θέση όπου ο servo κίνησης του κάθετου άξονα (εικόνα 3.22) και του servo κίνησης του οριζόντιου άξονα (εικόνα 3.23) βρίσκονται στις **179° μοίρες** και **180° μοίρες** αντίστοιχα.



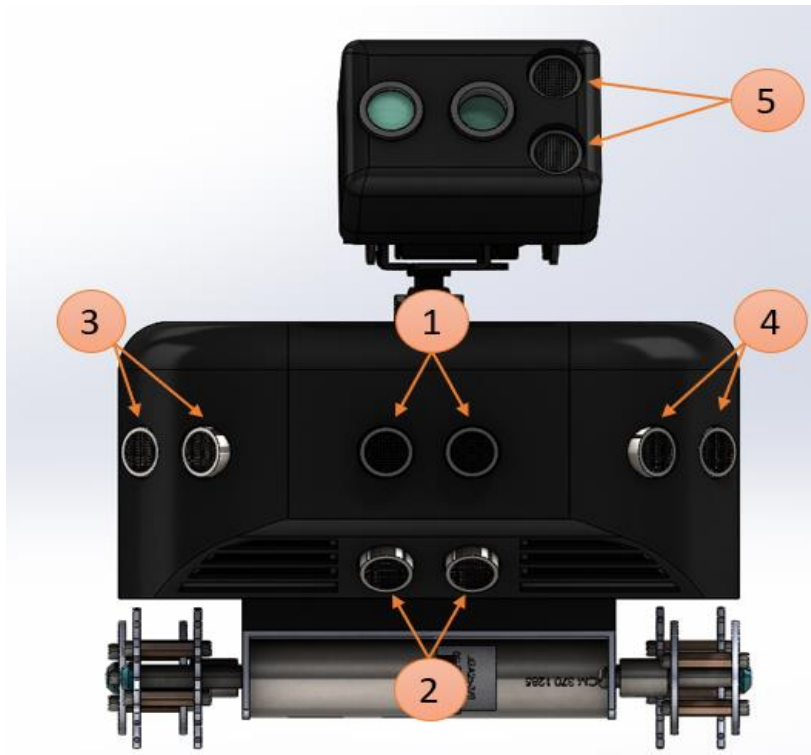
Εικόνα 3. 22: Lidar Scan 360, οριζόντια κίνηση.

Στη συνέχεια πραγματοποιούνται οι μετρήσεις από τις **359° μοίρες** ως τις **181° μοίρες**, αλλάζοντας κατάλληλα θέση στον *servo* κινητήρα ελέγχου κίνησης του οριζόντιου άξονα. Οι μετρήσεις στις 180° και 360° μοίρες, δεν λαμβάνονται από τον αισθητήρα σε αυτή την θέση του κινητήρα, καθώς είναι οι αντίστοιχες με τις μετρήσεις των 0° και 180° μοιρών από τις μετρήσεις που πάρθηκαν στη μπροστινή θέση. Επιπλέον, ο μετρητής θέσης του κάθετου άξονα λαμβάνει τις τιμές **179** ως **1** ώστε να πραγματοποιηθεί κατάλληλα η προαναφερθείσα κίνηση.



Εικόνα 3. 23: Lidar Scan 360, εναλλαγή από μπροστινή θέση scan σε πίσω.

Το **σύστημα αισθητήρων υπερήχων**, αποτελείται από πέντε (5) αισθητήρες τοποθετημένους σε κατάλληλα σημεία στο αμάξιωμα (εικόνα 3.24). Σκοπός του συστήματος είναι να ειδοποιήσουν τον κεντρικό μικροελεγκτή σε περίπτωση που παραβιαστεί κάποια από τις αποστάσεις ασφαλείας που έχουν οριστεί.



Αισθητήρες Υπερήχων

1. Μπροστινός Αισθητήρας (Forward)
2. Κάτω Αισθητήρας (Down)
3. Δεξιός Αισθητήρας (Right)
4. Αριστερός Αισθητήρας (Left)
5. Αισθητήρας Βραχίονα (Turret)

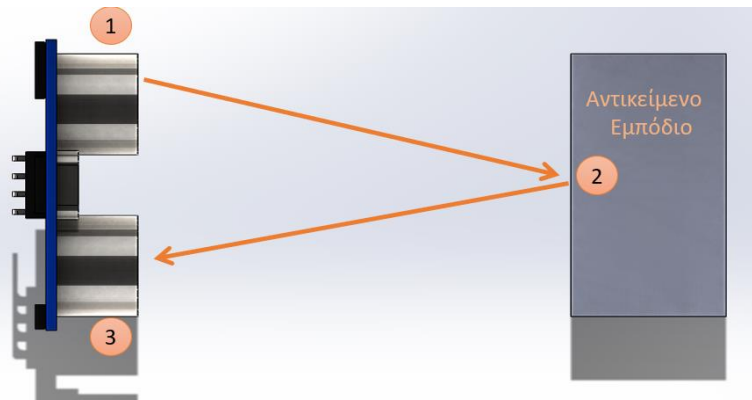
Εικόνα 3. 24: Θέση Αισθητήρων υπερήχων.

Οι αισθητήρες υπερήχων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι *HC-SR04*, καθώς αποτελούν φθηνή και αξιόπιστη υλοποίηση αισθητήρα υπερήχων για μικρές εφαρμογές. Έχουν τάση λειτουργίας τα 5V με ρεύμα 15mA. Η απόσταση των μετρήσεων τους κυμαίνεται από τα 2- 400cm με ακρίβεια ως 3mm. Για την επικοινωνία με τον αισθητήρα δεν απαιτείται κάποιο πρωτόκολλο.



Λειτουργία Αισθητήρα Υπερήχων

1. Εκπομπός υπέρηχου
2. Ανάκλαση του υπέρηχου
3. Λήψη του υπέρηχου από τον δέκτη.



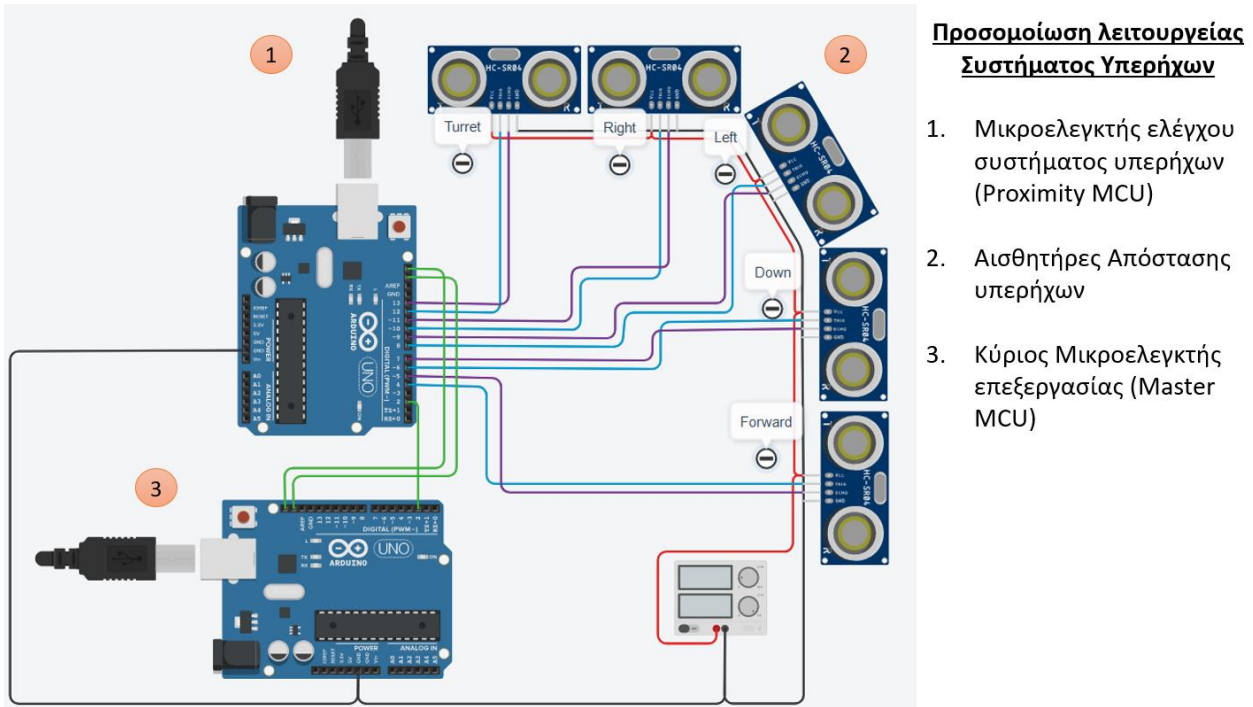
Εικόνα 3. 25: Αρχή λειτουργίας αισθητήρα υπερήχων [41].

Η αρχή λειτουργίας του αισθητήρα υπερήχων, βασίζεται στην ανάκλαση του από τα αντικείμενα που βρίσκονται στο δρόμο του. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και στο ζωικό βασίλειο από τις νυχτερίδες, για την πτήση τους εντός σκοτεινού χώρου. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται σκανδαλισμός του αισθητήρα με την αποστολή παλμού πλάτους 10μs στο *Trigger Pin*. Κατά τον σκανδαλισμό *Echo Pin* γίνεται *HIGH* και ο εκπομπός του αισθητήρα ξεκινάει την αποστολή οχτώ (8) υπέρηχων παλμών των 40kHz. Όταν επιστρέφει κάποιος από τους παλμούς, το *Echo Pin* μεταβαίνει σε κατάσταση *LOW*. Καθ' όλη αυτή τη διάρκεια της διαδικασίας, ο μικροελεγκτής ελέγχου του αισθητήρα καταγράφει την διάρκεια

του χρόνου που χρειάστηκε ώστε το *Echo Pin* να μεταβεί σε κατάσταση *LOW*. Έπειτα ο υπολογισμός της απόστασης προκύπτει από τον ακόλουθο μαθηματικό τύπο:

$$R = c \frac{t}{2} \quad (3.2)$$

Όπου **R** είναι η απόσταση, **c** η ταχύτητα του ήχου (343m/s) και **t** ο χρόνος όπου παρέμεινε το *Echo Pin* σε κατάσταση *HIGH*. Ακολουθεί η προσομοίωση του συστήματος υπερήχων με χρήση της πλατφόρμας *Tinkercad*.



Εικόνα 3. 26: Προσομοίωση συστήματος υπερήχων.

Στην προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν είδωλα του *Arduino Uno* για τους μικροελεγκτές. Ο βασικός μικροελεγκτής (εικόνα 3.26,3) επεξεργασίας αποστέλλει εντολές στον μικροελεγκτή ελέγχου των αισθητήρων (εικόνα 3.26.1) μέσω του πρωτοκόλλου επικοινωνίας **I2C**. Ο χρήστης μέσω της σειριακής επικοινωνίας εισάγει δεδομένα που θα επεξεργαστούν καταλληλά για να σταλούν στον μικροελεγκτή ελέγχου των αισθητήρων. Οι εντολές που έχει τη δυνατότητα να αποστείλει ο κεντρικός αφορούν την επίδειξη των τιμών των αισθητήρων απόστασης μεμονωμένα ή όλων μαζί, καθώς και την δυνατότητα να αγνοεί ο μικροελεγκτής ελέγχου αισθητήρων την δοθείσα ασφαλή τιμή για κάποιον από τους αισθητήρες, ώστε να μην ενεργοποιείται το pin διακοπής.

Η ακολουθία της εκάστοτε εντολής αποτελείται από τέσσερα (4) Bytes. Το πρώτο Byte, καθορίζει τον αισθητήρα επιλογής και καθορίζεται από την αποστολή του κατάλληλου χαρακτήρα όπως απεικονίζεται στον πίνακα που ακολουθεί. Τα επόμενα 2 Bytes καθορίζουν την ενέργεια που θα εκτελεστεί. Σε περίπτωση που είναι μηδενικά, πραγματοποιείται αποστολή της μέτρησης του κάθε αισθητήρα στον κεντρικό μικροελεγκτή επεξεργασίας. Όταν τα bytes είναι άσσοι (1), τότε δίνεται εντολή για παράβλεψη του αισθητήρα από το σύστημα διακοπών. Κατά τη διάρκεια της παράβλεψης υπάρχει ακόμα η δυνατότητα λήψης των μετρήσεων του αισθητήρα. Σε περίπτωση που είναι επιθυμητό να ξαναμπει ο αισθητήρα στην διαδικασία λήψης διακοπών ξανά γίνεται η αποστολή των 2 bytes με άσσους στον μικροελεγκτή.

Σχεδιασμός και υλοποίηση αυτόνομου συστήματος με μικροελεγκτές

Πίνακας 3: Εντολές επικοινωνίας με μικροελεγκτή ελέγχου για το σύστημα αισθητήρων υπέρηχων.

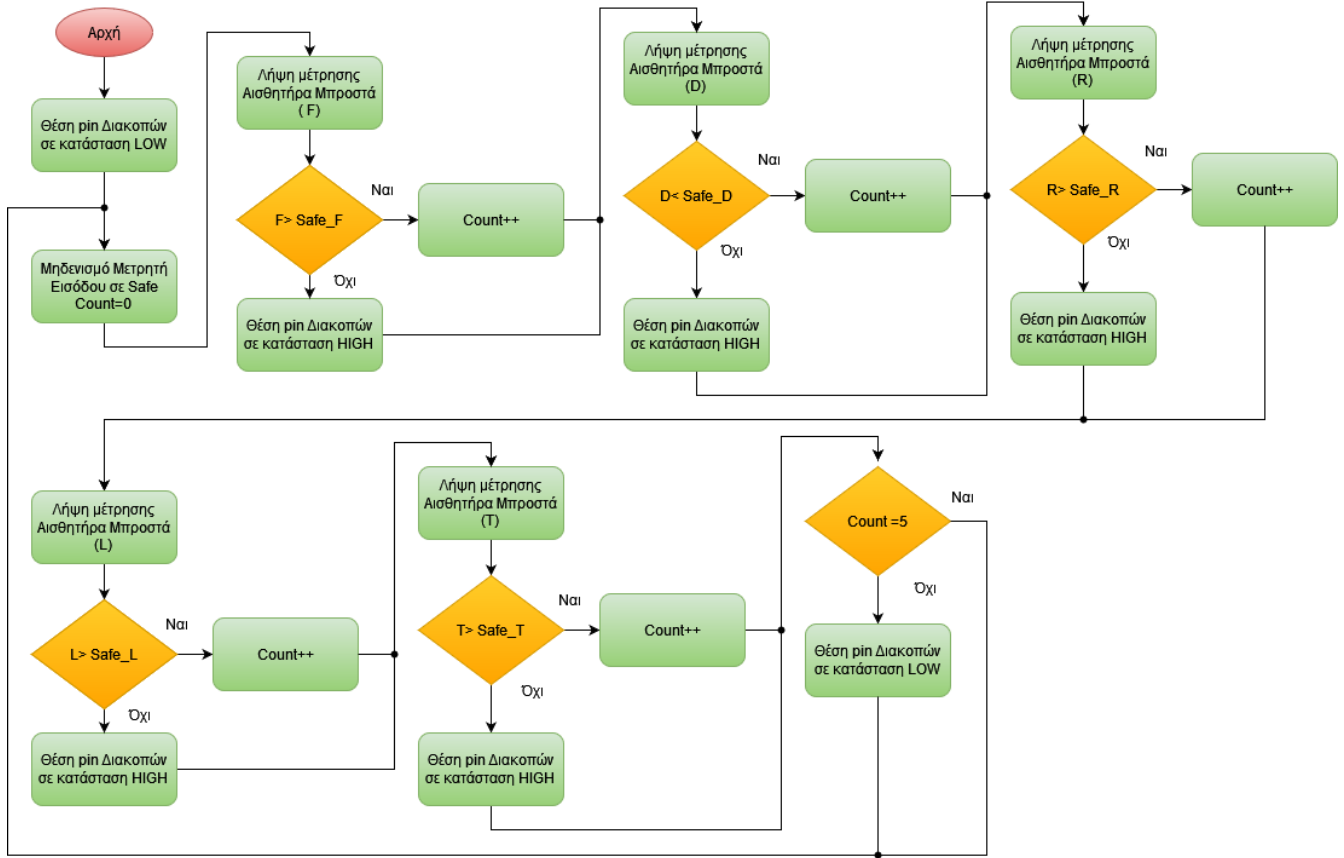
Value	Command
F	Forward Ultrasonic Sensor
D	Down Ultrasonic Sensor
L	Left Ultrasonic Sensor
R	Right Ultrasonic Sensor
T	Turret Ultrasonic Sensor
K	Successful Sensor Check

Στη συνέχεια ακολουθεί ένα απλοποιημένο διάγραμμα λειτουργίας του μικροελεγκτή ελέγχου των αισθητήρων(εικόνα3.27). Είναι απλοποιημένο καθώς ο σκοπός του είναι η κατανόηση της βασικής διαδικασίας λειτουργίας του συστήματος αυτού. Στο διάγραμμα δεν αναλύεται η διαδικασία επικοινωνίας με τον κύριο μικροελεγκτή ελέγχου, ούτε ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται η αγνόηση κάποιου από τους αισθητήρες στην λήψη απόφασης ενεργοποίησης του ακροδέκτη διακοπών.

Αποτελείται από έναν ατέρμονα βρόχο καθώς είναι απαραίτητη η λειτουργία του σε όλη την διάρκεια λειτουργίας του ρομποτικού συστήματος. Αρχικά ο ακροδέκτης διακοπών τίθεται σε κατάσταση *LOW*. Έπειτα μηδενίζεται ο μετρητής ελέγχου των μετρήσεων των αισθητήρων. Είναι αναγκαίος καθώς προσαυξάνεται κάθε φορά που δεν παραβιάζεται η μέτρηση των αισθητήρων, σύμφωνα με τις ορισμένες ασφαλείς αποστάσεις. Έπειτα πραγματοποιείται μέτρηση του κάθε αισθητήρα και σύγκριση του με την ασφαλή τιμή. Σε περίπτωση που δεν την παραβιάζει πραγματοποιείται αύξηση του μετρητή, διαφορετικά ενεργοποιείται ο ακροδέκτης διακοπών (*HIGH*). Η παραβίαση προκύπτει όταν οι τιμές της μέτρησης του εκάστοτε αισθητήρα είναι μικρότερες από τις ασφαλείς καθώς αυτό σηματοδοτεί πως κάποιο εμπόδιο είναι επικίνδυνα κοντά. Το αντίθετο ισχύει **μόνο** στον αισθητήρα μέτρησης προς τα κάτω, καθώς μία μέτρηση μεγαλύτερη της ασφαλής σηματοδοτεί κίνδυνο στο έδαφος, όπως πιθανή κοιλότητα του εδάφους. Στο τέλος των μετρήσεων πραγματοποιείται μια σύγκριση του μετρητή με το πλήθος των αισθητήρων, ώστε σε περίπτωση που έχει προηγηθεί διακοπή σε προηγούμενο κύκλο εκτέλεσης και πλέον δεν υπάρχει (δηλαδή όλοι οι αισθητήρες είναι σε ασφαλείς μετρήσεις), να πραγματοποιηθεί αλλαγή της κατάστασης του ακροδέκτη διακοπών σε *LOW*. Τέλος, πραγματοποιείται μηδενισμός του μετρητή και εκ νέου μέτρηση των αισθητήρων.

Στην έκδοση της κατασκευής διαφορές παρατηρούνται στα τελευταία βήματα που αναφέρθηκαν μετά την λήψη των μετρήσεων, όπου σύμφωνα με μεταβλητές ελέγχου υλοποιούν τις προαναφερθείσες εντολές. Επίσης, οι μεταβλητές ελέγχου αντικαθιστούν τον μετρητή, όπου σε κάθε μέτρηση πραγματοποιείται εναλλαγή κατάστασης τους.

