

Αυτόνομη Συνεργατική Εξερεύνηση με Πολλαπλά Ρομπότ βάσει Τεχνητών Αρμονικών Πεδίων



Δημοσθένης Καναβός

Τομέας Σημάτων, Ελέγχου και Ρομποτικής
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Διπλωματική εργασία για το πτυχίο του
Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών

Επιβλέπων Χαράλαμπος Ψυλλάκης
Δεύτερος Επιβλέπων Νεκτάριος Κοζύρης
Τρίτος Επιβλέπων Κωνσταντίνος Κυριακόπουλος

Σεπτέμβριος, 2021

Ευχαριστίες

Ξεκινώντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ.Κωνσταντίνο Κυριακόπουλο για την ευκαιρία που μου έδωσε να εργαστώ στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Χαράλαμπο Μπεχλιούλη για την πολύτιμη καθοδήγηση που μου παρείχε, καθ' όλη την περίοδο εκπόνησης της εργασίας μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συνεργάτες, Παναγιώτη Ρουσσέα και Κωνσταντίνο Αλεβίζο, για την βοήθεια και τις συμβουλές τους, αλλά και όλες τις ενδιαφέρουσες συζητήσεις που είχαμε στο εργαστήριο.

Περίληψη

Ο βασικός στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η πειραματική επαλήθευση της αυτόνομης εξερεύνησης βάσει Αρμονικών Πεδίων Δυναμικού με τη μέθοδο Fast Multipole Boundary Element Method, σε πραγματικό περιβάλλον, με πραγματικά ρομπότ.

Στη συνέχεια προχωράμε στην επέκταση του αλγορίθμου εξερεύνησης, ώστε αυτός να υποστηρίζει την συνεργατική εξερεύνηση από ομάδα ρομπότ, μία μέθοδος η οποία, όπως ήταν αναμενόμενο, μειώνει δραματικά τον χρόνο εξερεύνησης.

Για την εκτέλεση των πειραμάτων χρειάστηκε η επισκευή και εκ νέου ρύθμιση, μερικών εκ των ρομπότ του εργαστηρίου.

Λίστα Πινάκων

2.1	Τα χαρακτηριστικά του Pioneer 3-DX.	9
2.2	Τα χαρακτηριστικά του Hokuyo UST-10LX.	11
2.3	Οι τιμές του χάρτη πληρότητας.	12
3.1	Τα χαρακτηριστικά του SUMMIT-XL.	25
3.2	Ο τελεστής συγχώνευσης $\hat{\oplus}$	29
4.1	Οι συνολικοί χρόνοι εξερεύνησης για 1 ρομπότ.	38
4.2	Οι συνολικοί χρόνοι εξερεύνησης για 3 ρομπότ.	39

Λίστα Σχημάτων

1.1	Μερικές εφαρμογές της ρομποτικής εξερεύνησης	2
1.2	Πλοήγηση βάσει Αρμονικών Πεδίων Δυναμικού-HPF	4
2.1	Το Pioneer 3-DX της Adept.	9
2.2	Οι διαστάσεις του Pioneer 3-DX	10
2.3	Το ODROID-XU3 της Hardkernel.	10
2.4	Σάρωση με το Hokuyo UST-10LX	11
2.5	Ένα παράδειγμα ΤΧΕΘ μέσω του πακέτου gmapping.	12
2.6	Εξαγωγή των συνόρων ∂E_O και ∂E_F	14
2.7	Παράδειγμα διάσπασης quadtree	17
2.8	Απαιτούμενοι υπολογισμοί για τις 2 μεθόδους	18
2.9	Η γωνία θ που σχηματίζει ο άξονας X του ρομπότ ως προς το gradient του πεδίου δυναμικού στη συγκεκριμένη θέση του χώρου.	19
2.10	Οι ταχύτητες v, v_R, v_L και ω	20
3.1	Συνεργασία - Από τη φύση στην τεχνολογία	22
3.2	Συνεργατική Εξερεύνηση	23
3.3	Τριάδα από ρομπότ εξερευνά το υπόγειο του κτηρίου M.	24
3.4	Το SUMMIT-XL της Robotnik.	25
3.5	Οι συσκευές του δικτύου ROS.	26
3.6	Παράδειγμα με ευθυγραμμισμένα ρομπότ.	27
3.7	Τοποθέτηση εικονικού εμποδίου στις θέσεις των ρομπότ-συνεργατών	30
4.1	Ο χώρος της προσομοίωσης για ένα ρομπότ.	31
4.2	Προσομοίωση σε χώρο γραφείου με ένα ρομπότ.	32
4.3	Προσομοίωση σε χώρο γραφείου με ένα ρομπότ. (συνέχεια)	33
4.4	Ο χώρος της προσομοίωσης για 3 ρομπότ.	34
4.5	Οι 3 τοπικοί χάρτες και ο συνολικός.	35
4.6	Ο χώρος του πειράματος με τις θέσεις εκκίνησης.	36
4.7	Δοκιμές για κάθε μία από τις 3 θέσεις εκκίνησης.	37
4.8	Οι χάρτες του ρομπότ A.	38

4.9	Οι χάρτες του ρομπότ Β.	38
4.10	Οι χάρτες του ρομπότ Γ.	39
4.11	Σύγκριση χρόνων εξερεύνησης για τις 2 μεθόδους.	39

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Διατύπωση Προβλήματος	1
1.2	Ανασκόπηση Σχετικής Βιβλιογραφίας	3
1.3	Συνεισφορά	6
1.4	Δομή Διπλωματικής Εργασίας	7
2	Εξερεύνηση βάσει Τεχνητών Αρμονικών Πεδίων	8
2.1	Εισαγωγή	8
2.2	Υλοποίηση	9
2.2.1	Ρομπότ	9
2.2.2	Αντίληψη-Σάρωση	11
2.2.3	Ταυτόχρονη Χαρτογράφηση και Εντοπισμός Θέσης	12
2.2.4	Εξαγωγή Συνόρου	13
2.2.5	Υπολογισμός Πεδίου Δυναμικού	15
2.2.6	Έλεγχος προσανατολισμού	19
3	Συνεργατική Εξερεύνηση	21
3.1	Εισαγωγή	21
3.1.1	Συστήματα Πολλαπλών Ρομπότ	21
3.1.2	Εξερεύνηση Πολλαπλών Ρομπότ	23
3.2	Υλοποίηση	25
3.2.1	Ρομπότ	25
3.2.2	Αρχιτεκτονική ROS	26
3.2.3	Συγχώνευση χαρτών	27
3.2.4	Αποφυγή συγκρούσεων	30
4	Αποτελέσματα	31
4.1	Προσομοιώσεις	31
4.2	Πειράματα	36
5	Συμπεράσματα	40

5.1	Αποτίμηση	40
5.2	Δυσκολίες	41
5.3	Μελλοντικές Επεκτάσεις	42

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

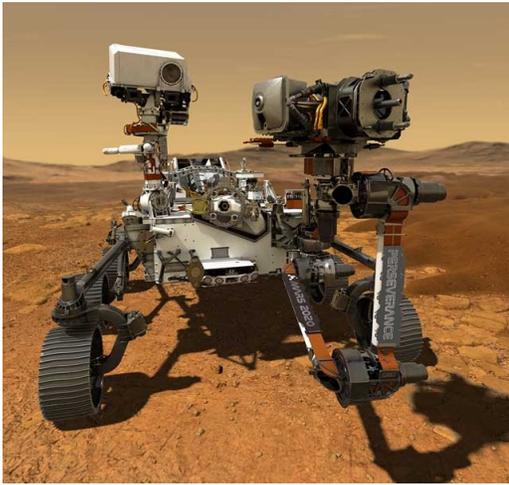
1.1 Διατύπωση Προβλήματος

Το πρόβλημα το οποίο πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία είναι αυτό της **Αυτόνομης Ρομποτικής Εξερεύνησης**.

Η γενική μορφή του προβλήματος περιλαμβάνει ένα ρομποτικό όχημα, το οποίο πλοηγείται αυτόνομα σε έναν άγνωστο χώρο, έχοντας ως στόχο την πλήρη χαρτογράφηση αυτού, με τη χρήση ενός ή περισσότερων αισθητήρων απόστασης.

Η αυτόνομη ρομποτική εξερεύνηση στις μέρες μας συναντάται, από τις πιο απλές, καθημερινές εφαρμογές, ως και στις πιο απαιτητικές και εξεζητημένες. Από τις αποστολές εξερεύνησης στον πλανήτη Άρη (Σχήμα 1.1i) ή την χαρτογράφηση περιοχών, αφιλόξενων για τους ανθρώπους (ηφαίστεια, ναυάγια, πυρηνικά ατυχήματα), έως τις αυτόνομες ηλεκτρικές σκούπες (Σχήμα 1.1ii), έχουμε ρομπότ που εξερευνούν τον περιβάλλοντα χώρο τους, χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση-εντολή.

Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, τα ρομπότ λαμβάνουν πληροφορίες από τον χώρο γύρω τους και με βάση αυτές, καταστρώνουν ένα σχέδιο πλοήγησης μέσα σε αυτό το περιβάλλον. Αυτό το σχέδιο πλοήγησης πρέπει πάντα να εξασφαλίζει την ασφάλεια του ρομπότ, αποφεύγοντας συγκρούσεις ή περιοχές στις οποίες το ρομπότ, θα μπορούσε να εγκλωβιστεί. Επιπλέον θα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι καθ' όλη τη διάρκεια της πλοήγησης, οι εντολές κίνησης δεν υπερβαίνουν των δυνατοτήτων των ενεργοποιητών και σέβονται τους κινηματικούς περιορισμούς του ρομπότ.



(i) Το αυτόνομο ρόβερ Perseverance της αποστολής MARS 2020 της NASA.



(ii) Η αυτόνομη ηλεκτρική σκούπα της iRobot, Roomba-i7.

Σχήμα 1.1: Μερικές εφαρμογές της ρομποτικής εξερεύνησης

Το πρόβλημα της αυτόνομης εξερεύνησης χωρίζεται στα εξής, επιμέρους τμήματα:

- **Αντίληψη**

Η διαδικασία καθορισμού θέσης και προσανατολισμού του ρομπότ στο χώρο και καταγραφής του περιβάλλοντος χώρου, με χρήση κατάλληλων αισθητήριων οργάνων.

- **Απόφαση**

Η διαδικασία επεξεργασίας των προσλαμβανόμενων δεδομένων για τον καθορισμό της επόμενης θέσης, στην οποία θα πρέπει να βρεθεί το ρομπότ ή σχεδιασμού της νέας τροχιάς που θα πρέπει να ακολουθήσει.

- **Δράση**

Η οδήγηση των κινητήρων-επενεργητών του ρομπότ με κατάλληλο τρόπο, ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι θέσης-ταχύτητας που καθορίστηκαν στο προηγούμενο στάδιο.

Η παρούσα διπλωματική εργασία, κυρίως, εστιάζει στο δεύτερο τμήμα του προβλήματος. Αναφορικά με το πρώτο και το τρίτο τμήμα, χρησιμοποιήθηκαν ήδη γνωστές, καλά εδραιωμένες μέθοδοι, με όλες τις απαραίτητες τροποποιήσεις για την προσαρμογή τους στην εφαρμογή μας.

1.2 Ανασκόπηση Σχετικής Βιβλιογραφίας

Το πρώτο στάδιο της ρομποτικής εξερεύνησης περιλαμβάνει την δημιουργία ενός χάρτη του περιβάλλοντος χώρου, αλλά και τον καθορισμό της θέσης του ρομπότ μέσα σε αυτό το περιβάλλον. Μπορεί να γίνει αντιληπτό ότι η δημιουργία χάρτη του περιβάλλοντος χώρου προαπαιτεί την γνώση της ακριβούς θέσης του ρομπότ, ενώ με τη σειρά της, η ακριβής θέση του ρομπότ στο χώρο χρειάζεται τον χάρτη του περιβάλλοντος χώρου.

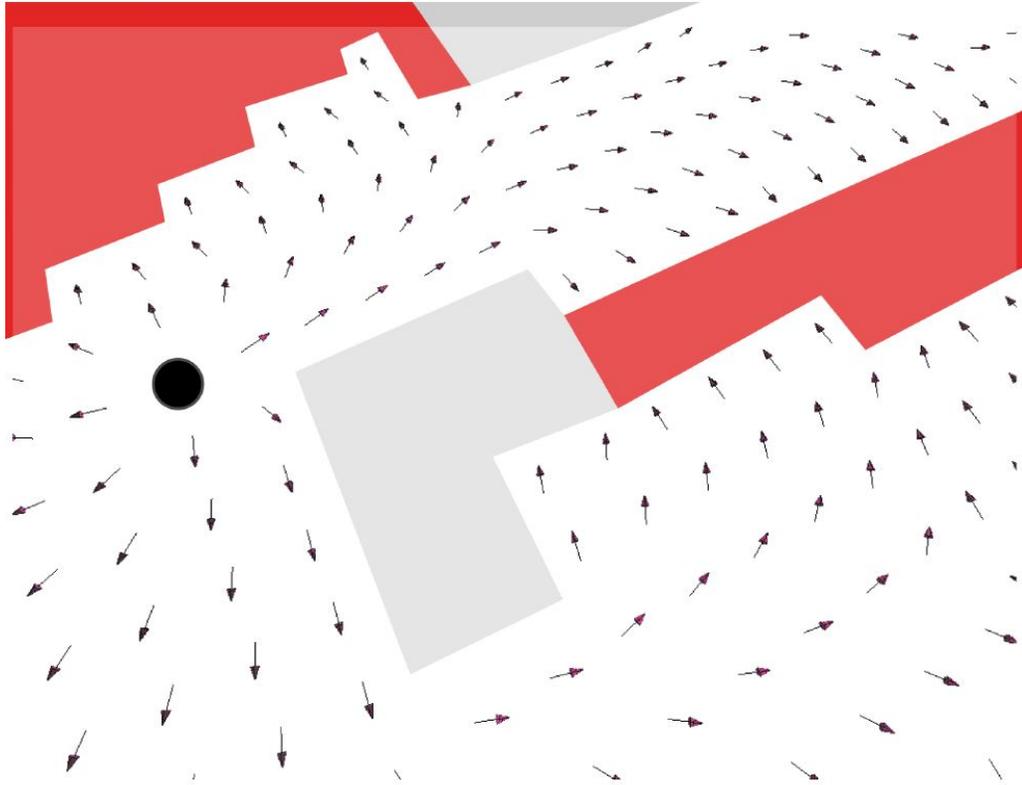
Ο συνηθέστερος τρόπος για επίλυση αυτού του προβλήματος αμοιβαίας εξάρτησης, είναι μέσω μεθόδων **Ταυτόχρονης Χαρτογράφησης και Εντοπισμού Θέσης** (μετ. Simultaneous Localization and Mapping) εν συντομία **SLAM** (H.Durrant-Whyte and T.Bailey(2006)[5], T.Bailey and H.Durrant-Whyte(2006)[1]).

Η μέθοδος των (A.Doucet et al.(2000)[4]) εισήγαγε για πρώτη φορά Rao-Blackwellized particle filters ως τρόπο επίλυσης του προβλήματος. Αυτή η προσέγγιση δεν είναι αποδοτική για το αυξημένο πλήθος από particles, που συνήθως απαιτείται για την ακριβή χαρτογράφηση και εντοπισμό. Ένα επιπλέον πρόβλημα της συγκεκριμένης μεθόδου εντοπίζεται στον κίνδυνο διαγραφής των σωστών particles κατά τη διάρκεια του βήματος επαναδειγματοληψίας.

