



Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Σχολή Μηχανικών

Τμήμα Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής

Πτυχιακή εργασία

**Κοινόχρηστος έλεγχος βασισμένος σε VFH+ για
κινητά ρομπότ που λειτουργούν εξ αποστάσεως**

ΠΑΠΠΑΣ ΠΑΝΤΕΛΕΉΜΩΝ
71445065

Επιβλέπων:

ΓΡΗΓΟΡΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΥ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Αιγάλεω - Αθήνα, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ, 2021

Εγκρίθηκε από την εξεταστική επιτροπή την Τετάρτη 3 Μαρτίου 2021.

Νικολάου Γρηγόριος
Καθηγητής

Βασιλειάδου Σουλτάνα
Καθηγήτρια

Δρόσος Χρήστος
Καθηγητής

Copyright © Παππάς Παντελεήμων, 2021
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Παππάς Παντελεήμων του Παππά Κωνσταντίνου, με αριθμό μητρώου 71445065 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής, δηλώνω υπεύθυνα ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής 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



Παππάς Παντελεήμων

Στους γονείς μου για την υποστήριξή τους και στην αδερφή μου που έφτιαχνε καφέ

Ευχαριστίες

Στα πλαίσια της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή για την εκπόνηση της εργασίας, κύριο Νικολάου Γρηγόρη, για όλη του την καθοδήγηση και βοήθεια. Επίσης, τους Dr. Manolis Chiou και Dr. Rustam Stolkin για την βοήθεια και συνεισφορά τους από το Extreme Robotics Laboratory του University of Birmingham καθώς και τον συνάδελφο μου Γεώργιο Ένιμο.

Ημερομηνία 3/3/2021
Παπάς Παντελεήμων

Περίληψη

Αυτό το άρθρο αντιμετωπίζει το πρόβλημα της ασφαλούς και αποτελεσματικής πλοήγησης σε απομακρυσμένα ελεγχόμενα ρομπότ που λειτουργούν σε επικίνδυνα και μη δομημένα περιβάλλοντα, ή την διεξαγωγή άλλων απομακρυσμένων ρομποτικών εργασιών. Παρουσιάζεται μια μέθοδος κοινού ελέγχου (shared control), η οποία συνδυάζει τις εντολές από μια μονάδα πλοήγησης αποφυγής εμποδίων VFH+ με τις εντολές τηλελειτουργίας που παρέχονται από έναν χειριστή μέσω ενός χειριστηρίου. Η προσέγγιση που παρουσιάζεται προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, όπως η ευελιξία που επιτρέπει την απλή προσαρμογή της συμπεριφοράς του ελεγκτή και την εύκολη ενσωμάτωση με μεταβλητά συστήματα αυτονομίας, καθώς και την ικανότητα αντιμετώπισης δυναμικών περιβαλλόντων. Τα πλεονεκτήματα του παρουσιαζόμενου ελεγκτή αποδεικνύονται από μια πειραματική αξιολόγηση σε ένα σενάριο αντιμετώπισης καταστροφών. Πιο συγκεκριμένα, τα στοιχεία που παρουσιάζονται δείχνουν μια σαφή αύξηση της απόδοσης όσον αφορά την ασφάλεια και το χρόνο ολοκλήρωσης εργασιών σε σύγκριση με μια καθαρή προσέγγιση τελετουργίας, καθώς και την ικανότητα αντιμετώπισης προηγουμένως μη παρατηρημένων εμποδίων.

Λέξεις Κλειδιά: Robotics, Human-Computer Interaction, Systems and Control

Abstract

This paper addresses the problem of safe and efficient navigation in remotely controlled robots operating in hazardous and unstructured environments; or conducting other remote robotic tasks. A shared control method is presented which blends the commands from a VFH+ obstacle avoidance navigation module with the teleoperation commands provided by an operator via a joypad. The presented approach offers several advantages such as flexibility allowing for a straightforward adaptation of the controller's behaviour and easy integration with variable autonomy systems; as well as the ability to cope with dynamic environments. The advantages of the presented controller are demonstrated by an experimental evaluation in a disaster response scenario. More specifically, presented evidence show a clear performance increase in terms of safety and task completion time compared to a pure teleoperation approach, as well as an ability to cope with previously unobserved obstacles.

Keywords: Robotics, Human-Computer Interaction, Systems and Control

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες	iii
Περίληψη	v
Abstract	vii
Πίνακας περιεχομένων	x
Πίνακας σχημάτων	xii
Πίνακας πινάκων	xiii
1 Εισαγωγή	1
1.1 Πλαίσιο, σκοπός και στόχοι της πτυχιακής εργασίας	2
1.2 Μεθοδολογία	3
1.3 Περιορισμοί	4
1.4 Ορισμοί	4
1.5 Οργάνωση, κεφαλαίωση, διάρθρωση της εργασίας	5
2 Θεωρητικό μέρος – Βιβλιογραφική έρευνα – Σχετικές προσπάθειες	7
2.1 Τεχνητά δυναμικά πεδία - Artificial Potential Fields methods	9
2.2 Μέθοδος δυναμικού παραθύρου (Dynamic Window Approach)	10
2.3 Ιστογραμμικές μέθοδοι - Histogramic methods	10
2.3.1 VFH+	13
2.3.2 Scaled VFH (SVFH)	13
2.3.3 VFH*	14
2.3.4 Traversability Field Histogram (TFH)	15
2.3.5 IVFH*	15
2.3.6 VFH*TDT	16
2.3.7 VPH	17
2.3.8 VPH+	17
2.3.9 Virtual Fixtures	18
2.4 Ερευνητικές υποθέσεις	19
2.5 Κοινόχρηστος ελέγχος για κινητά ρομπότ	20
2.6 Οδομετρία	22
2.7 SLAM	24
2.7.1 Το πρόβλημα SLAM	24
2.7.2 Προσπάθειες επίλυσης του SLAM	25
2.7.3 Χρήση του SLAM	26

3	Μεθοδολογία ή/και Σχέδιο εργασιών – Υλοποίηση – Εφαρμογή	29
3.1	ROS	29
3.2	Husky	32
3.3	URDF, Rviz και Gazebo	32
3.4	Ο αλγόριθμος VFH+	35
3.5	Κοινόχρηστος έλεγχος για κινητά ρομπότ	40
4	Αποτελέσματα – Ευρήματα / Επιτεύγματα	47
4.1	Πρωτόκολλο πειράματος	47
4.2	Αναλυτική παρουσίαση αποτελεσμάτων	49
4.3	Μέθοδοι Στατιστικής Ανάλυσης	51
4.4	Κυριότερα ευρήματα / αποτελέσματα	57
5	Συζήτηση – Συμπεράσματα – Μελλοντικές επεκτάσεις	59
5.1	Ανακεφαλαίωση	59
5.2	Συζήτηση / Συμπεράσματα	59
5.3	Αξιοποίηση / Πρακτικές προεκτάσεις της έρευνας	60
5.4	Μελλοντικές επεκτάσεις / Πρακτικές Προεκτάσεις της Έρευνας	61
	Βιβλιογραφικές Αναφορές	63
	Πρόσθετη Βιβλιογραφία	69

Πίνακας σχημάτων

Εικόνα 1.	Κινητό ρομπότ εν δράση από την καταστροφή της Φουκουσίμα [5]	2
Εικόνα 2.	Χειριστές κινητών ρομπότ που δουλεύουν με στολές hazmat [5]	3
Εικόνα 3.	Παράδειγμα αλγορίθμου BUG [11]	8
Εικόνα 4.	Απεικόνιση τρόπου λειτουργίας των Τεχνητών δυναμικών πεδίων [12]	9
Εικόνα 5.	Διάταξη ρομπότ συγχρονισμένης οδήγησης [18]	11
Εικόνα 6.	Πάνω Πεδίο ταχυτήτων Κάτω Δυναμικό παράθυρο [17]	11
Εικόνα 7.	Παράδειγμα αλγορίθμου VFF στα πλαίσια λειτουργίας κινητού ρομπότ [22]	12
Εικόνα 8.	Προσέγγιση των τροχιών α) μη δυναμικές β) δυναμικές [23]	13
Εικόνα 9.	Κάδοι της μεθόδου SVFH σε σενάριο διασταύρωσης [25]	14
Εικόνα 10.	Σενάριο αδυναμίας των μεθόδων τοπικής πλοήγησης [26]	15
Εικόνα 11.	Παράδειγμα λειτουργίας VFH* με αυξανόμενο βάθος αναζήτησης [26]	16
Εικόνα 12.	Χάρτης διαβασιμότητας [27]	17
Εικόνα 13.	Αρχή λειτουργίας της μεθόδου VPH+ [30]	18
Εικόνα 14.	Διαδρομή με VPH [30]	19
Εικόνα 15.	Διαδρομή με VPH+ [30]	20
Εικόνα 16.	Παράδειγμα ενεργών περιορισμών α) Περιορισμός περιοχής β) Περιορισμός διαδρομής (Τα εμπόδια απεικονίζονται με γκρι και οι περιορισμοί με μαύρο) [34]	20
Εικόνα 17.	Φάσμα Τηλελειτουργίας - Αυτονομίας [39]	21
Εικόνα 18.	Το NURIC Smart Wheelchair που αποτελείται από αισθητήρα RGB-D, mini-PC, πλακέτες μετατροπέα και κωδικοποιητές τροχών. [42]	22
Εικόνα 19.	Υπολογισμός οδομετρίας [51]	23
Εικόνα 20.	3D point cloud κτιρίου που δημιουργήθηκε από UAV [60]	26
Εικόνα 21.	Παράδειγμα χάρτη SLAM	27
Εικόνα 22.	Το δίκτυο ROS [63]	30
Εικόνα 23.	Αρχιτεκτονική του ROS	31
Εικόνα 24.	Το κινητό ρομπότ Husky [64]	32
Εικόνα 25.	Παράδειγμα URDF κύβου	34
Εικόνα 26.	Οπτικοποίηση rviz του ρομπότ Turtlebot 2 σε έναν χάρτη	35
Εικόνα 27.	Το ρομποτικό όχημα Husky σε εξομίωση Gazebo	36
Εικόνα 28.	Πλέγμα Ιστογράμματος, με R για το ρομπότ	37
Εικόνα 29.	Απεικόνιση μεγενθυμένων εμποδίων και απαγορευμένων ζωνών [23]	38
Εικόνα 30.	a) Primary polar histogram, b) binary polar histogram, c) masked polar histogram [23]	39
Εικόνα 31.	Μπλοκ διάγραμμα του κοινόχρηστου ηλεκτή	41
Εικόνα 32.	Ο συνδυασμός του κοινού ελεγκτή μεταξύ της μονάδας VFH + και των εντολών του χειριστή	45

Εικόνα 33.	Η μονάδα ελέγχου χειριστή (OCU) αποτελείται από ένα φορητό υπολογιστή, ένα χειριστήριο και μια οθόνη που δείχνει το GUI.	48
Εικόνα 34.	Αριστερά: ροή βίντεο από την κάμερα. Δεξιά: Ο χάρτης (όπως δημιουργήθηκε από το SLAM) που δείχνει τη στάση του ρομπότ, τις αντανάκλασεις λέιζερ των εμποδίων (κόκκινο) και τους τοίχους (μαύρο). Στον χάρτη, η αποστολή ήταν να πλοηγηθούμε από το σημείο A στο σημείο B.	48
Εικόνα 35.	Η πειραματική αρένα αναζήτησης και διάσωσης που χρησιμοποιήθηκε	49
Εικόνα 36.	Ιστόγραμμα χρόνων ολοκλήρωσης τηλελειτουργίας	52
Εικόνα 37.	Ιστόγραμμα Χρόνων ολοκλήρωσης κοινόχρηστου ελεγκτή	53
Εικόνα 38.	Ιστόγραμμα συγκρούσεων τηλελειτουργίας	54
Εικόνα 39.	Ιστόγραμμα συγκρούσεων κοινόχρηστου ελεγκτή	54
Εικόνα 40.	Γράφημα χρόνου ολοκλήρωσης εργασιών. Οι γραμμές σφάλματος υποδεικνύουν το τυπικό σφάλμα.	57
Εικόνα 41.	Γράφημα αριθμού συγκρούσεων. Οι γραμμές σφάλματος υποδεικνύουν το τυπικό σφάλμα.	58

Πίνακας πινάκων

Πίνακας 1.	Χρόνοι χειριστή Α	50
Πίνακας 2.	Συγκρούσεις χειριστή Α	50
Πίνακας 3.	Χρόνοι χειριστή Β	50
Πίνακας 4.	Συγκρούσεις χειριστή Β	50
Πίνακας 5.	Χρόνοι χειριστή Γ	50
Πίνακας 6.	Συγκρούσεις χειριστή Γ	50

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η πρόοδος της έρευνας επέτρεψε στα ρομπότ να χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο σε εφαρμογές κρίσιμες για τον χρόνο και την ασφάλεια, όπως αναζήτηση και διάσωση με βοήθεια ρομπότ (Search and Rescue, SAR), επιθεώρηση επικίνδυνου περιβάλλοντος και αντίδραση σε καταστροφές. Τέτοιες πολύπλοκες και απαιτητικές εφαρμογές απαιτούν ευέλικτες, αποτελεσματικές και στιβαρές ρομποτικές πλατφόρμες. Το πεδίο των κινητών ρομπότ έχει διερευνηθεί εκτενώς από την άποψη των παραδοσιακών προσεγγίσεων καθαρής τηλελειτουργίας για τέτοιες εφαρμογές. Ωστόσο, οι πρόσφατες εξελίξεις στις ρομποτικές τεχνολογίες τόσο σε πλαίσιο λογισμικού (π.χ. αλγόριθμους) όσο και σε πλαίσιο υλικών εξαρτημάτων (π.χ. αισθητήρες και ισχύ επεξεργασίας) μπορούν όλο και περισσότερο να αντιμετωπίσουν την αβεβαιότητα και τα μη δομημένα περιβάλλοντα. Αυτές οι εξελίξεις μπορούν να αποδειχθούν ζωτικής σημασίας σε πολλές εφαρμογές αντιμετώπισης καταστροφών και απομακρυσμένων επιθεωρήσεων όπως SAR, αναγνώριση σε πυρηνικούς χώρους καταστροφών ή σε παρόμοια επικίνδυνα περιβάλλοντα. Πολλές μελέτες πεδίου [1]–[3] έχουν δείξει ότι η έλλειψη αυτόνομων δυνατοτήτων είναι μερικές από τις σημαντικότερες δυσχέρειες κατά τη διάρκεια ρομποτικών λειτουργιών σε επικίνδυνα περιβάλλοντα. Για παράδειγμα, η έλλειψη αυτόνομων δυνατοτήτων στα ρομποτικά συστήματα μπορεί να οδηγήσει σε δραστική αύξηση της νοητικής κόπωσης για τους ανθρώπινους χειριστές και στην ταχύτητα εκτέλεσης εργασιών [4]. Επιπλέον, η καθαρή τηλελειτουργία μπορεί να αυξήσει τις συγκρούσεις του ρομπότ εντός του επικίνδυνου περιβάλλοντος, π.χ. σε πυρηνικές καταστροφές [5]. Τόσο οι ερευνητές όσο και οι επαγγελματίες χειριστές ρομπότ μαζί με τους διασώστες συμφωνούν ότι τα ρομπότ που διαθέτουν περισσότερες αυτόνομες δυνατότητες θα μπορούσαν να αποδειχθούν ευεργετικά κατά την εκτέλεση εργασιών. Μάλιστα, η χρησιμότητα τέτοιου είδους εφαρμογών έγινε ιδιαίτερα αισθητή στην πυρηνική καταστροφή της Φουκουσίμα καθώς ο στόλος των κινητών ρομπότ για κινητές καταστροφές δεν ήταν επαρκής για την αντιμετώπιση της κρίσης, ένα παράδοξο καθώς η Ιαπωνία είναι ένα από τα πιο φιλορομποτικά έθνη με ένα από τα πιο υψηλά επίπεδα στο τομέα του αυτοματισμού. Επιπροσθέτως, υπήρχε καθυστέρηση τριών εβδομάδων πριν μπορέσουν οι χειριστές να λειτουργήσουν τα διαθέσιμα κινητά ρομπότ καθώς ήταν απαραίτητη η εκπαίδευση των χειριστών πάνω σε αυτά. Τα κινητά ρομπότ ήταν ένα εργαλείο τόσο απαραίτητο που άλλα έθνη προτίνεται να λάβουν κατάλληλα μέτρα όσον αφορά τα πυρηνικά τους εργοστάσια και να λάβουν σαν παράδειγμα τα μαθήματα που έγιναν καθαρά ορατά στην πυρηνική καταστροφή της Φουκουσίμα [5].

Οι μεταβλητές προσεγγίσεις αυτονομίας όπως ο κοινόχρηστος/διαμοιρασμένος έλεγχος (Shared Control), η Ανθρώπινη Πρωτοβουλία (Human-Initiative) και ο έλεγχος Μικτής Πρωτοβουλίας (Mixed-Initiative) μπορούν να υιοθετηθούν για την αντιμετώπιση των προαναφερθέντων προβλημάτων συνδυάζοντας τις συμπληρωματικές δυνατότητες του ανθρώπινου χειριστή και της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence, A.I) του ρομπότ, ενώ εξουδετερώνουν τις αδυναμίες του καθενός. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό καθώς το επικρατέστερο παράδειγμα για την ανάπτυξη ρομπότ είναι να έχουμε πάντα έναν άνθρωπο εντός του βρόχου (Human in-the-loop).



Εικόνα 1. Κινητό ρομπότ εν δράση από την καταστροφή της Φουκουσίμα [5]

Η μειωμένη αντίληψη και η εκθετική αύξηση του νοητικού φόρτου εργασίας είναι ένα μείγμα που οδηγεί σε δραστικά υποβαθμισμένη απόδοση κατά τη διάρκεια των λειτουργιών. Η χρήση κοινόχρηστου/διαμοιρασμένου ελέγχου (Shared Control) μπορεί να επιτρέψει στον χειριστή να παραμείνει ταυτόχρονα επικεντρωμένος σε πολλές απαιτητικές εργασίες, ενώ το ρομπότ βοηθά ενεργά στην ασφαλή πλοήγηση μέσω του μη δομημένου περιβάλλοντος. Για παράδειγμα, η αποφυγή επικίνδυνων περιοχών και εμποδίων με τη χρήση κοινόχρηστου/διαμοιρασμένου ελέγχου θα μπορούσε να αποδειχθεί επωφελής για ισχυρή απόδοση κατά τη διάρκεια λειτουργιών σε δύσκολες συνθήκες, όπως τηλεπικοινωνιακές δυσκολίες μεταξύ του ρομπότ και του χειριστή (π.χ. καθυστέρηση στις εντολές του χειριστή). Επιπροσθέτως, η χρήση ενός τέτοιου ελεγκτή μπορεί να συμβάλει στην ανακούφιση μερικών από τις επιβαρύνσεις ελέγχου και, συνεπώς, στην ανακούφιση του νοητικού φόρτου εργασίας των χειριστών. Μετα-ειδική ανάλυση του πυρηνικού περιστατικού της Φουκουσίμα [6] και η καλά τεκμηριωμένη προσωπική εμπειρία ενός από τους χειριστές ρομπότ της Φουκουσίμα, όπως φημίζεται στο [5], επιβεβαιώνει ότι λόγω των υψηλών επιπέδων ακτινοβολίας, οι λειτουργίες ήταν πολύ περισσότερο δύσκολες και ο νοητικός φόρτος εργασίας παρέμεινε σε πολύ υψηλά επίπεδα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ότι οι χειριστές έπρεπε να φορούν στολές hazmat και 2-3 στρώματα γαντιών (Βλ. Εικόνα 2), γεγονός που επηρεάζει σημαντικά την ευαισθητοποίηση για την κατάστασή τους και την ικανότητα ελέγχου των ρομπότ.

1.1 Πλαίσιο, σκοπός και στόχοι της πτυχιακής εργασίας

Σε αυτήν την εργασία, παρουσιάζεται μια μέθοδος διαμοιρασμένου ελέγχου (Shared Control) για ασφαλή πλοήγηση σε επικίνδυνα και δυναμικά περιβάλλοντα. Ο προτεινόμενος ελεγκτής κοινής χρήσης συνδυάζει τις εντολές μιας μονάδας πλοήγησης αποφυγής εμποδίων VFH+ με τις εντολές κίνησης που παρέχονται από έναν χειριστή μέσω ενός χειριστηρίου. Οι εντολές κίνησης που παρέχονται από τον ελεγκτή οδηγούν σε ασφαλείς τροχιές ικανές να αποφεύγουν εμπόδια και επικίνδυνες περιοχές. Αυτή η εργασία συμβάλλει: α) δείχνοντας πώς μπορεί να τροποποιηθεί η συμβατική μέθοδος αυτόνομης πλοήγησης VFH+ ώστε να χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο του διαμοιρασμένου ελέγχου για απομακρυσμένες εργασίες επιθεώρησης και εξερεύνησης (δηλαδή τροποποιημένη ώστε να λειτουργεί με άγνωστους στόχους, να είναι αποτελεσματική σε ακατάστατα



Εικόνα 2. Χειριστές κινητών ρομπότ που δουλεύουν με στολές hazmat [5]

περιβάλλοντα, ενσωματωμένη με έναν άνθρωπο χειριστή), β) δείχνει πώς μπορεί να συνδυαστεί το τροποποιημένο VFH+ με τις προθέσεις ενός ανθρώπινου χειριστή, μέσω μιας συμβατικής διεπαφής τηλελειτουργίας, για την επίτευξη ενός συστήματος διαμοιρασμένου ελέγχου, γ) αποδεικνύοντας ξεκάθαρα ότι η προτεινόμενη μέθοδος διαμοιρασμένου ελέγχου ξεπερνά τη συμβατική τηλελειτουργία σε μια προσομοιωμένη αποστολή καταστροφής. Ένα πλεονέκτημα της προσέγγισής μας είναι η ευελιξία της που επιτρέπει μια απλή προσαρμογή της προκύπτουσας συμπεριφοράς ρομπότ χωρίς να αλλάζει την βασική αρχιτεκτονική του ελεγκτή. Αυτή η ευελιξία επιτρέπει στον κοινόχρηστο ελεγκτή να ενσωματώνεται εύκολα ως επιπρόσθετο επίπεδο αυτονομίας (Level of Autonomy, LOA) σε μεταβλητά συστήματα αυτονομίας όπως το Human-Initiate (δηλ. Ο άνθρωπος έχει την εξουσία να ξεκινήσει εναλλαγές μεταξύ διαφορετικών LOA) [7] ή Mixed-Initiate (δηλαδή τόσο ο άνθρωπος όσο και το ρομπότ μπορούν να ξεκινήσουν εναλλαγές LOA) [8] συστήματα. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα είναι η ικανότητα αντιμετώπισης δυναμικών περιβαλλόντων λόγω της αντιδραστικής φύσης της μεθόδου διαμοιρασμένου ελέγχου.

1.2 Μεθοδολογία

Σε αυτήν την εργασία έγινε εκτενής βιβλιογραφική έρευνα για την σφαιρική εικόνα της βέλτιστης τεχνολογίας πάνω σε μεθόδους τοπικής πλοήγησης (local navigation methods). Επιπροσθέτως, η παραμετροποίηση των αλγορίθμων και των μεθόδων έγινε με μία μίξη θεωρητικού υποβάθρου και ευρετικών μεθόδων για την βέλτιστη απόδοσή τους. Οι λεπτομέρειες πάνω στην παραμετροποίηση θα αναφέρονται όπου είναι σχετικές στην εργασία. Για την πειραματική αξιολόγηση, χρησιμοποιήθηκαν τρεις ειδικοί χειριστές του ρομποτικού οχήματος που εκτελούσαν την ίδια αποστολή σε εξομοιωμένη αρένα με τον επιβλέπων του πειράματος να έχει τοποθετήσει άγνωστα εμπόδια στους χρήστες και στον τροφοδοτημένο χάρτη. Επίσης, παρουσιάζεται καθυστέρηση στην πηγή εικόνας βίντεο, καθώς και καθυστέρηση στις εντολές του χρήστη. Στο πείραμα μετρήθηκαν δύο ειδών τιμών, ο χρόνος ολοκλήρωσης της αποστολής και ο αριθμός των συγκρούσεων του ρομποτικού οχήματος.

1.3 Περιορισμοί

Η έρευνα αυτή περιορίζεται στο γεγονός ότι όλα τα πειράματα και συνεπώς τα αποτελέσματα και συμπεράσματα που έχουν ληφτεί βασίζονται σε πιστή εξομοίωση του ρομποτικού οχήματος Husky και σε εξομοιωμένη αρένα στην πλατφόρμα Gazebo. Παρόλο που η πλατφόρμα Gazebo προσφέρει πιστή προσέγγιση όσον αφορά τους αισθητήρες, το ρομποτικό όχημα και την συμπεριφορά του, την γενικότερη φυσική της αρένας κ.α θα προτιμούσαμε να υπάρξει πείραμα βασισμένο στο πραγματικό ρομποτικό όχημα. Άλλοι περιορισμοί αφορούν τον ελεγκτή κοινόχρηστης/διαμοιρασμένης λειτουργίας που, όπως θα εξηγηθεί αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια, δεν έχει ακόμη φτάσει την βέλτιστη δυναμικότητα που μπορεί εν δυνάμει να προσφέρει, όπως δυναμική διαιτησία κατά την μίξη των εντολών ελέγχου.

1.4 Ορισμοί

SAR: Ακρονύμιο του όρου Search and Rescue που απευθύνεται σε αποστολές διάσωσης ανθρώπων σε περίπτωση σεναρίου καταστροφής. Μία παραλλαγή του όρου αυτού μπορεί να είναι το USAR, "Urban Search and Rescue" που απευθύνεται για διασώσεις σε αστικά περιβάλλοντα (π.χ διάσωση από κατεδαφισμένα κτίρια και κατασκευές).

Επικίνδυνα Περιβάλλοντα: Θεωρούμε ως επικίνδυνο περιβάλλον (ή επικίνδυνη περιοχή) οποιοδήποτε περιβάλλον που θέτει σε κίνδυνο την σωματική ακεραιότητα ή την υγεία του ανθρώπου που έχει προκύψει από κάποια καταστροφή. Η καταστροφή μπορεί να είναι φυσική (π.χ πυρκαγιά, πλημμύρα κ.α) ή αλλιώς να έχει προκύψει από αστοχίες κατασκευών ή κτιρίων οικιακής ή βιομηχανικής φύσεως.

Κινητά Ρομπότ: Με τον όρο κινητά ρομπότ αναφερόμαστε σε ρομποτικά οχήματα που έχουν την δυνατότητα κίνησης είτε σε έδαφος είτε στον αέρα που ελέγχονται κυρίως με τον χειριστή να είναι απομακρυσμένος σε κάποιο κέντρο ελέγχου.

Τηλελειτουργία: Με τον όρο 'τηλελειτουργία' αναφερόμαστε αυστηρά στην διαδικασία που ένας χειριστής ελέγχει άμεσα την πλοήγηση ενός κινητού ρομπότ χωρίς κανενός είδους υποβοήθησης από λοιπά υποσυστήματα.

Αυτονομία: Με τον όρο 'αυτονομία' αναφερόμαστε αυστηρά στην διαδικασία πλοήγησης του κινητού ρομπότ που προκύπτει καθαρά από τις εντολές που δίνονται από κάποιον αλγόριθμο/υποσύστημα πλοήγησης που ο χειριστής δεν μπορεί να επηρεάσει κατά την λειτουργία του.

Επίπεδο Αυτονομίας:

Τα επίπεδα αυτονομίας αναφέρονται σε ένα φάσμα που κυμαίνεται μεταξύ της καθαρής τηλελειτουργίας και της καθαρής αυτονομίας. Τα επίπεδα αυτονομίας είναι διακριτές επιλογές σε αυτό το φάσμα με την τηλελειτουργία και την αυτονομία να είναι επίσης διακριτά επίπεδα αυτονομίας. Για παράδειγμα, ο κοινόχρηστος/διαμοιρασμένος έλεγχος είναι ένα ξεχωριστό επίπεδο αυτονομίας από την τηλελειτουργία ή την αυτονομία.

Κοινόχρηστος έλεγχος:

Ο κοινόχρηστος ή αλλιώς διαμοιρασμένος έλεγχος αναφέρεται σε ένα επίπεδο αυτονομίας που ο χρήστης αλλά και κάποιο υποσύστημα συμβάλουν στην πλοήγηση του κινητού ρομπότ. Για το υπόλοιπο της εργασίας αυτής, θα αναφερόμαστε στον διαμοιρασμένο έλεγχο ως κοινόχρηστο έλεγχο.

Ανθρώπινη Πρωτοβουλία(Human Initiate):

Η έννοια της ανθρώπινης πρωτοβουλίας για τους δικούς μας σκοπούς αναφέρεται στην υπεροχή του ανθρώπου να παίρνει αποφάσεις για την λειτουργία του κινητού ρομπότ. Δεν είναι το ίδιο με την έννοια της τηλελειτουργίας ή γενικότερα των επιπέδων αυτονομίας καθώς μία απόφαση που μπορεί να πρέπει να ληφθεί είναι η επιλογή του επιπέδου αυτονομίας. Η ανθρώπινη πρωτοβουλία λοιπόν αναφέρεται στην γενικότερη ιεραρχία του ελέγχου και στην κυβερνητική.

Μικτή Πρωτοβουλία(Mixed Initiate):

Ομοίως όπως εξηγήθηκε στην 'Ανθρώπινη Πρωτοβουλία', η Μικτή Πρωτοβουλία επιτρέπει σε ένα σύστημα να λάβει και να εφαρμόσει δικές του αποφάσεις αλλά επίσης και να αρνηθεί αποφάσεις που έχουν ληφθεί από τον άνθρωπο.

Human in the loop:

Ο όρος Human in the loop ορίζεται ως ένα μοντέλο συστήματος που απαιτεί ανθρώπινη αλληλεπίδραση.

Τεχνητή Νοημοσύνη (A.I):

Η τεχνητή νοημοσύνη (AI) είναι η ικανότητα ενός υπολογιστή ή ενός ρομπότ που ελέγχεται από έναν υπολογιστή να κάνει εργασίες που συνήθως εκτελούνται από τον άνθρωπο, επειδή απαιτούν ανθρώπινη νοημοσύνη.

Αντίληψη: Με τον όρο 'Αντίληψη' εννοούμε την δυνατότητα του ανθρώπου να λαμβάνει πληροφορίες από το περιβάλλον του και να φτάσει σε ρητά συμπεράσματα. Στην εργασία, η αντίληψη του χειριστή παίζει μεγάλο ρόλο στις αποστολές κινητών ρομπότ καθώς δεν είναι δεδομένη.

Μέθοδοι Πλοήγησης: Οι 'μέθοδοι πλοήγησης' αναφέρονται σε διάφορες τεχνικές ή αλγόριθμους που μπορούν να εφαρμοστούν στο επίπεδο αυτονομίας της "Αυτονομίας".

Universal Robot Description Format : Μοντέλα σχεδίασης ρομπότ.

1.5 Οργάνωση, κεφαλαίωση, διάρθρωση της εργασίας

Σε αυτήν την εργασία θα δούμε την βιβλιογραφική έρευνα που έχει διεξαχθεί στο Κεφάλαιο 2 μαζί με κάποιες σημαντικές έννοιες της κινητής ρομποτικής που είναι απαραίτητες για την κατανόηση του πλαισίου εργασίας. Στο Κεφάλαιο 3 θα δούμε αναλυτικά τα επιμέρους εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία του τελικού συστήματος κοινόχρηστου/διαμοιρασμένου ελέγχου. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται το πειραματικό πρωτόκολλο και η πειραματική αξιολόγηση του συστήματος μας, καθώς και τα ευρήματά μας. Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζουμε την τελική ανάλυση των αποτελεσμάτων, ακολουθεί συζήτηση του πειράματος και αντλούμε τα συμπεράσματά μας για το ολικό σύστημα.

