

Πλοήγηση Ρομποτικού Σμήνους

Αθανάσιος Κρόκος

Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Βλάχος

Ιωάννινα, Ιανουάριος, 2023



ΤΜΗΜΑ ΜΗΧ. Η/Υ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE & ENGINEERING
UNIVERSITY OF IOANNINA

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Βλάχο για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε κατά την εκπόνηση της εργασίας αυτής. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου της οποίας έχω την αδιάκοπη υποστήριξη καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Ιανουάριος 2023

Αθανάσιος Κρόκος

Περίληψη

Η Ρομποτική Σμήνους είναι ένας συνεχώς εξελισσόμενος τομέας της Ρομποτικής. Η ύπαρξη του τομέα ωφείλεται στην παρατήρηση των σχηματισμών των ζωικών οργανισμών στην φύση. Κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι ο σχηματισμός των αποδημητικών πτηνών κατά την μετανάστευση, ο σχηματισμός κοπαδιών από ψάρια αλλά και η κίνηση των μυρμηγκιών από και προς την αποικία. Αυτή η συμπεριφορά καθιστά ευκολότερη την πραγματοποίηση φυσικών λειτουργιών. Τα σμήνη στην φύση, μέσω της ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ των ατόμων που τα απαρτίζουν, μπορούν να καταφέρουν λειτουργίες όπως, η έρευνα της συντομότερης διαδρομής, η πλοήγηση και η διατήρηση του προσανατολισμού.

Αυτή την ιδιότητα των ζωικών οργανισμών εκμεταλλεύεται ο τομέας της Ρομποτικής Σμήνους. Στην προσπάθεια μίμησης των σμηνών στην φύση, πολλαπλά ρομπότ τοποθετούνται σε ένα σμήνος. Τα ρομπότ συλλέγουν πληροφορίες μέσω των αισθητήρων που διαθέτουν, τις οποίες μοιράζονται με τα υπόλοιπα άτομα στο σμήνος. Ο κλάδος της Ρομποτικής Σμήνους είναι ένα αντικείμενο συνεχούς μελέτης, με το ευρευνητικό ενδιαφέρον να επικεντρώνεται στην διάταξη στον χώρο, την πλοήγηση και την λήψη αποφάσεων.

Η εργασία αυτή πραγματεύεται την πλοήγηση ρομποτικού σμήνους αποτελούμενο από πέντε τροχοφόρα ρομπότ. Ο στόχος είναι η διατήρηση του σχηματισμού που επιλέξαμε καθώς το σμήνος κινείται προς τον στόχο σε περιβάλλον με ύπαρξη εμποδίων.

Λέξεις Κλειδιά: ρομποτικό σμήνος, πλοήγηση, διατήρηση σχηματισμού

Abstract

Swarm Robotics is a constantly evolving field of Robotics. Swarm Robotics as a field owes its existence to the observation of the formation of animals in nature. Some examples of this behavior are, the formation of the migrating birds during migration, schools of fish and the navigation of ants to and from the colony.

The field of Swarm Robotics takes advantage of this property of living organisms. To imitate this behavior, several robots can be considered as a swarm. The robots collect information through the sensors that they carry. This information is then shared with the other individuals in the swarm. The field of Swarm Robotics is an object of continuous research, with most of the research interest dedicated to tasks such as robot layout in space, navigation and decision making.

The topic of the thesis is the navigation of a robotic swarm consisting of five wheeled robots. The goal is to maintain the chosen formation, as the swarms navigates to the goal in an environment with obstacles.

Keywords: robotic swarm, navigation, formation

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	1
1.1 Εισαγωγή στο θέμα της εργασίας.....	1
1.2 Αντικείμενο της εργασίας.....	2
1.3 Σχετική έρευνα.....	2
1.4 Δομή της εργασίας.....	6
Κεφάλαιο 2. Το πραγματικό ρομπότ	7
2.1 Παρουσίαση AmigoBot	7
2.1.1 Παρουσίαση των αισθητήρων του ρομπότ.....	8
2.1.2 Ασύρματη και ενσύρματη επικοινωνία.....	10
2.2 Τροποποιήσεις	10
2.3 Περιγραφή επικοινωνίας.....	15
2.3.1 Επικοινωνία ρομπότ – υπολογιστή	15
2.3.2 Επικοινωνία σμήνους – υπολογιστή.....	16
2.3.3 Επικοινωνία ρομπότ – ρομπότ στα πλαίσια του σμήνους	16
Κεφάλαιο 3. Ο Αλγόριθμος Πλοήγησης	17
3.1 Σύντομη περιγραφή του αλγόριθμου.....	17
3.2 Η προσέγγιση Αρχηγού – Ακόλουθου.....	17
3.3 Ο σχηματισμός του σμήνους	18
3.3.1 Η διατήρηση του σχηματισμού	22
3.4 Οι συναρτήσεις Δυναμικών Πεδίων.....	25
3.4.1 Το Ελκτικό Δυναμικό.....	28
3.4.2 Το Απωστικό Δυναμικό.....	30
3.4.3 Το συνολικό Δυναμικό.....	31
3.5 Η ροή του αλγόριθμου	33
Κεφάλαιο 4. Το περιβάλλον προσομοίωσης Gazebo	39
4.1 Περιγραφή του περιβάλλοντος.....	40
4.2 Η μοντελοποίηση του ρομπότ	42
4.2.1 Η μοντελοποίηση της κίνησης	44

