

Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών



Ανάπτυξη Αυτόνομου Ρομποτικού Οχήματος για Συνεργατικές Drone-Rover Αποστολές Περιβαλλοντικής Παρακολούθησης

Διπλωματική Εργασία

Γεώργιος Μπολωνάκης

A.M: 2010030016, Email: gbolonakis@isc.tuc.gr

Εξεταστική Επιτροπή:

Αναπληρωτής Καθηγητής Μιχαήλ Γ. Λαγουδάκης (Σχολή ΗΜΜΥ)

Καθηγητής Απόστολος Δόλλας (Σχολή ΗΜΜΥ)

Αναπληρωτής Καθηγητής Παναγιώτης Παρτσινέβελος (Σχολή ΜΗΧΟΠ)

Χανιά, Φεβρουάριος 2020

Technical University of Crete, Greece
School of Electrical and Computer Engineering



Development of an Autonomous Robotic Rover for Collaborative Drone-Rover Environmental Monitoring Missions

Diploma Thesis

Georgios Bolonakis

A.M: 2010030016, Email: gbolonakis@isc.tuc.gr

Thesis Committee:

Associate Professor Michail G. Lagoudakis (School of ECE)

Professor Apostolos Dollas (School of ECE)

Associate Professor Panagiotis Partsinevelos (School of MRE)

Chania, February 2020

Περίληψη

Στην εποχή μας εκδηλώνεται ολοένα και μεγαλύτερο ενδιαφέρον για εφαρμογές αυτόνομων συνεργατικών αποστολών ρομποτικών ομάδων, όπως έρευνα και διάσωση μετά από καταστροφές, καταγραφή περιβαλλοντικών μετρήσεων, επιτήρηση έργων και χώρων, κλπ., σε περιοχές δύσβατες ή επικίνδυνες για τον άνθρωπο. Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη (υλικό και λογισμικό) ενός αυτόνομου επίγειου ρομποτικού οχήματος τύπου rover για συνεργατικές drone-rover αποστολές περιβαλλοντικής παρακολούθησης. Στόχος είναι η αυτόνομη πλοήγηση και δράση του rover σε μια δύσβατη περιοχή, μετά την αερομεταφορά του από το drone με τη βοήθεια ενός ήδη υλοποιημένου συστήματος σύζευξης των δύο οχημάτων. Για την επίτευξη του στόχου, η αρχικά επιλεγμένη εξάτροχη πλατφόρμα του οχήματος επεκτάθηκε με πρόσθετες βάσεις τρισδιάστατης εκτύπωσης, όπου τοποθετήθηκαν τα απαραίτητα ηλεκτρονικά στοιχεία. Όλα τα επιμέρους στοιχεία του οχήματος (κινητήρες, αισθητήρες, ελεγκτές, κεραίες, μπαταρίες, κοκ) είναι συνδεδεμένα και ελέγχονται από ένα Raspberry Pi 3b. Για την επίλυση του προβλήματος της αυτόνομης πλοήγησης έγινε εκτενής χρήση του Robot Operating System (ROS) για αξιόπιστο συγχρονισμό, επικοινωνία και επεκτασιμότητα του συστήματος. Με τη βοήθεια του συστήματος Global Navigation Satellite Systems (GNSS) και τους χάρτες ανοιχτού κώδικα Open Street Maps (OSM) αναπτύχθηκαν οι απαραίτητοι αλγόριθμοι για την αυτόνομη πλοήγηση του οχήματος κατά μήκος οποιασδήποτε εφικτής επιθυμητής διαδρομής. Επίσης, υλοποιήθηκε η αμφίδρομη επικοινωνία τόσο των ενσωματωμένων συστημάτων, όσο και των ελεγκτών κίνησης και πτήσης που βρίσκονται στο rover και στο drone αντίστοιχα, για να εξασφαλισθεί η απρόσκοπτη επικοινωνία μεταξύ τους και ο απαραίτητος συντονισμός για τη δράση τους. Το ρομποτικό όχημα που αναπτύχθηκε, δοκιμάστηκε σε συνθήκες πραγματικού κόσμου και εκτός της τηλεχειριζόμενης ή αυτόνομης πλοήγησης, έχει επιπλέον τη δυνατότητα της δημιουργίας νέων χαρτών στον χώρο όπου κινείται. Το προτεινόμενο σύστημα παρέχει μια αξιόπιστη βάση για την ανάπτυξη πιο σύνθετων ρομποτικών ομάδων για συνεργατικές αποστολές.

Abstract

In our days, there is a growing interest in applications of autonomous cooperative missions of robotic teams, such as post-disaster search-and-rescue, environmental measurements, surveillance of works and sites, etc., in areas inaccessible to humans. The subject of this thesis is the development (hardware and software) of an autonomous ground robotic rover for collaborative drone-rover environmental monitoring missions. The aim is to autonomously navigate and operate the rover in a hard-to-access area, after transporting it with the drone using an already implemented coupling system between the two vehicles. To achieve this goal, the initially selected six-wheel-drive vehicle platform was expanded with additional 3D-printed bases, where the necessary electronic components were installed. All vehicle components (motors, sensors, controllers, antennas, batteries, etc.) are connected to and controlled by a Raspberry Pi 3b. Extensive use of the Robot Operating System (ROS) for reliable synchronization, communication and scalability has been extensively used to solve the problem of autonomous navigation. With the help of the Global Navigation Satellite Systems (GNSS) and the open-source Open Street Maps (OSM), the algorithms necessary for autonomous vehicle navigation along any possible desired route have been developed. Two-way communication within the embedded systems, as well as between the motion and flight controllers located on the rover and the drone respectively, was implemented to ensure seamless communication between them and the necessary coordination for their operation. The robotic vehicle that has been developed, was tested in real-world conditions and, in addition to remote or autonomous navigation, it has the ability to create new maps in the area where it moves. The proposed system provides a reliable basis for developing more complex robotic teams for collaborative missions.

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον κ. Λαγουδάκη, ο οποίος υπήρξε πολύτιμος αρωγός για την διεκπεραίωση της εργασίας και διαφώτιζε υπομονετικά τυχόν πρακτικές και θεωρητικές μου απορίες, καθώς και τον κ. Παρτσινέβελο για τις συμβουλές και την ολοκληρωμένη καθοδήγηση κατά την πορεία της έρευνας και πραγματοποίησης της εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου σε όλα τα παιδιά της ομάδας SenseLab, και συγκεκριμένα στους συμφοιτητές μου Άγγελο Αντωνόπουλο και Δημήτρη Χατζηπαράσχη για την άψογη συνεργασία που είχαμε, την βοήθεια που μου προσέφεραν και να τους ευχαριστήσω για τις όμορφες και δύσκολες στιγμές που μοιραστήκαμε μέχρι να αποπερατωθεί η παρούσα εργασία.

Ιδιαίτερως, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τον φίλο και συνάδελφο Κωνσταντίνο Χόκια για την υπομονή που έδειξε σε όλα τα στάδια των διπλωματικών μας εργασιών.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου, οι οποίοι έχουν σταθεί άξιοι συμπαραστάτες τόσα χρόνια στα ακαδημαϊκά και επαγγελματικά μου βήματα στηρίζοντας και ενισχύοντάς με, με τα απαραίτητα εφόδια.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	xi
Κατάλογος Σχημάτων	xiii
1 Εισαγωγή	1
1.1 Συνεισφορά	1
1.2 Διάρθρωση	2
2 Θεωρητικό Υπόβαθρο	3
2.1 Robot Operating System (ROS)	3
2.2 Ρομποτικός Πράκτορας	5
2.3 Μη Επανδρωμένα Επίγεια Οχήματα	6
2.4 Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα	7
2.5 Συστήματα GNSS	8
2.6 Αυτόνομη Ρομποτική Πλοήγηση	9
3 Σκοπός της Εργασίας	15
3.1 Ανάπτυξη Αυτόνομου Ρομποτικού Οχήματος για Συνεργατικές Drone-Rover Αποστολές	15
3.2 Παρόμοιες Εργασίες	17
4 Η Προσέγγιση που Ακολουθήθηκε	21
4.1 Επιλογή-Κατασκευή του μη Επανδρωμένου Επίγειου Οχήματος	22
4.2 Λογισμικό και Προγραμματισμός Συστήματος	30
5 Αποτελέσματα	37
5.1 Τελική Μορφή του Αυτόνομου Οχήματος	38
5.2 Αυτόνομη Πλοήγηση	38

Περιεχόμενα

5.3	Δημιουργία Νέου Χάρτη	40
5.4	Συνεργατική Αποστολή	40
5.5	RQT Graph	42
6	Συμπεράσματα	45
6.1	Αναβάθμιση Εξοπλισμού και Επέκταση του Συστήματος	46
6.2	Μελλοντικές Πιθανές Αποστολές	47
	Βιβλιογραφία	49

Κατάλογος Σχημάτων

2.1	ROS (Publish/Subscribe)	4
2.2	Τετράτροχο όχημα της Clearpath Robotics	6
2.3	DJI Matrice 200	7
3.1	4-τροχο όχημα της εταιρίας Clearpath Robotics	18
3.2	Ερπυστριοφόρο επίγειο όχημα του Πανεπιστημίου Carnegie Mellon	18
3.3	Αυτόνομο αραχνοειδές επίγειο όχημα από το πανεπιστήμιο του Linköping	19
4.1	Το εξακόπτερο που είχαμε στη διάθεσή μας	22
4.2	Πλατφόρμα ανάπτυξης	23
4.3	Raspberry Pi 3b	24
4.4	DC Dual Motor της Microbot	24
4.5	DC Dual Motor της OEM	25
4.6	APM 2.8 ardupilot	26
4.7	ApmPlanner	26
4.8	Ultrasonic Distance Sensor	27
4.9	3DR Radio Telemetry 915MHZ Module	28
4.10	Radiolink AT9S 10CH RC Transmitter and Receiver	28
4.11	Προφυλακτήρας οχήματος με θέση για αισθητήρα υπερήχων	29
4.12	Βάση πλευρικών αισθητήρων υπερήχων	29
4.13	Βάση οδηγού κίνησης και DC-DC converter	30
4.14	Τελική μορφή οχήματος	30
4.15	Χάρτης από το OpenStreetMap	32
4.16	Χάρτης του Πολυτεχνείου Κρήτης στο RVIZ	33
4.17	Συντομότερη διαδρομή στο RVIZ	34
4.18	Δοκιμή κόμβου ελέγχου κίνησης σε εξωτερικό χώρο	35
4.19	Μενού εκκίνησης κόμβων	36

Κατάλογος Σχημάτων

5.1	Αυτόνομο ρομποτικό όχημα κατά την περίοδο των εσωτερικών δοκιμών . .	37
5.2	Αυτόνομο ρομποτικό όχημα	38
5.3	Διαδρομές που δοκιμάστηκαν σε εξωτερικό χώρο	39
5.4	Ανοιχτοί κόμβοι κατά την διάρκεια των δοκιμών	39
5.5	Δημιουργία νέου χάρτη	40
5.6	Διαδρομή που ακολουθήθηκε στο RVIZ	41
5.7	Προσέγγιση και σύζευξη του UGV με το UAV	41
5.8	Μεταφορά του UGV από το UAV	42
5.9	Γράφος RQT κατά την διάρκεια της αυτόνομης πλοήγησης	43
5.10	Γράφος RQT επικοινωνίας των δύο οχημάτων	44

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Τα μη επανδρωμένα οχήματα κατέχουν ένα σημαντικό κομμάτι της τεχνολογίας της σύγχρονης εποχής. Εφαρμογές μπορούν να παρατηρηθούν σε αποστολές έρευνας και διάσωσης, περιβαλλοντολογικές μετρήσεις, τοπογραφίας, χαρτογράφησης, κ.α. Ενώ ακόμα συστηματικές μετρήσεις, όπως υγρασία εδάφους, οι οποίες θα χρειαζόντουσαν τη συνεχή παρουσία ενός ανθρώπου ή πολλούς τοποθετημένους αισθητήρες σε διαφορετικά σημεία πλέον μπορούν να γίνουν με χρήση ενός μόνο μη επανδρωμένου οχήματος. Επιπλέον, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρατηρείται στην ανάπτυξη συστημάτων συνεργατικών αποστολών, επεκτείνοντας περαιτέρω τις εφαρμογές των μη επανδρωμένων οχημάτων. Τέτοιου είδους συστήματα ενισχύονται από την ανάπτυξη ανοικτών πλαισίων λογισμικού, που επιτρέπουν την επικοινωνία και διαλειτουργικότητα πολλών διαφορετικών ρομποτικών συστημάτων, αλλά και από την επαναχρησιμοποίηση και τον διαμοιρασμό βιβλιοθηκών λογισμικού.

1.1 Συνεισφορά

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την ανάπτυξη ενός επίγειου ρομποτικού οχήματος, το οποίο αφενός θα χρησιμοποιεί χάρτες ανοιχτού κώδικα για την αυτόνομη πλοήγησή του, αφετέρου θα παρέχει τη δυνατότητα επικοινωνίας με ένα ή περισσότερα εναέρια οχήματα, καθώς και τη δυνατότητα μεταφοράς του από αυτά. Το αίτημα επίλυσης του συγκεκριμένου ζητήματος προήλθε από την ανάγκη εκτέλεσης αποστολών σε περιοχές όπου η φυσική παρουσία του ανθρώπου θα κρίνονταν επικίνδυνη ή ακόμα και αδύνατη εξαιτίας φυσικών εμποδίων και της ιδιομορφίας του εδάφους. Για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον και τα εργαλεία ενός meta-os συστήματος, συγκεκριμένα του ROS (Robot Operating System) [1], δίνοντας την δυνατότητα αξιόπιστου συγχρονισμού και μεγάλης επεκτασιμότητας. Επιπροσθέτως, το ROS είναι ένα λογισμικό όπου η χρήση του

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

συνεισφέρει στην κοινότητα ανοικτού κώδικα.

Η προτεινόμενη προσέγγιση θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα μεγάλο αριθμό α-ποστολών, όπως για παράδειγμα στη συλλογή δεδομένων από τaráτσες κτιρίων για την τακτική μελέτη τους. Επίσης, η χαρτογράφηση απομακρυσμένων δύσβατων περιοχών καθίσταται εφικτή, επεκτείνοντας τις βιβλιοθήκες χαρτών ανοικτού κώδικα. Ακόμα, θα μπορούσε να εφαρμοστεί στον έλεγχο επικινδυνότητας σε περιοχές με μεγάλο ρίσκο φυσικής παρουσίας του ανθρώπου, όπως σε μία διαρροή επικίνδυνων χημικών αερίων. Επιπλέον, μια πολύ χρήσιμη εφαρμογή είναι ο συνεχής περιμετρικός έλεγχος για την επιτήρηση διαφόρων περιοχών.

Το τελικό αποτέλεσμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ένα πρώτο βήμα για την ρεαλιστική χρήση ενός επίγειου οχήματος σε συνεργατικές αποστολές περιβαλ-λοντικής παρακολούθησης με εναέρια οχήματα.

1.2 Διάρθρωση

Στο Κεφάλαιο 2 περιέχεται το θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση εννοιών που θα αναφερθούν στη συνέχεια. Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται η ανάλυση του σκοπού της δι-πλωματικής εργασίας, καθώς και αναφορά σε παρόμοιες εργασίες που έχουν γίνει στο παρελθόν. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται εκτενώς η προσέγγιση που ακολουθήθηκε για την επίλυση του προβλήματος. Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μετά την ολοκλήρωση της εργασίας. Τέλος, το Κεφάλαιο 6 περιλαμβάνει τα συμπερά-σματα που προέκυψαν, καθώς και περαιτέρω βελτιώσεις που θα μπορούσαν να γίνουν στο μέλλον.

Κεφάλαιο 2

Θεωρητικό Υπόβαθρο

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται κάποιες έννοιες για την αρτιότερη κατανόηση της διπλωματικής εργασίας.

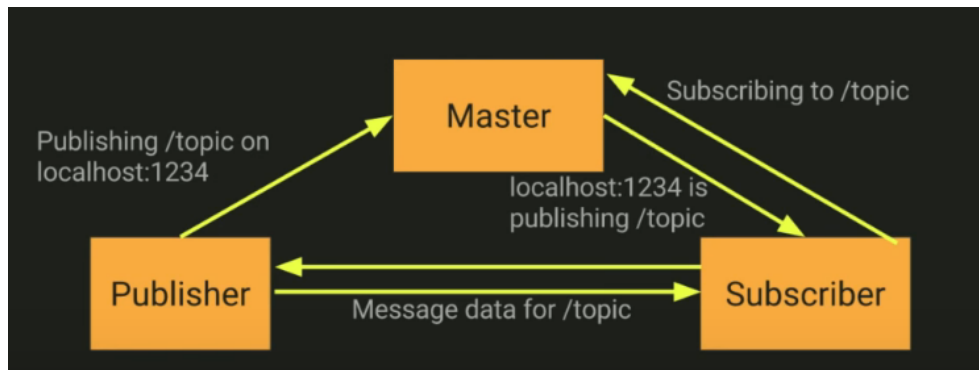
2.1 Robot Operating System (ROS)

Το ROS πρωτοεμφανίστηκε στο Πανεπιστήμιο του Στάνφορντ, αλλά επίσημα αναπτύχθηκε από τη ρομποτική εταιρεία Willow Garage το 2007. Το ROS παρείχε υπηρεσίες βασικού λειτουργικού συστήματος και προσέφερε βασικούς ελεγκτές για χαρτογράφηση, εντοπισμό, πλοήγηση, σε έναν αυξανόμενο αριθμό ερευνητών της ρομποτικής. Το 2013, μια ανεξάρτητη μη κερδοσκοπική οργάνωση που ονομάζεται Open Source Robotics Foundation (OSRF) ανέλαβε τη διαχείριση του ROS, για να στηρίξει τη σωστή ανάπτυξη λογισμικού ανοικτού κώδικα για χρήση στη ρομποτική έρευνα και στην ανάπτυξη προϊόντων.