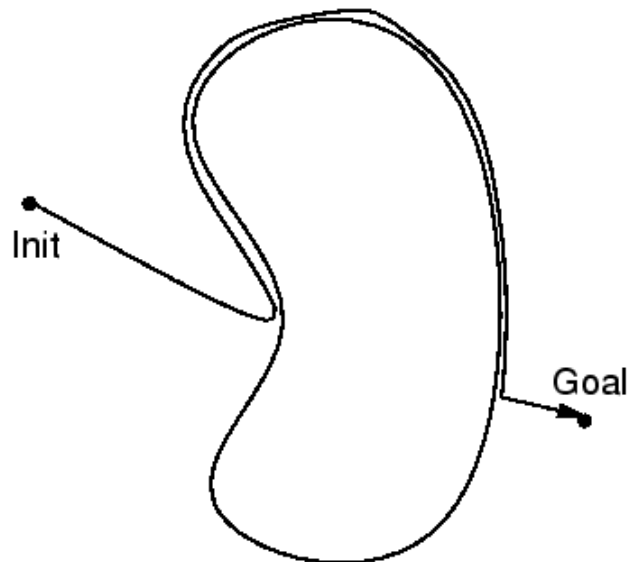
Κεφάλαιο 2

Θεωρητικό μέρος – Βιβλιογραφική έρευνα – Σχετικές προσπάθειες

Η πλοήγηση των ρομποτικών οχημάτων σε άγνωστα περιβάλλοντα είναι ένα από τα πιο μελετημένα προβλήματα στον τομέα της ρομποτικής. Είναι ζωτικής σημασίας να μπορούμε να γνωρίζουμε την θέση του ρομπότ σε σχέση με το περιβάλλον του ή/και με τον χώρο εργασίας του. Ορίζουμε σαν χώρο εργασίας ενός βραχίονα, όλες τις θέσεις του τρισδιάστατου χώρου που έχει πρόσβαση ο βραχίονας. Ομοίως, ο "χώρος εργασίας" ενός κινητού οχήματος θα είναι το επίπεδο ή ο χώρος που προκύπτει από την ικανότητα ανίχνευσης των αισθητηρίων του με βάση την ισχύ και το εύρος τους. Ένας από τους πολλούς λόγους που αυτή η γνώση είναι χρήσιμη, είναι η ικανότητα αποφυγής εμποδίων και συγκρούσεων της ρομποτικής μονάδας. Ένας από τους πιο απλούς τρόπους που μπορεί να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της πλοήγησης είναι η οικογένεια των αλγορίθμων Bug (π.χ Bug1, Bug2, Alg1, Alg2, DistBug, κ.α). Οι αλγόριθμοι Bug επιλύουν το πρόβλημα πλοήγησης αποθηκεύοντας μόνο έναν ελάχιστο αριθμό σημείων διέλευσης, αλλά χωρίς να δημιουργήσουν έναν πλήρη χάρτη του περιβάλλοντος. Εάν δεν υπάρχει διαδρομή λύσης, ο αλγόριθμος μπορεί να αναγνωρίσει αυτήν την κατάσταση και τερματίζει με την αναφορά ότι ο στόχος είναι απρόσιτος, αντί να περιπλανιέται ατέλειωτα. Σε αυτούς τους αλγόριθμους, αρκεί να υπάρχουν απλοί αισθητήρες, όπως υπέρυθρες, προκειμένου να γνωρίζουμε που βρίσκεται η άκρη του εμποδίου και το ρομπότ να εφαρμόσει την απλή στρατηγική "παράλληλης ακολουθίας τοίχου" (wall following strategy) μέχρι να επιτύχει τον στόχο που του έχει ανατεθεί, δηλαδή να φτάσει στον τελικό του προορισμό (Βλ. Εικόνα 3). Το μεγάλο μειονέκτημα της οικογένειας Bug όμως είναι πως λειτουργούν ικανοποιητικά μόνο σε ιδανικά περιβάλλοντα χωρίς θόρυβο, καθώς δεν έχουν ιδιότητες ανοχής θορύβου [9]. Το 1985 ο Khatib παρουσιάζει την προσέγγιση των "Τεχνητών δυναμικών πεδίων" που μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε ρομποτικούς βραχίονες, όσο και σε κινητά ρομπότ [10]. Διακρίθηκαν όμως σοβαρές ελλείψεις από ερευνητές πάνω στα "Τεχνητά δυναμικά πεδία" και με την πάροδο του χρόνου αναπτύχθηκε μία μεγάλη γκάμα μεθόδων αποφυγής εμποδίων. Παρά το μεγάλο εύρος των μεθόδων αποφυγής εμποδίων όμως, μπορούμε να κατατάξουμε τις τεχνικές αυτές σε δύο γενικές κατηγορίες.

- Τοπικές μέθοδοι αποφυγής εμποδίων
- Καθολικές μέθοδοι αποφυγής εμποδίων

Οι τοπικές μέθοδοι αποφυγής εμποδίων (*Local Navigation Methods*) είναι κατά κύριο λόγο αντιδραστικές μέθοδοι. Οι τοπικές μέθοδοι αποφυγής χρησιμοποιούν τα δεδομένα που λαμβάνουν από τους αισθητήρες του κινητού ρομπότ για να εντοπίσουν τυχόν εμπόδια στο περιβάλλον τους και το οδηγούν καταλλήλως για την αποφυγή τους. Αυτό σημαίνει πως αυτές οι μέθοδοι είναι δυναμικές και μπορούν να αντιμετωπίσουν τον κίνδυνο σύγκρουσης που παρουσιάζεται σε πραγματικό χρόνο. Η διαφοράς μεταξύ των τοπικών μεθόδων αποφυγής εμποδίων εμφανίζονται



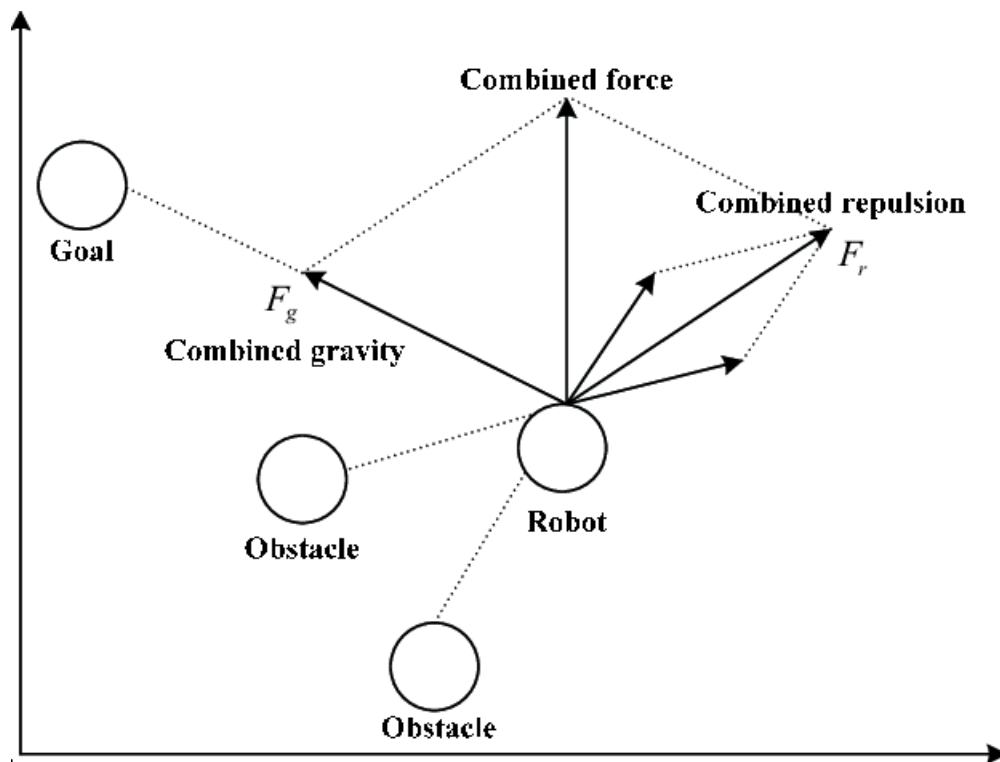
Εικόνα 3. Παράδειγμα αλγορίθμου BUG [11]

στον τρόπο που επεξεργάζονται τα δεδομένα των αισθητηρίων, τα συμπεράσματα που βγάζουν από αυτά τα δεδομένα και την λογική της δόμησης, της ιεραρχίας και των αποφάσεων της μεθόδου, δηλαδή κυρίως στην συνάρτηση κόστους της μεθόδου καθώς και τις παραμέτρους και μεγέθη που λαμβάνει υπόψιν της.

Οι καθολικές μέθοδοι αποφυγής εμποδίων (*Global Navigation Methods*) είναι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται όταν το κινητό ρομπότ έχει πρόσβαση σε χάρτη που αντικατοπτρίζει το περιβάλλον του ή έχει την δυνατότητα να δημιουργήσει έναν (π.χ με τεχνικές SLAM). Αυτές οι μέθοδοι έχουν ως λειτουργία τον σχεδιασμό διαδρομών στον χάρτη για την επίτευξη ενός στόχου B με έναρξη ένα σημείο A. Συνήθως οι καθολικές μέθοδοι διαφέρουν στον υπολογισμό βέλτιστης διαδρομής για την επίτευξη του στόχου. Οι καθολικές μέθοδοι έχουν στατικό χαρακτήρα και υπολογίζουν με βάση τον χάρτη που τους παρέχεται, δηλαδή οι διαδρομές που παράγουν δεν προσαρμόζονται σε αλλαγές πραγματικού χρόνου στο περιβάλλον.

Μπορεί σωστά να συμπεράνει κανείς πως ο συνδυασμός των δύο αυτών τύπων μεθόδων θα ήταν η βέλτιστη επιλογή, αλλά η επιλογή μεταξύ των δύο αυτών τύπων ή ακόμα και η δημιουργία ενός υβριδικού συστήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εφαρμογή μας. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί πως οι τοπικές μέθοδοι παίρνουν επίσης υπόψιν τους την προδιαγραφή ενός στόχου και σε μερικές είναι προϋπόθεση για να την ρητή λειτουργία τους. Παρομοίως, μερικές καθολικές μέθοδοι σχεδιάζουν την βέλτιστη δυνατή διαδρομή μέσα στον χώρο εργασίας του κινητού οχήματος χρησιμοποιώντας αλγορίθμους σαν τον A*. Στην δική μας εφαρμογή ενδιαφερόμαστε να μελετήσουμε μεθόδους που θα μας επιτρέψουν την δημιουργία ενός κοινόχρηστου ελεγκτή για την επίλυση του προβλήματος που θέσαμε.

Υπάρχει μια πληθώρα τοπικών μεθόδων αποφυγής εμποδίων που αντικατοπτρίζουν τις διάφορες προσπάθειες επίλυσης του προβλήματος στη βιβλιογραφία. Ωστόσο, αυτές οι μέθοδοι δημιουργήθηκαν με γνώμονα την αυτόνομη πλοήγηση ρομπότ. Αυτό σημαίνει πως μια εφαρμογή κοινόχρηστου ελέγχου έχει το πλεονέκτημα να διορθώσει πιθανές ελλείψεις σε ορισμένες από αυτές τις μεθόδους, αξιοποιώντας παράλληλα τα δυνατά τους σημεία. Για παράδειγμα, υπάρχουν κοινά προβλήματα όπως "παγίδες τοπικών ελαχίστων" και "ανέφικτοι στόχοι" σε μερικές από τις δημοφιλείς αυτόνομες μεθόδους πλοήγησης. Ενώ αυτές οι μέθοδοι γίνονται συνεχώς καλύτερες, απαιτούν ακόμη πιο εξελιγμένες λύσεις και υπολογιστική ισχύ για προβλήματα που ένας έμπει-



Εικόνα 4. Απεικόνιση τρόπου λειτουργίας των Τεχνητών δυναμικών πεδίων [12]

ρος χειριστής θα μπορούσε εύκολα να αντιμετωπίσει. Αυτό είναι ένα από τα πλεονεκτήματα του κοινόχρηστου ελέγχου για πλοήγηση σε αντίθεση με την αυτόνομη πλοήγηση μόνο. Σε αυτήν την ενότητα, θα περιγράψουμε μερικές από αυτές τις μεθόδους που σχετίζονται με το περιβάλλον μας (δηλαδή την αποφυγή εμποδίων και τον κοινό έλεγχο) και θα τις εξετάσουμε από αυτήν την προοπτική.

2.1 Τεχνητά δυναμικά πεδία - Artificial Potential Fields methods

Τεχνητά δυναμικά πεδία (PFMs ή APFs) είναι ένα δημοφιλές σύνολο μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση της αποφυγής εμποδίων σε κινητά ρομπότ και ρομποτικούς βραχίονες, που εισήχθησαν αρχικά από τον Khatib το 1985 [10] και είναι γνωστά για τα κομψά μαθηματικά και την απλή ιδέα των ελκυστικών και αποκρουστικών δυνάμεων που κατευθύνουν το ρομπότ κατάλληλα και προς τον στόχο αποφεύγοντας τα εμπόδια (Βλ. Εικόνα 4).

Η πρόσφατη βιβλιογραφία επικεντρώνεται κυρίως στη βελτίωση του αρχικού αλγορίθμου APF τροποποιώντας τις λειτουργίες έλξης και απώθησης. Για παράδειγμα, στο έργο των Rostami *et al* [13], το τροποποιημένο APF φαίνεται να παράγει βελτιωμένα αποτελέσματα σε προσομοιωμένα μη σύνθετα περιβάλλοντα. Οι Sfeir *et al* [14] επιχειρούν να βελτιώσουν τα APF ώστε να λειτουργούν σε άγνωστα περιβάλλοντα, εισάγοντας μια νέα μορφή αποθητικής δύναμης. Η προσέγγιση που ακολουθεί είναι η εφαρμογή ενός αλγορίθμου ελέγχου «Stop and Go», ένας βρόχος διακοπής κίνησης - περιστροφής του ρομπότ - που κινείται σε ευθεία γραμμή και ασχολείται με την ομαλότητα της τροχιάς. Ομοίως, οι Gu *et al* [15] αντιμετωπίζουν κλασικές αδυναμίες των APF εισάγοντας την τιμή της σχετικής απόστασης σε ένα τροποποιημένο διάλυμα απώθησης. Εφαρμόζουν επίσης έναν ελεγκτή ασαφούς λογικής που αναλαμβάνει όταν ανιχνεύει ότι το ρομπότ έχει πέσει σε μια παγίδα τοπικών ελαχίστων.

Ενώ τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα παραπάνω άρθρα είναι πρακτικά, δεν εκτελούνται απαραίτητα σε ρεαλιστικό πλαίσιο και η μέθοδος APF δεν εγγυάται την αποφυγή

παγίδων τοπικών ελαχίστων, ενώ απαιτείται παραμετροποίηση με δοκιμή και σφάλμα (trial and error) για σωστή διαμόρφωση.

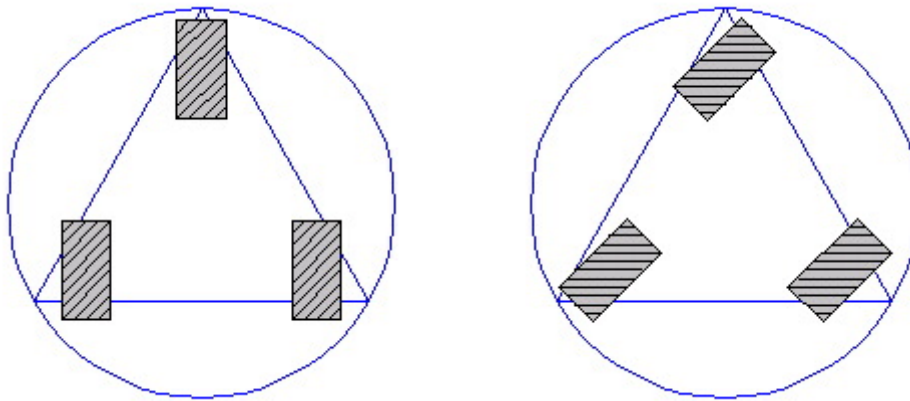
Ενώ τα APF λειτουργούν καλά για κινητά ρομπότ, δεν είναι κατάλληλα για κάτι περισσότερο από αποφυγή βασικών εμποδίων και ιδιαίτερα για αντιδραστική πλοήγηση σε πραγματικό χρόνο. Από όσα γνωρίζει ο συγγραφέας και με την βέλτιστη των ικανοτήτων του έρευνα, οι ανεπάρκειες των APF συνεχίζουν να δημιουργούν πρόβλημα, όπως "ο στόχος πλοήγησης δεν είναι εφικτός" μερικές φορές, το ρομπότ είναι ευαίσθητο σε παγίδες τοπικού ελαχίστου (π.χ. στροφές τύπου U) και το πιο σημαντικό, ανεπιθύμητη ταλαντωτική συμπεριφορά [16]. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι τα μειονεκτήματα δεν μπορούν να επιλυθούν, εκτός εάν ο βασικός αλγόριθμος αναθεωρηθεί εκτενώς ή αναθεωρηθεί πλήρως. Επιπλέον, δύο βασικές παραδοχές που κάνουν τα APF είναι ότι υπάρχει πάντα ένας δεδομένος στόχος πλοήγησης και ότι το περιβάλλον είναι πάντα γνωστό. Αντίθετα, στον στοχευμένο τομέα (π.χ. απόκριση σε καταστροφές), το ρομπότ συχνά χρειάζεται να χτίζει έναν χάρτη σταδιακά, χωρίς προκαθορισμένο στόχο πλοήγησης και αποφεύγοντας τα προηγουμένως μη παρατηρημένα εμπόδια. Τέλος, η αποφυγή εμποδίων υπολογίζοντας μόνο το άθροισμα των εφαρμοζόμενων δυνάμεων δεν παρέχει την απαιτούμενη ευελιξία για τον καθορισμό διαφορετικών συμπεριφορών για το ρομπότ που θα χρησιμοποιηθεί στον κοινό έλεγχο.

2.2 Μέθοδος δυναμικού παραθύρου (Dynamic Window Approach)

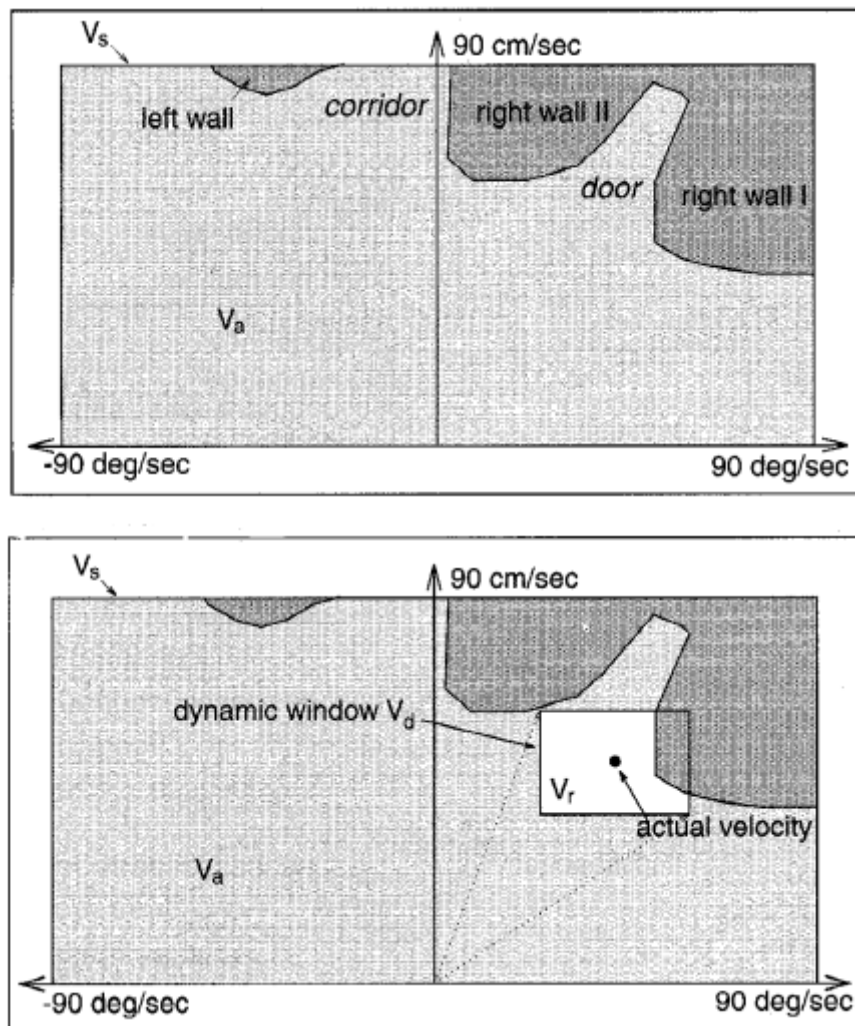
Το δυναμικό παράθυρο [17] είναι μέθοδος που αξιοποιεί τον "χώρο ταχυτήτων". Στον χώρο ταχυτήτων η πρώτη διάσταση αντιπροσωπεύει μια γωνιακή ταχύτητα του κέντρου βάρους του ρομπότ και η δεύτερη διάσταση είναι μια ανιχνεύσιμη ταχύτητα του ρομπότ. Το δυναμικό παράθυρο είναι σχεδιασμένο να αντιμετωπίζει τους περιορισμούς που επιβάλλονται για ρομπότ σε συνωστισμένα περιβάλλοντα από περιορισμένες ταχύτητες και επιταχύνσεις, και προέρχονται απευθείας από τη δυναμική κίνησης κινητών ρομπότ συγχρονισμένης οδήγησης. Τα ρομπότ συγχρονισμένης οδήγησης είναι μια διαμόρφωση δύο κινητήρων, τριών ή τεσσάρων τροχών, όπου ένας κινητήρας περιστρέφει όλους τους τροχούς για να παράγει κίνηση και ο άλλος κινητήρας γυρίζει όλους τους τροχούς για να αλλάξει κατεύθυνση (Βλ. Εικόνα 5). Η μέθοδος θεωρεί περιοδικά μόνο ένα μικρό χρονικό διάστημα κατά τον υπολογισμό της επόμενης εντολής διεύθυνσης για να αποφευχθεί η τεράστια πολυπλοκότητα του γενικού προβλήματος σχεδιασμού κίνησης. Στο δυναμικό παράθυρο η αναζήτηση των εντολών ελέγχου του ρομπότ πραγματοποιείται απευθείας στο χώρο των ταχυτήτων. Δηλαδή, η μέθοδος λαμβάνει υπόψιν του πορείες που αποφεύγουν τα εμπόδια σε ένα μικρό παράθυρο για κάθε χρονική στιγμή (Βλ. Εικόνα 6). Σε αυτό το παράθυρο όλες δυνατές πορείες και ταχύτητες είναι γνωστές και διαθέσιμες στην μέθοδο και θα επιλέξει την ασφαλέστερη πορεία και ταχύτητα προς τον στόχο αποφεύγοντας τα εμπόδια. Η δυναμική του ρομπότ ενσωματώνεται στη μέθοδο με τη μείωση του χώρου αναζήτησης σε αυτές τις ταχύτητες που είναι προσβάσιμες υπό τους δυναμικούς περιορισμούς. Στην εφαρμογή μας δεν χρησιμοποιούμε αυτήν διάταξη κινητών ρομπότ όπως θα δούμε παρακάτω και μας ενδιαφέρει να εξετάσουμε μεθόδους ανθεκτικές σε θόρυβο και εξωτερικά περιβάλλοντα. Ένας ακόμη λόγος που μας αποθαρρύνει να χρησιμοποιήσουμε αυτήν την μέθοδο είναι πως δεν υποστηρίζει την δυνατότητα τροποποίησης όπως θα θέλαμε. Τέλος, η μέθοδος δυναμικού παραθύρου κάνει επίσης την παραδοχή πως ο στόχος και το περιβάλλον μας είναι γνωστά. Για αυτόν τον λόγο δεν θα επιλεγεί για την εφαρμογή μας, αλλά συμπεριλαμβάνεται στο θεωρητικό μας υπόβαθρο για πληρότητα.

2.3 Ιστογραμμικές μέθοδοι - Histogramic methods

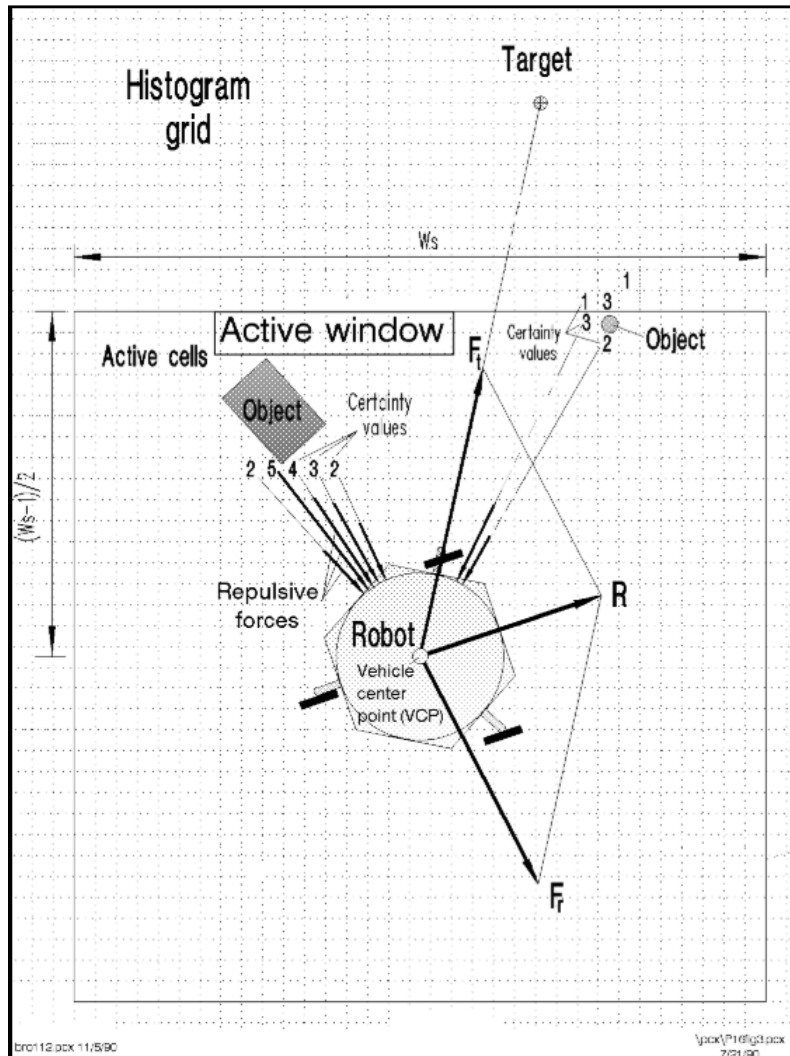
Σε μια προσπάθεια αποκατάστασης των αδυναμιών των APF, η μέθοδος Virtual Force Field (VFF) προτάθηκε από τους *Borenstein and Koren* [19]. Στο VFF [20] η προκύπτουσα κατεύθυνση της κίνησης του ρομπότ δεν δίνεται από το απλό άθροισμα των ελκυστικών και αποκρουστικών



Εικόνα 5. Διάταξη ρομπότ συγχρονισμένης οδήγησης [18]



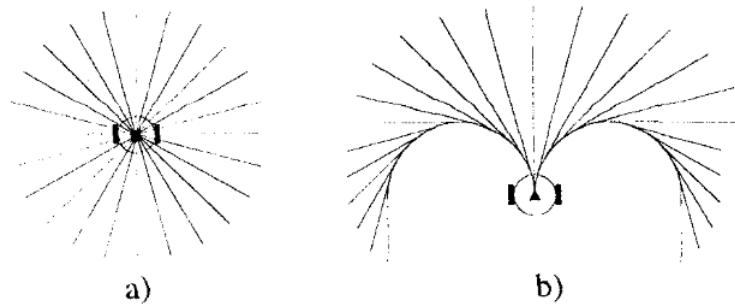
Εικόνα 6. Πάνω Πεδίο ταχυτήτων Κάτω Δυναμικό παράθυρο [17]



Εικόνα 7. Παράδειγμα αλγορίθμου VFF στα πλαίσια λειτουργίας κινητού ρομπότ [22]

δυνάμεων, αλλά καθορίζεται ως ένα από τα περάσματα σε ένα δισδιάστατο καρτεσιανό πλέγμα, που ονομάζεται πλέγμα ιστογράμματος C (Βλ. Εικόνα 7). Ωστόσο, πολλές αδυναμίες του VFF (π.χ. έντονη ταλαντωτική συμπεριφορά, αναποτελεσματικότητα χαρτογράφησης σε πραγματικό χρόνο) οδήγησαν στην ανάπτυξη του Vector Field Histogram (VFH) [21].

Ως αποτέλεσμα, η ανθεκτικότητα του VFH επιτρέπει τη συνεχή και γρήγορη κίνηση του κινητού ρομπότ χωρίς να σταματά στα εμπόδια. Στο VFH, τα εμπόδια δεν αποπνέουν μια απωστική δύναμη όπως κάνουν στο VFF, αλλά έχει κατασκευαστεί ένα διανυσματικό πεδίο που αποφεύγει τα εμπόδια που καταλαμβάνουν το πλέγμα του ιστογράμματος. Οι ιστογραμμικές μέθοδοι που παρουσιάζονται σε αυτήν την ενότητα επεκτείνονται και βελτιώνονται σε σχέση με την αρχική μέθοδο VFH καθώς οι Ιστογραμμικές μέθοδοι έχουν το πλεονέκτημα πως είναι εύκολα τροποποιήσιμες. Η απόδειξη είναι η ποικιλία των μεθόδων αυτών που μπορεί να βρει κανείς στην βιβλιογραφία καθώς εμείς παρουσιάζουμε μερικούς από τους πιο εδραιωμένους ιστογραμμικούς αλγόριθμους παρακάτω. Η ιδιότητα αυτή των ιστογραμμικών αλγορίθμων είναι και ο λόγος που δείχνουμε προτίμηση προς αυτούς, καθώς μπορούμε να τροποποιήσουμε καταλλήλως τις μεθόδους για τις ανάγκες του ελεγκτή που μας ενδιαφέρει.



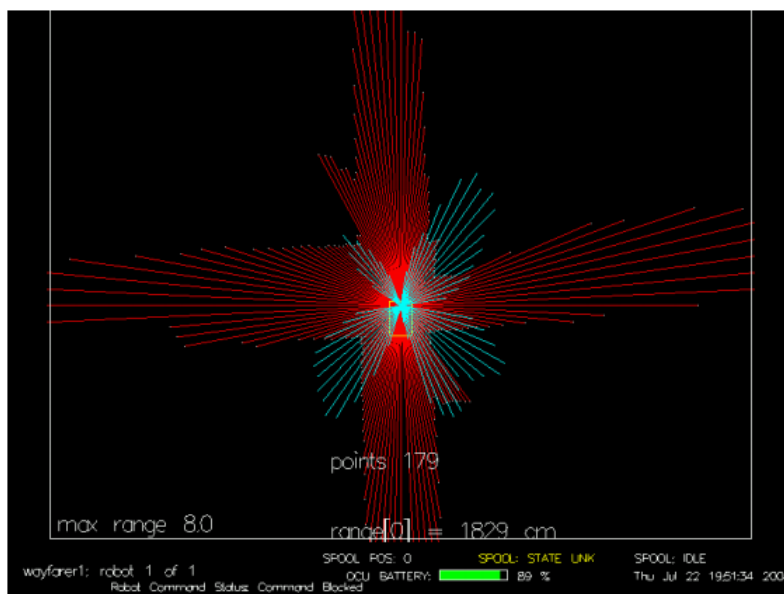
Εικόνα 8. Προσέγγιση των τροχιών a) μη δυναμικές b) δυναμικές [23]

2.3.1 VFH+

Ο αλγόριθμος **VFH+** [23] αντιμετώπισε πολλά ζητήματα του προκατόχου του (δηλαδή VFH) λαμβάνοντας υπόψιν του τα φυσικά χαρακτηριστικά και την κινηματική του ρομπότ. Μειώνει τον αριθμό των υπολογιστικών δεδομένων που απαιτούνται για την αναπαράσταση εμποδίων χρησιμοποιώντας ένα δισδύαστο πλέγμα για τον εντοπισμό εμποδίων και κατασκευάζοντας τριών ειδών πολικά ιστογράμματα για την αναπαράστασή τους. Στην τελευταία φάση του αλγορίθμου βρίσκεται η συνάρτηση κόστους που λαμβάνει την απόφαση της κατεύθυνσης, η οποία είναι βελτιωμένη σε σχέση με τους VFH και VFF, δεσμεύοντας την επιλεγμένη πορεία. Αυτό το γεγονός είναι ένα από τα πλεονεκτήματα του VFH+ καθώς το ρομπότ δεν ταλαντεύεται όταν βρίσκει περισσότερες από μία διαθέσιμες διαδρομές. Λαμβάνοντας τα φυσικά χαρακτηριστικά του ρομπότ, η μέθοδος μπορεί να παράγει δυναμικές τροχιές (Βλ. Εικόνα 8) με βάση την ταχύτητα κίνησης του ρομπότ, την απόσταση και την μέγιστη επιτρεπόμενη γωνία. Επιπροσθέτως, η μέθοδος μεγενθύνει την περιοχή που βρίσκονται τα εμπόδια ώστε το ρομπότ να μπορεί να τα αποφύγει νωρίτερα. Ένα παράδειγμα της δύναμης της μεθόδου μπορεί να φανεί από το άρθρο των δημιουργών της Iwan Ulrich and Johann Borenstein [23] καθώς η μέθοδος ήταν υπεύθυνη για την πλοήγηση τυφλών ατόμων στο ρομποτικό όχημα GuideCane σε μη δομημένα και άγνωστα περιβάλλοντα. Η μέθοδος VFH δρα ως βάση για πολλές τροποποιημένες ιστογραμμικών αλγορίθμων όπως ήδη αναφέραμε, αλλά η βελτιωμένη μέθοδος VFH+ είναι η πιο δημοφιλής στην βιβλιογραφία της κινητής ρομποτικής. Παρ' όλα αυτά, η μέθοδος αποτελεί μια καθαρά αντιδραστική μέθοδο πλοήγησης, και συνεπώς είναι επιρρεπής σε περιπτώσεις που μπορεί να οδηγήσει το ρομπότ σε αδιέξοδα. Ωστόσο, σε αντίθεση με το VFH, η ρύθμιση των παραμέτρων της είναι ευκολότερη και έχει το πλεονέκτημα πως μία κακή διαμόρφωση δεν θα οδηγήσει σε καταστροφικά αποτελέσματα [24].