4.2.2	<i>Η μοντελοποίηση των αισθητήρων.....</i>	46
4.2.3	<i>Η μοντελοποίηση του εικονικού κόσμου.....</i>	50
4.3	<i>Πειραματικά αποτελέσματα.....</i>	52
4.3.1	<i>Αρχικός σχηματισμός (Πρώτη φάση).....</i>	52
4.3.2	<i>Πλοήγηση σμήνους (Δεύτερη φάση)</i>	59
Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.		73
5.1	<i>Συμπεράσματα.....</i>	73
5.2	<i>Προτάσεις για μελλοντική έρευνα</i>	74

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή στο θέμα της εργασίας

Η ικανότητα πλοήγησης στο χώρο είναι μια σημαντική ιδιότητα για ένα ρομπότ. Ο όρος πλοήγηση αναφέρεται στην ικανότητα της ρομποτικής πλατφόρμας να κινηθεί από την τρέχουσα θέση στην οποία βρίσκεται προς μια επιθυμητή τελική θέση. Για την επιτυχή πλοήγηση ενός ρομπότ στον χώρο είναι απαραίτητη η γνώση της θέσης και του προσανατολισμού του ανα πάσα στιγμή στο χώρο. Ο προσδιορισμός της θέσης και του προσανατολισμού γίνεται ως προς ένα σταθερό σημείο αναφοράς στον χώρο. Αν πρόκειται για πλοήγηση στον διδιάστατο χώρο το σημείο αναφοράς συνήθως είναι η θέση $(0, 0)$, ή αλλιώς το σημείο τομής των αξόνων που ορίζουν τον χώρο. Ο προσανατολισμός του ρομπότ περιγράφεται ως η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ αυτού και του σημείου αναφοράς. Η γνώση της θέσης και του προσανατολισμού του ρομπότ αναφέρεται και ως εντοπισμός ρομπότ(robot localization).

Η προσέγγιση της Ρομποτικής Σμήνους βασίζεται στην συλλογική συμπεριφορά των ρομπότ του σμήνους για την επιτέλεση έργου. Η συλλογική συμπεριφορά των ρομπότ είναι το αποτέλεσμα της επικοινωνίας των ατόμων και της αλληλεπίδρασης τους με το περιβάλλον. Κάθε άτομο στο σμήνος συλλέγει πληροφορίες από το περιβάλλον με τους αισθητήρες που διαθέτει. Κάποια χρήσιμα παραδείγματα πληροφοριών από το περιβάλλον είναι, η θέση πιθανών εμποδίων στο χώρο, τα επίπεδα φωτεινότητας σε διάφορα σημεία του χώρου ή τα επίπεδα συγκέντρωσης κάποιου αερίου στον χώρο. Μετά την συλλογή των πληροφοριών και σύμφωνα με τον αλγόριθμο που εκτελείται, κάθε ρομπότ «μοιράζεται» τις πληροφορίες που έχει συλλέξει με τα υπόλοιπα άτομα στο σμήνος. Η συμπεριφορά αυτή οδηγεί σε ταχύτερη εξερεύνηση του χώρου από αυτή που θα πετύχαινε η χρήση ενός μόνο ρομπότ. Η τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε εφαρμογές όπως η ομαδοποίηση ρομπότ(clustering) αλλά και η πλοήγηση(navigation).

1.2 Αντικείμενο της εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε αλγόριθμος για την πλοήγηση ρομποτικού σμήνους, αποτελούμενο από πέντε τροχοφόρα ρομπότ. Αντλώντας έμπνευση από τον σχηματισμό των αποδημητικών πτηνών, επιλέχθηκε ο σχηματισμός που χρησιμοποιούμε. Εκτελώντας Συλλογική Κίνηση(Collective Movement), τα ρομπότ κινούνται με συνεκτικό τρόπο διατηρώντας τον επιλεγμένο σχηματισμό προς τον στόχο.

Ο αλγόριθμος που παρουσιάζεται έχει αναπτυχθεί με σκοπό την εκτέλεσή του στα πραγματικά ρομπότ του Εργαστηρίου Ρομποτικής του Τμήματος Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Όσον αφορά τα πραγματικά ρομπότ, έγιναν κάποιες απαραίτητες επεμβάσεις σε επίπεδο υλικού για την λειτουργία τους. Η ανάπτυξη του αλγόριθμου έγινε σε περιβάλλον προσομοίωσης. Λαμβάνοντας υπόψιν τα χαρακτηριστικά του πραγματικού ρομπότ έγινε η σχεδίαση του εικονικού μοντέλου που χρησιμοποιείται στο περιβάλλον προσομοίωσης. Η μοντελοποίηση έγινε πιστά στο πραγματικό ρομπότ, γεγονός που επιτρέπει την μεταφορά της εκτέλεσης από την προσομοίωση στην πραγματικότητα με σχεδόν μηδενικές αλλαγές στον κώδικα.

1.3 Σχετική έρευνα

Ο κλάδος της Ρομποτικής Σμήνους είναι ένα αντικείμενο συνεχούς μελέτης. Το μέγεθος του ερευνητικού ενδιαφέροντος στον συγκεκριμένο τομέα μπορεί να γίνει αντιληπτό από την πληθώρα των επιστημονικών άρθρων και συγγραμμάτων πάνω στην συγκεκριμένη θεματολογία.

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας η μελέτη ενός συνόλου άρθρων και συγγραμμάτων συνέβαλε όχι μόνο στην άντληση ιδεών για τον προσδιορισμό του θέματος της εργασίας αλλά και σε πιο συγκεκριμένα θέματα υλοποίησης. Σε αυτή την ενότητα θα περιγραφούν με συντομία οι επιστημονικές μελέτες που συμβουλευτήκαμε.