Το ROS [1] είναι ένα μεταλειτουργικό σύστημα, δηλαδή δεν παρέχει μόνο τις τυπικές υπηρεσίες ενός λειτουργικού συστήματος, αλλά και λειτουργίες υψηλού επιπέδου (ασύγχρονες και σύγχρονες κλήσεις, κεντρικές βάσεις δεδομένων και συστήματα διαμόρφωσης λογισμικού για ρομποτικές εφαρμογές, κ.λπ.). Έχει ευρεία εφαρμογή και αποδοχή στο χώρο της ρομποτικής, καθώς αποτελεί ένα λογισμικό ανοικτού κώδικα (open source). Πρόκειται για μια συλλογή εργαλείων λογισμικού και βιβλιοθηκών που χρησιμοποιούνται από προγραμματιστές ρομποτικών συστημάτων για την ανάπτυξη εφαρμογών. Το ROS δεν είναι συνηθισμένο λειτουργικό σύστημα, αλλά χρησιμοποιεί το περιβάλλον χρήστη του βασικού λειτουργικού συστήματος, το σύστημα αρχείων, το σύστημα διαχείρισης εργασιών και τα βοηθητικά εργαλεία προγραμματισμού. Το πιο διαδεδομένο βασικό λειτουργικό σύστημα για το ROS είναι το Linux, και έπειτα το MacOS. Το ROS κυρίως βασίζεται στην υπηρεσία επικοινωνίας μεταξύ εργασιών που εκτελούνται για τη λειτουργία του ρομπότ με τη χρήση μηνυμάτων (Publish/Subscribe),

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

η οποία επιτρέπει την επικοινωνία των διεργασιών (nodes) μέσω των θεμάτων εργασιών (topics). Το κάθε θέμα έχει συγκεκριμένο τύπο, ανάλογα με το είδος της εργασίας και του μηνύματος. Η διαχείριση των εργασιών και των θεμάτων εργασιών γίνεται από το ROS Master, το κεντρικό σύστημα, το οποίο επιτρέπει στις διεργασίες να επικοινωνούν μεταξύ τους, μέσω μηνυμάτων. Ενδεικτικά μπορούμε να δούμε πως γίνεται η συγκεκριμένη διαδικασία στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: ROS (Publish/Subscribe)

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του ROS είναι η δυνατότητα επιλογής γλώσσας προγραμματισμού, για την ανάπτυξη του πηγαίου κώδικα. Οι διαθέσιμες γλώσσες προγραμματισμού είναι οι C++, Python και Lisp, ενώ υπάρχουν πειραματικές βιβλιοθήκες σε Java και Lua. Επίσης, καθώς η δημιουργία πηγαίου κώδικα για ρομποτικές εφαρμογές μπορεί να γίνει αρκετά δύσκολη, η χρήση ήδη υπάρχοντων πακέτων, που προσφέρει η κοινότητα του ROS διευκολύνει πολύ τη διαδικασία.

2.1.1 Επιπρόσθετα Πακέτα Ανοικτού Κώδικα

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το ROS επιτρέπει τη χρήση διαφόρων πακέτων ανοικτού κώδικα για ρομποτικές εφαρμογές. Τα πακέτα είναι βιβλιοθήκες (libraries), αρχεία κώδικα (scripts), αρχεία παραμετροποίησης (configuration files) και άλλα. Σε περιπτώσεις εμπορικών εφαρμογών ο χρήστης είναι υποχρεωμένος να πάρει έγκριση από τον αντίστοιχο δημιουργό του κάθε πακέτου. Χάρη σε αυτά τα πακέτα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε διάφορα εργαλεία, χωρίς να συντάξουμε όλον τον κώδικα από την αρχή. Η δομή του ROS απαρτίζεται από πακέτα τα οποία βοηθούν ώστε να δημιουργηθούν οι επεκτάσεις (plugins), που μας δίνουν διάφορες δυνατότητες και εργαλεία. Τα ήδη υπάρχοντα πακέτα μπορούμε να τα βρούμε στα αποθετήρια (repositories), που είναι διαδικτυακοί χώροι αποθήκευσης. Σαφώς, είναι ελεύθερη η δημιουργία εκ νέου πακέτων ή η πρόταση για βελτίωση των υπάρχοντων.

Ένα πακέτο ROS έχει την παρακάτω δομή:

include :

Στο φάκελο αυτό περιέχονται header files όταν το πακέτο περιγράφεται σε γλώσσα C++. Τα αρχεία αυτά περιγράφουν τις επεκτάσεις (plugins) κώδικα που χρειάστηκαν για τις λειτουργίες του ρομπότ.

src :

Στο φάκελο αυτό περιέχονται αρχεία .py, όταν το πακέτο περιγράφεται σε γλώσσα Python.

msg :

Ο φάκελος αυτός περιέχει μηνύματα που χρειάζονται για τη δημοσίευση (publish) από το ROS σε κάποιο θέμα μιας ενεργής διεργασίας.

scripts :

Στα αρχεία αυτά περιγράφονται οι λειτουργίες των διαφόρων διεργασιών που χρειάζονται για τον έλεγχο του οχήματος.

package.xml :

Το αρχείο αυτό πρέπει να περιλαμβάνεται σε κάθε πακέτο. Αυτό το αρχείο ορίζει ιδιότητες σχετικά με το πακέτο, όπως το όνομα του πακέτου, η έκδοση, οι συγγραφείς και οι εξαρτήσεις (dependencies).

CMakeLists.txt :

Κάθε πακέτο πρέπει να περιέχει ένα ή περισσότερα αρχεία CMakeLists.txt. Περιγράφουν τον τρόπο κατασκευής του πακέτου και το σημείο εγκατάστασής του.

2.2 Ρομποτικός Πράκτορας

Ρομποτικός πράκτορας [2] ονομάζεται οποιαδήποτε ευφυής μηχανική συσκευή που μπορεί να υποκαθιστά τον άνθρωπο σε διάφορες εργασίες. Ένα ρομπότ μπορεί να δράσει αυτόνομα σε ένα οποιοδήποτε περιβάλλον και είναι σε θέση να αντιλαμβάνεται, να σκέφτεται και να ενεργεί. Τα ρομπότ μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να κάνουν εργασίες οι οποίες είτε είναι δύσκολες ή επικίνδυνες για να γίνουν απευθείας από έναν άνθρωπο. Ωστόσο, είναι κατάλληλα εργαλεία για την διερεύνηση προβλημάτων τεχνητής νοημοσύνης που περιλαμβάνουν την πλοήγηση στο χώρο, την αποφυγή εμποδίων ή τη σχεδίαση μονοπατιού. Ένα από τα χαρακτηριστικά των ρομποτικών συστημάτων είναι η πολυπλοκότητα των περιβαλλόντων μέσα στα οποία κινούνται.

2.3 Μη Επανδρωμένα Επίγεια Οχήματα

Με τον όρο μη επανδρωμένα επίγεια οχήματα UGV (Unmanned Ground Vehicles) εννοούμε τα οχήματα τα οποία κινούνται στο έδαφος χωρίς να χειρίζονται άμεσα από ανθρώπινο παράγοντα. Τα UGVs χρησιμοποιούνται σε πληθώρα περιπτώσεων όπου ο άνθρωπος είναι δύσκολο ή επικίνδυνο να συμμετάσχει. Ο χειρισμός τους χωρίζεται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία, τα οχήματα χρησιμοποιούν ένα πλήθος αισθητήρων για την κίνησή τους στον χώρο, καθιστώντας τα αυτόνομα και στην δεύτερη κατηγορία ο χειρισμός γίνεται με την βοήθεια ενός χειριστή μέσω ραδιοκυμάτων ή ακόμα και δικτυακά. Υπάρχει μεγάλο πλήθος εφαρμογών που χρησιμοποιούνται τα UGVs. Κάποια ενδεικτικά παραδείγματα είναι τα μη επανδρωμένα οχήματα που χρησιμοποιεί η εταιρία Amazon για την μεταφορά εμπορευμάτων στις αποθήκες της και τα τετράποδα μη επανδρωμένα επίγεια οχήματα της εταιρία Boston Dynamics για στρατιωτική υποστήριξη. Τέλος υπάρχει και η κλασική μορφή τετράτροχων οχημάτων που βρίσκουν πολλές εφαρμογές σε αποστολές περιβαλλοντολογικού ενδιαφέροντος. Ένα παράδειγμα μη επανδρωμένου επίγειου οχήματος είναι το τετράτροχο όχημα της Clearpath Robotics το οποίο παρατίθεται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Τετράτροχο όχημα της Clearpath Robotics

2.4 Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα

Ως μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα UAV (Unmanned Aerial Vehicles), ορίζονται τα κάθε είδους ιπτάμενα οχήματα που δεν έχουν χειριστή στην άτρακτό τους, αλλά πραγματοποιούν πτήσεις είτε αυτόνομα είτε μέσω τηλεκατεύθυνσης. Οι προαναφερθείσες ονομασίες αναφέρονται στους ορισμούς που κατά καιρούς έχουν δοθεί για την περιγραφή αυτών των οχημάτων. Ο όρος UAV περιγράφει μόνο το χωρίς χειριστή εναέριο όχημα. Ο όρος UAS (Unmanned Aircraft System) περιλαμβάνει όλες τις συσκευές, το προσωπικό και τις διαδικασίες οι οποίες χρησιμοποιούνται προκειμένου το μη επανδρωμένο εναέριο όχημα να θεωρείται ως ολοκληρωμένο σύστημα. Τέλος, ο όρος RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems) καθιερώθηκε σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία και με την ανάγκη όλες οι πτήσεις μη επανδρωμένων αεροσκαφών να έχουν τουλάχιστον έναν επιβλέποντα πιλότο στο έδαφος. Τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα συνήθως έχουν τη μορφή μικρού αεροπλάνου ή ελικοπτέρου με έναν ή περισσότερους κινητήρες και έλικες συντονισμένους για πλήρως ελεγχόμενη πτήση από ειδικό πρόγραμμα ή χειριστήριο εδάφους. Ένα παράδειγμα μη επανδρωμένου εναέριου οχήματος είναι το Matrice 200 της εταιρίας DJI το οποίο παρατίθεται στο Σχήμα 2.3



Σχήμα 2.3: DJI Matrice 200

2.5 Συστήματα GNSS

- **GPS (Global Positioning System)**

Το δορυφορικό σύστημα GPS αποτελείται συνολικά από 32 δορυφόρους και για την πλήρη λειτουργία του, το σύστημα βασίζεται σε ένα πλέγμα 24 δορυφόρων. Στην πλήρη λειτουργία του, δίνεται η δυνατότητα να παρατηρούνται ταυτόχρονα 6 έως 8 δορυφόροι από οποιαδήποτε σημείο της γήινης επιφάνειας με ανοικτό ορίζοντα. Οι δορυφόροι αυτοί είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι σε 6 τροχιακά επίπεδα με γωνία κλίσης 55° ως προς το ισημερινό επίπεδο, χρειάζονται περίπου 12 ώρες για μία πλήρη περιστροφή και βρίσκονται σε απόσταση 20189 χιλιόμετρα από την επιφάνεια της γης. Ο σχεδιασμός αυτής της διάταξης των δορυφόρων έχει σαν στόχο κάθε σημείο της γήινης επιφάνειας να έχει ορατότητα τουλάχιστον προς 4 δορυφόρους. Το σύστημα ξεκίνησε από το Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ και ονομάστηκε αρχικά NAVSTAR GPS (Navigation Signal Timing and Ranging Global Positioning System). Το δορυφορικό αυτό σύστημα ρυθμίζεται καθημερινά από τη Βάση Πολεμικής Αεροπορίας Στριβερ (Schriever) με κόστος 400 εκατομμύρια δολάρια το χρόνο.

- **GLONASS (Global Navigation Satellite System)**

Το παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα πλοήγησης της Ρωσίας GLONASS [3] επαναλειτουργεί από το 2011 μετά από την ολοκλήρωση του πλήρη τροχιακού σχηματισμού των 24 δορυφόρων. Σήμερα το δορυφορικό σύστημα Glonass αποτελείται από 28 δορυφόρους συνολικά από τους οποίους οι 24 βρίσκονται σε κανονική λειτουργία. Οι δορυφόροι αυτοί είναι ίσα κατανεμημένοι σε 3 τροχιακά επίπεδα με 8 δορυφόρους στο κάθε τροχιακό επίπεδο. Διατηρούν σχεδόν κυκλική τροχιά με κλίση 64.8° ως προς το ισημερινό επίπεδο σε απόσταση 19100 χιλιόμετρα από την επιφάνεια της γης και χρειάζονται περίπου 11 ώρες για μία πλήρη περιστροφή.

- **GALILEO**

Το σύστημα Galileo [4] αναπτύχθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και την Ευρωπαϊκή Διαστημική Υπηρεσία ESA (European Space Agency) και αποτελείται συνολικά από 30 δορυφόρους με τους 27 πραγματικά ενεργούς και 3 εφεδρικούς. Οι δορυφόροι είναι τοποθετημένοι σε 3 τροχιακά επίπεδα σε μέση γήινη τροχιά με γωνία κλίσης 56° ως προς το ισημερινό επίπεδο, χρειάζονται περίπου 14 ώρες για μία πλήρη περιστροφή και έχουν ύψος τροχιάς περίπου 23600 χιλιόμετρα. Με τον παραπάνω σχεδιασμό επιτυγχάνεται το να είναι πάντοτε ορατοί τουλάχιστον 6 έως 8 δορυφόροι από οποιαδήποτε σημείο της γήινης επιφάνειας.

- **BeiDou-2/Compass**

Το δορυφορικό σύστημα της Κίνας (Compass/BeiDou-2) είχε προβλεφθεί αρχικά

να αποτελείται από 35 δορυφόρους, εκ των οποίων οι 5 δορυφόροι να είναι γεωστατικής τροχιάς και οι υπόλοιποι 30 δορυφόροι θα είναι μεσαίου ύψους γήινης τροχιάς. Οι δορυφόροι του συστήματος αυτού είναι διατεταγμένοι σε 3 τροχιακά επίπεδα με γωνία κλίσης 55° ως προς το ισημερινό επίπεδο και χρειάζονται περίπου 13 ώρες για μία πλήρη τροχιακή περίοδο. Σήμερα το BeiDou-2 έχει περίπου 50 δορυφόρους και αξιοποιείται σε περιφερειακές περιοχές της Ασίας και του Ειρηνικού ωκεανού.

2.6 Αυτόνομη Ρομποτική Πλοήγηση

Στην ρομποτική το ρόλο του πλοηγού τον αναλαμβάνει κάποιο λογισμικό, το οποίο λαμβάνει υπόψη του τα χαρακτηριστικά του χώρου όπου έχει υποβληθεί το ρομπότ, καθώς επίσης και τα χαρακτηριστικά του ίδιου του ρομπότ, ώστε να μπορεί να σχεδιάσει την διαδρομή που θα ακολουθήσει και να επιλέξει τις κατάλληλες ενέργειες ελέγχου.

Την ρομποτική πλοήγηση ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή μπορούμε να την διαχωρίσουμε σε δύο βασικές κατηγορίες, την καθολική πλοήγηση και την τοπική πλοήγηση.

- **Καθολική πλοήγηση**

Το κυρίως χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης κατηγορίας είναι ότι βασίζεται σε έναν ήδη υπάρχον χάρτη ο οποίος μας παρέχει πληροφορίες που ανταποκρίνονται σε κάποιο περιβάλλοντα χώρο. Με βάση τις πληροφορίες αυτές, το ρομποτικό όχημα μπορεί να σχεδιάσει την κατάλληλη διαδρομή προς το στόχο, εφόσον αυτή υπάρχει, και να πάρει αποφάσεις για το πως θα πλοηγηθεί προς αυτόν.

- **Τοπική πλοήγηση**

Αντιθέτως, στην τοπική πλοήγηση δεν υπάρχει καμία πληροφορία για τον περιβάλλοντα χώρο, όπου καλείται το ρομποτικό όχημα να πλοηγηθεί, κατά συνέπεια το ρομποτικό όχημα λαμβάνει αποφάσεις μόνο με βάση τα αισθητήρια όργανα που διαθέτει. Στην συγκεκριμένη κατηγορία δεν είναι πάντα εφικτό να σχεδιαστεί κάποια διαδρομή προς κάποιο στόχο, καθώς δεν προϋπάρχει κάποιος χάρτης.

Γενικότερα ένα ρομποτικό σύστημα για να μπορέσει να πλοηγηθεί, αυτόνομα αλλά και με ασφάλεια θα πρέπει να απαντάει σε τέσσερα βασικά ερωτήματα. Προσπαθώντας να δώσουμε απάντηση σε κάθε ένα από αυτά τα ερωτήματα, διαχωρίζουμε το συνολικό πρόβλημα της ρομποτικής πλοήγησης σε τέσσερα υποπροβλήματα, διαφορετικά μεν μεταξύ τους, αλλά χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι οποιαδήποτε επίλυση στα επιμέρους υποπροβλήματα είναι αποδεκτή. Για να είναι κάθε επιμέρους επίλυση αποδεκτή, θα πρέπει να υπάρχει μία συνέχεια μεταξύ τους, έτσι ώστε να υπάρχει εν τέλει μία ολοκληρωμένη λύση στο συνολικό πρόβλημα [5].