Σχεδιασμός και υλοποίηση αυτόνομου συστήματος με μικρολεγκτές



Εικόνα 3. 27: Απλοποιημένο διάγραμμα λειτουργίας μικροελεγκτή ελέγχου αισθητήρων υπερήχων.

Η πυξίδα έχει σκοπό να παρέχει πληροφορίες στο ρομπότ σχετικά με τη φορά του αμαξώματος στον χώρο. Χρησιμοποιήθηκε το GY-271 το οποίο επικοινωνεί κατευθείαν με τον κεντρικό μικροελεγκτή του συστήματος μέσω του πρωτοκόλλου I2C. Έχει την δυνατότητα καθορισμού του μαγνητικού πεδίου σε τρεις (3) άξονες. Για τον καθορισμό του πεδίου στην εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε μόνο ένας εκ των αξόνων. Για την λειτουργία έγινε χρήση της έτοιμης βιβλιοθήκης *Arduino (MechaQMC5883.h)* [42]. Δεν πραγματοποιήθηκε προσομοίωση για την παρούσα λειτουργία. Ακολουθεί ο πίνακας τιμών του άξονα μαγνητικού πεδίου σε μοίρες με την αντιστοίχισή τους στα σημεία του ορίζοντα. Να σημειωθεί πως έχει ληφθεί υπόψιν η ανακρίβεια του αισθητήρα κατά την λειτουργία, οπότε έχει δοθεί ένα σφάλμα μεταξύ των τιμών στις +/- 10° μοίρες..

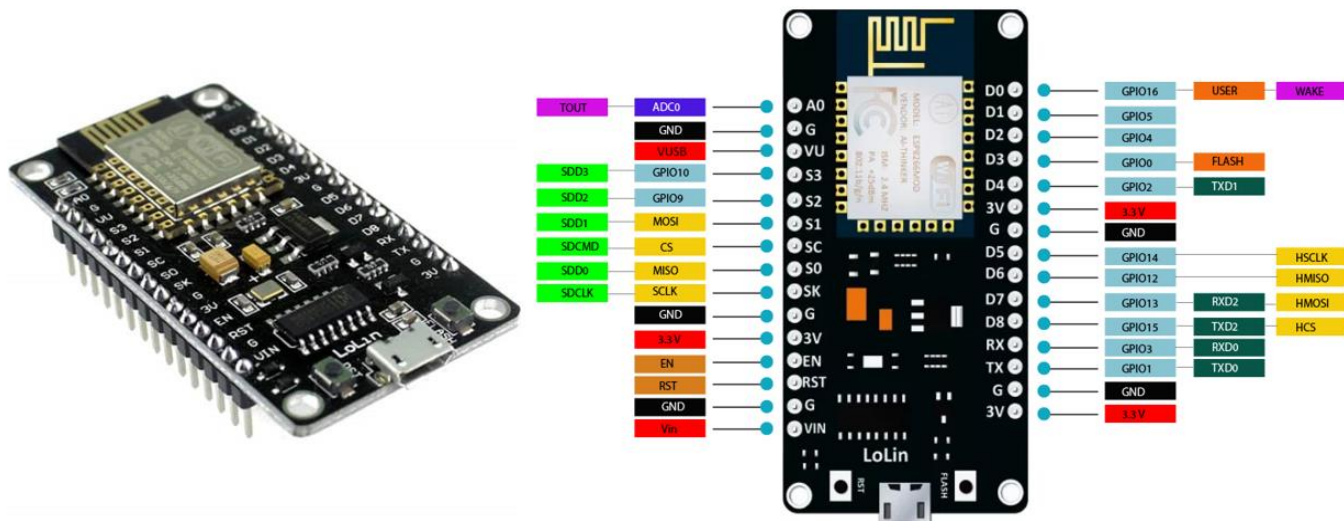
Πίνακας 4: Πίνακας σημείων ορίζοντα, μοιρών πυξίδας.

Σημείο Ορίζοντα	Μοίρες	Μοίρες (υπόψιν σφάλματος)
Βοράς (N)	0°	350° – 10°
Δύση (W)	90°	80° – 100°
Νότος (S)	180°	170° – 190°
Ανατολή(E)	270°	260° – 280°

3.2.4. Σύστημα Επεξεργασίας / Μικροελεγκτές

3.2.4.1. 1^η Υλοποίηση – ESP8266 & Arduino Nano

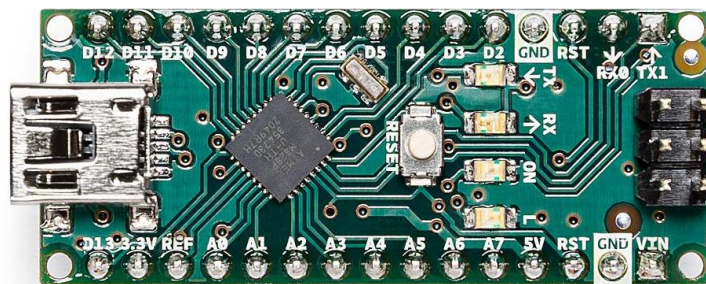
Για την επιτυχή λειτουργία του ρομποτικού συστήματος ήταν αναγκαία επιλογή η επιλογή μικροελεγκτών ή κάποιας αναπτυξιακής πλατφόρμας, ώστε να υλοποιηθούν οι κατάλληλες συμπεριφορές. Αρχική σκέψη ήταν η υλοποίηση με μια συστοιχία από τρεις (3) μικροελεγκτές *Atmel 328p*. Όμως τελικά επιλέχθηκε η χρήση έτοιμων αναπτυξιακών καθώς μείωσαν την πολυπλοκότητα της κατασκευής, κρατώντας το κόστος χαμηλό, δίνοντας καλύτερη επεξεργαστική ισχύ και επεκτασιμότητα για μελλοντικές αναβαθμίσεις.



Εικόνα 3. 28: ESP8266 – LoLin NodeMCU V3 [43].

Για την υλοποίηση του βασικού μικροελεγκτή επεξεργασίας χρησιμοποιήθηκε ένα **ESP8266** και συγκεκριμένα η υλοποίηση *LoLin NodeMCU v3* [44]. Επιλέχθηκε καθώς είναι μια φθηνή υλοποίηση ανοιχτού υλικολογισμικού με τη δυνατότητα να προγραμματιστεί από το περιβάλλον του *Arduino IDE*. Επιπλέον, παρέχει αρκετά μεγαλύτερη επεξεργαστική ισχύ από τους μικροελεγκτές της *Atmel ATmega328p*, καθώς έχει ενσωματωμένο τον επεξεργαστή L106 32-bit αρχιτεκτονικής RISC (*Reduced Instruction Set Computer*), χρονισμένο στα 80MHz με ικανότητα χρονισμού και στα 160MHz. Διαθέτει 32KiB RAM, flash μνήμη 512KB (με μέγιστη τα 16MB) και υποστηρίζει πληθώρα πρωτοκόλλων επικοινωνίας όπως το SPI και το I2C που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική. Η πλατφόρμα λειτουργεί στα 3.3V, όμως μέσω της θύρας USB μπορεί να λάβει τάση 5V. Τέλος, διαθέτει και την ικανότητα επικοινωνίας μέσω πρωτοκόλλου WIFI, το οποίο συνεισφέρει επιπλέον στην μελλοντική επεκτασιμότητα του ρομποτικού συστήματος.

Για τους μικροελεγκτές ελέγχου των αισθητήρων και του συστήματος κίνησης/οδομετρίας, επιλέχθηκε η χρήση της πλατφόρμας *Arduino Nano* [45]. Η επιλογή τους έγινε λόγω του ότι ενσωματώνουν τον μικροελεγκτή της *Atmel ATmega328*, ενώ παράλληλα οι κλώνοι αυτής της υλοποίησης έχουν χαμηλό κόστος (κοντά στο κόστος του μικροελεγκτή *ATmega328p*). Επιπλέον, αποτελούν πλατφόρμα ανοιχτού υλικολογισμικού με μικρό μέγεθος και έχουν την δυνατότητα να εκτελέσουν τον κώδικα των προσομοιώσεων χωρίς σημαντικές τροποποιήσεις.

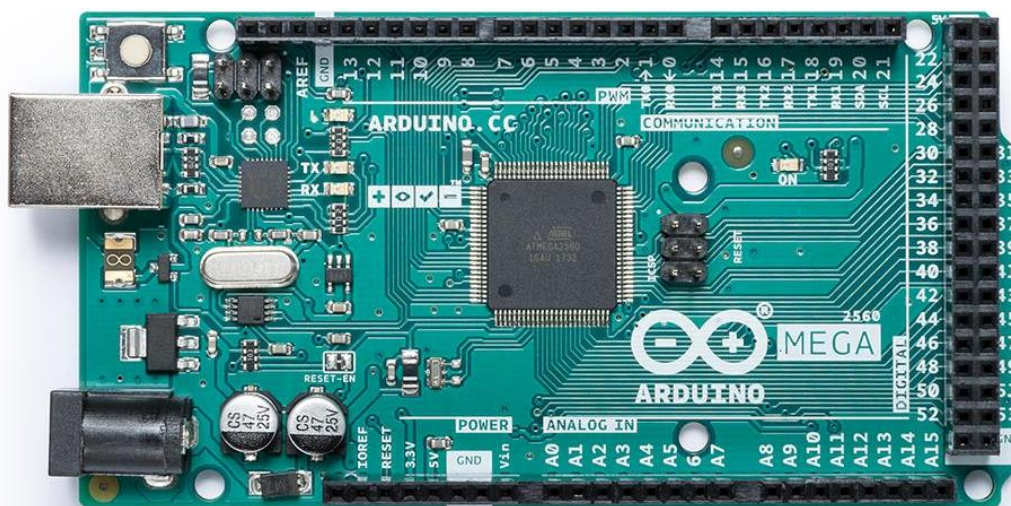


Εικόνα 3. 29: Arduino Nano [45].

Η τάση λειτουργίας και εισόδου είναι στα 5V γεγονός που καθιστά εύκολο τον χειρισμό των αισθητήρων της ρομποτικής πλατφόρμας. Έχει ταχύτητα επεξεργασίας τα 16MHz, μνήμη Flash 32KB και SRAM 2KB τα οποία είναι αρκετά για την μεμονωμένη λειτουργία με αισθητήρες και μοτέρ. Διαθέτει 22 ακροδέκτες I/O, 6 εκ των οποίων είναι PWM καθιστώντας τα ιδανικά για την χρήση του μικροελεγκτή ελέγχου κίνησης και τον μικροελεγκτή ελέγχου του συστήματος αισθητήρων υπερήχων του ρομπότ.

3.2.4.2. 2^η Υλοποίηση

Πραγματοποιήθηκε δεύτερη υλοποίηση των λειτουργιών του ρομποτικού συστήματος. Σε αυτήν ως αναπτυξιακή πλατφόρμα επιλέχθηκε το *Arduino Mega 2560* [46]. Ο σκοπός της δεύτερης υλοποίησης ήταν η ενσωμάτωση των λειτουργιών σε μια πλατφόρμα για την εξοικονόμηση χώρου, καθώς και κατανάλωσης ισχύος.

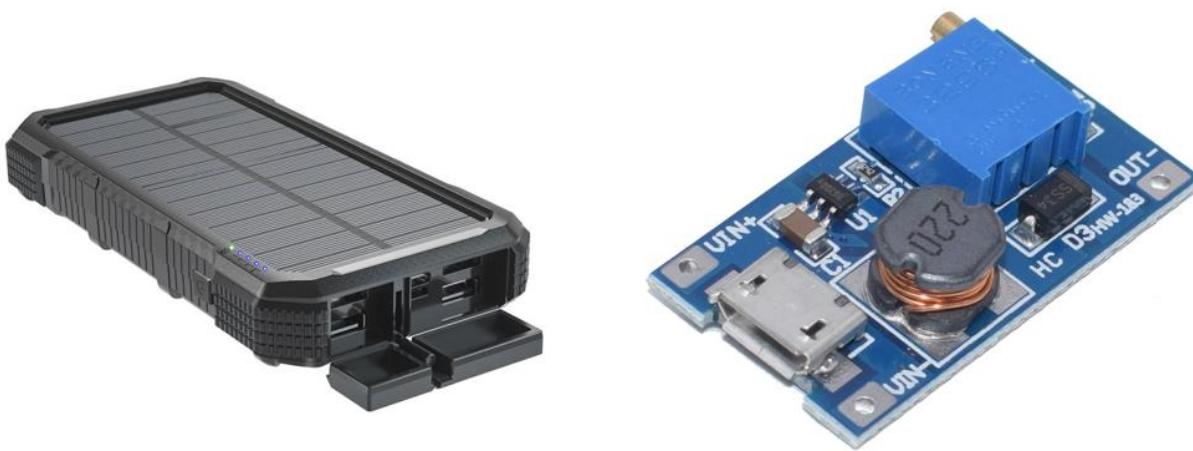


Εικόνα 3. 30: Arduino Mega 2560 [46].

Χρησιμοποιεί τον μικροελεγκτή της *Atmel Atmega2560*, χρονισμένο στα 16MHz. Διαθέτει Flash μνήμη των 256KB και SRAM 8KB τα οποία ικανοποιούν τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Επιπλέον, διαθέτει 54 ακροδέκτες I/O εκ των οποίων οι 6 έχουν την ικανότητα PWM. Επίσης, υποστηρίζει τα πρωτόκολλα I2C και SPI που χρησιμοποιούνται στην επικοινωνία του ρομπότ με τους αισθητήρες και τον αποθηκευτικό χώρο της κάρτας SD. Η συγκεκριμένη υλοποίηση της ρομποτικής δεν παρέχει τις ίδιες δυνατότητες επεκτασιμότητας με την πρώτη υλοποίηση, αλλά αποτελεί μια ευκολότερη έκδοση ως προς την υλοποίηση της χωρίς τα πιθανά προβλήματα επικοινωνίας και συγχρονισμού των συσκευών της πρώτης.

3.2.5. Τροφοδοσία

Για την τροφοδοσία της πλατφόρμας χρησιμοποιήθηκε το powerbank της 4SMARTS (*Solar Power Bank Rugged Titanpack Slim 20.000MAH*) [47]. Επιλέχθηκε λόγω της μεγάλης του χωρητικότητας και της δυνατότητας φόρτισης 4 συσκευών ταυτόχρονα. Αυτό το χαρακτηριστικό ήταν ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς στην πρώτη υλοποίηση της πλακέτας τα αναπτυξιακά, καθώς και η πλακέτα Step-UP λάμβαναν κατευθείαν τροφοδοσία από το powerbank μέσω της θύρας USB. Επιπλέον, η ποιότητα κατασκευής του και η ανοχή του σε αντίξοες συνθήκες ήταν ένα ακόμα κριτήριο επιλογής. Όμως, προσθέτει σημαντικό βάρος στο ρομπότ (450gr). Στη δεύτερη υλοποίηση είναι δυνατή η χρήση ενός μικρότερου σε μέγεθος και βάρος powerbank.



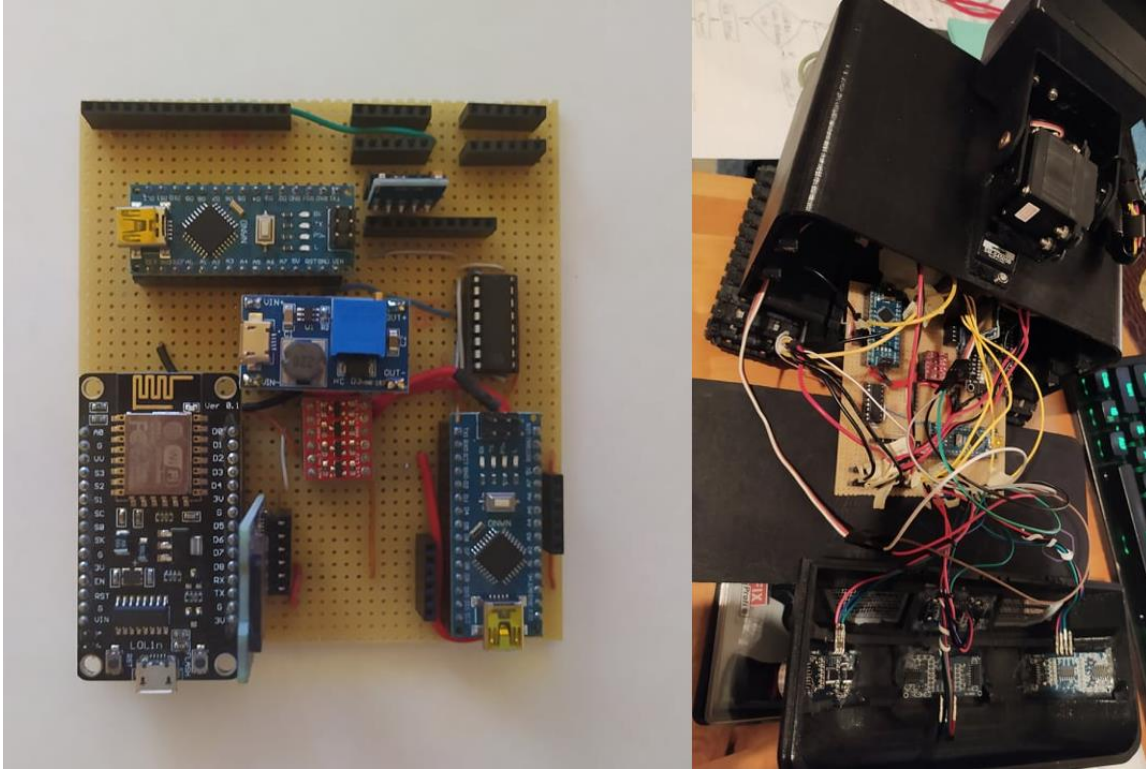
Εικόνα 3. 31: Αριστερά power bank της 4Smarts [47], δεξιά step-up converter MT3608 [48].

Για την τροφοδοσία των μοτέρ του συστήματος ήταν αναγκαία η χρήση ενός *DC-DC Step-Up converter*. Στις παρούσες υλοποιήσεις χρησιμοποιήθηκε το MT3608. Επιλέχθηκε λόγω της προσιτής του τιμής και της δυνατότητας τροφοδότησης του με θύρα *micro USB*. Υποστηρίζει ως είσοδο τάσεις από 2-24V με έξοδο τάσεις 5-28V, εύρος που καλύπτει την τάση λειτουργίας των μοτέρ. Επιπλέον, η δυνατότητα για ρεύμα εξόδου 2A καλύπτει τις απαιτήσεις για την λειτουργία των μοτέρ της πλατφόρμας, δίνοντας την δυνατότητα για μελλοντική επεκτασιμότητα.