- Research Advance in Swarm Robotics [1]

Στο συγκεκριμένο άρθρο παρουσιάζεται η εξέλιξη του τομέα της Ρομποτικής Σμήνους. Με λεπτομέρεια περιγράφονται τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες ενός ρομποτικού σμήνους, ενώ δίνεται έμφαση στα πλεονεκτήματα της προσέγγισης με σμήνος ενάντια στην προσέγγιση με ένα μόνο ρομπότ. Ο συγγραφέας κάνει αναφορά σε στρατηγικές ελέγχου του σχηματισμού του

σμήνους, με σημαντικότερη την αναφορά στην μεθοδο των Συναρτήσεων Δυναμικού Πεδίου(Artificial Potential Functions). Η συγκεκριμένη μέθοδος θα χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο του σμήνους στον αλγόριθμο που αναπτύξαμε και θα περιγραφεί σε επόμενο κεφάλαιο.

- **Swarm Robotic Behaviors and Current Applications [2]**

Το θέμα του άρθρου είναι η περιγραφή και η κατηγοριοποίηση των διαφορετικών τρόπων «συμπεριφοράς» ενός ρομποτικού σμήνους. Ο όρος συμπεριφορά χρησιμοποιείται για να περιγραφεί το είδος του έργου(task) που επιτελεί το σμήνος (π.χ. πλοήγηση, λήψη αποφάσεων), αλλά και η κίνηση των ατόμων στο σμήνος. Τέλος, υπάρχουν αναφορές σε πραγματικά ρομποτικά σμήνη που αναπτύχθηκαν για ερευνητική ή βιομηχανική χρήση.

- **Adaptive Coordinated Motion Control for Swarm Robotics Based on Brain Storm Optimization [3]**

Η συγκεκριμένη δημοσίευση πραγματεύεται το θέμα της Συγχρονισμένης Κίνησης σε ρομποτικά σμήνη. Οι συγγραφείς παρουσιάζουν την προσέγγιση Αρχηγού-Ακόλουθου (Leader-Follower) για τον έλεγχο της κίνησης των ατόμων του σμήνους. Επιπρόσθετα, περιγράφουν το πρόβλημα της προσέγγισης αυτής. Ο έλεγχος με την προσέγγιση Leader-Follower απαιτεί το ρομπότ με την ιδιότητα του «αρχηγού» να γνωρίζει κάθε χρονική στιγμή τις ταχύτητες των ρομπότ «ακόλουθων». Όπως είναι αναμενόμενο, η απαίτηση αυτή αυξάνει τον όγκο των πληροφοριών που διαβιβάζονται. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας και για την ανάπτυξη του αλγόριθμου πλοήγησης, βασιστήκαμε στην προσέγγιση Leader-Follower. Τέλος, με την ανάπτυξη μιας επιπρόσθετης συμπεριφοράς λύσαμε το πρόβλημα που αναφέρθηκε, όπως θα περιγραφεί σε επόμενη ενότητα.

- **A Control Method for a Swarm of Plant Pot Robots that Uses Artificial Potential Fields for Effective Utilization of Sunlight [4]**

Στην συγκεκριμένη δημοσίευση παρουσιάζεται μια εφαρμογή της Ρομποτικής Σμήνους με στόχο την καλύτερη αξιοποίηση του ηλιακού φωτός για την φωτοσύνθεση. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται ένα σμήνος τροχοφόρων ρομπότ σε κάθε ένα από τα οποία έχει τοποθετηθεί ένα φυτό. Ο στόχος είναι η πλοήγηση του σμήνους από περιοχές με χαμηλά επίπεδα φωτός προς την περιοχή με την μεγαλύτερη φωτεινότητα. Τα ρομπότ που απαρτίζουν το σμήνος κινούνται στον

χώρο σύμφωνα με μεθοδο των Συναρτήσεων Δυναμικού Πεδίου(Artificial Potential Functions). Εκτός αυτού, για την εξασφάλιση της ορθής λειτουργίας του συστήματος, τα ρομπότ είναι ικανά να αποφύγουν τυχόν εμπόδια ή άλλα ρομπότ αξιοποιώντας την ίδια μέθοδο. Η συλλογή των απαραίτητων πληροφοριών για την πλοήγηση (επίπεδα φωτεινότητας, ύπαρξη εμποδίων) γίνεται με την χρήση διάφορων αισθητήρων. Η συμπεριφορά που επιτυγχάνεται είναι η ομαλή μετακίνηση όλων των φυτών-ρομπότ στην περιοχή με υψηλότερη φωτεινότητα.

- **Leader-Follower Formation Control Using Artificial Potential Functions: A Kinematic Approach [5]**

Η δημοσίευση αυτή παρουσιάζει μια τεχνική για τον έλεγχο του σχηματισμού ενός σμήνους τροχοφόρων ρομπότ, βασισμένη στην προσέγγιση Leader-Follower. Για την αποφυγή των εμποδίων αλλά και την πλοήγηση του ρομπότ-αρχηγού χρησιμοποιείται η μέθοδος των Συναρτήσεων Δυναμικού Πεδίου. Τα υπόλοιπα ρομπότ(ακόλουθοι) προσεγγίζουν την τροχιά του αρχηγού. Το κριτήριο για τον έλεγχο του σμήνους είναι η διατήρηση της προκαθορισμένης απόστασης μεταξύ του αρχηγού και του κάθε ρομπότ-ακόλουθου.