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

1. Τι πρέπει να θυμάμαι ;

- **Χαρτογράφηση (mapping)**

2. Που βρίσκομαι ;

- **Εντοπισμός θέσης (localization)**

3. Που πρέπει να πάω ;

- **Σχεδιασμός διαδρομής (path planning)**

4. Πως μπορώ πάω ;

- **Έλεγχος κίνησης (motion control)**

2.6.1 Χαρτογράφηση

Σκοπός της χαρτογράφησης είναι η συλλογή όλης της απαραίτητης πληροφορίας, έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένας χάρτης για την αναπαράσταση του περιβάλλοντος χώρου. Η λύση του συγκεκριμένου προβλήματος διαφέρει ανάλογα με την εφαρμογή, το περιβάλλον στο οποίο εργαζόμαστε και τα αισθητήρια όργανα με τα οποία έχουμε εξοπλίσει το ρομποτικό μας σύστημα.

Στην ρομποτική, τους χάρτες που χρησιμοποιούμε ή που παράγονται έπειτα από μία χαρτογράφηση, μπορούμε να τους διακρίνουμε σε δύο βασικούς τύπους, τους χάρτες πλέγματος (**grid-based maps**) και τους χάρτες διακριτικών (**landmark-based maps**).

- **Χάρτες πλέγματος**

Η αναπαράσταση του χάρτη γίνεται με τη χρήση ενός πλέγματος όπου κάθε κελί αντιστοιχεί σε μία θέση. Σε κάθε κελί είναι διατεταγμένη μία τυχαία δυαδική μεταβλητή για τον καθορισμό της συγκεκριμένης θέσης, αν είναι ελεύθερος χώρος ή εμπόδιο.

- **Χάρτες διακριτικών**

Στην συγκεκριμένη κατηγορία η αναπαράσταση βασίζεται στην ανίχνευση συγκεκριμένων διακριτικών που βρίσκονται στον περιβάλλοντα χώρο, όπου το κάθε διακριτικό μπορούμε να το χειριστούμε ως ένα σημείο (X_i, Y_i).

Στις μέρες μας έχουν αναπτυχθεί διάφοροι αλγόριθμοι αυτόνομης χαρτογράφησης με τους πλέον πιο διαδεδομένους, τον αλγόριθμο χαρτογράφησης πλέγματος (**Occupancy Grid Mapping - OGM**), στην περίπτωση που ψάχνουμε τον χάρτη του περιβάλλοντος ενώ έχουμε γνώση κάθε χρονική στιγμή για την θέση του ρομποτικού συστήματος και τον αλγόριθμο ταυτόχρονου εντοπισμού και χαρτογράφησης (**Simultaneous**

Localization and Mapping - SLAM) [6], για την περίπτωση που ψάχνουμε και τα δύο.

2.6.2 Εντοπισμός Θέσης

Ανάλογα με τον περιβάλλοντα χώρο που πρόκειται να εργαστούμε, πρέπει να εξοπλίσουμε το ρομποτικό μας σύστημα με τα κατάλληλα αισθητήρια όργανα, αλλά και αλγόριθμους, έτσι ώστε να μπορεί κάθε χρονική στιγμή να προσδιορίζει τη θέση του, αλλά και τον προσανατολισμό του στο χώρο εργασίας και συνάμα μέσα στο χάρτη που έχει στη διάθεσή του. Ο εντοπισμός θέσης είναι από τα πιο βασικά προβλήματα αντίληψης ενός ρομπότ, καθώς σχεδόν σε όλες τις εφαρμογές απαιτείται η γνώση της θέσης του. Εντοπισμός θέσης γενικότερα είναι όλη η διαδικασία αντιστοίχισης του συστήματος συντεταγμένων ενός χάρτη με το τοπικό σύστημα συντεταγμένων ενός ρομπότ.

Το πρόβλημα του εντοπισμού θέσης είναι ένα πολυδιάστατο πρόβλημα και αντιμετωπίζεται αναλύοντας τις επιμέρους διαστάσεις.

- **Τοπικός και καθολικός εντοπισμός θέσης**

Στον τοπικό εντοπισμό θέσης (**local localization**) [7] έχουμε γνώση της αρχικής θέσης του ρομπότ, ενώ στον καθολικό εντοπισμό θέσης (**global localization**) δεν έχουμε καμία πληροφορία για την αρχική θέση του ρομπότ.

- **Στατικά και δυναμικά περιβάλλοντα**

Στατικό περιβάλλον είναι το περιβάλλον στο οποίο η μοναδική κατάσταση που αλλάζει είναι η θέση του ρομπότ. Επιπλέον, σε ένα δυναμικό περιβάλλον πέρα από τη θέση του ρομπότ αλλάζει και το περιβάλλον, με άλλα λόγια αλλάζει η κατάσταση και άρα η θέση και άλλων αντικειμένων μέσα στο περιβάλλοντα χώρο.

- **Παθητικός και ενεργητικός εντοπισμός**

Στον παθητικό εντοπισμό θέσης ο αλγόριθμος του ελέγχου κίνησης του ρομπότ είναι ανεξάρτητος του εντοπισμού θέσης, δηλαδή το ρομπότ κινείται στον περιβάλλοντα χώρο και ο εντοπισμός επιτυγχάνεται παρατηρώντας την κίνηση του ρομπότ. Αντίθετα, στον ενεργητικό εντοπισμό θέσης η κίνηση του ρομπότ ελέγχεται από τον αλγόριθμο εντοπισμού θέσης προς διευκόλυνση του εντοπισμού.

- **Μονορομποτικός και πολυρομποτικός εντοπισμός**

Στον μονορομποτικό εντοπισμό (**single robot localization**) ασχολούμαστε μονάχα με ένα ρομπότ και δεν έχουμε ζητήματα επικοινωνίας, καθώς όλα τα δεδομένα συλλέγονται και επεξεργάζονται μόνο από αυτό το ρομποτικό σύστημα. Στον πολυρομποτικό εντοπισμό (**multi robot localization**) ασχολούμαστε με ομάδες από ρομπότ και άρα έχουμε και ζητήματα επικοινωνίας. Μπορούμε αρχικά

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

να εκμεταλλευτούμε τον μονορομποτικό εντοπισμό του κάθε ρομποτικού συστήματος και εν τέλει να υπάρχει η δυνατότητα τα ρομπότ να εντοπίσουν το ένα τη θέση του άλλου, έτσι ώστε να καταφέρουμε να έχουμε καλύτερη απόδοση ως προς τον εντοπισμό του κάθε ενός ξεχωριστά.

Οι πιο διαδεδομένοι αλγόριθμοι που αντιμετωπίζουν το πρόβλημα του εντοπισμού θέσης είναι ο αλγόριθμος εντοπισμού θέσης Μαρκόβ (**Markov localization**), ο αλγόριθμος εντοπισμού θέσης με πλέγμα (**Grid localization**), ο αλγόριθμος εντοπισμού θέσης Γκάους (**Gaussian localization**) και ο αλγόριθμος εντοπισμού θέσης Μόντε Κάρλο (**Monte Carlo localization - MCL**).

2.6.3 Σχεδιασμός Διαδρομής

Το πρόβλημα του σχεδιασμού διαδρομής που θα πρέπει να ακολουθήσει ένα ρομπότ είναι ένα αρκετά περίπλοκο πρόβλημα [8]. Για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος, από τη δεκαετία του '80, ένα μεγάλο μέρος της επιστήμης υπολογιστών ασχολείται με την ανάπτυξη αλγορίθμων και μεθόδων αναζήτησης. Το αντικείμενο της εύρεσης μονοπατιών ξεκίνησε με τους ρομποτικούς βραχίονες στη γραμμή παραγωγής εργοστασίων και από τότε έχει συμπεριλάβει κάθε είδους ρομποτική εφαρμογή, με τους αλγόριθμους και τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται να ποικίλλουν ανάλογα με το περιβάλλον εργασίας και την εφαρμογή. Έχοντας γνώση για το που βρίσκεται το ρομποτικό μας σύστημα μέσα σε ένα χάρτη, με τη χρήση του κατάλληλου αλγορίθμου και με γνώμονα πάντα τα κριτήρια που επιβάλλει ο εκάστοτε αλγόριθμος γίνεται η επιλογή της πιο σύντομης διαδρομής μέσα από ένα σύνολο διαφορετικών διαδρομών. Κύριο μέλημα των μεθόδων είναι η ασφαλής μετάβαση του ρομπότ από την αρχική του θέση μέχρι το σημείο που έχει ορίσει ως στόχο, η γρήγορη και άμεση προσέγγιση του τελευταίου, αλλά και η ελαχιστοποίηση του χρόνου εκτέλεσης του εκάστοτε αλγορίθμου. Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στον τομέα της αυτόνομης πλοήγησης οχημάτων είναι η χάραξη διαδρομής στον περιβάλλοντα χώρο που πρόκειται να κινηθεί ένα αυτόνομο όχημα κατά τη διάρκεια της τρέχουσας εξερεύνησης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποιοι βασικοί μέθοδοι σχεδιασμού διαδρομής.

- **Εύρεση διαδρομής σε γράφο**

Στα μαθηματικά, ο γράφος είναι μία αφηρημένη αναπαράσταση ενός συνόλου αντικειμένων, στο οποίο κάποια από τα αντικείμενα συνδέονται με άλλα μέσω μίας σχέσης. Οι οντότητες αυτές, οι οποίες αναπαριστούν αφηρημένες μαθηματικές έννοιες, ονομάζονται κόμβοι ή κορυφές και οι συνδέσεις μεταξύ τους ακμές. Με τη χρήση ενός αλγορίθμου που θα αξιολογεί και θα συγκρίνει τα βάρη μεταξύ των κόμβων ενός γράφου, το ελάχιστο μονοπάτι που θα προκύψει έχει σαν στόχο να αναδείξει τη βέλτιστη διαδρομή. Στο παρελθόν έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές

που επιλύουν το συγκεκριμένο πρόβλημα με τους αλγόριθμους των **Bellman-Ford**, **Floyd-Warshall**, **Dijkstra** [9], **Johnson** [10] και **A*** [11] να ξεχωρίζουν ως οι καλύτεροι.

- **Αποσύνθεση κελιών**

Η μέθοδος αυτή διακριτοποιεί τον χάρτη, στον οποίο κινείται το ρομπότ, σε ένα πεπερασμένο πλήθος από μικρότερες περιοχές που τις ονομάζουμε κελιά. Συγκεκριμένα, κάθε δυνατή κίνηση του ρομπότ από το ένα κελί στο γειτονικό του μπορεί να πραγματοποιηθεί λαμβάνοντας πάντα υπόψιν τις δυνατότητες και τους περιορισμούς κίνησης του ρομπότ. Η συνολική διαδρομή που πρέπει να ακολουθήσει το ρομπότ για να μεταβεί μέσω των κελιών αυτών σε ένα επιθυμητό σημείο, αναπαριστάται σαν ένας μη κατευθυνόμενος γράφος. Το μέγεθος των κελιών μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με τις απαιτήσεις και ο υπολογισμός του μονοπατιού μπορεί να πραγματοποιηθεί από οποιοδήποτε αλγόριθμο αναζήτησης σε γράφο. Αυτή η κατηγορία έχει πιθανώς ερευνηθεί πολύ περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη, μιας και η πολυπλοκότητά της σχετίζεται άμεσα με τον αλγόριθμο αναζήτησης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί [12] [13].

- **Πεδία δυναμικού**

Στην συγκεκριμένη μέθοδο γίνεται ανάθεση μίας τιμής δυναμικού για κάθε σημείο του χάρτη που θα κινείται το ρομπότ, δίνοντας τη μεγαλύτερη τιμή στο σημείο που έχουμε ως στόχο και την μικρότερη τιμή στα γνωστά εμπόδια που βρίσκονται μέσα στο χάρτη. Στα ρομποτικά συστήματα η μέθοδος αυτή υπολογίζει ένα διάνυσμα με τη βοήθεια των αισθητήρων του ρομπότ και με βάση το ερέθισμα που δέχεται, το ρομπότ ακολουθεί κάθε χρονική στιγμή το μέγιστο παραγόμενο διάνυσμα το οποίο εν τέλει το οδηγεί στο στόχο. Τα δυναμικά πεδία επιλύουν ένα μεγαλύτερο εύρος του προβλήματος της πλοήγησης σε σχέση με τις άλλες μεθόδους και με τη μέθοδο αυτή λαμβάνεται υπόψιν το συνολικό περιβάλλον του ρομπότ. Η τεχνική αυτή είναι πιθανόν από τις πιο δημοφιλείς στην πλοήγηση ρομποτικών συστημάτων [14] [15].

2.6.4 Έλεγχος Κίνησης

Καθώς η μέθοδος σχεδιασμού διαδρομής ασχολείται με την αναζήτηση της διαδρομής που πρέπει να ακολουθήσει το ρομποτικό όχημα, η μέθοδος του ελέγχου κίνησης ασχολείται με τον τρόπο που θα ακολουθήσει το ρομποτικό όχημα τη διαδρομή αυτή. Έτσι ο υπολογισμός του μονοπατιού θα καθοριστεί με βάση τα εμπόδια που βρίσκονται στο χώρο κίνησης του ρομποτικού συστήματος, δίνοντας σαν αποτέλεσμα το συντομότερο μονοπάτι ελεύθερο εμποδίων. Ο ελεγκτής κίνησης θα λάβει αυτά τα σημεία και θα παράγει τις απαραίτητες τιμές για τα συστήματα ελέγχου του ρομπότ. Ο έλεγχος

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

κίνησης του ρομπότ πρέπει να γίνεται με κατάλληλο τρόπο ώστε οι παράμετροι ελέγχου σε κάθε χρονική στιγμή να καθορίζονται με την καλύτερη δυνατή ακρίβεια. Οι κινηματικές εξισώσεις του ρομπότ είναι αυτές που καθορίζουν την επομένη θέση-διεύθυνση του ρομπότ σε κάθε χρονική στιγμή. Οι τεχνικές που ακολουθούνται είναι ποικίλες και διαφοροποιούνται ανάλογα με την εφαρμογή και το ρομποτικό σύστημα για το οποίο προορίζονται. Γενικότερα, καμία μέθοδος δεν μπορεί να μας εγγυηθεί ότι το ρομποτικό όχημα θα καταφέρει να φτάσει στον τελικό στόχο του. Πολλές προσεγγίσεις αλγορίθμων αποφυγής εμποδίων, όπως ο αλγόριθμος DWA [16], παράγουν τροχιές στον χώρο των ταχυτήτων, για την ασφαλή ακολούθηση ολικού μονοπατιού.

Οι αλγόριθμοι ή μέθοδοι διάσχισης μονοπατιού συνήθως χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, ανοικτού και κλειστού βρόχου. Οι αλγόριθμοι ανοικτού βρόχου, συνήθως, λύνουν το πρόβλημα, μέσω του, εκ των προτέρου διαχωρισμού ενός μονοπατιού σε μία ακολουθία ευθύγραμμων τμημάτων και καμπυλών και τον υπολογισμό των εντολών ταχύτητας για την ακολούθηση της ακολουθίας των τμημάτων. Σαν αποτέλεσμα, δεν λαμβάνουν υπόψιν απρόσμενες καταστάσεις, όπως ολίσθηση, αλλά και ατέλειες κινηματικού και δυναμικού μοντέλου του ρομπότ και επομένως μπορεί να αποκλίνουν σημαντικά από την επιθυμητή συμπεριφορά. Αντίθετα, μέθοδοι διάσχισης μονοπατιού, κλειστού βρόχου, λειτουργούν δυναμικά, μετασχηματίζοντας το πρόβλημα της διάσχισης μονοπατιού, στο πρόβλημα της επιλογής ενός υπό-στόχου και την παραγωγή εντολών ελέγχου για την ακολούθηση του στόχου αυτού, λαμβάνοντας υπόψιν την τρέχουσα κατάσταση του ρομπότ και την απόκλιση από την επιθυμητή συμπεριφορά, δηλαδή, για παράδειγμα τα σφάλματα θέσης και προσανατολισμού από το τρέχοντα υπό-στόχο. Οι μέθοδοι κλειστού βρόχου, όπως είναι προφανές είναι αποδοτικότεροι και πιο εύρωστοι από μεθόδους ανοικτού βρόχου, αλλά απαιτούν την ύπαρξη τεχνικών για την συνεχή εκτίμηση της κατάστασης του ρομπότ και τον υπολογισμό των αποκλίσεων του από το επιθυμητό μονοπάτι.

Το αντικείμενο της διάσχισης μονοπατιού για ρομποτικά οχήματα, έχει ερευνηθεί εκτενώς από τον ερευνητικό κόσμο, αλλά έχει επικεντρωθεί κατά κύριο λόγο σε ολονομικά ή ψευδο-ολονομικά ρομπότ, όπως ρομπότ με κινηματικό μοντέλο πανκατευθυντικό (**omnidirectional**), αντίστροφο (**differential drive**) και ολίσθησης (**skid steer drive**). Παράλληλα, υπάρχει και επαρκής έρευνα για την ακολούθηση μονοπατιού για μη ολονομικά ρομπότ, όπως το συμβατικό αυτοκίνητο με κινηματικό μοντέλο (**Ackermann**).