2.3.2 Scaled VFH (SVFH)

Η μέθοδος **SVFH** [25] είναι επέκταση της μεθόδου VFH και διαφέρει στο γεγονός πως οι τιμές πληρότητας στα κελιά του πλέγματος C (ενεργού παραθύρου ή ιστογραμμικού πλέγματος) κατανέμονται σε γειτονικούς κάδους. Αυτή η μέθοδος δεν χρησιμοποιεί μόνο τις τιμές του αντίστοιχου τομέα για τη δημιουργία του ιστογράμματος, αλλά χρησιμοποιεί επίσης τις τιμές των παρακείμενων τομέων με βάση κάποια προκαθορισμένη απόσταση. Ένα εμπόδιο που μπορεί να αποφεύγεται εύκολα σε μεγάλη εμβέλεια μπορεί να απαιτήσει πιο δραστικούς χειρισμούς αποφυγής σε μικρή απόσταση, και αυτό αντικατοπτρίζεται στις τιμές κάδου του SVFH. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η ταχύτερη και σταδιακή αποφυγή εμποδίων. Ένα άλλο πλεονέκτημα του αλγορίθμου αυτού είναι πως έχει την δυνατότητα να εντοπίζει εμπόδια τα οποία το κινητό ρομπότ είναι ικανό να σκαρφαλώσει. Καθώς αυτή η ιδιότητα είναι χρήσιμη στο πλαίσιο της εφαρμογής υπήρξε σκέψη όσον αφορά την επιλογή της μεθόδου για το σύστημα μας, αλλά αποφασίσαμε πως δεν είναι ωφέλιμη καθώς είναι επιρρεπής σε θόρυβο. Ένα ακόμα μειονέκτημα είναι πως η μέθοδος μπορεί

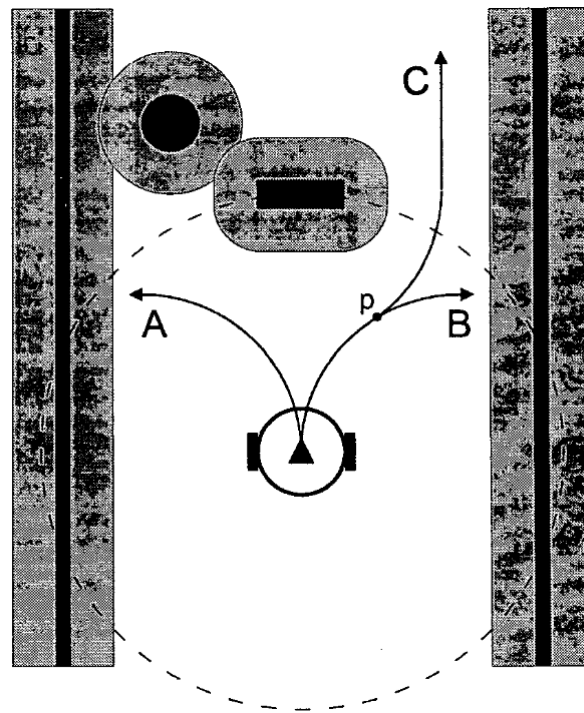


Εικόνα 9. Κάδοι της μεθόδου SVFH σε σενάριο διασταύρωσης [25]

να μην εντοπίσει ανυψωμένα εμπόδια (π.χ σασί αυτοκινήτων).

2.3.3 VFH*

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί η τοπική φύση του VFH+, οι Ulrich et al. [26] πρότειναν τη μέθοδο **VFH***. Ο αλγόριθμος VFH* συνδυάζει το VFH+ και τον παγκόσμιο προγραμματιστή A* προκειμένου να αποτρέψει την παγίδευση του ρομπότ ή τη λήψη ανεπιθύμητων αποφάσεων. Ένα παράδειγμα ανεπιθύμητης απόφασης στις καθαρές τοπικές μεθόδους παρουσιάζεται στην Εικόνα 10. Τα εμπόδια απεικονίζονται ως μαύρο και οι απαγορευμένες ζώνες ως γκρι. Η κατεύθυνση A είναι φαινομενικά ανοιχτός δρόμος στην αρχή αλλά εάν το ρομπότ την ακολουθήσει θα βρεθεί σε αδιέξοδο. Η αντικειμενικά σωστή κατεύθυνση είναι η B. Η στρατηγική VFH+ κατασκευάζει ένα πολικό ιστόγραμμα γύρω από την τρέχουσα θέση του ρομπότ, αναζητά ανοίγματα στο ιστόγραμμα, και στη συνέχεια αποφασίζει μεταξύ τριών λογικών κατευθύνσεων για κάθε άνοιγμα. Το VFH+ διορίζει επιπλέον μία αξία κόστους για κάθε μια από αυτές τις βασικές κατευθύνσεις. Το VFH+ σε αυτό το σημείο επιλέγει τη βασική πορεία με το λιγότερο κόστος ως την νέα του κατεύθυνση. Αντίθετα, το VFH* αναλύει τις συνέπειες των κατευθύνσεων για όλες τις υποψήφιες κατευθύνσεις πριν πάρει μια τελική επιλογή για τη νέα κατεύθυνση κίνησης. Για κάθε πρωτεύουσα υποψήφια κατεύθυνση, το VFH* υπολογίζει τη νέα θέση και προσανατολισμό που θα είχε το ρομπότ μετά τη μετακίνηση για μια προβλεπόμενη απόσταση βημάτων. Δηλαδή, το VFH* θα εκτελεί τον αλγόριθμο VFH+ σε όλες τις μελλοντικές θέσεις του ρομπότ με βάση την βέλτιστη πορεία σε ένα ορισμένο βάθος αναζήτησης. Στην Εικόνα 11 μπορούμε να δούμε τις τροχιές του ρομπότ που πραγματοποιήθηκαν κατά την διάρκεια του πειράματος των Ulrich et al [26] στο άρθρο τους. Στο σενάριο a) φαίνεται πως το ρομπότ έκανε την λάθος απόφαση να αποφύγει τα εμπόδια από αριστερά και να βρεθεί σε αδιέξοδο. Αυξάνοντας το βάθος αναζήτησης, βλέπουμε πως το ρομπότ παίρνει όλο και πιο ρητές αποφάσεις με πιο βελτιστοποιημένες τροχιές. Έτσι με αυτόν τον τρόπο, μπορούμε να αποτρέψουμε σενάρια όπως αυτό που παρουσιάζεται στην Εικόνα 10. Για αυτόν τον λόγο υπήρχε η ανάγκη της εφαρμογής ιδιοτήτων καθολικών μεθόδων για την αντιμετώπιση προβλημάτων σαν αυτό. Σε αυτόν τον τομέα η μέθοδος VFH* είναι οφέλιμη. Ωστόσο, απαιτεί προσεκτικό συντονισμό παραμέτρων και επιβαρύνεται από ένα βαρύ υπολογιστικό φορτίο. Επιπλέον, θεωρείται ότι ο παγκόσμιος σχεδιαστής έχει πρόσβαση σε έναν χάρτη που δεν ισχύει πάντα για ένα ρομπότ αντιμετώπισης καταστροφών.



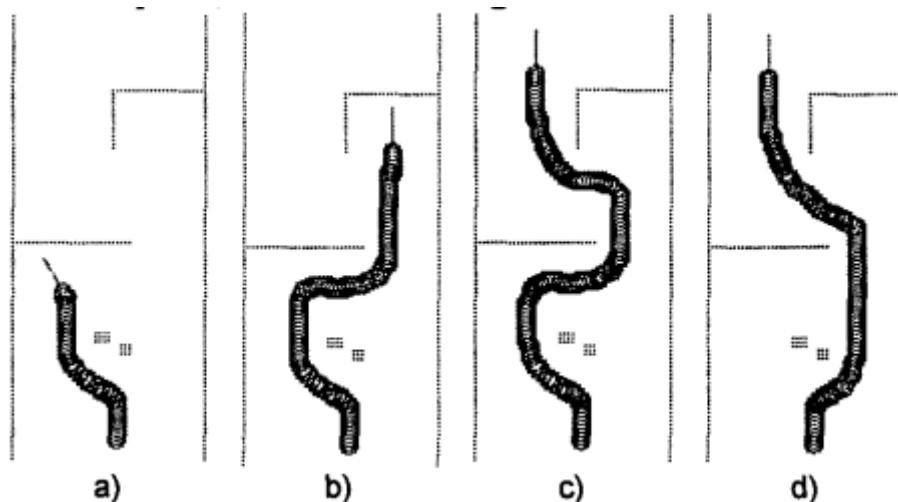
Εικόνα 10. Σενάριο αδυναμίας των μεθόδων τοπικής πλοήγησης [26]

2.3.4 Traversability Field Histogram (TFH)

Ο αλγόριθμος **TFH** [27] καθορίζει την πορεία και την ταχύτητα ενός κινητού ρομπότ με βάση έναν χάρτη διαβασιμότητας. Ο αλγόριθμος μετασχηματίζει τον χάρτη αυτόν σε ένα μονοδιάστατο καταγεγραμμένο ιστογράμμο και υπολογίζει τις κατάλληλες εντολές κίνησης με βάση το ιστογράμμο αυτό. Ο αλγόριθμος αποτελείται από τέσσερις κύριες ενότητες: Χαρτογράφηση εδάφους, Ανάλυση διασταύρωσης εδάφους (ΤΤΑ), Προγραμματισμός διαδρομής και Έλεγχος κίνησης. Ο χάρτης διαβασιμότητας ΤΤΑ παράγεται υπολογίζοντας τις πλαγιές και την τραχύτητα του εδάφους. Η μέθοδος TFH έχει το πλεονέκτημα πως δημιουργήθηκε για περιβάλλοντα εξωτερικού χώρου και παρουσιάζει μείωση της ταχύτητας του κινητού ρομπότ στην παρουσία ενός εμποδίου. Σε συνδυασμό με το τυπικό πλέγμα ιστογράμματος επιτρέπει την πλοήγηση ρομπότ σε υπαίθριο περιβάλλον αλλά για ρομπότ που κινούνται σε επίπεδες επιφάνειες σε εσωτερικούς χώρους, δεν έχει μεγάλη σημασία [28]. Αλλά ομοίως με την μέθοδο VFH* η μέθοδος TFH υποθέτει πως ένας χάρτης της περιοχής του ρομπότ είναι διαθέσιμος αλλά επίσης βασίζεται στην δημιουργία του χάρτη διαβασιμότητας ΤΤΑ. Η χρήση καθολικών στοιχείων στην μέθοδο αυτή καθώς και η εξάρτηση της από έναν χάρτη εδάφους είναι ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά της μεθόδου για την εφαρμογή εξού και απορίπτεται.

2.3.5 IVFH*

Η μέθοδος IVFH* [29] είναι μια βελτιωμένη εκδοχή της μεθόδου VFH* που δίνει την επιπλέον δυνατότητα να αντιμετωπίζει κινούμενα εμπόδια, καθώς σε ένα πραγματικό περιβάλλον δεν υπάρχουν μόνο στατικά εμπόδια, αλλά μπορεί να προκύψουν κινούμενα εμπόδια, άνθρωποι ή άλλα ρομπότ. Για να το επιτύχει αυτό, η μέθοδος διασπάει την επιλεγμένη πορεία του ρομπότ σε ένα σύνολο σημείων, με το κάθε σημείο να έχει την δυνατότητα να παραμορφωθεί την προβλεπόμενη τροχιά του ρομπότ σε πραγματικό χρόνο καθώς δέχεται απωθητικές δυνάμεις από το μεν κινούμενο εμπόδιο. Η συγκεκριμένη μέθοδος προσφέρει μεγάλη χρηστικότητα στην εφαρμογή

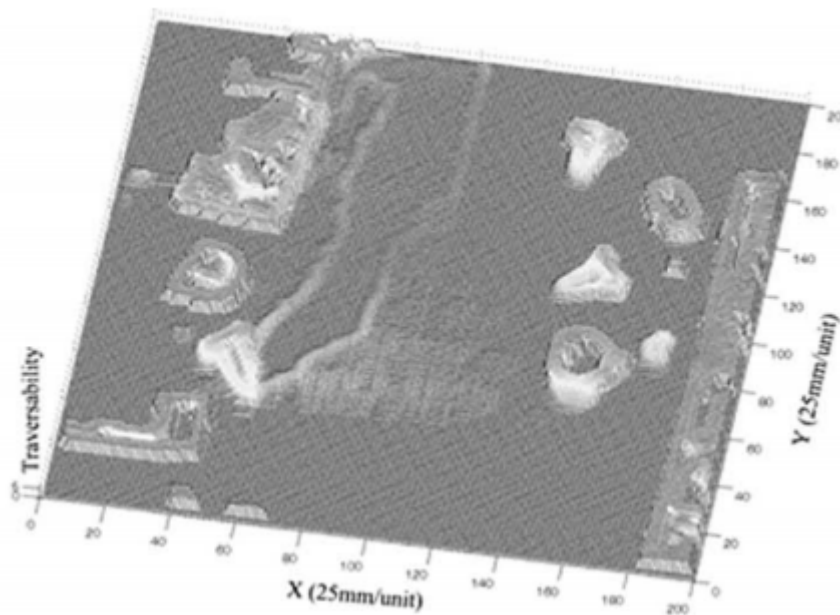


Εικόνα 11. Παράδειγμα λειτουργίας VFH* με αυξανόμενο βάθος αναζήτησης [26]

μας σε σχέση με την μέθοδο VFH* μόνη της. Παρ'όλα αυτά είναι εκτός του πεδίου αυτού του εγγράφου και θα φυλαχθεί για μελλοντική μελέτη.

2.3.6 VFH*TDT

Οι Babinec et al. [28] πρότειναν τη μέθοδο **VFH*TDT** που είναι ένα σύνολο τροποποιήσεων στις μεθόδους VFH+ και VFH*. Οι τροποποιήσεις του VFH+ σχετίζονται με τη βελτίωση της απόδοσης υπό την έννοια των ομαλών κινήσεων και των ισορροπημένων αντιδράσεων στα εμπόδια. Μια σημαντική αλλαγή εμφανίζεται στον υπολογισμό των τιμών ιστογράμματος, ο οποίος λαμβάνει υπόψη του τη χρήση του αποστασιομετρικού λέιζερ. Στην περίπτωση του VFH*, οι τροποποιήσεις έχουν επεκτείνει ένα πεδίο εφαρμογής σε μη στατικά περιβάλλοντα και έχουν επιτρέψει την ταυτόχρονη αποφυγή στατικών και κινούμενων εμποδίων. Η μέθοδος VFH+ είναι ένα συστατικό της VFH*. Επομένως, όλες οι αλλαγές που γίνονται στο VFH+ μπορούν να μεταφερθούν σε τροποποιημένο VFH*. Εισάγεται ολόκληρη η μέθοδος κάτω από το όνομα VFH*TDT. Αυτό καθιστά την μέθοδο VFH*TDT ικανή να αντιμετωπίσει δυναμικά περιβάλλοντα με κινούμενα εμπόδια. Για να γίνει η αναπαράσταση των κινούμενων εμποδίων, η μέθοδος παίρνει την θέση του ρομπότ την στιγμή που το εντόπισε, ένα πίνακα με τα σημεία της σάρωσης του λέιζερ και τον αριθμό των σημείων της σάρωσης του λέιζερ. Επίσης, χρησιμοποιώντας αισθητήρια κίνησης λαμβάνει υπόψη της την ταχύτητα και τον προσανατολισμό του εμποδίου που εντοπίστηκε. Αλλάζοντας το σημείο αναφοράς του ρομπότ στην κατεύθυνση που εντοπίστηκε το κινούμενο εμπόδιο είναι δυνατό να γίνει προσομοίωση και να προβλεφτεί η κίνηση του κινούμενου εμποδίου. Η μέθοδος επίσης υπολογίζει την χρονική διαφορά ανάμεσα στην κατάσταση που βρίσκεται το εμπόδιο σε σχέση με την προβλεπόμενη κίνηση του. Τα μέρη της μεθόδου VFH* τροποποιούνται έτσι ώστε να έχει την δυνατότητα να μπορεί να προσαρμόζεται στις προβλέψεις των κινούμενων εμποδίων ακόμα και εκτός του ενεργού παραθύρου του ρομπότ, καθώς οι κλασσικές μέθοδοι VFH+ και VFH* δεν υπολογίζουν για κινούμενα εμπόδια που μπορεί να κατευθύνονται προς το ρομπότ. Συνήθως στις εφαρμογές κινητών ρομπότ χρειάζεται να γίνει επανασχεδιασμός της διαδρομής ή να κάνουν εναλλαγές μεταξύ διαφορετικών αλγορίθμων για να αποφύγουν σύγκρουση είτε με στατικά είτε με κινούμενα εμπόδια. Η μέθοδος VFH*TDT το χειρίζεται ταυτόχρονα. Πρόκειται για την πιο εξελιγμένη μέθοδο έως τώρα που γνωρίζει ο συγγραφέας. Ακριβώς όμως επειδή η πολυπλοκότητα της μεθόδου είναι μεγάλη για ένα προκαταρκτικό σύστημα σαν το δικό μας, η επιλογή μιας τόσο εξελιγμένης μεθόδου αυτονομίας δεν είναι απαραίτητα ρητή επιλογή για ένα σύστημα κοινόχρηστου ελεγκτή.



Εικόνα 12. Χάρτης διαβασιμότητας [27]

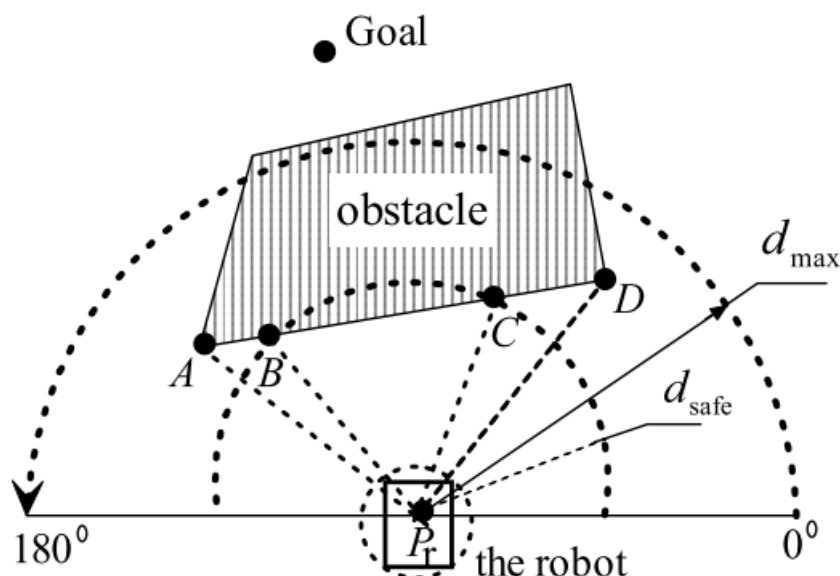
2.3.7 VPH

Η μέθοδος Vector Polar Histogram (**VPH**) [24] αξιοποιεί την ακρίβεια του ανιχνευτή λέιζερ (laser rangefinder) και μειώνει τον αριθμό των απαραίτητων βημάτων για την αξιόπιστη ανίχνευση της κατανομής των εμποδίων με τη δημιουργία ενός πλέγματος βεβαιότητας για αναπαράσταση εμποδίων. Το κινητό ρομπότ μπορεί να χρησιμοποιήσει ραντάρ λέιζερ για να εντοπίσει εμπόδια μπροστά του. Σε κάθε κύκλο ανίχνευσης, το ραντάρ μεταδίδει μια δέσμη λέιζερ και λαμβάνει την αντανάκλασή του από μια επιφάνεια. Με τον υπολογισμό του χρόνου μεταξύ μετάδοσης και λήψης, το ραντάρ μπορεί να πάρει την κατανομή του εμποδίου. Έτσι, αυτή η τροποποίηση δεν δημιουργεί ιστογραμμικό πλέγμα, αλλά χρησιμοποιεί μια μεταβλητή τιμή κατωφλίου με βάση την επίδραση των εμποδίων στις αντίστοιχες κατευθύνσεις. Το όριο αυτό χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του πολικού ιστογράμματος για την αναπαράσταση των εμποδίων. Εκτεταμένες δοκιμές σε ένα κινητό ρομπότ έδειξαν ότι ο αλγόριθμος είναι αρκετά γρήγορος για αποφυγή εμποδίων σε πραγματικό χρόνο, είναι υπολογιστικά αποτελεσματικός, εύρωστος, δεν είναι ευαίσθητος σε παρερμηνείες δεδομένων και επιτρέπει γρήγορη συνεχή κίνηση. Ένα άλλο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι οι παράμετροι διαμόρφωσης μειώνονται σε σύγκριση με το VFH+. Παρ'όλα αυτά η μέθοδος δεν φαίνεται να είναι στον ίδιο βαθμό διαδεδομένη στην βιβλιογραφία όσο η μέθοδος VFH+. Βάσει της γνώσης του συγγραφέα, η μέθοδος δεν έχει αρκετά παραδείγματα υλοποίησης εάν και υπάρχουν αναφορές σε αυτήν όπως [28]. Για αυτόν τον λόγο η μέθοδος δεν θα προτιμηθεί για την υλοποίηση που παρουσιάζεται σε αυτήν την εργασία αλλά θα παραμείνει αντικείμενο για μελλοντική μελέτη και έρευνα.

2.3.8 VPH+

Το **VPH+** [30] είναι μια επέκταση του VPH και βελτιώνει την ικανότητα πλοήγησης σε συνωστισμένα περιβάλλοντα. Η μέθοδος VPH+ προσθέτει μια νέα στρατηγική που ομαδοποιεί τα σημεία εμποδίων σε μπλοκ εμποδίων, έτσι ώστε τα εμπόδια με στενή σχέση να θεωρούνται ως σύνολο. Σύμφωνα με τη μέθοδο VPH+, πιστεύεται ότι τα τέσσερα σημεία, A, B, C και D ανήκουν στο ίδιο μπλοκ εμποδίων και η γραμμή AD χρησιμοποιείται για να αντιπροσωπεύει το μπλοκ

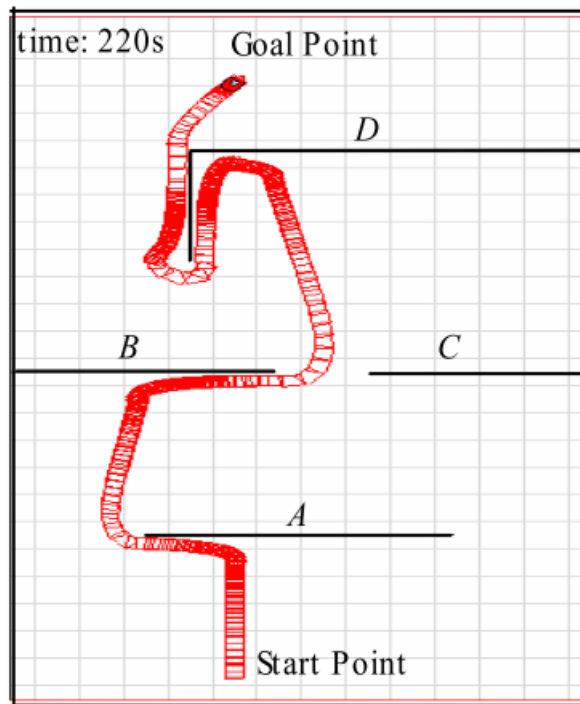
εμποδίων. Ως αποτέλεσμα, το ρομπότ μπορεί να κάνει ένα πιο επιθυμητό σχέδιο διαδρομής και η τροχιά του ρομπότ βελτιστοποιείται. Ο τρόπος που ο αλγόριθμος ομαδοποιεί τα σημεία αυτά μπορεί να φανεί στην Εικόνα 13. Με την ταξινόμησή τους ως κοίλη ή μη κοίλη, το ρομπότ αποφεύγει τα εμπόδια εκ των προτέρων, με αποτέλεσμα μια ομαλότερη πορεία. Για την μέθοδο αυτήν έγινε πειραματική αξιολόγηση μεταξύ των μεθόδων VPH και VPH+ σε πραγματικό περιβάλλον από τους Jianwei *et al* [30]. Με την μέθοδο VPH το ρομπότ κατάφερε να ολοκληρώσει την διαδρομή σε χρόνο 220 sec όπως φαίνεται στην Εικόνα 14 ενώ η μέθοδος VPH+ κατάφερε να ολοκληρώσει την διαδρομή σε 90 sec.



Εικόνα 13. Αρχή λειτουργίας της μεθόδου VPH+ [30]

2.3.9 Virtual Fixtures

Η ομάδα μεθόδων Virtual Fixtures (VF) σχετίζεται κάπως με τις αντιδραστικές μεθόδους αποφυγής εμποδίων και την τηλελειτουργία. Ωστόσο, δεν είναι μια συμβατική μέθοδος πλοήγησης, αλλά μια προσέγγιση που χρησιμοποιείται για τον καλύτερο έλεγχο των χειρουργικών ρομπότ. Στην ουσία, τα VF είναι μια αντιληπτική επικάλυψη που έχει σχεδιαστεί για να καθοδηγήσει τον ανθρώπινο χειριστή σε βελτιωμένο έλεγχο ενός τηλεχειριζόμενου ρομπότ με τον ίδιο τρόπο όπως ένας χάρακας είναι μια «αντιληπτική επικάλυψη» που έχει σχεδιαστεί για να βελτιώσει την απόδοση σχεδίασης γραμμής. Τα VF αποσκοπούν στη μείωση της διανοητικής κόπωσης που απαιτείται για την εκτέλεση απομακρυσμένων εργασιών και επιτρέποντας την ακρίβεια και την απόδοση να ξεπεράσει τις φυσικές ανθρώπινες ικανότητες. Αυτό καθιστά τα VF πολύ δημοφιλή για καλά καθορισμένες εργασίες και απομακρυσμένους χειριστές που μπορούν επίσης να παρέχουν ανατροφοδότηση δύναμης [31]–[35]. Για παράδειγμα, σε μια ρομποτική χειρουργική επέμβαση στο γόνατο, όπου μπορούν να προσδιοριστούν εύκολα οι κατάλληλοι περιορισμοί (π.χ. παραμετρικοί επιφανειακοί περιορισμοί που καθορίζουν μια περιοχή και παρέχουν καθοδήγηση), μια οπτική επικάλυψη VF μπορεί να είναι εξαιρετικά επωφελής. [34], [36]. Ένα παράδειγμα για καλύτερη κατανόηση μπορεί να φανεί στην Εικόνα 16. Ας υποθέσουμε πως λειτουργούμε με κάποιο άκρο εργασίας. Στο σενάριο a) το άκρο εργασίας μπορεί να κινηθεί ελεύθερα στην λευκή περιοχή και θα απαγορεύει στον χειριστή να εισχωρήσει στην γκρι ζώνη. Στο σενάριο b) το άκρο εργασίας θα μπορεί να ακολουθήσει μόνο την τροχιά που απεικονίζεται με μαύρο. Μπορούμε να φανταστούμε

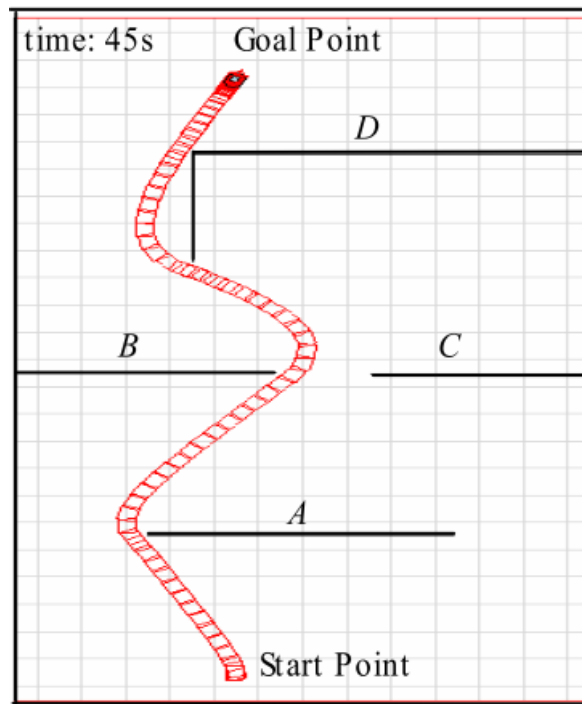


Εικόνα 14. Διαδρομή με VPH [30]

ένα σενάριο που αντί να λειτουργούμε με κάποιο άκρο εργασίας να λειτουργήσουμε με κάποιο κινητό ρομπότ. Όμως η συνεχώς μεταβαλλόμενη φύση των τόπων καταστροφών και των δυναμικών περιβαλλόντων δεν επιτρέπει την εύκολη δημιουργία τέτοιων επικαλύψεων. Εάν θεωρήσουμε πως τα εμπόδια δεν διαφέρουν από μία απαγορευμένη περιοχή, τα VF θα μπορούσαν να είναι μία ρητή στρατηγική για την διευκόλυνση του χειριστή, αλλά με βασικές προϋποθέσεις την γνώση και την στατικότητα του περιβάλλοντος. Εφόσον αυτές οι προϋποθέσεις δεν είναι ρεαλιστικές και δεν συγκλίνουν με τις απαιτήσεις της εφαρμογής, η μέθοδος απορρίφθηκε σαν επιλογή από εμάς, αλλά την συμπεριλαμβάνουμε για πληρότητα.

2.4 Ερευνητικές υποθέσεις

Σε σύγκριση με τις άλλες ιστογραμμικές μεθόδους, το VFH+ είναι ικανό να αντιμετωπίσει ισχυρά την αβεβαιότητα στις αναγνώσεις των αισθητήρων. Οι εφαρμογές που μας ενδιαφέρουν μπορούν να αξιοποιήσουν αυτά τα πλεονεκτήματα καθώς μπορούν να έχουν πολλές απρόβλεπτες περιστάσεις που μπορούν να επηρεάσουν την αισθητηριακή είσοδο του ρομπότ με διάφορους τρόπους, π.χ. θόρυβος σε μετρήσεις λέιζερ λόγω σκόνης στο περιβάλλον. Με τη χρήση νέων αισθητήρων ορισμένοι αλγόριθμοι μπορούν να τροποποιηθούν καταργώντας τους περιορισμούς και τις ελλείψεις αισθητηρίων (π.χ αισθητήρια IR, και χαμηλή υπολογιστική δύναμη), τα οποία αρχικά ενσωματώθηκαν σε αυτές τις παλαιότερες μεθόδους. Επισημαίνεται επίσης ότι τα κινητά ρομπότ αρχίζουν ολοένα και περισσότερο να χρησιμοποιούνται σε πραγματικά περιβάλλοντα. Ως εκ τούτου, η πλοήγηση των κινητών ρομπότ πρέπει να είναι προετοιμασμένη για την επιτυχή αντιμετώπιση καταστάσεων σε ένα δυναμικά μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Επιπλέον, οι μέθοδοι που εφαρμόζουν κάποιο είδος παγκόσμιου σχεδιασμού (π.χ. VFH*, VFH*TDT) είναι χρήσιμες για πλήρως αυτόνομες ρομποτικές εφαρμογές, αλλά η χρήση ενός παγκόσμιου χάρτη και η πολυπλοκότητά τους υπερβαίνουν τα πλεονεκτήματα που χρησιμοποιήθηκαν σε ένα πλαίσιο κοινόχρηστου ελέγχου στην αντιμετώπιση καταστροφών (π.χ. παγκόσμιος χάρτης, εάν υπάρχει, ενδέχεται να υποστεί απότομη αλλαγή). Τέλος, ορισμένα μειονεκτήματα του VFH+ (π.χ. παγιδεύεται σε τοπικά ελάχι-

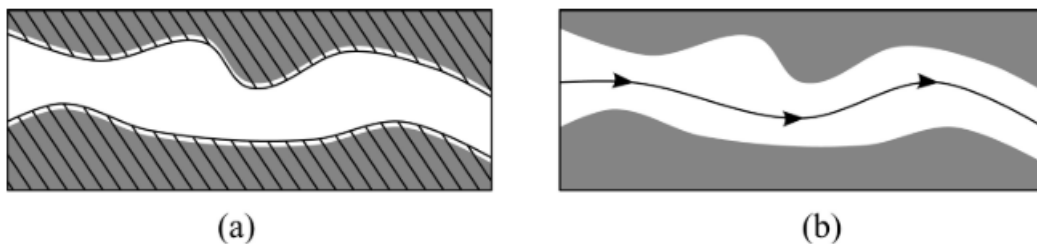


Εικόνα 15. Διαδρομή με VPH+ [30]

στα) σε σύγκριση με άλλες μεθόδους μπορούν να ξεπεραστούν με τον κοινό έλεγχο, αποφεύγοντας παράλληλα πιο περίπλοκες μεθόδους (π.χ. VFH*TDT). Η επιλογή της μεθόδου VFH+ έγινε με τους λόγους που εξηγήθηκαν παραπάνω και τα λογικά συμπεράσματα του συγγραφέα σύμφωνα με την βέλτιστη των ικανοτήτων του έρευνα. Εντούτοις, η εφαρμογή μιας εντελώς διαφορετικής μεθόδου είναι απολύτως δυνατή με την προϋπόθεση πως έχουν γίνει οι απαραίτητες τροποποιήσεις. Όπως θα εξηγηθεί στο άρθρο αυτό, ο σχεδιασμός του κοινόχρηστου ελεχτή έχει την δυνατότητα να υποστηρίξει πολλαπλές μεθόδους πλοήγησης και μπορεί να συντονιστεί εύκολα με άλλες παρόμοιες μεθόδους.