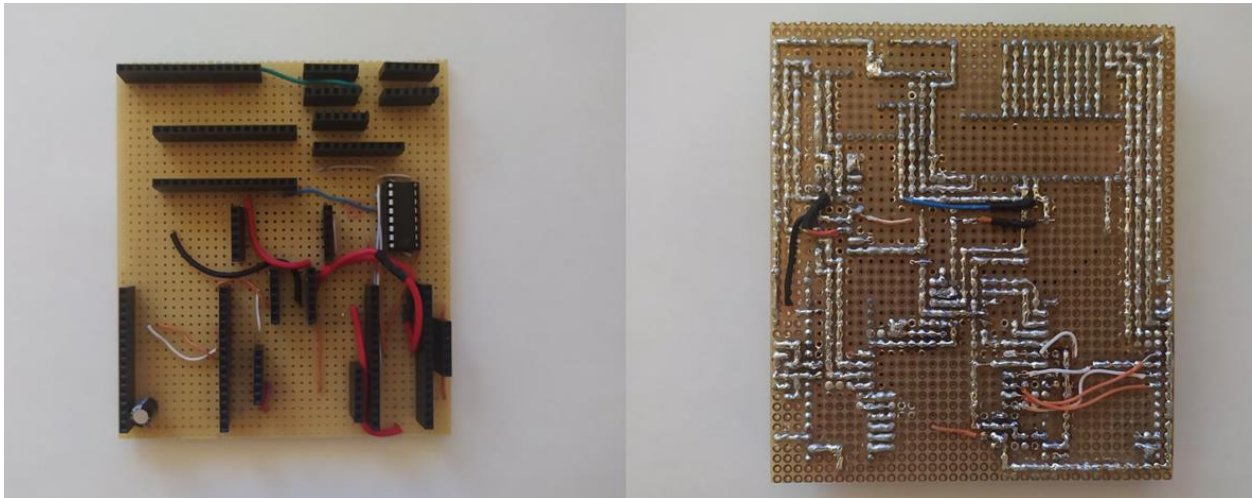
3.2.6. Πλακέτα Συστήματος

Για τη λειτουργία του ρομποτικού συστήματος κρίθηκε αναγκαία η ανάπτυξη μιας πλακέτας η οποία συνδέει κατάλληλα όλα τα ηλεκτρονικά υποσυστήματα μεταξύ τους, καθώς και με τα περιφερειακά του ρομπότ (μοτέρ και αισθητήρες). Στην εικόνα 3.32, απεικονίζεται η πλακέτα της πρώτης υλοποίησης της πλατφόρμας. Η πρωτότυπη πλακέτα υλοποιήθηκε με τη χρήση μιας διάτρητης πλακέτας μονής όψης διαστάσεων 100x100mm, στην οποία δημιουργήθηκαν συνδέσεις με τη χρήση κόλλησης και καλωδίων. Στην εικόνα 3.33, απεικονίζεται η τελική μορφή των δύο όψεων της πλακέτας, η οποία προέκυψε έπειτα από πολλαπλές βελτιώσεις και αλλαγές συνδέσεων.

Σχεδιασμός και υλοποίηση αυτόνομου συστήματος με μικρολεγκτές

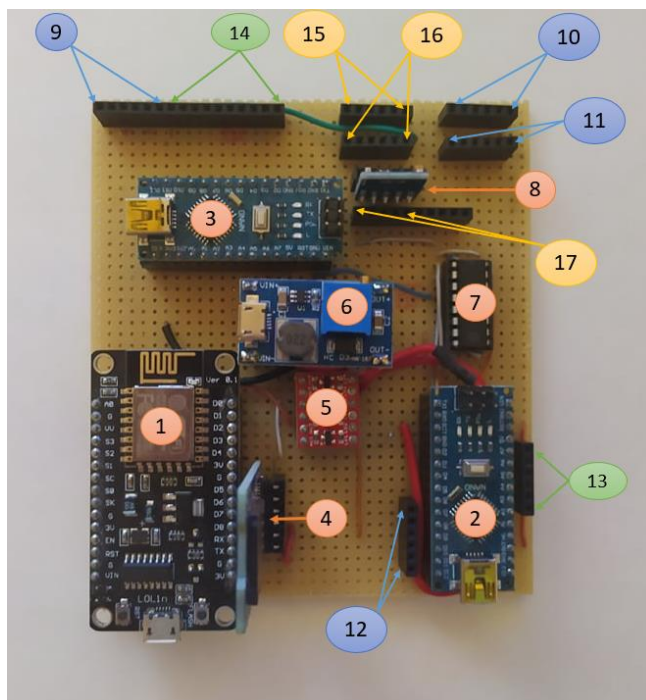


Εικόνα 3. 32: Πλακέτα πρώτης υλοποίησης (αριστερά), πλακέτα εντός του ρομπότ (δεξιά).



Εικόνα 3. 33: Πλακέτα πρώτης υλοποίησης.

Στη συνέχεια, περιγράφονται εκτενώς τα στοιχεία και οι συνδέσεις των καλωδίων της πλακέτας. Με πορτοκαλί χρώμα σηματοδοτούνται οι μονάδες λειτουργίας του συστήματος, με μπλε οι συνδέσεις που αφορούν το σύστημα κίνησης του αμαξώματος, με πράσινο τους αισθητήρες και με κίτρινό τις συνδέσεις που έχουν τοποθετηθεί για μελλοντικές επεκτάσεις της πλατφόρμας.



Δομή Πλακέτας 1^{ης} Υλοποίησης

Μονάδες Συστήματος/ MCUs

1. ESP8266 (Master MCU)
2. Arduino Nano (Motor MCU)
3. Arduino Nano (Ultrasonic MCU)
4. Micro SD card Reader module
5. Logic Level Converter (I2C Bus)
6. Step-Up Converter
7. L293D (Motor H-Bridge)
8. Compass Module

Συνδέσεις Συστήματος Κίνησης

9. Συνδέσεις Servo κινητήρων
10. Συνδέσεις Τροφοδοσίας Encoders
11. Συνδέσεις Ακροδέκτες Μοτέρ
12. Συνδέσεις Encoders των Μοτέρ

Συνδέσεις Αισθητήρων Απόστασης

13. Συνδέσεις αισθητήρα LiDAR (I2C Bus)
14. Συνδέσεις ακροδεκτών αισθητήρων υπερήχων.

Συνδέσεις Μελλοντικής Επέκτασης

15. Συνδέσεις τροφοδοσίας - +5V
16. Συνδέσεις τροφοδοσίας - GND
17. Θέση για γυροσκόπιο/ επιταχυνσιομέτρο (I2C Bus)

Εικόνα 3. 34: Στοιχεία και συνδέσεις της πλακέτας.

Συγκεκριμένα, οι μικροελεγκτές(εικόνα 3.34:1,2,3), ο αισθητήρας *LiDAR*(εικόνα 3.34,13) και το module της πυξίδας(εικόνα 3.34,8) συνδέονται σε ένα κοινό *I2C* διάλυο επικοινωνίας. Ενδιάμεσα του διαλύου *I2C* και του *ESP8266* βρίσκεται μια πλακέτα αμφίδρομης επικοινωνίας *I2C*(εικόνα 3.34,5), η οποία μετατρέπει την επικοινωνία σε 3.3V από την μεριά του *ESP8266*, ενώ από την άλλη την έχει στα 5V. Η πλακέτα αυτή είναι της εταιρείας *Sparkfun Logic Level Converter Bi-Directional*, η οποία είναι αναγκαία καθώς το *ESP8266* έχει τάση λειτουργίας τα 3.3V, γεγονός που θα προκαλούσε επιπλοκές σε περίπτωση κατευθείαν επικοινωνίας τις με συσκευές που έχουν τάση λειτουργίας τα 5V. Μέσω του διαλύου, το *ESP8266* λαμβάνει πληροφορίες από τους υπόλοιπους αισθητήρες και καθορίζεται η συμπεριφορά του ρομπότ. Σε αυτό συνδέεται με χρήση του πρωτοκόλλου *SPI* μια μονάδα για κάρτες *SD*(εικόνα 3.34,4) στην οποία αποθηκεύονται οι μετρήσεις του ρομπότ για περαιτέρω επεξεργασία από τον χρήστη. Οι κινητήρες *Servo* συνδέονται με το *ESP8266* μέσω των ακροδεκτών στην θέση 9 της εικόνας 3.34.

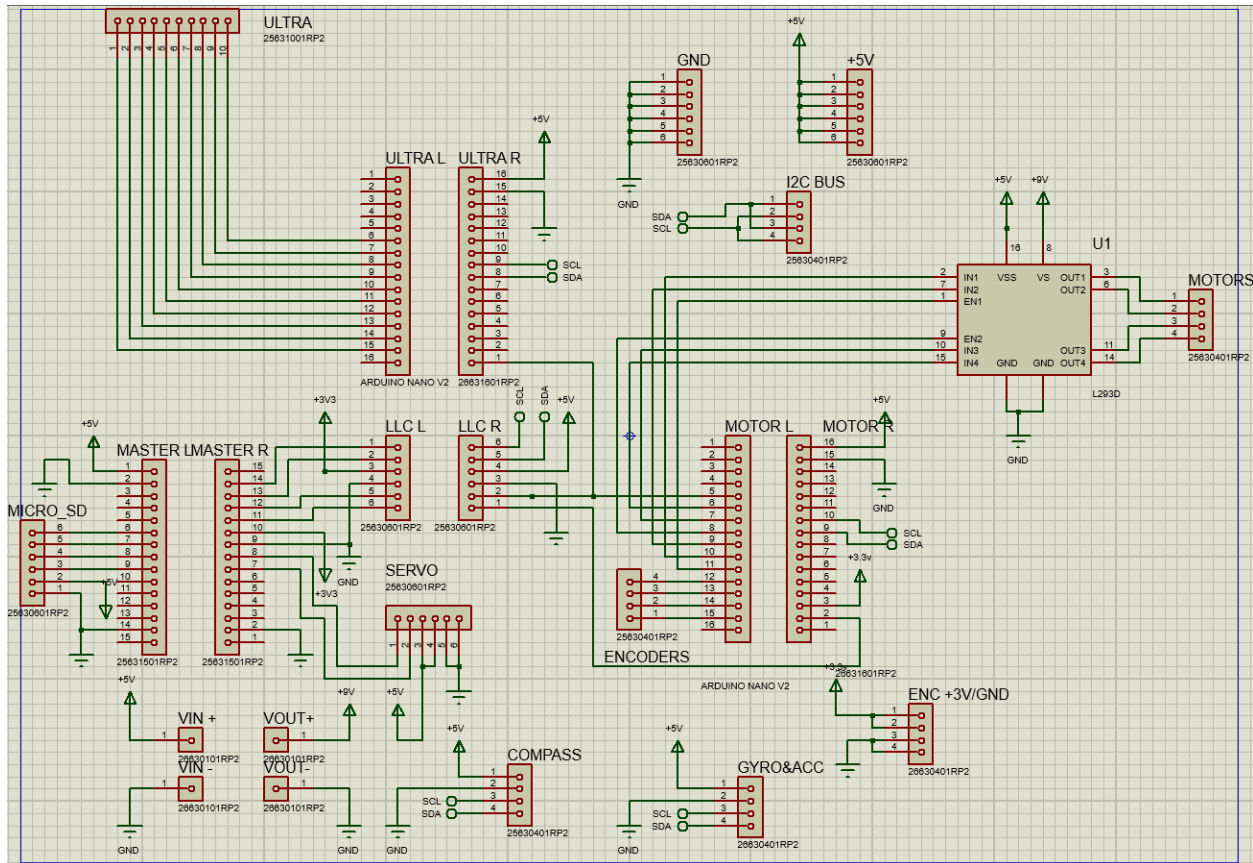
Στο σύστημα κίνησης ο μικροελεγκτής της κίνησης (εικόνα 3.34,2) λαμβάνει τις εντολές από το *ESP8266* μέσω του διαλύου *I2C*. Ελέγχει τις μετρήσεις από τους *Encoders* μέσω των συνδέσεων που υπάρχουν στην εικόνα 3.34,12. Για την κίνηση στέλνει κατάλληλα σήματα στο *L293D* (εικόνα 3.34,7), που ελέγχει τα μοτέρ. Το *L293D* λαμβάνει την τροφοδοσία που παρέχει στα μοτέρ μέσω του *step-Up* (εικόνα 3.34,6). Οι ακροδέκτες που λαμβάνουν τις κατάλληλες εναλλαγές τάσης για τα μοτέρ βρίσκονται στην θέση 11 της εικόνας 3.34. Επιπλέον, υπάρχει σύνδεση μεταξύ του μικροελεγκτή κίνησης και του μικροελεγκτή ελέγχου των υπερήχων(εικόνα 3.34,3), όπου ο πρώτος είναι αποδέκτης διακοπών που έχουν προκληθεί από τον δεύτερο. Επίσης, υπάρχει σύνδεση του *ESP8266* σε αυτή την γραμμή μέσω της πλακέτας *Sparkfun Logic Level Converter Bi-Directional*, για τους λόγους που αναλυθήκαν προηγουμένως.

Στο σύστημα αισθητήρων υπερήχων, ο μικροελεγκτής ελέγχου των υπερήχων (εικόνα 3.34,3) λαμβάνει τις εντολές από το *ESP8266* μέσω του διαλύου *I2C*. Έπειτα, λαμβάνει μετρήσεις μέσω των ακροδεκτών που εντοπίζονται στην θέση 14 της εικόνας 3.34, όπου συνδέονται στην πλακέτα, από δεξιά προς τα αριστερά ο κάθε αισθητήρας υπερήχων (Forward,Down,Right,Left,Turret).Κατά την σύνδεση, πρώτα

Σχεδιασμός και υλοποίηση αυτόνομου συστήματος με μικρολεγκτές

συνδέεται ο ακροδέκτης Trigger και έπειτα ο ακροδέκτης Echo του κάθε αισθητήρα (Forward-Trigger, Forward-Echo, Down-Trigger, Down-Echo κλπ.). Όπως προαναφέρθηκε, πραγματοποιείται σύνδεση με τον μικροελεγκτή για τον έλεγχο των μοτέρ με στόχο την εκτέλεση διακοπής σε περίπτωση παραβίασης των αποστάσεων ασφαλείας.

Επιπρόσθετα, στην πλακέτα υπάρχουν θέσεις για μελλοντικές αναβαθμίσεις και επεκτάσεις. Συγκεκριμένα, στη θέση 15 υπάρχουν επιπλέον συνδέσεις για παροχή τάσης 5V, στη θέση 16 για παροχή GND και στη θέση 16 για σύνδεση επιταχυνσιόμετρου/γυροσκοπίου, τύπου GY-521. Ακολουθεί και το διάγραμμα συνδέσεων των κυκλωμάτων που παρουσιάζει τα παραπάνω που αναλυθήκαν.

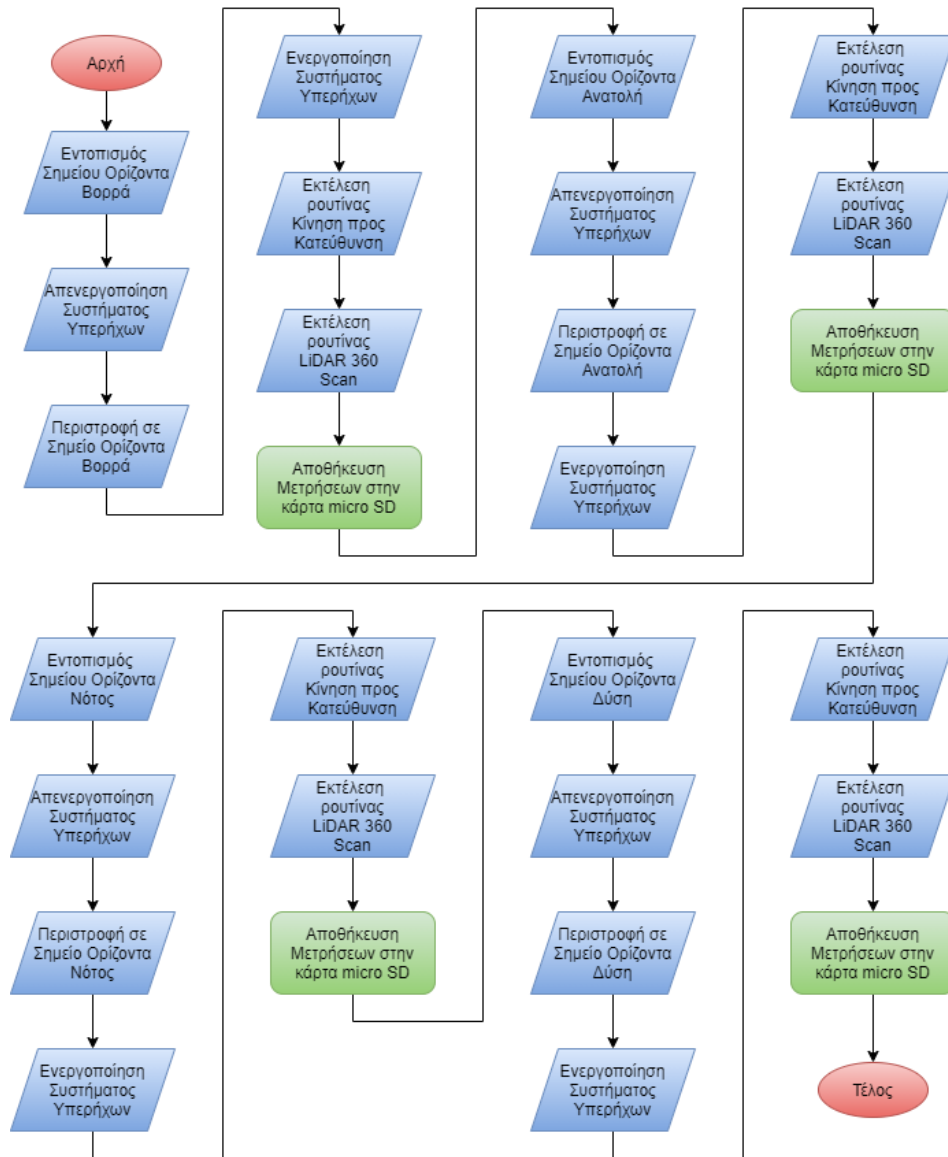


Εικόνα 3. 35: Διάγραμμα συνδέσεων κυκλώματος, πλακέτα πρώτης υλοποίησης.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως για τη δεύτερη υλοποίηση δεν έχει αναπτυχθεί κάποια πλακέτα. Αποτελεί μελλοντική επέκταση της διπλωματικής, πιθανώς με πλακέτα PCB έναντι διάτρητης.

3.2.7. Αλγόριθμος Συμπεριφοράς Ρομποτικού Συστήματος

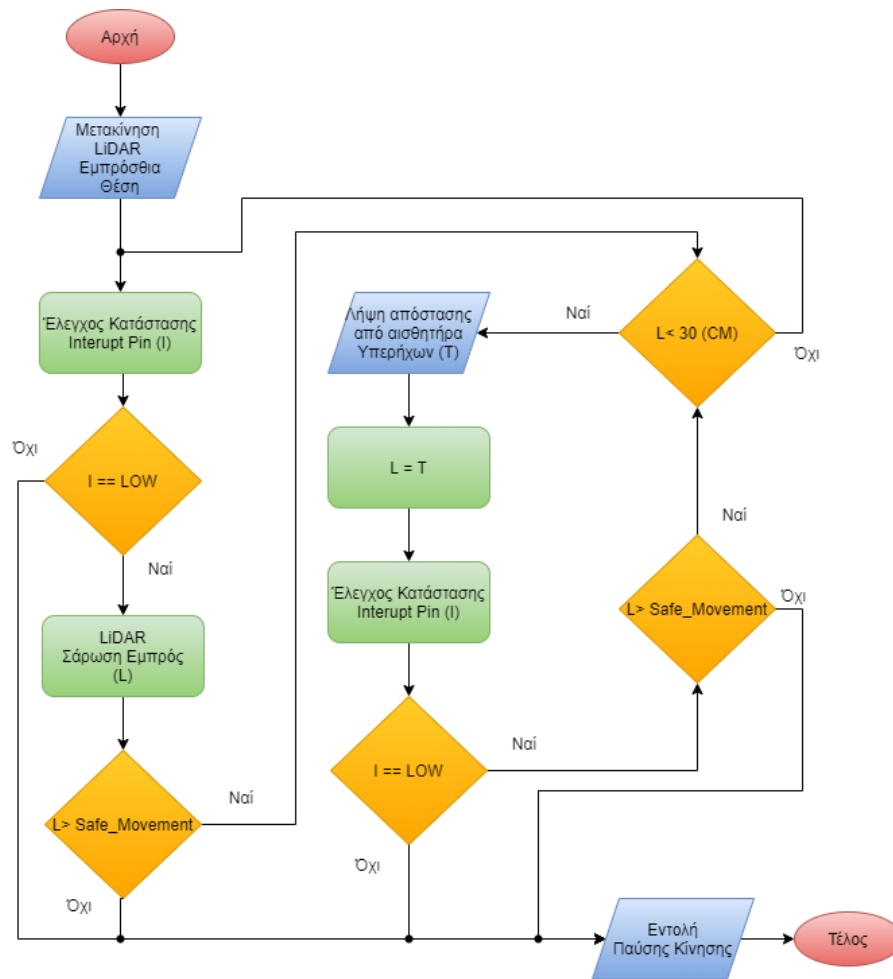
Ακολουθεί η διαγραμματική αναπαράσταση του αλγόριθμου συμπεριφοράς του ρομποτικού συστήματος. Αποτελεί αλγόριθμο **πλήρους αυτονομίας** καθώς για την ολοκλήρωση της συμπεριφοράς δεν υπάρχει η ανάγκη παρέμβασης του ανθρώπινου παράγοντα και ανήκει στην κατηγορία της **ευρετικής προσέγγισης** (ενότητα: 2.3 Αυτόνομη πλοήγηση). Ο λόγος επιλογής υλοποίησης *ευρετικής προσέγγισης*, έγινε με γνώμονα τις δυνατότητες επεξεργαστικής ισχύος του υλικού. Ιδανικός για την παρούσα εφαρμογή θα ήταν ένας μεικτός αλγόριθμος ευρετικής και βέλτιστης προσέγγισης.