Κεφάλαιο 3

Σκοπός της Εργασίας

3.1 Ανάπτυξη Αυτόνομου Ρομποτικού Οχήματος για Συνεργατικές Drone-Rover Αποστολές

Τα μη επανδρωμένα επίγεια οχήματα (**UGV**) έχουν τη δυνατότητα να είναι αρκετά ευέλικτα, να έχουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας για τη κίνησή τους, να μεταφέρουν μεγάλα φορτία, ενώ επίσης μπορούν να παίρνουν μετρήσεις ακριβείας λόγω σταθερότητας. Παράλληλα, τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (**UAV**) μπορούν να αποφεύγουν εμπόδια, όπως περιφράξεις, σκάλες και άλλα, να ανεβαίνουν σε οροφές-ταράτσες κτιρίων, καθώς επίσης και να κάνουν χρήση αισθητήρων για εναέριες μετρήσεις.

Κύριος σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η κατασκευή ενός UGV, όπου πέρα από το ότι η πλοήγησή του θα γίνεται αυτόνομα, θα μπορεί να συνεργάζεται με ένα UAV για την εκτέλεση από κοινού αποστολών, κάτι που προϋποθέτει την επικοινωνία των δύο οχημάτων. Μπορεί να παρατηρηθεί πως το κύριο πρόβλημα για να λυθεί χωρίζεται σε επιμέρους υποπροβλήματα με τα κύρια να είναι:

- **Κατασκευή του οχήματος**
- **Αυτόνομη πλοήγηση**
- **Επικοινωνία των δύο οχημάτων**

3.1.1 Κατασκευή του Οχήματος

Το αρχικό πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί είναι η επιλογή-κατασκευή του UGV, έτσι ώστε να μπορεί να κινηθεί αυτόνομα και με ασφάλεια για να εκτελέσει διάφορες συνεργατικές αποστολές περιβαλλοντικής παρακολούθησης. Για την επιλογή αυτή, πέρα του οδοστρώματος που θα κινείται το UGV, πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψιν ότι όχι

3. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

μόνο θα συνεργάζεται με το UAV που είχαμε στη διάθεσή μας, αλλά να υπάρχει και η δυνατότητα να μεταφέρεται από αυτό. Το πρόβλημα της μεταφοράς του UGV από το UAV δεν εξετάζεται στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, όμως πρέπει να ληφθούν υπόψιν όλοι οι παράμετροι του οχήματος που θα καταστήσουν κάτι τέτοιο εφικτό, όπως για παράδειγμα το μέγεθος του UGV, το βάρος του και το πόσο εύκολα μπορεί προβεί σε διάφορους ελιγμούς.

3.1.2 Αυτόνομη Πλοήγηση

Έπειτα, το κύριο πρόβλημα που πρέπει να εξεταστεί είναι αυτό της αυτόνομης πλοήγησης. Το μη επανδρωμένο όχημα που θα κατασκευαστεί θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να διαβάσει χάρτες, να μπορεί να εντοπίζει τη θέση του σε πραγματικό χρόνο και να κινείται αυτόνομα και με ασφάλεια μέσα σε αυτούς. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, κατά τη διάρκεια της μετάβασης του οχήματος από ένα σημείο σε κάποιο άλλο, θα πρέπει δυναμικά να αποφεύγει τυχόν εμπόδια. Στην περίπτωση που κάποια διαδρομή δεν είναι χαρτογραφημένη, το ρομποτικό όχημα θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να δημιουργεί νέους χάρτες.

3.1.3 Επικοινωνία των δύο Οχημάτων

Για να μπορούμε να έχουμε αποστολές συνεργασίας προϋπόθεση είναι η επικοινωνία του UGV με το UAV. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε με απευθείας επικοινωνία των δύο οχημάτων, είτε με τη συνεχόμενη ύπαρξη κάποιου σταθμού βάσης ο οποίος έχει τον ρόλο του μεσολαβητή για την επικοινωνία αυτή. Στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν θα γίνει μελέτη για την επικοινωνία των δύο οχημάτων μέσω κάποιου επιπλέον σταθμού βάσης, αλλά μέσω της αμφίδρομης επικοινωνίας τους. Με γνώμονα αυτό πρέπει να γίνει μελέτη για την επικοινωνία, τόσο των ενσωματωμένων συστημάτων των δύο οχημάτων, όσο και των συστημάτων πλοήγησης που συνήθως έχει κάθε αυτόνομο όχημα.

3.1.4 Εφαρμογές

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως οι εφαρμογές όπου μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μη επανδρωμένα οχήματα είναι πολλές. Με δεδομένο ότι το αυτόνομο επίγειο όχημα θα συνεργάζεται με το εναέριο ρομποτικό όχημα, διευρύνεται το εύρος χρήσης που θα είχαν μεμονωμένα τα δύο οχήματα. Κάποιες εφαρμογές στις οποίες είναι αναγκαία μια τέτοια συνεργασία παρατίθενται στην συνέχεια.

- **Καταμέτρηση έντασης ανέμου σε ανεμογεννήτριες**

Με την προσθήκη ανεμόμετρου στα δύο οχήματα (επίγειο και εναέριο) δίνεται η δυνατότητα της ταυτόχρονης μέτρησης της έντασης του ανέμου στην κορυφή και στη βάση μίας ανεμογεννήτριας.

- **Καταγραφή δεδομένων σε επικίνδυνες περιοχές**

Σε μία περιοχή όπου η παρουσία του ανθρώπου κρίνεται επικίνδυνη, τοποθετώντας τα κατάλληλα αισθητήρια όργανα στα δύο οχήματα δίνεται η δυνατότητα απομακρυσμένα να παρθούν σημαντικά δεδομένα. Για παράδειγμα, έπειτα από μια περιβαλλοντολογική μόλυνση από διαρροή σε κάποιο χημικό ή πυρηνικό εργοστάσιο.

- **Γεωργία ακριβείας**

Στην σύγχρονη εποχή για τον εκσυγχρονισμό της αγροτικής διαδικασίας υπάρχει ανάγκη συνεχόμενων εναέριων και επίγειων μετρήσεων. Έτσι, η τοποθέτηση αισθητήριων οργάνων καθίσταται μεγάλο εφόδιο για την αύξηση της παραγωγής, την πρόβλεψη για την λίπανση, καθώς και για την συγκομιδή των προϊόντων.

- **Αυτόνομη Επιτήρηση σε Στέγες Κτιρίων**

Σε περιοχές που υπάρχουν πολλά κτίρια, όπως μία πόλη, μία πάρα πολύ χρήσιμη εφαρμογή θα ήταν η μεταφορά του επίγειου οχήματος από το εναέριο όχημα, από στέγη σε στέγη, για την συλλογή δεδομένων στην κάθε στέγη ξεχωριστά από το επίγειο όχημα.

3.2 Παρόμοιες Εργασίες

Δεδομένου της πληθώρας εφαρμογών που υπάρχουν, έχουν υλοποιηθεί και διαφορετικοί τύποι μη επανδρωμένων επίγειων οχημάτων.

3.2.1 4-τροχο Όχημα της Εταιρίας Clearpath Robotics

Η εταιρία Clearpath Robotics [17] δημιουργήθηκε από τέσσερις απόφοιτους του Πανεπιστήμιου του Waterloo στον Καναδά. Η εταιρία εξειδικεύεται σε μια πλατφόρμα αυτόνομου ρομποτικού οχήματος, Σχήμα 3.1, όπου ο αγοραστής μπορεί να τοποθετήσει ανάλογα με τις ανάγκες του μια μεγάλη γκάμα αισθητήριων οργάνων.

3. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ



Σχήμα 3.1: 4-τροχο όχημα της εταιρίας Clearpath Robotics

3.2.2 Ερπυστριοφόρο Επίγειο Όχημα του Πανεπιστημίου Carnegie Mellon

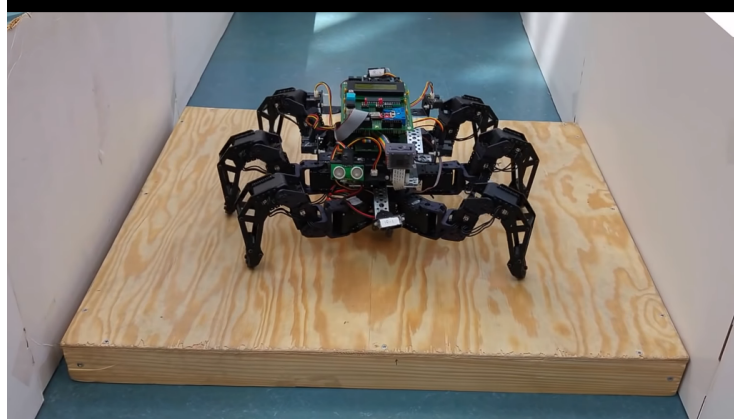
Στο πανεπιστήμιο του Carnegie Mellon [18] η ρομποτική ομάδα Field Robotics Center (FRC) έχει αναπτύξει ένα αυτόνομο ρομποτικό όχημα με ερπύστριες που έχει την δυνατότητα να επικοινωνεί και με ένα αυτόνομο εναέριο όχημα, Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Ερπυστριοφόρο επίγειο όχημα του Πανεπιστημίου Carnegie Mellon

3.2.3 Αυτόνομο Αραχνοειδές από το Πανεπιστήμιο του Linköping

Ένα επίγειο ρομποτικό όχημα μπορεί να μην έχει την συμβατική μορφή με τροχούς ή ερπύστριες. Στο πανεπιστήμιο του Linköping [19] έχει αναπτυχθεί ένα αραχνοειδές UGV που δυναμικά έχει την δυνατότητα να κινείται σε ένα χώρο, Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Αυτόνομο αραχνοειδές επίγειο όχημα από το πανεπιστήμιο του Linköping

3. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Κεφάλαιο 4

Η Προσέγγιση που Ακολουθήθηκε

Για την καλύτερη επεξήγηση και κατανόηση της προσέγγισης που ακολουθήθηκε, θα γίνει μια εκτενέστερη ανάλυση των παρακάτω θεμάτων.

- **Επιλογή-κατασκευή του μη επανδρωμένου επίγειου οχήματος**

Πλατφόρμα οχήματος

Ενσωματωμένο σύστημα

Οδηγός κίνησης των ηλεκτροκινητήρων

Αισθητήρια όργανα

Συστήματα επικοινωνίας

Απομακρυσμένος χειρισμός οχήματος

Σχεδίαση και εκτύπωση τρισδιάστατων μοντέλων

- **Λογισμικό και προγραμματισμός συστήματος**

Κόμβος ελέγχου καταστάσεων

Κόμβος ελέγχου κίνησης ηλεκτροκινητήρων

Πακέτο MAVROS για την επικοινωνία μέσω πρωτοκόλλου MAVLINK

Χάρτες ανοιχτού κώδικα

Γραφική παρουσίαση χάρτη και θέσης οχήματος - Rviz

Σχεδιασμός διαδρομής και πακέτο Route Network

Έλεγχος κίνησης με χρήση αισθητήρων απόστασης για την αποφυγή εμποδίων

Scripts αυτοματοποίησης εκκίνησης κόμβων

4.1 Επιλογή-Κατασκευή του μη Επανδρωμένου Επίγειου Οχήματος

Όπως έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενο κεφάλαιο το αυτόνομο ρομποτικό όχημα UGV που κατασκευάστηκε έπρεπε τηρεί συγκεκριμένες προδιαγραφές για να μπορεί να μεταφέρεται από το μη επανδρωμένο εναέριο όχημα UAV που είχαμε στην διάθεσή μας. Το συγκεκριμένο UAV είναι ένα εξακόπτερο, με πιλότο Pixhawk και ωφέλιμο φορτίο 4 κιλά και παρατίθεται στο σχήμα 4.1. Με γνώμονα αυτό, αλλά και τις αποστολές στις οποίες θα έχει δυνατότητα να ολοκληρώσει, έγινε η επιλογή της πλατφόρμας, καθώς και των υπολοίπων στοιχείων του οχήματος.



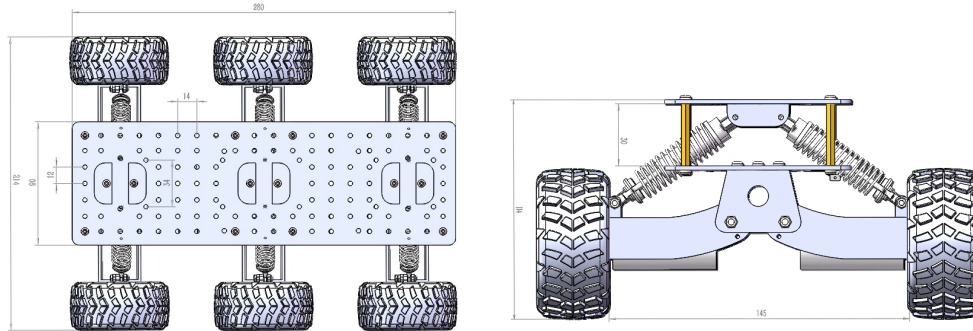
Σχήμα 4.1: Το εξακόπτερο που είχαμε στη διάθεσή μας

4.1.1 Πλατφόρμα Οχήματος

Μετά από μια ενδελεχή έρευνα για τις διαθέσιμες πλατφόρμες που υπάρχουν στην αγορά, έγινε επιλογή μίας εξάτροχης (6wd) πλατφόρμας με ανεξάρτητους ηλεκτροκινητήρες σε κάθε τροχό όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2. Η πλατφόρμα ανάπτυξης έχει διαστάσεις 28εκ x 21εκ x 11.5εκ και βάρος 1,4 κιλά, χαρακτηριστικά τα οποία μας επιτρέπουν την ασφαλή μεταφορά του από το UAV. Κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά της πλατφόρμας ανάπτυξης είναι ότι τα μοτέρ κίνησης έχουν τάση λειτουργίας τα 12V και κατανάλωση 350mah ανά μοτέρ, πράγμα που του επιτρέπει να έχει ωφέλιμο φορτίο τα 6 κιλά και ιπποδύναμη 5 κιλά ανά εκατοστό. Ένα όχημα με τέτοιες δυνατότητες μπορεί

4.1 Επιλογή-Κατασκευή του μη Επανδρωμένου Επίγειου Οχήματος

να κινείται σε διαφορετικούς τύπους εδαφών και οδοστρωμάτων με αποτέλεσμα να μπορεί να ολοκληρώσει ένα μεγάλο εύρος αποστολών.



Σχήμα 4.2: Πλατφόρμα ανάπτυξης

4.1.2 Ενσωματωμένο Σύστημα

Ένα από τα σημαντικότερα μέρη του αυτόνομου ρομποτικού οχήματος είναι το ενσωματωμένο σύστημα, καθώς σε αυτό θα τρέχουν όλοι οι κώδικες που θα υλοποιηθούν. Με γνώμονα ότι στην υλοποίηση της διπλωματικής εργασίας θα γινόταν χρήση του ROS χρειαζόμασταν ένα ενσωματωμένο σύστημα με μικρό μέγεθος αλλά παράλληλα να έχει τη δυνατότητα να μπορεί να εγκατασταθεί λειτουργικό σύστημα που να είναι συμβατό με το ROS. Μετά από έρευνα και λόγω της μεγάλης κοινότητας που έχει, έγινε επιλογή του Raspberry PI 3b, στο οποίο έγινε εγκατάσταση του λειτουργικού συστήματος Debian 8 (Jessie). Με αυτή την επιλογή το ενσωματωμένο σύστημα θα έχει πολλές δυνατότητες, όπως την εγκατάσταση του ROS, την ταυτόχρονη λειτουργία πολλών κόμβων, καθώς και την επεξεργασία εικόνας, στοιχεία που δίνουν μεγάλη επεκτασιμότητα στο σύστημα μας. Το Raspberry Pi 3 Model B έχει ενσωματωμένο ένα σύστημα σε τσιπ (System on Chip – SoC) BroadCom BCM2837 που συνδυάζει μια κεντρική μονάδα επεξεργασίας Cortex-A53, αρχιτεκτονικής ARM, με τέσσερις πυρήνες, χρονισμό στα 1.2GHz με ένα σύστημα γραφικών Broadcom VideoCore IV και μνήμη LPDDR2 RAM μεγέθους 1GB. Διαθέτει, επίσης, τέσσερις θύρες USB, θύρα Ethernet 100Mbps, κεραία για ασύρματη σύνδεση WiFi 2.4GHz 802.11n, Bluetooth 4.1, υποδοχή κάρτας μνήμης Micro SD, θύρα εξόδου HDMI, θύρα εξόδου βίντεο DSI και αναλογική έξοδο ήχου-βίντεο 3.5mm. Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται το συγκεκριμένο μοντέλο raspberry που χρησιμοποιήθηκε.