2.5 Κοινόχρηστος ελέγχος για κινητά ρομπότ

Ο κοινόχρηστος έλεγχος ή διαμοιρασμένος έλεγχος είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται τακτικά είτε για την απεικόνιση συστημάτων στα οποία ο άνθρωπος συνεργάζεται σε κάποιο επίπεδο με το ρομπότ, είτε για να απεικονίσει συστήματα στα οποία λαμβάνει χώρα κάποιος τύπος εισόδου ή ανάμιξη μεταξύ των εντολών του ρομπότ ή του ανθρώπου. Σε αυτό το άρθρο, θα χρησιμοποιή-



Εικόνα 16. Παράδειγμα ενεργών περιορισμών a) Περιορισμός περιοχής b) Περιορισμός διαδρομής (Τα εμπόδια απεικονίζονται με γκρι και οι περιορισμοί με μαύρο) [34]

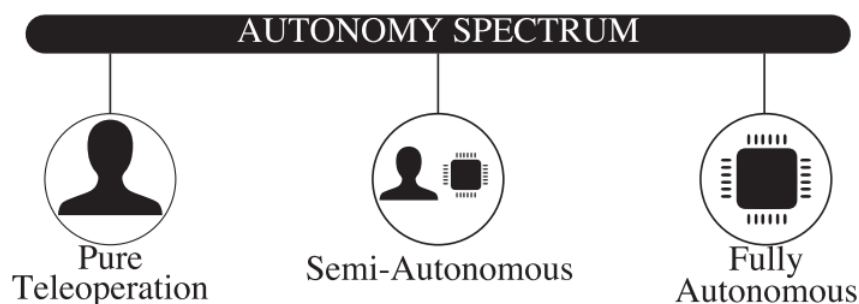
σουμε αυτόν τον όρο για να αναφερθούμε ρητά στο τελευταίο. Ένας ακόμα τρόπος που μπορούμε να σκεφτούμε τον κοινόχρηστο έλεγχο είναι ως ένα επίπεδο αυτονομίας που πέφτει ανάμεσα στα επίπεδα αυτονομίας "Τηλελειτουργία" και "Πλήρης Αυτονομία" όπως φαίνεται στην Εικόνα 17. Συνήθως, τα κοινόχρηστα συστήματα ελέγχου ασχολούνται με την ασφάλεια του ρομπότ (δηλαδή την αποφυγή συγκρούσεων) ή/και με την ελαχιστοποίηση της προσπάθειας τηλελειτουργίας του χειριστή/χρήστη. Παρόλο που ο κοινόχρηστος έλεγχος είναι μια δημοφιλής προσέγγιση σε διάφορες ρομποτικές εφαρμογές (π.χ. σε ρομποτικούς βραχίονες) [37], [38]) εδώ θα επικεντρωθούμε σε κινητά ρομπότ.

Μία μορφή κοινόχρηστου ελέγχου είναι η λειτουργία διασφάλισης (safeguard) στην οποία το ρομπότ παρεμβαίνει για να σταματήσει τις μη ασφαλείς εντολές του χειριστή προκειμένου να αποφευχθούν συγκρούσεις. Οι Krotkov et al. [40] εφάρμοσαν έναν ελεγκτή προστασίας σε ένα σεληνιακό rover για να καλύψει τις χρονικές καθυστερήσεις μεταξύ των εντολών. Στο έργο των Fong et al [41], προτείνεται ένας ελεγκτής προστασίας για κινητά ρομπότ που αναπτύσσονται σε μη δομημένα περιβάλλοντα.

Μια άλλη δημοφιλής εφαρμογή μπορεί να βρεθεί στον τομέα των ρομποτικών αναπηρικών αμαξιδίων (Βλ. Εικόνα 18) όπου η ασφάλεια, η άνεση και η ικανότητα παροχής βοήθειας στους χρήστες είναι όλες αυστηρές απαιτήσεις [42]. Ένα παράδειγμα που δεν χρησιμοποιεί ιστογραμματικές μεθόδους είναι το έργο των Carlson και Demiris [43]. Συνδυάζει ασφαλείς τροχιές από έναν προγραμματιστή AI με πρόβλεψη πρόθεσης χρήστη βάσει εντολών του joystick. Μια εφαρμογή κοινόχρηστου ελέγχου για αναπηρικά αμαξίδια μπορεί να βρεθεί στο έργο του Urdiales et al [44] που χρησιμοποιεί συμβατικά APF. Δοκιμάζουν τη μέθοδο τους σε δομημένα οικιακά περιβάλλοντα. Παρομοίως, στο έργο του Storms et al [45] παρουσιάζεται μια νέα μέθοδος αναπαράστασης και αποφυγής εμποδίων που βασίζεται στο μοντέλο πρόβλεψης ελέγχου. Αυτή η προσέγγιση απαιτεί μοντέλα ανθρώπινων χειριστών για κοινόχρηστο έλεγχο. Άλλες κοινές προσεγγίσεις ελέγχου περιλαμβάνουν απτική ανατροφοδότηση και εξατομικευμένη βοήθεια με ανθρώπινη επίδειξη που έχουν αποδειχθεί ότι αυξάνουν την απόδοση και την νευρική χειριστήριου [46] [47].

Ένα από τα πιο παραπλήσια άρθρα σε σχέση με το δικό μας είναι το έργο του Bell et al [48] στο οποίο η μέθοδος VFH παρακάμπτει τις μη ασφαλείς εντολές χειριστή. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση αποτυγχάνει να πλοηγηθεί σε στενά περάσματα (π.χ. μια πόρτα), καθιστώντας αναγκαία τη χρήση ενός ξεχωριστού τρόπου ελέγχου για τέτοιες περιπτώσεις. Επιπλέον, η υλοποίησή τους χρησιμοποιεί μια πολύ τροποποιημένη μέθοδο VFH που οδηγεί σε συμβιβασμούς όσον αφορά την ταχύτητα καθώς και την απόκτηση μεγάλου υπολογιστικού φορτίου. Μια άλλη σχετική εφαρμογή κοινού ελέγχου μπορεί να φανεί στο έργο των Chen et al [49]. Εφαρμόζουν έλεγχο με VFH+ και υποβοηθούμενο από χειρονομίες και φωνητικό έλεγχο για ένα πανκατευθυντικό κινητό ρομπότ σε δομημένα οικιακά περιβάλλοντα.

Πολλές από τις παραπάνω προσεγγίσεις αφορούν οικιακά σενάρια σε δομημένα περιβάλλοντα και σε πολλές περιπτώσεις, ο χειριστής βρίσκεται φυσικά στον ίδιο χώρο με το ρομπότ (π.χ.



Εικόνα 17. Φάσμα Τηλελειτουργίας - Αυτονομίας [39]



Εικόνα 18. Το NURIC Smart Wheelchair που αποτελείται από αισθητήρα RGB-D, mini-PC, πλακέτες μετατροπέα και κωδικοποιητές τροχών. [42]

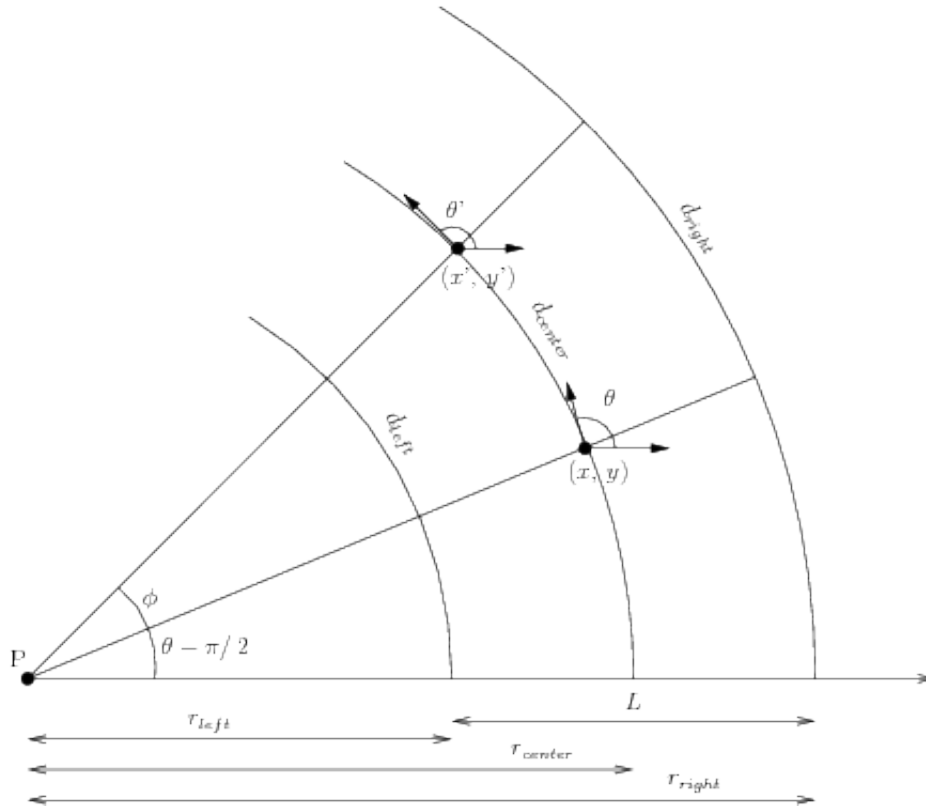
σε ρομποτικά αναπηρικά αμαξίδια). Αντιθέτως, η δουλειά μας επικεντρώνεται σε απομακρυσμένα ελεγχόμενα ρομπότ σε εφαρμογές που περιλαμβάνουν μη δομημένα και δυναμικά περιβάλλοντα όπως στο SAR και μια ποικιλία συνθηκών υποβάθμισης της απόδοσης (π.χ. καθυστερήσεις επικοινωνίας). Επιπλέον, ορισμένες από τις παραπάνω μεθόδους αποτρέπουν τις μη ασφαλείς εντολές χρήστη με έναν ενοχλητικό τρόπο (π.χ. συστήματα διασφάλισης). Αντίθετα, αξιοποιούμε την ικανότητα της μεθόδου VFH+ και τον κοινό έλεγχο για ομαλή ανάμειξη εντολών αντί να παρακάμπτουμε ή να διακόπτουμε τις εντολές του χειριστή.

2.6 Οδομετρία

Είναι σημαντικό για ένα ρομπότ να γνωρίζει τη θέση του, ειδικά σε μια εργασία αναζήτησης και διάσωσης. Το να γνωρίζουμε πού βρισκόμαστε μπορεί να μην φαίνεται δύσκολο, αλλά παραμένει μια πρόκληση για τα κινητά ρομπότ. Οι άνθρωποι γνωρίζουν πού βρίσκονται χρησιμοποιώντας το εξαιρετικό σύστημα όρασης, τη μνήμη τους και τις γνώσεις τους για το περιβάλλον τους. Ωστόσο, τα ρομπότ δεν έχουν αυτές τις πολύ ανεπτυγμένες δεξιότητες. Ένας τρόπος με τον οποίο τα ρομπότ έχουν καθορίσει τη θέση τους στο περιβάλλον τους είναι η οδομετρία. Η Οδομετρία είναι η χρήση αισθητήρων κίνησης για τον προσδιορισμό της αλλαγής θέσης του ρομπότ σε σχέση με κάποια γνωστή θέση. Για παράδειγμα, εάν ένα ρομπότ ταξιδεύει σε ευθεία γραμμή και αν γνωρίζει τη διάμετρο των τροχών του, τότε μετρώντας τον αριθμό των περιστροφών τροχών μπορεί να καθορίσει πόσο μακριά έχει ταξιδέψει. Τα ρομπότ συχνά έχουν κωδικοποιητές άξονα συνδεδεμένους στους κινητήριους τροχούς τους, οι οποίοι εκπέμπουν σταθερό αριθμό παλμών ανά περιστροφή. Μετρώντας αυτούς τους παλμούς, ο επεξεργαστής μπορεί να εκτιμήσει την απόσταση που διανύθηκε.

Η οδομετρία είναι μια πολύ συνηθισμένη τεχνική προσδιορισμού θέσης για κινητά ρομπότ, αλλά έχει τους περιορισμούς της. Δεδομένου ότι είναι μια αθροιστική μέτρηση, οποιοδήποτε σφάλμα ανίχνευσης θα αυξάνεται καθώς περνά ο χρόνος. Τα ρομπότ ενδέχεται να χρειαστεί περιοδικά να χρησιμοποιούν άλλους αισθητήρες για να προσδιορίσουν με ακρίβεια τη θέση του ρομπότ για την αποφυγή υπερβολικής συσσώρευσης σφαλμάτων. [50]:

Για τον υπολογισμό της οδομετρίας μπορούμε να συμβουλευτούμε την Εικόνα 19. Θεωρούμε πως ένα κινητό ρομπότ κινείται σε κυκλική τροχιά με κέντρο P , με τους τροχούς του να κινούνται σε διαφορετικές ταχύτητες. Η παράμετρος L είναι η απόσταση ανάμεσα στους δύο τροχούς και αντίστοιχα οι ακτίνες r_{left} και r_{right} οι αποστάσεις από το σημείο P προς τους αντίστοιχους τροχούς. Εάν σε σύντομο χρονικό διάστημα, Δt , οι ταχύτητες των δύο τροχών είναι σχετικά σταθερές, τότε η ταχύτητα προς τα εμπρός του ρομπότ, το V_x και η ταχύτητα περιστροφής, ω , και μπορεί επίσης να θεωρηθεί σταθερή, μπορούμε να ενημερώσουμε την παγκόσμια θέση από την σχέση 2.6[51]:



Εικόνα 19. Υπολογισμός οδομετρίας [51]

$$\mathcal{P}_i = (x, y, \theta) \text{ και } \mathcal{P}_{i+1} = (x', y', \theta')$$

Οι νέες συντεταγμένες θα δίνονται ως εξής από τους υπολογισμούς του Edwin Olson [51]:

$$x' = x + r_{center}[-\sin \theta + \sin \varphi \cos \theta + \sin \theta \cos \varphi]$$

$$y' = y + r_{center}[\cos \theta - \cos \varphi \cos \theta + \sin \theta \sin \varphi]$$

Για να απλοποιηθούν σημαντικά οι εξισώσεις, μπορεί να γίνει μια προσέγγιση. Εάν το φ είναι μικρό, όπως συμβαίνει συνήθως για μικρά βήματα χρόνου, μπορούμε να προσεγγίσουμε τα $\sin \varphi = \varphi$ και $\cos \varphi = 1$.

$$\begin{aligned} x' &= x + r_{center}[-\sin \theta + \varphi \cos \theta + \sin \theta] \\ x' &= x + r_{center} \varphi \cos \theta \\ x' &= x + d_{center} \cos \theta \end{aligned}$$

και

$$\begin{aligned} y' &= y + r_{center}[\cos \theta - \cos \theta + \varphi \sin \theta] \\ y' &= y + r_{center} \varphi \sin \theta \\ y' &= y + d_{center} \sin \theta \end{aligned}$$

Η αλλαγή στην κατεύθυνση προσανατολισμού του ρομπότ, είναι η διαφορά των αποστάσεων που διανύουν οι τροχοί διαιρούμενοι με την ακτίνα περιστροφής L .

$$d_{center} = \frac{d_{left} + d_{right}}{2}$$

$$\varphi = \frac{d_{right} - d_{left}}{L}$$

$$\mathcal{P}_{i+1} = \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ \theta_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{center} \cos \theta_i \\ d_{center} \sin \theta_i \\ \varphi \end{bmatrix}$$

2.7 SLAM

Ο ταυτόχρονος τοπικός εντοπισμός και χαρτογράφηση (SLAM) είναι ένα θεμελιώδες πρόβλημα στην κινητή ρομποτική και έχει μελετηθεί εκτενώς στην βιβλιογραφία. Μια λύση στο πρόβλημα SLAM έχει θεωρηθεί ως «ιερό δισκοπότηρο» για την κοινότητα της κινητής ρομποτικής, καθώς θα παρέχει τα μέσα για να γίνει ένα ρομπότ πραγματικά αυτόνομο. [52][53]

2.7.1 Το πρόβλημα SLAM

Το πρόβλημα ταυτόχρονου εντοπισμού και χαρτογράφησης (SLAM) ρωτά αν είναι δυνατό ένα κινητό ρομπότ να τοποθετηθεί σε μια άγνωστη τοποθεσία, σε ένα άγνωστο περιβάλλον και να δημιουργήσει σταδιακά έναν συνεπή χάρτη αυτού του περιβάλλοντος, ενώ ταυτόχρονα να προσδιορίζει τη θέση του σε αυτόν τον χάρτη. Η γένεση του πιθανολογικού προβλήματος SLAM συνέβη στο Συνέδριο Ρομποτικής και Αυτοματισμού IEEE του 1986 που πραγματοποιήθηκε στο Σαν Φρανσίσκο, Καλιφόρνια [54].

Στην πιο βασική του μορφή, το πρόβλημα θεωρεί πως το περιβάλλον αποτελείται από «ορόσημα» που είναι στατικά στο περιβάλλον και η μέθοδος επίλυσης θα είναι η άντληση πληροφοριών γίνεται από τους αισθητήρες του ρομπότ που θα σαρρώνουν το περιβάλλον αυτό και συνδυάζουν τα ορόσημα αυτά σε έναν κατασκευασμένο χάρτη. Το σύστημα θα κατοχυρώνει την κατάσταση του ρομπότ για κάθε χρονική στιγμή k με πληροφορίες όπως την τοποθεσία του ρομπότ $X_r(k)$ και την περιγραφή των οροσήμων $X_f(k) = X_f$ σε μία σχέση 2.1 [55],

$$X(k) = \begin{bmatrix} X_r(k) \\ X_f(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_r(k) \\ X_f \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Η διαδικασία θα συσχετίζει την κατάσταση τη στιγμή $k + 1$ με την κατάσταση τη στιγμή k με την σχέση 2.2,

$$\begin{aligned} X_r(k+1) &= f(X_r(k), u(k), v(k)) \\ X_f(k+1) &= X_f(k) \end{aligned} \quad (2.2)$$

όπου $u(k)$ η οδομετρία του ρομπότ την στιγμή k και $v(k)$ είναι ο θόρυβος της διαδικασίας τη στιγμή k . Η παρατήρηση τη στιγμή k είναι συνάρτηση του X_k που δίνεται από την σχέση 2.3

$$z(k) = h(X_r(k), X_f(k), w(k)) = h(X_r(k), X_f(k), w(k)) \quad (2.3)$$

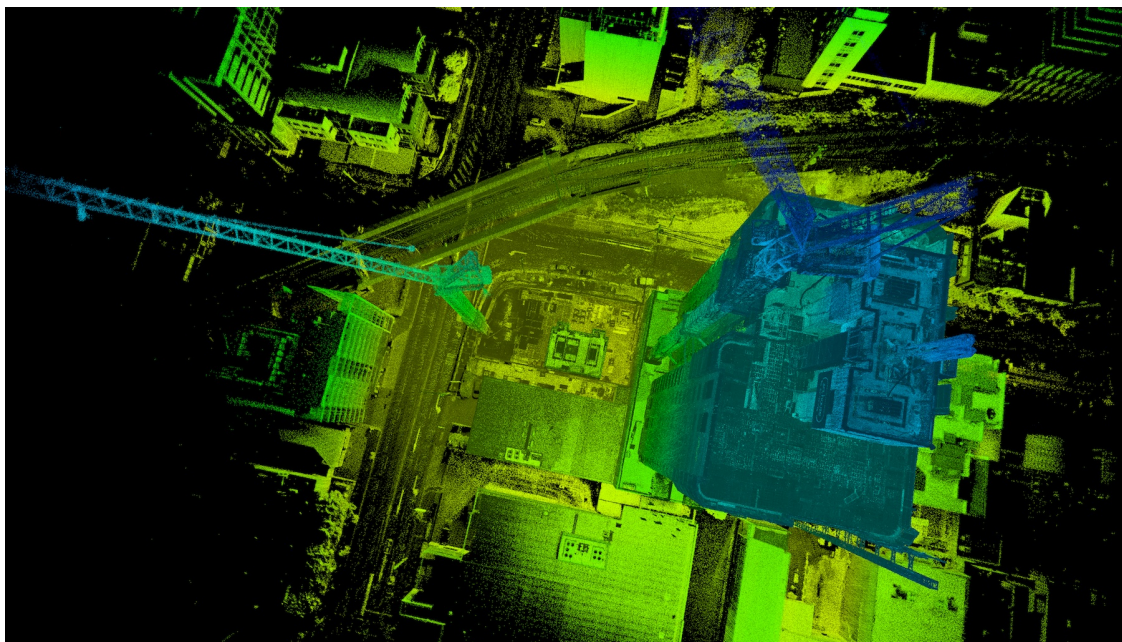
όπου $w(k)$ είναι το θόρυβος της παρατήρησης την στιγμή k .

Οι λύσεις του SLAM επικεντρώνονται στην εκτίμηση του $X(k)$ από τους αισθητήρες του ρομπότ και στα 30 χρόνια έρευνας του προβλήματος έχουν υπάρξει πολλές προσεγγίσεις πάνω στην βέλτιστη εκτίμηση της κατάστασης του συστήματος.

2.7.2 Προσπάθειες επίλυσης του SLAM

Γενικότερα, μπορούν να παρατηρηθούν δύο προσεγγίσεις στην επίλυση του προβλήματος. Η πρώτη προσέγγιση είναι η εφαρμογή πιθανοτικών τεχνικών για την βελτιστοποίηση της ακρίβειας των παρατηρήσεων του ρομπότ όσον αφορά τις θέσεις των οροσήμεων του περιβάλλοντος. Μία από τις πρώτες μεθόδους πιθανοτικών μεθόδων παρουσιάστηκε στο έργο των John J. Leonard και Hugh F. Durrant-Whyte μία από τις πρώτες προσεγγίσεις της επίλυσης του προβλήματος SLAM [56]. Στο έργο τους, καθιέρωσαν μια στατιστική βάση για την περιγραφή των σχέσεων μεταξύ ορόσημων και την διαχείριση της γεωμετρικής αβεβαιότητας με τον αλγόριθμο EKF-SLAM. Χρησιμοποιούν εκτεταμένα φίλτρα Kalman (Extended Kalman Filter) για να ελαχιστοποιήσουν λανθασμένες μετρήσεις από τα αισθητήρια του ρομπότ, για την βελτιστοποίηση της ακρίβειας του παραγόμενου χάρτη. Η μέθοδος EKF-SLAM ήταν από τις πιο δημοφιλείς πιθανοτικές μεθόδους της επίλυσης του προβλήματος SLAM. Ένα από τα μεγάλα μειονεκτήματα των μεθόδων πιθανοτικού φιλτραρίσματος όπως EKF-SLAM, particle filter (PF), maximum likelihood (ML), expectation maximization (EM), κ.α είναι πως δουλεύουν καλά μόνο για μικρούς χώρους. Επίσης, μέθοδοι όπως η EKF-SLAM είναι ευαίσθητες σε εσφαλμένα δεδομένα και απαιτεί μεγάλη υπολογιστική δύναμη καθώς απαιτεί όλα τα ορόσημα και ο πίνακας κοινής συνδιακύμανσης να ενημερώνεται κάθε φορά που γίνεται παρατήρηση, γεγονός που επιδεινώνεται σε μεγαλύτερα μεγέθη χαρτών [54] [57]. Ο αλγόριθμος FastSLAM, που εισήχθη από τους Montemerlo et al. [58], σηματοδότησε μια θεμελιώδη εννοιολογική αλλαγή στο σχεδιασμό πιθανοτικού SLAM. Στο FastSLAM χρησιμοποιείται ένα φίλτρο σωματιδίων Rao-Blackwellized (RBPF) που έχει καλή επεκτασιμότητα για χάρτες με πολλά ορόσημα. Το κάθε σωματίδιο αντιπροσωπεύει την τροχιά του ρομπότ και χρησιμοποιεί το EKF για την διατήρηση του τοπικού χάρτη έτσι ώστε η υπολογιστική πολυπλοκότητα του SLAM είναι πολύ μειωμένη.

Η δεύτερη προσέγγιση της επίλυσης του SLAM είναι η εφαρμογή κλειστού βρόχου για την διόρθωση της αναπαράστασης των χαρτών που παράγονται από τις μεθόδους που συζητήσαμε προηγουμένως. Η συσχέτιση δεδομένων είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν ένα όχημα επιστρέφει σε μια ήδη χαρτογραφημένη περιοχή μετά από μια μακρά εκδρομή, και έτσι εμφανίζεται το πρόβλημα κλεισίματος βρόχου ή βελτιστοποίησης γραφήματος. Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης γραφήματος χρησιμοποιούν το πίσω άκρο του συστήματος το οποίο αντλεί συμπεράσματα για τα παραγόμενα δεδομένα που παράγονται από το μπροστινό μέρος, δηλ τις μεθόδους που έχουμε ήδη αναφέρει. Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν επικύρωση κατά παρτίδες που εκμεταλλεύεται τους περιορισμούς που είναι εγγενείς στη διαμόρφωση SLAM, τις μεθόδους που βασίζονται στην εμφάνιση και τις τεχνικές πολλαπλών υποθέσεων. Οι τρέχοντες αλγόριθμοι βελτιστοποίησης γραφημάτων περιλαμβάνουν τους ORB-SLAM, LSD-SLAM, RTAB-MAP κλπ. [59][57]



Εικόνα 20. 3D point cloud κτιρίου που δημιουργήθηκε από UAV [60]

2.7.3 Χρήση του SLAM

Για τους δικούς μας σκοπούς το SLAM είναι σύνολο μεθόδων που χρησιμοποιούνται στα αυτόνομα οχήματα που επιτρέπουν την δημιουργία ενός χάρτη (Βλ. Εικόνα 21) και την ικανότητα να εντοπίζουν την τοποθεσία τους σε αυτόν τον χάρτη ταυτόχρονα σε πραγματικό χρόνο. Οι αλγόριθμοι SLAM έχουν φτάσει σε μεγάλο σημείο οριμότητας και επιτρέπουν στο κινητό ρομποτικό όχημα να χαρτογραφήσει άγνωστα περιβάλλοντα για την εκτέλεση εργασιών όπως ο σχεδιασμός διαδρομών και η αποφυγή εμποδίων. Εάν και το SLAM μελετάται εδώ και πολλά χρόνια έχουν υπάρξει τεράστιες βελτιώσεις στην ταχύτητα επεξεργασίας των υπολογιστών και τη διαθεσιμότητα αισθητήρων χαμηλού κόστους, όπως κάμερες και συσκευές εύρεσης λέιζερ και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε έναν μεγάλο αριθμό πρακτικών εφαρμογών.

Για να καταλάβουμε γιατί το SLAM είναι σημαντικό, ας δούμε μερικά από τα οφέλη και τα παραδείγματα εφαρμογής του.

Ακόμη και σε εφαρμογές οικιακής χρήσης όπως για παράδειγμα μια ρομποτική σκούπα, χωρίς SLAM θα κινείται απλά τυχαία μέσα σε ένα δωμάτιο και μπορεί να μην είναι σε θέση να καθαρήσει ολόκληρη την επιφάνεια του δαπέδου. Σε άλλες ρομποτικές εφαρμογές, το ρομπότ μπορεί επίσης να χρησιμοποιήσει ταυτόχρονα την κάμερα και άλλους αισθητήρες για να δημιουργήσει έναν χάρτη των εμποδίων στο περιβάλλον του.

Το SLAM είναι ιδιαίτερα δυνατό όταν εφαρμοστεί με αισθητήρια τύπου LIDAR. Το LIDAR είναι μια μέθοδος τηλεπισκόπησης που χρησιμοποιεί φως με τη μορφή παλμικού λέιζερ για τη μέτρηση εύρους (μεταβλητές αποστάσεις) προς τη Γη. Αυτοί οι παλμοί φωτός σε συνδυασμό με άλλα δεδομένα που καταγράφονται από ένα σύστημα παράγουν ακριβείς, τρισδιάστατες πληροφορίες σχετικά με το σχήμα της Γης και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειάς της. Οι τιμές εξόδου από αισθητήρες λέιζερ είναι γενικά δεδομένα σημείου 2D (x, y) ή 3D (x, y, z). Το νέφος σημείου αισθητήρα (pointcloud) λέιζερ παρέχει μετρήσεις απόστασης υψηλής ακρίβειας και λειτουργεί πολύ αποτελεσματικά για την κατασκευή χαρτών με το SLAM. Ένα παράδειγμα της δύναμης του συνδυασμού των LIDAR και SLAM μπορεί να φανεί στην Εικόνα 20

Παρόλα αυτά, τα σημειακά σύννεφα δεν είναι τόσο λεπτομερή όσο οι εικόνες όσον αφορά την πυκνότητα και δεν παρέχουν πάντα επαρκή χαρακτηριστικά για αντιστοίχιση. Για παράδειγμα, σε μέρη όπου υπάρχουν λίγα εμπόδια, είναι δύσκολο να ευθυγραμμιστούν τα σημειακά σύννεφα και



Εικόνα 21. Παράδειγμα χάρτη SLAM

αυτό μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια της διαδρομής της θέσης του οχήματος. Επιπλέον, η αντιστοίχιση νέφους σημείου απαιτεί γενικά υψηλή ισχύ επεξεργασίας, επομένως είναι απαραίτητη η βελτιστοποίηση των διεργασιών για την βελτίωση ταχύτητας. Λόγω αυτών των προκλήσεων, ο εντοπισμός για αυτόνομα οχήματα μπορεί να περιλαμβάνει τη συγχώνευση άλλων αποτελεσμάτων μέτρησης, όπως η οδομετρία των τροχών, το παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα πλοήγησης (GNSS) και τα δεδομένα της IMU. Για εφαρμογές όπως ρομπότ αποθήκης, χρησιμοποιείται συνήθως 2D LIDAR SLAM, ενώ το SLAM που χρησιμοποιεί 3D LIDAR point cloud μπορεί να χρησιμοποιηθεί για UAV και αυτοματοποιημένο χώρο στάθμευσης [61].

Στην δική μας περίπτωση θα χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο SLAM που μπορεί να βρεθεί στην βιβλιοθήκη GMapping που είναι συμβατή με το ROS (θα εξηγηθεί στο Κεφάλαιο 3). Η προσέγγιση SLAM αυτή λαμβάνει πρωτογενή δεδομένα εύρους λέιζερ και οδομετρία αλλά γίνεται και χρήση των φίλτρων σωματιδίων Rao-Blackwellized, όπως είδαμε στο FastSLAM. Αυτή η έκδοση είναι βελτιστοποιημένη για σαρωτές λέιζερ μεγάλης εμβέλειας, όπως σαρωτής SICK LMS ή PLS. Τα λέιζερ μικρής εμβέλειας όπως ο σαρωτής Hokuyo δεν θα λειτουργούν τόσο καλά με τις τυπικές ρυθμίσεις παραμέτρων.

Κεφάλαιο 3

Μεθοδολογία ή/και Σχέδιο εργασιών – Υλοποίηση – Εφαρμογή

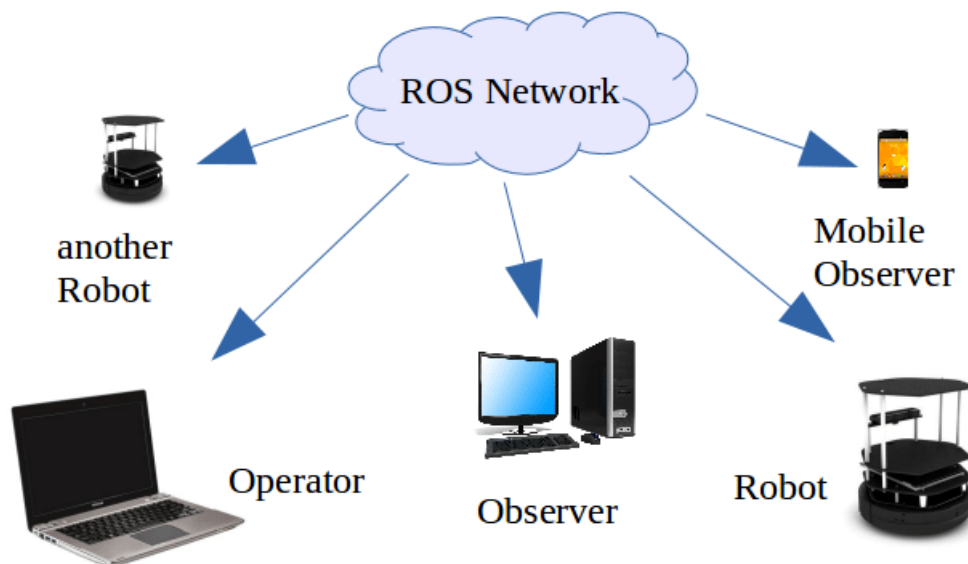
Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξετάσουμε πλήρως την δομή και τα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Η κατανόηση της δομής των συστημάτων που θα αναφέρουμε θα δώσει σφαιρική εικόνα της επίτευξης ενός συστήματος σαν αυτό που παρουσιάζουμε.

3.1 ROS

Σύμφωνα με την ιστοσελίδα του Robotic Operating System, το ROS είναι ένα μετα-λειτουργικό σύστημα ανοιχτού κώδικα για το ρομπότ μας. Παρέχει τις υπηρεσίες που θα περίμενε κανείς από ένα λειτουργικό σύστημα, όπως αφαίρεση υλικού, έλεγχο συσκευών χαμηλού επιπέδου, εφαρμογή λειτουργιών που χρησιμοποιούνται συνήθως, μετάδοση μηνυμάτων μεταξύ διαδικασιών και διαχείριση πακέτων. Παρέχει επίσης εργαλεία και βιβλιοθήκες για τη λήψη, τη δημιουργία, τη σύνταξη και την εκτέλεση κώδικα σε πολλούς υπολογιστές [62] (Βλ. Εικόνα 22).

Ο σκοπός ενός λειτουργικού συστήματος είναι με προσφέρει ένα μεσολαβητικό επίπεδο λογικής διασύνδεσης μεταξύ του λογισμικού και του υλικού. Με την χρήση ενός λειτουργικού συστήματος, ο χρήστης δεν χρειάζεται να σκοτίζεται με την διαχείριση του υλικού και του επιτρέπει την εύκολη χρήση της συσκευής/υπολογιστή. Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο αντιμετωπίζεται το ROS. Ο όρος μετα-λειτουργικό σύστημα απλά δηλώνει την ανάγκη του λειτουργικού συστήματος για ρομπότ (δηλ. το ROS) να έχει βάση πάνω σε ένα λειτουργικό σύστημα. Η επιλογή του λειτουργικού συστήματος για το ROS είναι κυρίως συστήματα Linux, εάν και υπάρχουν διαθέσιμες επιλογές για συστήματα Windows. Όπως όλα τα λειτουργικά συστήματα έχουν πολλαπλές εκδόσεις, έτσι ισχύει και για το ROS. Η έκδοση που χρησιμοποιείται σε αυτήν την εργασία είναι η έκδοση ROS "Kinetic Kame" με πλήρη υποστήριξη από τις εκδόσεις συστημάτων Linux Ubuntu Xenial και Willy, και με μερική υποστήριξη από συστήματα όπως OS X, Gentoo, OpenEmbedded/Yocto και Debian.