Εικόνα 3. 36: Διάγραμμα αναπαράστασης συμπεριφοράς λειτουργίας κεντρικού μικροελεγκτή.

Ο αλγόριθμος αναζητά τα τέσσερα σημεία του οριζοντα και κινείται με βάση αυτά. Το πρώτο σημείο εντοπισμού είναι ο βορράς. Εφόσον εντοπιστεί ο βορράς, πραγματοποιείται αποστολή εντολών για την απενεργοποίηση των διακοπών από τους αισθητήρες υπερήχων στον μικροελεγκτή ελέγχου αυτών, όπως αναφέρεται στην ενότητα 3.2.3(Σύστημα Αισθητήρων). Η ενέργεια αυτή είναι απαραίτητη καθώς η οποιαδήποτε παρουσία της ρουτίνας διακοπών, δεν θα επιτρέψει στον μικροελεγκτή ελέγχου κίνησης να

πραγματοποιήσει οποιαδήποτε μελλοντική κίνηση. Έπειτα, δίνεται η εντολή κίνησης στον μικροελεγκτή κίνησης ώστε να πραγματοποιηθεί η επιτόπου περιστροφή του αμαξώματος ως προς την κατεύθυνση του σημείου ενδιαφέροντος του ορίζοντα. Κατά τη διάρκεια της κίνησης, ο μικροελεγκτής ελέγχου λαμβάνει μετρήσεις από την πυξίδα σύμφωνα με την διαδικασία της ενότητας 3.2.3(Σύστημα Αισθητήρων). Όταν η τιμή της πυξίδας βρεθεί μέσα στο εύρος ζώνης του σημείου ενδιαφέροντος του ορίζοντα, αποστέλλεται εντολή παύσης κίνησης στον μικροελεγκτή ελέγχου του συστήματος κίνησης. Στην συνέχεια δίνεται εντολή για ενεργοποίηση των διακοπών από το σύστημα ελέγχου υπερήχων. Έπειτα, εκτελείται η ρουτίνα κίνηση προς κατεύθυνση η οποία θα αναλυθεί μετέπειτα. Όταν πραγματοποιηθεί η ρουτίνα, θα εκτελεστεί η ενέργεια *LiDAR 360 Scan* όπου αναφορά της έχει γίνει στην ενότητα 3.2.3(Σύστημα Αισθητήρων). Και πραγματοποιείται αποθήκευση των μετρήσεων στην κάρτα *microSD*. Τα προαναφερθέντα συμβαίνουν αντίστοιχα και για τα υπόλοιπα σημεία του ορίζοντα. Αφού έχουν ληφθεί οι μετρήσεις και για τα τέσσερα σημεία του ορίζοντα, αποθηκεύοντας κατάλληλα τα δεδομένα κάθε φορά, τερματίζει η εκτέλεση του αλγορίθμου.



Εικόνα 3. 37: Διάγραμμα αναπαράστασης λειτουργίας «Ρουτίνα κίνηση προς Κατεύθυνση».

Η λειτουργία ρουτίνα κίνηση προς κατεύθυνση δημιουργήθηκε με σκοπό να διασφαλίσει την ασφαλή κίνηση του ρομποτικού συστήματος ως προς την επιθυμητή τοποθεσία. Στην αρχή τοποθετεί τον αισθητήρα LiDAR στην εμπρός/θέση του αμαξώματος (90° μοίρες σύμφωνα με το σύστημα διεύθυνσης του ρομπότ). Έπειτα πραγματοποιείται έλεγχος για αίτηση διακοπών, ώστε να διαπιστωθεί αν είναι ασφαλή η κίνηση που σκοπεύει να πραγματοποιήσει το ρομπότ. Σε περίπτωση που υπάρχει αίτημα

διακοπής εκτελείται εντολή παύσης κίνησης και τερματίζεται η ρουτίνα. Αντίθετα, εφόσον δεν υπάρχει, πραγματοποιείται μέτρηση της απόστασης με τον αισθητήρα LiDAR. Έπειτα ελέγχεται αν η τιμή μέτρησης δεν παραβιάζει την μικρότερη απόσταση ασφαλείας κίνησης που έχει οριστεί εξ' αρχής. Η παραβίαση αυτής οδηγεί σε παύση κίνησης και τερματισμό της ρουτίνας. Εφόσον δεν υπάρχει παραβίαση της απόστασης, πραγματοποιείται σύγκριση της τιμής του αισθητήρα LiDAR με μία ελάχιστη απόσταση που έχει δοθεί από το σύστημα, στην συγκεκριμένη περίπτωση τα 30 cm, ώστε να μεταβούν οι μετρήσεις εμπρόσθιας απόστασης από τη χρήση του αισθητήρα LiDAR, σε χρήση του αισθητήρα υπερήχων που βρίσκεται στον βραχίονα. Η ενέργεια αυτή είναι αναγκαία, καθώς σε μικρές αποστάσεις ο αισθητήρας υπερήχων έχει μικρότερο σφάλμα από το LiDAR, γεγονός που τον καθιστά καταλληλότερο για την μέτρηση της εμπρόσθιας απόστασης. Έπειτα συνεχίζει με τον ίδιο τρόπο η εκτέλεση της ρουτίνας με βάση τις μετρήσεις του αισθητήρα υπερήχων, έως ότου παραβιαστεί η συνθήκη ρουτίνας διακοπών ή η μικρότερη δοθείσα ασφαλής απόσταση. Όταν συμβεί μια εκ των δύο παραβιάσεων τότε δίνεται εντολή παύσης στο σύστημα κίνησης και τερματίζει η ρουτίνα.

Η αποθήκευση των απαραίτητων δεδομένων για τη δημιουργία του χάρτη από υπολογιστικό σύστημα γίνεται στην κάρτα *microSD* με την χρήση αρχείων τύπου **CSV** (**C**omma **S**eparated **V**alues). Οι μεταβλητές χωρίζονται μεταξύ τους με την χρήση της άνω τελείας «;» (semicolon), παρ' όλη την ονομασία της μορφής του αρχείου. Ο λόγος είναι ότι με αυτήν την μορφή δεν υπάρχει πρόβλημα με την αναζήτηση τιμών που περιέχουν δεκαδικά ψηφία. Το ρομποτικό σύστημα έχει την δυνατότητα αποθήκευσης πολλαπλών αρχείων *csv* καθώς κατά τη δημιουργία τους, παρέχει έναν αύξοντα αριθμό στην ονομασία του. Το αρχείο αποτελείται από τέσσερις γραμμές μια για κάθε σημείο ενδιαφέροντος του ορίζοντα. Το πρώτο στοιχείο κάθε γραμμής είναι η κατεύθυνση με βάση το σημείο ορίζοντα. Το δεύτερο στοιχείο σηματοδοτεί την απόσταση από την προηγούμενη μέτρηση. Στην πρώτη μέτρηση η απόσταση είναι 0 καθώς δεν έχει πραγματοποιηθεί κίνηση με βάση άλλο σημείο του ορίζοντα. Έπειτα ακολουθούν 360 μετρήσεις απόστασης του αισθητήρα LiDAR από το σημείο εκείνο που σηματοδοτούν μια πλήρης περιστροφή. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται παράδειγμα δομής ενός αρχείου *csv* από τις μετρήσεις του ρομποτικού συστήματος.

Πίνακας 5: Δομή αρχείου αποθήκευσης μετρήσεων στην κάρτα *microSD*.

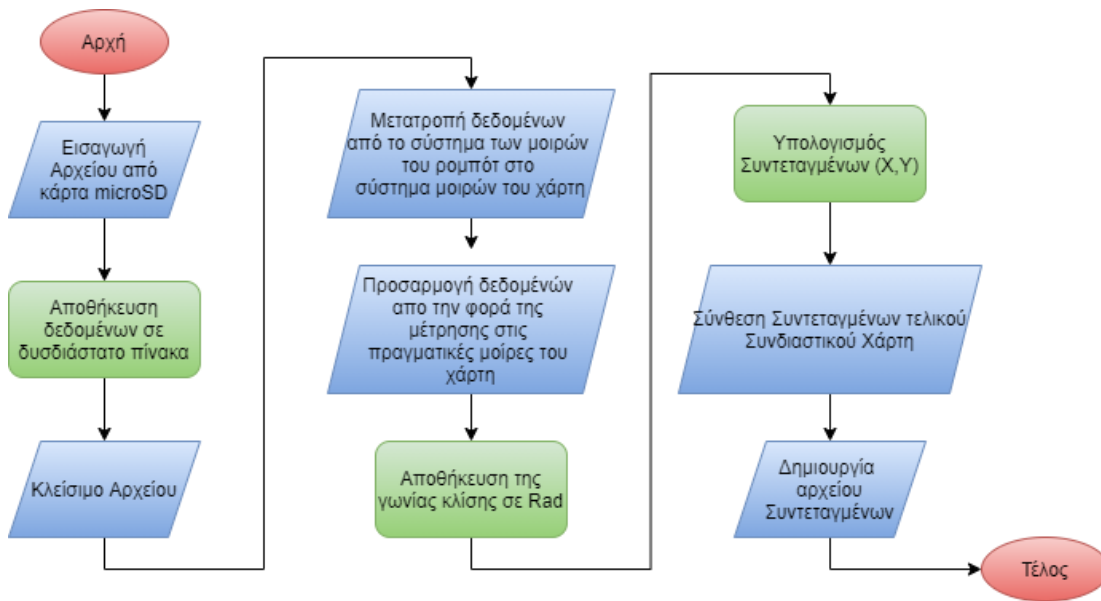
Κατεύθυνση	Απόσταση Προηγούμενης Θέσης	Μετρήσεις (0 -> 359)
N	0	54;47;68...55;140
E	100	44;37;98...55;167
S	70	32;97;240...67;432
W	100	127;111;168...104;42

3.2.8. Επεξεργασία δεδομένων από υπολογιστή

Για την κατασκευή της δυσδιάστατης απεικόνισης του χώρου από το αρχείο *csv*, που περιέχει τα δεδομένα που έχει αποθηκεύσει το ρομπότ, είναι αναγκαία η περαιτέρω επεξεργασία του από ένα υπολογιστικό σύστημα. Αρχικά, είναι απαραίτητη η μετατροπή των δεδομένων σε σημεία καρτεσιανών συντεταγμένων για την αναπαράστασή τους. Για την επεξεργασία αυτή, αναπτύχθηκε το πρόγραμμα **Map Converter**, το οποίο παρατίθεται στα αρχεία της παρούσας διπλωματικής. Το πρόγραμμα αναπτύχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού **C** και λαμβάνει ως είσοδο το αρχείο *csv* του ρομπότ, επεξεργάζεται κατάλληλα τις μετρήσεις αποστάσεων και κινήσεων του ρομπότ και στο τέλος παράγει ένα αρχείο *csv*, με την ονομασία **Coordinates.csv**, που περιέχει τις καρτεσιανές συντεταγμένες των εμποδίων εντός του χώρου. Τέλος, το αρχείο των συντεταγμένων εισάγεται ως είσοδος σε ένα εκ των προγραμμάτων εκτύπωσης, που υλοποιήθηκαν με την χρήση της γλώσσας **python**. Για την εκτέλεση των αρχείων της γλώσσας *python*, είναι αναγκαία η ύπαρξη περιβάλλοντος ανάπτυξης *python* εντός του

υπολογιστικού συστήματος. Για την παρούσα διπλωματική, χρησιμοποιήθηκε το **PyCharm** της *JetBrains* [49], καθώς η έκδοση της κοινότητας (community edition) αποτελεί ελεύθερη πλατφόρμα ανάπτυξης. Λόγω της απλότητας των προγραμμάτων εκτύπωσης που υλοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής, δε πραγματοποιείται περεταίρω εξήγηση της λειτουργίας τους.

Στην εικόνα που ακολουθεί, απεικονίζεται το διάγραμμα λειτουργίας του προγράμματος **Map Converter**. Αρχικά, το πρόγραμμα λαμβάνει ως είσοδο το αρχείο συντεταγμένων που δημιουργήθηκε από το ρομπότ. Για την εισαγωγή του αρχείου, είναι απαραίτητο το *csv* αρχείο και το *MapConverter.exe* να βρίσκονται εντός του ίδιου καταλόγου. Επιπλέον, ο χρήστης θα πρέπει να εισάγει χειροκίνητα το όνομα του αρχείου, μαζί με την κατάληξη *.csv* στο αναδυόμενο παράθυρο τερματικού. Μετά από την εισαγωγή, το πρόγραμμα πραγματοποιεί κατάλληλα την αποθήκευση των δεδομένων. Αποθηκεύει σε έναν μονοδιάστατο πίνακα τις αποστάσεις που έχουν παρθεί σε κάθε μέτρηση και σε έναν δισδιάστατο πίνακα τις εκάστοτε μετρήσεις για κάθε θέση. Δεν κρίθηκε αναγκαία η αποθήκευση της εκάστοτε θέσης, καθώς η σειρά κίνησης σε κάθε σημείο του ορίζοντα είναι προκαθορισμένη (Βορράς, Ανατολή, Νότος και Δύση). Έπειτα, το πρόγραμμα μετατρέπει κατάλληλα τα δεδομένων από το σύστημα μοιρών του ρομπότ, στο σύστημα του χάρτη και έπειτα τα προσαρμόζει από την φορά της μέτρησης στις πραγματικές μοίρες του χάρτη. Και οι δύο προαναφερθείσες διαδικασίες είναι εξαιρετικά σημαντικές και θα πραγματοποιηθεί περαιτέρω ανάλυση με διαγράμματα στην συνέχεια.



Εικόνα 3. 38: Αρχή λειτουργίας προγράμματος μετατροπής σε αρχείο συντεταγμένων.

Με την ολοκλήρωση των παραπάνω διαδικασιών, πραγματοποιείται η μετατροπή της εκάστοτε κλίσης που υπάρχει ανά μέτρηση από μοίρες σε ακτίνια. Για την μετατροπή, έγινε χρήση του τριγωνομετρικού τύπου που ακολουθεί:

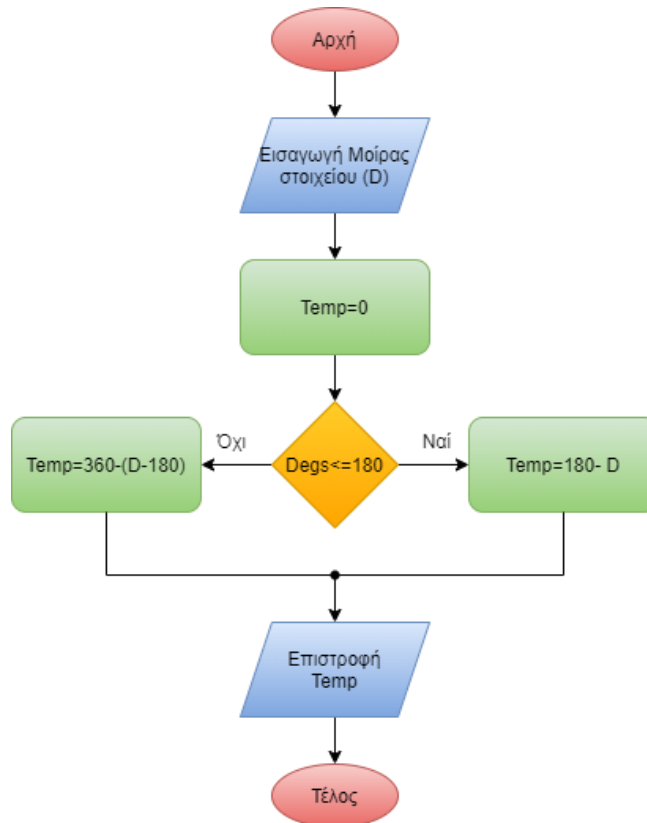
$$Rad = degs \frac{\pi}{180} \quad (3.3)$$

Όπου **Rad** είναι τα ακτίνια, **degs** οι μοίρες και $\pi = 3.14$. Έπειτα, με παρόμοιο τρόπο και με την χρήση των ακόλουθων δύο τριγωνομετρικών εξισώσεων, πραγματοποιείται ο υπολογισμός των καρτεσιανών συντεταγμένων.

$$X = D \cos(r) \quad (3.4)$$

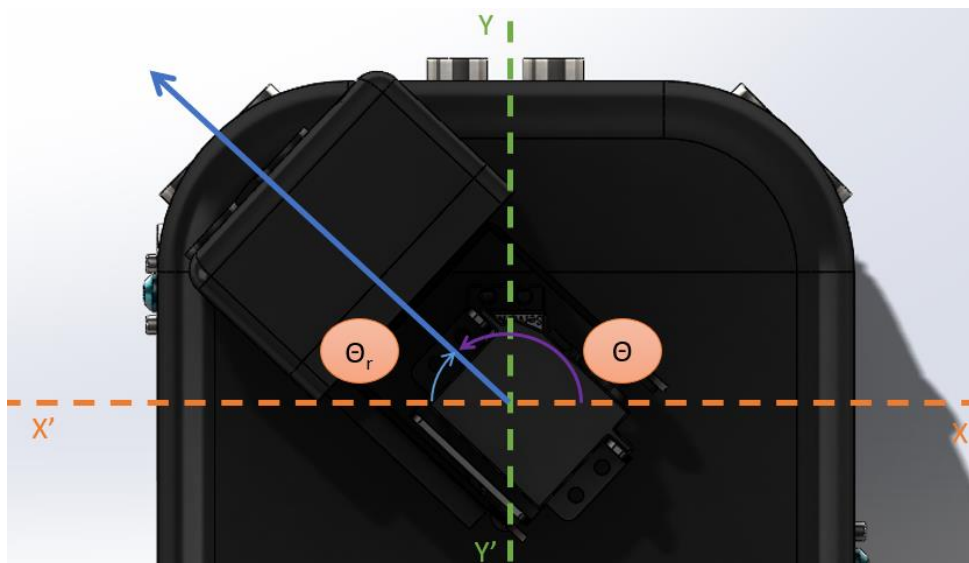
$$Y = D \sin(r) \quad (3.5)$$

Όπου X, Y οι εκάστοτε συντεταγμένες, D η απόσταση κάθε μέτρησης και r τα εκάστοτε ακτίνια. Έπειτα, εκτελείται η διαδικασία σύνθεσης τους τελικού χάρτη, η οποία αναλύεται εκτενώς με διάγραμμα στην συνέχεια. Τέλος, οι συντεταγμένες που δημιουργήθηκαν από τις προαναφερθείσες ενέργειες, αποθηκεύονται στο αρχείο *Coordinates.csv*, που δημιουργείται από το πρόγραμμα, ώστε να γίνει είσοδος στα προγράμματα αναπαράστασης του χάρτη. Οι συντεταγμένες του αρχείου είναι παρατεταμένες κάθετα, όπου το πρώτο δεδομένο αναπαριστά την τεταμένη του άξονα x , ενώ το δεύτερο τη τεταμένη του άξονα Y . Τα δεδομένα χωρίζονται με την χρήση του χαρακτήρα της άνω τελείας «;».