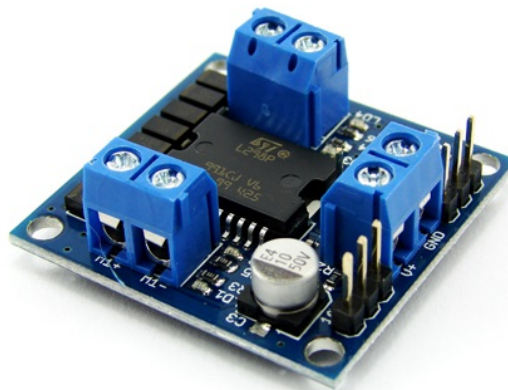
4. Η ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΠΟΥ ΑΚΟΛΟΥΘΗΘΗΚΕ



Σχήμα 4.3: Raspberry Pi 3b

4.1.3 Οδηγός Κίνησης των Ηλεκτροκινητήρων

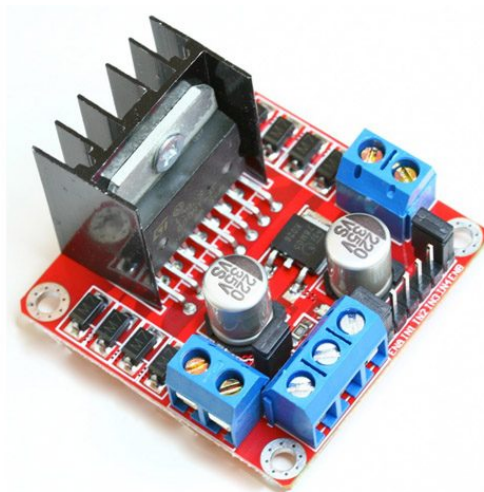
Ένα επίσης σημαντικό στοιχείο για ένα μη επανδρωμένο επίγειο όχημα είναι ο οδηγός κίνησης των ηλεκτροκινητήρων, όπου η σπουδαιότητα του έγινε περισσότερο αντιληπτή κατά τις πρώτες δοκιμές σε εξωτερικό χώρο. Αρχικά στο UGV τοποθετήθηκε ένας DC Dual Motor οδηγός κίνησης της εταιρίας Microbot που φαίνεται και στο Σχήμα 4.4. Παρόλο το περίφημο ολοκληρωμένο κύκλωμα L298 στο οποίο βασίζεται, έπειτα από



Σχήμα 4.4: DC Dual Motor της Microbot

4.1 Επιλογή-Κατασκευή του μη Επανδρωμένου Επίγειου Οχήματος

την συνεχόμενη χρήση του και κυρίως σε εξωτερικό χώρο, όπου οι τριβές ανάμεσα στους τροχούς και το έδαφος ήταν μεγαλύτερες, παρατηρήθηκε η άνοδος της θερμοκρασίας του L298 σε μη επιθυμητά επίπεδα με αποτέλεσμα να μην μπορεί να εκτελεστεί η σωστή κίνηση των μοτέρ. Για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος σε πρώτη φάση προστέθηκε μία ψήκτρα επάνω στο ολοκληρωμένο κύκλωμα και σε δεύτερη φάση προστέθηκε και ένας ανεμιστήρας. Παρόλο τις επεμβάσεις και τις προσθήκες που έγιναν το πρόβλημα δεν λύθηκε ικανοποιητικά, έτσι, έπειτα από έρευνα και αρκετές δοκιμές για το πως μπορούν να λυθούν τα προβλήματα που παρατηρήθηκαν, έγινε αντικατάσταση του οδηγού κίνησης με κάποιον παρεμφερή της εταιρίας OEM, ο οποίος και αυτός βασίζεται στο ολοκληρωμένο κύκλωμα L298. Τα αποτελέσματα ήταν μια πιο ομαλή κίνηση των μοτέρ τόσο στις χαμηλές ταχύτητες, όσο και στις υψηλές, αλλά κυρίως ακόμη και έπειτα από συνεχή λειτουργία και κίνηση πάνω σε έδαφος με μεγάλες τριβές, όπως είναι η άσφαλτος ή ένας χωματόδρομος, η θερμοκρασία του L298 κυμαινόταν πάντα σε επιθυμητά επίπεδα. Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται ο οδηγός κίνησης που τελικά χρησιμοποιήθηκε.



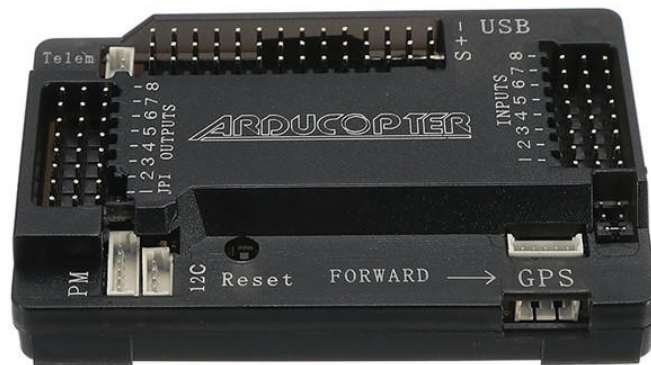
Σχήμα 4.5: DC Dual Motor της OEM

4.1.4 Αισθητήρια Όργανα

Η πλατφόρμα που επιλέχθηκε έχει την δυνατότητα να μεταφέρει ένα μεγάλο εύρος αισθητήριων οργάνων, αυτό οφείλεται στο ωφέλιμο φορτίο, αλλά και τον ελεύθερο χώρο που έχει. Επίσης λόγω του ενσωματωμένου συστήματος που χρησιμοποιήθηκε, δίνεται η δυνατότητα παράλληλης τοποθέτησης πολλαπλών αισθητήριων οργάνων μέσω των i2c, GPIO και USB θυρών που έχει.

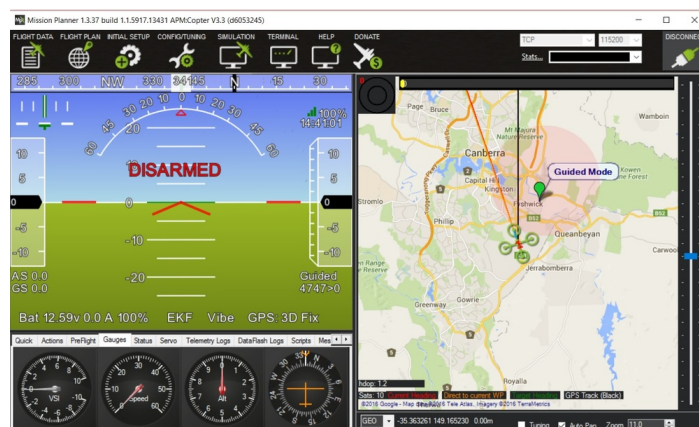
4. Η ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΠΟΥ ΑΚΟΛΟΥΘΗΘΗΚΕ

Όπως θα αναφερθεί και στην συνέχεια, βασική προϋπόθεση για ένα ρομποτικό όχημα να είναι αυτόνομο, είναι ο εντοπισμός θέσης και ο προσανατολισμός του. Στο ρομποτικό όχημα που κατασκευάστηκε τοποθετήθηκε ο arm 2.8 ardupilot, Σχήμα 4.6, για την χρήση της πυξίδας, αλλά και του οργάνου γεωεντοπισμού που έχει. Ο ardupilot



Σχήμα 4.6: APM 2.8 ardupilot

συνδυάζει και τις δυο λειτουργίες, επιπλέον όμως δίνει και επιπρόσθετη επεκτασιμότητα στο σύστημά μας, καθώς τα περισσότερα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα είναι εφοδιασμένα με τέτοιου είδους ελεγκτές πτήσεων. Επίσης τοποθετώντας τον ardupilot προστέθηκε και η δυνατότητα γραφικής απεικόνισης πληροφοριών, Σχήμα 4.7, του μη επανδρωμένου επίγειου οχήματος μέσω της εφαρμογής APM planner της ίδιας εταιρίας [20].



Σχήμα 4.7: ApmPlanner

4.1 Επιλογή-Κατασκευή του μη Επανδρωμένου Επίγειου Οχήματος

Επιπροσθέτως, τοποθετήθηκαν τρεις αισθητήρες απόστασης στο εμπρόσθιο, το δεξιό και το αριστερό μέρος του οχήματος για την δυναμική αποφυγή εμποδίων. Ταυτόχρονα έγινε δοκιμή αισθητήρων θερμοκρασίας και υγρασίας, δημιουργώντας τους κόμβους ανάγνωσης των μετρήσεων του από αλλά συστήματα μέσω του ROS, κάτι που θα αναλυθεί εκτενέστερα σε παρακάτω υποκεφάλαιο. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 4.8 παρατίθεται ο αισθητήρας απόστασης που τοποθετήθηκε.



Σχήμα 4.8: Ultrasonic Distance Sensor

4.1.5 Συστήματα Επικοινωνίας

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, για την επίτευξη αποστολών συνεργασίας η επικοινωνία των δύο οχημάτων κρίνεται αναγκαία. Το επίγειο όχημα που κατασκευάστηκε πέρα της εκάστοτε αποστολής που θα εκτελεί, θα έχει πάντα και το ρόλο του σταθμού βάσης. Έτσι, δημιουργώντας ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο, μέσω της κεραίας wifi που έχει το raspberry pi, τα ενσωματωμένα συστήματα άλλων μη επανδρωμένων οχημάτων μπορούν να συνδεθούν και να ανταλλάξουν μηνύματα με το όχημα μας μέσω ROS. Όμως με την τεχνολογία του wifi υπάρχουν περιορισμοί όσον αφορά τη δυνατότητα επικοινωνίας σε μεγάλη απόσταση κάτι που παρατηρήθηκε και έπειτα από δοκιμές σε εξωτερικό χώρο.

Για την απευθείας επικοινωνία του ardupilot του UAV και του ενσωματωμένου συστήματος του UGV τοποθετήθηκε μια κεραία τηλεμετρίας της εταιρίας 3DR. Έτσι μέσω του πρωτοκόλλου mavlink με την χρήση του MAVROS, μας δόθηκε η δυνατότητα ανταλλαγής μηνυμάτων και μέσω τηλεμετρίας. Σε σύγκριση με το Wifi, η τηλεμετρία επεκτείνει την απόσταση επικοινωνίας σε μεγαλύτερο βαθμό και μας δίνει την δυνατότητα της συνεχούς αλληλεπίδρασης των δυο οχημάτων σε ακόμα μεγαλύτερες αποστάσεις. Ενδεικτικά στο Σχήμα 4.9 παρατίθεται η κεραία τηλεμετρίας.

4. Η ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΠΟΥ ΑΚΟΛΟΥΘΗΘΗΚΕ



Σχήμα 4.9: 3DR Radio Telemetry 915MHz Module

4.1.6 Απομακρυσμένος Χειρισμός Οχήματος

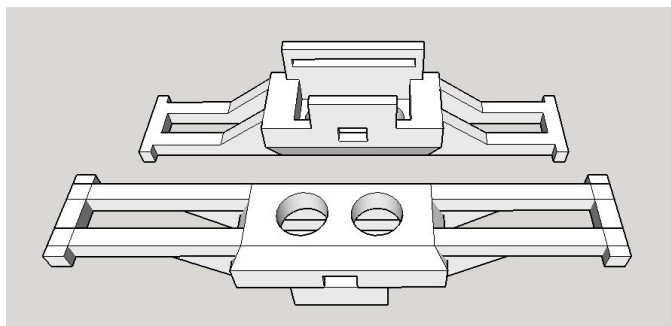
Για τον απομακρυσμένο έλεγχο του οχήματος, κάτι που ήταν απαραίτητο για τις δοκιμές που έγιναν, αλλά και για την αποφυγή ατυχημάτων ή ζημιών, έγινε η χρήση τηλεχειριστηρίου, Σχήμα 4.10. Καθώς το τηλεχειριστήριο είχε πολλούς διακόπτες επιλογής, πέρα από την δυνατότητα χειροκίνητου ελέγχου του ρομποτικού οχήματος, μας έδινε επιπλέον την δυνατότητα παραμετροποίησης και αλλαγή κατάστασης του οχήματος.



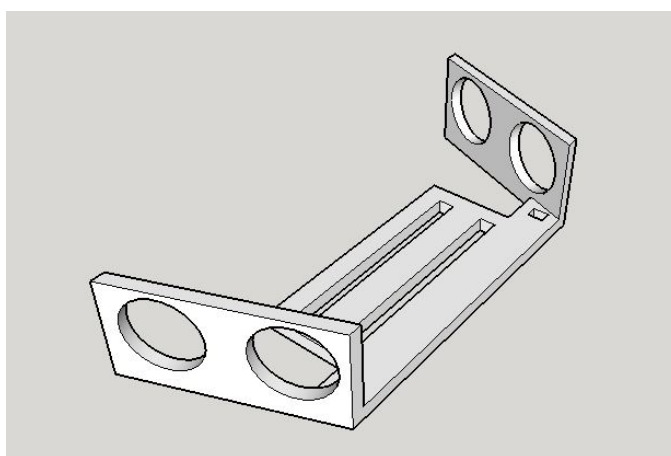
Σχήμα 4.10: Radiolink AT9S 10CH RC Transmitter and Receiver

4.1.7 Σχεδίαση και Εκτύπωση Τρισδιάστατων Μοντέλων

Για την σωστή τοποθέτηση όλων των επιμέρους εξαρτημάτων του οχήματος, σχεδιάστηκαν τρισδιάστατα μοντέλα και στην συνέχεια εκτυπώθηκαν σε τρισδιάστατο εκτυπωτή με υλικό PLA. Στο Σχήμα 4.11 παρουσιάζεται η τελική μορφή του προφυλακτήρα, ο οποίος είναι και η βάση στήριξης του εμπρόσθιου αισθητήρα απόστασης, ενώ στο Σχήμα 4.12 παρουσιάζεται η βάση των πλευρικών αισθητήρων.



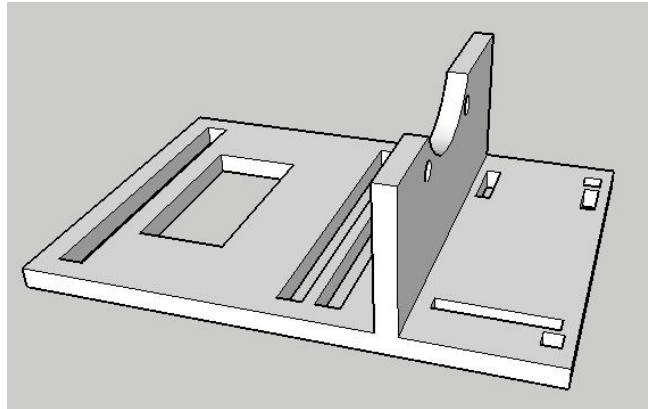
Σχήμα 4.11: Προφυλακτήρας οχήματος με θέση για αισθητήρα υπερήχων



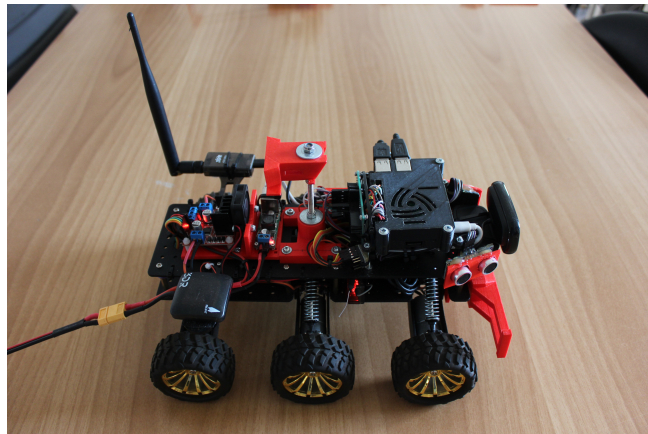
Σχήμα 4.12: Βάση πλευρικών αισθητήρων υπερήχων

Τέλος, στο Σχήμα 4.13 φαίνεται η βάση του οδηγού κίνησης, του ανεμιστήρα και του μετατροπέα DC-DC και στο σχήμα 4.14 παρουσιάζεται η τελική μορφή του οχήματος που κατασκευάστηκε τοποθετώντας πάνω του όλο τον απαραίτητο εξοπλισμό.

4. Η ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΠΟΥ ΑΚΟΛΟΥΘΗΘΗΚΕ



Σχήμα 4.13: Βάση οδηγού κίνησης και DC-DC converter



Σχήμα 4.14: Τελική μορφή οχήματος

4.2 Λογισμικό και Προγραμματισμός Συστήματος

Όπως έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενο κεφάλαιο, στο ενσωματωμένο σύστημα έγινε εγκατάσταση του λειτουργικού συστήματος Debian 8 (Jessie) και έπειτα εγκαταστάθηκε το μέτα-λειτουργικό σύστημα ROS (Indigo). Καθώς έγινε η επιλογή το ρομποτικό όχημα να είναι το κεντρικό όχημα των συνεργατικών αποστολών, αρχικά δημιουργεί ένα κλειστό ασύρματο δίκτυο μέσω wifi με ονομασία ROVER_ROS, στο οποίο άλλα συστήματα με ROS θα μπορούν να συνδεθούν σε αυτό. Έπειτα για τη λειτουργία του συστήματος γίνεται εκκίνηση του κεντρικού κόμβου (master node). Για την υλοποίηση του αυτόνομου συστήματος έπρεπε να δημιουργηθεί ένα πλήθος κόμβων, αλλά και να γίνει χρήση αρκετών πακέτων ανοιχτού κώδικα.

4.2.1 Κόμβος Ελέγχου Καταστάσεων

Ξεκινώντας δημιουργήθηκε ένας κεντρικός κόμβος τον οποίο θα διαβάζουν επόμενοι κόμβοι για να τρέχουν κατά το δοκούν ανάλογα με την κατάσταση που θα μεταδίδεται. Μέσω του πακέτου MAVROS, που θα αναλυθεί στην συνέχεια, διαβάζονται οι πληροφορίες του τηλεχειριστηρίου και γίνεται η επιλογή της κατάστασης. Όπως έχει προαναφερθεί απαραίτητη κατάσταση για τις δοκιμές που έγιναν ήταν αυτή της χειροκίνητης λειτουργίας, όπου το τηλεχειριστήριο καθοδηγεί το όχημα. Επιπροσθέτως σε αυτό τον κόμβο δίνεται η δυνατότητα της δημιουργίας των εκάστοτε αποστολών. Έτσι, για παράδειγμα, στην κατάσταση mapping θα δημιουργείται ένας νέος χάρτης, ενώ στην κατάσταση pathfinder το όχημα θα κινείται αυτόνομα σε έναν υπάρχων χάρτη, όπως θα αναλυθούν και στην συνέχεια.