- **Differentially Driven Robots Moving in Formation Leader-Follower Approach [6]**

Το συγκεκριμένο άρθρο, όπως προδίδει και ο τίτλος του, περιγράφει την κίνηση ενός σμήνους ρομπότ αξιοποιώντας την προσέγγιση Leader-Follower. Σύμφωνα με την υλοποίηση που προτείνεται εδώ, το ρομπότ-αρχηγός εκτελεί μια προκαθορισμένη τροχιά. Τα υπόλοιπα ρομπότ-ακόλουθοι προσεγγίζουν την τροχιά του αρχηγού χρησιμοποιώντας την μέθοδο των Συναρτήσεων Δυναμικού Πεδίου, τόσο για την πλοήγηση αλλά και για την αποφυγή εμποδίων. Σημαντικό σημείο ελέγχου και σε αυτή την προσέγγιση είναι η διατήρηση σταθερής απόστασης μεταξύ αρχηγού και ακόλουθων ρομπότ.

Από την μελέτη των δημοσιεύσεων [5], [6] είναι ασφαλές να ισχυριστούμε πως ο σημαντικότερος παράγοντας ελέγχου για την διατήρηση του σχηματισμού σε ένα ρομποτικό σμήνος είναι η απόσταση κάθε ατόμου από τον αρχηγό. Το συμπέρασμα αυτό ισχύει, είτε πρόκειται για πλοήγηση στον χώρο, είτε για την ακολούθηση προκαθορισμένης τροχιάς.

- Principles of Robot Motion [7]

Η μελέτη του συγκεκριμένου συγγράμματος συνεισέφερε σημαντικά στην ανάπτυξη του αλγόριθμου πλοήγησης. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε το τέταρτο κεφάλαιο, το οποίο πραγματεύεται την μέθοδο των Συναρτήσεων Δυναμικού Πεδίου (Artificial Potential Functions). Όπως θα περιγραφεί σε επόμενη ενότητα, η χρήση των Συναρτήσεων Δυναμικού Πεδίου συνθέτει ένα τμήμα του προφίλ της κίνησης του ρομποτικού σμήνους.

1.4 Δομή της εργασίας

Αρχικά, στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το πραγματικό ρομπότ πάνω στο οποίο σχεδιάστηκε ο αλγόριθμος. Γίνεται αναφορά στα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του, ενώ περιγράφονται και οι τροποποιήσεις που έγιναν για την λειτουργία του. Τέλος, περιγράφεται η επικοινωνία του ρομπότ, τόσο σαν μονάδα αλλά και σαν σμήνος με τον υπολογιστή.

Στο Κεφάλαιο 3, περιγράφεται διεξοδικά ο αλγόριθμος πλοήγησης που αναπτύχθηκε. Διαφορετικές ενότητες αφιερώνονται στην παρουσίαση κάθε πτυχής της σχεδίασης του αλγόριθμου, π.χ. ο σχηματισμός του ρομποτικού σμήνους.

Στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζεται το περιβάλλον προσομοίωσης Gazebo, το οποίο χρησιμοποιήθηκε κατά την ανάπτυξη του αλγόριθμου. Στην συνέχεια, αναφέρεται η διαδικασία της μοντελοποίησης του πραγματικού ρομπότ στο περιβάλλον προσομοίωσης. Τέλος, επιβεβαιώνεται η ορθή λειτουργία του αλγόριθμου με την παρουσίαση διαγραμμάτων.

Στο Κεφάλαιο 5, αναφέρονται συνοπτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την ανάπτυξη του αλγόριθμου πλοήγησης και την συμπεριφορά του ρομποτικού σμήνους. Τέλος, προτείνονται κάποιες ιδέες για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 2. Το πραγματικό ρομπότ

2.1 Παρουσίαση AmigoBot

Όπως αναφέρθηκε στο εισαγωγικό κεφάλαιο, ο αλγόριθμος πλοήγησης αναπτύχθηκε με στόχο την εκτέλεσή του σε πραγματικά ρομπότ. Συγκεκριμένα, πρόκειται για το μοντέλο AmigoBot της εταιρίας Adept MobileRobots. Πρόκειται για ένα ρομπότ διαφορικής οδήγησης και μικρών διαστάσεων. Σχεδιάστηκε για εκπαιδευτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, ενώ είναι εξοπλισμένο με έναν αριθμό από αισθητήρες. Το ρομπότ διαθέτει τον επεξεργαστή Renesas SH2-7144, ο οποίος εκτελεί το λειτουργικό σύστημα του ρομπότ (AmigoOS).[8][9]

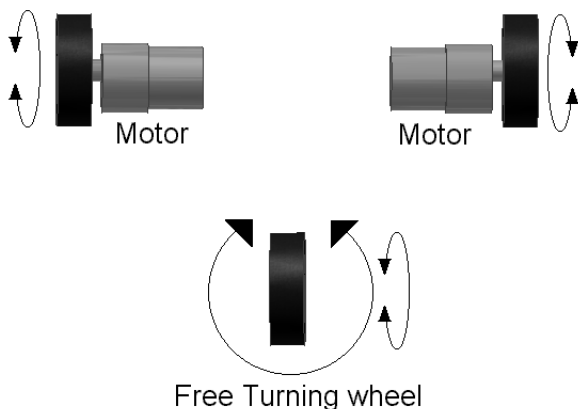


Εικόνα 1. Η μορφή του ρομπότ

Στην Εικόνα 1, παρουσιάζεται η μορφή της ρομποτικής πλατφόρμας όπως αποτυπώνεται στην ιστοσελίδα του κατασκευαστή. Υπάρχει μια πληθώρα εξαρτημάτων συμβατά με το συγκεκριμένο ρομπότ. Αν και εδώ παρουσιάζεται το βασικό μοντέλο, τα ρομπότ που έχουμε στην κατοχή μας φέρουν κάποια έξτρα εξαρτήματα, τα οποία θα περιγραφούν στην συνέχεια.