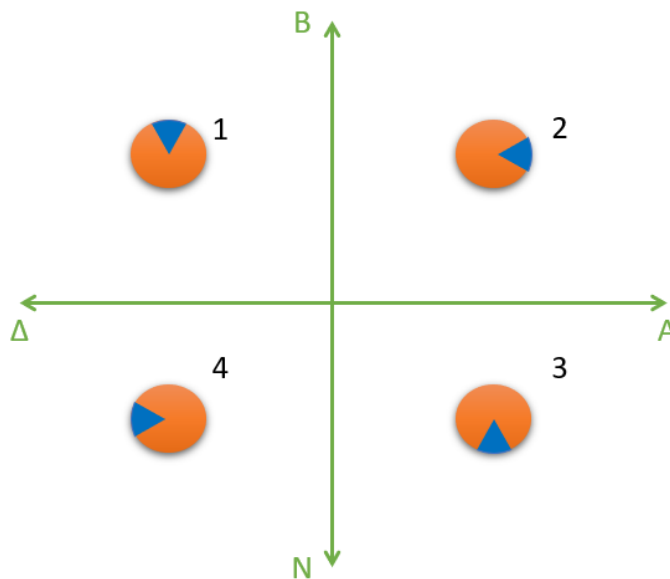
Εικόνα 3. 39: Διαδικασία «Μετατροπή Δεδομένων από το σύστημα μοιρών του ρομπότ στο σύστημα του χάρτη».

Η διαδικασία **μετατροπής δεδομένων από το σύστημα μοιρών του ρομπότ στο σύστημα του χάρτη** αποτελεί την πρώτη επεξεργασία των δεδομένων που υφίσταται. Αυτό συμβαίνει διότι το ρομπότ, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.2.3, για τον υπολογισμό των μοιρών ξεκινάει από την αριστερή μεριά του σασί, όπου βρίσκονται οι 0° μοίρες του κάθετου άξονα κίνησης, οι οποίες αυξάνονται κατά την δεξιόστροφη περιστροφή (άξονας x' , περιστροφή του ρολογιού). Στο καρτεσιανό σύστημα συμβαίνει το αντίθετο, η μέτρηση των μοιρών ξεκινάει από τον δεξιό οριζόντιο άξονα και οι μοίρες προσαυξάνονται σύμφωνα με αριστερόστροφη περιστροφή (άξονας x , αντίθετη περιστροφή από του ρολογιού). Άρα, προκύπτει πως οι πραγματικές μοίρες του ρομπότ με τις πραγματικές είναι παραπληρωματικές γωνίες (έχουν άθροισμα 180° , εικόνα 3.40). Με βάση τα προαναφερθέντα, η παρούσα διαδικασία εκτελεί την μετατροπή, λαμβάνοντας υπόψη αν η γωνία έχει περάσει τις 180° , καθώς σε αυτήν την περίπτωση απαιτείται μια μικρή αλλαγή στη σειρά των πράξεων, καθώς οι μοίρες βρίσκονται στο 3° και 4° τεταρτημόριο, όπως εικονίζεται και στο διάγραμμα της εικόνας 3.39.



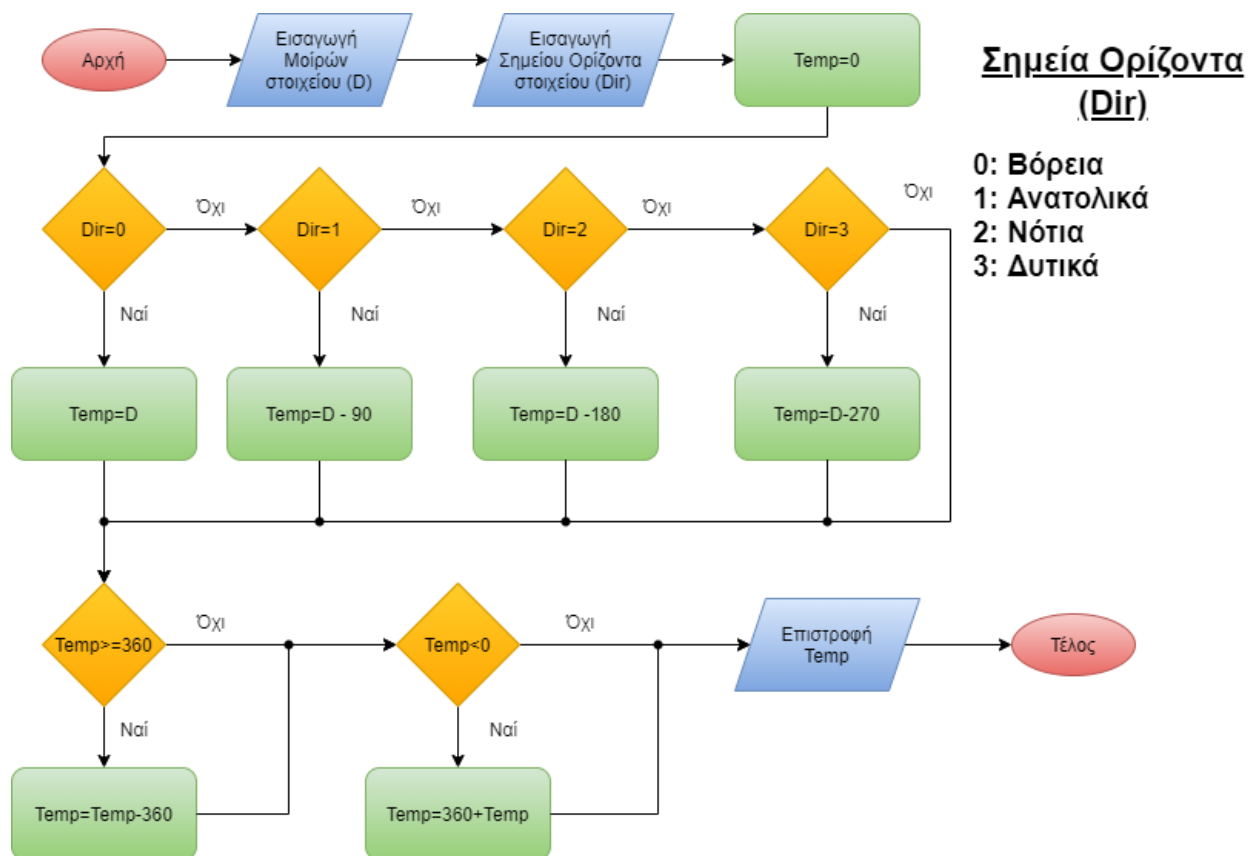
Εικόνα 3. 40: Αντιστοιχία μοιρών ρομπότ (Θ_r) με μοίρες καρτεσιανού συστήματος (Θ).

Η διαδικασία **προσαρμογής των δεδομένων από την φορά της μέτρησης στις πραγματικές μοίρες του χάρτη** αποτελεί την δεύτερη κατά σειρά επεξεργασία των δεδομένων του ρομπότ. Σε κάθε μέτρηση, το ρομπότ πέρα από διαφορετική θέση έχει και διαφορετική διεύθυνση, όπως εικονίζεται παρακάτω.



Εικόνα 3. 41: Θεωρητικές θέσεις του ρομπότ κατά την διαδικασία μετρήσεων. Με μπλε συμβολίζεται η διεύθυνση της μπροστινής όψης του σασί.

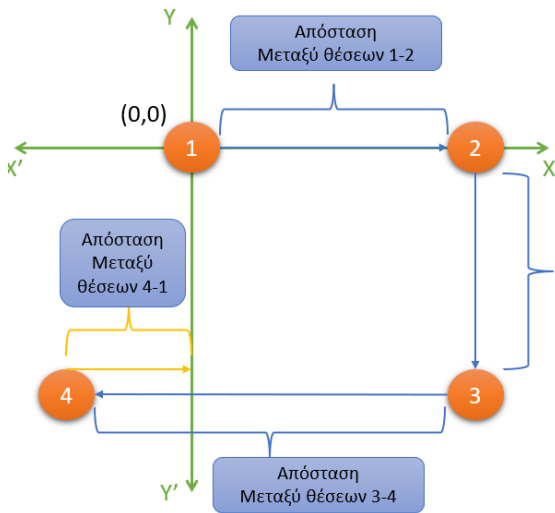
Η παρούσα διαδικασία δημιουργήθηκε για να αντιμετωπίσει αυτήν τη δυσκολία, μετατρέποντας τις μοίρες τις κάθε μέτρησης σε ένα κοινό σύστημα συντεταγμένων. Στο διάγραμμα που ακολουθεί αναλύεται η διαδικασία. Ως είσοδο στην διαδικασία είναι τα δεδομένα των μοιρών που έχουν παραχθεί και η εκάστοτε φορά που έχει λάβει τις μετρήσεις το ρομπότ. Η φορά των μετρήσεων είναι γνωστή, καθώς ακολουθεί την συμπεριφορά κίνησης που έχει αναλυθεί, σύμφωνα με τα σημεία ενδιαφέροντος του μαγνητικού ορίζοντα.



Εικόνα 3. 42: Διαδικασία «Προσαρμογή δεδομένων από τη φορά της μέτρησης στις πραγματικές μοίρες του χάρτη».

Έπειτα, πραγματοποιείται κατάλληλα η αφαίρεση των εκάστοτε αναγκαίων μοιρών, ανάλογα με την φορά του ρομπότ, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 3.41. Όταν το ρομπότ βρίσκεται στην *βόρεια* θέση, δε χρειάζεται να πραγματοποιηθεί κάποια μετατροπή, καθώς αυτή είναι η φορά που έχει οριστεί ως κοινή (εικόνα 3.41, θέση 1). Όταν το ρομπότ κοιτάει *ανατολικά* (εικόνα 3.41, θέση 2), αφαιρούνται 90° από κάθε κλίση, ώστε να ταυτιστούν οι μετρήσεις με το σύστημα διευθύνσεων της πρώτης θέσης. Παρόμοια, στη *νότια* θέση (εικόνα 3.41, θέση 3), απαιτείται αφαίρεση 180° και στη *δυτική* (εικόνα 3.41, θέση 4) αφαίρεση 270°. Τέλος, πραγματοποιείται έλεγχος αν οι παραπάνω μετατροπές έχουν υπερβεί τα όρια μίας περιστροφής (0° – 360°) και πραγματοποιείται η κατάλληλη μετατροπή για κάθε περίπτωση ώστε να βρίσκονται τα αποτελέσματα εντός ορίων.

Ακολουθεί η περιγραφή της διαδικασίας **σύνθεσης συντεταγμένων τελικού συνδυαστικού χάρτη**, που αποτελεί την τελευταία μορφή επεξεργασίας που πραγματοποιείται από το πρόγραμμα. Στόχος είναι η σύνθεση των επιμέρους συντεταγμένων κάθε μέτρησης σε ένα τελικό σύστημα συντεταγμένων. Ως δεδομένα λαμβάνονται η απόσταση της θέσης του ρομπότ και οι συντεταγμένες που δημιουργήθηκαν από τις μετρήσεις, μέσω των ενεργειών που περιγράφηκαν προηγουμένως. Οι συντεταγμένες αυτές, έχουν ως αρχή (σημείο 0,0) την εκάστοτε θέση του ρομπότ, γεγονός που δεν εξυπηρετεί για την τελική σύνθεση της απεικόνισης του χώρου. Στην εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 3.43), περιγράφεται σύντομα η διαδικασία μετατροπής των θέσεων σε ένα ενιαίο σύστημα.



Υπολογισμοί Αποστάσεων ανά Θέση

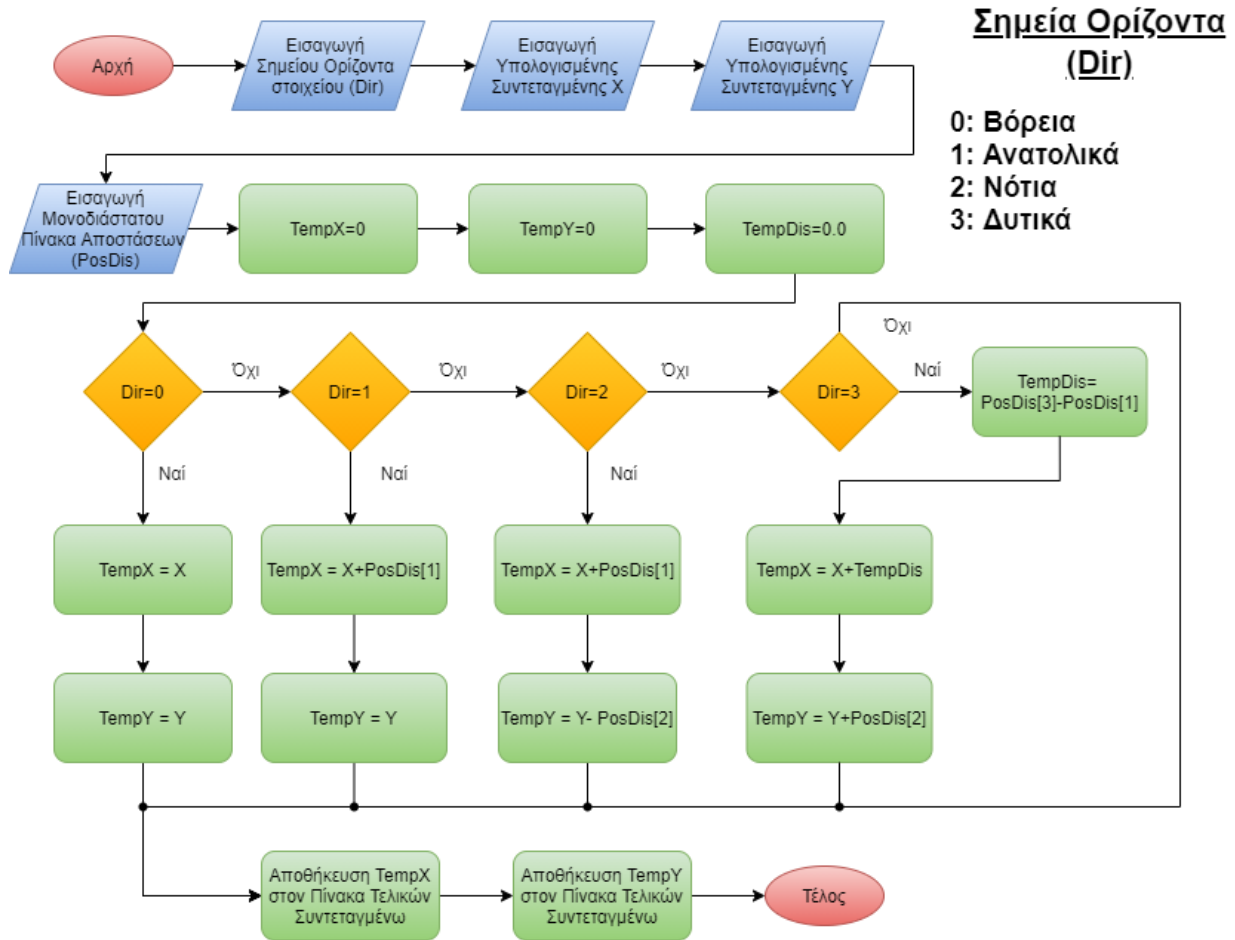
- Περιγράφονται οι πράξεις που εκτελούνται ανά συντεταγμένη:
1. Δεν απαιτείται υπολογισμός -Αρχική Θέση (0,0)
 2. $X = X + |Απόσταση_{1-2}|$
Y παραμένει ως έχει.
 3. $X = X + |Απόσταση_{1-2}|$
 $Y = Y - |Απόσταση_{2-3}|$
 4. $X = X + (Απόσταση_{1-2} - Απόσταση_{3-4})$
 $Y = Y - |Απόσταση_{2-3}|$

Εικόνα 3. 43: Οπτική απεικόνιση της διαδικασίας σύνθεσης συντεταγμένων.

Η πρώτη θέση (Θέση 1, κατεύθυνση βόρεια) δεν απαιτεί κάποια επεξεργασία, διότι αποτελεί το σύστημα συντεταγμένων πάνω στο οποίο θα δημιουργηθεί ο τελικός χάρτης. Στη δεύτερη θέση (θέση 2, κατεύθυνση ανατολικά) είναι απαραίτητη η πρόσθεση της απόλυτης τιμής της απόστασης μεταξύ της πρώτης και της δεύτερης θέσης στη συντεταγμένη X, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.43. Δεν απαιτείται κάποια μεταβολή στη συντεταγμένη Y. Στη τρίτη θέση (Θέση 3, κατεύθυνση νότια) έχει πραγματοποιηθεί κίνηση στον άξονα y σε σχέση με την προηγούμενη θέση. Για αυτόν το λόγο απαιτείται η αφαίρεση της απόλυτης τιμής της απόστασης μεταξύ της δεύτερης και της τρίτης θέσης. Επιπλέον, λόγω της προηγούμενης κίνησης (θέση 1 σε θέση 2), απαιτείται ξανά η πρόσθεση της απόλυτης τιμής της μεταβολής τους στη συντεταγμένη X. Στην τέταρτη και τελευταία κίνηση (Θέση 4, κατεύθυνση δυτικά), απαιτείται χρήση των προηγούμενων μεταβολών και στους δύο άξονες. Στη συντεταγμένη X απαιτείται η πρόσθεση της διαφοράς των αποστάσεων μεταξύ των θέσεων 1-2 και 3-4 αντίστοιχα, ώστε να προκύψει η απόσταση των θέσεων 4-1. Το πρόσημο της διαφοράς μεταξύ των θέσεων 1-2 και 3-4, είναι αναγκαίο ώστε να προκύψει σωστά η συντεταγμένη X, οπότε και δεν απαλείφεται με την χρήση απόλυτης τιμής. Στη συντεταγμένη Y, η μόνη κίνηση που έχει πραγματοποιηθεί είναι μεταξύ των θέσεων 2-3, για αυτό και αφαιρείται η απόλυτη τιμή της από αυτές.

Στο διάγραμμα της εικόνας που ακολουθεί (εικόνα 3.44), αναπαρίσταται η αλγοριθμική υλοποίηση της προαναφερθείσας διαδικασίας. Ως εισόδους δέχεται την εισαγωγή της διεύθυνσης κίνησης καθώς και οι υπολογισμένες συντεταγμένες X,Y κάθε σημείου. Επιπλέον, γίνεται εισαγωγή του πίνακα των αποστάσεων μεταξύ των κινήσεων που πραγματοποίησε το ρομπότ (βόρεια, δυτικά, νότια και ανατολικά). Αντίστοιχα, σε κάθε διεύθυνση δίνεται ένας αριθμός, από το 0 έως το 3, όπως φαίνεται στην εικόνα. Έπειτα, πραγματοποιείται η προαναφερθείσα διαδικασία επεξεργασίας ώστε να προκύψουν οι τελικές συντεταγμένες. Χρήση της απόλυτης τιμής γίνεται μόνο στην περίπτωση κίνησης προς τα δυτικά, καθώς οι προηγούμενες αποστάσεις είναι πάντα θετικοί αριθμοί. Τέλος, οι νέες συντεταγμένες αποθηκεύονται σε ένα δυδιάστατο πίνακα ώστε να γίνει η εξαγωγή τους στο αρχείο εξόδου *Coordinates.csv*.

Σχεδιασμός και υλοποίηση αυτόνομου συστήματος με μικρολεγκτές



Εικόνα 3. 44: Διαδικασία «Σύνθεση συντεταγμένων τελικού συνδυαστικού χάρτη».