4.2.2 Κόμβος Ελέγχου Κίνησης Ηλεκτροκινητήρων

Για την κίνηση των ηλεκτροκινητήρων του αυτόνομου οχήματος χρειάστηκε να δημιουργηθεί ένας κόμβος που θα μπορεί να μεταβάλει τις τιμές των GPIO εξόδων του Raspberry Pi, ώστε να ελέγχουμε τον οδηγό κίνησης των ηλεκτροκινητήρων. Οι τιμές της φοράς κίνησης των ηλεκτροκινητήρων κάθε πλευράς του οχήματος δίνονται στη μορφή High-Low για κίνηση μπροστά, Low-High για κίνηση πίσω και Low-Low για ελεύθερη κίνηση. Αντίστοιχα με την χρήση PWM(Pulse With Modulation) [21] στις κατάλληλες εξόδους ελέγχεται η ταχύτητα των ηλεκτροκινητήρων της κάθε πλευράς σε ένα πεδίο τιμών από 0 έως 100. Ο συγκεκριμένος κόμβος διαβάζει το μήνυμα της κατάστασης από τον κόμβο ελέγχου καταστάσεων και στην κατάσταση χειροκίνητης λειτουργίας μετατρέπει τις πληροφορίες του χειριστηρίου σε παλμούς PWM, ενώ στην κατάσταση αυτόνομης λειτουργίας διαβάζει το μήνυμα που εκπέμπει ο κόμβος ελέγχου κίνησης (Motion controller), που θα αναλυθεί στην συνέχεια, για να κάνει την ίδια λειτουργία.

4.2.3 MAVROS

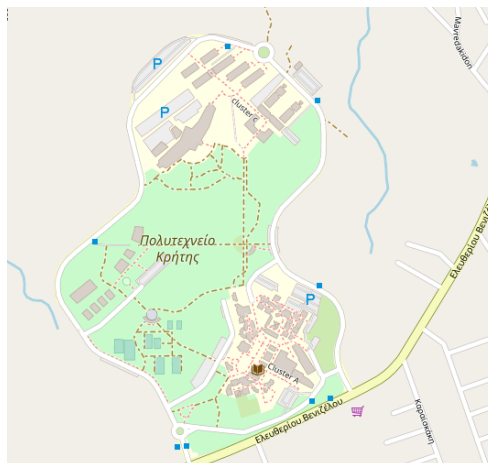
Το πακέτο MAVROS είναι ένα βοηθητικό πακέτο που επιτρέπει την επικοινωνία του πιλότου (ArduPilot) με το Raspberry Pi του ρομποτικού οχήματος μέσω του πρωτοκόλλου MAVLink. Έτσι δημιουργείται ένα πλήθος ROS μηνυμάτων με όλες τις πληροφορίες του πιλότου, όπως στίγμα GNSS, τιμή πυξίδας, κατάσταση μπαταρίας, δεδομένα χειριστηρίου και πολλά άλλα. Όπως έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενο κεφάλαιο, το επίγειο ρομποτικό όχημα θα συνεργάζεται με ένα εναέριο όχημα και έτσι χρειάστηκε η μετατροπή του υπάρχοντος πακέτου, ώστε να μπορεί να επικοινωνήσει το Raspberry Pi ταυτόχρονα και με τους δύο ελεγκτές πτήσης, δηλαδή με τον ArduPilot που βρίσκεται στο ρομποτικό όχημα, αλλά και με τον ArduPilot που φέρει το εναέριο όχημα.

4. Η ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΠΟΥ ΑΚΟΛΟΥΘΗΘΗΚΕ

Πιο συγκεκριμένα, μετά από αρκετή έρευνα και προσπάθειες τροποποιήθηκε το αρχείο `CmakeLists.txt` ώστε να επιτρέπει την ταυτόχρονη δημιουργία δύο συνδέσεων, μια για το επίγειο όχημα και μια για το εναέριο όχημα. Επίσης δημιουργήθηκαν δύο αντίγραφα του αρχείου `main_node.cpp` το ένα με όνομα `main_drone.cpp` και το άλλο με όνομα `main_rover.cpp`. Ως αποτέλεσμα το Raspberry pi κατέχει πλέον την θέση του ενδιάμεσου σταθμού και έχει όλες τις πληροφορίες που χρειάζεται για την αυτόνομη πλοήγηση του επίγειου οχήματος, αλλά και την δυνατότητα αποστολής στιγμάτων για την αυτόνομη πλοήγηση του εναέριου οχήματος (waypoints). Σε αυτό το σημείο παρατηρήθηκε έλλειψη γνώσης από την κοινότητα του ROS, γεγονός που δείχνει ότι υπάρχουν κενά στις συνεργατικές αποστολές χωρίς επίγειο σταθμό βάσης.

4.2.4 Χάρτες Ανοικτού Κώδικα

Το αυτόνομο ρομποτικό όχημα που κατασκευάστηκε έχει δυνατότητα καθολικής πλοήγησης σε χάρτες ανοικτού κώδικα. Για να επιτευχθεί αυτό, αρχικά έγινε λήψη της περιοχής ενδιαφέροντος σε μορφή OSM από το site του openstreetmap [22] και στην συνέχεια έγινε χρήση του πακέτου Osm Cartography. Με την κατάλληλη παραμετροποίηση, χρησιμοποιώντας και το πακέτο geometry, πλέον ο χάρτης είναι σε μορφή προσβάσιμη από άλλους κόμβους του συστήματος σε μορφή ROS μηνύματος. Στην Εικόνα 4.15 παρατίθεται η διαδικτυακή μορφή του χάρτη του Πολυτεχνείου Κρήτης που είναι και η περιοχή που πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές του αυτόνομου ρομποτικού οχήματος.



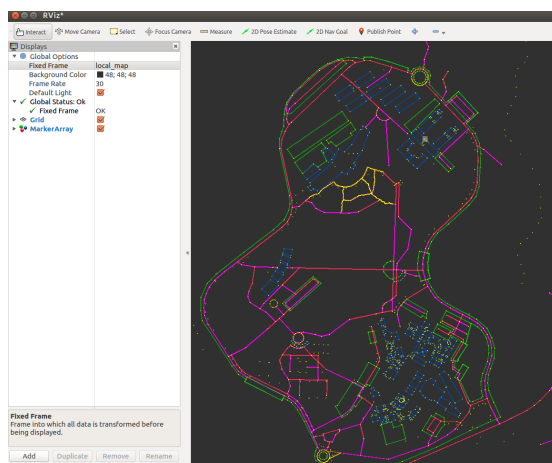
Σχήμα 4.15: Χάρτης από το OpenStreetMap

Κατά τις δοκιμές παρατηρήθηκε ότι κάποια περιοχή μπορεί να μην είναι χαρτογραφημένη ή να έχει αποκλίσεις και έτσι δημιουργήθηκε ένας επιπλέον κόμβος και μια

κατάσταση για την δημιουργία νέων χαρτών που στην συνέχεια θα μπορούν να ανέβουν και στην κοινότητα ανοιχτού κώδικα, επεκτείνοντας επιπλέον την βιβλιοθήκη αυτή.

4.2.5 Γραφική Παρουσίαση Χάρτη και Θέσης Οχήματος RVIZ

Σημαντικό εργαλείο του ROS που χρησιμοποιήθηκε επανειλημμένα στην παρούσα εργασία είναι το ROS visualization (RVIZ). Πρόκειται για ένα πακέτο ανοιχτού κώδικα το οποίο παρέχει ένα γραφικό περιβάλλον απεικόνισης τόσο εικόνων, χαρτών και βίντεο, όσο τροχιών κίνησης του ρομποτικού οχήματος και μετασχηματισμών μεταξύ συστημάτων συντεταγμένων. Μέσω του RVIZ, είναι δυνατή η ανά πάσα στιγμή γραφική απεικόνιση της κατάστασης του συστήματος, αλλά και η παρακολούθηση της κίνησης του ρομποτικού οχήματος και των δεδομένων που παρατηρούνται από τους αισθητήρες του. Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, το RVIZ χρησιμοποιήθηκε για την γραφική αναπαράσταση του χάρτη, διαβάζοντας το ROS μήνυμα που δημιουργήσε ο κόμβος `osm_cartography`, για την επιλογή του σημείου αφετηρίας και τερματισμού της διαδρομής, αλλά και για την εμφάνιση του αποτελέσματος του κόμβου σχεδιασμού διαδρομής που θα αναλυθεί στην συνέχεια. Τέλος, κατά τη διάρκεια των δοκιμών που έγιναν σε εξωτερικό χώρο, γινόταν η παρακολούθηση της θέσης του οχήματος τρέχοντας το `rviz` στον φορητό υπολογιστή που είχε συνδεθεί στο ασύρματο δίκτυο που δημιουργεί το επίγειο όχημα. Στο Σχήμα 4.16 φαίνεται η τελική απεικόνιση στο RVIZ, μετά την απαραίτητη παραμετροποίηση, ο χάρτης του Πολυτεχνείου Κρήτης που έγινε λήψη από το `openstreetmap`.

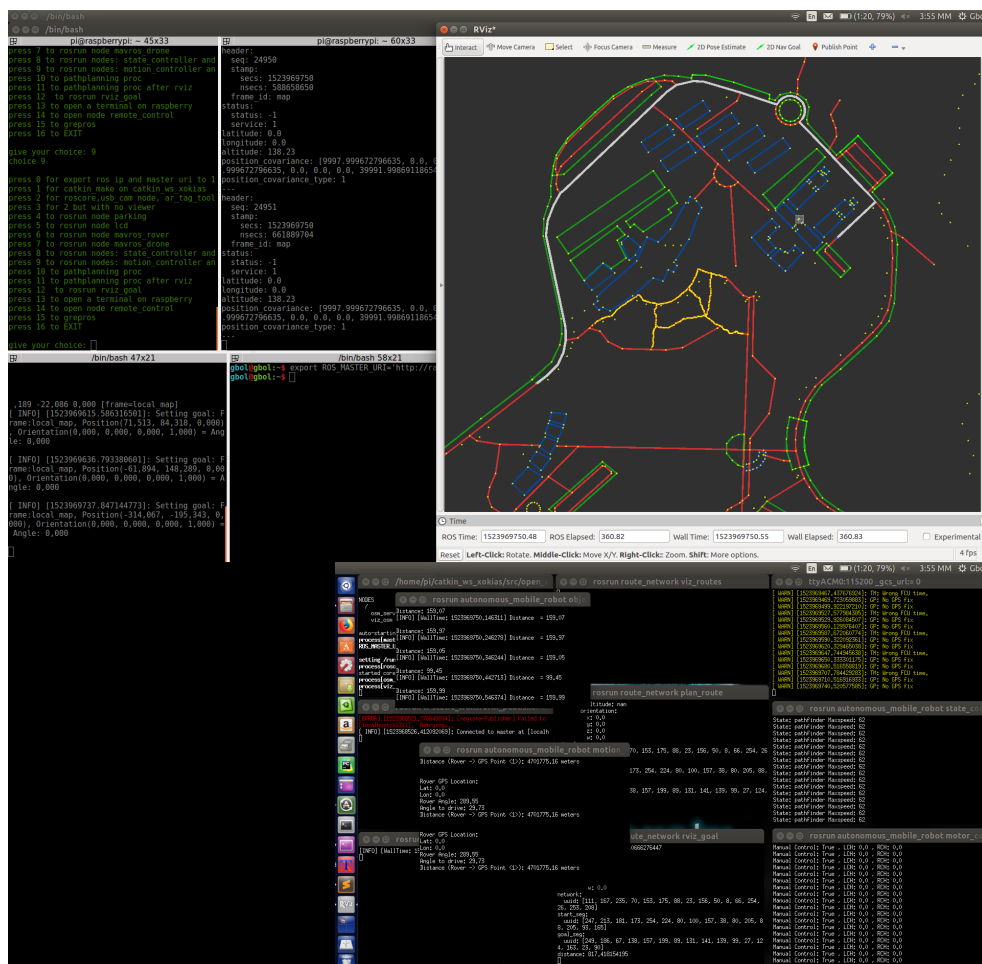


Σχήμα 4.16: Χάρτης του Πολυτεχνείου Κρήτης στο RVIZ

4. Η ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΠΟΥ ΑΚΟΛΟΥΘΗΘΗΚΕ

4.2.6 Σχεδιασμός Διαδρομής και Πακέτο Route Network

Χρησιμοποιώντας τα σημεία που δόθηκαν για την εκάστοτε αποστολή μέσω του RVIZ και με τη χρήση των κόμβων `route_network`, `viz_route`, `plan_route` και `rviz_goal` γίνεται η διαδικασία επιλογής της πιο σύντομης διαδρομής. Επιλέγοντας τον αλγόριθμο A* [23] δημιουργείται ένα μήνυμα ROS το οποίο έχει όλες τις ακμές και τις κορυφές της διαδρομής που το ρομποτικό όχημα θα τεθεί να ακολουθήσει. Στο Σχήμα 4.17 με λευκό χρώμα φαίνεται η τελική απεικόνιση στο RVIZ της διαδρομής, καθώς και οι ανοιχτοί κόμβοι που χρειάστηκαν να είναι ενεργοί κατά τη συγκεκριμένη διαδικασία.



Σχήμα 4.17: Συντομότερη διαδρομή στο RVIZ

4.2.7 Έλεγχος Κίνησης (Motion control)

Βασικός κόμβος για το αυτόνομο ρομποτικό όχημα είναι αυτός του ελέγχου κίνησης (motion_controller). Ο συγκεκριμένος κόμβος έπειτα από την ανάγνωση των σημείων της διαδρομής που πρέπει να ακολουθήσει, των δεδομένων της πυξίδας που φέρει και της γεωγραφικής του θέσης, είναι υπεύθυνος για την δημιουργία του μηνύματος με τις τιμές που θα χρησιμοποιήσει ο κόμβος ελέγχου κίνησης των ηλεκτροκινητήρων. Οι τιμές αυτές υπολογίζονται συνεχώς και σε πραγματικό χρόνο, βρίσκοντας την γωνία μεταξύ της θέσης του σχήματος και του εκάστοτε σημείου της διαδρομής ως προς τον βορρά, έως ότου η απόσταση του οχήματος και του σημείου έρθει στο επιθυμητό όριο. Έπειτα, συνεχίζει με την εύρεση της απόστασης και της γωνίας του επομένου σημείου, έως ότου βρεθεί στο σημείο τερματισμού.

Τέλος, διαβάζοντας τα δεδομένα των αισθητήρων απόστασης που έχει στο μπροστινό, δεξιό και αριστερό μέρος του, το ρομποτικό όχημα δυναμικά αποφεύγει τυχόν εμπόδια που θα εμφανιστούν στην διαδρομή του με περιστροφή 90° και κίνηση του οχήματος προς περιοχή που δεν είναι κατειλημμένη. Ταυτόχρονα, δυναμικά προσαρμόζει την γωνία στην οποία κινείται, όταν πλησιάζει τυχόν εμπόδια στο αριστερό ή δεξιό μέρος του. Κατά την διάρκεια των δοκιμών η λειτουργία αυτή βελτιώνει την πλοήγηση του οχήματος που λόγω των αποκλίσεων της γεωγραφικής του θέσης, αλλά και αποκλίσεων του χάρτη, συναντούσε πλευρικά εμπόδια του δρόμου, όπως το πεζοδρόμιο. Στο Σχήμα 4.18 παρουσιάζεται το αυτόνομο ρομποτικό όχημα κατά την διάρκεια των δοκιμών σε εξωτερικό χώρο.



Σχήμα 4.18: Δοκιμή κόμβου ελέγχου κίνησης σε εξωτερικό χώρο

4. Η ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΠΟΥ ΑΚΟΛΟΥΘΗΘΗΚΕ

4.2.8 Αυτοματοποίηση Εκκίνησης Κόμβων μέσω Script

Στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν δημιουργήθηκε η ανάγκη αυτοματοποίησης της διαδικασίας εκκίνησης όλων των κόμβων, αλλά και του ασύρματου τοπικού δικτύου. Έτσι δημιουργήθηκε ένα script, με μορφή όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 4.19, σειριακής εκκίνησης των κόμβων με τις απαιτούμενες παραμέτρους.

```
press 0 for export ros ip and master uri to 192.168.0.120
press 1 for catkin_make on catkin_ws_xokias
press 2 for roscore,usb_cam node, ar_tag_toolbox node,screen and MAVROS rover-drone
press 3 for 2 but with no viewer
press 4 to rosrune node parking
press 5 to rosrune node lcd
press 6 to rosrune node mavros_rover
press 7 to rosrune node mavros_drone
press 8 to rosrune nodes: state_controller and motor_controller
press 9 to rosrune nodes: motion_controller and object_avoidance
press 10 to pathplanning proc
press 11 to pathplanning proc after rviz
press 12 to rosrune rviz_goal
press 13 to open a terminal on raspberry
press 14 to open node remote_control
press 15 to grepros
press 16 to EXIT

give your choice: 
```

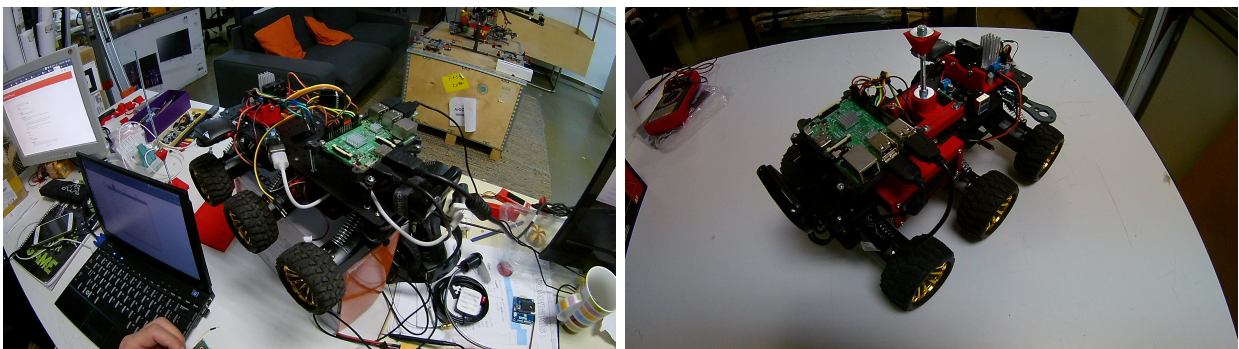
Σχήμα 4.19: Μενού εκκίνησης κόμβων

Κεφάλαιο 5

Αποτελέσματα

Για την επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας έγιναν δοκιμές τόσο σε εσωτερικό όσο και σε εξωτερικό περιβάλλον. Στο εσωτερικό περιβάλλον, λόγω έλλειψης του σήματος GNSS, δοκιμάστηκαν κάποια μόνο επιμέρους κομμάτια κώδικα, πιο συγκεκριμένα αρχικά έγιναν δοκιμές για τη σωστή επικοινωνία του Raspberry Pi, και των δυο ελεγκτών πτήσης που ήταν κομβικό σημείο για επίλυση συνεργατικών αποστολών. Ενώ στην συνέχεια, έγιναν δοκιμές για την σωστή λειτουργία των ηλεκτροκινητήρων, για το πως μπορεί να κινηθεί το ρομποτικό όχημα σε χειροκίνητη λειτουργία μέσω τηλεχειριστηρίου, αλλά και για το πως σε πρώτο στάδιο μπορεί να κινηθεί αυτόνομα.