Με τον όρο ρομπότ διαφορικής οδήγησης περιγράφουμε τον τρόπο κίνησης του ρομπότ. Συγκεκριμένα, η κίνηση των ρομπότ αυτού του τύπου βασίζεται σε δύο ξεχωριστούς επενεργητές. Οι επενεργητές, συγκεκριμένα για τα τροχοφόρα ρομπότ οι κινητήρες, περιστρέφουν τις ρόδες με κάποια δεδομένη ταχύτητα. Ελέγχοντας κάθε χρονική στιγμή την ταχύτητα περιστροφής των κινητήρων μπορούμε να ελέγξουμε την κίνηση του ρομπότ. Η αλλαγή του προσανατολισμού του ρομπότ ωφείλεται στην διαφορά της

ταχύτητας περιστροφής των κινητήρων. Με αυτή την διάταξη των κινητήρων(Εικόνα 2) το ρομπότ μπορεί να αλλάξει προσανατολισμό, χωρίς να χρειάζεται κάποιο επιπλέον σύστημα διεύθυνσης. Επιπροσθέτως, εκτός από την ύπαρξη των δύο διαφορεικά οδηγούμενων τροχών εκατέρωθεν του πλαισίου του ρομπότ, απαραίτητη είναι και η ύπαρξη ενός τρίτου τροχού για την διατήρηση της ισορροπίας. Η ύπαρξη αυτού του τροχού ωφείλεται αποκλειστικά και μόνο στην διατήρηση της ισορροπίας, χωρίς να υπάρχει κάποιος επενεργητής στον τροχό αυτο. Η κίνηση του είναι ελεύθερη, ώστε να μπορεί να ακολουθεί την κίνηση του επιβάλουν οι επενεργητές προσφέροντας σταθερότητα στο ρομπότ. Ο ελεύθερος τροχός συχνά αναφέρεται και ως ‘caster wheel’.



Εικόνα 2. Αναπαράσταση της θέσης των επενεργητών ενός ρομπότ διαφορικής οδήγησης.



Εικόνα 3. Αναπαράσταση ενός caster wheel.

2.1.1 Παρουσίαση των αισθητήρων του ρομπότ

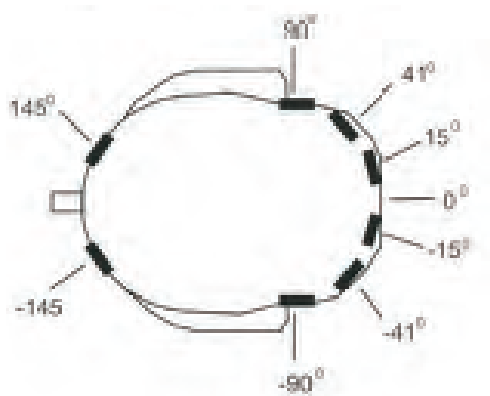
Η συμπεριφορά του ρομπότ βασίζεται στην λειτουργία των αισθητήρων που διαθέτει. Το AmigoBot διαθέτει δυο τύπους αισθητήρων, περιστροφικούς κωδικοποιητές(rotary encoders) και αισθητήρες σόναρ.

Οι περιστροφικοί κωδικοποιητές είναι αισθητήρες περιστροφής. Τοποθετούνται στον άξονα των κινητήρων και καταγράφουν την περιστροφή του άξονα. Στην συνέχεια γίνεται επεξεργασία του σήματος που παράγουν οι κωδικοποιητές, το οποίο μετατρέπεται σε πληροφορία για την θέση, τον προσανατολισμό και την τρέχουσα ταχύτητα του ρομπότ. Με αυτό τον τρόπο, γνωρίζουμε ανα πάσα στιγμή την θέση και τον προσανατολισμό κάθε ρομπότ στον χώρο. Η χρήση των περιστροφικών κωδικοποιητών είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη όχι μόνο στον τομέα της ρομποτικής, αλλά και στην

κατασκευή ηλεκτρονικών συσκευών που απαιτούν γνώση της θέσης για την λειτουργία τους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η χρήση τους σε φωτογραφικούς φακούς αλλά και σε ποντίκια παλαιότερης τεχνολογίας.

Το Amigobot είναι εξοπλισμένο με αισθητήρες σόναρ για την ανίχνευση εμποδίων στον χώρο. Στην Εικόνα1 μπορούμε να παρατηρήσουμε την μορφή των σόναρ. Πρόκειται για τους κυκλικούς δίσκους που είναι τοποθετημένοι περιμετρικά του σώματος του ρομπότ.

Η λειτουργία των σόναρ αξιοποιεί την ανάκλαση των ηχητικών κυμάτων για τον εντοπισμό αντικείμενων. Συγκεκριμένα, η εφαρμογή τους στο ρομπότ είναι η εξής: Κατά την λειτουργία τους, το κάθε σόναρ παράγει ένα ηχητικό κύμα. Τα κύματα ταξιδεύουν στον χώρο και στην περίπτωση πρόσκρουσης με κάποιο αντικείμενο, ανακλώνται πίσω και λαμβάνονται ως σήμα από το σόναρ που το εξέπεμψε. Στην συνέχεια, το λειτουργικό σύστημα του ρομπότ επεξεργάζεται τα σήματα και υπολογίζει την απόσταση στην οποία ανιχνεύτηκε το εμπόδιο. Την πληροφορία αυτή χρησιμοποιούμε μέσω αλγόριθμων για την αποφυγή του συγκεκριμένου εμποδίου. Αξίζει να αναφερθεί σε αυτό το σημείο πως η μόνη πληροφορία που μπορούμε να λάβουμε από τα σόναρ είναι οι αποστάσεις των εμποδίων στον χώρο. Συνεπώς, τα σόναρ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ανίχνευση εμποδίων ή χαρτογράφηση του χώρου, αλλά δεν προσφέρουν κάποια μέθοδο αναγνώρισης των διαφορετικών εμποδίων.