Τα αποτελέσματα των προγραμμάτων εκτύπωσης από την εισαγωγή των αρχείων *Coordinates.csv*, παρατίθενται στην ενότητα που ακολουθεί, όπου και γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων τους.

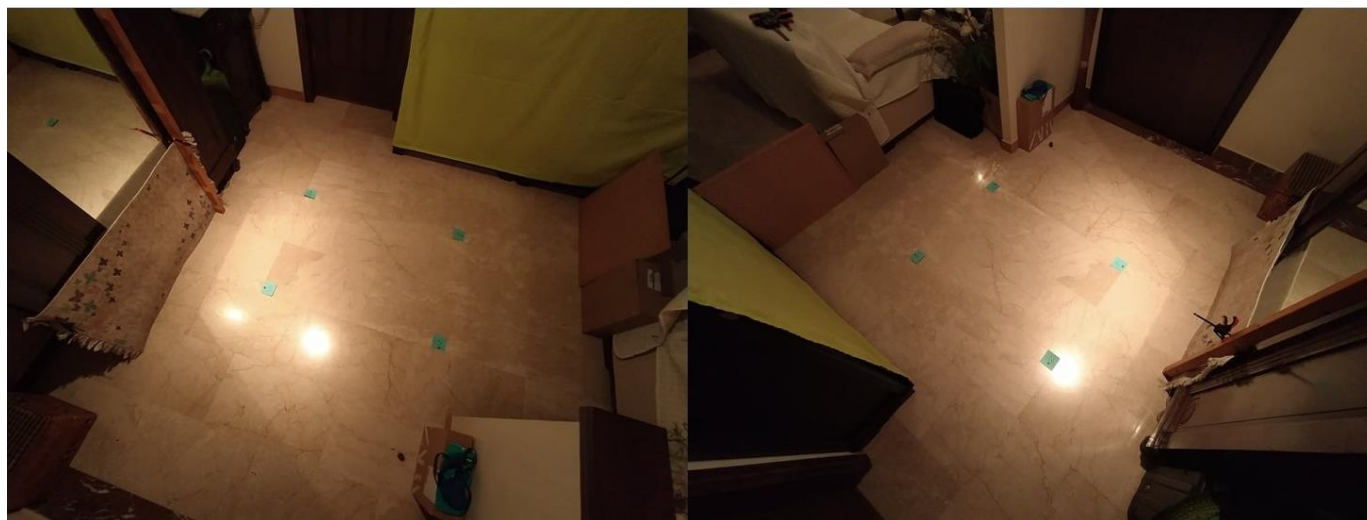
4. Κεφάλαιο: Πειραματική Μελέτη

4.1. Εισαγωγή

Ακολουθεί η πειραματική μελέτη που διεξάχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αρχικά, θα πραγματοποιηθεί μια σύντομη παρουσίαση του πειραματικού χώρου και των συνθηκών του κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Έπειτα, αναφέρονται οι θέσεις του ρομποτικού συστήματος που πάρθηκαν εντός του χώρου, καθώς και οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε αυτές. Τέλος, παρατίθενται τα αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν και συγκρίνονται με τον πραγματικό πειραματικό χώρο.

4.2. Πειραματικός Χώρος

Ως πειραματικός χώρος επιλέχθηκε ένας μικρός χώρος ενός δωματίου, αποκομμένος από το υπόλοιπο με την χρήση εμποδίων. Η επιλογή αυτή έγινε με στόχο τον έλεγχο της σωστής λειτουργίας των συμπεριφορών που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, σε ένα χώρο με ελαφρώς σύνθετη γεωμετρία ώστε να ελεγχθεί η ποιότητα του συνολικού αποτελέσματος της κατασκευής, σε όσο το δυνατόν ρεαλιστικές συνθήκες χρήσης της πλατφόρμας. Επιπλέον, παράγοντες επιλογής του χώρου ήταν ο έλεγχος των μετρήσεων του αισθητήρα LiDAR σε πληθώρα επιφανειών, όπως και της αποτελεσματικότητας της οδομετρίας. Στην ακόλουθη εικόνα παρατίθενται η φωτογραφική απεικόνιση του χώρου.

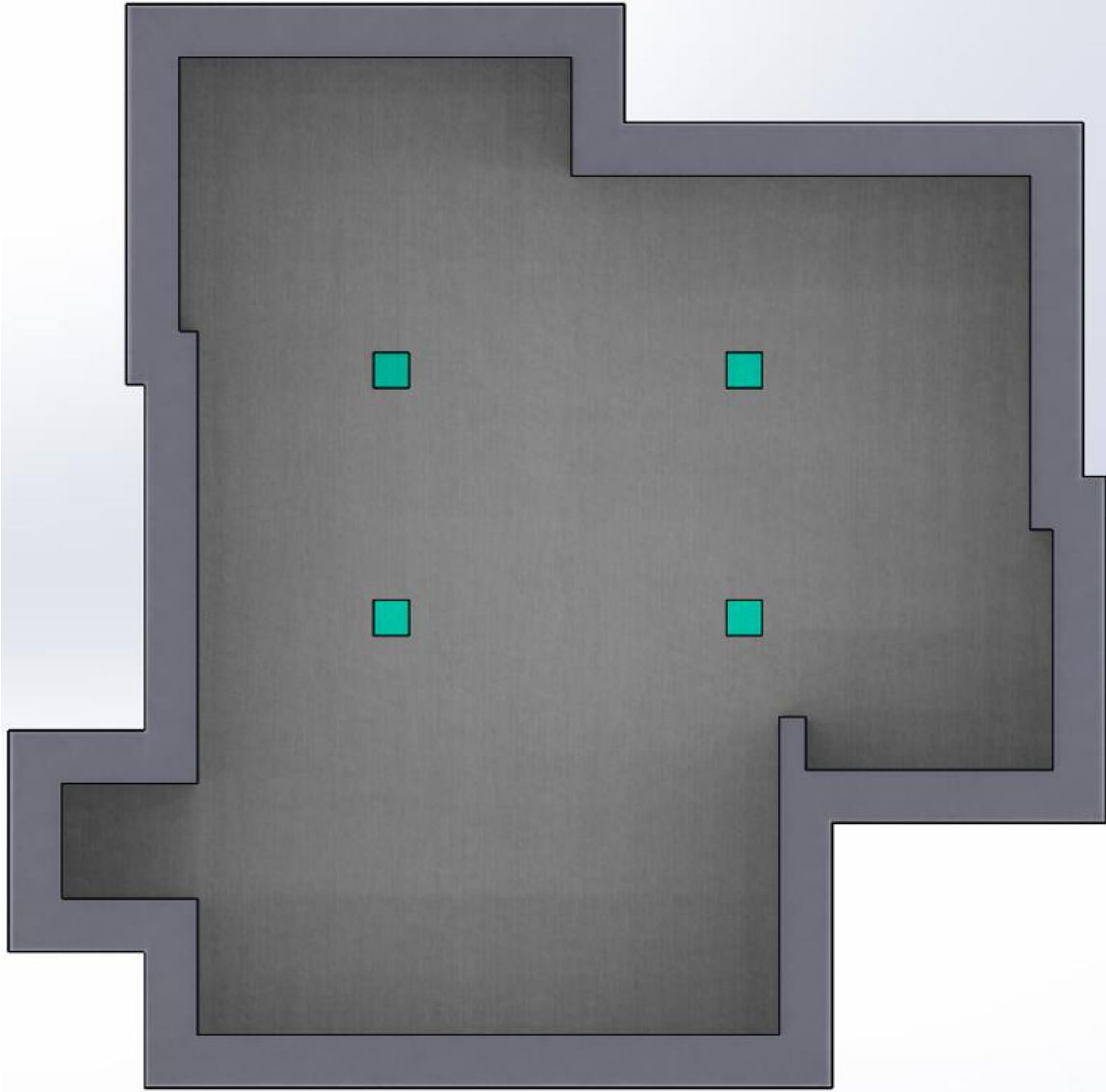


Εικόνα 4. 1: Πειραματικός χώρος με καλυμμένες τις ανακλαστικές επιφάνειες.

Για τον έλεγχο των μετρήσεων του αισθητήρα LiDAR, ο χώρος διαμορφώθηκε κατάλληλα ανά πείραμα, με την κάλυψη ή μη των ανακλαστικών του επιφανειών (όπως βερνικωμένο ξύλο, πλαστικοποιημένα βιβλία στην βιβλιοθήκη κλπ.). Οι μετρήσεις της εκάστοτε περίπτωσης απεικονίζονται και αναλύονται σε επόμενη ενότητα.

Το σύστημα οδομετρίας του ρομπότ κλήθηκε να λειτουργήσει στο πάτωμα του περιφραγμένου χώρου. Η επιφάνεια του χώρου αποτελείται από μάρμαρο, γεγονός που το καθιστά ελαφρώς ολισθηρό, ιδιαίτερα για ερπυστριόφρα οχήματα όπως αυτό της διπλωματικής. Η αποτελεσματικότητα της οδομετρίας αναλύεται σε επόμενη ενότητα.

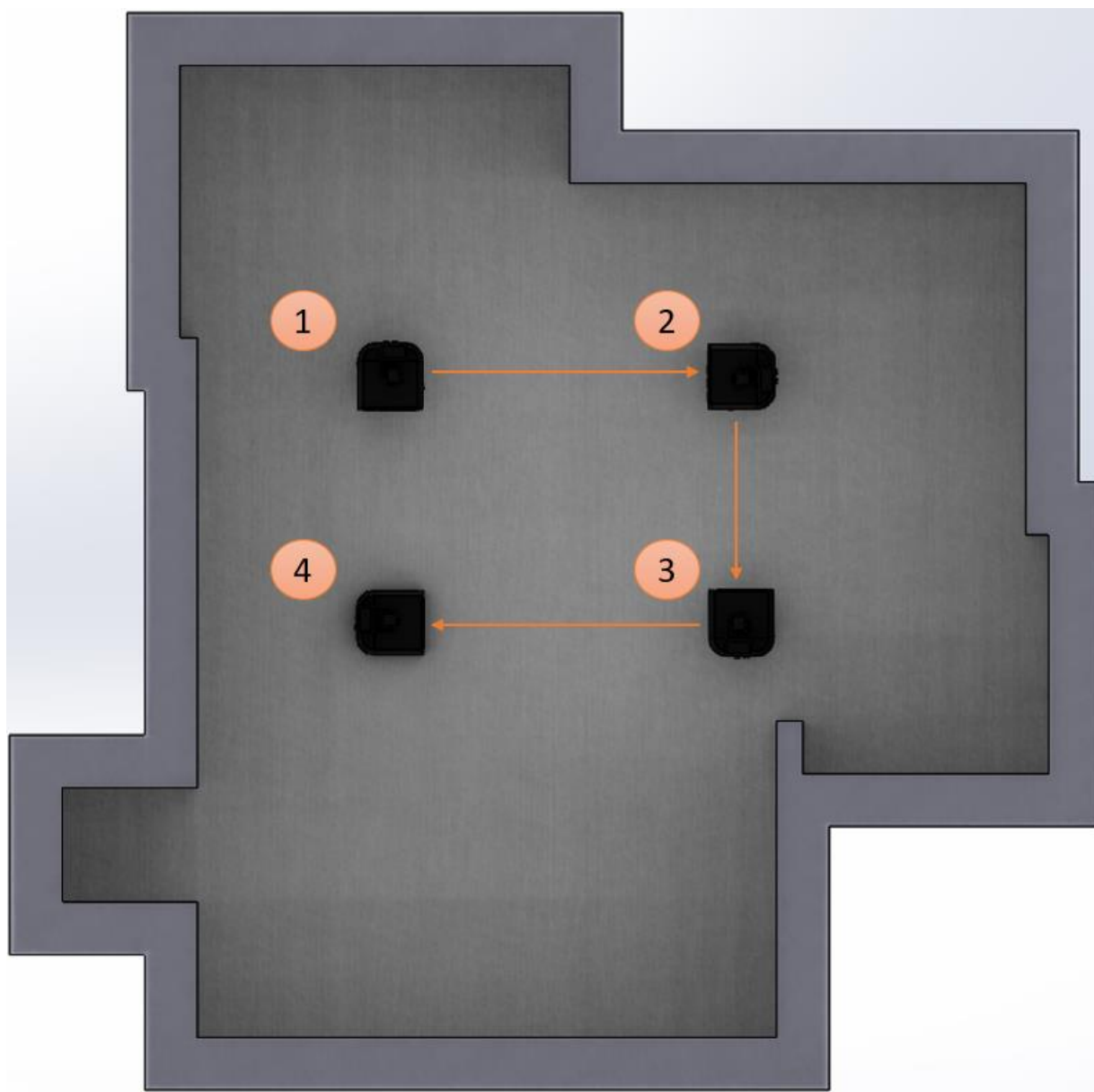
Στην εικόνα που ακολουθεί, αναπαρίσταται η απεικόνιση της κάτοψης του πειραματικού χώρου, που προέκυψε από χειροκίνητες μετρήσεις του χώρου. Τα πράσινα τετραγωνάκια αναπαριστούν τις θέσεις μετρήσεων που έλαβε το ρομπότ κατά την κίνησή του εντός του χώρου.



Εικόνα 4. 2: Απεικόνιση κάτοψης πειραματικού χώρου.

4.3. Θέσεις και κίνηση

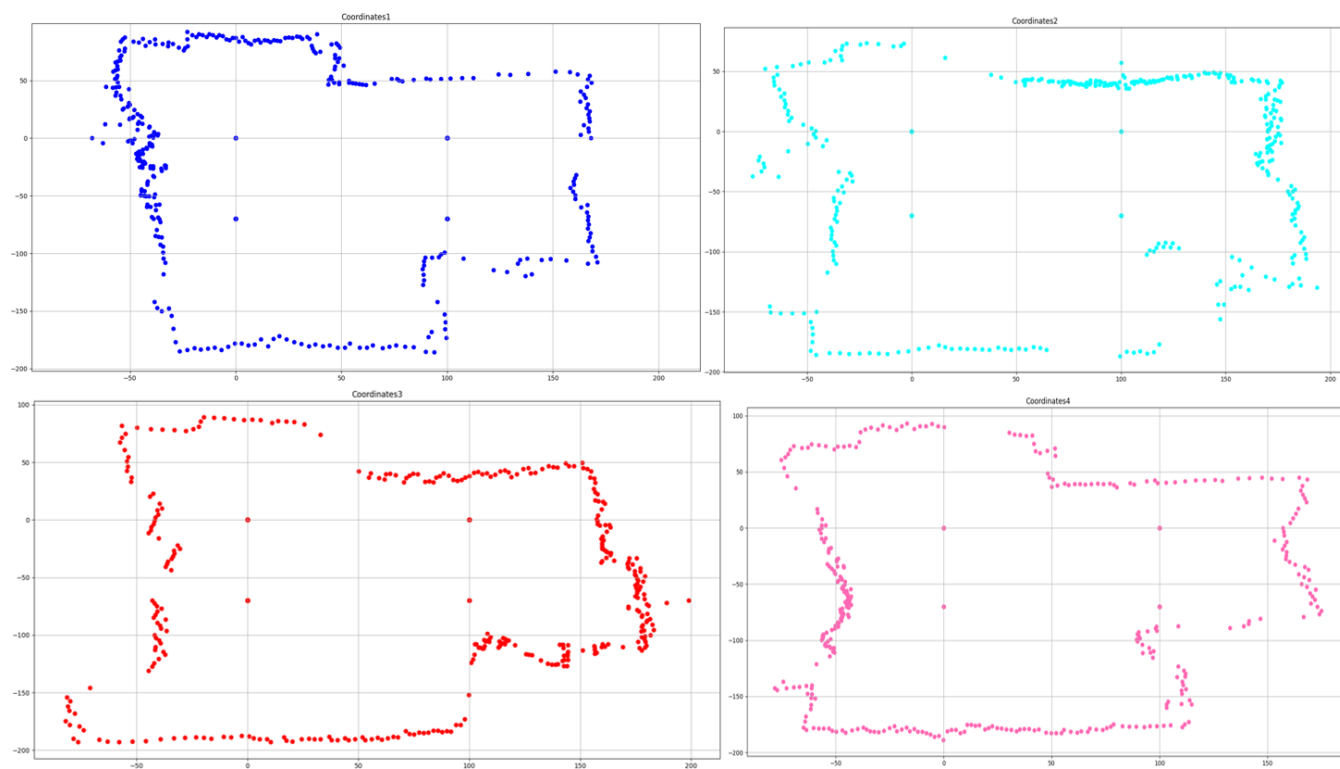
Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η συμπεριφορά κίνησης του ρομπότ καθορίζεται από τα σημεία του μαγνητικού οριζοντα. Στην εικόνα που ακολουθεί, απεικονίζονται οι θέσεις που έλαβε το ρομπότ κατά τις μετρήσεις καθώς και η διεύθυνση της εκάστοτε κίνησης που πραγματοποιήθηκε από θέση σε θέση.



Εικόνα 4. 3: Απεικόνιση θέσεις πραγματοποίησης μετρήσεων του ρομπότ, εντός του πειραματικού χώρου.

Στην πρώτη θέση, το αμάξωμα είχε κατεύθυνση προς τον μαγνητικό βορά. Εφόσον πραγματοποίησε σάρωση του χώρου και αποθήκευση δεδομένων πραγματοποίησε επιτόπια περιστροφή 90° δεξιόστροφα, ως προς την ανατολή. Έπειτα από την πρώτη στην δεύτερη θέση διένυσε απόσταση 100cm (1m), όπου λήφθηκαν οι αντίστοιχες μετρήσεις. Στην συνέχεια, μετά από δεξιόστροφη επιτόπια περιστροφή 90° (νότια) και κινήθηκε στην θέση 3, διανύοντας απόσταση 70cm (0,7m) όπου πραγματοποιήθηκε η αντίστοιχη σάρωση. Η τελευταία κίνηση προς την τέταρτη θέση πραγματοποιήθηκε έπειτα από επιτόπια

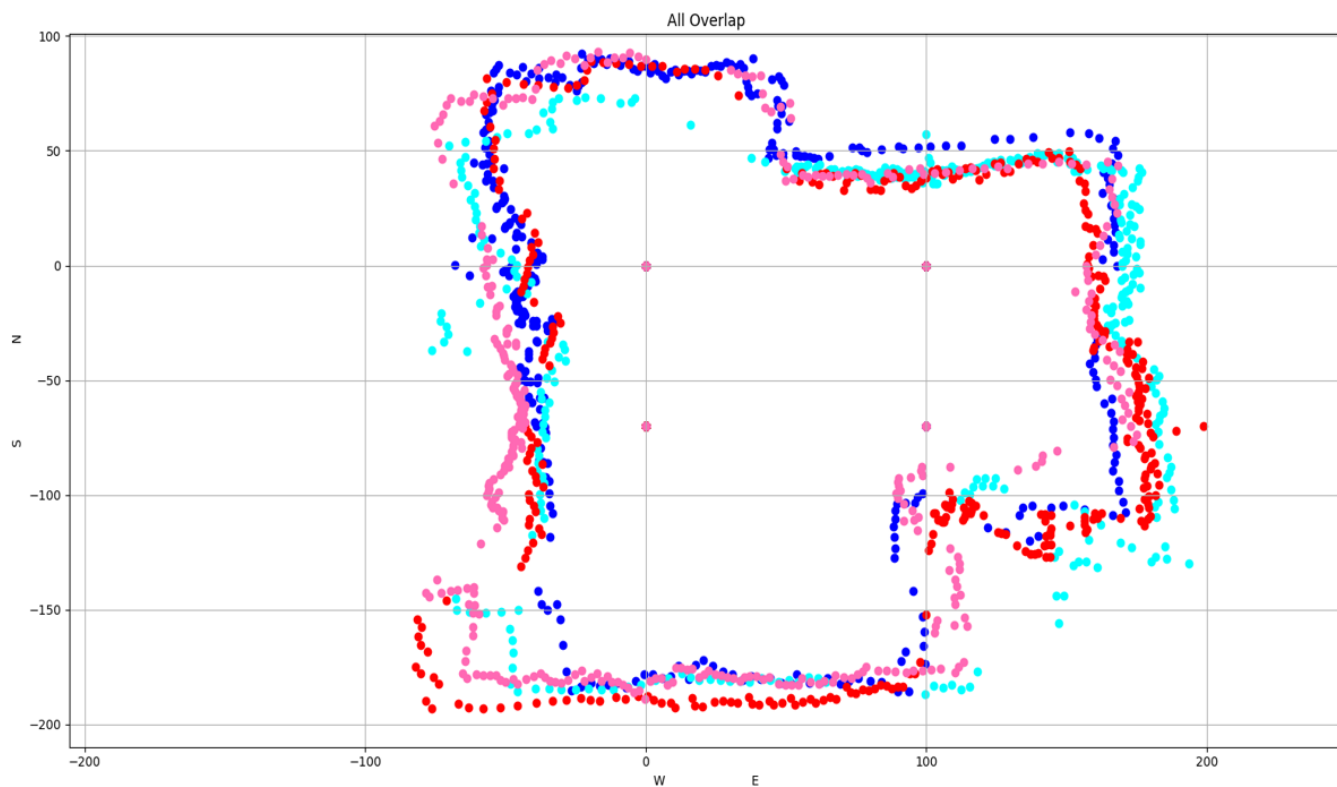
δεξιόστροφη περιστροφή 90° και κίνηση του ρομπότ 100cm (1m). Ακολουθεί εικόνα των επιμέρους μετρήσεων των θέσεων έπειτα από κάθε κίνηση του αμαξώματος. Πάνω αριστερά είναι τα αποτελέσματα της πρώτης θέσης, πάνω δεξιά της δεύτερης, κάτω αριστερά της τρίτης και κάτω δεξιά της τέταρτης.