Το ROS αποτελείται από ανεξάρτητους κόμβους που επικοινωνούν μεταξύ τους. Η επικοινωνία αυτή γίνεται με "μηνυμάτα" που μπορεί να είναι απλοί πρωτόγονοι τύποι δεδομένων (π.χ int32) είτε πιο πολύπλοκες δομές δεδομένων που μπορούμε να δημιουργήσουμε εμείς. Οι κόμβοι του ROS δεν είναι απαραίτητο να βρίσκονται στο ίδιο σύστημα που σημαίνει πως μπορεί να υποστηρίξει εκτέλεση από πολλαπλούς υπολογιστές. Η δυνατότητα του συνδυασμού συστημάτων κάνει την ανάπτυξη εφαρμογών ρομποτικής ευκολότερη καθώς μπορούμε να εστιάσουμε στην δημιουργία της εφαρμογής μας. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι πως οι κόμβοι του ROS λειτουργούν ασύγχρονα. Μπορούμε να έχουμε εκτέλεση πολλαπλών υποσυστημάτων στην εφαρμογή μας χωρίς να ανησυχούμε ιδιαίτερα. Επιπροσθέτως, το ROS αναλαμβάνει από μόνο του τον συντονισμό

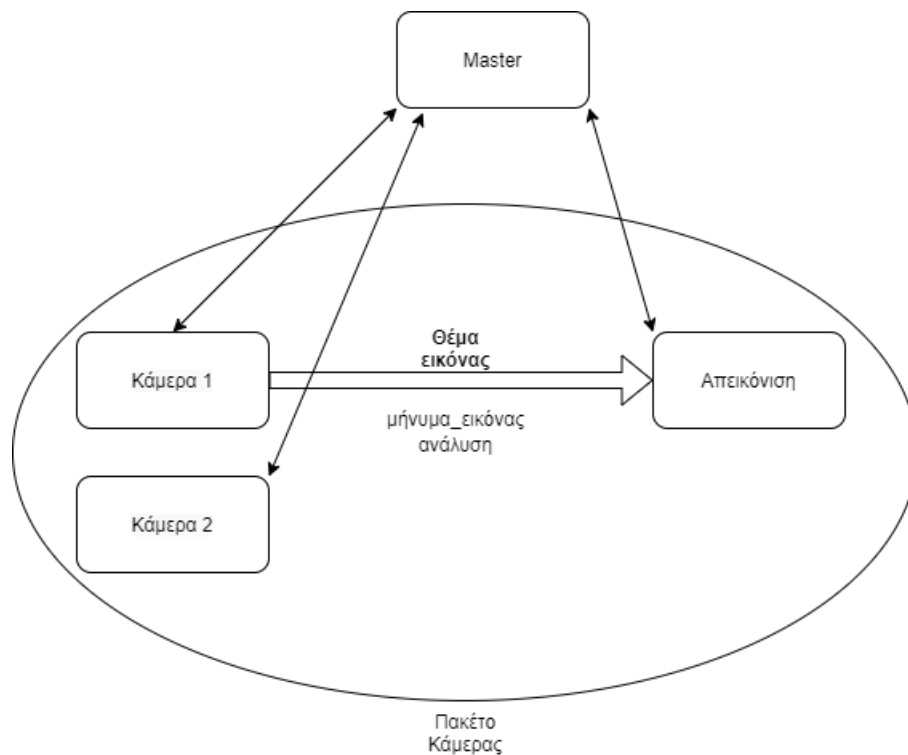


Εικόνα 22. Το δίκτυο ROS [63]

μεταξύ των κόμβων, την δημιουργία τους και την θέση τους σε θέσεις μνήμης αλλά και την επικοινωνία μεταξύ τους. Αυτό το επιτυγχάνει με την χρήση του "Master" κόμβου που είναι υπεύθυνο για όλες αυτές τις λειτουργίες.

Για να καταλάβουμε πως δουλεύει ο "Master" κομβος, οι κόμβοι και το ROS γενικότερα ας δούμε ένα παράδειγμα:

Ας υποθέσουμε πως έχουμε δύο κόμβους. Έναν κόμβο 'κάμερα' που καταγράφει εικόνα και έναν κόμβο 'απεικόνισης'. Πρακτικά, ο κόμβος της κάμερας θα συνδέεται απαραίτητα με ένα φυσικό αισθητήριο (μία φυσική κάμερα) ή μπορεί μία εικονική κάμερα που υπάρχει μόνο σε μια εξομοίωση υπολογιστή. Ο κόμβος της οποιαδήποτε περίπτωσης θα περιέχει το λογισμικό που επιτρέπει την καταγραφή εικόνας και την έκφρασή της σε δεδομένα που μπορούν να ερμηνευτούν και να αποθηκευτούν. Ομοίως, ο κόμβος 'απεικόνισης' θα είναι ένας κόμβος με κατάλληλο λογισμικό που θα μπορεί να ερμηνεύσει τα δεδομένα εικόνας που υπάρχουν και να τα αναπαράξει πιστά σε μία οθόνη. Είναι χρήσιμο να σκεφτόμαστε την επικοινωνία μεταξύ κόμβων στο ROS ως μία συζήτηση μεταξύ δύο ατόμων. Σε μία συζήτηση συνήθως υπάρχει ένας ομιλητής, ένας ακροατής και ένα θέμα συζήτησης. Στο ROS οι κόμβοι δίνουν τα δεδομένα τους σε όλους του υπόλοιπους κόμβους, ή όπως αλλιώς μπορούμε να πούμε 'διαφημίζουν' το 'θέμα' τους. Τα 'μηνύματα' των κόμβων όπως αναφέραμε μπορεί να είναι οποιασδήποτε φύσεως, ή αλλιώς οποιουδήποτε 'θέματος'. Οι κόμβοι έχουν πρόσβαση στα 'μηνύματα' όλων των κόμβων αλλά δεν είναι απαραίτητο πως την αξιοποιούν. Για να αξιοποιήσει ένας κόμβος ένα μήνυμα, θα πρέπει να 'εγγραφεί' στο 'θέμα' της συζήτησης. Πρέπει να αναφερθεί πως ένας κόμβος μπορεί να είναι 'εγγραμένος' σε πολλαπλά 'θέματα' και ένα 'θέμα' να περιέχει πολλαπλά 'μηνύματα'. Για παράδειγμα, σε μία συζήτηση με θέμα τα "λουλούδια" υπάρχουν πολλά πράγματα που μπορούν να ειπωθούν όπως "Για ποιο λουλούδι μιλάμε" ή χαρακτηριστικά των λουλουδιών όπως η όψη τους, η μυρωδιά τους, θεραπευτικές ή δηλητηριώδεις ιδιότητες και πολλά άλλα. Ομοίως, στο παραδειγμά μας το 'θέμα' συζήτησης μεταξύ των κόμβων 'Κάμερα' και 'Απεικόνιση' θα είναι "Εικόνα" αλλά θα έχει πολλαπλά 'μηνύματα' όπως η εικόνα της κάμερας, η ανάλυση, η ημερομηνία λήψης κ.α. Ένας ακόμα παραλληλισμός που θα κάνουμε, είναι πως συνήθως οι συζητήσεις πολλές φορές γίνονται με ένα πρόσωπο που είναι υπεύθυνο για την οργάνωση τους, ώστε να μην υπάρξουν επιπλοκές. Το ίδιο ισχύει και στο ROS καθώς την λειτουργία αυτή ακριβώς έχει ο κόμβος "master". Ο "master" κόμβος ενημερώνεται για όλες τις συζητήσεις που υπάρχουν ανάμεσα σε όλους του κόμβους. Για να



Εικόνα 23. Αρχιτεκτονική του ROS

μπορέσει ο κόμβος "Κάμερα" να επικοινωνήσει με τον κόμβο "Απεικόνιση" θα πρέπει πρώτα να επικοινωνήσει με τον κόμβο "master". Ο "master" θα ελέγξει εάν υπάρχει ο κόμβος "Απεικόνιση", που βρίσκεται (στην μνήμη), εάν καταλαβαίνει το θέμα της συζήτησης, και θα "ρωτήσει" τον κόμβο "Απεικόνιση" εάν θέλει να επικοινωνήσει με τον κόμβο "Κάμερα". Εάν όλες οι προϋποθέσεις πληρούνται, ο "master" θα επιτρέψει την επικοινωνία ανάμεσα στους δύο κόμβους. Η αρχιτεκτονική του ROS με βάση το παράδειγμα που εξετάσαμε μπορεί να απεικονιστεί συνοπτικά στην *Εικόνα 23*. Όπως βλέπουμε, είναι δυνατό να έχουμε παραπάνω από μία κάμερα ή γενικότερα παραπάνω από έναν κόμβους με παρόμοια λειτουργία. Στην περίπτωση της *Εικόνας 23*, ο κόμβος "Απεικόνιση" δεν είναι εγγραμμένος στο θέμα συζήτησης του κόμβου "Κάμερα 2". Παρ'όλα αυτά, μπορούμε να υποπτευθούμε πως το "θέμα" του κόμβου "Κάμερα 2" θα είναι παρόμοιο, εάν όχι ακριβώς το ίδιο, με το "θέμα" του κόμβου "Κάμερα 1". Εφόσον παρατηρούμε παραπλήσιες λειτουργίες και χρήσεις μεταξύ των κόμβων "Κάμερα 1", "Κάμερα 2" και "Απεικόνιση" όλα τους μπορούν να οργανωθούν υπό ένα "πακέτο" το "Πακέτο κάμερας". Ένα σύστημα που έχει αναπτυχθεί στο ROS συνήθως περιλαμβάνει πολλαπλά πακέτα με πολλαπλές αλληλένδετες αλληλεπιδράσεις.

Το ROS αποτελεί ένα από τα πιο δημοφιλή οικοσυστήματα ανάπτυξης λογισμικού ρομποτικής για ερευνητικούς και βιομηχανικούς σκοπούς. Ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματα που προσφέρει είναι η έννοια του ανοιχτού κώδικα, η δυνατότητα δημιουργίας και τροποποίησης κώδικα και η υποστήριξη βιβλιοθηκών και drivers. Υπάρχει μία πληθώρα ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών που είναι συμβατά με το ROS αλλά καθώς και πολλαπλές βιβλιοθήκες και εργαλεία για κάθε είδους ανάγκη που μπορεί να έχει ένα ρομπότ. Άλλα εργαλεία που προσφέρονται περιλαμβάνουν:

- Εργαλεία Εξομοίωσης
- Εργαλεία Testing
- Εργαλεία Προγραμματισμού



Εικόνα 24. Το κινητό ρομπότ Husky [64]

- Εργαλεία Debugging
- Εργαλεία Ελέγχου
- και πολλά άλλα...

Ένα άλλο μεγάλο πλεονέκτημα είναι η κοινότητα που στηρίζει το ROS και συνεχίζει να προσφέρει βελτιώσεις στο μεταλειτουργικό σύστημα για μελλοντικές καινοτομίες στην ρομποτική. Υπάρχει υποστήριξη σε βιβλιοθήκες για πολλές γλώσσες προγραμματισμού όπως C++, Python, LISP, Java, Javascript, MATLAB, Ruby, Haskell, R, Julia κ.α. Η εργασία μας βασίστηκε σε ένα εμβληματικό παράδειγμα των αξιών που εκφράζει το ROS όπως θα δούμε στην ενότητα 3.2.

3.2 Husky

Ένα από τα πρώτα κινητά ρομπότ πεδίου που έχει πλήρη υποστήριξη από το ROS είναι το μη επανδρωμένο όχημα εδάφους "Husky" από την Clearpath Robotics. [64]

Το Husky είναι μια πλατφόρμα ανάπτυξης ρομποτικής μεσαίου μεγέθους. Η μεγάλη χωρητικότητα ωφέλιμου φορτίου και τα συστήματα ισχύος του φιλοξενούν μια μεγάλη ποικιλία ωφέλιμων φορτίων, προσαρμοσμένων ώστε να καλύπτουν ερευνητικές ανάγκες. Υποστηρίζει στερεοφωνικές κάμερες, LIDAR, GPS, IMU, χειριστές και άλλα, με υποστήριξη ROS και με ανοιχτό κώδικα. Έχει μάζα 50kg με διαστάσεις 990x670x390mm με την πλατφόρμα δεσίματος εξοπλισμού να είναι 296x411x155mm. Η τελική του ταχύτητα είναι 1.0 m/s με την μπαταρία του να έχει διάρκεια τρεις ώρες. Χάρη την υποστήριξη του οικοσυστήματος ROS και του ανοιχτού κώδικα, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τους drivers που παρέχει η Clearpath robotics στην σελίδα της στο Github. Όχι μόνο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το φυσικό ρομπότ, αλλά μπορούμε να εξομοιώσουμε το Husky UGV με χρήση εργαλίων όπως το RViz και το Gazebo.

3.3 URDF, Rviz και Gazebo

Το γεγονός πως γίνεται χρήση του ROS για την εκπόνηση αυτής της εργασίας σημαίνει πως θα πρέπει να ασχοληθούμε με πολλούς τύπους αρχείων και τις ιεραρχίες τους. Ένας από τους

πιο σημαντικούς τύπους αρχείων που θα χρειαστεί να κατανοήσουμε είναι τα αρχεία, ή για να έμιαστε πιο ακριβείς, τα μοντέλα URDF (Universal Robot Description Format). Το μοντέλο URDF είναι μια συλλογή αρχείων που περιγράφουν τη φυσική περιγραφή ενός ρομπότ στο ROS. Αυτά τα αρχεία χρησιμοποιούνται από το ROS για να πει στον υπολογιστή πώς φαίνεται το ρομπότ στην πραγματική ζωή. Απαιτούνται αρχεία URDF για να κατανοήσει το ROS και να είναι σε θέση να προσομοιώσει καταστάσεις με το ρομπότ πριν ένας ερευνητής ή μηχανικός αποκτήσει πραγματικά το ρομπότ. Επιτρέπουν επίσης τροποποιήσεις στην πλατφόρμα στο ROS, έτσι ώστε να μπορεί να ενσωματωθούν και να δοκιμαστούν διάφοροι αισθητήρες, ρομποτικοί βραχίονες, εξαρτήματα όρασης ή χωρητικότητα ωφέλιμου φορτίου. Για παράδειγμα ένας απλός κύβος με διαστάσεις 1x1x1 μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

```
<robot name="simple_box2">

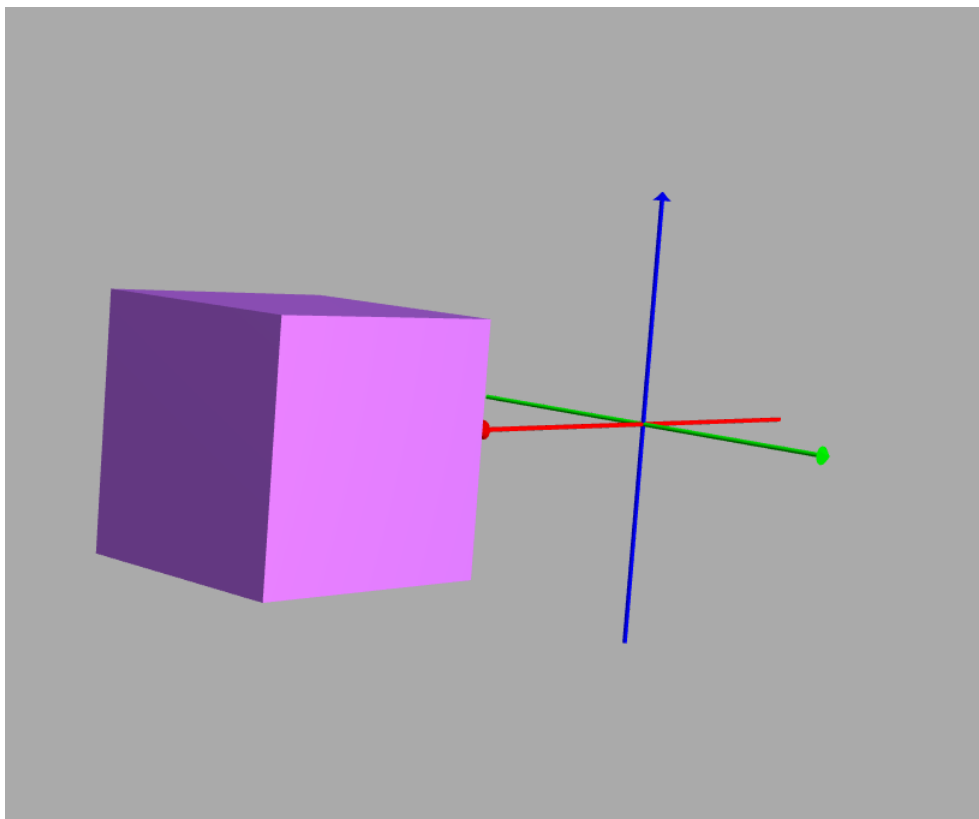
  <link name="cube">
    <inertial>
      <origin xyz="2 0 0" />
      <mass value="1.0" />

      <inertia
        ixx="1.0" ixy="0.0" ixz="0.0"
        iyy="100.0" iyz="0.0" izz="1.0" />
    </inertial>

    <visual>
      <origin xyz="2 0 0"/>
      <geometry>
        <box size="1 1 1" />
      </geometry>
    </visual>
    <collision>
      <origin xyz="2 0 0"/>
      <geometry>
        <box size="1 1 1" />
      </geometry>
    </collision>
  </link>

  <gazebo reference="cube">
    <material>Gazebo/Blue</material>
  </gazebo>
</robot>
```

Σε αυτόν τον κύβο έχουμε ορίσει τις διαστάσεις του, την φυσική συγκρούσεων, την φυσική αδρανείας με τον πίνακα αδρανείας του κύβου και φυσικά το χρώμα του. Συνεπώς, με όλες τις παραμετρούς περιγραφής που έχουμε δώσει μπορούμε να περιμένουμε μια πιστή στον υλικό κόσμο αναπαράσταση του κύβου σε μία εξομοίωση.

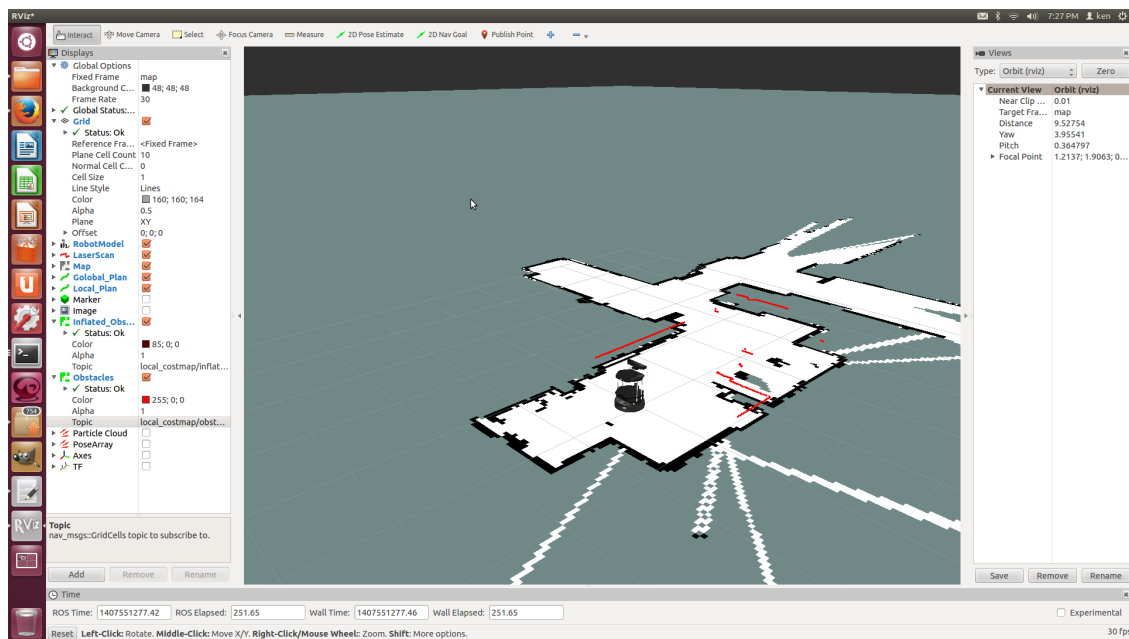


Εικόνα 25. Παράδειγμα URDF κύβου

Έχοντας κατανοήσει την έννοια των μοντέλων URDF μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα αντίστοιχα μοντέλα URDF για το ρομπότ Husky UGV σε δύο εργαλεία εξομοίωσης του ROS το rviz και το Gazebo καθώς δεν έχουμε την δυνατότητα να λειτουργήσουμε με το φυσικό ρομπότ.

Το rviz είναι ένα τρισδιάστατο εργαλείο οπτικοποίησης για εφαρμογές ROS. Παρέχει μια εικόνα του μοντέλου του ρομπότ, του αισθητήρα λήψης και πληροφορίες από αισθητήρες ρομπότ όπως και επανάληψη λήψης δεδομένων (Βλ. Εικόνα 26). Μπορεί να εμφανίσει δεδομένα από κάμερα, λέιζερ, από συσκευές 3D και 2D, συμπεριλαμβανομένων εικόνων και σημείων νέφους. Καθώς το rviz παρέχει εργαλεία για την οπτικοποίηση των δεδομένων του ρομπότ, μπορεί να δημιουργηθεί με βάση τις ανάγκες μας μια γραφική διεπαφή χρήστη (GUI) για τον έλεγχο της ρομποτικής διάταξης. Η αλληλεπίδραση μεταξύ του ανθρώπινου χειριστή και του ρομπότ (HRI) αποτελεί μεγάλο κομμάτι έρευνας στην κινητή ρομποτική για καταστροφές με την δική της εκτενή βιβλιογραφία. Θα αποφύγουμε να επεκταθούμε σε αυτόν τον τομέα της κινητής ρομποτικής σε αυτήν την εργασία αλλά θα χρησιμοποιήσουμε μια φιλική προς τον χρήστη γραφική διεπαφή που έχει χρησιμοποιηθεί σε σχετικά πειράματα στον τομέα της κινητής ρομποτικής [8] [7].

Το Gazebo είναι ένας προσομοιωτής 3D, ενώ το ROS δρα ως διεπαφή για το ρομπότ. Ο συνδυασμός και των δύο μας δίνει έναν ισχυρό προσομοιωτή ρομπότ. Με το Gazebo μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα σενάριο 3D στον υπολογιστή μας με ρομπότ, εμπόδια και πολλά άλλα αντικείμενα. Το Gazebo χρησιμοποιεί επίσης έναν φυσικό κινητήρα για φωτισμό, βαρύτητα, αδράνεια κ.λπ. Αξιοποιώντας την δύναμη του εξομοιωτή Gazebo μπορούμε εύκολα να προσομοιώσουμε τα χαρακτηριστικά, την φυσική και τις ικανότητες του ρομποτικού οχήματος Husky, όπως φαίνεται στην Εικόνα 27. Σε συνδυασμό με το τρισδιάστατο εργαλείο rviz, έχουμε την δυνατότητα να δημιουργήσουμε ένα σενάριο απομακρυσμένης λειτουργίας ενός ρομποτικού οχήματος με τον προσομοιωτή Gazebo να παρέχει την προσομοίωση του ρομπότ και του περιβάλλοντος. Έτσι, έχουμε την δυνατότητα να εξετάσουμε σενάρια απομακρυσμένης λειτουργίας από ένα κέντρο ελέγχου



Εικόνα 26. Οπτικοποίηση rviz του ρομπότ Turtlebot 2 σε έναν χάρτη

στον υπολογιστή μας. Έτσι με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να αποφύγουμε να χρησιμοποιήσουμε το πραγματικό ρομπότ για λόγους ευκολίας και ασφάλειας όσον αφορά την εφαρμογή μας και τα πειράματά μας.

3.4 Ο αλγόριθμος VFH+

Έχοντας κατανοήσει το πλαίσιο λειτουργίας και τα εργαλεία που χρησιμοποιούμε, ας ξαναδιατυπώσουμε το πρόβλημα που θέλουμε να εξετάσουμε.

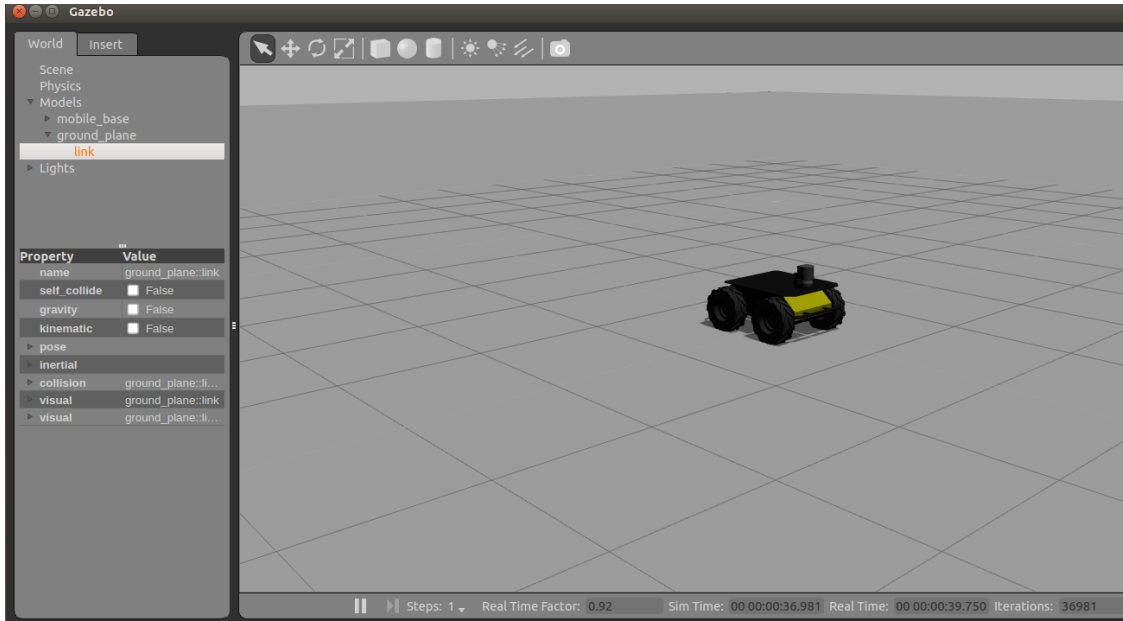
Το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται εδώ είναι ο σχεδιασμός ενός κοινόχρηστου ελεγκτή για ασφαλή πλοήγηση (δηλαδή αποφυγή εμποδίων και επικίνδυνες περιοχές) κινητών ρομπότ που λειτουργούν εξ αποστάσεως. Η Αυτόνομη αποφυγή εμποδίων του ρομπότ είναι οι εντολές U_r και η εντολή του χειριστή U_h που ενεργούν ως είσοδοι στον ελεγκτή που τα συνδυάζει και εξάγει εντολές ασφαλούς κίνησης U_f . Αυτή η εντολή εξόδου U_f τροφοδοτείται στους ενεργοποιητές του ρομπότ και έχει ως αποτέλεσμα μια ασφαλή πορεία. Η είσοδος του ρομπότ U_r είναι οι εντολές ταχύτητας που παράγονται από μια μονάδα αποφυγής εμποδίων VFH+ και εκφράζει την ταχύτητα στον ελεύθερο χώρο χωρισμένο σε γραμμικά και γωνιακά μέρη. Το ίδιο ισχύει και για τον ανθρώπινο χειριστή που εισάγει τις εντολές U_h μέσω joyrad.

Εδώ, για πληρότητα, θα εξηγηθεί αναλυτικά ο αλγόριθμος VFH+. Για την επίτευξη του κοινόχρηστου ελεγκτή που παραμένει λειτουργικός ακόμα και όταν ο στόχος είναι άγνωστος, έγιναν τροποποιήσεις στον βασικό αλγόριθμο. Θα εξηγήσουμε αναλυτικά τον αρχικό αλγόριθμο και σε σημεία που έχει υποστεί τροποποίηση θα αναφέρεται και θα συγκρίνεται με τον αρχικό.

Πρώτον, ένα πλέγμα ιστογράμματος ορίζεται ως ένα ενεργό παράθυρο τετράγωνου σχήματος ($w_s \times w_s$). Το πλέγμα ενημερώνεται σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιώντας αισθητήρες εύρους λέιζερ και λαμβάνοντας το μέγιστο εύρος μέτρησης του λέιζερ d_{max} μπορούμε να προσδιορίσουμε τις διαστάσεις του πλέγματος βάσει της Εξ. 3.1:

$$d_{max} = \frac{\sqrt{2}(w_s - 1)}{2} \quad (3.1)$$

Στο σύστημά μας το παράθυρο που χρησιμοποιούμε είναι ένα πλέγμα ιστογράμματος κυττά-



Εικόνα 27. Το ρομποτικό όχημα Husky σε εξομοίωση Gazebo

ρων 60×60 (δηλ. $W_s = 60$) με μέγεθος κελιού 100 mm που μας δίνει ένα ενεργό τετράγωνο παράθυρο C_a με 4^2 (δηλαδή $4m$ σε κάθε κατεύθυνση από το κέντρο του ρομπότ).

Στη συνέχεια, το *Primary Polar Histogram* H^p προέρχεται από τα δεδομένα που συλλέγονται από το λείζερ που παράγει απόσταση $d_{i,j}$ για κάθε ενεργό κελί έως το κεντρικό σημείο του ρομπότ, σε συνολικό γωνιακό εύρος λείζερ 270 μοιρών. Τα δεδομένα του αισθητήρα επεξεργάζονται σε διάνυσμα μέτρου $m_{i,j}$ (βλ. Εξ. 3.2) και κατεύθυνση διανύσματος $\beta_{i,j}$ (βλ. Εξ. 3.3) στο ενεργό παράθυρο:

$$m_i = c_{i,j}^2(\alpha - b d_{i,j}^2) \quad (3.2)$$

$$\beta_{i,j} = \arctan \frac{y_j - y_0}{x_i - x_0} \quad (3.3)$$

που προέρχεται από τη θέση του ρομπότ (x_0, y_0) και την κατεύθυνση (x_i, y_j) των ενεργών κελιών $c_{i,j}$, όπως φαίνεται στην Εξ. 3.2 και 3.3. Οι τιμές για α και b είναι παράμετροι που επιλέγονται σύμφωνα με την Εξ. 3.4

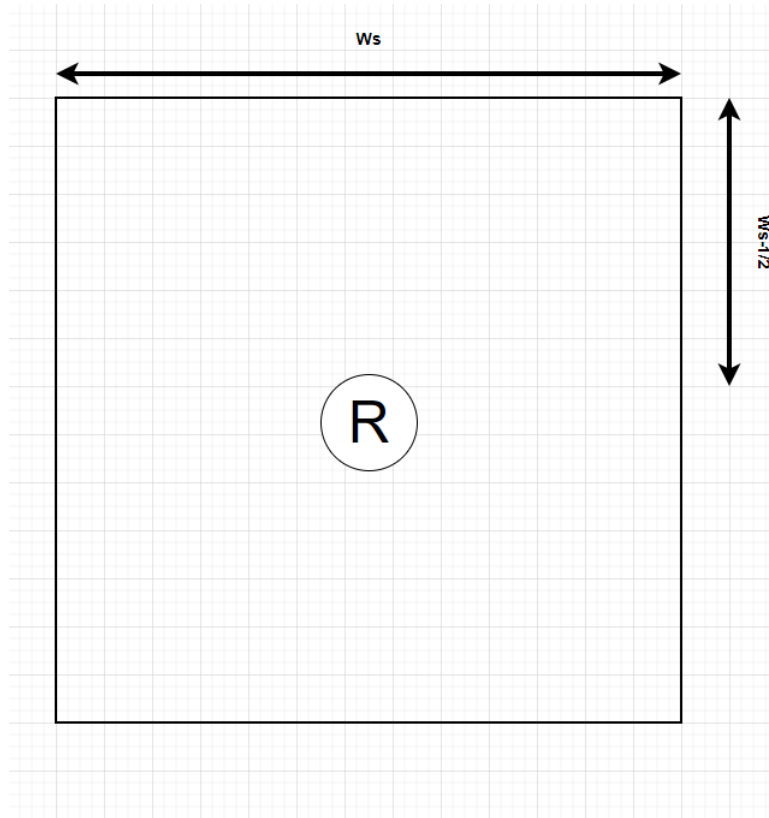
$$\alpha - b \left(\frac{W_s - 1}{2} \right)^2 = 1 \quad (3.4)$$

Ορίσαμε εμπειρικά τη γωνιακή ανάλυση α σε 5° , σαν το εύρος λείζερ μας να είναι 360° που θα μας έδινε 72 τομείς. Θεωρούμε ότι δεν έχει σημασία, ακόμα κι αν δουλεύουμε με μια σειρά λείζερ 270° .