Μεταγενέστερες προσπάθειες επιμελήθηκαν της διόρθωσης αυτών των ατελειών, με προεξέχουσα αυτή των G.Grisetti et al.(2007)[8]. Η συγκεκριμένη μέθοδος, μάλιστα, χρησιμοποιεί απευθείας τα αποτελέσματα σάρωσης για την κατασκευή του χάρτη. Ένα ακόμα θετικό στοιχείο αυτής της μεθόδου είναι ότι διατίθεται ελεύθερα ως λογισμικό ανοιχτού κώδικα μέσω του πασίγνωστου ROS πακέτου **gmapping**

Μετά την δημιουργία του χάρτη του περιβάλλοντος χώρου και τον υπολογισμό της θέσης και προσανατολισμού του ρομπότ μέσα σε αυτόν, το επόμενο στάδιο της ρομποτικής εξερεύνησης περιλαμβάνει τον σχεδιασμό της κίνησης του ρομπότ. Μία αρκετά διαδεδομένη μέθοδος για ασφαλή ρομποτική εξερεύνηση, είναι μέσω της χρήσης Τεχνητών Πεδίων Δυναμικού (μετ. Artificial Potential Fields). Αυτή η κατηγορία αλγορίθμων εξερεύνησης αντιμετωπίζουν τα εμπόδια του χώρου ως πηγές δυναμικού και τις ανεξερεύνητες περιοχές ως καταβόθρες δυναμικού. Έτσι το ρομπότ απωθείται από τα εμπόδια και έλκεται από τις ανεξερεύνητες περιοχές, δηλαδή κινείται από υψηλότερης σε χαμηλότερης ενέργειας, καταστάσεις. Όπως είναι γνωστό, τα Τεχνητά

Πεδία Δυναμικού δεν αποκλείουν το ενδεχόμενο δημιουργίας τοπικών ελαχίστων, όπου το ρομπότ θα μπορούσε να εγκλωβιστεί. Αντιθέτως, τα Αρμονικά Πεδία Δυναμικού (μετ. Harmonic Potential Fields) από το σχεδιασμό τους δεν επιτρέπουν την ύπαρξη τέτοιων, ανεπιθύμητων σημείων, αφού όσα τοπικά ελάχιστα εντοπίζονται στο χώρο είναι σαγματικά σημεία (E.Prestes et al.(2001)[14]). Η μέθοδος των R.Shade et al.(2011)[15] έδωσε έγκυρα αποτελέσματα, χωρίς όμως να μπορεί να επεκταθεί αποδοτικά σε μεγαλύτερους χώρους, λόγω υπολογιστικής πολυπλοκότητας.



(i) Το πεδίο δυναμικού, όπως αυτό προκύπτει από τις συνοριακές τιμές (R.Shade et al.(2011)[15]). Με κόκκινο χρώμα φαίνονται οι ανεξερεύνητες περιοχές, με γκρι χρώμα τα εμπόδια, με λευκό ο ελεύθερος χώρος.

Σχήμα 1.2: Πλοήγηση βάσει Αρμονικών Πεδίων Δυναμικού-HPF

Σε επόμενες προσπάθειες οι V. Jorge et al.(2015)[15] κατάφεραν να υπολογίζουν το πεδίο δυναμικού μόνο σε περιοχές κοντά στο ρομπότ, αγνοώντας τις πιο απομακρυσμένες, που δεν θα επηρέαζαν σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα.

Τέλος οι P.Grontas et al.(2020)[9] προτείνουν μία μέθοδο εξερεύνησης βασισμένη σε Αρμονικά Πεδία Δυναμικού, χρησιμοποιώντας την Fast Multipole accelerated Boundary Element Method - FMBEM(Y.Liu(2009)[13]) για την κατασκευή και ενημέρωση

των ΑΠΔ. Με αυτό τον τρόπο πετυχαίνουν γραμμική υπολογιστική πολυπλοκότητα, αλλά και χωρική. Επιπλέον χρησιμοποιούν συνοριακές συνθήκες Neumann για τη λύση της εξίσωσης Laplace, τις οποίες διαμορφώνουν με κατάλληλους νόμους προσαρμοστικού ελέγχου. Αυτό δίνει μεγαλύτερη ευελιξία στον διαχωρισμό συνόρων με διαφορετικές ιδιότητες, εν αντιθέσει με τις περισσότερες μεθόδους που χρησιμοποιούν συνοριακές συνθήκες Dirichlet.

1.3 Συνεισφορά

Η συνεισφορά της παρούσας διπλωματικής εργασίας εντοπίζεται στην πειραματική επαλήθευση της μεθόδου των P.Groutas et al.(2020)[9] σε πραγματικό περιβάλλον, με πραγματικά ρομπότ, καθώς επίσης και στην επέκταση του αλγορίθμου εξερεύνησης, ώστε αυτός να υποστηρίζει την συνεργατική εξερεύνηση από ομάδα ρομπότ.

Ως προς το πρώτο σκέλος, η παρούσα διπλωματική επιχειρεί να επαληθεύσει, πρωτίστως, την ασφαλή πλοήγηση του ρομπότ, αλλά και ότι ο άγνωστος χώρος εξερευνάται πλήρως. Ταυτόχρονα ελέγχεται η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου και συνεπώς αν μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις πραγματικών εφαρμογών εξερεύνησης. Σε αυτή την κατεύθυνση, κατασκευάστηκε ένας προς εξερεύνηση χώρος, στο υπόγειο του κτηρίου Μ της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, όπου διεξήχθησαν πολλαπλές δοκιμές.

Ως προς την επέκταση του αλγορίθμου σε συστήματα πολλαπλών ρομπότ, χρησιμοποιήθηκαν 3 τροχοφόρα ρομπότ, συνολικά. Φυσικά χρειάστηκαν τροποποιήσεις στον αρχικό αλγόριθμο, που να εξυπηρετούν την επικοινωνία μεταξύ των ρομπότ και τη συγχώνευση των επιμέρους χαρτών. Οι δοκιμές για το σύστημα πολλαπλών ρομπότ έγιναν στον ίδιο χώρο με αυτές του ενός ρομπότ, έτσι ώστε να έχουμε συγκρίσιμα αποτελέσματα.

1.4 Δομή Διπλωματικής Εργασίας

Το Κεφάλαιο 2 πραγματεύεται την πειραματική επαλήθευση της αυτόνομης εξερεύνησης βάσει Αρμονικών Πεδίων Δυναμικού με τη μέθοδο Fast Multipole accelerated Boundary Element Method, σε πραγματικό περιβάλλον, με ένα πραγματικό ρομπότ.

Στο Κεφάλαιο 3 έχουμε την επέκταση του αλγορίθμου του Κεφαλαίου 2, σε πολλαπλά ρομπότ, ενώ στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και πειραμάτων μας.

Τέλος στο Κεφάλαιο 5, αναλύουμε τα αποτελέσματα του προηγούμενου Κεφαλαίου.

Κεφάλαιο 2

Εξερεύνηση βάσει Τεχνητών Αρμονικών Πεδίων

2.1 Εισαγωγή

Ο πρωταρχικός στόχος της παρούσας διπλωματικής ήταν η πειραματική επιβεβαίωση της μεθόδου εξερεύνησης που προτείνουν οι P.Groutas et al.(2020)[9].

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1, η βασική ιδέα, πάνω στην οποία αναπτύχθηκε η συγκεκριμένη μέθοδος εξερεύνησης, είναι αυτή των Αρμονικών Πεδίων Δυναμικού, με την επίλυση της εξίσωσης Laplace να γίνεται μέσω της Fast Multipole Boundary Element Method - FMBEM (Y.Liu(2009)[13]). Έτσι επιτυγχάνεται γραμμική υπολογιστική πολυπλοκότητα ως προς το μήκος του συνόρου εξερεύνησης, καθώς και γραμμική χωρική πολυπλοκότητα.

Επιπλέον αυτού, προτείνουν ένα σχήμα προσαρμοστικού ελέγχου των συνοριακών συνθηκών του συνόρου εξερεύνησης, με στόχο την βελτίωση της συμπεριφοράς του ρομπότ, χωρίς αυτό να επηρεάζει την εγγενή ασφάλεια και ιδιότητες σύγκλισης των Αρμονικών Πεδίων Δυναμικού.

Πριν το τελικό πείραμα, πραγματοποιήθηκαν πολλαπλές προσομοιώσεις στο περιβάλλον ρομποτικών προσομοιώσεων CoppeliaSim, το μέχρι πρότινος γνωστό και ως V-REP. Στο ασφαλές περιβάλλον που μας παρέχει μία προσομοίωση, έγιναν όλες οι απαραίτητες ρυθμίσεις παραμέτρων και δοκιμάστηκαν όλες οι νέες προσθήκες λογισμικού.

2.2 Υλοποίηση

2.2.1 Ρομπότ

Το ρομπότ που επιλέξαμε για τα πειράματά μας είναι το **Pioneer 3-DX** της εταιρίας Adept. Πρόκειται για ένα μη-ολονομικό δίτροχο ρομπότ το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως από εργαστήρια ρομποτικής σε όλο τον κόσμο, κυρίως σε ερευνητικές εφαρμογές που αφορούν χωρομέτρηση, χαρτογράφηση, αποφυγή εμποδίων και υπολογισμό τροχιάς.

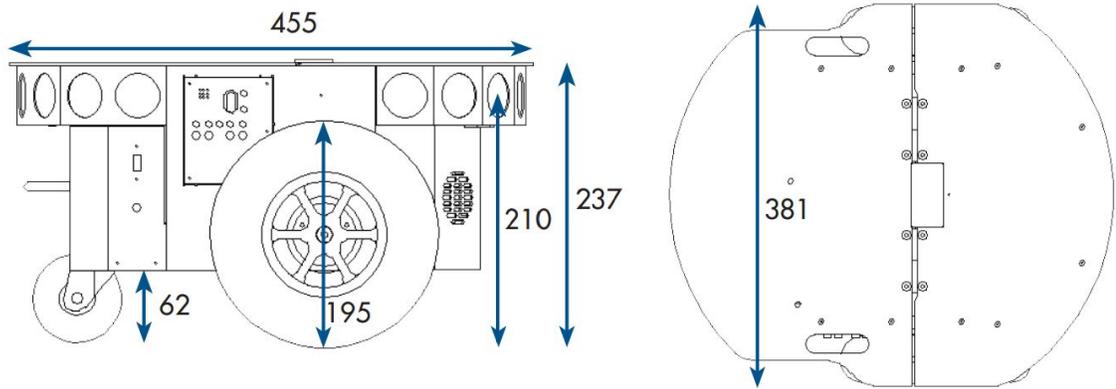


Σχήμα 2.1: Το Pioneer 3-DX της Adept.

Το Pioneer 3-DX διαθέτει ενσωματωμένο μικρο-ελεγκτή ο οποίος πραγματοποιεί αυτόματα έλεγχο ταχύτητας και παρέχει ανάδραση της εκτίμησης θέσης και προσανατολισμού του ρομπότ στο χώρο.

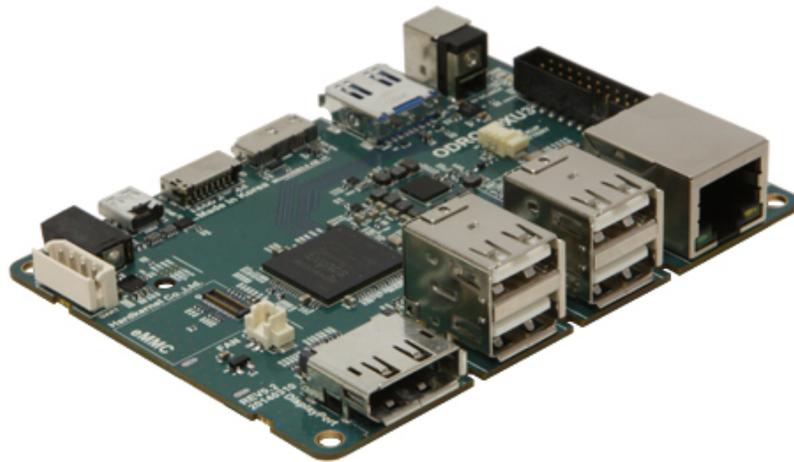
Βάρος	9 kg
Μέγιστη γραμμική ταχύτητα	1.2 m/s
Μέγιστη γωνιακή ταχύτητα	300°/s
Μπαταρίες	3x 12V-7.2Ah
Διάρκεια συνεχούς λειτουργίας	8-10 h
Διάρκεια Φόρτισης	12 h

Πίνακας 2.1: Τα χαρακτηριστικά του Pioneer 3-DX.



Σχήμα 2.2: Οι διαστάσεις του Pioneer 3-DX

Για τις ανάγκες του πειράματος, το ρομπότ εξοπλίστηκε με έναν υπολογιστή γενικού σκοπού, το **ODROID-XU3** της Hardkernel με λειτουργικό σύστημα Linux και δικτύωση μέσω Ethernet και Wifi. Ο ρόλος αυτού του ισχυρού μικρο-υπολογιστή είναι η σύνδεση του ρομπότ στο δίκτυο ROS που σηκώνουμε για τις ανάγκες του πειράματος. Στο ODROID-XU3 εκτελούνται η σάρωση και χαρτογράφηση του χώρου, μέσω των κατάλληλων ROS πακέτων και αντίστοιχων κόμβων, μαζί με την σειριακή επικοινωνία με τον ενσωματωμένο ελεγκτή του Pioneer 3-DX για τις εντολές κίνησης.



Σχήμα 2.3: Το ODROID-XU3 της Hardkernel.

2.2.2 Αντίληψη-Σάρωση

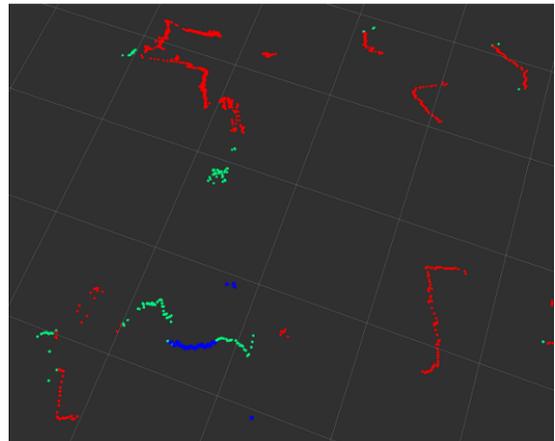
Η αντίληψη του περιβάλλοντος χώρου ενός ρομπότ, μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους. RGBD κάμερα, SONAR, LiDAR, είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται περισσότερο. Εμείς, για τη σάρωση του περιβάλλοντος χώρου, επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε μία συσκευή LiDAR και συγκεκριμένα το **Hokuyo UST-10LX** (Σχήμα 2.4i) με τα εξής χαρακτηριστικά:

Εύρος απόστασης	$21\text{mm} \leq x \leq 30000\text{mm}$
Οπτικό πεδίο	270°
Ανάλυση	0.25°
Συχνότητα	40Hz
Ακρίβεια	$\pm 40\text{mm}$

Πίνακας 2.2: Τα χαρακτηριστικά του Hokuyo UST-10LX.



(i) Το Hokuyo UST-10LX



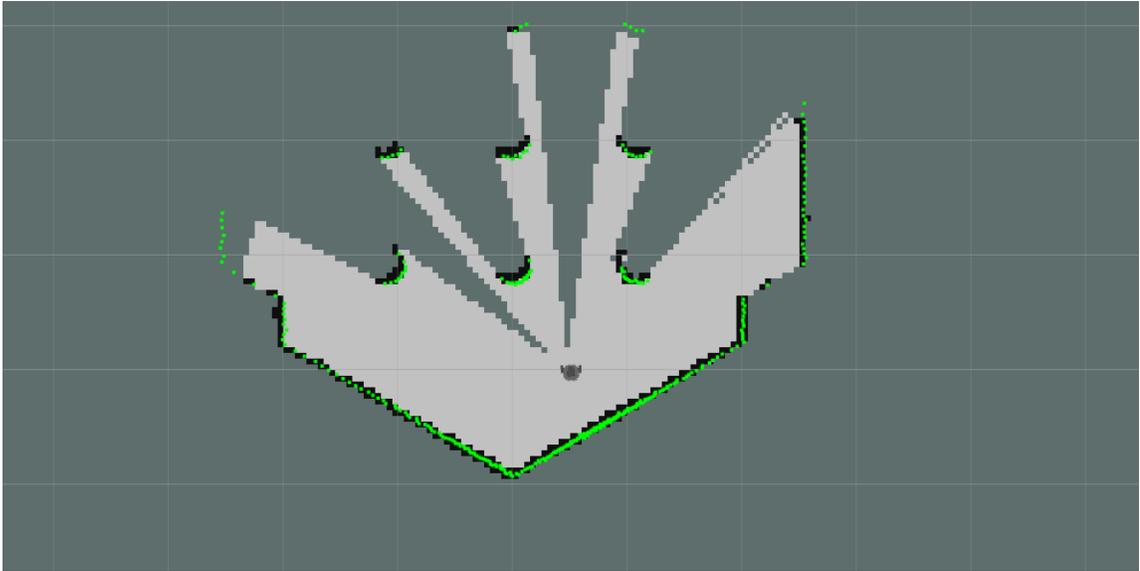
(ii) Σημεία σάρωσης

Σχήμα 2.4: Σάρωση με το Hokuyo UST-10LX

Οι μετρήσεις του Hokuyo UST-10LX εμφανίζονται, με τη βοήθεια του ROS πακέτου urg-node στο topic `/scan`, ως μια λίστα σημείων και αποστάσεων (Σχήμα 2.4ii).