Εικόνα 4. 4: Μετρήσεις ανά θέση. Πάνω αριστερά πρώτη θέση, πάνω δεξιά δεύτερη θέση, κάτω αριστερά τρίτη θέση, κάτω δεξιά τέταρτη θέση.

Παρατηρείται ότι στο κέντρο του σχήματος υπάρχουν τέσσερα σημεία που δημιουργούν ένα τετράγωνο διαστάσεων 100x70cm. Αποτελούν κατάλοιπα του προγράμματος μετατροπής των δεδομένων σε συντεταγμένες, του προγράμματος *Map Converter* που αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Παρόλα αυτά, έχουν παραμείνει, καθώς βοηθάνε στην περαιτέρω κατανόηση της θέσης και της σύγκρισης των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε κάθε επιμέρους θέση. Επιπλέον, παρατηρείται πως οι μετρήσεις είναι πιο πυκνές στις μεριές του χώρου όπου είναι πιο κοντά το ρομπότ προσδίδοντας καλύτερη ανάλυση του χώρου, κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο καθώς οι διαστάσεις του τριγώνου που προκύπτει μεταξύ της προσπίπτουσας και της ανακλώμενης ακτίνας του αισθητήρα είναι μικρότερης.

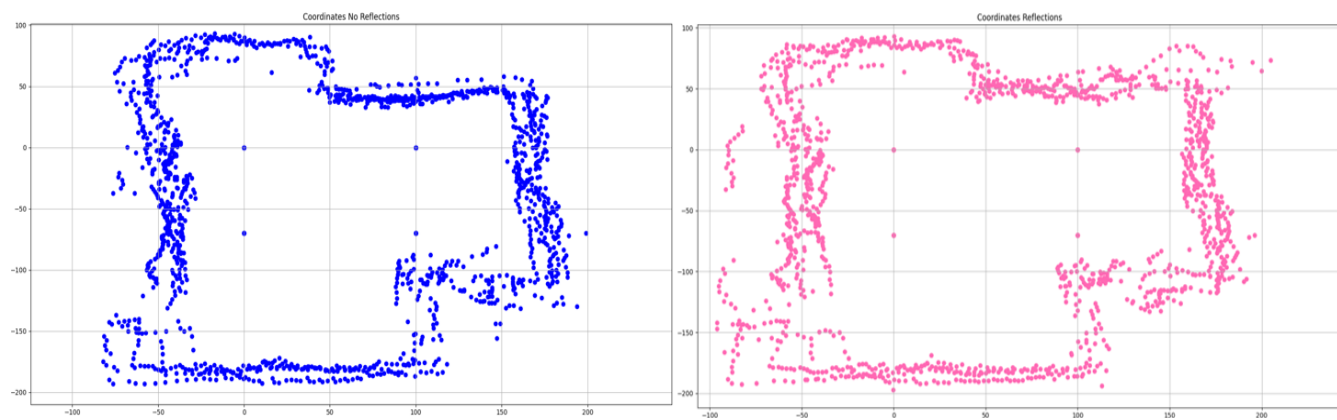
Στην εικόνα που ακολουθεί, απεικονίζεται ο τελικός χάρτης που προκύπτει από τις μετρήσεις. Το χρώμα των μετρήσεων κάθε θέσης είναι το ίδιο με την προηγούμενη εικόνα (εικόνα 4.4). Παρατηρείται, πως οι μετρήσεις σε κάθε θέση βρίσκονται αρκετά κοντά μεταξύ τους, δίνοντας μια αίσθηση της κάτοψης του χώρου, χωρίς να συγκλίνουν απόλυτα. Οι παράγοντες που οδηγούν σε αυτό το αποτέλεσμα, καθώς και οι τρόποι βελτιστοποίησής τους αναλύονται στην ενότητα που ακολουθεί.



Εικόνα 4. 5: Συνδυαστικός χάρτης μετρήσεων.

4.4. Αποτελέσματα

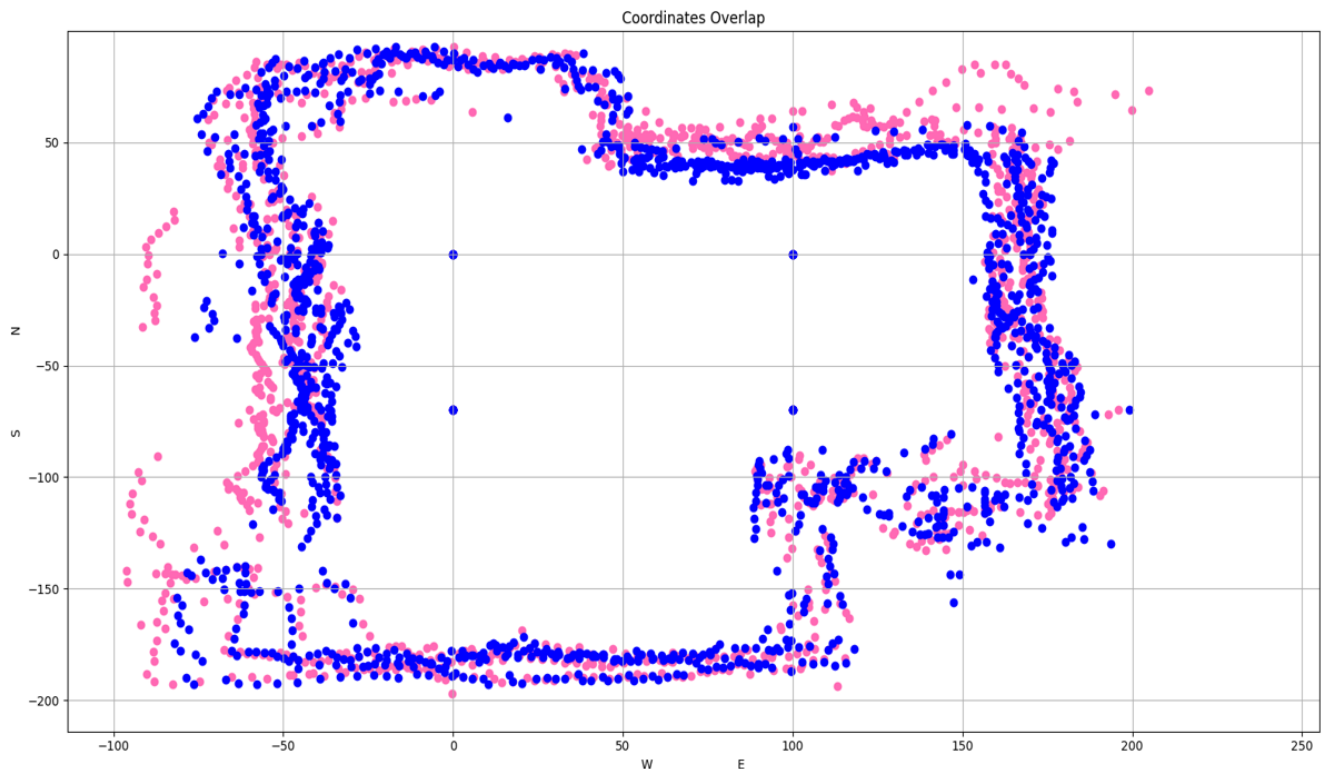
Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν δύο πειραματικές δοκιμές της λειτουργίας της ρομποτικής πλατφόρμας που αναπτύχθηκε. Η πρώτη εκτέλεση έγινε στο χώρο δοκιμών, μη έχοντας καλυμμένες τις ανακλαστικές επιφάνειες του περιβάλλοντος, ενώ στην δεύτερη πειραματική δοκιμή καλύφθηκαν. Τα αποτελέσματα των δοκιμών κάθε εκτέλεσης παρατίθενται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 4. 6: Μετρήσεις εντός πειραματικού χώρου. Αριστερά με καλυμμένες τις ανακλαστικές επιφάνειες. Δεξιά μη καλυμμένες οι ανακλαστικές επιφάνειες.

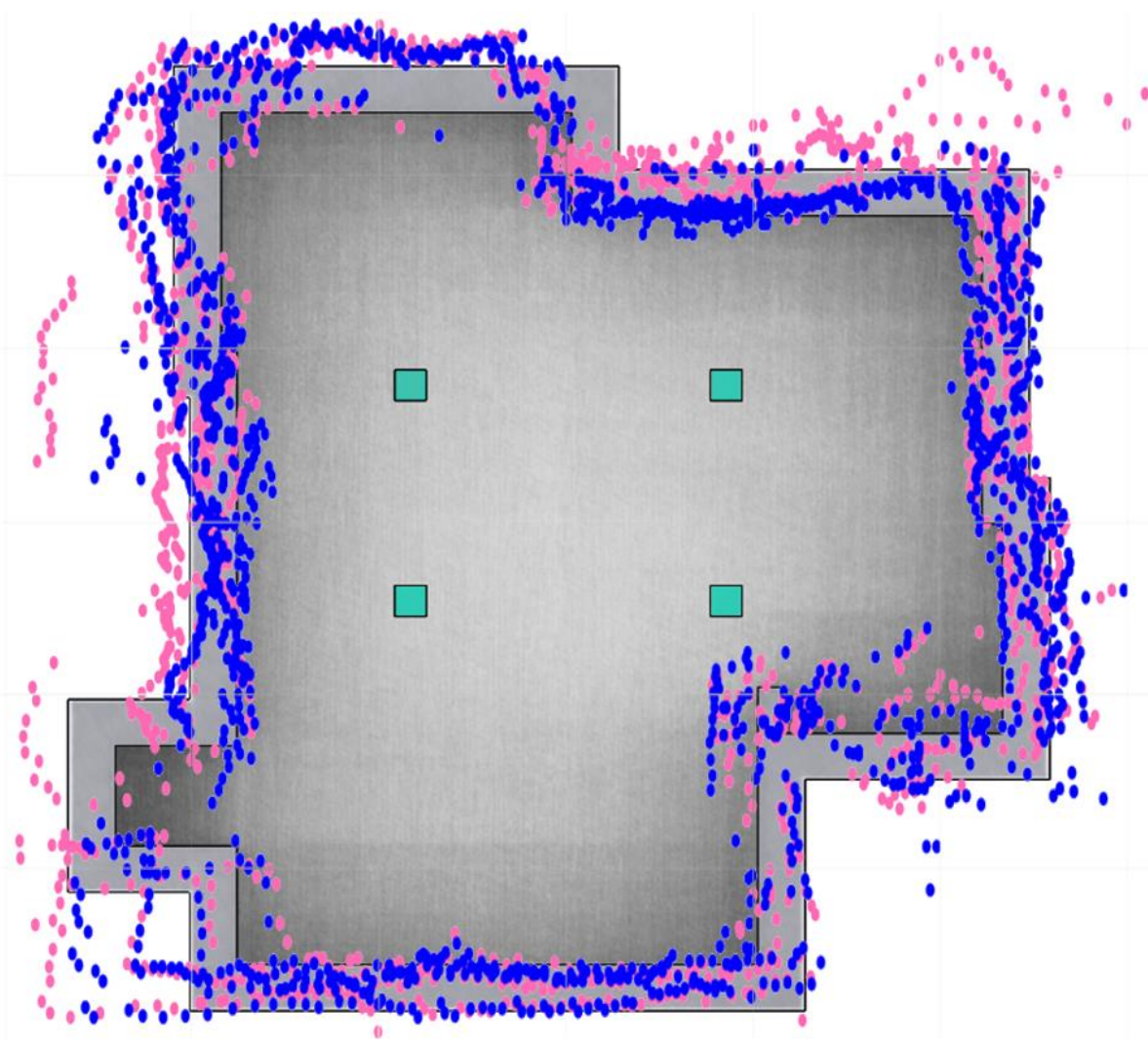
Σκοπός των δοκιμών ήταν ο έλεγχος της πιστότητας των μετρήσεων του αισθητήρα LiDAR. Επιπλέον, για τον σκοπό αυτό, από το ρομπότ απενεργοποιήθηκε η ρουτίνα εναλλαγής των μετρήσεων από αισθητήρα LiDAR σε αισθητήρα υπερήχων σε μικρή απόσταση, που περιγραφικέ στη ενότητα 3.2.7 , με σκοπό την πραγματοποίηση μετρήσεων μόνο από τον αισθητήρα LiDAR. Επιπλέον, στην παρούσα υλοποίηση της συμπεριφοράς του ρομπότ, προστέθηκε και μια βαθμίδα *φίλτρον μέσου όρου είκοσι τιμών* (Average 20 filter) κατά την λήψη της εκάστοτε μέτρησης. Σκοπός ήταν η λήψη όσο το δυνατόν πιστότερων μετρήσεων σε κάθε σημείο του χώρου, πραγματοποιώντας βαθμονόμηση του αισθητήρα σε κάθε μέτρηση, χωρίς να αυξηθεί δραματικά ο χρόνος πραγματοποίησης εκτέλεσης του κάθε πειράματος.

Στον χώρο τοποθετήθηκαν διακριτά σημεία (εικόνα 4.1), τα οποία αναπαριστούν την κάθε θέση μέτρησης. Το αμάξωμα τοποθετήθηκε χειροκίνητα στην πρώτη θέση των μετρήσεων. Για την πιστότητα των μετρήσεων αυτών των πειραματικών δοκιμών, πραγματοποιήθηκε αλλαγή στον κώδικα συμπεριφοράς της ρομποτικής πλατφόρμας, δίνοντας χειροκίνητα τις τιμές για τη πραγματοποίηση της εκάστοτε κίνησης, όπως αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα (100cm,70cm,100cm). Η ενέργεια αυτή κρίθηκε απαραίτητη, καθώς λόγω της φύσεως των δύο πειραματικών δοκιμών τα σημεία λήψης μετρήσεων τις εκάστοτε δοκιμής θα διέφεραν, δυσκολεύοντας σημαντικά την σύγκριση μεταξύ των μετρήσεων τους. Στην εικόνα που ακολουθεί απεικονίζεται ο συνδυαστικός χάρτης μετρήσεων των πειραματικών δοκιμών, όπου ακολουθείται η ίδια χρωματική απεικόνιση με την προηγούμενη εικόνα.



Εικόνα 4. 7: Συνδυαστικός χάρτης μετρήσεων.

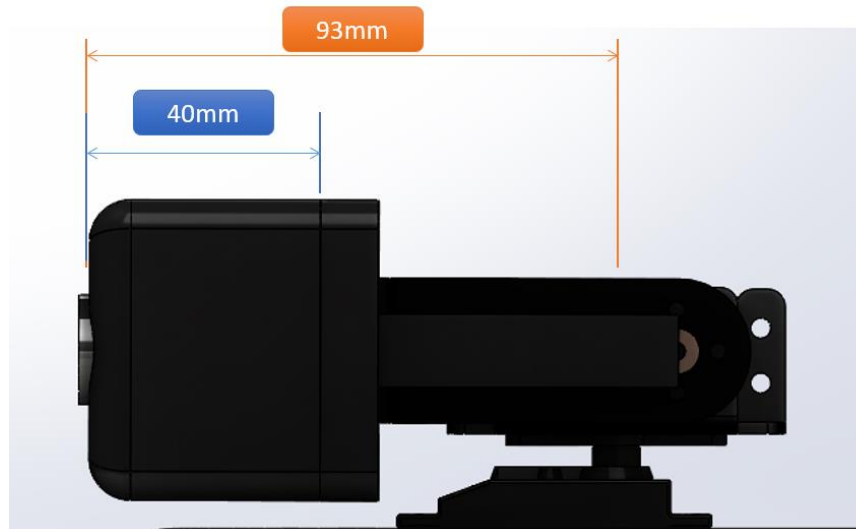
Παρατηρώντας την εικόνα, είναι εμφανές πως οι μετρήσεις κατά την εκτέλεση της πειραματικής δοκιμής με καλυμμένες επιφάνειες είναι πιο συγκεντρωμένες και συμπαγείς, σε σχέση με την άλλη πειραματική εκτέλεση. Επιπλέον, ένας ακόμα παράγοντας θορύβου στις μετρήσεις ήταν η μη πιστότητα του συστήματος οδομετρίας, για τους λόγους που έχει αναλυθεί στην ενότητα 2.3.1.1 . Ακολουθεί εικόνα όπου πραγματοποιείται σύγκριση των μετρήσεων με την κάτοψη του πειραματικού χώρου.



Εικόνα 4. 8: Συνδυαστικός χάρτης μετρήσεων εν σύγκριση με την κάτοψη.

Οι μετρήσεις των πειραματικών δοκιμών, αν και με ελαφριά απόκλιση, καταφέρνουν να δώσουν μια ρεαλιστική εικόνα του πειραματικού περιβάλλοντα χώρου. Παράγοντες που δημιουργούν τον θόρυβο των μετρήσεων εντοπίζονται σε αρκετά σημεία της παρούσας υλοποίησης. Το σύστημα οδομετρίας κλήθηκε να λειτουργήσει σε ολισθηρή επιφάνεια, γεγονός που οδήγησε το ρομπότ να θεωρεί ελαφρώς διαφορετικά την θέση του στον χώρο από ότι πραγματικά ήταν. Απόκλιση παρατηρείται και στις μετρήσεις του αισθητήρα LiDAR λόγω του σχεδιασμού του αμαξώματος. Παρόλο που ο άξονας κίνησης του κινητήρα servo έχει τοποθετηθεί στο κέντρο του αμαξώματος, η σύνδεση του με την μεταλλική βάση του επόμενου κινητήρα καθιστά τον αισθητήρα να μην βρίσκεται ακριβώς στο κέντρο. Για αυτόν τον λόγο το κάλυμμα του αισθητήρα έχει σχεδιαστεί ώστε να έχει μετατοπισμένο ελαφρώς τον αισθητήρα ώστε η θέση του να επανέλθει όσο το δυνατόν στο κέντρο μειώνοντας αισθητά την προαναφερθείσα απόκλιση στην τάξη του 1mm. Επιπλέον, απόκλιση υπήρξε από το μήκος του βραχίονα και την θέση που ο αισθητήρας λαμβάνει τις μετρήσεις. Παρατηρήθηκε πως οι μετρήσεις του αισθητήρα μετρούνται από απόσταση 40mm χαμηλότερα από τους φακούς του. Επιπλέον, στην απόκλιση συνεισφέρει το γεγονός πως κατά την διάρκεια εκτέλεσης των πειραματικών δοκιμών δεν λήφθηκε υπόψιν το μήκος του βραχίονα, κάτι που έκανε τις μετρήσεις να συγκλίνουν κατά 9,3cm προς τον κέντρο της εκάστοτε θέσης

μέτρησης. Η πρόβλεψη της παρούσας απόκλισης θα είχε σημαντικό αποτέλεσμα στις μετρήσεις των δοκιμών. Η εικόνα που ακολουθεί αναπαριστά την προαναφερθείσα απόκλιση.