Λόγω του πλήθους των μηνυμάτων ROS σε εσωτερικό χώρο, έγινε έλεγχος της σωστής χρήση των μηνυμάτων, αλλά και του συγχρονισμού τους, καθώς το επίγειο όχημα κατέχει τον κυρίαρχο ρόλο των συνεργατικών αποστολών. Τέλος, δοκιμάστηκαν και οι διαφόρων τύπων αισθητήρες που τοποθετήθηκαν πάνω στο επίγειο όχημα. Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται το αυτόνομο ρομποτικό όχημα κατά την περίοδο των εσωτερικών δοκιμών.



Σχήμα 5.1: Αυτόνομο ρομποτικό όχημα κατά την περίοδο των εσωτερικών δοκιμών

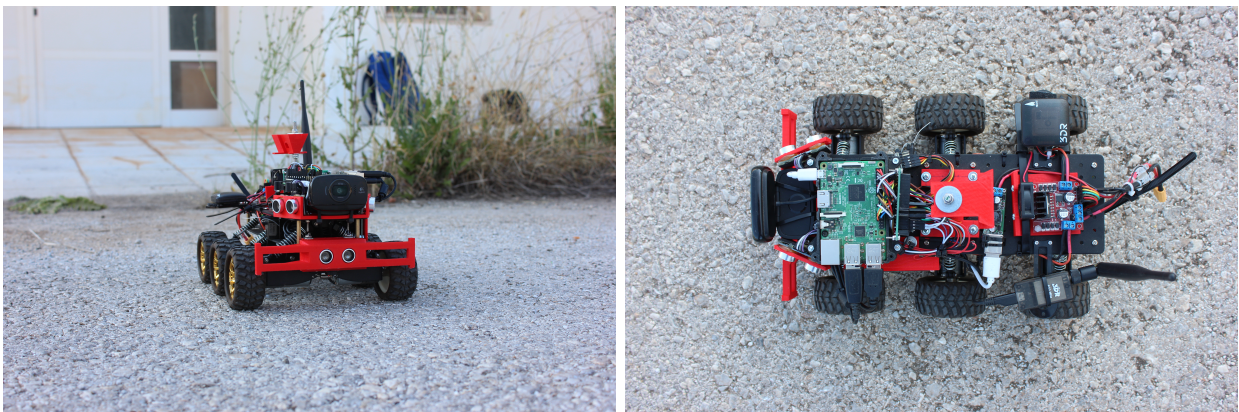
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σε εξωτερικό περιβάλλον δοκιμάστηκε η πλήρης λειτουργία του συστήματος, καθώς και ένα πλήθος αποστολών, όπου εξετάστηκε η σωστή επικοινωνία των δυο οχημάτων (του εναέριου και επίγειου), η αυτόνομη πλοήγηση του επίγειου οχήματος και η κατασκευή χαρτών από αυτό.

5.1 Τελική Μορφή του Αυτόνομου Οχήματος

Έπειτα από ένα πλήθος αλλαγών στο σχεδιασμό και στην κατανομή των εξαρτημάτων του οχήματος, η τελική μορφή βοήθησε στην αποδοτικότερη χρήση του χώρου του αυτόνομου οχήματος.

Ακόμα, μετά την αλλαγή του οδηγού κίνησης των ηλεκτροκινητήρων, το αυτόνομο ρομποτικό όχημα είχε πλέον την δυνατότητα να κινείται σε αρκετά πιο δύσβατες περιοχές σε σύγκριση με τον αρχικό. Το συγκεκριμένο πρόβλημα επιλύθηκε κατά αυτόν τον τρόπο μετά από αρκετή έρευνα και δοκιμή διαφορετικών τεχνικών. Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται η τελική μορφή του αυτόνομου ρομποτικού οχήματος.



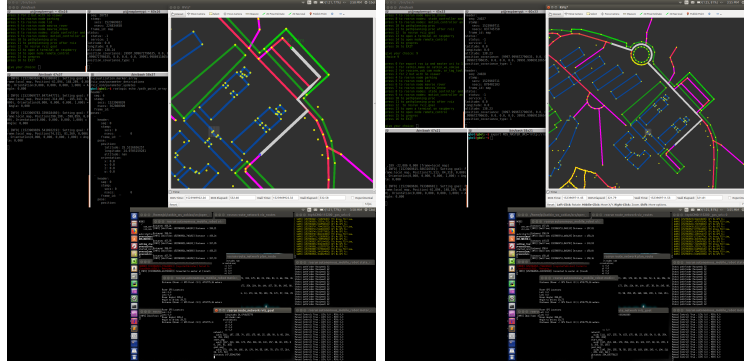
Σχήμα 5.2: Αυτόνομο ρομποτικό όχημα

5.2 Αυτόνομη Πλοήγηση

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, κεντρικός στόχος της παρούσας διπλωματικής ήταν η αυτόνομη πλοήγηση του οχήματος. Στο σημείο αυτό πραγματοποιήθηκε ένα μεγάλο πλήθος δοκιμών, τόσο σε εσωτερικό, όσο και σε εξωτερικό περιβάλλον. Το αποτέλεσμα των δοκιμών αυτών ήταν η δημιουργία ενός σταθερού συστήματος, το οποίο έχει την δυνατότητα, δίνοντας ένα αρχικό σημείο και ένα σημείο

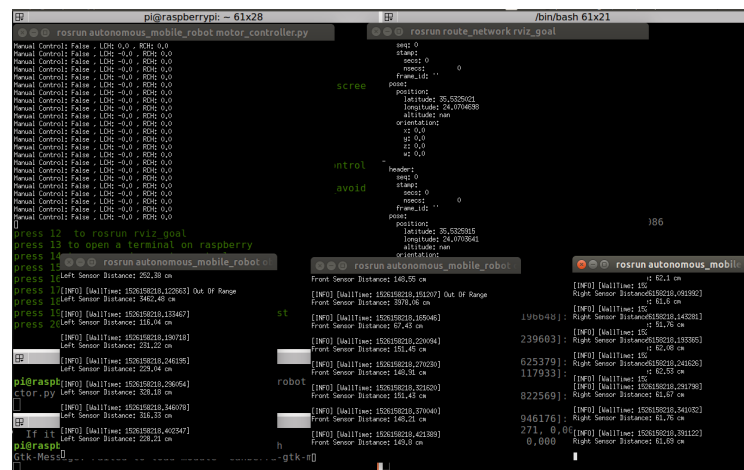
5.2 Αυτόνομη Πλοήγηση

τερματισμού, να οδηγηθεί αυτόνομα ελαχιστοποιώντας το ενδεχόμενο πρόσκρουσης του σε τυχόν εμπόδια που δεν ήταν στον αρχικό χάρτη που του είχε δοθεί. Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζονται κάποιες από τις διαδρομές που δοκιμάστηκαν σε εξωτερικό χώρο καθώς και οι ανοιχτοί κόμβοι του συστήματος.



Σχήμα 5.3: Διαδρομές που δοκιμάστηκαν σε εξωτερικό χώρο

Κατά την διάρκεια των δοκιμών από οποιοδήποτε άλλο σύστημα με ROS, υπήρχε η δυνατότητα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο των μηνυμάτων, των κόμβων, αλλά και της κατάστασης της μνήμης και του επεξεργαστή του Raspberry Pi. Στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζονται οι ανοιχτοί κόμβοι που τρέχουν στο ενσωματωμένο σύστημα.

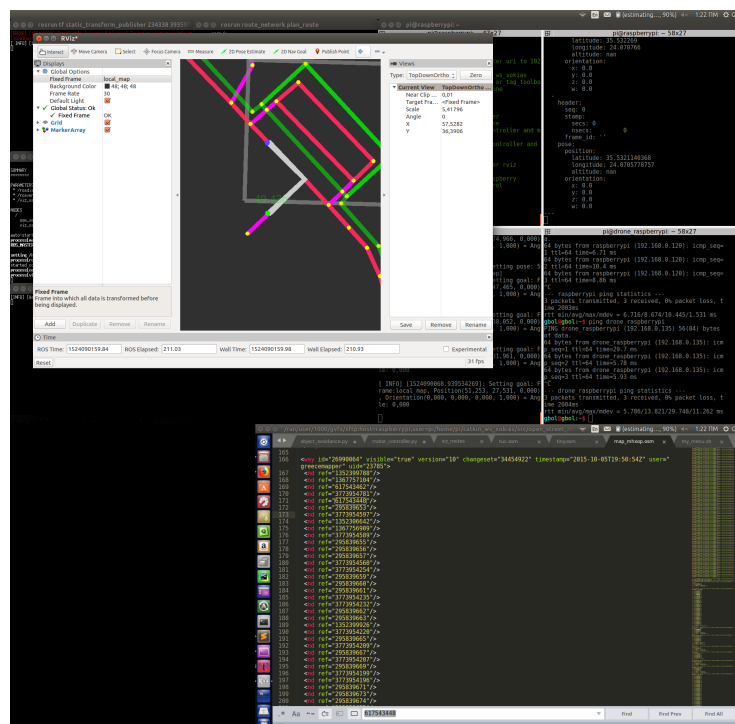


Σχήμα 5.4: Ανοιχτοί κόμβοι κατά την διάρκεια των δοκιμών

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.3 Δημιουργία Νέου Χάρτη

Στην συνέχεια ένα εξίσου σημαντικό μέρος της διπλωματικής εργασίας ήταν η δημιουργία νέων χαρτών για τις περιοχές που δεν είναι χαρτογραφημένες, αλλά και για περιοχές που χρειάζονται διορθώσεις ή προσθήκες. Η συγκεκριμένη διαδικασία εκτελείται μέσω του τηλεχειριστηρίου, θέτοντας αρχικά κάποια σημεία ως κόμβους και έπειτα θέτοντας σύνολα κόμβων ως ακμές. Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται ένας καινούργιος χάρτης που δημιουργήθηκε για την περιοχή του πάρκινγκ της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, καθώς και η μορφή του αρχείου που δημιουργείται.

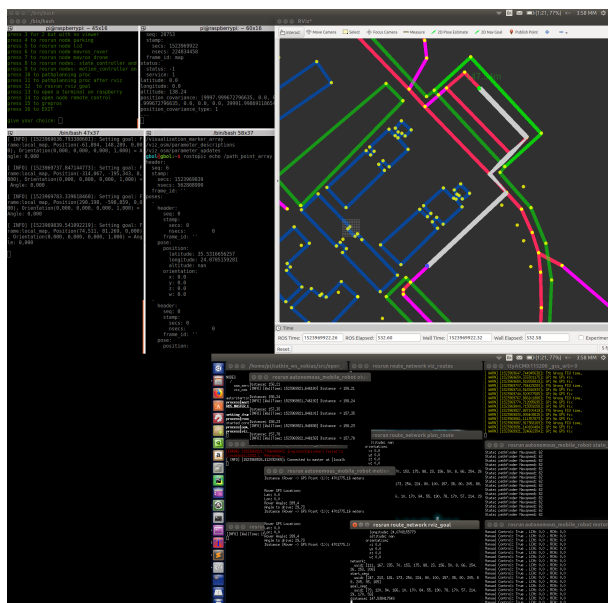


Σχήμα 5.5: Δημιουργία νέου χάρτη

5.4 Συνεργατική Αποστολή

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια, το μη επανδρωμένο επίγειο όχημα που κατασκευάστηκε θα έχει την δυνατότητα μεταφοράς του από το 6-κόπτερο μη επανδρωμένο εναέριο όχημα που ήταν στην διάθεσή μας. Με το σύστημα σύζευξης-αποσύζευξης, αλλά και περαιτέρω προγραμματισμό του επίγειου οχήματος, που υλοποιήθηκε στην διπλωματική εργασία του φοιτητή της σχολής ΗΜΜΥ Χόκια Κων/νου,

εξετάστηκε ένα πλήρες σενάριο αποστολής. Η συγκεκριμένη αποστολή περιλαμβάνει μετακίνηση του UGV από το UAV, απόθεση σε κάποιο χώρο, αυτόνομη πλοήγηση του UGV καταγράφοντας δεδομένα θερμοκρασίας και υγρασίας και τέλος, επανασύνδεση με το UAV. Στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζεται ο χάρτης με την διαδρομή που διένυσε το αυτόνομο όχημα με επιτυχία, συλλέγοντας ταυτόχρονα δεδομένα καθ'όλη τη διάρκεια της πλοήγησης.



Σχήμα 5.6: Διαδρομή που ακολουθήθηκε στο RVIZ

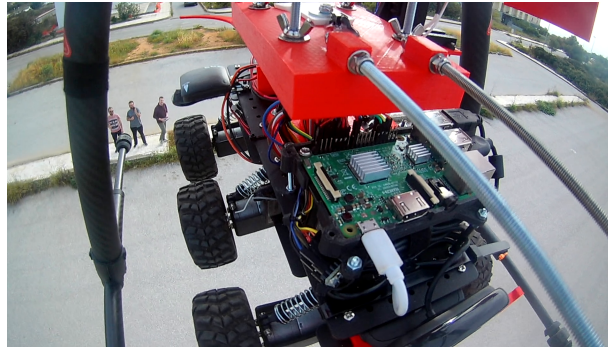
Στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζεται η τελική προσέγγιση και σύζευξη των δύο οχημάτων, αφού ολοκληρώθηκε η αποστολή του αυτόνομου ρομποτικού οχήματος.



Σχήμα 5.7: Προσέγγιση και σύζευξη του UGV με το UAV

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

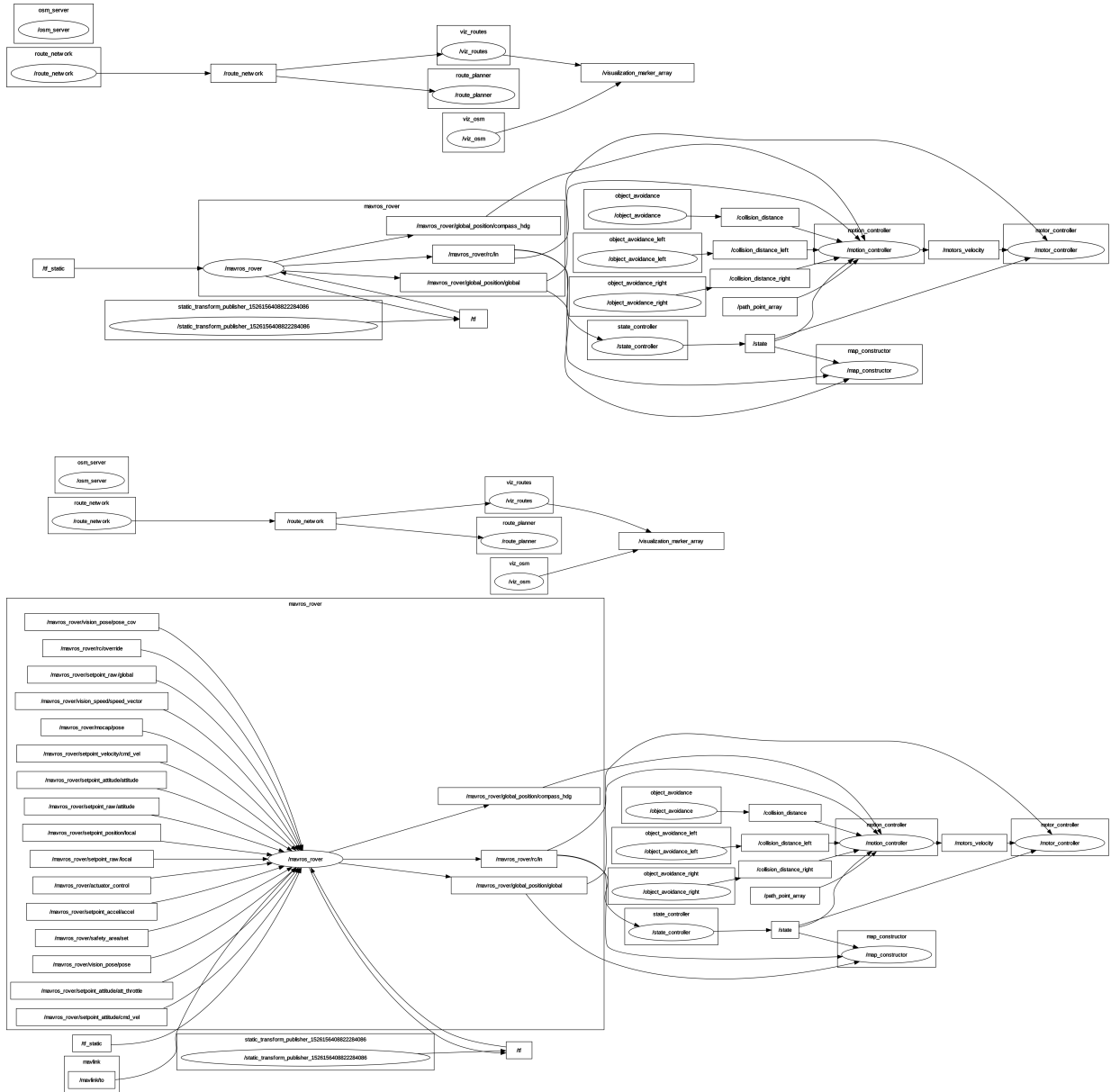
Τέλος, στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζεται η μεταφορά του UGV από το UAV. Η επίτευξη της μεταφοράς αυτής επιβεβαιώνει την θεωρητική έρευνα που είχε προηγηθεί και σε ρεαλιστικό επίπεδο.