2.2.3 Ταυτόχρονη Χαρτογράφηση και Εντοπισμός Θέσης

Η ΤΧΕΘ (μετ. SLAM) έγινε με χρήση του ROS πακέτου gmapping(Σχήμα 2.5), το οποίο υλοποιεί τον αλγόριθμο OpenSlam's Gmapping. Το συγκεκριμένο πακέτο δημιουργεί τον ROS node **slam-gmapping**, ο οποίος συνδυάζει πληροφορίες του topic **/scan**, με τις μετρήσεις οδομετρίας **/tf (odom)** και παράγει έναν χάρτη πληρότητας στο topic **/map**.



Εντοπίζουμε τα σημεία της σάρωσης με ανοικτό πράσινο χρώμα, τα εμπόδια με μαύρο, τον ελεύθερο χώρο με ανοικτό γκρι και τον ανεξερεύνητο με σκούρο γκρι.

Σχήμα 2.5: Ένα παράδειγμα ΤΧΕΘ μέσω του πακέτου gmapping.

Αυτός ο χάρτης πληρότητας, είναι ένας διδιάστατος πίνακας, ο οποίος, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2.3 έχει την τιμή **100** στα κελιά που εκτιμάται ότι υπάρχει εμπόδιο, την τιμή **0** στα ελεύθερα κελιά και την τιμή **-1** στα κελιά για τα οποία ακόμα δεν έχουμε αποφανθεί για την πληρότητα τους. Η ανάλυση του χάρτη πληρότητας επιλέγουμε να είναι στα **20 κελιά/μέτρο**.

Πίνακας 2.3: Οι τιμές του χάρτη πληρότητας.

Κατάσταση	Τιμή
ΑΓΝΩΣΤΟ	-1
ΚΑΤΕΙΛΗΜΜΕΝΟ	100
ΕΛΕΥΘΕΡΟ	0

2.2.4 Εξαγωγή Συνόρου

Αφού έχουμε δημιουργήσει τον χάρτη πληρότητας του περιβάλλοντος χώρου, συνεχίζουμε με τον καθορισμό του συνόρου. Όπως εξηγούν οι P.Groutas et al.(2020)[9] το σύνορο ∂E_F αποτελείται από όλα τα ελεύθερα κελιά που γειτονεύουν με άγνωστα κελιά, ενώ στο σύνορο ∂E_O ανήκουν όλα τα κατειλημμένα κελιά που γειτονεύουν με ελεύθερα. Για την εξαγωγή των συνόρων ακολουθούμε τα ακόλουθα βήματα:

- **Μορφολογική διαστολή κατειλημμένων κελιών**

Για τη διαστολή χρησιμοποιείται, ως δομικό στοιχείο, ένας πίνακας 7*7 με μοναδιαία στοιχεία. Με αυτό τον τρόπο, μπορεί ακόμα και ένα κατειλημμένο κελί να εκφραστεί ως κλειστή καμπύλη, κάτι που αποτελεί προϋπόθεση για τη λύση της εξίσωσης Laplace. Επιπλέον αυτού, η μορφολογική διαστολή των εμποδίων είναι απαραίτητη για την ασφαλή πλοήγηση μη σημειακού ρομπότ. Έτσι υπολογίζοντας ένα δίσκο, επαρκώς μεγάλο, ώστε να περιέχει το ρομπότ, επιλέγουμε το αντίστοιχο μέγεθος δομικού στοιχείου.

- **Απομόνωση συνδεδεμένων ελεύθερων κελιών**

Είναι πιθανό να υπάρχουν κελιά εκτός του χώρου εργασίας του ρομπότ, τα οποία έχουν σημανθεί, λανθασμένα, ως ελεύθερα (από σφάλμα μετρήσεων). Αυτό αντιμετωπίζεται τρέχοντας έναν flood-fill αλγόριθμο, έχοντας ως σημείο εκκίνησης το κελί πάνω στο οποίο βρίσκεται το ρομπότ. Με την ολοκλήρωση του γεμίσματος, όσα ελεύθερα κελιά δεν τα έχει 'πλημμυρίσει' ο flood-fill, θεωρούμε ότι εξ αρχής είχαν λανθασμένα σημανθεί ως ελεύθερα.

- **Αναγνώριση διαφορετικών τύπων συνόρων**

Δημιουργούμε τον πίνακα M_{free} ίδιων διαστάσεων με τον χάρτη πληρότητας. Ο M_{free} αποτελείται από μοναδιαία στοιχεία στις θέσεις που αντιστοιχούν σε ελεύθερα κελιά και μηδενικά στις υπόλοιπες. Μετά από συνέλιξη με τον πίνακα:

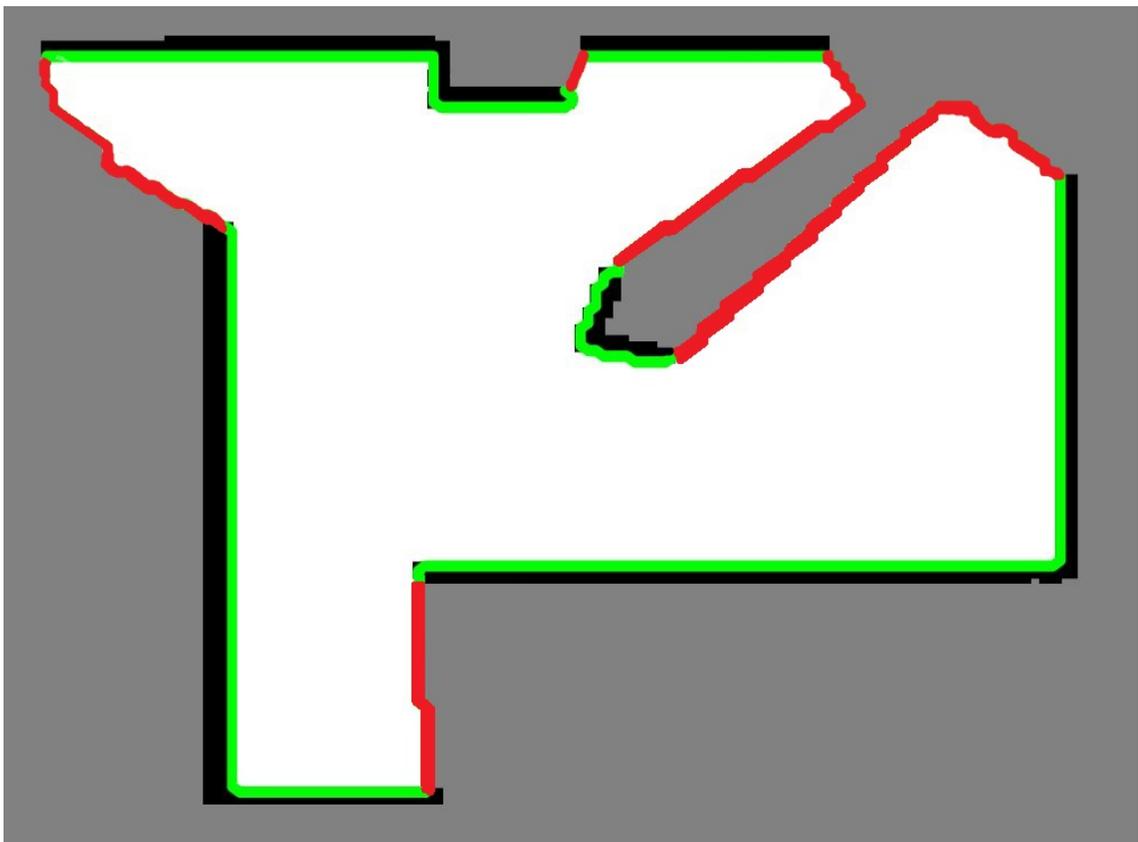
$$M_{conv} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

τα στοιχεία που έχουν θετικές τιμές αποτελούν το περίγραμμα της ελεύθερης

περιοχής. Από αυτά, όσα κελιά αντιστοιχούν σε εμπόδια αποτελούν το σύνορο ∂E_O . Ομοίως, για την εξαγωγή του ∂E_F , δημιουργούμε τον πίνακα M_{unknown} ίδιων διαστάσεων με τον χάρτη πληρότητας. Ο M_{unknown} αποτελείται από μοναδιαία στοιχεία στις θέσεις που αντιστοιχούν σε άγνωστα κελιά και μηδενικά στις υπόλοιπες. Μετά από συνέλιξη με τον πίνακα M_{conv} τα στοιχεία που έχουν θετικές τιμές αποτελούν το περίγραμμα της άγνωστης περιοχής. Από αυτά, όσα αντιστοιχούν σε ελεύθερα κελιά αποτελούν το σύνορο ∂E_F .

- **Ομαδοποίηση και ταξινόμηση των κέντρων των κελιών**

Με τη βοήθεια της MATLAB συνάρτησης `bwboundaries` ομαδοποιούμε τα κελιά του συνόρου σε ξεχωριστές καμπύλες. Η ίδια συνάρτηση ταξινομεί τα κελιά της κάθε καμπύλης σε σειρά, δεξιόστροφη για τα εσωτερικά σύνορα, αριστερόστροφη για τα εξωτερικά.



Εντοπίζουμε το σύνορο ∂E_O με πράσινο χρώμα και το σύνορο ∂E_F με κόκκινο.

Σχήμα 2.6: Εξαγωγή των συνόρων ∂E_O και ∂E_F .

2.2.5 Υπολογισμός Πεδίου Δυναμικού

Το πεδίο δυναμικού, όπως έχει ήδη αναφερθεί, υπολογίζεται μέσω της μεθόδου Fast Multipole Boundary Element Method - FMBEM (Y.Liu(2009)[13]), η οποία πετυχαίνει καλύτερες επιδόσεις σε σχέση με την συμβατική Boundary Element Method - BEM, λόγω βελτιωμένης υπολογιστικής πολυπλοκότητας, αλλά και πολυπλοκότητας χώρου.

Στην συμβατική BEM (J.T.Katsikadelis(2016)[12]) μετατρέπουμε την εξίσωση Laplace:

$$\nabla_p^2 \phi = 0, p \in \Omega \quad (2.1)$$

με την βοήθεια της ταυτότητας Green στην ακόλουθη:

$$\phi(q) = - \int_{\partial\Omega} \left[v(q, p) \frac{\partial \phi(q)}{\partial n_q} - \phi(q) \frac{\partial v(q, p)}{\partial n_q} \right] ds_q \quad (2.2)$$

όπου $\Omega, \partial\Omega$ είναι το πεδίο ορισμού της λύσης και το σύνορό του και $v(p, q)$ είναι η θεμελιώδης λύση της Laplace με:

$$v(p, q) = \frac{1}{2\pi} \ln(\|p - q\|) \quad (2.3)$$

Στη συνέχεια διακριτοποιούμε το σύνορο $\partial\Omega$ σε N σταθερά στοιχεία $\partial\Omega_i, i = 1, \dots, N$, τα οποία ορίζονται από ευθύγραμμα τμήματα, πάνω στα οποία θεωρούμε ότι έχουμε σταθερές συνοριακές τιμές. Όπως αναλύει βαθύτερα ο J.T.Katsikadelis(2016)[11] η (2.2) διακριτοποιείται ως εξής:

$$-\frac{1}{2}\phi_i + \sum_{j=1}^N \left(\int_{\partial\Omega_j} \frac{\partial v}{\partial n} ds \right) \phi_j = \sum_{j=1}^N \left(\int_{\partial\Omega_j} v ds \right) \phi_{n,j}, i = 1, \dots, N \quad (2.4)$$

όπου $\phi_n = \frac{\partial \phi}{\partial n}$ και $\phi_i, \phi_{n,i}$ οι συνοριακές συνθήκες του i -οστού στοιχείου.

Με κατάλληλη αναδιάταξη των όρων, η (2.4) μπορεί να γραφτεί ως σύστημα γραμμικών εξισώσεων:

$$A \cdot x = b \quad (2.5)$$

όπου $A \in \mathbb{R}^{N \times N}$ ο πίνακας των συντελεστών, $x \in \mathbb{R}^N$ ο πίνακας των άγνωστων συνοριακών μεγειθών και $b \in \mathbb{R}^N$ γνωστός σταθερός πίνακας.

Ο υπολογισμός του A απαιτεί $O(N^2)$ πράξεις, αφού χρειάζεται να υπολογιστούν τα ολοκληρώματα της (2.2) για κάθε πιθανό ζευγάρι από στοιχεία καθώς επίσης και $O(N^2)$ χώρο στη μνήμη. Άρα η λύση του συστήματος (2.5) θα απαιτούσε $O(N^3)$ πράξεις, γεγονός που καθιστά την συμβατική BEM ασύμφορη για εφαρμογές εξερεύνησης στις οποίες το σύνορο συνεχώς μεγαλώνει και ο χρόνος υπολογισμού πρέπει να παραμένει χαμηλός.

Αυτό το πρόβλημα έρχεται να λύσει η μέθοδος FMBEM(Y.Liu(2009)[13]), σύμφωνα με την οποία τα ολοκληρώματα:

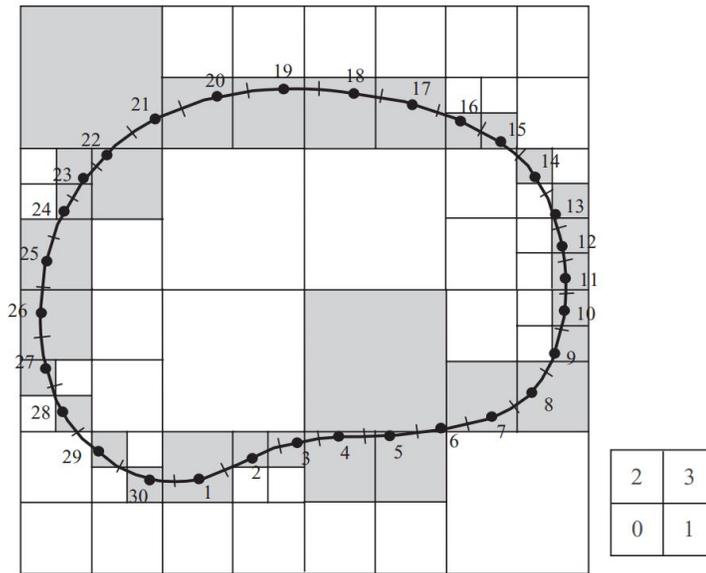
$$\int_{\partial\Omega_j} \frac{\partial v(p, q)}{\partial n} \phi(q) ds_q \quad (2.6)$$

$$\int_{\partial\Omega_j} v(p, q) \frac{\partial \phi(q)}{\partial n} ds_q \quad (2.7)$$

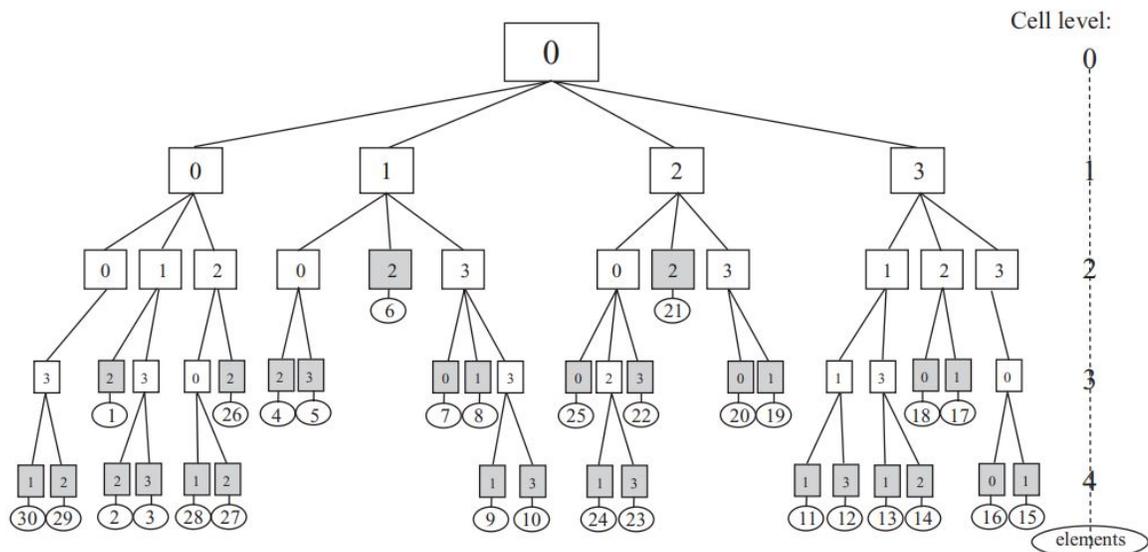
μπορούν να υπολογιστούν προσεγγιστικά, μέσω μιγαδικών πολυωνυμικών αναπτύγμάτων, με τον κατάλληλο αριθμό από όρους και τα οποία αναπτύγματα ο Y.Liu[13] ονομάζει 'πολυπολικά αναπτύγματα'. Με αυτό τον τρόπο, μπορεί κανείς να βρεί την επίδραση ενός στοιχείου στη θέση p πάνω στο στοιχείο $\partial\Omega_j$, απλά υπολογίζοντας το αντίστοιχο πολυπολικό ανάπτυγμα, δεδομένου ότι τα δύο αυτά στοιχεία 'απέχουν αρκετά'.