Για κάθε κελί, η γωνία διεύρυνσης $\gamma_{i,j}$ είναι:

$$\gamma_{i,j} = \arcsin \frac{r_{r+s}}{d_{i,j}} \quad (3.5)$$

Κανονικά στο VFH+, τα εμπόδια διευρύνονται με μια ακτίνα $r_{r+s} = r_r + d_s$ όπου, d_s είναι η ελάχιστη απόσταση μεταξύ του ρομπότ και ενός εμποδίου και r_r η ακτίνα του ρομπότ. Ενώ η μέθοδος VFH+ λαμβάνει υπόψιν του το πλάτος του ρομπότ, διαπιστώσαμε ότι το ρομπότ ήταν υπερευαίσθητο σε εμπόδια κατά τον πειραματισμό. Ένας παράγοντας σε αυτό το πρόβλημα ήταν



Εικόνα 28. Πλέγμα Ιστογράμματος, με R για το ρομπότ

ότι το Husky UGV που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματά μας, είναι ένα σχετικά μακρύ ορθογώνιο όχημα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η μέθοδος να δίνει μια ακτίνα περίπου 530mm που είναι πολύ μεγάλη για το ρομπότ. Ως εκ τούτου, διαπιστώσαμε ευρετικά ότι μια μείωση κατά 26%, σε ακτίνα 400mm, αποδίδει πολύ καλύτερα αποτελέσματα. Δεδομένου ότι υπήρχε μείωση στην ακτίνα του ρομπότ, αυξάνουμε την τιμή r_r κατά 10% στη σχέση διεύρυνσης r_{r+s} για πρόσθετη ασφάλεια, ανεξάρτητα από την επιλεγμένη απόσταση ασφαλείας d_s .

Για κάθε γωνιακό τομέα k , η πυκνότητα πολικού εμποδίου υπολογίζεται στη συνέχεια με:

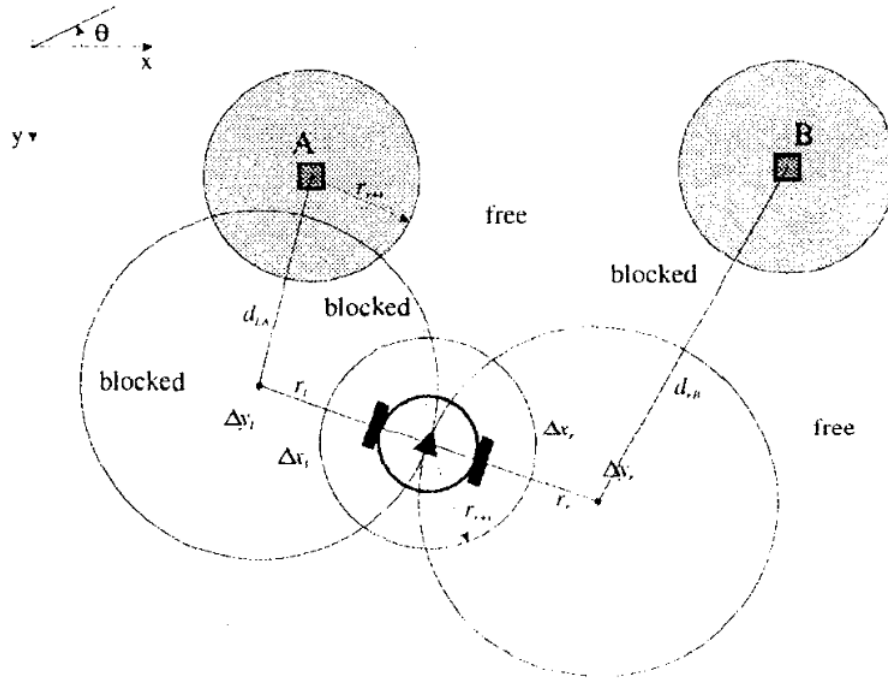
$$H_k^p = \sum_{i,j \in C_\alpha} m_{i,j} \cdot h'_{i,j} \quad (3.6)$$

με:

$$\begin{aligned} h'_{i,j} &= 1 && \text{if } k \cdot \alpha \in [\beta_{i,j} - \gamma_{i,j}, \beta_{i,j} + \gamma_{i,j}] \\ h'_{i,j} &= 0 && \text{otherwise} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Στη συνέχεια τροποποιούμε το *Binary Polar Histogram* H^b ρυθμίζοντας το ελάχιστο όριο τ_{low} καθώς και το μέγιστο όριο τ_{high} . Αυτά τα όρια είναι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν ποιοι γωνιακοί τομείς H^p είναι είτε *free* (0) είτε *block* (1), αντί να έχουν τιμές πολικής πυκνότητας όπως φαίνεται στην Εξ. 3.8

$$\begin{aligned} H_{k,n}^b &= 1 && \text{if } H_{k,n}^p > \tau_{high} \\ H_{k,n}^b &= 0 && \text{if } H_{k,n}^p < \tau_{low} \\ H_{k,n}^b &= H_{k,n-1}^b && \text{otherwise} \end{aligned} \quad (3.8)$$



Εικόνα 29. Απεικόνιση μεγενθυμένων εμποδίων και απαγορευμένων ζωνών [23]

Στη συνέχεια, υπολογίζεται το *Masked Polar Histogram* H^m , το οποίο υποδηλώνει την πιθανότητα της ελεύθερης περιοχής να μπορεί να περαστεί με βάση κυκλικών τόξων καθώς το ρομπότ αποφεύγει εμπόδια σε κάθε δείγμα. Αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει δυναμικές και ομαλές τροχιές (Βλ. Εικόνα 29). Η μέγιστη καμπυλότητα τροχιάς ενός κινητού ρομπότ είναι συχνά συνάρτηση της ταχύτητας του ρομπότ. Όσο πιο γρήγορα ταξιδεύει το ρομπότ, τόσο μικρότερη είναι η μέγιστη καμπυλότητα.

Η καμπυλότητα μιας καμπύλης ορίζεται από $\kappa = \frac{1}{r}$. Οι τιμές των ελάχιστων ακτίνων οδήγησης ως συνάρτηση της ταχύτητας του ρομπότ μπορούν εύκολα να μετρηθούν. Ορίζουμε αυτές τις ακτίνες και για τις δύο πλευρές ως $r_r = \frac{1}{\kappa_r}$ και $r_l = \frac{1}{\kappa_l}$.

Οι θέσεις των κέντρων της δεξιάς και της αριστερής τροχιάς σε σχέση με την τρέχουσα θέση του ρομπότ καθορίζονται στην Εξ. 3.9:

$$\begin{aligned} \Delta x_r &= r_r \cdot \sin \theta & \Delta y_r &= r_r \cdot \cos \theta \\ \Delta x_l &= -r_l \cdot \sin \theta & \Delta y_l &= -r_l \cdot \cos \theta \end{aligned} \quad (3.9)$$

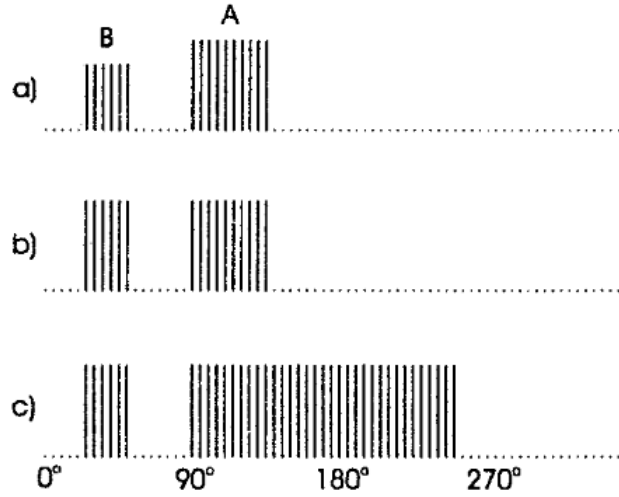
Οι αποστάσεις από τα ενεργά κελιά $c_{i,j}$ του κελιού παραθύρου C_a προς τα δεξιά d_r και αριστερά d_l κέντρα τροχιάς υπολογίζονται στην Εξ. 3.12,

η δεξιά κατεύθυνση του ρομπότ αποκλείεται εάν:

$$d_r^2 < (r_r + r_{r+s}) \quad \text{συνθήκη 1} \quad (3.10)$$

και η αριστερή κατεύθυνση του ρομπότ αποκλείεται εάν:

$$d_l^2 < (r_l + r_{r+s}) \quad \text{συνθήκη 2} \quad (3.11)$$



Εικόνα 30. a) Primary polar histogram, b) binary polar histogram, c) masked polar histogram [23]

Στη συνέχεια ελέγχοντας κάθε ενεργό κελί καθορίζουμε το μέγιστο όριο για στροφές δεξιά φ_r , αριστερά φ_l και πίσω $\varphi_b = \theta + \pi$ ως την αντίθετη κατεύθυνση προς την τρέχουσα κατεύθυνση κίνησης. Μπορούν να προσδιοριστούν εφαρμόζοντας τα ακόλουθα βήματα:

1. Προσδιορίστε φ_b . Ορίστε φ_r και φ_l ίσο με φ_b .
2. Για κάθε κελί $c_{i,j}$ στο ενεργό παράθυρο C_a με $c_{i,j} > \tau$:
 - Εάν το $\beta_{i,j}$ βρίσκεται στα δεξιά του θ και στα αριστερά του φ_r , επιλέξτε *συνθήκη 1*. Εάν πληρείται η συνθήκη, ορίστε φ_r ίσο με $\beta_{i,j}$
 - Εάν το $\beta_{i,j}$ βρίσκεται στα αριστερά του θ και στα δεξιά του φ_l , επιλέξτε *συνθήκη 2*. Εάν πληρείται η συνθήκη, ορίστε φ_l ίσο με $\beta_{i,j}$

$$d_r^2 = (\Delta x_r - \Delta x(j))^2 + (\Delta y_r - \Delta y(i))^2 \quad (3.12)$$

$$d_l^2 = (\Delta x_l - \Delta x(j))^2 + (\Delta y_l - \Delta y(i))^2$$

Τώρα κατασκευάζουμε το *masked polar histogram* ως εξής:

$$\begin{aligned} H_k^m &= 0 && \text{εάν } H_k^b = 0 \text{ και } (k \cdot \alpha) \in \{[\varphi_r, \theta], [\theta, \varphi_l]\} \\ H_k^m &= 1 && \text{άλλο} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Τέλος, εφαρμόζουμε τη συνάρτηση κόστους της VFH+. Η μέθοδος αναζητά όλα τα ανοίγματα στο Masked Polar Histogram και υπολογίζει τις υποψήφιες οδηγίες. Στη συνέχεια επιλέγεται η κατεύθυνση υποψηφίου k_d με το χαμηλότερο κόστος ως η νέα κατεύθυνση κίνησης $\varphi_d = k_d \cdot \alpha$. Διακρίνει τα ανοίγματα *πλατιά* και *στενά*. Εάν το δεξί και το αριστερό τμήμα (k_r, k_l) είναι μικρότερο από s_{max} το άνοιγμα θεωρείται στενό. Σε αυτήν την περίπτωση υπάρχει μόνο μία υποψήφια κατεύθυνση, που οδηγεί το ρομπότ στο κέντρο του ανοίγματος:

$$c_d = \frac{k_r + k_l}{2} \quad (3.14)$$

Στην περίπτωση ενός πλατύ ανοίγματος υπάρχουν δύο υποψήφιες κατευθύνσεις c_r προς τα δεξιά και c_l στην αριστερή πλευρά του ανοίγματος:

$$\begin{aligned} c_r &= k_r + \frac{S_{max}}{2} \\ c_l &= k_l - \frac{S_{max}}{2} \end{aligned} \quad (3.15)$$

Υπάρχει επίσης η υποψήφια κατεύθυνση c_t που περιγράφεται στην Εξ. 3.16, αλλά δεν χρησιμοποιείται στην υλοποίησή μας, καθώς η μέθοδος μας παραμένει αδιάφορη στην ύπαρξη στόχου, σε αντίθεση με την αρχική μέθοδο VFH+ που απαιτούσε έναν στόχο για να λειτουργήσει. Επομένως, ορίζεται σε μια σταθερή γωνία 90° , την μπροστινή κατεύθυνση του ρομπότ.

$$c_t = k_t \quad \text{if } k \in [c_r, c_l] \quad (3.16)$$

Όσο για τη συνάρτηση κόστους της υποψήφιας κατεύθυνσης c , η υλοποίησή μας εμφανίζεται στην Εξ. 3.17. Ο τρέχων προσανατολισμός θ_n δίνεται από την οδομετρία.

$$g(c) = \mu_1 \cdot \Delta(c, k) + \mu_2 \cdot \Delta(c, \frac{\theta_n}{\alpha}) + \mu_3 \cdot \Delta(c, k_{d,n-1}) \quad (3.17)$$

όπου $\Delta(c_1, c_2)$ είναι μια συνάρτηση που υπολογίζει την απόλυτη διαφορά γωνίας μεταξύ δύο τομέων c_1 και c_2 έτσι ώστε το αποτέλεσμα να είναι $\leq \frac{\pi}{2}$.

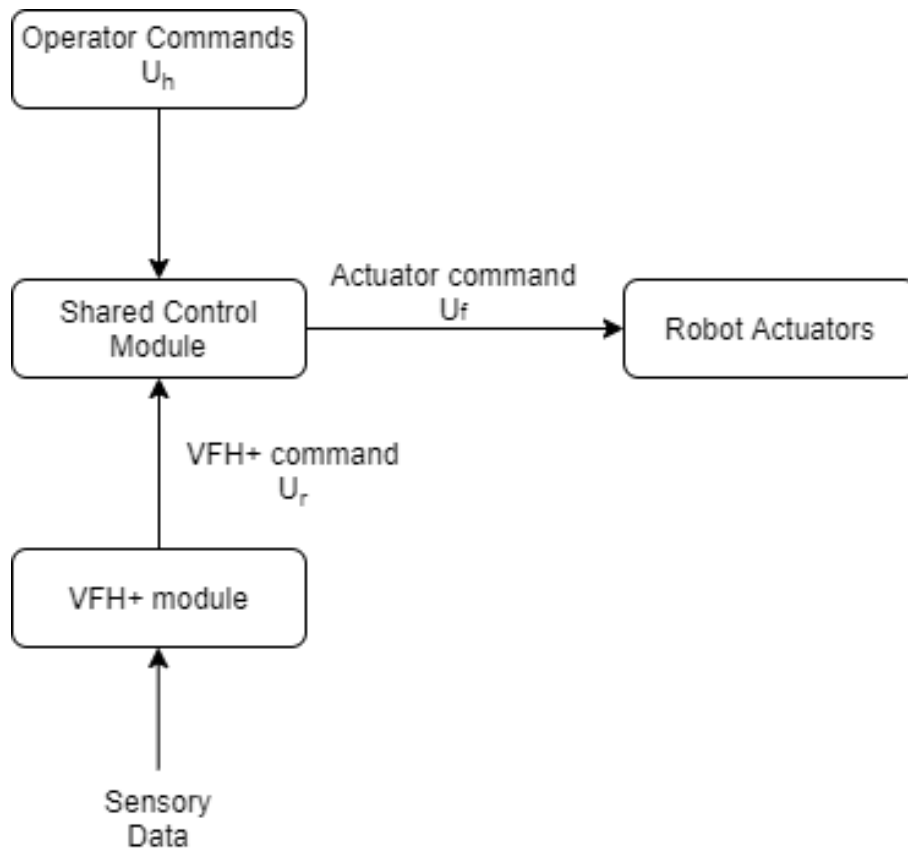
$$\Delta(c_1, c_2) = \min\{|c_1 - c_2|, |c_1 - c_2 - \pi|, |c_1 - c_2 + \pi|\} \quad (3.18)$$

3.5 Κοινόχρηστος έλεγχος για κινητά ρομπότ

Ο κοινόχρηστος ελεγκτής είναι υπεύθυνος για την ανάμειξη των εντολών ταχύτητας της ομάδας VFH+ U_r και το χειριστήριο χειριστή δίνει εντολή U_h , με αποτέλεσμα ασφαλείς ταχύτητες εξόδου U_f για να ακολουθήσει το ρομπότ (βλ. Εικ. 31). Όπως έχουμε ήδη αναφερθεί, και μπορεί να φανεί από την Εικ. 31 ο ελεγκτής είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε να υποστηρίζει πολλαπλές μεθόδους τοπικής πλοήγησης κινητών ρομπότ. Αυτό σημαίνει πως θα μπορούσαμε κάλλιστα να έχουμε επιλέξει μέθοδο διαφορετική από τον VFH+, αρκεί να ανήκει στην οικογένεια των ιστογραμμικών μεθόδων και να έχουν πραγματοποιηθεί οι απαραίτητες τροποποιήσεις. Σε κάθε περίπτωση, οι τροποποιήσεις των ιστογραμμικών μεθόδων πηγάζουν από την μέθοδο VFH, οπότε οποιαδήποτε μετεξέλιξη της είναι δυνατή και αποδεκτή αναλόγως των αναγκών της εφαρμογής. Επιπροσθέτως με την υποστήριξη του μεταλειτουργικού συστήματος ROS, η μέθοδος τοπικής πλοήγησης και ο ελεγκτής μας έχουν υλοποιηθεί ως ξεχωριστοί κόμβοι. Το γεγονός αυτό μας επιτρέπει να έχουμε έναν εσωτερικό "διακόπτη" στα πλαίσια του ελεγκτή που να επιλέγει την επιθυμητή μέθοδο, καθώς μπορεί να υποστηρίξει πολλαπλές μεθόδους. Συνεπώς το U_r μπορεί να εξαρτάται από όποια μέθοδο επιλέξουμε σε μία ομάδα κόμβων ιστογραμμικών μεθόδων. Σε αυτή την εργασία λειτουργούμε καθαρά με την μέθοδο VFH+, αλλά θέλουμε να δώσουμε έμφαση στην συγκεκριμένη ιδιότητα του ελεγκτή.

Μαθηματικά, ο κοινός έλεγχος θεωρείται συχνά ως διαιτησία δύο πολιτικών (δηλ. πολιτική ανάμειξης) [65]. Στην περίπτωση μας, η συνάρτηση διαιτησίας που εκφράζει αυτήν την ανάμειξη είναι η ακόλουθη:

$$U_f = \alpha U_h + (1 - \alpha) U_r \quad (3.19)$$



Εικόνα 31. Μπλοκ διάγραμμα του κοινόχρηστου ελεγκτή

Η επιρροή U_h και U_r προσαρμόζεται από τη συνάρτηση διαιτητή $\alpha(\cdot)$. Οι τιμές της συνάρτησης πρέπει να κυμαίνονται από 0.0 έως 1.0 και μπορούν να προσαρμοστούν στις απαιτήσεις της εφαρμογής, των συνθηκών και της συμπεριφοράς του ελεγκτή. Για παράδειγμα, εάν ένας χειριστής απαιτεί περισσότερη βοήθεια λόγω του υψηλού φόρτου εργασίας, τότε με τη χρήση της κατάλληλης προσαρμοστικής συνάρτησης, το επίπεδο των U_r μπορεί να τροποποιηθεί (π.χ. να γίνει η πιο κυρίαρχη είσοδος). Στην περίπτωση μας, το $\alpha(\cdot)$ παραμένει σταθερό για τους σκοπούς αυτής της εργασίας, εκφράζοντας τη γραμμική ανάμειξη μεταξύ U_h και U_r . Η τιμή $\alpha(\cdot) = 0.5$ επιλέχθηκε ευρετικά και ουσιαστικά σημαίνει ότι τόσο οι εντολές του ρομπότ όσο και του χειριστή συμβάλλουν εξίσου στο τελικό διάνυσμα ταχύτητας U_f . Ο κόμβος ανάμειξης είναι υπεύθυνος για την παραγωγή του τελικού διανύσματος που θα οδηγηθεί στους ενεργοποιητές του ρομπότ. Οι λειτουργίες έχουν ως εξής:

$$u_{linear} = \alpha(\cdot)u_{h_{linear}} + (1 - \alpha(\cdot))u_{r_{linear}} \quad (3.20)$$

$$u_{angular} = \alpha(\cdot)u_{h_{angular}} + (1 - \alpha(\cdot))u_{r_{angular}} \quad (3.21)$$

$$u_f = u_{linear} + u_{angular} \quad (3.22)$$

Ο κοινόχρηστος ελεγκτής που προτείνεται μπορεί να εκτελεστεί στο παρασκήνιο χωρίς να επηρεαστεί η συμπεριφορά του ρομπότ. Μπορεί να ενεργοποιηθεί σε χρόνο εκτέλεσης και κατ'απαιτήση (π.χ. με το πάτημα ενός κουμπιού από τον χειριστή στον έλεγχο Ανθρώπινης Πρωτοβουλίας ή από το ρομπότ σε συστήματα ελέγχου Μικτής Πρωτοβουλίας) σε καταστάσεις που μπορεί να είναι επωφελείς.

Η λεπτομερής υλοποίηση του κώδικα μπορεί να φανεί παρακάτω. Δημιουργούμε έναν κόμβο στο ROS υλοποιώντας την κλάση "Shared Control" για τον ελεγκτή μας. Στην συνέχεια, κάνουμε εγγραφή στα μηνύματα του χειριστηρίου του χρήστη αλλά και στα μηνύματα που θα δίνει ο αλγόριθμος VFH+. Οι μορφή των μηνυμάτων και στις δύο περιπτώσεις είναι της μορφής 'Twist' που είναι οι γραμμικές και γωνιακές συντεταγμένες x, y, z που θα κινηθεί το ρομποτικό μας όχημα. Οι ρουτίνες teleCallback και vfhCallback διαβάζουν τις συντεταγμένες από τα μηνύματα του χειριστηρίου και του αλγορίθμου και στην συνέχεια τις περνάμε στην ρουτίνα operationCallback που εκτελείται συνεχώς. Η ρουτίνα operationCallback είναι υπεύθυνη για την μίξη των εντολών και είναι η καρδιά του ελεγκτή. Σε αυτό το σημείο αποφασίζουμε την τιμή του a που σε αυτήν την περίπτωση είναι μία απλή μεταβλητή τύπου float. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, θα μπορούσαμε κάλλιστα να έχουμε μία δυναμική μεταβλητή a που θα διαχειρίζεται ένας άλλος κόμβος του ROS και απλά να εισάγουμε την τιμή του στην ρουτίνα, όπως κάναμε και με τα μηνύματα. Επιπροσθέτως, μπορεί να αλλαχτεί εύκολα ο τρόπος της πολιτικής μίξης εντολών. Σε αυτόν τον ελεγκτή επηρεάζονται οι επιτρεπτές στροφές του ρομποτικού οχήματος, όπως φαίνεται από την εντολή "cmd_vel.angular.z".

```
#include <ros/ros.h>
#include <geometry_msgs/Twist.h>

class Shared_Control
{
private:
    ros::NodeHandle nh_;
    ros::Subscriber teleop_sub_;
    ros::Subscriber vfh_sub_;
    ros::Publisher shared_cmd_;
    ros::Timer timer;

    geometry_msgs::Twist tele;
    geometry_msgs::Twist vfh;
    geometry_msgs::Twist cmd_vel;

public:
    Shared_Control();
    void teleCallback(const geometry_msgs::Twist::ConstPtr& tele);
    void vfhCallback(const geometry_msgs::Twist::ConstPtr& vfh);
    void operationCallback(const ros::TimerEvent&);
};

Shared_Control::Shared_Control()
{
    //subscriber to controller commands
    teleop_sub_ =
    nh_.subscribe("/delayed_teleop/cmd_vel", 5, &Shared_Control::teleCallback,this);
    //subscriber to VFH+ output

    vfh_sub_ =
```

```

nh_.subscribe("/vfh/cmd_vel", 5, &Shared_Control::vfhCallback, this);

shared_cmd_ = nh_.advertise<geometry_msgs::Twist>("/shared_control/cmd_vel", 5);

timer =
nh_.createTimer(ros::Duration(0.1), &Shared_Control::operationCallback, this);
}

void Shared_Control::teleCallback(const geometry_msgs::Twist::ConstPtr& msg)
{
// Teleoperation callback. We store the values of the controller
// input to class variables.

tele.linear.x = msg->linear.x;
tele.linear.y = msg->linear.y;
tele.linear.z = msg->linear.z;

tele.angular.x = msg->angular.x;
tele.angular.y = msg->angular.y;
tele.angular.z = msg->angular.z;
}

void Shared_Control::vfhCallback(const geometry_msgs::Twist::ConstPtr& msg)
{
// Same as teleCallback.
vfh.linear.x = msg->linear.x;
vfh.linear.y = msg->linear.y;
vfh.linear.z = msg->linear.z;

vfh.angular.x = msg->angular.x;
vfh.angular.y = msg->angular.y;
vfh.angular.z = msg->angular.z;
}

void Shared_Control::operationCallback(const ros::TimerEvent&)
{
/* We combine the controller and VFH+ inputs.
* We care about the angular x input mostly
* and ignore the linear x at the moment
* This Callback can be modified freely for
*more optimized input blending.
*/
if (tele.linear.x == 0 & tele.angular.z == 0){

```

```
/*
 * This is just so VFH+ doesn't move the robot
 * if the operator is not touching the stick at all
 */
cmd_vel.linear.x = 0;
cmd_vel.linear.y = 0;
cmd_vel.linear.z = 0;

cmd_vel.angular.x = 0;
cmd_vel.angular.y = 0;
cmd_vel.angular.z = 0;
}
else
{
float alpha = 0.5;

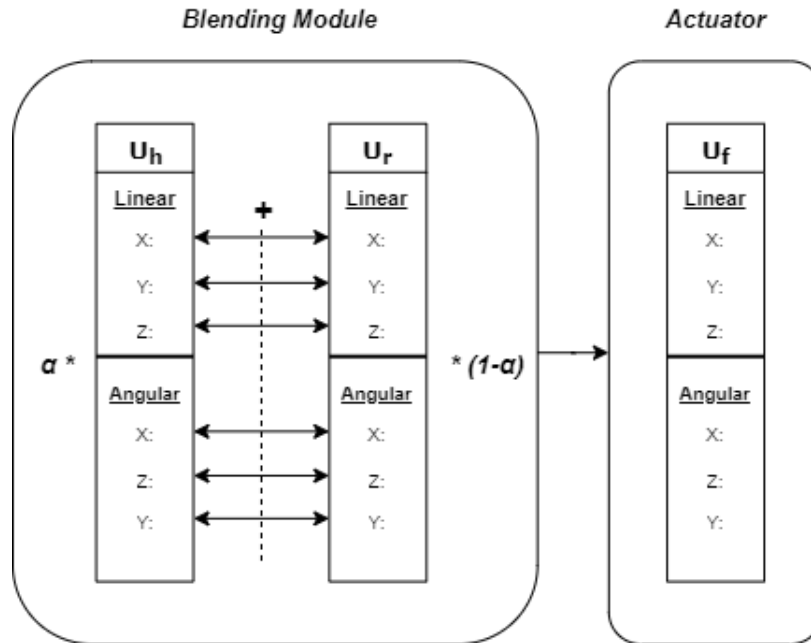
cmd_vel.linear.x = tele.linear.x /*+ vfh.linear.x*/;
cmd_vel.linear.y = tele.linear.y + vfh.linear.y;
cmd_vel.linear.z = tele.linear.z + vfh.linear.z;

cmd_vel.angular.x = tele.angular.x + vfh.angular.x;
cmd_vel.angular.y = tele.angular.y + vfh.angular.y;
cmd_vel.angular.z = alpha * tele.angular.z - (1- alpha)*vfh.angular.z;
}

shared_cmd_.publish(cmd_vel);
}

int main(int argc, char **argv)
{
ros::init(argc, argv, "shared_control_node");
Shared_Control shared_control_node;
ros::spin();
return 0;
}
```

Ένα σχήμα για να την καλύτερη κατανόηση του παραπάνω κώδικα παρέχεται στην Εικόνα 32. Αποτελεί μια λεπτομερή απεικόνιση της τρέχουσας λειτουργίας του ελεγκτή καθώς επεξεργάζομαστε τον έλεγχο κίνησης του ρομπότ, στην προκειμένη περίπτωση διανύσματα τύπου Twist, και τα οδηγούμε στους ενεργοποιητές του ρομπότ Husky. Η αποτελεσματικότητα των παραγόμενων τροχιών και γενικά του ελεγκτή θα εξεταστεί πειραματικά στο επόμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 32. Ο συνδυασμός του κοινού ελεγκτή μεταξύ της μονάδας VFH + και των εντολών του χειριστή

Κεφάλαιο 4

Αποτελέσματα – Ευρήματα / Επιτεύγματα

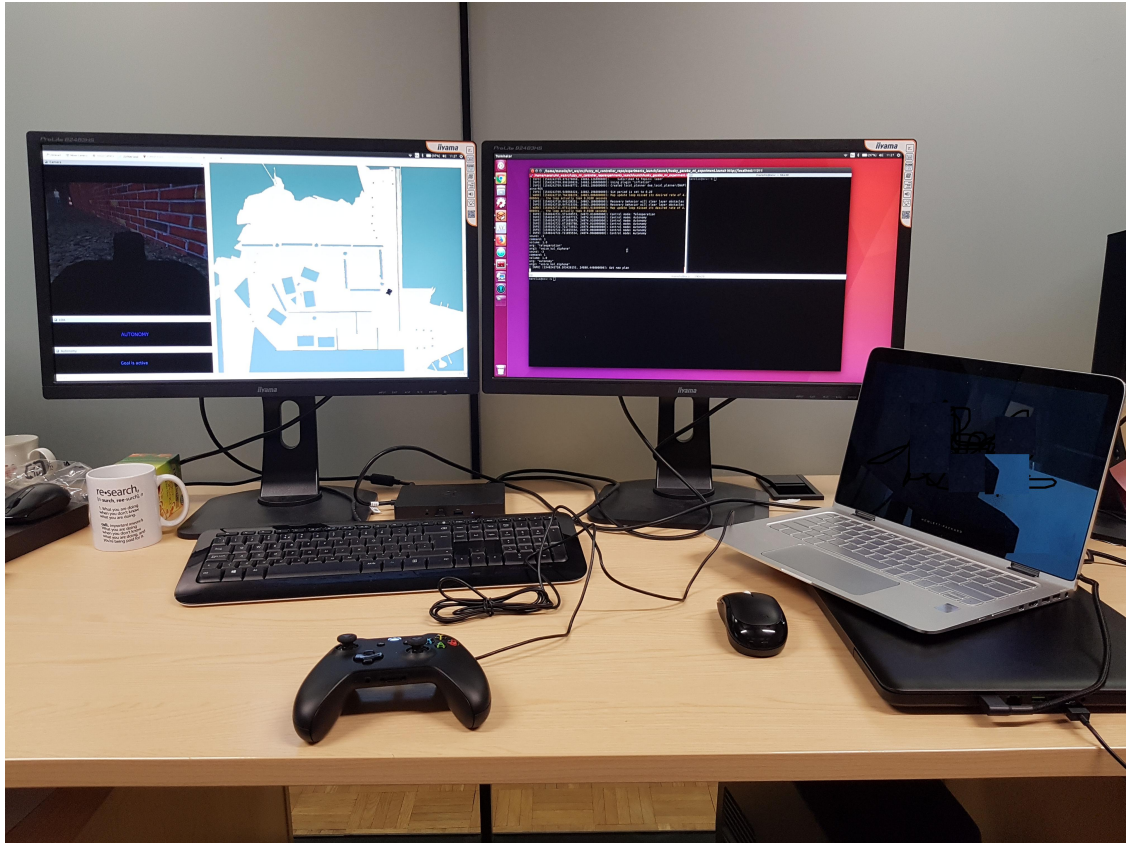
Πραγματοποιήθηκε ένα πείραμα για την αξιολόγηση της απόδοσης της προτεινόμενης μεθόδου κοινόχρηστου ελέγχου. Για το πείραμα, δημιουργήθηκε μια ρεαλιστικά προσομοιωμένη δοκιμαστική αρένα SAR (δηλαδή, Περιβάλλον SAR) με διαστάσεις περίπου $24m \times 24m$ (βλέπε Εικ. 34 και 35). Το Gazebo, ένας ρομποτικός προσομοιωτής υψηλής πιστότητας, χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του περιβάλλοντος και του ρομποτικού συστήματος. Ο προσομοιωτής Gazebo χρησιμοποιεί έναν προηγμένο κινητήρα φυσικής και δημιουργεί ρεαλιστικά περιβάλλοντα και ερεθίσματα για τους χειριστές, όπως φαίνεται στα σχήματα 35 και 34. Η αρένα περιλαμβάνει κόμβους του ROS που δρουν ως τεχνητός θόρυβος στα αισθητήρια του ρομπότ, έτσι ώστε το όχημα να μην λειτουργεί σε ιδανικές συνθήκες. Το προσομοιωμένο ρομπότ ήταν εξοπλισμένο με LIDAR και κάμερα RGB. Ελέγχθηκε μέσω μιας μονάδας ελέγχου χειριστή (OCU) (βλ. Εικ. 33) καθώς αναπαράγουμε ένα σενάριο απομακρυσμένου ελέγχου κινητού ρομπότ. Το OCU αποτελείται από ένα ποντίκι, ένα χειριστήριο για τις εντολές του χειριστή και έναν φορητό υπολογιστή που εκτελεί το λογισμικό και μια οθόνη που δείχνει το Γραφικό περιβάλλον εργασίας χρήστη (GUI) (βλ. Σχ. 34). Το αποθετήριο¹ που περιέχει τον κωδικό ROS για τον κοινόχρηστο έλεγχο με βάση το VFH+ που περιγράφεται σε αυτό το έγγραφο, παρέχεται με άδεια MIT.

Η προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε για να αποφευχθεί η εισαγωγή παραπλανητικών παραγόντων από την ανάπτυξη ρομπότ σε πραγματικό κόσμο και για τη βελτίωση της επαναληψιμότητας του πειράματος. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα δεδομένης της πολυπλοκότητας του πειράματος και του μεγέθους της δοκιμαστικής αρένας. Για παράδειγμα, η ασύρματη επικοινωνία με το ρομπότ που αποτυγχάνει λόγω απρόβλεπτης υποβάθμισης σήματος μπορεί να λειτουργήσει ως παράγοντας σύγχυσης που επηρεάζει αρνητικά το ελεγχόμενο πείραμά μας. Επιπλέον, το σύστημά μας είναι ένα εξ αποστάσεως ελεγχόμενο ρομπότ και ως εκ τούτου η διεπαφή ελέγχου (δηλαδή Το OCU με το joystick και το GUI) παραμένει η ίδια σε μια πραγματική ανάπτυξη.