Εικόνα 4. 9: Απόκλιση αισθητήρα LiDAR στο μήκος του βραχίονα.

Επιπλέον, στις αποκλίσεις συνεισφέρει και ο αλγόριθμος συμπεριφοράς της ρομποτικής πλατφόρμας. Λόγω της επεξεργαστικής ισχύος του κεντρικού μικροελεγκτή που χρησιμοποιήθηκε, δεν ήταν δυνατή η υλοποίηση κάποιου *Kalman* φίλτρου ή αλγόριθμου τύπου *SLAM*, που η χρησιμότητά τους αναλύθηκε εκτενέστερα στο κεφάλαιο 2. Σημαντική μείωση του θορύβου θα μπορούσε να προκύψει μέσω της εφαρμογής φίλτρου *Kalman* κατά την επεξεργασία των μετρήσεων της ρομποτικής πλατφόρμας από το υπολογιστικό σύστημα, όμως λόγω περιορισμένου χρόνου δεν υπήρξε η δυνατότητα πραγματοποίησης αυτής της υλοποίησης.

5. Κεφάλαιο: Συμπεράσματα – Μελλοντικές επεκτάσεις

5.1. Συμπεράσματα

Τα αυτόνομα ρομποτικά συστήματα με ικανότητα κίνησης εντός του ανθρώπινου περιβάλλοντος συναντιούνται όλο και συχνότερα στην καθημερινότητά μας. Η παρούσα διπλωματική διατριβή έδειξε την δυνατότητα που υπάρχει από τα ρομποτικά συστήματα για την αυτόνομη χαρτογράφηση του περιβάλλοντα χώρου. Αυτή κρίνεται αναγκαία καθώς δίνει την δυνατότητα σε αυτόνομα οχήματα και ρομποτικά συστήματα, να κινούνται με ασφάλεια εντός αυτού και να εκτελούν τους σκοπούς τους, χωρίς να θέτουν σε κίνδυνο τον εαυτό τους, τους ζωντανούς οργανισμούς στο περιβάλλον λειτουργία τους, καθώς και το ίδιο το περιβάλλον δράσης τους.

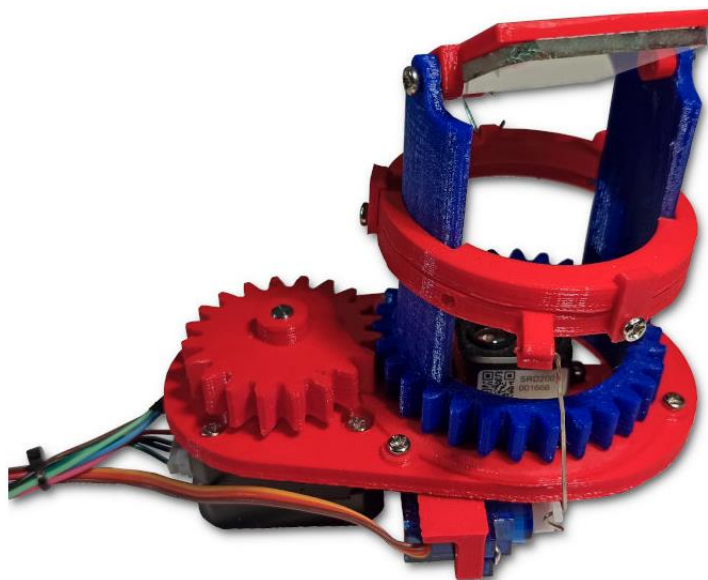
Πραγματοποιήθηκε η ανάλυση βασικών θεωρητικών εννοιών και μεθόδων, με σκοπό ο αναγνώστης να είναι σε θέση να αποκτήσει σφαιρική κατανόηση των προβλημάτων, της αυτόνομης κίνησης και της αυτόνομης χαρτογράφησης χώρου. Με βάση τα προαναφερθέντα, σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε εξολοκλήρου μια πλατφόρμα για την επίλυση του προβλήματος χαρτογράφησης, η οποία βασίστηκε κυρίως στην χρήση ενός αισθητήρα LiDAR για τις μετρήσεις. Κατά τον σχεδιασμό των μηχανολογικών εξαρτημάτων και των ηλεκτρονικών της πλατφόρμας, δόθηκε βάση στο να κρατηθεί όσο το δυνατόν χαμηλότερα το κόστος κατασκευής τους. Δόθηκε έμφαση στην χρήση *Opensource/Openhardware* τεχνολογιών, όπως του *Arduino*, ώστε να είναι ευκολότερη η κατασκευή του συστήματος από τον εκάστοτε αναγνώστη της παρούσας διπλωματικής. Τα μηχανολογικά εξαρτήματα σχεδιάστηκαν έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής τους με χρήση τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης (3D Printing). Επιπλέον, κατά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση των ηλεκτρονικών και μηχανολογικών εξαρτημάτων, λήφθηκε υπόψη η δυνατότητα για μελλοντικές επεκτάσεις.

Υλοποιήθηκε ένας *ευρετικός αλγόριθμος* για την συμπεριφορά του ρομποτικού συστήματος. Η επιλογή αυτού του είδους αλγόριθμου έγινε λόγω της επεξεργαστικής ισχύος των μικροελεγκτών που χρησιμοποιήθηκαν, ώστε να παραμείνει το κόστος χαμηλό. Η κύρια επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε σε υπολογιστικό σύστημα μέσω του οποίου προέκυψαν και οι δυσδιάστατες απεικονίσεις του πειραματικού χώρου των δοκιμών.

Το ρομπότ πραγματοποίησε επιτυχώς τον υπολογισμό των απαιτούμενων συμπεριφορών ως προς τις κινήσεις του και την λήψη μετρήσεων. Έπειτα από την επεξεργασία των μετρήσεων από υπολογιστικό σύστημα προέκυψαν οι χάρτες του χώρου, που απεικόνιζαν με αρκετά καλή πιστότητα τον χώρο δοκιμών. Έπειτα από την εκτέλεση των δοκιμών και την παρατήρηση των μετρήσεων, προέκυψαν πιθανές βελτιώσεις ως προς τον σχεδιασμό του αμαξώματος, καθώς και της αλγοριθμικής του συμπεριφοράς για την μείωση του θορύβου των μετρήσεων. Τέλος, παρατηρήθηκαν και πιθανές βελτιώσεις που έχουν την δυνατότητα να πραγματοποιηθούν κατά την επεξεργασία των δεδομένων από ένα υπολογιστικό σύστημα.

5.2. Μελλοντικές επεκτάσεις

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα (4.4), η ρομποτική πλατφόρμα μπορεί να λάβει πληθώρα βελτιώσεων και επεκτάσεων. Κατασκευαστικά, σε επόμενη έκδοση ο αισθητήρας θα βρίσκεται εντός τους σασί του ρομπότ, καθώς με αυτόν τον τρόπο θα είναι προστατευμένος από το περιβάλλον του. Επιπλέον, αυτή η αλλαγή της τοποθέτησης του αισθητήρα, καθιστά να βρίσκεται σε σταθερό μέρος, στο κέντρο του αμαξώματος, περιορίζοντας τις αποκλείσεις των μετρήσεων που προκύπτουν από κραδασμούς κατά την λειτουργία του βραχίονα στη παρούσας υλοποίησης. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται μια κατασκευή *Opensource* από το «Charle's Lab» [50], όπου χρησιμοποιείται ένα κάτοπτρο που μεταβάλλοντας την θέση του αλλάζει η κλίση της γωνίας μέτρησης κατάλληλα. Μια παρόμοια κατασκευή θα μπορούσε να ενσωματωθεί στο αμάξιωμα.



Εικόνα 5. 1: Open-Source 3D LiDAR sensor από «Charles Lab» [50].

Για τη βελτίωση της συμπεριφοράς, θα μπορούσε να γίνει αλλαγή στο σύστημα επεξεργασίας του ρομπότ. Υπάρχει η δυνατότητα ενσωμάτωσης μικροϋπολογιστή, όπως ενός raspberry pi, ώστε να μεταφερθεί η επεξεργασία των δεδομένων εντός του αμαξώματος. Διαφορετικά, τα δεδομένα θα μπορούσαν να αποστέλλονται μέσω δικτύου σε ένα υπολογιστικό σύστημα με την χρήση της δυνατότητας WIFI του μικροελεγκτή ESP8266. Επιπλέον, εφόσον πραγματοποιηθεί ένα εκ των προαναφερθέντων, είναι δυνατή η ανάπτυξη κάποιου αλγόριθμου βελτιστοποίησης, ο οποίος θα λειτουργεί σε συνεργασία με τον παρόντα αλγόριθμο, ή θα τον αντικαταστήσει.

Τέλος, η παρούσα κατασκευή και τα αποτελέσματα της εργασίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν από πληθώρα κλάδων της πληροφορικής, για την ανάπτυξη οχημάτων κίνησης που κάνουν χρήση τεχνικών μηχανικής μάθησης και τεχνητής νοημοσύνης. Υπάρχει η δυνατότητα χρήσης συμπεριφορών της κατασκευής ακόμα και σε στατικά συστήματα, όπως σε βραχίονες, ώστε να αναγνωρίζουν καλύτερα τις μεταβολές εντός του περιβάλλοντος δράσης τους.

Παράρτημα Α: Προσομοιώσεις

Συνολική Προσομοίωση Διπλωματικής	https://www.tinkercad.com/things/73x62XecwMt
Προσομοίωση Μικροελεγκτή Συστήματος Υπερήχων	https://www.tinkercad.com/things/c0c7J5orbrz
Προσομοίωση Συστήματος Βραχίονα-LiDAR	https://www.tinkercad.com/things/kkITeR2vfJn
Προσομοίωση Συστήματος Κίνησης/Οδομετρίας	https://www.tinkercad.com/things/IJdy4z3Kx1K
Προσομοίωση πρωτοκόλλου επικοινωνίας I2C	https://www.tinkercad.com/things/eQ9swgzqwXP
Προσομοίωση Σειριακής Επικοινωνίας	https://www.tinkercad.com/things/fPxs3FdEkyr

Αναφορές

- [1] D. Zunt, «Who did actually invent the word "robot" and what does it mean?,» 2013. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://web.archive.org/web/20130123023343/http://capek.misto.cz/english/robot.html>.
- [2] Apollodorus, «www.perseus.tufts.edu,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.perseus.tufts.edu/hopper/text?doc=urn:cts:greekLit:tlg0548.tlg001.perseus-grc1:1.9.26>.
- [3] E. M. Kyriakos Efstathiou, «Celestial Gearbox,» *Mechanical Engineering Magazine*, p. 3, 1 8 2018.
- [4] T. b. D. R. H. Al-Jazari, *The Book of Knowledge of Ingenious Mechanical Devices*, Pakistan Hijra Council, 1989.
- [5] E. a. A. Robotics, «epsr.org.uk,» 09 2010. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://epsr.org.uk/research/ourportfolio/themes/engineering/activities/principlesofrobotics/>.
- [6] J. Vincent, «www.theverge.com,» The Verge. Vox Media., 29 06 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.theverge.com/2016/6/29/12057516/satya-nadella-ai-robot-laws>. [Πρόσβαση 06 09 2021].
- [7] NASA/JPL-Caltech, «mars.nasa.gov,» 14 07 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://mars.nasa.gov/resources/25118/portrait-of-perseverance-and-ingenuity-artists-concept/>. [Πρόσβαση 14 09 2021].
- [8] J. Happich, «eenewseurope.com,» 14 6 2018. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.eenewseurope.com/news/total-design-autonomous-robots-inspections>. [Πρόσβαση 14 09 2021].
- [9] «www.robotplatform.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.robotplatform.com/knowledge/sensors/robot_sensors.html. [Πρόσβαση 08 09 2021].
- [10] «www.futek.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.futek.com/force-sensor>. [Πρόσβαση 08 09 2021].
- [11] R. C. Michelson, «/www.accessscience.com,» School of Aerospace Engineering, Georgia Institute of Technology, Smyrna, Georgia., [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.accessscience.com/content/autonomous-navigation/YB000130>. [Πρόσβαση 09 09 2021].
- [12] C. C. D. T. T. R. D. K. Thi Thoa Mac, «Heuristic approaches in robot path planning: A survey,» *elsevier.com*, p. 16, 2016.
- [13] www.choose.co.uk, «www.choose.co.uk,» 11 5 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.choose.co.uk/guide/robot-vacuum-cleaners/>. [Πρόσβαση 14 09 2021].
- [14] N. B. N. Sariff, «An Overview of Autonomous Mobile Robot Path Planning Algorithms,» σε *Research and Development, 2006. SCOReD 2006. 4th Student Conference on*, Universiti Teknologi MARA, 40450 Shah Alam, Selangor, Malaysia, 2006.
- [15] Π. Σαρίδης, «threepixelslab.gr,» 10 10 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://threepixelslab.gr/automobiles/electric-vehicles/79650/tesla-mesa-sto-2020-tha-kykloforisei-leitourgia-full-self-driving/>. [Πρόσβαση 14 09 2021].

- [16] C. O'Brien, «venturebeat.com,» 10 4 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://venturebeat.com/2019/04/10/inside-nokias-factory-of-the-future-robots-data-automation-5g-and-even-some-humans/>. [Πρόσβαση 14 09 2021].
- [17] B. Douglas, «www.mathworks.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.mathworks.com/videos/autonomous-navigation-part-1-what-is-autonomous-navigation-1592993748308.html>. [Πρόσβαση 09 09 2021].
- [18] S. M. R. L. 159, «Carnegie Mellon University: School of Computer Science,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.cs.cmu.edu/~rasc/Download/AMRobots5.pdf>. [Πρόσβαση 11 09 2021].
- [19] G. D. Shoudong Huang, «Robot Localization: An Introduction,» 15 10 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/047134608X.W8318>. [Πρόσβαση 15 09 2021].
- [20] Robo-Rats, «Robo-Rats Locomotion Page,» Dartmouth College Computer Science Department Robot Building Course, 04 04 01. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://groups.csail.mit.edu/drl/courses/cs54-2001s/odometry.html>. [Πρόσβαση 16 09 2021].
- [21] D. F. B. T. Frank Dellaert, «Carnegie Mellon University: The Robotic Institute,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.ri.cmu.edu/pub_files/pub1/dellaert_frank_1999_2/dellaert_frank_1999_2.pdf. [Πρόσβαση 18 09 2021].
- [22] S. Thrun, «<http://www.cs.cmu.edu/~thrun>,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1301/1301.0607.pdf>. [Πρόσβαση 18 09 2021].
- [23] W. B. F. Sebastian Thrun, «Grid And Monte Carlo Localization,» σε *Probabilistic Robotics*, EARLY DRAFT—NOT FOR DISTRIBUTION, 200, p. 200.
- [24] L. Moysis, «Το Φίλτρο Kalman (An introduction to the Kalman Filter),» 07 2012. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.researchgate.net/publication/273632153_To_Philtro_Kalman_An_introduction_to_the_Kalman_Filter. [Πρόσβαση 18 09 2021].
- [25] G. Welch, «UNC College of arts and Sciences: Computer Sciences,» 01 07 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/>. [Πρόσβαση 18 09 2021].
- [26] A. N.A.Thacker, «Tutorial: The Kalman Filter,» σε *Tina Memo No. 1996-002*, Manchester, M13 9PT., TINA, 1998, pp. 1-10.
- [27] M. N. M. A. Z. S. R. a. M. Y. Nabil Zhafri, «AiGEV 2016,» σε *Autonomous mobile robot localization using Kalman filter*, Faculty of Manufacturing Engineering, Universiti Malaysia Pahang, 26600 Pekan, Pahang, Malaysia, 2017.
- [28] J.-A. Fernández-Madriral, *Simultaneous Localization and Mapping for Mobile Robots: Introduction and Methods*, IGI Global, 2012.
- [29] M. B. H. Péter Fankhauser, «ResearchGate,» ANYmal Research, 05 2018. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.researchgate.net/figure/The-presented-robot-centric-mapping-framework-enables-mobile-robots-to-create-consistent_fig3_325918227. [Πρόσβαση 21 09 2021].
- [30] Z. Z. Y Wang, «Research on dead-reckoning based localization for cleaning robot,» *journal of Physics Conference Series* , p. 5, 01 2020.

- [31] E. L. A. Iker Lluvia, «Active Mapping and Robot Exploration: A Survey,» 2021.
- [32] S. J. C. Chuho Yi, «Map Representation for Robots,» *The Smart Computing Review* , p. 27, 29 02 2012.
- [33] S. Thrun, «Robotic Mapping: A Survey,» 2002.
- [34] R. Dynamics, «roboticstomorrow.com,» 26 11 2015. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.roboticstomorrow.com/article/2015/11/low-cost-lidar-based-navigation-for-mobile-robotics/7270>. [Πρόσβαση 22 09 2021].
- [35] R. A. Bååth, «karos-project.org,» 2008. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.ikaros-project.org/articles/2008/gridmaps/>. [Πρόσβαση 22 09 2021].
- [36] M. R. B. Soren Riisgaard, SLAM for Dummies, MIT OCW.
- [37] «www.cableworks.g,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.cableworks.gr/ilektronika/arduino-and-microcontrollers/motors/dc/jga25-370-6v-dc-motor-100rpm-with-speed-encoder/>. [Πρόσβαση 04 10 2021].
- [38] «Garmin: LIDAR_Lite_v3_Operation_Manual_and_Technical_Specifications,» [Ηλεκτρονικό]. Available: http://static.garmin.com/pumac/LIDAR_Lite_v3_Operation_Manual_and_Technical_Specifications.pdf.
- [39] P. S. University. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://web.pdx.edu/~jduh/courses/geog493f12/Week04.pdf>.
- [40] jmseitz, «Github,» Garmin, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://github.com/garmin/LIDARLite_Arduino_Library.
- [41] «Εικόνα HC-SR04,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.hellasdigital.gr/electronics/sensors/ultrasonic/hc-sr04-ultrasonic-module-distance-measuring-transducer-sensor-for-arduino/>.
- [42] keepworking, «Github,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://github.com/keepworking/Mecha_QMC5883L.
- [43] «www.theengineeringprojects.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.theengineeringprojects.com/2018/10/introduction-to-nodemcu-v3.html>.
- [44] «circuit.rocks,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://circuit.rocks/nodemcu-v3-esp8266-development-board-ch340.html>.
- [45] «store.arduino.cc,» arduino, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano?selectedStore=eu>.
- [46] «store.arduino.cc,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>.
- [47] PowerBank, «Eshop.gr,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.e-shop.gr/4smarts-solar-power-bank-rugged-titanpack-slim-20000mah-black-p-TEL.067547>.
- [48] Grobotronics, «grobotronics.com,» OEM, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://grobotronics.com/dc-dc-converter-step-up-5-28v-2a-with-micro-usb-mt3608.html>.
- [49] PyCharmWebsite, «www.jetbrains.com,» jetBrains, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.jetbrains.com/pycharm/>.

[50] C. GRASSIN, «charleslabs.fr.» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://charleslabs.fr/en/project-3D+Lidar+Scanner+MK2>.

[51] J. R. Asimov Isaac, I, Robot., Garden City, New York: Doubleday & Company, Inc., 1950.