Οι πολυωνυμικοί συντελεστές αυτών, όμως, εξαρτώνται μόνο από το στοιχείο που δρα ως πηγή, δηλαδή στη θέση p . Συνεπώς μπορούμε να ομαδοποιήσουμε τα στοιχεία που βρίσκονται 'κοντά' μεταξύ τους και να υπολογίζουμε την συνολική επίδραση που έχουν σε μακρινά σημεία, απλά προσθέτοντας τους πολυωνυμικούς όρους του καθενός.

Ένας τρόπος να αποφανθούμε για το ποια στοιχεία βρίσκονται ‘κοντά’ ή ‘μακριά’, είναι μέσω της διάσπασης του συνόρου σε quadtree, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7.



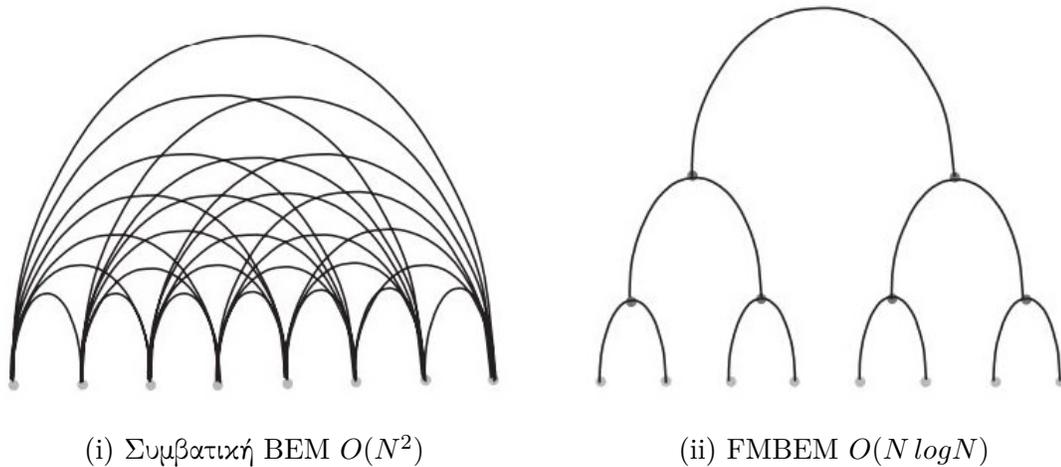
(i) Η quadtree-διάσπαση του συνόρου



(ii) Το αντίστοιχο δέντρο

Σχήμα 2.7: Παράδειγμα διάσπασης quadtree

Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να έχουμε FMBEM με υπολογιστική πολυπλοκότητα $O(N \log N)$. Το πλεονέκτημα της μεθόδου φαίνεται στο Σχήμα 2.8, όπου φαίνονται οι απαιτούμενοι υπολογισμοί μεταξύ των διαφορετικών στοιχείων για τις δύο μεθόδους.



Σχήμα 2.8: Απαιτούμενοι υπολογισμοί για τις 2 μεθόδους

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, για τον υπολογισμό των (2.6) και (2.7) θα πρέπει να εντοπιστούν όλα τα μακρινά στοιχεία και να υπολογιστούν τα αντίστοιχα πολυώνυμά τους και σε αυτό να αθροιστεί και η επίδραση των κοντινών στοιχείων με ευθύ υπολογισμό. Προς βελτίωση αυτής μπορούμε να εξάγουμε ένα πολυώνυμο (ο Y.Liu[13] ονομάζει ‘τοπικό ανάπτυγμα’) για κάθε στοιχείο, που θα προσεγγίζει την συνολική επίδραση των μακρινών στοιχείων στο εν λόγω στοιχείο. Διατηρούμε, βέβαια, τον ευθύ υπολογισμό της επίδρασης των κοντινών στοιχείων μέσω των ολοκληρωμάτων (2.6) και (2.7). Έτσι επιτυγχάνεται γραμμική υπολογιστική πολυπλοκότητα, αλλά και χωρική.

Ακολουθεί ο αλγόριθμος που συνοψίζει όσα προαναφέρθηκαν:

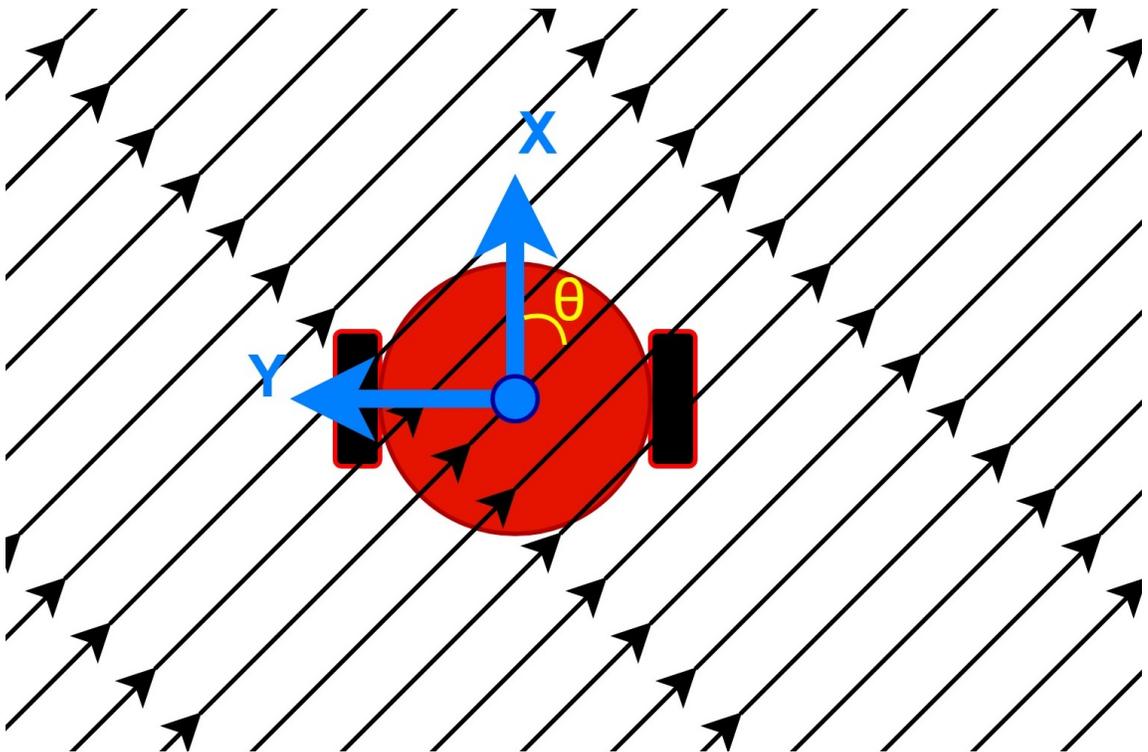
- Διακριτοποίηση του συνόρου $\partial\Omega$ και καθορισμός αρχικών συνοριακών συνθηκών.
- Διάσπαση του συνόρου σε quadtree δομή.
- Υπολογισμός των πολυπολικών αναπτυγμάτων για κάθε στοιχείο στο δέντρο, από τα στοιχεία-φύλλα προς την ρίζα.
- Υπολογισμός των τοπικών αναπτυγμάτων, από τη ρίζα προς τα στοιχεία-φύλλα.
- Υπολογισμός των ολοκληρωμάτων, για κοντινά στοιχεία ευθέως, ενώ για τα μακρινά μέσω των τοπικών αναπτυγμάτων.
- Υπολογισμός του $A \cdot x$ και εκτέλεση του βήματος της επαναληπτικής μεθόδου
- Αξιολόγηση του σφάλματος και επανάληψη μέχρι τη σύγκλιση

2.2.6 Έλεγχος προσανατολισμού

Ο αλγόριθμος των P.Groutas et al.(2020)[9] δεν λαμβάνει υπόψιν κινηματικούς περιορισμούς στους οποίους ενδέχεται να υπόκειται ένα ρομπότ. Το αντιμετωπίζει ως έναν ολονομικό δίσκο, του οποίου την ταχύτητα μπορούμε να ελέγχουμε ευθέως.

Το ρομπότ, όμως, που χρησιμοποιήσαμε για την διεξαγωγή των πειραμάτων, όπως έχει αναφερθεί, είναι το μη-ολονομικό δίτροχο Pioneer 3-DX της Adept. Η προσαρμογή στις κινηματικές ιδιαιτερότητες του ρομπότ, επιτυγχάνεται με έναν αρκετά απλό τρόπο: Φροντίζουμε ο άξονας X του ρομπότ να είναι πάντα ευθυγραμμισμένος με το διάνυσμα gradient του πεδίου στην αντίστοιχη θέση και η γραμμική ταχύτητα στον άξονα X να ισούται με το μέτρο του gradient στο ίδιο σημείο.

Η διαδικασία της ευθυγράμμισης του ρομπότ, γίνεται μέσω ενός PID ελεγκτή που προσπαθεί, κάθε στιγμή, να μηδενίσει την γωνία θ που σχηματίζει ο άξονας X του ρομπότ με το διάνυσμα του gradient του πεδίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9.



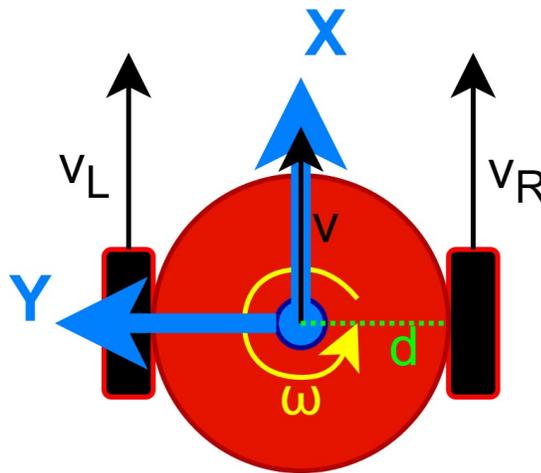
Σχήμα 2.9: Η γωνία θ που σχηματίζει ο άξονας X του ρομπότ ως προς το gradient του πεδίου δυναμικού στη συγκεκριμένη θέση του χώρου.

Με τη βοήθεια του ROS πακέτου **RosAria**, το Pioneer 3-DX μας παρέχει τη διεπαφή, μέσω της οποίας μπορούμε να του δίνουμε εντολές ταχύτητας. Οι εντολές αυτές αναφέρονται στην επιθυμητή γραμμική ταχύτητα στον άξονα X και στην επιθυμητή γωνιακή ταχύτητα γύρω από τον άξονα Z. Οι δύο αυτές ταχύτητες συνδέονται με τις γραμμικές ταχύτητες των τροχών μέσω των σχέσεων (2.8) και (2.9)

$$v = \frac{v_R + v_L}{2} \quad (2.8)$$

$$\omega = \frac{v_R - v_L}{2d} \quad (2.9)$$

όπου d η απόσταση κάθε τροχού από το κέντρο περιστροφής του ρομπότ και v_R, v_L οι γραμμικές ταχύτητες των τροχών.



Σχήμα 2.10: Οι ταχύτητες v, v_R, v_L και ω

Η υλοποίηση του ελεγκτή προσανατολισμού και γραμμικής ταχύτητας έγινε σε πακέτο που δημιουργήσαμε με το όνομα **translate_cmd_vel**. Η έξοδος του ελεγκτή είναι η εντολή επιθυμητής γωνιακής ταχύτητας προς το ρομπότ.

Κεφάλαιο 3

Συνεργατική Εξερεύνηση

3.1 Εισαγωγή

3.1.1 Συστήματα Πολλαπλών Ρομπότ

Ως Συστήματα Πολλαπλών Ρομπότ χαρακτηρίζουμε εκείνα τα ρομποτικά συστήματα, τα οποία περιλαμβάνουν δύο ή περισσότερα ρομπότ και έχουν σαν στόχο την επίλυση ενός πολύπλοκου προβλήματος, διαιρώντας το σε απλούστερα υπο-προβλήματα.

Όπως περιγράφεται και από τους A. Gautam, S. Mohan [7], η πραγματική ισχύς των συστημάτων πολλαπλών ρομπότ εντοπίζεται στην καλή συνεργασία του συνόλου και στον σωστό καταμερισμό των εργασιών και όχι τόσο στις ικανότητες που διαθέτουν τα μεμονωμένα μέλη. Μία διαπίστωση που έρχεται σε συμφωνία με όσα γνωρίζουμε μέχρι τώρα, για το πως λειτουργούν οι άνθρωποι σε μια κοινωνία. Ένα πολύπλοκο και δυσεπίλυτο, για ένα άτομο, πρόβλημα, μετά από σωστό καταμερισμό εργασιών και αποδοτική συνεργασία περισσότερων ατόμων, συνήθως φαντάζει τετριμμένο.

Η συνεργατική μέθοδος επίλυσης των προβλημάτων, εμφανίζεται ακόμα και στο ζωικό βασίλειο, όπου έχουμε αμέτρητα παραδείγματα ζωικών οργανισμών να συνεργάζονται για να αντιμετωπίσουν σύνθετα προβλήματα μετακίνησης, σίτισης και επιβίωσης τους. Για παράδειγμα, όταν σμήνη από χήνες πετούν σε σχηματισμό "V", αποδεδειγμένα, μειώνουν την συνολική αντίσταση του αέρα για το σμήνος, άρα και την ενέργεια που ξοδεύουν, ενώ ταυτόχρονα πετυχαίνουν καλύτερη οπτική επαφή μεταξύ τους.

Τα συστήματα πολλαπλών ρομπότ, με παρόμοιο τρόπο, διαιρούν το πρόβλημα σε επιμέρους τμήματα, το καθένα εκ των οποίων λύνεται πιο εύκολα και αποδοτικά.



(i) Μυρμήγκια συνεργάζονται για τη δημιουργία γέφυρας



(ii) Χήνες πετούν σε σχηματισμό



(iii) Αυτόνομα φορτηγά της Daimler κινούνται ως platoon σε αυτοκινητόδρομο



(iv) Εναέρια ρομπότ (μετ. drones) πετούν σε σχηματισμό

Σχήμα 3.1: Συνεργασία - Από τη φύση στην τεχνολογία

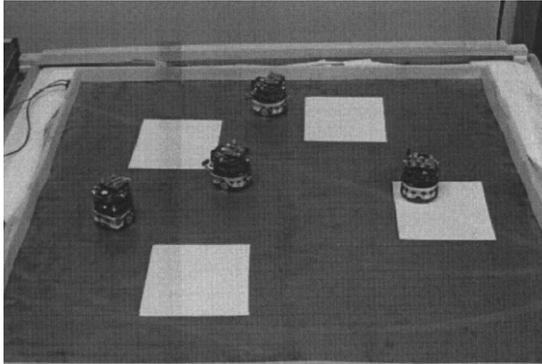
Τα πλεονεκτήματα των συστημάτων πολλαπλών ρομπότ έναντι συστημάτων ενός ρομπότ, είναι δεδομένα και περιγράφονται αναλυτικά, μεταξύ άλλων και από τους Z.Yan, N.Jouandeau, A.A.Charif [17]. Εν συντομία είναι τα εξής:

- Καλύτερη Χωρική Κατανομή
- Καλύτερες επιδόσεις σε μετρικές που αφορούν τον χρόνο εκτέλεσης της διεργασίας ή την κατανάλωση ενέργειας.
- Ευρωστία προερχόμενη από την πολλαπλότητα των πηγών πληροφορίας.
- Χαμηλότερο κόστος εν συγκρίσει με αυτό ενός πανίσχυρου ρομπότ.
- Αξιοπιστία, ευελιξία, επεκτασιμότητα και πολυχρηστικότητα.