Εικόνα 4. Η κατανομή των σόναρ στο σώμα το ρομπότ.

Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 4, το Amigobot διαθέτει 8 αισθητήρες σόναρ τοποθετημένους υπο γωνία. Η τοποθέτηση των αισθητήρων προσφέρει στο ρομπότ ένα «οπτικό πεδίο» περιμετρικά του σώματός του. Η πληροφορία που λαμβάνουμε σε επίπεδο προγραμματισμού είναι ένας πίνακας 8 θέσεων. Κάθε θέση αντιστοιχεί στις μετρήσεις καθενός από τα σόναρ. Επιπροσθέτως, με την γνώση της γωνίας τοποθέτησης

του κάθε σόναρ μπορούμε να αποφανθούμε και για τη γωνία στην οποία ανιχνεύτηκε ένα εμπόδιο.

Πρίν από την χρήση των αισθητήρων για την πλοήγηση, ήταν αναγκαία η μελέτη της ακρίβειάς τους μέσω πειραμάτων. Τοποθετώντας εμπόδια σε κάποια απόσταση περιμετρικά του ρομπότ, συγκρίναμε τις ενδείξεις του κάθε σόναρ με την πραγματική απόσταση στο επίπεδο. Σε κάθε γύρο των πειραμάτων μετακινούμε τα εμπόδια 10 εκατοστά πιο μακριά ξεκινώντας από τα 10 εκατοστά μέχρι και το ένα μέτρο. Με αυτό τον τρόπο εξετάσαμε την επίδραση της απόστασης στην ακρίβεια των αισθητήρων. Κατά την πειραματική μελέτη παρατηρήθηκε μια σταθερή απόκλιση 16 εκατοστών από την πραγματική απόσταση. Πρόκειται για την τιμή του μέσου σφάλματος των αισθητήρων, την οποία λαμβάνουμε υπόψιν κατά την πλοήγηση.

2.1.2 Ασύρματη και ενσύρματη επικοινωνία

Το ρομπότ μπορεί να ελεγχθεί από ηλεκτρονικό υπολογιστή ή λαπτοπ μέσω ασύρματης ή ενσύρματης επικοινωνίας. Η ενσύρματη επικοινωνία επιτυγχάνεται μέσω της σειριακής θύρας RS-232, που βρίσκεται στο κάτω μέρος του ρομπότ. Η επικοινωνία αυτού του τύπου απαιτεί την σύνδεση του ρομπότ και του υπολογιστή με καλώδιο καθ' όλη την διάρκεια της λειτουργίας.

Τα ρομπότ του εργαστηρίου Ρομποτικής διαθέτουν ως πρόσθετο εξάρτημα συσκευή ασύρματης επικοινωνίας(Wireless Ethernet-to-Serial device). Η συσκευή αυτή αξιοποιεί την σειριακή θύρα RS-232 και μετατρέπει τα σειριακά δεδομένα που παράγει το ρομπότ σε πλαίσια Ethernet με σκοπό την διάδοση τους σε ένα ασύρματο δίκτυο Wi-Fi. Στην συνέχεια, αρκεί να λάβουμε τα δεδομένα στον υπολογιστή που χρησιμοποιούμε, ο οποίος είναι συνδεδεμένος στο ίδιο δίκτυο. Η επικοινωνία ρομπότ-υπολογιστή είναι αμφίδρομη. Ο υπολογιστής στέλνει μέσω του δικτύου τις εντολές για τον έλεγχο του ρομπότ, ενώ το ρομπότ στέλνει τις πληροφορίες των αισθητήρων του (θέση, προσανατολισμός, μετρήσεις σόναρ, κ.α.).

2.2 Τροποποιήσεις

Για την λειτουργία των πέντε AmigoBot, που διαθέτει το εργαστήριο Ρομποτικής ήταν απαραίτητες να γίνουν κάποιες τροποποιήσεις σε επίπεδο υλικού. Με δεδομένη την αναλώσιμη φύση των μπαταριών, ήταν αναγκαίο να αντικατασταθούν οι μπαταρίες μολύβδου που τοποθετήθηκαν από τον κατασκευαστή. Οι μπαταρίες που τοποθετήσαμε είναι τύπου Λιθίου(li-po batteries), έχουν μικρότερο μέγεθος και βάρος αλλά και

μεγαλύτερη χωρητικότητα. Έγινε αντικατάσταση των τερματικών στα καλώδια τροφοδοσίας των ρομπότ, με τερματικά τύπου XT-60 για εύκολη σύνδεση και αποσύνδεση των μπαταριών. Για την συγκεκριμένη τροποποίηση ήταν απαραίτητη η ανάγνωση του Τεχνικού Εγχειριδίου Οδηγιών του ρομπότ[10].



Εικόνα 5. Σύγκριση των μπαταριών

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται η σύγκριση των μπαταριών. Στην κορυφή, έχουμε την μπαταρία λιθίου η οποία αντικαθιστά τις δυο μπαταρίες μολύβδου. Μετά την αντικατάσταση το ρομπότ είναι αρκετά ελαφρύτερο. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την μεγαλύτερη χωρητικότητα επιτρέπει μεγαλύτερη διάρκεια χρήσης με μια μόνο φόρτιση.

Η φόρτιση των μπαταριών γίνεται με έναν φορτιστή μπαταριών Li-Po. Για την φόρτιση οι μπαταρίες αποσυνδέονται από τα ρομπότ και φορτίζουν ξεχωριστά. Τέλος, η ύπαρξη του δεύτερου βύσματος επιτρέπει την εξισοροποιημένη φόρτιση των μπαταριών επεκτείνοντας έτσι την συνολική διάρκεια ζωής τους.