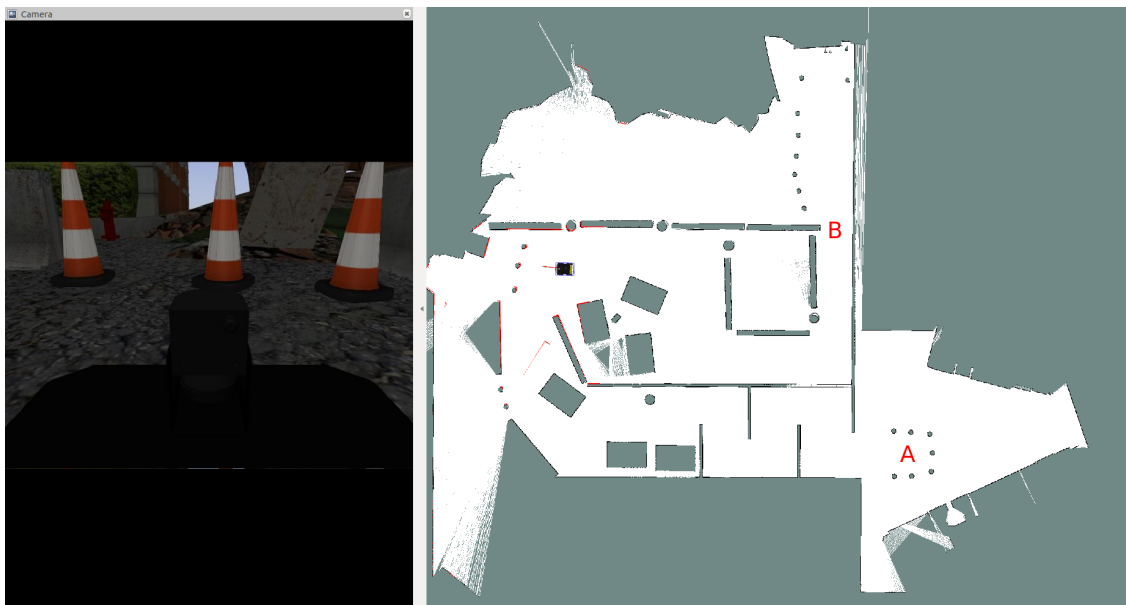
4.1 Πρωτόκολλο πειράματος

Σε τρεις έμπειρους χειριστές ρομπότ ανατέθηκε η πλοήγηση από το σημείο A στο σημείο B (βλ. Εικ. 34) όσο το δυνατόν γρηγορότερα και με ασφάλεια. Καθένας από τους τρεις χειριστές διενήργησε συνολικά 8 δοκιμές της εργασίας, 4 φορές χρησιμοποιώντας καθαρή τηλελειτουργία και 4 φορές χρησιμοποιώντας τον κοινόχρηστο ελεγκτή. Προκειμένου να αντισταθμιστεί και να ελαχιστοποιηθεί το μαθησιακό αποτέλεσμα, οι δοκιμές διεξήχθησαν σε ένα εναλλασσόμενο πρότυπο.

¹Extreme Robotics Lab GitHub repository: https://github.com/uob-er1/shared_control



Εικόνα 33. Η μονάδα ελέγχου χειριστή (OCU) αποτελείται από ένα φορητό υπολογιστή, ένα χειριστήριο και μια οθόνη που δείχνει το GUI.



Εικόνα 34. **Αριστερά:** ροή βίντεο από την κάμερα. **Δεξιά:** Ο χάρτης (όπως δημιουργήθηκε από το SLAM) που δείχνει τη στάση του ρομπότ, τις αντανakλάσεις λέιζερ των εμποδίων (κόκκινο) και τους τοίχους (μαύρο). Στον χάρτη, η αποστολή ήταν να πλοηγηθούμε από το σημείο A στο σημείο B.



Εικόνα 35. Η πειραματική αρένα αναζήτησης και διάσωσης που χρησιμοποιήθηκε

Ένας χάρτης που δημιουργήθηκε από SLAM δόθηκε στο σύστημα και τον χειριστή (δηλαδή μέσω του GUI) στην αρχή της δοκιμής. Ωστόσο, πριν από κάθε δοκιμή, ο πειραματιστής έβαλε τυχαία πολλά επιπλέον εμπόδια στην αρένα για τα οποία οι χειριστές δεν γνώριζαν και ήταν ορατά μόνο στο χάρτη ως αντανάκλασεις λέιζερ και μόνο σε μικρή απόσταση. Αυτό έγινε για να εισαχθεί μια δυναμική περιβαλλοντική επίδραση κοινή σε σενάρια αντιμετώπισης καταστροφών. Δόθηκε προσοχή στη δυσκολία της συνολικής εργασίας να παραμείνει η ίδια μεταξύ των δοκιμών ανεξάρτητα από τις θέσεις των τυχαίων εμποδίων. Επιπλέον, για να προωθηθεί ο ρεαλισμός της εργασίας, εισήχθη καθυστέρηση 1sec στις εντολές του χειριστή. Επίσης, η συχνότητα μετάδοσης εικόνας της κάμερας μειώθηκε στα 2.5Hz. Οι καθυστερημένες εντολές και η καθυστερημένη ροή βίντεο είναι κοινές δυσκολίες επικοινωνίας κατά τη διάρκεια απομακρυσμένων λειτουργιών π.χ. στο [39], [66] και στο DARPA DRC Finals [3].

4.2 Αναλυτική παρουσίαση αποτελεσμάτων

Μετρήθηκαν δύο μετρήσεις απόδοσης για την αξιολόγηση του συστήματος: ο χρόνος ολοκλήρωσης που αντικατοπτρίζει τον χρόνο που χρειάστηκε για να ολοκληρωθεί η δοκιμασία, δηλαδή από την αφετηρία A μέχρι τον στόχο B (Βλ. Εικόνα 34 Δεξιά) και τον αριθμό των συγκρούσεων με το περιβάλλον (δηλαδή εμπόδια). Οι μετρήσεις μας έγιναν με χρονόμετρο που ξεκινάει κατά την ενεργοποίηση του επιπέδου αυτονομίας του ρομπότ που μας ενδιαφέρει και τρέχει μέχρι το κέντρο του ρομπότ να φτάσει στο σημείο B. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι πίνακες των μετρήσεων και των τριών χειριστών. Οι πίνακες 1,3,5 εκφράζουν τους χρόνους ολοκλήρωσης της δοκιμασίας για κάθε χειριστή αντίστοιχα σε απλή τηλελειτουργία και με την χρήση του κοινόχρηστου ελεγκτή. Ομοίως, οι πίνακες 2,4,6 εκφράζουν τον αριθμό συγκρούσεων για κάθε χειριστή για τις δύο λειτουργίες.

Πίνακας 1. Χρόνοι χειριστή Α

Δοκιμασία	Χρόνος Τηλελειτουργίας [sec]	Χρόνος Κοινόχρητου [sec]
1	190.7	141.1
2	180.5	154.4
3	193.6	146.0
4	229.6	156.6

Πίνακας 2. Συγκρούσεις χειριστή Α

Δοκιμασία	Συγκρούσεις Τηλελειτουργίας	Συγκρούσεις Κοινόχρητου
1	3	0
2	1	0
3	2	0
4	1	0

Πίνακας 3. Χρόνοι χειριστή Β

Δοκιμασία	Χρόνος Τηλελειτουργίας [sec]	Χρόνος Κοινόχρητου [sec]
1	212.5	158.3
2	206.5	161.3
3	171.6	156.4
4	197.2	148.2

Πίνακας 4. Συγκρούσεις χειριστή Β

Δοκιμασία	Συγκρούσεις Τηλελειτουργίας	Συγκρούσεις Κοινόχρητου
1	0	0
2	1	0
3	1	1
4	6	0

Πίνακας 5. Χρόνοι χειριστή Γ

Δοκιμασία	Χρόνος Τηλελειτουργίας [sec]	Χρόνος Κοινόχρητου [sec]
1	220.3	162.9
2	200.3	170.9
3	220.6	172.0
4	237.7	174.5

Πίνακας 6. Συγκρούσεις χειριστή Γ

Δοκιμασία	Συγκρούσεις Τηλελειτουργίας	Συγκρούσεις Κοινόχρητου
1	2	0
2	6	1
3	5	0
4	6	1

4.3 Μέθοδοι Στατιστικής Ανάλυσης

Για να μπορούμε να βγάλουμε ρητά συμπεράσματα εάν ο κοινόχρηστος ελεγκτής μας αποδίδει καλύτερα σε σχέση με την τηλελειτουργία θα πρέπει να ελέγξουμε εάν τα δεδομένα μας έχουν στατιστική σημαντικότητα. Πολλές μέθοδοι στατιστικής ανάλυσης όπως η συσχέτιση, μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης, t-test κ.α βασίζονται στην προϋπόθεση πως τα δεδομένα έχουν Γκαουσιανή κατανομή, δηλαδή κανονική κατανομή. Η σημαντικότητα της κανονικότητας του δείγματος είναι αντιστρόφως ανάλογη στην στατιστική. Για δείγματα από >30 ή 40 συνήθως είναι δυνατό να γίνει στατική ανάλυση χωρίς να υπάρχουν μεγάλες συνέπειες. Σε περιπτώσεις που το δείγμα είναι πολύ μεγάλο η κανονικότητα του δείγματος μπορεί να αγνοηθεί εντελώς καθώς το θεώρημα κεντρικό ορίου αναφέρει ότι οι μέσοι όροι τυχαίων δειγμάτων από οποιαδήποτε διανομή θα έχουν από μόνοι τους μια κανονική κατανομή. Κατά συνέπεια, όταν έχουμε δείγματα εκατοντάδων παρατηρήσεων, συχνά μπορούμε να αγνοήσουμε την κατανομή των δεδομένων [67] [68]. Καθώς η κανονικότητα των δειγμάτων είναι σημαντική στην έρευνα τα δείγματα περνάνε από τεστ κανονικότητας πριν γίνει κάποια στατιστική ανάλυση, με ένα από τα πιο εδραιωμένα στην βιβλιογραφία να είναι το Kolmogorov–Smirnov τεστ (K–S τεστ ή KS τεστ). Αλλά καθώς στην δική μας περίπτωση λειτουργούμε με μικρό δείγμα, $N = 12$ για κάθε μέγεθος που μετράμε το KS τεστ είναι αδύναμο. Το να γνωρίζουμε την κανονικότητα των μετρήσεών μας είναι ύψιστης σημασίας. Για αυτές τις περιπτώσεις προτείνεται το τεστ κανονικότητας Shapiro-Wilk καθώς είναι η ο πιο αξιόπιστος έλεγχος κανονικότητας για χαμηλό αριθμό δείγματος. Τα δεδομένα ελέγχθηκαν για κανονικότητα με τον έλεγχο Shapiro-Wilk και επιπλέον επιθεωρήθηκαν οπτικά. Το τεστ Shapiro Wilk ελέγχει εάν το κανονικό μοντέλο διανομής ταιριάζει στις παρατηρήσεις. Το τεστ χρησιμοποιεί μόνο τη δοκιμή δεξιάς ουράς. Κατά την εκτέλεση της δοκιμής, η στατιστική W είναι μόνο θετική και αντιπροσωπεύει τη διαφορά μεταξύ του εκτιμώμενου μοντέλου και των παρατηρήσεων. Όσο μεγαλύτερη είναι η στατιστική, τόσο πιθανότερο είναι το μοντέλο να μην είναι σωστό. Η αριστερή ουρά μπορεί να αντιπροσωπεύει μια τιμή που είναι πολύ μικρή, η στατιστική W δεν μπορεί να είναι πολύ μικρή. Για δείγματα $3 \leq n \leq 50$ μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον τύπο:

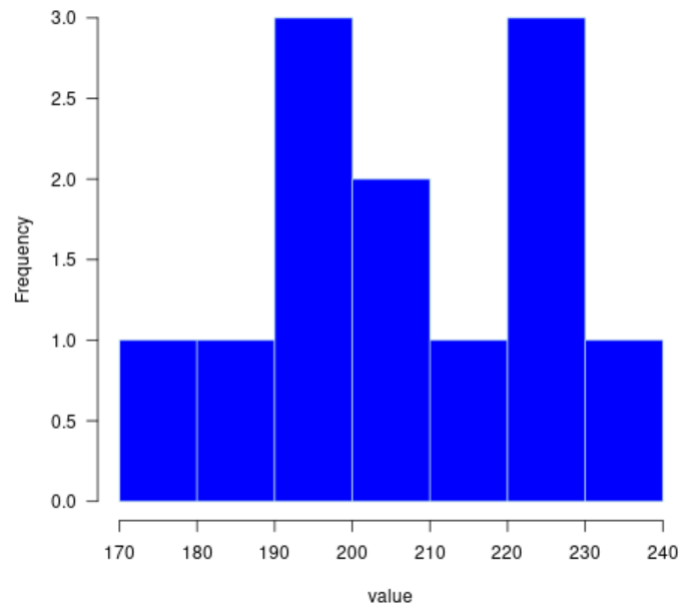
$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

όπου:

- $x_{(i)}$ εκφράζει το στατιστικό στοιχείο της τάξης i
- \bar{x} η μέση τιμή του δείγματος
- a_i συντελεστές

Όσο πιο κοντά βρίσκεται η τιμή W βρίσκεται στο 1, τόσο πιο κανονική είναι η κατανομή μας. Εάν υπολογίσουμε το p-value και βρούμε πως είναι μεγαλύτερο από 0.05 δεν μπορούμε να απορρίψουμε την μηδενική υπόθεση (H_0) πως η κατανομή μας είναι κανονική.

Εξετάζοντας καταλλήλως τα δείγματα χρόνου και συγκρούσεων στις αντίστοιχες λειτουργίες με την βοήθεια της γλώσσας R, βλέπουμε πως το τεστ Shapiro-Wilk μας δίνει ένα p-value μεγαλύτερο του 0.05 για τους χρόνους σε λειτουργία τηλελειτουργίας (p-value = 0.9947) και για τους χρόνους σε λειτουργία κοινόχρηστου ελεγκτή (p-value = 0.8154). Συνεπώς αποτυγχάνουμε να απορρίψουμε την μηδενική υπόθεση H_0 και αποδεχόμαστε πως τα δείγματα των χρόνων ακολουθούν κανονική κατανομή. Αντιθέτως, τα δείγματα συγκρούσεων μας δίνουν ένα p-value μικρότερο από 0.05 στον αριθμό συγκρούσεων σε λειτουργία τηλελειτουργίας (p-value = 0.0243) και στον αριθμό συγκρούσεων σε λειτουργία κοινόχρηστου ελεγκτή (p-value = 4.398e-05). Συνεπώς θα πρέπει να απορρίψουμε την μηδενική υπόθεση H_0 πως τα δείγματα των αριθμών συγκρούσεων προέρχονται από κανονική κατανομή.



Εικόνα 36. Ιστόγραμμα χρόνων ολοκλήρωσης τηλελειτουργίας

Για τους χρόνους τηλελειτουργίας θα έχουμε:

```
x<-c(171.6,180.5,190.7,193.6,197.2,200.3,206.5,212.5,220.3,220.6,229.6,237.7)
shapiro.test(x)
hist(x,main="Main",xlab="value",border="light blue",col="blue",las=1)
```

=====

Shapiro-Wilk normality test

data: x
W = 0.98387, p-value = 0.9947

Για τους χρόνους κοινόχρηστου ελεγκτή θα έχουμε:

```
x<-c(141.1,146.0,148.2,154.4,156.4,156.6,158.3,161.3,162.9,170.9,172.0,174.5)
shapiro.test(x)
hist(x,main="Main",xlab="value",border="light blue",col="blue",las=1)
```

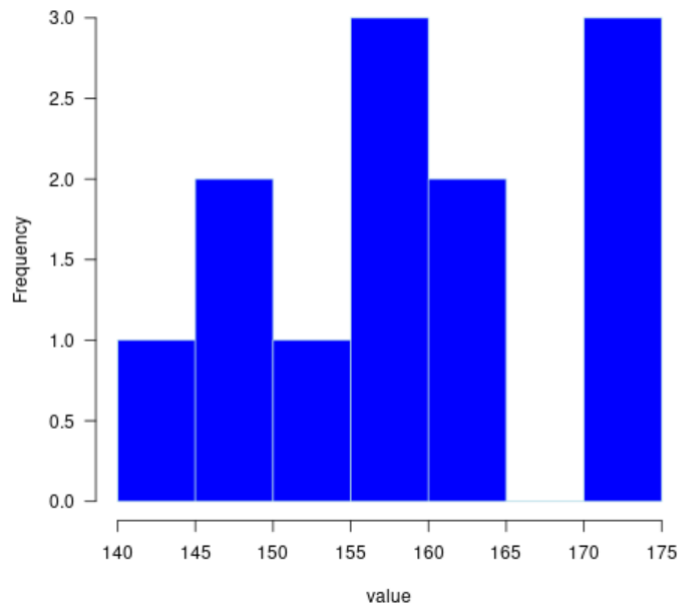
=====

Shapiro-Wilk normality test

data: x
W = 0.96225, p-value = 0.8154

Για τις συγκρούσεις τηλελειτουργίας θα έχουμε:

```
x<-c(0,1,1,1,1,1,2,2,3,5,6,6,6)
shapiro.test(x)
```



Εικόνα 37. Ιστόγραμμα Χρόνων ολοκλήρωσης κοινόχρηστου ελεγκτή

```
hist(x,main="Main",xlab="value",border="light blue",col="blue",las=1)
```

Shapiro-Wilk normality test

```
data: x
W = 0.83532, p-value = 0.0243
```

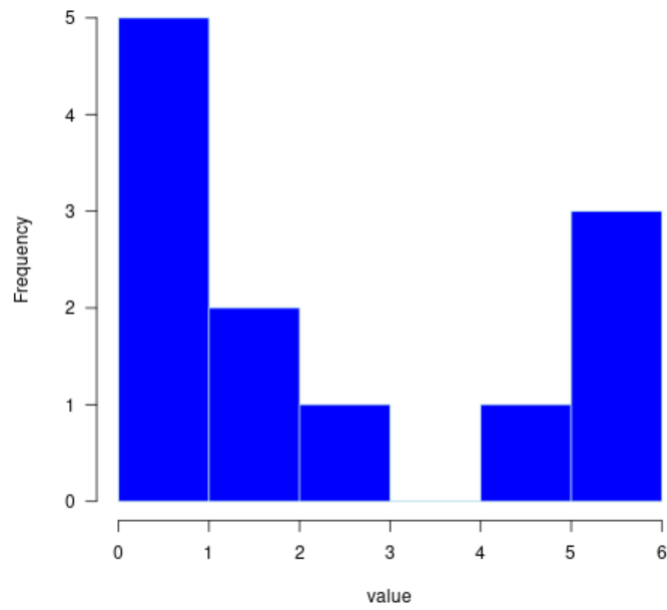
Για τις συγκρούσεις κοινόχρηστου ελεγκτή θα έχουμε:

```
x<-c(0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1)
shapiro.test(x)
hist(x,main="Main",xlab="value",border="light blue",col="blue",las=1)
```

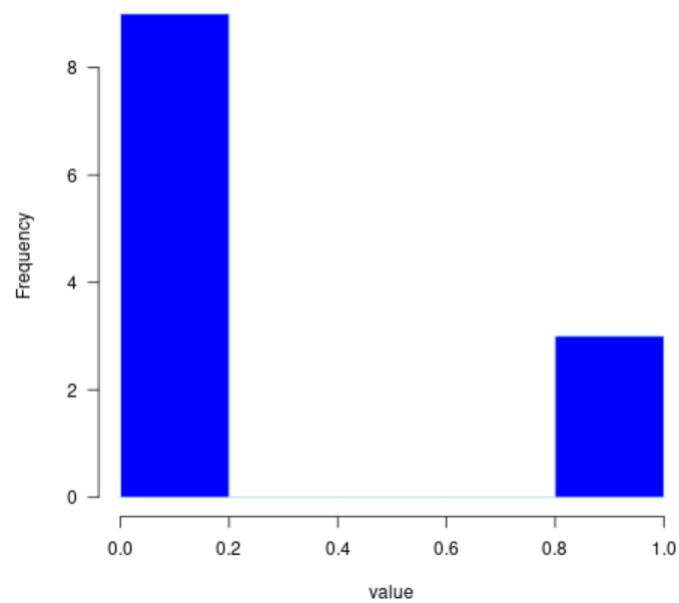
Shapiro-Wilk normality test

```
data: x
W = 0.5521, p-value = 4.398e-05
```

Σε αυτό το σημείο θέλουμε να εξετάσουμε εάν ο κοινόχρηστος ελεγκτής μας δουλεύει όπως θα θέλαμε και πως όντως έχει καλύτερη επίδοση σε μία αποστολή SAR σε σχέση με την καθαρή τηλελειτουργία. Καθώς τα δεδομένα των χρόνων ολοκλήρωσης και στις δύο λειτουργίες συμμορφώθηκαν με μια κανονική κατανομή μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα paired samples t-test για να εξετάσουμε αυτό ακριβώς. Το paired samples t-test, είναι μια στατιστική διαδικασία που χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί εάν η μέση διαφορά μεταξύ δύο συνόλων είναι μηδέν. Οι κοινές εφαρμογές του paired samples t-test περιλαμβάνουν μελέτες ελέγχου περιπτώσεων ή σχέδια επαναλαμβανόμενων μέτρων [69]. Καθώς λειτουργούμε με την υπόθεση πως η επίδοση του κοινόχρηστου ελεγκτή είναι καλύτερη από την καθαρή τηλελειτουργία, θα θέσουμε ως μηδενική



Εικόνα 38. Ιστόγραμμα συγκρούσεων τηλελειτουργίας



Εικόνα 39. Ιστόγραμμα συγκρούσεων κοινόχρηστου ελεγκτή

υπόθεση H_0 πως ο μέσος όρος των χρόνων ολοκλήρωσης σε λειτουργία κοινόχρηστου ελεγκτή θα είναι ίσος ή μεγαλύτερος από τον μέσο όρο των χρόνων σε λειτουργία τηλελειτουργίας, δηλαδή $H_0 : \mu_{shared} \geq \mu_0$. Φυσικά, η εναλλακτική υπόθεση θα είναι πως ο μέσος όρος των χρόνων του κοινόχρηστου ελεγκτή θα είναι μικρότερος από τον μέσο όρο των χρόνων τηλελειτουργίας, δηλαδή $H_1 : \mu_{shared} < \mu_0$. Το t-test εκτιμά την πραγματική διαφορά μεταξύ δύο μέσων ομάδας χρησιμοποιώντας την αναλογία της διαφοράς στα μέσα ομάδας έναντι του ομαδοποιημένου τυπικού σφάλματος και των δύο ομάδων.

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{(s^2(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}))}} \quad (4.1)$$

Θα διεξάγουμε λοιπόν ένα paired samples t-test αριστερής ουράς με βαθμό αυτοπεποίθησης $\alpha = 0.05$. Ο τύπος 4.1 (με το t είναι η τιμή t , τα x_1 και x_2 είναι τα μέσα σύγκρισης των δύο ομάδων, το s^2 είναι το συγκεντρωτικό τυπικό σφάλμα των δύο ομάδων και τα n_1 και n_2 είναι ο αριθμός των παρατηρήσεων σε καθεμία από τις ομάδες) θα μας σώσει την τιμή t που στην περίπτωση μας εάν $t < -1.796$ θα πρέπει να απορρίψουμε την μηδενική υπόθεση H_0 . Θεωρούμε ότι ένα αποτέλεσμα είναι στατιστικά σημαντικό όταν αποδίδει p-value μικρότερο από 0.05.

Για δική μας ευκόλυνση θα εκτελέσουμε το t-test με γλώσσα R όπως φαίνεται παρακάτω. Στην περίπτωση των χρόνων ολοκλήρωσης μπορούμε να δούμε πως το t-test μας δίνει τιμή $t = -9.9802$. Συνδυάζοντας το γεγονός πως το p-value είναι όχι μόνο μικρότερο της τιμής 0.05 αλλά και των τιμών 0.01 και 0.001 συμπεραίνουμε πως έχουμε αρκετές αποδείξεις για να απορρίψουμε την μηδενική υπόθεση H_0 . Αυτό σημαίνει πως τα δεδομένα είναι μεγάλης στατιστικής σημασίας και δεν πως μπορούμε να αποδεχτούμε πως ο κοινόχρηστος ελεγκτής συμβάλλει στην ταχύτερη ολοκλήρωση της αποστολής.

```
rm(list = ls())
Teleoperation_time<-c(141.1,154.4,146.0,156.6,158.3,161.3,
                    156.4,148.2,162.9,170.9,172.0,174.5)

SharedControl_time<-c(190.7,180.5,193.6,229.6,212.5,206.5,
                    171.6,197.2,220.3,200.3,220.6,237.7)

t.test(Teleoperation_time, SharedControl_time,
       alternative = "less", paired = TRUE, mu = 0,
       conf.level = 0.95)

=====

Paired t-test

data: Teleoperation_time and SharedControl_time
t = -9.9802, df = 11, p-value = 3.77e-07
alternative hypothesis: true difference in means is less than 0
95 percent confidence interval:
 -Inf -38.16673
sample estimates:
mean of the differences
 -46.54167
```

Ομοίως, θα εξετάσουμε εάν ο κοινόχρηστος ελεγκτής μας συμβάλλει στην βελτίωση της ασφάλειας του ρομποτικού οχήματος ως προς τον αριθμό συγκρούσεων. Καθώς το τεστ Shapiro-Wilk

έδειξε πως το δείγμα των συγκρούσεων δεν ήταν κανονικά διαμεμημένο δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιήσουμε το t-test σε αυτήν την περίπτωση και ως εκ τούτου χρησιμοποιήθηκε το τεστ προσημασμένης διάταξης Wilcoxon. Ένα ζεύγος t-test συγκρίνει τις μέσες τιμές των δύο ομάδων, ενώ ένα τεστ Wilcoxon Signed-Rank συγκρίνει ολόκληρες τις κατανομές. Ένα ζεύγος t-test είναι ελαφρώς ισχυρότερο από ένα τεστ προσημασμένης διάταξης Wilcoxon. Το τεστ προσημασμένης διάταξης Wilcoxon έχει απόδοση 95% σε σύγκριση με ένα ζεύγος t-test. Το τεστ Wilcoxon είναι ένα μη παραμετρικό τεστ για τη σύγκριση δεδομένων. Όταν η λέξη "μη παραμετρική" χρησιμοποιείται στην στατιστική, δεν σημαίνει ότι δεν γνωρίζουμε τίποτα για τον πληθυσμό. Συνήθως σημαίνει ότι γνωρίζουμε ότι τα δεδομένα πληθυσμού δεν έχουν κανονική κατανομή. Το τεστ διεξάγεται κανονικά με τον τύπο 4.2, όπου W η στατιστική τιμή του τεστ, N_r το μέγεθος του δείγματος μας, $x_{1,i}, x_{2,i}$ αντίστοιχα ταξινομημένα ζεύγη από δύο κατανομές και R_i η διάταξη. Ομοίως με προηγούμενως, θα κάνουμε την μηδενική υπόθεση H_0 πως οι συγκρούσεις του ρομπότ ήταν λιγότερες σε λειτουργία τηλελειτουργίας σε σχέση με την λειτουργία κοινόχρηστου ελεγκτή, δηλαδή $H_0 : Shared \leq Tele$ με την εναλλακτική υπόθεση να είναι προφανώς το αντίθετο, δηλαδή $H_1 : Tele > Shared$. Για να απορρίψουμε την μηδενική υπόθεση θα πρέπει $W < W_{critical}$ όπου στην περίπτωση μας $W_{critical} = 10$ και θεωρούμε τα αποτελεσμάτα μας στατιστικά σημαντικά εάν έχουμε $p\text{-value} < 0.05$. Θα διεξάγουμε το τεστ σε γλώσσα R για να αναλύσουμε τις μετρήσεις μας.

$$W = \sum_{i=1}^{N_r} [\text{sgn}(x_{2,i} - x_{1,i}) \cdot R_i] \quad (4.2)$$

```
Teleoperation_col<-c(3,1,2,1,0,1,1,6,2,6,5,6)
Shared_col<-c(0,0,0,0,0,0,1,0,0,1,0,1)
wilcox.test(Teleoperation_col, Shared_col, alternative = "greater",
paired = TRUE, exact = FALSE, correct = TRUE)
```

=====

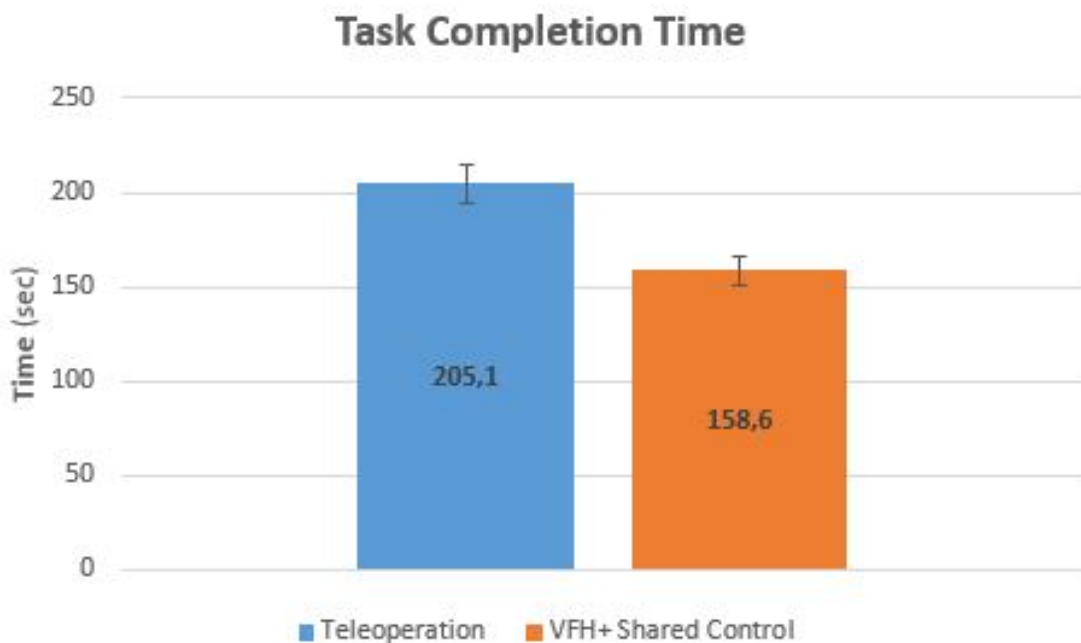
Wilcoxon signed rank test with continuity correction

```
data: Teleoperation_col and Shared_col
V = 55, p-value = 0.002817
alternative hypothesis: true location shift is greater than 0
```

Για την περίπτωση των αριθμών συγκρούσεων, θα πρέπει αναγκαστικά να απορρίψουμε την μηδενική υπόθεση H_0 καθώς η τιμή W θα δίνει $W_- = 55$. Επίσης, το $p\text{-value}$ είναι όχι μόνο μικρότερο από την τιμή 0.05 αλλά και από την τιμή 0.01. Συνεπώς, μπορούμε να συμπεράνουμε με μεγάλη αυτοπεποίθηση πως το κοινόχρηστος ελεγκτής βελτιώνει την ασφάλεια του ρομποτικού οχήματος μειώνοντας τον αριθμό συγκρούσεων.

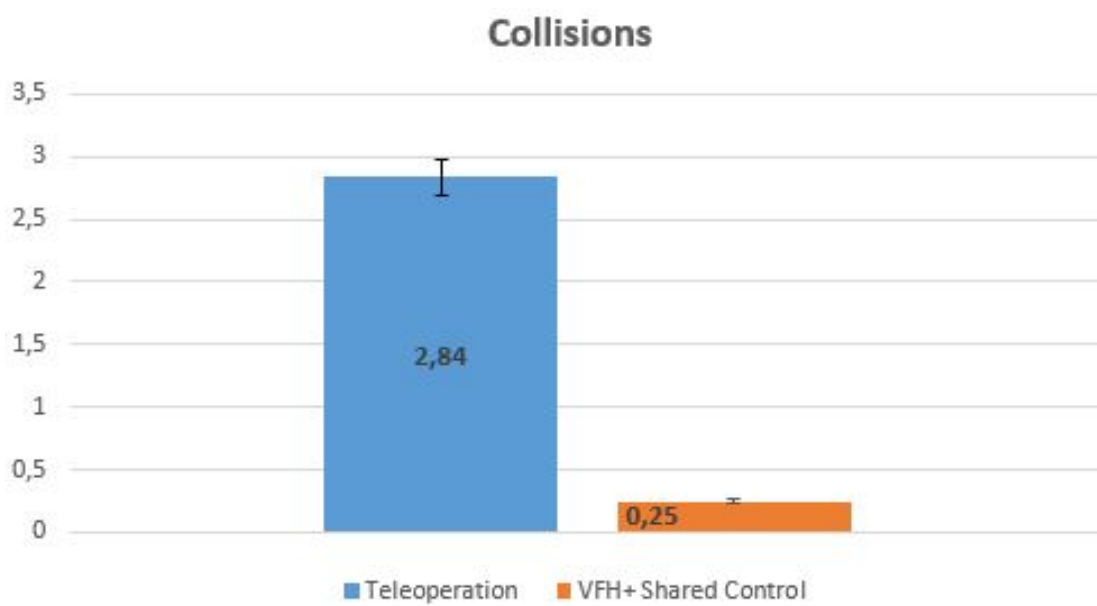
4.4 Κυριότερα ευρήματα / αποτελέσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζουμε συνοπτικά τα αποτελέσματα της διαχείρισης και επεξεργασίας των δεδομένων μας. Όπως βλέπουμε, ο χρόνος ολοκλήρωσης εργασιών σε δευτερόλεπτα σε κοινόχρηστο έλεγχο ήταν κατά μέσο όρο σημαντικά χαμηλότερος για την ολοκλήρωση εργασίας (-46.54167 δευτερόλεπτα). Πιο λεπτομερώς, χειριστές ολοκλήρωναν την εργασία με σκορ ($M = 205.1$, $SD = 19.9$) (δευτερόλεπτα) στο επίπεδο αυτονομίας της τηλελειτουργίας και σκορ ($M = 158.3$, $SD = 10.7$) (δευτερόλεπτα) στο επίπεδο αυτονομίας του κοινόχρηστου ελέγχου, δείτε το Σχ. 40. Επίσης οι μετρήσεις έδωσαν το στατιστικό σκορ ($t(11) = 9.9802$, $p < .001$.) που σημαίνει πως οι μετρήσεις μας είναι στατιστικά σημαντικές και πως το πείραμα μας επιβεβαιώνει την υπόθεση πως ο κοινόχρηστος έλεγχος αποδίδει καλύτερα σε εφαρμογές κινητής ρομποτικής σε σύγκριση με την τηλελειτουργία.