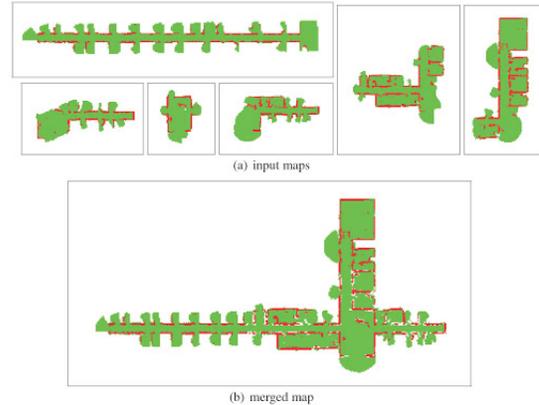
Είναι πολλές και ποικίλες οι εφαρμογές, στις οποίες τα Συστήματα Πολλαπλών Ρομπότ έχουν αποδείξει την αξία τους. Αυτόνομα φορτηγά που λειτουργούν και κινούνται ως στόλος, μπορούν να μεγιστοποιήσουν την απόδοση ενός δικτύου μεταφοράς αγαθών (Σχήμα 3.1iii). Σμήνη εναέριων ρομπότ μπορούν πετώντας σε κατάλληλους σχηματισμούς να φέρουν σε πέρας αποστολές εξερεύνησης ή εντοπισμού (Σχήμα 3.1iv).

3.1.2 Εξερεύνηση Πολλαπλών Ρομπότ

Το πρόβλημα της ρομποτικής εξερεύνησης αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στο ερευνητικό πεδίο της ρομποτικής. Ιδιαίτερα από το τέλος του 20ου αιώνα και μετά, έχουν καταγραφεί πολλές ερευνητικές προσπάθειες για την επίλυσή του, μέσω συνεργατικών μεθόδων (A.Billard et al.(1999)[2], W.Burgard et al.(2005)[3]).



(i) Πείραμα συνεργατικής εξερεύνησης από A. Billard et al.[2]



(ii) Παράδειγμα συγχώνευσης χαρτών

Σχήμα 3.2: Συνεργατική Εξερεύνηση

Η συνεργατική εξερεύνηση με χρήση πολλαπλών ρομπότ (Σχήμα 3.2i) παρουσιάζει μία σειρά πλεονεκτημάτων, έναντι συστημάτων που χρησιμοποιούν μόνο ένα ρομπότ:

- **Χρόνος Εξερεύνησης** - Το κυριότερο πλεονέκτημα είναι η μείωση του συνολικού χρόνου εξερεύνησης. Αυτό συμβαίνει όταν διαφορετικά ρομπότ εξερευνούν, ταυτόχρονα, διαφορετικά υποσύνολα του άγνωστου χώρου. Φυσικά, αυτό δεν θα μπορούσε να συμβεί στην περίπτωση της εξερεύνησης με ένα ρομπότ.
- **Αξιοπιστία - Ευρωστία** - Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα, που παρέχει η χρήση πολλαπλών ρομπότ για εξερεύνηση, είναι η εφεδρεία από πλευράς υλικού. Σε περίπτωση βλάβης ενός ή περισσότερων ρομπότ, η εξερεύνηση μπορεί να συνεχιστεί κανονικά από τα εναπομείναντα λειτουργικά ρομπότ.
- **Επεκτασιμότητα** - Ένα σύστημα πολλών ρομπότ μπορεί εύκολα να επεκταθεί με απλή προσθήκη περισσότερων ρομπότ, χωρίς να απαιτείται ο επανασχεδιασμός του συστήματος από την αρχή.
- **Κόστος Υλικού** - Τα συστήματα συνεργατικής εξερεύνησης παρέχουν τη

δυνατότητα για χρήση περισσότερων φθηνών ρομπότ, μικρού μεγέθους και χαμηλών υπολογιστικών δυνατοτήτων, έναντι ενός υπολογιστικά ισχυρότερου και ακριβότερου ρομπότ, που θα ολοκλήρωνε την διεργασία το ίδιο αποδοτικά.

Τα κρίσιμότερα σημεία της συνεργατικής εξερεύνησης είναι η αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ των ρομπότ-συνεργατών και η ακριβής συγχώνευση των επιμέρους χαρτών (Σχήμα 3.2ii)



Σχήμα 3.3: Τριάδα από ρομπότ εξερευνά το υπόγειο του κτηρίου Μ.

3.2 Υλοποίηση

3.2.1 Ρομπότ

Η ομάδα των ρομπότ που επιλέξαμε για τα πειράματά μας, αποτελείται από 2 Pioneer 3-DX της Adept και ένα SUMMIT-XL της Robotnik. Η περιγραφή του Pioneer 3-DX έγινε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2.2.1.



Σχήμα 3.4: Το SUMMIT-XL της Robotnik.

Το SUMMIT-XL της Robotnik είναι ένα 4-τροχο ρομπότ το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως σε ερευνητικά προγράμματα, καθώς επίσης και σε εφαρμογές εξερεύνησης και χαρτογράφησης σε περιοχές επικίνδυνες για τους ανθρώπους. Διαθέτει ενσωματωμένο υπολογιστή με λειτουργικό Linux, δικτύωση μέσω WiFi 802.11n και Ethernet και δυνατότητα επικοινωνίας μέσω USB και RS232. Επίσης, είναι εξοπλισμένο με ένα Ηοκυο UST-10LX (περιγραφή στο 2.2.2) και υποστηρίζει την αρχιτεκτονική ROS, χαρακτηριστικά που καθιστούν το συγκεκριμένο ρομπότ συμβατό με το πείραμά μας.

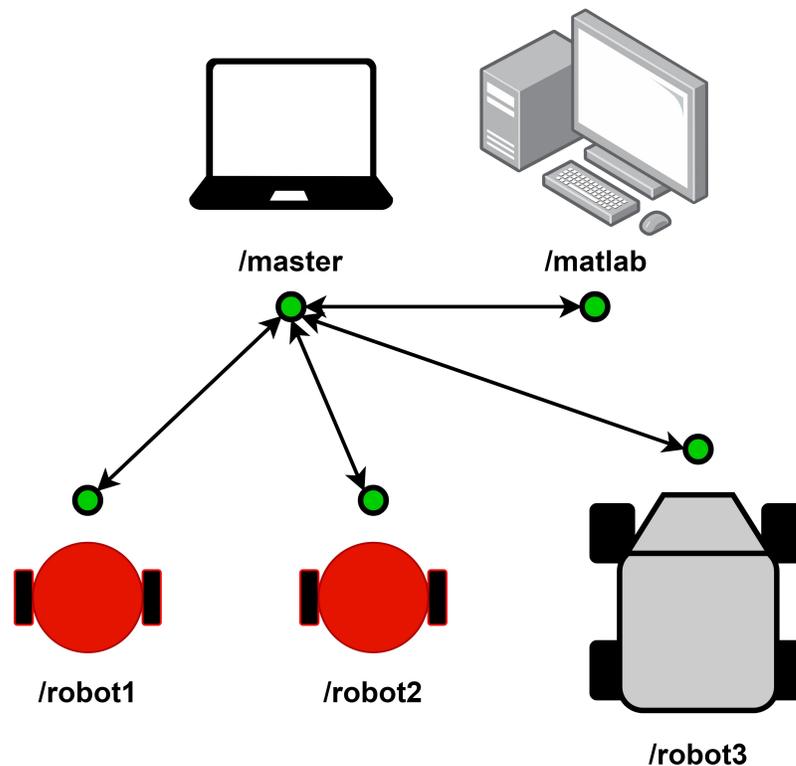
Βάρος	65 kg
Μέγιστη ταχύτητα	3 m/s
Μπαταρίες	LiFePO4 15Ah@48V
Διάρκεια συνεχούς λειτουργίας	10 h

Πίνακας 3.1: Τα χαρακτηριστικά του SUMMIT-XL.

3.2.2 Αρχιτεκτονική ROS

Η συνεργατική εξερεύνηση με πολλαπλά ρομπότ, όπως και κάθε άλλο σύστημα πολλαπλών ρομπότ, απαιτεί συνεχή και αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ των ρομπότ. Αυτή η δυνατότητα επικοινωνίας μας δίνεται από το κοινό δίκτυο ROS, του οποίου μέλη είναι όλα τα ρομπότ συνεργάτες.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.5, πέραν των ρομπότ, στο κοινό δίκτυο ROS συμμετέχουν και 2 ακόμη συσκευές. Η πρώτη εξ αυτών, είναι ένα λάπτοπ με λειτουργικό Linux, το οποίο δρα ως διαχειριστής του πειράματος και αποτελεί τον ROS-master του δικτύου. Η δεύτερη είναι ένας από τους σταθερούς υπολογιστές του εργαστηρίου, στον οποίο ανατίθενται ο υπολογισμός του πεδίου μέσω FMBEM, ο συντονισμός των ρομπότ και η συγχώνευση των χαρτών τους. Οι αλγόριθμοι για αυτές τις διεργασίες υλοποιούνται σε κώδικα MATLAB.



Σχήμα 3.5: Οι συσκευές του δικτύου ROS.

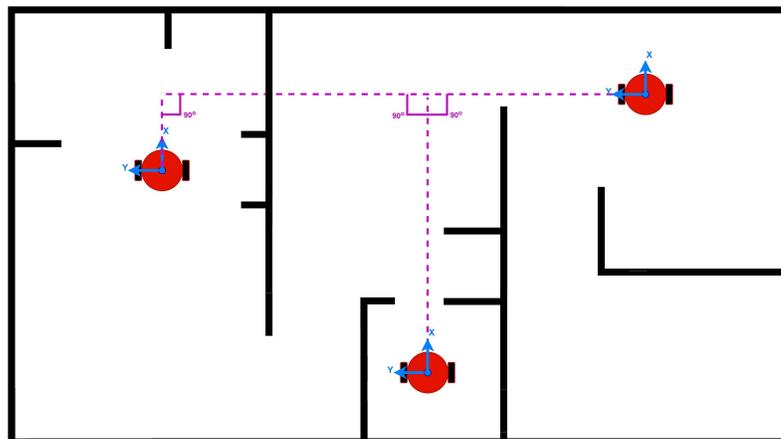
3.2.3 Συγχώνευση χαρτών

Η συγχώνευση των ξεχωριστών χαρτών που καταγράφουν τα ρομπότ, σε έναν ενιαίο χάρτη, όπως προαναφέρθηκε, είναι η βάση της συνεργατικής εξερεύνησης. Συνεπώς, για να έχουμε αποτελεσματική συνεργατική εξερεύνηση, θα πρέπει η συγχώνευση των χαρτών να γίνεται με ακρίβεια.

Είναι, επίσης, γνωστό ότι υπάρχουν αρκετές πιο σύνθετες και ενδεχομένως περισσότερο αποδοτικές μέθοδοι συγχώνευσης, σε σύγκριση με αυτήν που προτείνει η παρούσα διπλωματική. Οι Fenwick et al.(2002)[6] επεκτείνουν τον αλγόριθμο SLAM για ένα ρομπότ βάσει EKF σε συστήματα πολλαπλών ρομπότ. Ο Howard(2006)[10] επέκτεινε τον αλγόριθμο SLAM για ένα ρομπότ βάσει particle filters σε συστήματα πολλαπλών ρομπότ. Ο Thrun(2001)[16] προτείνει μία υβριδική μέθοδο συγχώνευσης, η οποία συνδυάζει τη δημιουργία ενός maximum likelihood χάρτη με έναν Monte-Carlo εκτιμητή για την αβεβαιότητα θέσης.

Θεωρώντας ότι μία τόσο σύνθετη προσέγγιση θα ξέφευγε από τον στόχο της διπλωματικής, σχεδιάσαμε μία απλή μέθοδο συγχώνευσης βασιζόμενοι στις αριθμητικές τιμές των κελιών των διαφορετικών χαρτών.

Σημειώνουμε ότι για διευκόλυνση της διαδικασίας συγχώνευσης, κάνουμε την παραδοχή ότι οι σχετικές, μεταξύ των ρομπότ, θέσεις εκκίνησης, είναι εξ αρχής γνωστές. Επιπρόσθετα, για την περαιτέρω διευκόλυνσή μας, επιλέγουμε τα επιμέρους συστήματα αναφοράς των ρομπότ, να είναι αρχικά ευθυγραμμισμένα ως προς το παγκόσμιο σύστημα αναφοράς, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.6: Παράδειγμα με ευθυγραμμισμένα ρομπότ.

Με τα ρομπότ ευθυγραμμισμένα, είναι κατανοητό ότι ο κοινός χάρτης προκύπτει από τους επιμέρους χάρτες, μόνο με ολίσθηση του ενός ως προς τον άλλο, στους άξονες x και y . Το μέτρο της ολίσθησης, φυσικά, καθορίζεται από την σχετική θέση εκκίνησης των 2 ρομπότ, μαζί με το σφάλμα θέσης που εισάγεται από το σύστημα οδομετρίας του καθενός ρομπότ.

Τις συνέπειες αυτού του σφάλματος στην επιτυχημένη συγχώνευση, μπορούμε και πρέπει να τις αναιρέσουμε. Προς επίτευξη αυτού του στόχου, δημιουργούμε το κριτήριο J για την αξιολόγηση της συγχώνευσης.

$$J(x, y) = \sum_{size_x} \sum_{size_y} mymap \cdot shifty(shiftx(friendmap, x_{rel} + x), y_{rel} + y)$$

mymap: ο χάρτης μου

friendmap: ο χάρτης του συνεργάτη μου

x_{rel}, y_{rel} : η σχετική θέση εκκίνησης του συνεργάτη μου

size_x: το μήκος του χάρτη μου

size_y: το πλάτος του χάρτη μου

shiftx(map, a): ολίσθηση του χάρτη ***map*** ως προς τον άξονα ***x*** κατά ***a***

shifty(map, a): ολίσθηση του χάρτη ***map*** ως προς τον άξονα ***y*** κατά ***a***

Εντοπίζουμε τα x και y τα οποία μεγιστοποιούν το κριτήριο J , δηλαδή:

$$[x_{cor}, y_{cor}] = \arg \max_{x, y} J(x, y), x \in [-20, 20], y \in [-20, 20]$$

Τα x_{cor}, y_{cor} αποτελούν την διόρθωση που αντισταθμίζει οποιοδήποτε σφάλμα θέσης, έως ± 20 κελιά (= 1 μέτρο).

Συνεπώς ο τελικός χάρτης δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$fullmap = mymap \hat{\oplus} shifty(shiftx(friendmap, x_{rel} + x_{cor}), y_{rel} + y_{cor})$$

Η λειτουργία του τελεστή $\hat{\oplus}$ περιγράφεται αναλυτικά στον Πίνακα 3.2

A	B	$A \hat{\oplus} B$
ΑΓΝΩΣΤΟ	ΕΛΕΥΘΕΡΟ	ΕΛΕΥΘΕΡΟ
ΑΓΝΩΣΤΟ	ΚΑΤΕΙΛΗΜΜΕΝΟ	ΚΑΤΕΙΛΗΜΜΕΝΟ
ΕΛΕΥΘΕΡΟ	ΚΑΤΕΙΛΗΜΜΕΝΟ	ΕΛΕΥΘΕΡΟ
X	X	X

Πίνακας 3.2: Ο τελεστής συγχώνευσης $\hat{\oplus}$.

Έχοντας ορίσει, λοιπόν, τα βασικά εργαλεία συγχώνευσης, τα βήματα που ακολουθεί το κάθε ρομπότ είναι τα εξής:

- Όταν για πρώτη φορά, το ρομπότ-συνεργάτης είναι στο οπτικό πεδίο του ρομπότ, εκκινείται η διαδικασία συγχώνευσης.
- Υπολογίζουμε τα x_{cor}, y_{cor} που μας δίνουν το καλύτερο δυνατό ταίριασμα χαρτών.
- Προχωράμε στη συγχώνευση τους. Η επόμενη λύση της FMBEM θα προκύψει με βάση τον προσαυξημένο χάρτη.
- Είναι πιθανό με το πέρασμα του χρόνου, τα 2 ρομπότ να έχουν εντοπίσει από κοινού, περισσότερα σημεία του χώρου, γεγονός που θα δικαιολογούσε την **επαναξιολόγηση** της συγχώνευσης. Έχοντας περισσότερα κοινά σημεία, είναι δεδομένο ότι το ταίριασμα των 2 χαρτών μπορεί να γίνει με μεγαλύτερη σιγουριά. Εκτελούμε, λοιπόν, τα προηγούμενα βήματα ξανά από την αρχή.
Σημειωτέον ότι η διαδικασία επαναξιολόγησης γίνεται περιοδικά, με συχνότητα που φθίνει με το πέρασμα του χρόνου.