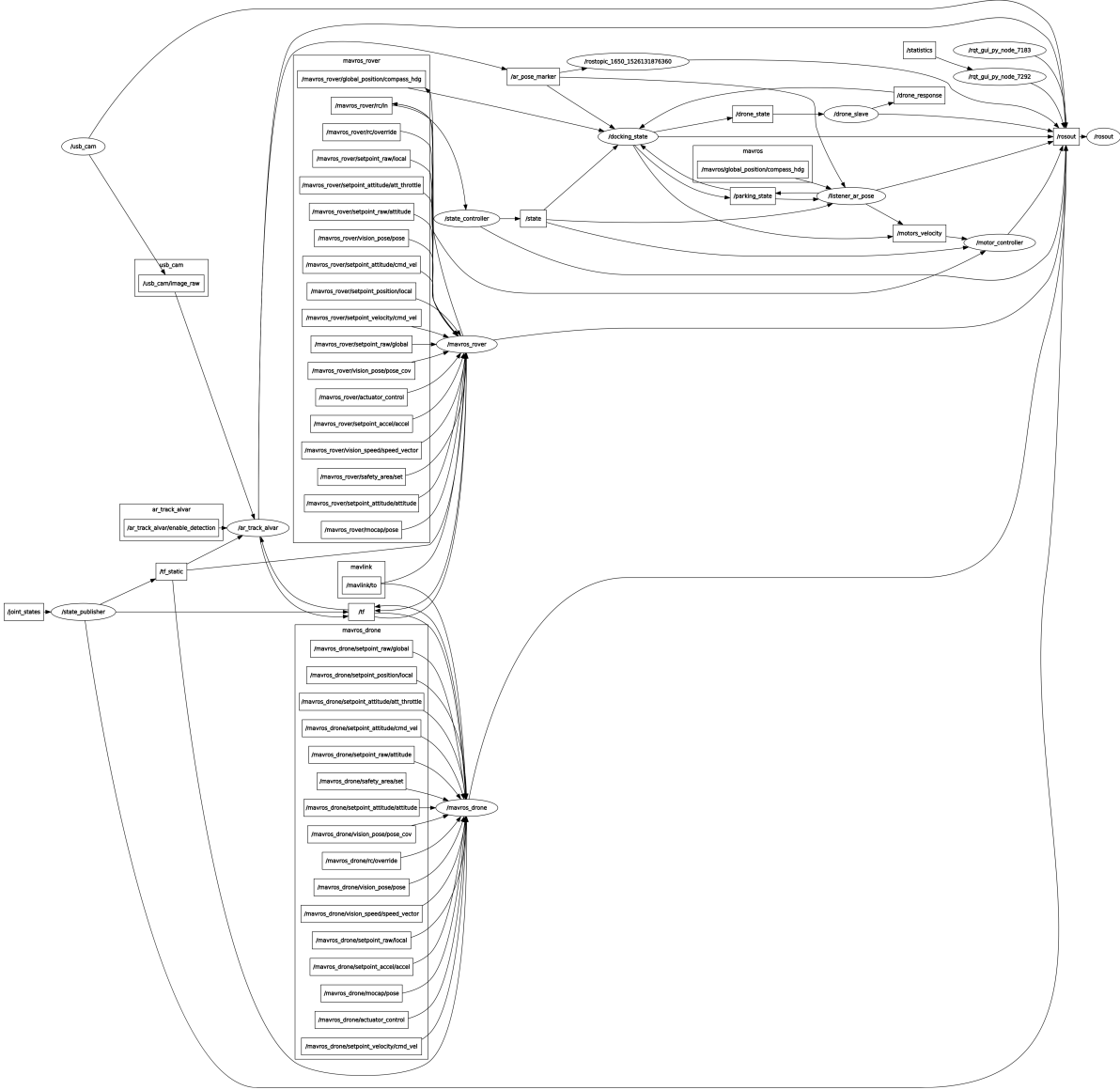
Σχήμα 5.8: Μεταφορά του UGV από το UAV

5.5 RQT Graph

Για τον έλεγχο της σωστής σύνδεσης των κόμβων και των μηνυμάτων που δημιουργούνται, γίνεται η χρήση του rqt graph, εργαλείο που προσφέρει την γραφική αναπαράσταση των κόμβων με τα μηνύματά τους. Στο Σχήμα 5.9 που ακολουθεί, εύκολα διακρίνεται το πλήθος των ανοιχτών κόμβων, καθώς και όλων των μηνυμάτων που απαιτούνται για την υλοποίηση της διπλωματικής εργασίας, ενώ στο Σχήμα 5.10, φαίνεται επιπλέον και η ανταλλαγή μηνυμάτων του UGV με το UAV.



Σχήμα 5.9: Γράφος RQT κατά την διάρκεια της αυτόνομης πλοήγησης



Σχήμα 5.10: Γράφος RQT επικοινωνίας των δύο οχημάτων

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

Σε σχέση με τον αρχικό στόχο και έπειτα από ένα μεγάλο αριθμό δοκιμών και αλλαγών η παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώθηκε με επιτυχία. Ο μεγάλος αυτός αριθμός δοκιμών και αλλαγών οδήγησε σε μια ρεαλιστική επίλυση του προβλήματος, τόσο της κατασκευής ενός επίγειου οχήματος που κινείται αυτόνομα, όσο και της δυνατότητας συνεργατικών αποστολών με άλλα αυτόνομα οχήματα.

Η πλατφόρμα που δημιουργήθηκε δίνει την δυνατότητα και σε επόμενους φοιτητές να εμπνευστούν και να χρησιμοποιήσουν το υλοποιημένο σύστημα και να δημιουργήσουν λύσεις για ένα μεγάλο αριθμό αποστολών. Με γνώμονα αυτό η πλατφόρμα θα παραμείνει στο Εργαστήριο Γεωδαισίας και Γεωπληροφορικής του Πολυτεχνείου Κρήτης και μπορεί να αποτελέσει σημείο αναφοράς για περαιτέρω εξέλιξη και εφαρμογές άλλων δραστηριοτήτων στα αντικείμενα Μηχανικών.

Τα κύρια συμπεράσματα από την υλοποίηση που πραγματοποιήθηκε είναι αρχικά η χρησιμότητα του ROS που παρέχει μια πληθώρα εργαλείων για την επίλυση πολλών προβλημάτων που μπορεί να αντιμετωπίσει ένα ρομποτικό σύστημα. Επιπλέον, το γεγονός ότι η διπλωματική εργασία έγινε σε πλήρως ρεαλιστικές συνθήκες και όχι σε προσομοίωση, οδήγησε στην καλύτερη κατανόηση των επιμέρους προβλημάτων, αλλά και στην επίλυση των περισσότερων από αυτά.

Επιπροσθέτως, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης, παρά τα προβλήματα που αντιμετωπίσαμε στο σχεδιαστικό μέρος, αλλά και στην εύρεση βέλτιστης σχεδίασης, έτσι ώστε να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις, αποκτήθηκε ένα μεγάλο εύρος γνώσης στον τομέα αυτό.

Ο χρόνος εκπόνησης της εργασίας αυτής και η ενασχόλησή μου με ρομποτικά συστήματα αποτέλεσε αστείρευτη πηγή γνώσης και μάθησης, τόσο στο θεωρητικό επίπεδο των τεχνικών της πλοήγησης, όσο και στο τεχνικό υπόβαθρο της ανάπτυξης της συγκεκριμένης μελέτης και υλοποίησης. Η ασταμάτητη επαφή με την υλοποίηση βέλτιστων αλγορίθμων, αλλά και ο τρόπος μοντελοποίησης της τεχνικής αυτής με τροφοδότησαν με σημαντική εμπειρία και γνώση, τόσο στην ανάπτυξη ενός επίγειου οχήματος,

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

όσο και στον τρόπο αντιμετώπισης των επιμέρους τεχνικών που απαιτούνται για την επίλυση του συνολικού προβλήματος της αυτόνομης πλοήγησης.

Τέλος, η υλοποίηση της συγκεκριμένης εργασίας μου έδωσε την δυνατότητα να μελετήσω ένα γνωστικό αντικείμενο που μέχρι στιγμής μόνο επιφανειακά γνώριζα. Η μελέτη των τεχνικών πλοήγησης ρομποτικών συστημάτων είναι ένα κεφάλαιο που πολλά χρόνια με ενδιέφερε, αλλά ποτέ δεν μου είχε δοθεί η ευκαιρία να ασχοληθώ συστηματικά.

6.1 Αναβάθμιση Εξοπλισμού και Επέκταση του Συστήματος

Ενδιαφέρον θα είχε η εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθοδολογίας και η τροποποίηση των αλγορίθμων για εφαρμογή σε δυναμικά περιβάλλοντα. Αυτό απαιτεί επιπλέον ανάπτυξη του λογισμικού, ώστε ανά πάσα χρονική στιγμή ο αλγόριθμος αναζήτησης μονοπατιού να αναθεωρεί τον περιβάλλοντα χώρο για να μπορεί να προβλέπει με ακρίβεια τον τρόπο που θα προσεγγίσει τον τελικό προορισμό. Όπως επίσης και η ανάπτυξη αντιστοίχων αλγορίθμων χαρτογράφησης (mapping) και εντοπισμού (localization), όπου το ρομπότ δεν γνωρίζει τίποτα για το περιβάλλον εργασίας του, αλλά διαθέτει όλα τα αισθητήρια όργανα (sonars, laser scanners) για να το εξερευνήσει και να το αποτυπώσει. Η εφαρμογή όλων των παραπάνω απαιτεί επιπλέον μεθοδολογίες ανάπτυξης και ελέγχου του ρομποτικού οχήματος ανά πάσα χρονική στιγμή, ώστε να γνωρίζουμε την ακριβή του θέση μέσα σε ένα περιβάλλοντα χώρο, αλλά και την αντίληψη-μάθηση για την εξερεύνηση του αγνώστου. Η ανάπτυξη των παραπάνω αλγορίθμων με την βοήθεια των αντιστοίχων αισθητηρίων και μεθοδολογιών θα αποτελέσει ένα ολοκληρωμένο πρωτότυπο πλήρως αυτόνομο ρομποτικό όχημα. Η ανάπτυξη ενός τέτοιου ρομποτικού συστήματος απαιτεί σημαντική ερευνητική μελέτη και ανάπτυξη περαιτέρω μεθόδων και τεχνικών πλοήγησης.

Μελλοντικά, θα μπορούσε επίσης να γίνει μετατροπή του υπάρχοντος εξοπλισμού, για την προσθήκη της δυνατότητας μεταφοράς ενός εναέριου οχήματος από το επίγειο. Η μετατροπή αυτή θα έδινε επιπλέον λειτουργίες στο παρόν σύστημα. Κάποιες από αυτές, θα μπορούσαν να είναι η μεταφορά του εναέριου οχήματος για εξοικονόμηση ενέργειας, καθώς τα επίγεια οχήματα καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια. Ενώ ακόμα θα μπορούσε το επίγειο όχημα να μπορεί να φορτίσει το εναέριο.

6.2 Μελλοντικές Πιθανές Αποστολές

Οι επιμέρους αποστολές που μπορούν να πραγματοποιηθούν όπως έχουμε επισημάνει είναι αρκετές. Ενδεικτικά κάποιες από αυτές θα μπορούσε να είναι η μεταφορά του UGV σε τάρτσες κατοικιών για την χαρτογράφηση τους. Με αυτόν τον τρόπο η πρόβλεψη για την μεταφορά του οχήματος αποκτά μεγάλη σημασία, καθώς σε αντίθετη περίπτωση θα έπρεπε κάποιος άνθρωπος να κάνει τις μεταφορές αυτές, κάτι αποτρεπτικό σε μια μεγάλη πόλη.

Ακόμα μια άλλη πρόταση είναι η τροποποίηση των υπάρχοντων μέσων και η μετατροπή τους για συνεργατικές αποστολές μεταξύ παραπάνω του ενός UGV και παραπάνω του ενός UAV.

Κλείνοντας, η τοποθέτηση ανεμόμετρου σε ένα επίγειο και σε ένα εναέριο αυτόνομο όχημα δίνει τη δυνατότητα ταυτόχρονης μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου στην κορυφή και στη βάση μιας ανεμογεννήτριας και της επανάληψης της διαδικασίας σε ένα μεγάλο αιολικό πάρκο για όλες τις ανεμογεννήτριες. Η μετατροπή αυτή θα αποτελούσε χρήσιμο εργαλείο στον τομέα των εναλλακτικών πηγών ενέργειας και συγκεκριμένα στο τομέα των ανεμογεννητριών.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Βιβλιογραφία

- [1] ROS <http://wiki.ros.org/>
- [2] Siciliano, B. and Sciavicco, L. and Villani, L. and Oriolo, G. *"Robotics: Modelling, Planning and Control"*, Springer London (2008)
- [3] GLONASS <https://www.glonass-iac.ru/en/>
- [4] GALILEO <https://galileognss.eu/>
- [5] Thrun, S. and Burgard, W. and Fox, D. and Arkin, R.C. *"Probabilistic Robotics"*, MIT Press (2005)
- [6] Wang, Z. and Dissanayake, G. and Huang, S. *"Simultaneous Localization and Mapping: Exactly Sparse Information Filters"*, World Scientific (2011)
- [7] Berns, K. and Puttkamer, E. *"Autonomous Land Vehicles: Steps towards Service Robots"*, Vieweg+Teubner Verlag (2010)
- [8] Τζαφέστας Σπύρος Γ. *"Ρομποτική: ανάλυση, έλεγχος, σχεδιασμός, προγραμματισμός, αίσθηση"*, (2003)
- [9] Dijkstra, E.W. *"A note on two problems in connection with graphs"*, Numerische Mathematik 1 (1959) σελ. 269-271
- [10] Dr. Jeffrey J. Gosper, Floyd-Warshall *"All-Pairs Shortest Pairs Algorithm"*, Brunel University (1998)
- [11] Hart, E.P., Nilsson, J.N., Bertram R. *"A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths"*. IEEE Transactions on System Science and Cybernetics, vol. 4, (1968) σελ.100-107

Βιβλιογραφία

- [12] K. Usher, *"Obstacle avoidance for a nonholonomic vehicle using occupancy grids"*, Autonomous Systems Laboratory, CSIRO ICT Centre, P.O. Box 883, Kenmore, Qld 4069, Australia
- [13] J. Mirtich and y. Canny, *"Using Skeletons for Nonholonomic Path Planning among Obstacles"*, Computer Science Division University of California Berkeley, CA 94720.
- [14] Gerstner, Wulfram and L. Abbott, *"Learning Navigational Maps through Potentiation and Modulation of Hippocampal Place Cells, Journal of Computational Neuroscience"*, (1996)
- [15] H. Tanner, S. Loizou and K. Kyriakopoulos, *"Nonholonomic Stabilization with Collision Avoidance for Mobile Robots"*, Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Maui, Hawaii, USA, Vol. 3, pp. 1220-1225, (2001)
- [16] D. Fox, W. Burgard, and S. Thrun. *"The dynamic window approach to collision avoidance"*. In: IEEE Robotics Automation Magazine 4.1 (1997), pp. 23–33
- [17] Clearpath robotics <https://clearpathrobotics.com/>
- [18] UAV/UGV Air-Ground Collaboration <https://www.ri.cmu.edu/project/uav-ugv-air-ground-collaboration/>
- [19] Spider Pig <http://www.fregu856.com/project/spiderpig/>
- [20] Ardupilot <https://ardupilot.org/>
- [21] G. Carrara and S. Gardella and M. Marchesoni and R. Salutari and G. Sciutto *"A new multilevel PWM method: a theoretical analysis"*. English
- [22] Open Street Map - OSM <https://www.openstreetmap.org/>
- [23] J. Yao and C. Lin and X. Xie and A. J. Wang and C. Hung *"Path Planning for Virtual Human Motion Using Improved A* Star Algorithm"*. Seventh International Conference on Information Technology: New Generations. English (2010)