Εικόνα 6. Φόρτιση μπαταριών

Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται ο τρόπος φόρτισης των μπαταριών καθώς και οι παράμετροι της φόρτισης(Ρεύμα φόρτισης: 2.0A και τάση φόρτισης: 14.8V).

Η δεύτερη τροποποίηση που έγινε αφορά την ασύρματη επικοινωνία των ρομπότ με τον υπολογιστή. Συγκεκριμένα, έγινε τροποποίηση των ρυθμίσεων των συσκευών ασύρματης επικοινωνίας και δόθηκαν νέες στατικές διευθύνσεις IP. Σαν αποτέλεσμα αυτής την ενέργειας, κάθε ρομπότ έχει μια μοναδική διεύθυνση IP στο δίκτυο, η οποία χρησιμοποιείται για την επικοινωνία του με τον υπολογιστή. Το δίκτυο που χρησιμοποιείται είναι το διαθέσιμο δίκτυο στο εργαστήριο ρομποτικής(cs-wireless). Στην περίπτωση που θέλουμε να αλλάξουμε το δίκτυο μέσω του οποίου επικοινωνούν τα ρομπότ, πρέπει να γίνει εκ νέου επεξεργασία των ρυθμίσεων και απόδοση νέων στατικών IP διευθύνσεων. Οι νέες διευθύνσεις IP καθώς και ο αριθμός της θύρας TCP(απαραίτητες πληροφορίες για την σύνδεση) αναγράφονται στο σώμα του κάθε ρομπότ. Για επεμβάσεις στις ρυθμίσεις των συσκευών επιβάλλεται η ανάγνωση του εγχειριδίου οδηγιών του κατασκευαστή[11].



Εικόνα 7. Η συσκευή ασύρματης επικοινωνίας



Εικόνα 8. Η κάτω όψη του ρομπότ.

Στην Εικόνα 7 παρουσιάζεται η συσκευή ασύρματης επικοινωνίας αποσυνδεδεμένη από το ρομπότ. Στην Εικόνα 8, βλέπουμε την κάτω όψη ενός από τα ρομπότ του εργαστηρίου. Παρατηρούμε την συσκευή ασύρματης επικοινωνίας πλήρως συνδεδεμένη με το ρομπότ. Οι απαιτούμενες συνδέσεις είναι οι εξής: Η τροφοδοσία, η οποία επιτυγχάνεται μέσω της πλακέτας του ρομπότ, η σύνδεση στην σειριακή θύρα RS-232 και η σύνδεση κεραίας. Η κεραία συνδέεται στην συσκευή και τοποθετείται στο σώμα του ρομπότ.



Εικόνα 9. Η πάνω όψη του ρομπότ.

Στην Εικόνα 9 παρουσιάζεται η πάνω όψη του ρομπότ. Εύκολα μπορεί να παρατηρηθεί η θέση της μπαταρίας, η θέση της κεραίας και η αναγραφή με τις λεπτομέρειες σύνδεσης. Η θέση της μπαταρίας αποφασίστηκε να είναι στο εξωτερικό του ρομπότ, με στόχο την εύκολη αφαίρεσή της για την φόρτιση. Σε άλλη περίπτωση, θα έπρεπε να γίνεται αποσυναρμολόγηση του ρομπότ κάθε φορά που απαιτείται φόρτιση.

Τέλος, για την μελλοντική χρήση των ρομπότ θα γραφεί ένας σύντομος οδηγός για την χρήση τους.

2.3 Περιγραφή επικοινωνίας

Ο έλεγχος των ρομπότ προϋποθέτει την επικοινωνία τους με τον υπολογιστή. Στην πλευρά του υπολογιστή είναι αναγκαία η ύπαρξη μια διεπαφής η οποία θα μας επιτρέψει να αναπτύξουμε ρομποτικές εφαρμογές. Η πιο διαδεδομένη διεπαφή είναι το ROS (Robot Operating System). Το ROS παρέχει ένα σύνολο απο βιβλιοθήκες και οδηγούς (drivers). Σε επίπεδο προγραμματισμού και με μια από τις δύο γλώσσες συμβατές με το ROS (Python ή C++), χρησιμοποιούμε τις διαθέσιμες βιβλιοθήκες για την ανάπτυξη ρομποτικών εφαρμογών. Για παράδειγμα, η ανάθεση ταχυτήτων στους κινητήρες ενός τροφόρου ρομπότ είναι μια λειτουργία που επιτυγχάνεται αξιοποιώντας τις δομές που προσφέρει το ROS.[12]

2.3.1 Επικοινωνία ρομπότ – υπολογιστή

Όπως αναφέρθηκε, ο προγραμματισμός ρομποτικών εφαρμογών βασίζεται στο ROS. Στην συνέχεια, για την σύνδεση στο πραγματικό ρομπότ χρησιμοποιούμε την διεπαφή RosAria[13]. Η διεπαφή αυτή επιτρέπει την σύνδεση με το ρομπότ και την πρόσβαση στις πληροφορίες που αυτό συλλέγει. Η σύνδεση κάθε ρομπότ γίνεται με τις πληροφορίες που αναφέρθηκαν στην ενότητα 2.2.