Καθ' όλη τη διάρκεια αξιολόγησης της συγχώνευσης και ενημέρωσης των x_{cor}, y_{cor} , επιλέγουμε τα δύο εμπλεκόμενα ρομπότ να παραμένουν ακίνητα.

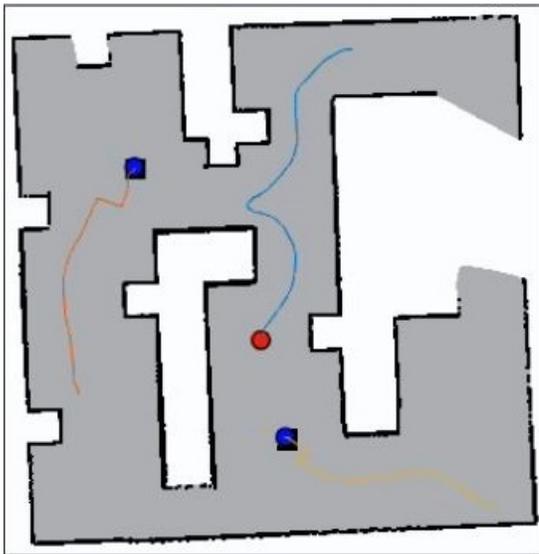
Αξίζει εδώ να τονίσουμε μία αρκετά σημαντική σχεδιαστική επιλογή, για λόγους αξιοπιστίας - εφεδρείας. Αντί η συγχώνευση των χαρτών να γίνεται συγκεντρωτικά σε έναν κόμβο, επιλέξαμε αυτή να γίνεται αποκεντρωμένα σε κάθε ρομπότ ξεχωριστά. Έτσι, σε περίπτωση που ένα ρομπότ τειθεί εκτός λειτουργίας, η εξερεύνηση μπορεί να ολοκληρωθεί χωρίς πρόβλημα από τα υπόλοιπα ρομπότ. Στα πλαίσια αυτής της επιλογής, όταν 2 ρομπότ συναντιούνται και μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία συγχώνευσης μεταξύ τους, τα υπόλοιπα ρομπότ της ομάδας εξερεύνησης, δεν γνωρίζουν για την συγκεκριμένη ανταλλαγή πληροφορίας.

3.2.4 Αποφυγή συγκρούσεων

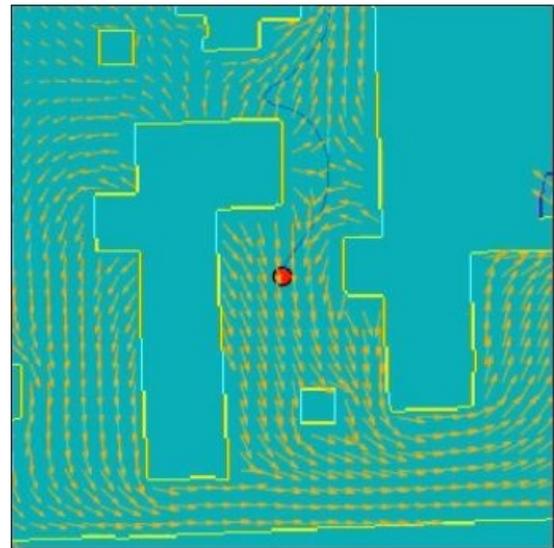
Σε ένα σύστημα εξερεύνησης πολλαπλών ρομπότ, είναι αυτονόητο ότι τα ρομπότ μοιράζονται τον ίδιο χώρο εργασίας. Συνεπώς, είναι πιθανό ένα ρομπότ να συναντήσει τα ρομπότ-συνεργάτες του, κατά την διάρκεια της εξερεύνησης, αν φυσικά τα ρομπότ εκκινούν από θέσεις μέσα σε έναν **μονοπατιακά συνεκτικό χώρο**.

Ορισμός: Ας υποθέσουμε έναν τοπολογικό χώρο $\Omega \subset \mathbb{R}^N$ και δύο οποιοδήποτε σημεία $p_1, p_2 \in \Omega$. Ο χώρος Ω ονομάζεται μονοπατιακά συνεκτικός εάν υπάρχει μονοπάτι $\gamma : [0, 1] \rightarrow \Omega, \gamma(0) = p_1, \gamma(1) = p_2$ που τα ενώνει.

Η μέθοδος που σχεδιάσαμε, προκειμένου να εγγυηθούμε αποφυγή συγκρούσεων, προέρχεται από μία αρκετά απλή ιδέα. Αντιμετωπίζουμε κάθε ρομπότ ως κινούμενο εμπόδιο, τοποθετώντας, τεχνητά, από ένα αρκούντως μεγάλο εμπόδιο στις πιο πρόσφατες θέσεις των ρομπότ-συνεργατών (Σχήμα 3.7).



(i) Ο χάρτης του χώρου



(ii) Το αντίστοιχο πεδίο δυναμικού

Σχήμα 3.7: Τοποθέτηση εικονικού εμποδίου στις θέσεις των ρομπότ-συνεργατών

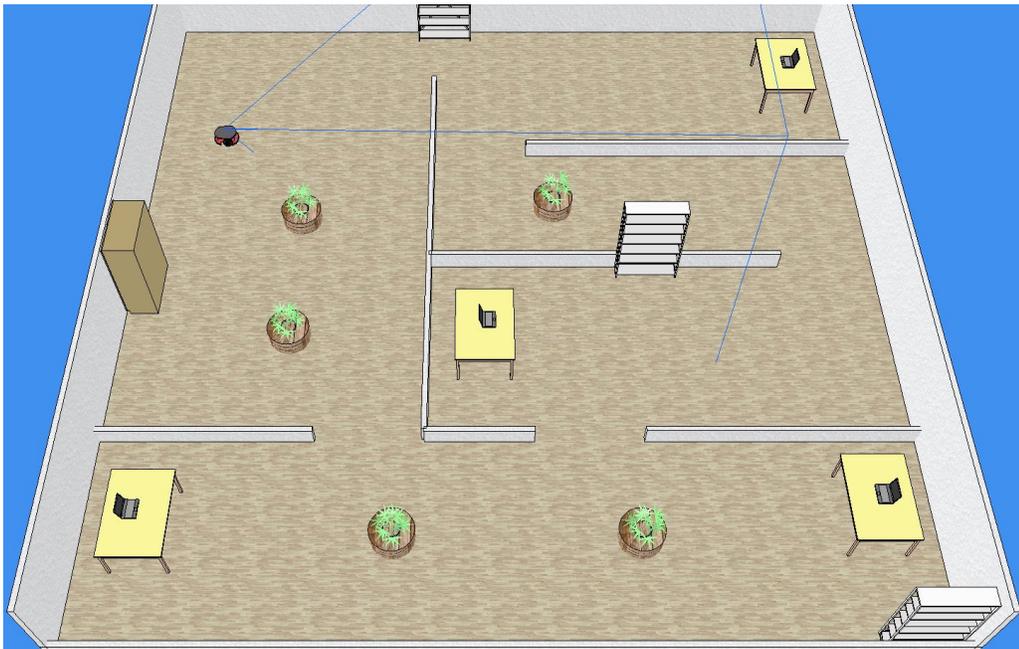
Επίσης εισάγουμε στον τύπο υπολογισμού της εντολής ταχύτητας των ρομπότ, έναν ακόμα συντελεστή, ο οποίος εγγυάται την αποφυγή συγκρούσεων στο χρονικό διάστημα, μεταξύ διαδοχικών λύσεων της FMBEM.

Κεφάλαιο 4

Αποτελέσματα

4.1 Προσομοιώσεις

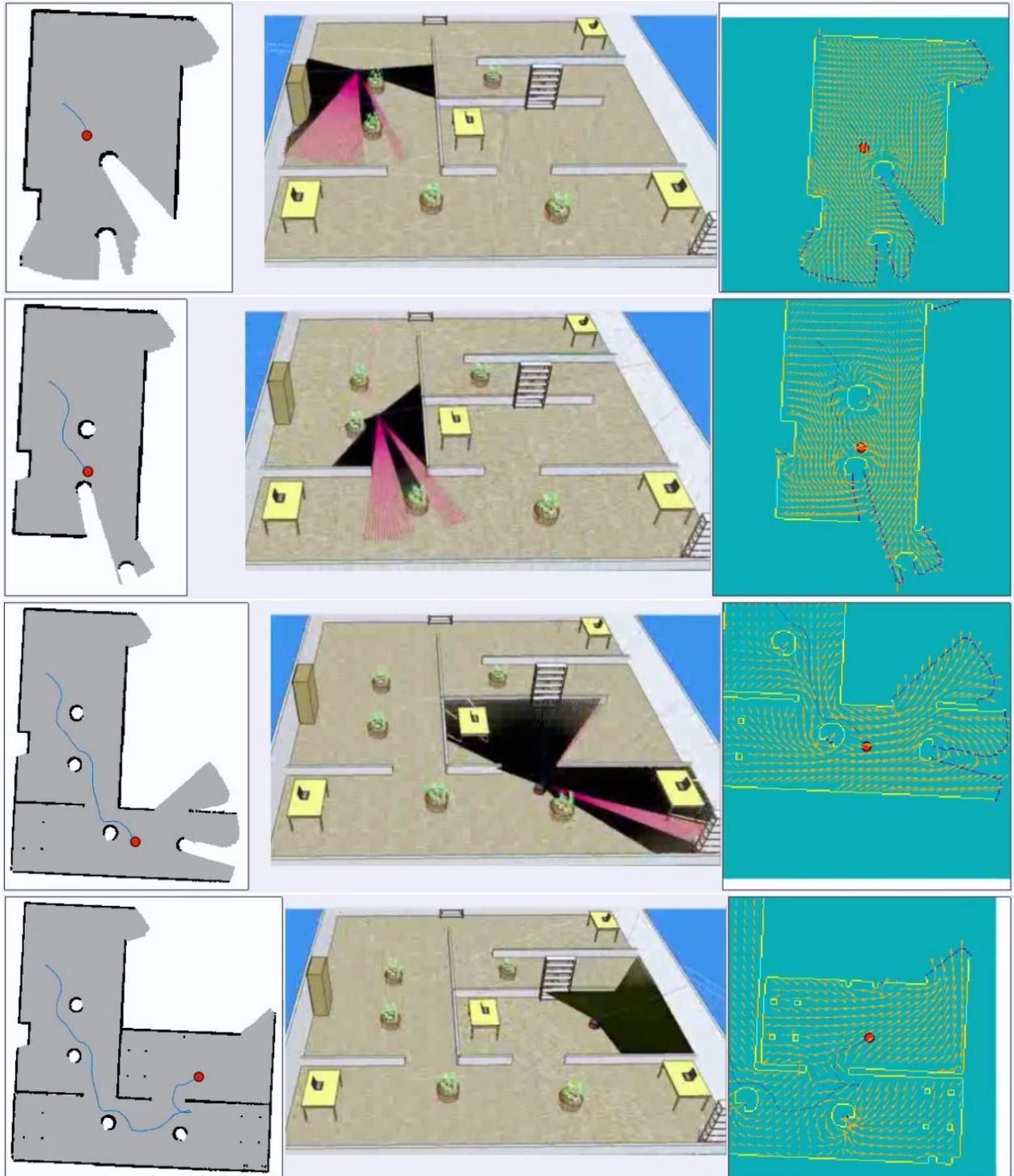
Πριν προχωρήσουμε στην διεξαγωγή των πειραμάτων, όλοι οι διαφορετικοί αλγόριθμοι δοκιμάστηκαν πρώτα σε προσομοιώσεις. Στο πρώτο στάδιο, κατασκευάσαμε με τη βοήθεια του περιβάλλοντος προσομοιώσεων CoppeliAsim, έναν χώρο γραφείου (Σχήμα 4.1), με συνήθη εμπόδια όπως τραπέζια, γλάστρες και ντουλάπες.



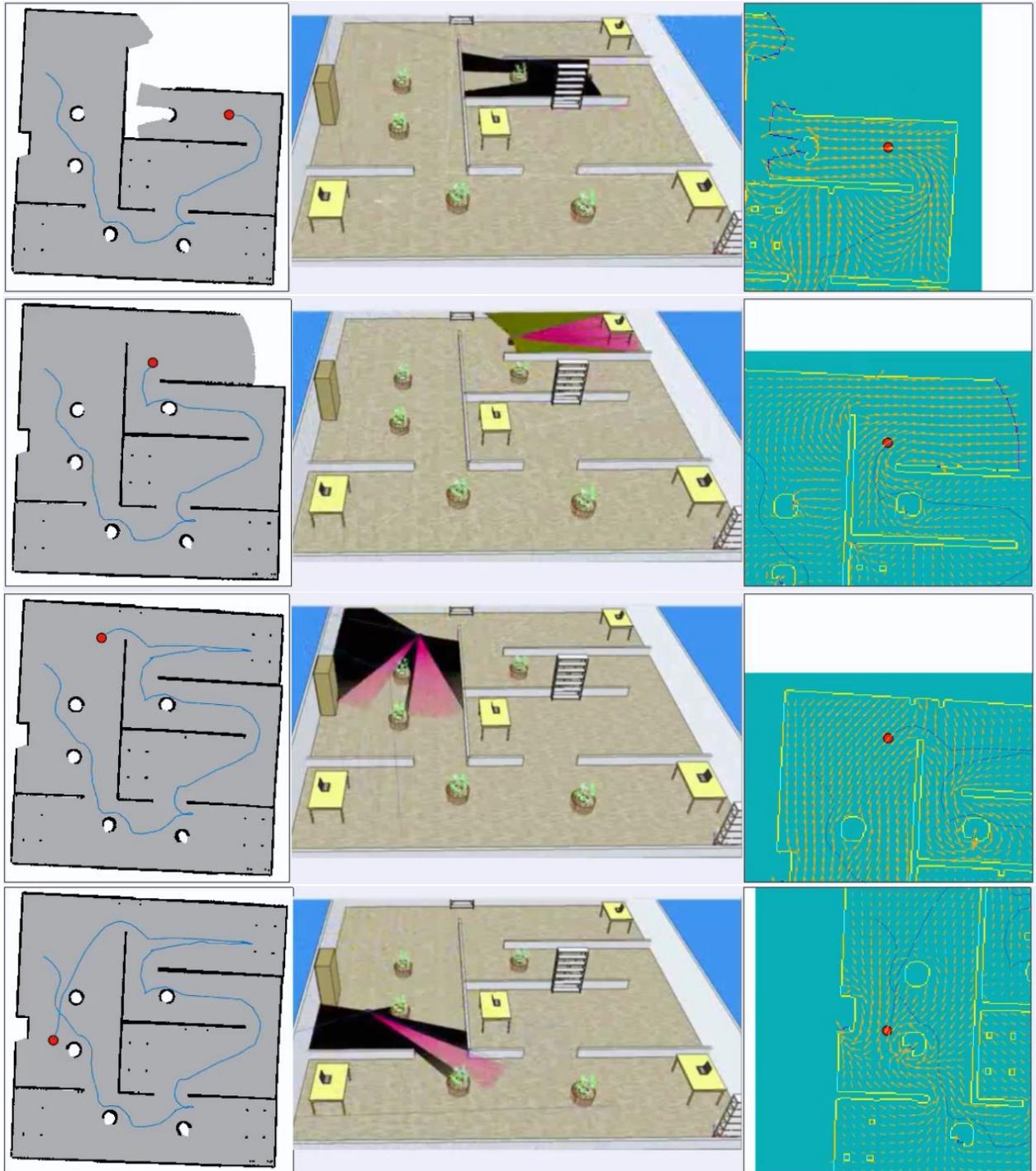
Σχήμα 4.1: Ο χώρος της προσομοίωσης για ένα ρομπότ.

Το ρομπότ κατάφερε να εξερευνήσει τον χώρο με απόλυτη επιτυχία, όπως φαίνεται σε διαδοχικά στιγμιότυπα, στα Σχήματα 4.2-4.3.