Εικόνα 40. Γράφημα χρόνου ολοκλήρωσης εργασιών. Οι γραμμές σφάλματος υποδεικνύουν το τυπικό σφάλμα.

Ομοίως, βλέπουμε πως ο αριθμός συγκρούσεων σε κοινόχρηστο έλεγχο ήταν κατά μέσο όρο σημαντικά χαμηλότερος κατά την διάρκεια της εργασίας. Πιο λεπτομερώς, χειριστές στο επίπεδο αυτονομίας της τηλελειτουργίας οι χειριστές είχαν σκορ ($M = 2.8$, $SD = 2.29$) σε συγκρούσεις και σκορ ($M = 0.25$, $SD = 0.45$) στο επίπεδο αυτονομίας του κοινόχρηστου ελέγχου, δείτε το Σχ. 41. Οι μετρήσεις έδωσαν το στατιστικό σκορ ($z = -2.82$, $p < .01$.) που σημαίνει πως οι μετρήσεις μας είναι στατιστικά σημαντικές και πως το πείραμα μας επιβεβαιώνει την υπόθεση πως ο κοινόχρηστος έλεγχος παρέχει ασφάλεια στο κινητό ρομπότ, ένα γεγονός που συμβάλει στην ολική απόδοση του κινητού ρομπότ.



Εικόνα 41. Γράφημα αριθμού συγκρούσεων. Οι γραμμές σφάλματος υποδεικνύουν το τυπικό σφάλμα.

Κεφάλαιο 5

Συζήτηση – Συμπεράσματα – Μελλοντικές επεκτάσεις

5.1 Ανακεφαλαίωση

Αυτή η εργασία παρουσίασε μια μέθοδο κοινόχρηστου ελέγχου βασισμένη στον αλγόριθμο VFH+ για απομακρυσμένα ελεγχόμενα κινητά ρομπότ. Η μέθοδος αξιολογήθηκε σε μια αποστολή πλοήγησης σε μια προσομοιωμένη αρένα καταστροφής. Η δυσκολία ελέγχου τέτοιων ρομπότ με συμβατική τηλελειτουργία σε υποβαθμισμένες συνθήκες επίδοσης όπως καθυστερήσεις στην επικοινωνία καταδεικνύεται από την προκύπτουσα κακή απόδοση στην εργασία. Αντιθέτως, η προτεινόμενη κοινή μέθοδος ελέγχου παρείχε σημαντική βελτίωση όσον αφορά την ασφάλεια και το χρόνο ολοκλήρωσης εργασιών σε σύγκριση με την τηλελειτουργία.

5.2 Συζήτηση / Συμπεράσματα

Η πειραματική μας αξιολόγηση έδειξε ότι ο κοινόχρηστος έλεγχος βελτιώνει την απόδοση καθώς η εργασία πλοήγησης ολοκληρώνεται κατά **30%** γρηγορότερα και υπάρχουν **120%** λιγότερες συγκρούσεις σε σύγκριση με την τηλελειτουργία. Η φύση του πειράματός μας έχει σκοπό να αντικατοπτρίζει ένα ρεαλιστικό σενάριο όπου οι χειριστές βρίσκονται υπό πίεση σε υποβαθμισμένες συνθήκες ελέγχου ρομπότ. Ενώ τα υποκείμενα ήταν όλοι εξειδικευμένοι χειριστές ρομπότ (δηλαδή εκτεταμένη εμπειρία στη λειτουργία παρόμοιων ρομπότ), η υπό εξέταση εργασία ήταν σημαντικά δύσκολη. Ένας παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψιν είναι ότι ο άνθρωπος παράγοντας βρίσκεται εξ αποστάσεως και λόγω του αυξημένου φόρτου εργασίας, η επίγνωση της κατάστασης τους (Situational Awareness) μειώνεται σημαντικά [70]. Όλοι οι προαναφερθέντες παράγοντες υπήρχαν κατά τη διάρκεια του πειράματός μας και τα αποτελέσματα υπογραμμίζουν την ανάγκη και τα πλεονεκτήματα του προτεινόμενου κοινού συστήματος ελέγχου. Στη λειτουργία Τηλελειτουργίας, έπρεπε να καταβληθεί σημαντική προσπάθεια από κάθε υποκείμενο για πλοήγηση του ρομπότ στην αρένα, καθώς η καθυστέρηση στην ανατροφοδότηση βίντεο και οι εντολές ελέγχου μπορούν να είναι διανοητικά εξαντλητικοί παράγοντες. Ένας από τους παράγοντες που συνέβαλαν στον υψηλό χρόνο ολοκλήρωσης εργασιών και σε μεγάλο αριθμό συγκρούσεων στην τηλελειτουργία ήταν το γεγονός ότι οι χρήστες απέτυχαν να κάνουν ακριβείς κινήσεις λόγω καθυστερήσεων εισαγωγής εντολών και της οπτικής ανατροφοδότησης. Για να το αντιμετωπίσουν αυτό, τα άτομα έπρεπε να υιοθετήσουν μια στρατηγική διακοπής και αναμονής και να αποφύγουν περίπλοκες εντολές. Ωστόσο, συχνά δεν κατάφεραν να προβλέψουν το αποτέλεσμα των εντολών τους και συχνά φαίνεται να υπεραντισταθμίζονται με πρόσθετες εντολές για να διορθώσουν την πορεία τους. Αυτό οδήγησε συχνά σε αυτο-προκαλούμενη ταλαντωτική συμπεριφορά και συγκρούσεις, ακόμη και σε σχετικά απλές στροφές ή σε διαδρόμους. Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί

να εξηγήσει την κακή απόδοση της τηλελειτουργίας, είναι η σταδιακή εξάντληση των χειριστών κατά τη διάρκεια των δοκιμών ως αποτέλεσμα των παραπάνω αναφερόμενων δυσκολιών. Η βελτιωμένη απόδοση του κοινόχρηστου ελέγχου μπορεί να αποδοθεί στη μείωση των απαραίτητων εντολών για πλοήγηση, καθώς και στη μείωση της πολυπλοκότητάς τους. Παρά την καθυστέρηση εισαγωγής των εντολών, στην πράξη, τα υποκειμένα χρειάστηκαν μόνο την εισαγωγή της γενικής κατεύθυνσης που ήθελαν να εκτελέσουν. Η αυτο-διόρθωση της μονάδας απαλλάσσει τον χειριστή από περίπλοκους ελιγμούς και το ρομπότ θα ακολουθούσε την καθοδηγούμενη κατεύθυνση της πορείας του. Επιπλέον, η αντιδραστική φύση του κοινόχρηστου ελέγχου μας, είναι σε θέση να αντιμετωπίσει δυναμικά μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα. Τα τυχαία τοποθετημένα εμπόδια δεν φαίνεται να υποβαθμίζουν την απόδοση ανεξάρτητα από την τοποθέτησή τους. Τα ανекδοτικά στοιχεία δείχνουν ότι οι ενέργειες του ρομπότ δεν ήταν αντίθετες με τις εντολές του χειριστή. Οι χειριστές αισθάνονταν σε μεγάλο βαθμό ότι το ρομπότ οδηγούσε μόνο του, το οποίο αποδίδει καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με την τηλελειτουργία, παρά την εξάντληση των υποκειμένων. Σε αυτό το έργο, η συνάρτηση διαιτησίας $\alpha(\cdot)$ ήταν μια σταθερά που υποδηλώνει ίσο ποσό εντολών που αναμειγνύεται από τον χειριστή και το ρομπότ. Ωστόσο, υπάρχουν καταστάσεις που μπορούν να επωφεληθούν από χαμηλότερες τιμές $\alpha(\cdot)$ (δηλ. Οι εντολές ρομπότ είναι η κυρίαρχη είσοδος). Για παράδειγμα, ο χειριστής έχει μεγάλο φόρτο εργασίας ή προβλήματα ασύρματης επικοινωνίας. Από την άλλη πλευρά, σε περίπτωση που η ανθρώπινη είσοδος μπορεί να είναι πιο επωφελής, όπως η οδήγηση μέσω στενών διαδρόμων ή άλλων ελιγμών ακριβείας (π.χ. το ρομπότ που έχει κολλήσει), θα ήταν χρήσιμες υψηλότερες τιμές $\alpha(\cdot)$. Μια λειτουργία διαιτησίας που προσαρμόζει το επίπεδο βοήθειας του ρομπότ στις περιστάσεις θα συμβάλει περισσότερο στην απόδοση και θα πρέπει να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής έρευνας. Οι ανέκδοτες παρατηρήσεις μας δείχνουν ότι ένα εύρος τιμών για $\alpha(\cdot)$ κυμαίνεται μεταξύ 0.3 και 0.7. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται εδώ συμβάλλουν περαιτέρω στη σχετική βιβλιογραφία που έχει δείξει ότι οι καθυστερημένες εισοδοί ελέγχου μπορούν να αυξήσουν δραστικά τον χρόνο ολοκλήρωσης εργασιών από 160% έως 480% [39] σε κινητά ρομπότ, ανάλογα με τη σοβαρότητα του λανθάνοντος χρόνου. Επιπλέον, συνεισφέρουμε περαιτέρω αποδεικτικά στοιχεία για τα πλεονεκτήματα του κοινού ελέγχου στην υπεραπόδοση της συμβατικής τηλεχειρισμού υπό τις καθυστερήσεις επικοινωνίας σύμφωνα με παρόμοια ευρήματα από τους Storms et al. [45].

Τέλος, με βάση τις γνωστές αδυναμίες του VFH+ (π.χ. τοπικά ελάχιστα), αναμενόταν η περιστασιακή μη ικανοποιητική απόδοση. Ωστόσο, χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη κοινή μέθοδο ελέγχου στην πράξη, το ρομπότ δεν έδειξε σημάδια παγίδευσης σε τοπικά ελάχιστα ή σημάδια δυσκολίας διέλευσης σε στενά ανοίγματα / διαδρόμους. Αυτό οφείλεται πιθανώς στο γεγονός ότι η είσοδος από τον χειριστή επηρεάζει άμεσα τις κινήσεις του ρομπότ προς τα εμπρός και προς τα πίσω, και στο πλαίσιο του κοινού ελέγχου οι αδυναμίες του VFH+ αντισταθμίζονται. Αυτό είναι ένα σενάριο που δείχνει τις συμπληρωματικές δυνατότητες των ανθρώπινων χειριστών και των ρομπότ (δηλαδή αυτόνομες δυνατότητες) με τους δύο πράκτορες να συμπληρώνουν τα δυνατά σημεία του άλλου και να τονίζουν τη σημασία της συνεργασίας ως ομάδας ανθρώπινου-ρομπότ σε απαιτητικές εργασίες.

5.3 Αξιοποίηση / Πρακτικές προεκτάσεις της έρευνας

Η κοινόχρηστη μονάδα ελέγχου εφαρμόστηκε ως Επίπεδο Αυτονομίας (LOA) για χρήση σε μεταβλητά συστήματα αυτονομίας που αλλάζουν κατά παραγγελία μεταξύ διαφορετικών LOA. Ως εκ τούτου, οι μελλοντικές εργασίες θα πρέπει να διερευνήσουν την ενσωμάτωση και τα πλεονεκτήματα της προτεινόμενης κοινής μεθόδου ελέγχου ως ένα πρόσθετο LOA που χρησιμοποιείται στα ρομποτικά συστήματα Human-Initiative και Mixed-Initiative.

5.4 Μελλοντικές επεκτάσεις / Πρακτικές Προεκτάσεις της Έρευνας

Σε μελλοντικές εργασίες, στοχεύουμε στην περαιτέρω ανάπτυξη της μεθόδου κοινόχρηστου ελέγχου ενσωματώνοντας μια δυναμική λειτουργία διαίτησίας. Αυτή η λειτουργία μπορεί να ρυθμίζει δυναμικά τον έλεγχο που πρέπει να δοθεί στο ρομπότ ή στον χειριστή. Αυτό μπορεί να βασίζεται στη ρητή χρήση της πρόθεσης του χειριστή ή της κατάστασης του χειριστή (π.χ. χειριστής που έχει υψηλό φόρτο εργασίας). Επιπλέον, πρέπει να γίνουν περαιτέρω δοκιμές με μια ποικιλία συνθηκών υποβάθμισης της απόδοσης τόσο για τη λειτουργία όσο και για το ρομπότ (π.χ. εξωτερικές περισπασμούς ή πρόσθετος θόρυβος αισθητήρα), προκειμένου να προσδιοριστούν πιθανές αδυναμίες που δεν έχουμε ακόμη συναντήσει. Το επόμενο ορόσημο της εργασίας μας είναι προς μια κοινή μέθοδο ελέγχου που είναι σε θέση να αποφεύγει εντελώς τις επικίνδυνες περιοχές, π.χ. μια περιοχή με υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας που μπορεί να καταστρέψει τα ηλεκτρονικά του ρομπότ ή περιοχές με υπερβολική θερμότητα. Στην ουσία, η ενσωμάτωση της μεθόδου μας με μια ποικιλία αισθητήρων (π.χ. αισθητήρες ακτινοβολίας ή υπέρυθρων αισθητήρων) και αναπαραστάσεις χαρτών (π.χ. χάρτης ακτινοβολίας). Τέλος, η κοινόχρηστη μονάδα ελέγχου εφαρμόστηκε ως Επίπεδο Αυτονομίας (LOA) για χρήση σε μεταβλητά συστήματα αυτονομίας που αλλάζουν κατά παραγγελία μεταξύ διαφορετικών LOA. Ως εκ τούτου, οι μελλοντικές εργασίες θα πρέπει να διερευνήσουν την ενσωμάτωση και τα πλεονεκτήματα της προτεινόμενης κοινής μεθόδου ελέγχου ως ένα πρόσθετο LOA που χρησιμοποιείται στα ρομποτικά συστήματα Human-Initiative και Mixed-Initiative.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] R. R. Murphy και J. L. Burke, «Up from the rubble: Lessons learned about HRI from search and rescue,» στο *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, τόμ. 49, 2005, σσ. 437–441.
- [2] M. Baker, R. Casey, B. Keyes και H. A. Yanco, «Improved interfaces for human-robot interaction in urban search and rescue,» στο *2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE Cat. No. 04CH37583)*, IEEE, τόμ. 3, 2004, σσ. 2960–2965.
- [3] A. Norton, W. Ober, L. Baraniecki, E. McCann, J. Scholtz, D. Shane, A. Skinner, R. Watson και H. Yanco, «Analysis of human–robot interaction at the DARPA Robotics Challenge Finals,» *The International Journal of Robotics Research*, τόμ. 36, αρθμ. 5-7, σσ. 483–513, 2017.
- [4] J. Casper και R. R. Murphy, «Human-robot interactions during the robot-assisted urban search and rescue response at the World Trade Center,» *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, τόμ. 33, αρθμ. 3, σσ. 367–385, 2003.
- [5] E. Guizzo, «Fukushima robot operator writes tell-all blog,» *IEEE Spectrum*, τόμ. 23, 2011.
- [6] K. Nagatani, S. Kiribayashi, Y. Okada, K. Otake, K. Yoshida, S. Tadokoro, T. Nishimura, T. Yoshida, E. Koyanagi, M. Fukushima κ.ά., «Emergency response to the nuclear accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using mobile rescue robots,» *Journal of Field Robotics*, τόμ. 30, αρθμ. 1, σσ. 44–63, 2013.
- [7] M. Chiou, R. Stolkin, G. Bieksaite, N. Hawes, K. L. Shapiro και T. S. Harrison, «Experimental analysis of a variable autonomy framework for controlling a remotely operating mobile robot,» στο *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, 2016, σσ. 3581–3588.
- [8] M. Chiou, N. Hawes και R. Stolkin, «Mixed-Initiative variable autonomy for remotely operated mobile robots,» 2020. διεύθυν.: <https://arxiv.org/abs/1911.04848>.
- [9] J. Ng και T. Bräunl, «Performance comparison of Bug navigation algorithms,» *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, τόμ. 50, αρθμ. 1, σσ. 73–84, 2007, ISSN: 09210296. DOI: [10.1007/s10846-007-9157-6](https://doi.org/10.1007/s10846-007-9157-6).
- [10] O. Khatib, «Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots,» στο *Proceedings. 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, τόμ. 2, 1985, σσ. 500–505.
- [11] *BUG Algorithms*, http://msl.cs.uiuc.edu/~lavalley/cs497_2001/book/uncertain/node3.html,
- [12] Y. Zhaofeng και Z. Ruizhe, «Path planning of multi-robot cooperation for avoiding obstacle based on improved artificial potential field method,» *Sensors & Transducers*, τόμ. 165, αρθμ. 2, σ. 221, 2014.

- [13] S. M. H. Rostami, A. K. Sangaiah, J. Wang και X. Liu, «Obstacle avoidance of mobile robots using modified artificial potential field algorithm,» *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, τόμ. 2019, αρθμ. 1, σ. 70, 2019.
- [14] J. Sfeir, M. Saad και H. Saliha-Hassane, «An improved Artificial Potential Field approach to real-time mobile robot path planning in an unknown environment,» στο *2011 IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments (ROSE)*, 2011, σσ. 208–213.
- [15] X. Gu, M. Han, W. Zhang, G. Xue, G. Zhang και Y. Han, «Intelligent Vehicle Path Planning Based on Improved Artificial Potential Field Algorithm,» στο *2019 International Conference on High Performance Big Data and Intelligent Systems (HPBD IS)*, 2019, σσ. 104–109.
- [16] Y. Koren, J. Borenstein κ.ά., «Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation,» στο *ICRA*, τόμ. 2, 1991, σσ. 1398–1404.
- [17] J. Minguez και L. Montano, «Nearness diagram navigation (nd): A new real time collision avoidance approach,» στο *Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000)(Cat. No. 00CH37113)*, IEEE, τόμ. 3, 2000, σσ. 2094–2100.
- [18] *Robo-Rats Locomotion: Synchro Drive*, <https://groups.csail.mit.edu/drl/courses/cs54-2001s/synchro.html>,
- [19] J. Borenstein και Y. Koren, «Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots in cluttered environments,» στο *Proceedings., IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1990, 572–577 vol.1.
- [20] J. Borenstein και Y. Koren, «Teleautonomous guidance for mobile robots,» *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, τόμ. 20, αρθμ. 6, σσ. 1437–1443, 1990.
- [21] J. Boernstein και Y. Koren, «The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots,» *IEEE Transaction on Robotics Automation*, τόμ. 7, αρθμ. 3, σσ. 278–288, 1991.
- [22] Y. Koren και J. Borenstein, «Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation,» *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, τόμ. 2, σσ. 1398–1404, 1991, ISSN: 10504729. DOI: [10.1109/robot.1991.131810](https://doi.org/10.1109/robot.1991.131810).
- [23] I. Ulrich και J. Borenstein, «VFH+: reliable obstacle avoidance for fast mobile robots,» στο *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.98CH36146)*, τόμ. 2, 1998, 1572–1577 vol.2.
- [24] Dong An και Hong Wang, «VPH: a new laser radar based obstacle avoidance method for intelligent mobile robots,» στο *Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation (IEEE Cat. No.04EX788)*, τόμ. 5, 2004, 4681–4685 Vol.5.
- [25] B. Yamauchi, «The Wayfarer modular navigation payload for intelligent robot infrastructure,» στο *Unmanned Ground Vehicle Technology VII*, International Society for Optics και Photonics, τόμ. 5804, 2005, σσ. 85–96.
- [26] I. Ulrich και J. Borenstein, «VFH/sup */: local obstacle avoidance with look-ahead verification,» στο *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065)*, τόμ. 3, 2000, 2505–2511 vol.3.
- [27] C. Ye, «Navigating a mobile robot by a traversability field histogram,» *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, τόμ. 37, αρθμ. 2, σσ. 361–372, 2007.

- [28] A. Babinec, F. Duchoň, M. Dekan, P. Pászto και M. Kelemen, «VFH* TDT (VFH* with Time Dependent Tree): A new laser rangefinder based obstacle avoidance method designed for environment with non-static obstacles,» *Robotics and autonomous systems*, τόμ. 62, αρθμ. 8, σσ. 1098–1115, 2014.
- [29] D. Jie, M. Xueming και P. Kaixiang, «IVFH□: Real-time dynamic obstacle avoidance for mobile robots,» στο *2010 11th International Conference on Control Automation Robotics & Vision*, IEEE, 2010, σσ. 844–847.
- [30] J. Gong, Y. Duan, Y. Man και G. Xiong, «VPH+: An Enhanced Vector Polar Histogram Method for Mobile Robot Obstacle Avoidance,» στο *2007 International Conference on Mechatronics and Automation*, 2007, σσ. 2784–2788.
- [31] A. B. Kuang, S. Payandeh, B. Zheng, F. Henigman και C. L. MacKenzie, «Assembling virtual fixtures for guidance in training environments,» *Proceedings - 12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, HAPTICS*, σσ. 367–374, 2004. DOI: [10.1109/HAPTIC.2004.1287223](https://doi.org/10.1109/HAPTIC.2004.1287223).
- [32] S. Payandeh και Z. Stanisić, «On application of virtual fixtures as an aid for telemanipulation and training,» *Proceedings - 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, HAPTICS 2002*, σσ. 18–23, 2002. DOI: [10.1109/HAPTIC.2002.998936](https://doi.org/10.1109/HAPTIC.2002.998936).
- [33] D. P. Losey, C. G. McDonald, E. Battaglia και M. K. O'Malley, «A review of intent detection, arbitration, and communication aspects of shared control for physical human–robot interaction,» *Applied Mechanics Reviews*, τόμ. 70, αρθμ. 1, σσ. 1–19, 2018, ISSN: 00036900. DOI: [10.1115/1.4039145](https://doi.org/10.1115/1.4039145).
- [34] S. A. Bowyer, B. L. Davies και F. Rodriguez Y Baena, «Active constraints/virtual fixtures: A survey,» *IEEE Transactions on Robotics*, τόμ. 30, αρθμ. 1, σσ. 138–157, 2014, ISSN: 15523098. DOI: [10.1109/TRO.2013.2283410](https://doi.org/10.1109/TRO.2013.2283410).
- [35] D. Aarno, S. Ekvall και D. Kragić, «Adaptive virtual fixtures for machine-assisted teleoperation tasks,» *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, τόμ. 2005, αρθμ. April, σσ. 1139–1144, 2005, ISSN: 10504729. DOI: [10.1109/ROBOT.2005.1570269](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2005.1570269).
- [36] B. Davies, M. Jakopc, S. J. Harris, F. Rodriguez y Baena, A. Barrett, A. Evangelidis, P. Gomes, J. Henckel και J. Cobb, «Active-constraint robotics for surgery,» *Proceedings of the IEEE*, τόμ. 94, αρθμ. 9, σσ. 1696–1703, 2006, ISSN: 00189219. DOI: [10.1109/JPROC.2006.880680](https://doi.org/10.1109/JPROC.2006.880680).
- [37] M. Adjigble, N. Marturi, V. Ortenzi και R. Stolkin, «An assisted telemanipulation approach: combining autonomous grasp planning with haptic cues.,» στο *IROS*, 2019, σσ. 3164–3171.
- [38] S. Javdani, H. Admoni, S. Pellegrinelli, S. S. Srinivasa και J. A. Bagnell, «Shared autonomy via hindsight optimization for teleoperation and teaming,» *The International Journal of Robotics Research*, τόμ. 37, αρθμ. 7, σσ. 717–742, 2018.
- [39] J. C. Lane, C. R. Carignan και D. L. Akin, «Time delay and communication bandwidth limitation on telerobotic control,» στο *Mobile Robots XV and Telemanipulator and Telepresence Technologies VII*, International Society for Optics και Photonics, τόμ. 4195, 2001, σσ. 405–419.
- [40] E. Krotkov, R. Simmons, F. Cozman και S. Koenig, «Safeguarded teleoperation for lunar rovers: From human factors to field trials,» στο *IEEE Planetary Rover Technology and Systems Workshop*, τόμ. 26, 1996, σ. 28.

- [41] T. Fong, C. Thorpe και C. Baur, «A safeguarded teleoperation controller,» στο *IEEE International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, 2001.
- [42] A. Erdogan και B. D. Argall, «The effect of robotic wheelchair control paradigm and interface on user performance, effort and preference: an experimental assessment,» *Robotics and Autonomous Systems*, τόμ. 94, σσ. 282–297, 2017.
- [43] T. Carlson και Y. Demiris, «Increasing robotic wheelchair safety with collaborative control: Evidence from secondary task experiments,» στο *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2010, σσ. 5582–5587.
- [44] C. Urdiales, A. Poncela, I. Sanchez-Tato, F. Galluppi, M. Olivetti και F. Sandoval, «Efficiency based reactive shared control for collaborative human/robot navigation,» στο *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 2007, σσ. 3586–3591.
- [45] J. Storms, K. Chen και D. Tilbury, «A shared control method for obstacle avoidance with mobile robots and its interaction with communication delay,» *The International Journal of Robotics Research*, τόμ. 36, αρθμ. 5-7, σσ. 820–839, 2017.
- [46] A. Kucukyilmaz και Y. Demiris, «Learning shared control by demonstration for personalized wheelchair assistance,» *IEEE transactions on haptics*, τόμ. 11, αρθμ. 3, σσ. 431–442, 2018.
- [47] H. Saeidi, J. R. Wagner και Y. Wang, «A mixed-initiative haptic teleoperation strategy for mobile robotic systems based on bidirectional computational trust analysis,» *IEEE Transactions on Robotics*, τόμ. 33, αρθμ. 6, σσ. 1500–1507, 2017.
- [48] D. A. Bell, J. Borenstein, S. P. Levine, Y. Koren και J. Jaros, «An assistive navigation system for wheelchairs based upon mobile robot obstacle avoidance,» στο *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1994, 2018–2022 vol.3.
- [49] W. Chen, C. Yang και Y. Feng, «Shared Control For Omnidirectional Mobile Robots,» στο *2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, IEEE, 2019, σσ. 6185–6190.
- [50] *Robo-Rats Locomotion: Odometry*, shorturl.at/IPU02,
- [51] E. Olson, «A primer on odometry and motor control,» *Electronic Group Discuss*, τόμ. 12, 2004.
- [52] F. Herodin, J. C. Mestries, D. Janodet, S. Martin, J. Mathieu, M. P. Gascon -, M. O. Pernin και A. Ythier, «Recombinant glycosylated human interleukin-6 accelerates peripheral blood platelet count recovery in radiation-induced bone marrow depression in baboons,» *Blood*, τόμ. 80, αρθμ. 3, σσ. 688–695, 1992, ISSN: 00064971. DOI: [10.1182/blood.v80.3.688.688](https://doi.org/10.1182/blood.v80.3.688.688).
- [53] T. Bailey και H. Durrant-Whyte, «Simultaneous localization and mapping (SLAM): Part II,» *IEEE Robotics and Automation Magazine*, τόμ. 13, αρθμ. 3, σσ. 108–117, 2006, ISSN: 10709932. DOI: [10.1109/MRA.2006.1678144](https://doi.org/10.1109/MRA.2006.1678144).
- [54] H. Durrant-Whyte και T. Bailey, «Simultaneous localization and mapping: part I,» *IEEE Robotics Automation Magazine*, τόμ. 13, αρθμ. 2, σσ. 99–110, 2006. DOI: [10.1109/MRA.2006.1638022](https://doi.org/10.1109/MRA.2006.1638022).
- [55] G. Dissanayake, S. Huang, Z. Wang και R. Ranasinghe, «A review of recent developments in Simultaneous Localization and Mapping,» στο *2011 6th International Conference on Industrial and Information Systems*, 2011, σσ. 477–482. DOI: [10.1109/ICIINFS.2011.6038117](https://doi.org/10.1109/ICIINFS.2011.6038117).
- [56] J. J. Leonard και H. F. Durrant-Whyte, «Mobile robot localization by tracking geometric beacons,» *IEEE Transactions on robotics and Automation*, τόμ. 7, αρθμ. 3, σσ. 376–382, 1991.

- [57] Z. Kong και Q. Lu, «A brief review of simultaneous localization and mapping,» στο *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2017, σσ. 5517–5522. DOI: [10.1109/IECON.2017.8216955](https://doi.org/10.1109/IECON.2017.8216955).
- [58] M. Montemerlo, S. Thrun, D. Koller, B. Wegbreit κ.ά., «FastSLAM: A factored solution to the simultaneous localization and mapping problem,» *Aaai/iaai*, τόμ. 593598, 2002.
- [59] T. Bailey και H. Durrant-Whyte, «Simultaneous localization and mapping (SLAM): part II,» *IEEE Robotics Automation Magazine*, τόμ. 13, αρθμ. 3, σσ. 108–117, 2006. DOI: [10.1109/MRA.2006.1678144](https://doi.org/10.1109/MRA.2006.1678144).
- [60] *SPAR3D*, <https://www.spar3d.com/news/uav-uas/hovermap-powerful-slam-drone-autonomy-lidar-mapping/>,
- [61] *What Is SLAM?* <https://www.mathworks.com/discovery/slam.html>,
- [62] *Ros/Introduction*, <http://wiki.ros.org/ROS/Introduction>.
- [63] S. S. H. Hajjaj και K. S. M. Sahari, «Establishing remote networks for ROS applications via Port Forwarding: A detailed tutorial,» *International Journal of Advanced Robotic Systems*, τόμ. 14, αρθμ. 3, σ. 1 729 881 417 703 355, 2017.
- [64] *HuskyUGV*, <https://clearpathrobotics.com/husky-unmanned-ground-vehicle-robot/>.
- [65] A. D. Dragan και S. S. Srinivasa, «A policy-blending formalism for shared control,» *The International Journal of Robotics Research*, τόμ. 32, αρθμ. 7, σσ. 790–805, 2013.
- [66] J. Gómez-de-Gabriel και A. Ollero, «Overcoming Communication Delay in Vehicle Teleoperation,» *IFAC Proceedings Volumes*, τόμ. 33, αρθμ. 25, σσ. 131–136, 2000.
- [67] D. G. Altman και J. M. Bland, «Statistics notes: The normal distribution,» *BMJ*, τόμ. 310, αρθμ. 6975, σ. 298, 1995, ISSN: 0959-8138. DOI: [10.1136/bmj.310.6975.298](https://doi.org/10.1136/bmj.310.6975.298). eprint: <https://www.bmj.com/content/310/6975/298.full.pdf>. διεύθν.: <https://www.bmj.com/content/310/6975/298>.
- [68] A. Ghasemi και S. Zahediasl, «Normality tests for statistical analysis: a guide for non-statisticians,» *International journal of endocrinology and metabolism*, τόμ. 10, αρθμ. 2, σ. 486, 2012.
- [69] *Paired Sample T-Test*, <https://www.statisticssolutions.com/manova-analysis-paired-sample-t-test>,
- [70] J. M. Riley και L. D. Strater, «Effects of robot control mode on situation awareness and performance in a navigation task,» στο *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society annual meeting*, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, τόμ. 50, 2006, σσ. 540–544.

Πρόσθετη Βιβλιογραφία

- [71] C. Ye και J. Borenstein, «Obstacle avoidance for the segway robotic mobility platform,» στο *ANS 10th Int. Conf. on Robotics and Remote Systems for Hazardous Environments*, 2004, σσ. 107–114.
- [72] N. Chindakham, Y.-Y. Kim, A. Pirayawaraporn και M.-H. Jeong, «Simultaneous Calibration of Odometry and Head-Eye Parameters for Mobile Robots with a Pan-Tilt Camera,» *Sensors*, τόμ. 19, αρθμ. 16, σ. 3623, 2019.
- [73] *GET Lab*, <https://getwww.uni-paderborn.de/news/show?entry=1894>,
- [74] Y. Zhang και G. Wang, «An improved RGB-D VFH+ obstacle avoidance algorithm with sensor blindness assumptions,» *2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering, ICRAE 2017*, τόμ. 2017-December, σσ. 408–414, 2018. DOI: [10 . 1109 / ICRAE.2017.8291420](https://doi.org/10.1109/ICRAE.2017.8291420).
- [75] C. Ye, «Navigating a mobile robot by a traversability field histogram,» *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, τόμ. 37, αρθμ. 2, σσ. 361–372, 2007, ISSN: 10834419. DOI: [10.1109/TSMCB.2006.883870](https://doi.org/10.1109/TSMCB.2006.883870).