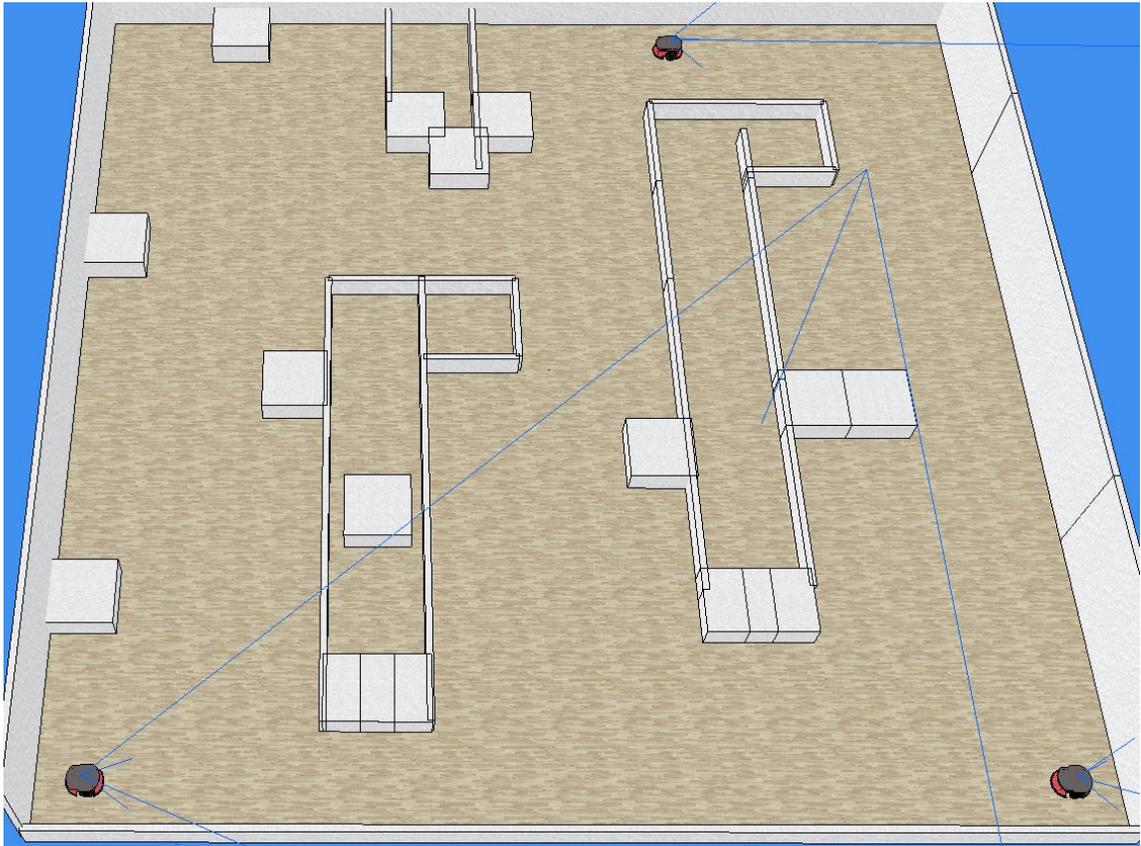
Σχήμα 4.2: Προσομοίωση σε χώρο γραφείου με ένα ρομπότ.



Σχήμα 4.3: Προσομοίωση σε χώρο γραφείου με ένα ρομπότ. (συνέχεια)



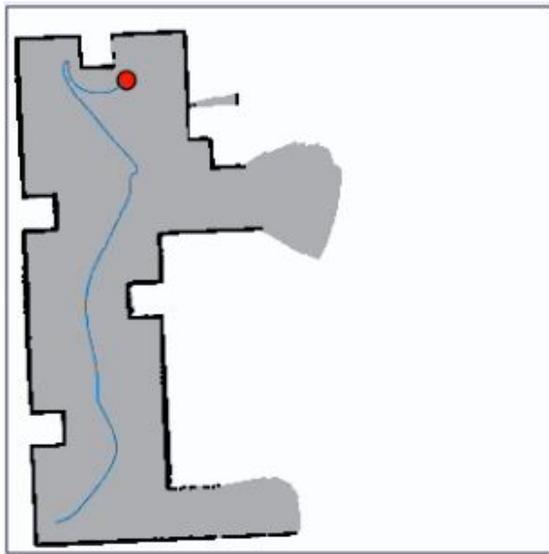
Στη συνέχεια προχωρήσαμε με την προσομοίωση του εκτεταμένου αλγορίθμου για πολλαπλά ρομπότ. Για τη συγκεκριμένη προσομοίωση, κατασκευάσαμε έναν νέο χώρο (Σχήμα 4.4) τον οποίον εξερεύνησαν 3 ρομπότ.



Σχήμα 4.4: Ο χώρος της προσομοίωσης για 3 ρομπότ.

Ο χώρος της προσομοίωσης είχε διαστάσεις 15m x 15m και μερικά χαρακτηριστικά εμπόδια ώστε να μπορεί, η συγχώνευση των χαρτών, να γίνει ευκολότερα.

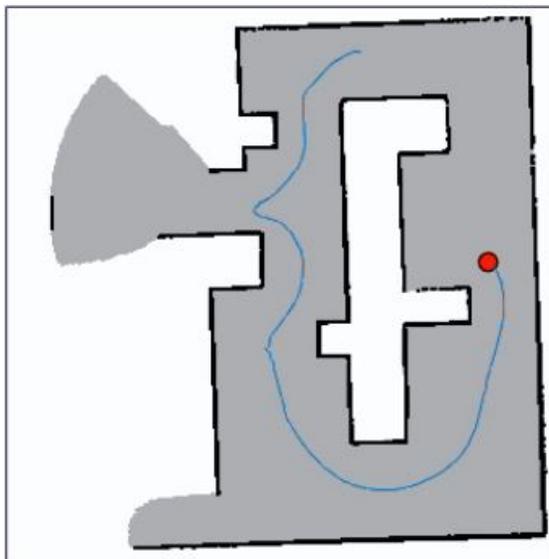
Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζονται μεμονωμένα, οι τοπικοί χάρτες των ρομπότ, μετά το τέλος της εξερεύνησης, καθώς επίσης και ο συνολικός. Επιπλέον, σε αυτούς τους χάρτες, μπορεί κανείς να δει την πλήρη τροχιά των ρομπότ.



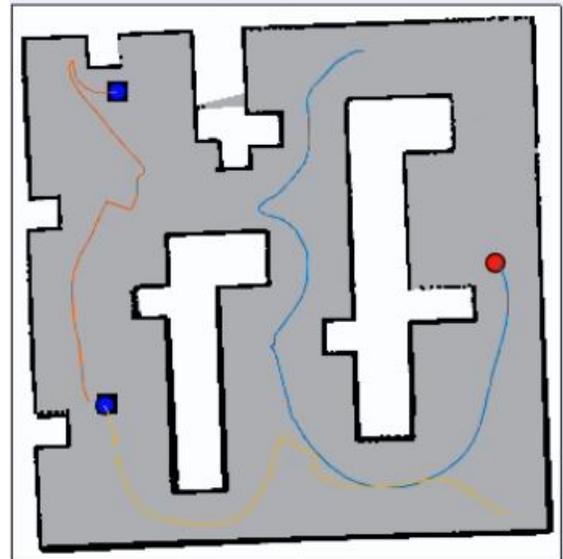
(i) Ρομπότ Α



(ii) Ρομπότ Β



(iii) Ρομπότ Γ



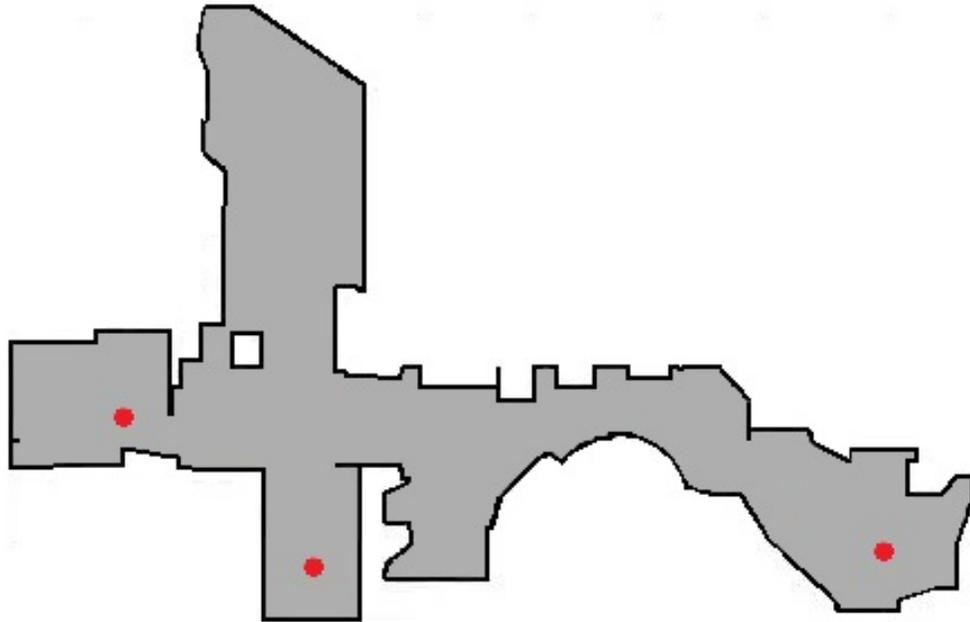
(iv) Συνολικός χάρτης

Σχήμα 4.5: Οι 3 τοπικοί χάρτες και ο συνολικός.

Είναι προφανές ότι η συγχώνευση των χαρτών ολοκληρώθηκε με επιτυχία και η εξερεύνηση τερματίστηκε, με το κάθε ρομπότ να έχει εξερευνήσει, μόνο μέρος του συνολικού χώρου. Τα θετικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων ικανοποίησαν τις απαιτήσεις μας για πλήρη εξερεύνηση του χώρου και αποφυγή συγκρούσεων.

4.2 Πειράματα

Μετά τις επιτυχείς προσομοιώσεις, προχωρήσαμε στην διεξαγωγή των πειραμάτων στις εγκαταστάσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών. Ο προς εξερεύνηση χώρος περιείχε το Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου και μέρος του κεντρικού διαδρόμου, στο υπόγειο του κτηρίου Μ. Σε αυτό τον χώρο επιλέχθηκαν αυθαίρετα 3 διαφορετικές θέσεις εκκίνησης για τα 3 ρομπότ του πειράματος.

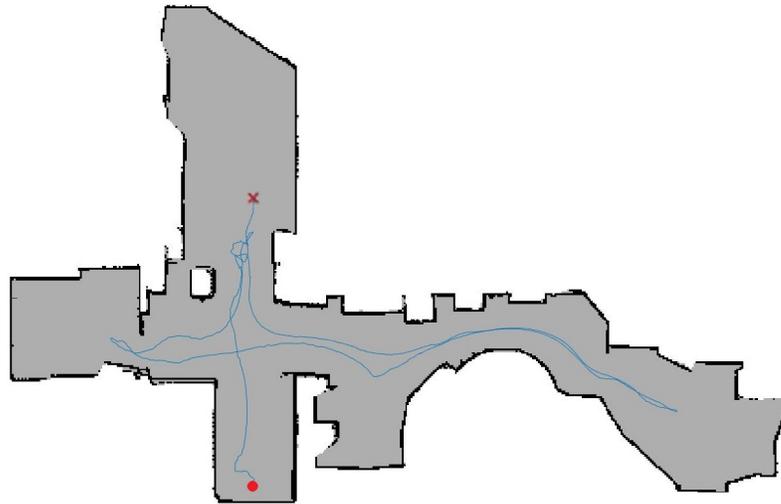


Σχήμα 4.6: Ο χώρος του πειράματος με τις θέσεις εκκίνησης.

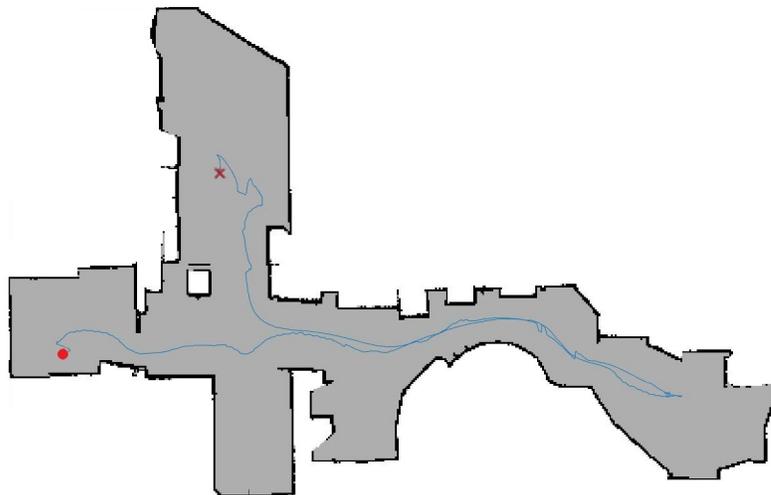
Στην πρώτη φάση του πειράματος, έγιναν δοκιμές εξερεύνησης με ένα ρομπότ, εκκινώντας από κάθε μια από τις 3 θέσεις εκκίνησης.

Αυτές οι δοκιμές έγιναν προκειμένου να μπορούμε να συγκρίνουμε και εν τέλει να επιβεβαιώσουμε την βελτίωση στον συνολικό χρόνο εξερεύνησης που επιφέρει η επέκταση του αλγορίθμου για την ομάδα των 3 ρομπότ.

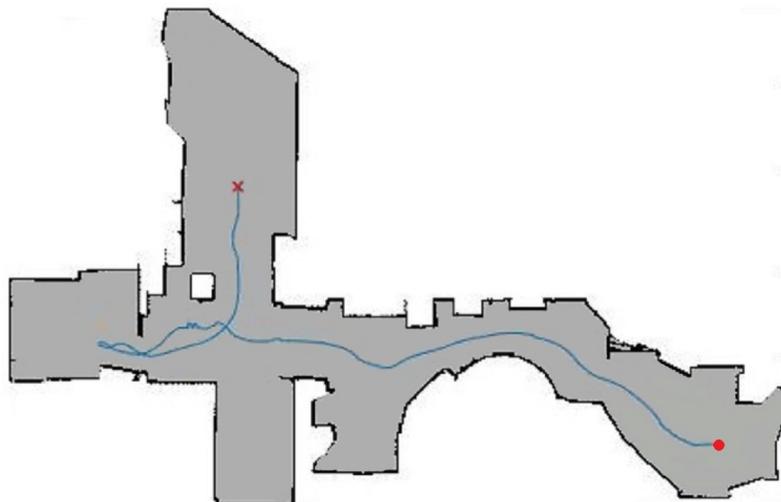
Για τις δοκιμές ενός ρομπότ, επιλέχθηκε το SUMMIT-XL και στο Σχήμα 4.7 φαίνονται οι τελικοί χάρτες, μαζί με την τροχιά του ρομπότ.



(i) Θέση εκκίνησης Α



(ii) Θέση εκκίνησης Β



(iii) Θέση εκκίνησης Γ

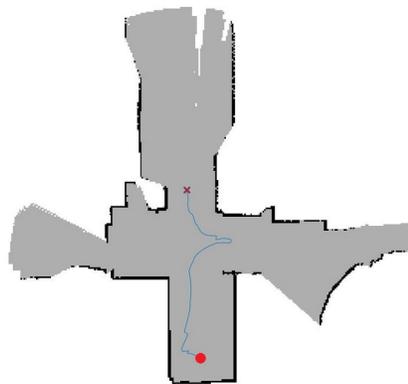
Σχήμα 4.7: Δοκιμές για κάθε μία από τις 3 θέσεις εκκίνησης.

Στον Πίνακα 4.1 φαίνονται οι χρόνοι εξερεύνησης για κάθε μία από τις θέσεις εκκίνησης.

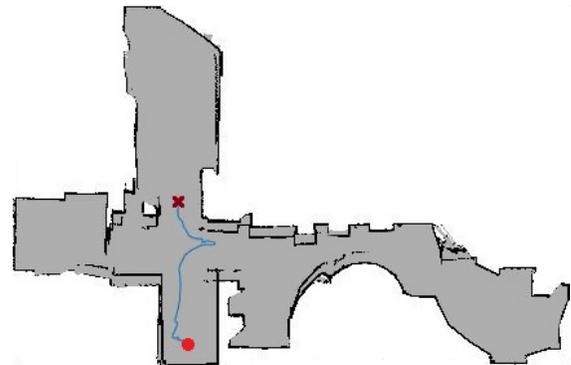
Θέση Εκκίνησης	Χρόνος Εξερεύνησης
Θέση Α	1048 sec (17m 28s)
Θέση Β	820 sec (13m 40s)
Θέση Γ	514 sec (8m 34s)

Πίνακας 4.1: Οι συνολικοί χρόνοι εξερεύνησης για 1 ρομπότ.

Αφού ολοκληρώσαμε τις δοκιμές με ένα ρομπότ και συλλέξαμε όλες τις απαραίτητες μετρήσεις, συνεχίσαμε με την προσθήκη και των άλλων 2 ρομπότ.

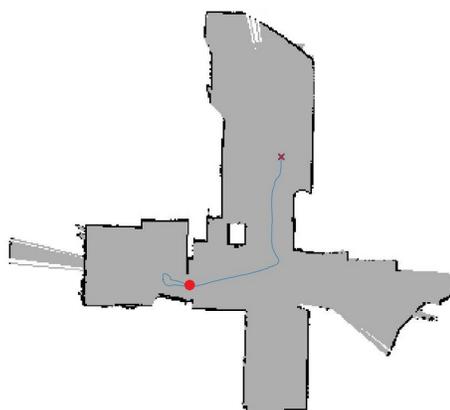


(i) Τοπικός χάρτης

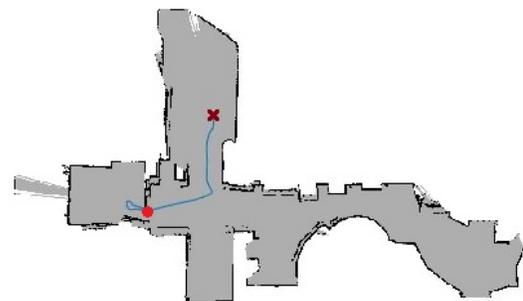


(ii) Συνολικός χάρτης

Σχήμα 4.8: Οι χάρτες του ρομπότ Α.

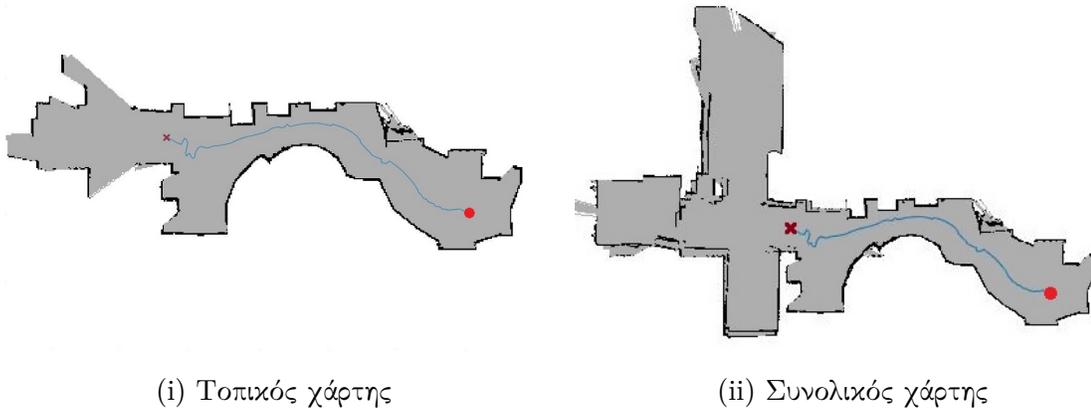


(i) Τοπικός χάρτης



(ii) Συνολικός χάρτης

Σχήμα 4.9: Οι χάρτες του ρομπότ Β.



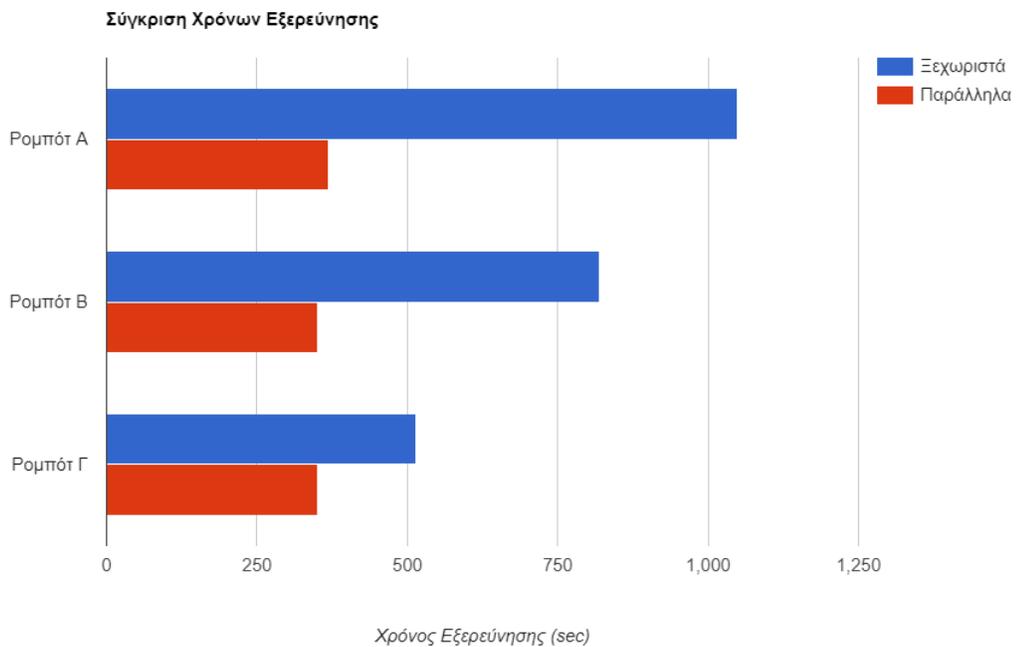
Σχήμα 4.10: Οι χάρτες του ρομπότ Γ.

Στον Πίνακα 4.2 φαίνονται οι συνολικοί χρόνοι εξερεύνησης για κάθε ρομπότ.

Ρομπότ	Χρόνος Εξερεύνησης
Ρομπότ Α	368 sec (6m 8s)
Ρομπότ Β	350 sec (5m 50s)
Ρομπότ Γ	350 sec (5m 50s)

Πίνακας 4.2: Οι συνολικοί χρόνοι εξερεύνησης για 3 ρομπότ.

Στο Σχήμα 4.11 φαίνεται ξεκάθαρα, η βελτίωση που επιτυγχάνεται στους χρόνους εξερεύνησης, μέσω της επέκτασης του αλγορίθμου σε σύστημα πολλαπλών ρομπότ.



Σχήμα 4.11: Σύγκριση χρόνων εξερεύνησης για τις 2 μεθόδους.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα

5.1 Αποτίμηση

Μετά και από τα αποτελέσματα των πειραμάτων (Κεφάλαιο 4.2) μπορούμε να καταλήξουμε στο ασφαλές συμπέρασμα ότι οι στόχοι της παρούσας διπλωματικής εργασίας, επιτεύχθηκαν.

Ως προς το πρώτο σκέλος της εργασίας, δηλαδή την πειραματική επαλήθευση της μεθόδου των P.Groutas et al.(2020)[9] για εξερεύνηση με ένα ρομπότ, επιβεβαιώθηκε μέσω πειραμάτων η ασφαλής πλοήγηση και η σύγκλιση της μεθόδου.

Επίσης, επικυρώθηκε η αξία της μεθόδου Fast Multipole Boundary Element Method - FMBEM (Y.Liu(2009)[13]) για εφαρμογές εξερεύνησης πραγματικού χρόνου, όπως ήδη μας προΐδεάζε η γραμμική της πολυπλοκότητα.

Ως προς το δεύτερο σκέλος της εργασίας, η επέκταση της μεθόδου των P.Groutas et al.(2020)[9] για σύστημα πολλαπλών ρομπότ, στέφθηκε με επιτυχία καθώς η βελτίωση στον συνολικό χρόνο εξερεύνησης ήταν προφανής (Σχήμα 4.11).

Μάλιστα, αυτή η βελτίωση επήλθε χωρίς να επηρεάσει κάπως τους στόχους για ασφαλή πλοήγηση και σύγκλιση της μεθόδου, οι οποίοι επιτεύχθηκαν στο πρώτο σκέλος της παρούσας εργασίας.

5.2 Δυσκολίες

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, παρουσιάστηκαν ορισμένες δυσκολίες, κυρίως τεχνικής φύσης, κατά την εκτέλεση των πειραμάτων.

Μια από αυτές, αποτέλεσε η εσφαλμένη συγχώνευση χαρτών στην περίπτωση που οι προς συγχώνευση χάρτες, δεν περιείχαν αρκετά κοινά σημεία.

Το συγκεκριμένο ζήτημα, συνήθως, προέκυπτε στην πρώτη προσπάθεια συγχώνευσης και σχεδόν πάντα επιλυόταν στην πρώτη επαναξιολόγηση της συγχώνευσης. Στο ενδιαμέσο χρονικό διάστημα, που ο χάρτης ενδεχομένως να μην είναι ασφαλής, φροντίσαμε με μία μείωση στην ταχύτητα των ρομπότ, να μην υπάρχει σύγκρουση με εμπόδιο ή άλλο ρομπότ.

Ένα ακόμα ζήτημα που μας απασχόλησε, ήταν αυτό της εμβέλειας του ασύρματου δικτύου σε ολόκληρο τον χώρο εξερεύνησης, με ισχυρό σήμα. Αυτό βέβαια λύθηκε εύκολα και γρήγορα χρησιμοποιώντας μία συσκευή WiFi-extender.

Τέλος, αξίζει να σημειώσουμε ότι το μεγαλύτερο μέρος εκπόνησης της εργασίας, συνέπεσε με την περίοδο εγκλεισμού και περιοριστικών μέτρων, για την αντιμετώπιση της πανδημίας της νόσου του κορονοϊού 2019 (COVID-19).

Από τη στιγμή που η πρόσβαση στις εγκαταστάσεις του εργαστηρίου ήταν αρκετά περιορισμένη, δόθηκε μεγαλύτερη βαρύτητα στις δοκιμές μέσω προσομοιώσεων.

5.3 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας, προέκυπταν ιδέες για μελλοντικές επεκτάσεις.

Μία από αυτές θα μπορούσε να είναι η υλοποίηση του αλγορίθμου εξερεύνησης σε ROS. Μία τέτοια επέκταση θα συνοδευόταν με βελτιωμένες επιδόσεις σε σύγκριση με την υλοποίηση σε Matlab. Η αποφυγή χρήσης του Matlab καθιστά τον αλγόριθμο λιγότερο απαιτητικό ως προς τους υπολογιστικούς πόρους και άρα συμβατό με μικρότερους και φθηνότερους υπολογιστές. Συνεπώς, η ύπαρξη ενός τέτοιου ROS πακέτου, θα έδινε μεγαλύτερη ευελιξία κατά την διάρκεια των πειραμάτων.

Πιθανή μελλοντική επέκταση της εργασίας, θα μπορούσε να είναι η εξερεύνηση με πολλαπλά ρομπότ, χωρίς πρότερη γνώση των αρχικών θέσεων. Θα μπορούσε το κάθε ρομπότ να κινείται ανεξάρτητα, στο δικό του τοπικό πλαίσιο αναφοράς, μέχρι τη στιγμή που θα συναντούσε ένα ρομπότ συνεργάτη. Στη συνέχεια, βάσει της σχετικής τους απόστασης και προσανατολισμού, θα μπορούσε να υπολογιστεί ο μετασχηματισμός μεταξύ των πλαισίων τους και να πραγματοποιηθεί η συγχώνευση των τοπικών χαρτών τους.

Τέλος, η συγκεκριμένη μέθοδος εξερεύνησης μπορεί να επεκταθεί σε χώρους τριών διαστάσεων, μιας και η FMBEM(Y.Liu(2009)[13]) μπορεί να εφαρμοστεί και σε 3D προβλήματα. Αυτό θα επέτρεπε και την προσέγγιση του προβλήματος της εξερεύνησης μέσω της μεθόδου των P.Grontas et al.(2020)[9] χρησιμοποιώντας εναέρια ρομπότ σε τρισδιάστατο χώρο.

Αναφορές

- [1] T. Bailey and H. Durrant-Whyte, ‘Simultaneous localization and mapping: Part ii,’ *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 13, no. 3, pp. 108–117, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1109/MRA.2006.1678144> (cit. on p. 3).
- [2] A. Billard, A. J. Ijspeert and A. Martinoli, ‘A multi-robot system for adaptive exploration of a fast-changing environment: Probabilistic modeling and experimental study,’ *Connection Science*, vol. 11, no. 3-4, pp. 359–379, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1080/095400999116304> (cit. on p. 23).
- [3] W. Burgard, M. Moors, C. Stachniss and F. E. Schneider, ‘Coordinated multi-robot exploration,’ *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 21, no. 3, pp. 376–386, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1109/TR0.2004.839232> (cit. on p. 23).
- [4] A. Doucet, N. de Freitas, K. Murphy and S. Russell, ‘Rao-blackwellized particle filtering for dynamic bayesian networks,’ *Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI)*, pp. 176–183, 2000. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3437-9_24 (cit. on p. 3).
- [5] H. Durrant-Whyte and T. Bailey, ‘Simultaneous localization and mapping: Part i,’ *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 13, no. 2, pp. 99–110, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1109/MRA.2006.1638022> (cit. on p. 3).
- [6] J. Fenwick, P. Newman and J. Leonard, ‘Cooperative concurrent mapping and localization,’ in *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.02CH37292)*, vol. 2, 2002, 1810–1817 vol.2. DOI: [10.1109/ROBOT.2002.1014804](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2002.1014804) (cit. on p. 27).
- [7] A. Gautam and S. Mohan, ‘A review of research in multi-robot systems,’ *2012 IEEE 7th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)*, pp. 1–5, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIInfS.2012.6304778> (cit. on p. 21).
- [8] G. Grisetti, C. Stachniss and W. Burgard, ‘Improved techniques for grid mapping with rao-blackwellized particle filters,’ *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23, no. 1, pp. 34–46, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1109/TR0.2006.889486> (cit. on p. 3).
- [9] P. D. Grontas, P. Vlantis, C. P. Bechlioulis and K. J. Kyriakopoulos, ‘Computationally efficient harmonic-based reactive exploration,’ *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 2, pp. 2280–2285, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.2970640> (cit. on pp. 4, 6, 8, 13, 19, 40, 42).

- [10] A. Howard, ‘Multi-robot simultaneous localization and mapping using particle filters,’ *The International Journal of Robotics Research*, vol. 25, no. 12, pp. 1243–1256, 2006. DOI: [10.1177/0278364906072250](https://doi.org/10.1177/0278364906072250) (cit. on p. 27).
- [11] J. T. Katsikadelis, ‘Chapter four - numerical implementation of the bem,’ in *The Boundary Element Method for Engineers and Scientists (Second Edition)*, J. T. Katsikadelis, Ed., Second Edition, Oxford: Academic Press, 2016, pp. 59–112, ISBN: 978-0-12-804493-3. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804493-3.00004-7>. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128044933000047> (cit. on p. 15).
- [12] ———, ‘Chapter three - the bem for potential problems in two dimensions,’ in *The Boundary Element Method for Engineers and Scientists (Second Edition)*, J. T. Katsikadelis, Ed., Second Edition, Oxford: Academic Press, 2016, pp. 35–57, ISBN: 978-0-12-804493-3. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804493-3.00003-5>. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128044933000035> (cit. on p. 15).
- [13] Y. Liu, *Fast Multipole Boundary Element Method: Theory and Applications in Engineering*. Cambridge University Press, 2009, ISBN: 9780511605345. DOI: <https://doi.org/10.1017/CB09780511605345> (cit. on pp. 4, 8, 15, 16, 18, 40, 42).
- [14] E. Prestes, M. A. P. Idiart, P. M. Engel and M. Wevisan, ‘Exploration technique using potential fields calculated from relaxation methods,’ *Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium (Cat. No.01CH37180)*, vol. 4, pp. 2012–2017, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1109/IR0S.2001.976368> (cit. on p. 4).
- [15] R. Shade and P. Newman, ‘Choosing where to go: Complete 3d exploration with stereo,’ *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2806–2811, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2011.5980121> (cit. on p. 4).
- [16] S. Thrun, ‘A probabilistic on-line mapping algorithm for teams of mobile robots,’ *The International Journal of Robotics Research*, vol. 20, no. 5, pp. 335–363, 2001. DOI: [10.1177/02783640122067435](https://doi.org/10.1177/02783640122067435) (cit. on p. 27).
- [17] Z. Yan, N. Jouandeau and A. A. Cherif, ‘A survey and analysis of multi-robot coordination,’ *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, pp. 1–2, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5772/57313> (cit. on p. 22).