Η αρχιτεκτονική του ROS περιγράφεται από έναν γράφο. Κατά την εκτέλεση της εφαρμογής προτίθενται κόμβοι, οι οποίοι εξυπηρετούν διάφορες ενέργειες. Γενικότερα, ένας κόμβος είναι μια μονάδα η οποία εκτελεί κάποιον υπολογισμό. Για παράδειγμα, η διεπαφή RosAria είναι ένας κόμβος του γραφήματος. Στην υλοποίηση του αλγόριθμου πλοήγησης, όπως θα σχολιαστεί και στην κατάλληλη ενότητα, δημιουργούμε πέντε κόμβους, οι οποίοι αντιστοιχούν σε κάθε ρομπότ και εκτελούν υπολογισμούς.

Μια χρήσιμη έννοια είναι το topic. Ένα topic μπορεί να θεωρηθεί ως ένα κανάλι μέσα στο οποίο υπάρχει ροή πληροφορίας. Σε ένα ρομπότ έχουμε την ύπαρξη ενός πλήθους topic. Κάθε topic περιέχει διαφορετικές πληροφορίες. Για παράδειγμα, το topic “/odom” περιέχει πληροφορίες για την θέση και τον προσανατολισμό του ρομπότ. Κατά την ανάπτυξη της εφαρμογής, ένας κόμβος(συνήθως το πρόγραμμα που αναπτύσσουμε), εγγράφεται σε έναν αριθμό από topics για να έχει πρόσβαση στις πληροφορίες του. Με την σύνδεση ρομπότ – υπολογιστή μέσω της διεπαφής RosAria έχουμε πρόσβαση σε ένα πλήθος απο topic.

Η ροή της πληροφορίας μέσα στα topics γίνεται με την μορφή μηνυμάτων (ROS Messages). Κάθε topic στέλνει το κατάλληλο μήνυμα για τις πληροφορίες που περιέχει.

Τέλος, η επικοινωνία ρομπότ – υπολογιστή επιτυγχάνεται μέσω της αμφίδρομης ανταλλαγής μηνυμάτων στα κατάλληλα topics. Στην συνέχεια, οι πληροφορίες αξιοποιούνται μέσω αλγόριθμων για το προσδιορισμό της συμπεριφοράς του ρομπότ.

2.3.2 Επικοινωνία σμήνους – υπολογιστή

Για τον έλεγχο του ρομποτικού σμήνους, είναι απαραίτητη η σύνδεση με τον υπολογιστή στον οποίο εκτελούμε τον αλγόριθμο. Με τις πληροφορίες σύνδεσης του κάθε ρομπότ, δημιουργούμε κόμβους της διεπαφής RosAria. Η σύνδεση του κάθε ρομπότ έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία πέντε κόμβων της διεπαφής, οι οποίοι αριθμούνται ως εξής RosAria1, RosAria2, κ.ο.κ. Τέλος, χρησιμοποιώντας το κατάλληλο όνομα κάποιου κόμβου RosAria σε συνδυασμό με το όνομα του κατάλληλου topic, έχουμε πρόσβαση στο συγκεκριμένο είδος πληροφορίας ενός συγκεκριμένου ρομπότ. Για παράδειγμα, με την εγγραφή στο topic RosAria1/cmd_vel μπορούμε να μάθουμε την γραμμική και την γωνιακή ταχύτητα του πρώτου ρομπότ στο σμήνος.

2.3.3 Επικοινωνία ρομπότ – ρομπότ στα πλαίσια του σμήνους

Σύμφωνα με την ενότητα 2.3.1, ο κώδικας που εκτελείται για τον χειρισμό κάθε ενός από τα ρομπότ του σμήνους αποτελεί έναν κόμβο στο γράφημα του ROS. Για τις ανάγκες των εφαρμογών πολλές φορές χρειαζόμαστε την επικοινωνία μεταξύ των ρομπότ του σμήνους, εκτός από την αναγκαία επικοινωνία καθενός με τον υπολογιστή. Με βάση τα όσα περιγράφηκαν, οι κόμβοι που αντιστοιχούν στα ρομπότ του σμήνους μπορούν να εγγραφούν στα topics των υπόλοιπων ρομπότ. Έτσι, πραγματοποιείται η επικοινωνία των ατόμων μέσα στο σμήνος και η διαμοίραση πληροφοριών. Η τεχνική αυτή επιτρέπει για παράδειγμα στο ρομπότ1 την γνώση της θέσης του ρομπότ2.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιούμε αυτή την τεχνική, ώστε να πετύχουμε συγχρονισμένη κίνηση στα άτομα του σμήνους. Εκτός αυτού, χρησιμοποιούμε την προσέγγιση αρχηγού – ακόλουθου. Η επικοινωνία ρομπότ – ρομπότ είναι αναγκαία στην προσέγγιση που χρησιμοποιούμε, καθώς ο αρχηγός χρειάζεται γνώση της κατάστασης του ακολούθων κάθε χρονική στιγμή.

Κεφάλαιο 3. Ο Αλγόριθμος

Πλοήγησης

3.1 Σύντομη περιγραφή του αλγόριθμου

Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγραφεί ο αλγόριθμος πλοήγησης που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Κάθε ενότητα αφιερώνεται και σε ένα διαφορετικό ζήτημα του αλγόριθμου. Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται θέματα όπως η κίνηση των ρομπότ και η αποφυγή εμποδίων, ο σχηματισμός του σμήνους, η διατήρησή του, κ.α. Στην τελευταία ενότητα περιγράφουμε την ροή του αλγόριθμου συνολικά. Συνοπτικά, ο στόχος του αλγόριθμου είναι η πλοήγηση του ρομποτικού σμήνους από την αρχική θέση στην θέση στόχο διατηρώντας κατά την πλοήγηση τον επιλεγμένο σχηματισμό.

3.2 Η προσέγγιση Αρχηγού – Ακόλουθου

Η προσέγγιση Αρχηγού-Ακόλουθου είναι μια τεχνική χειρισμού του ρομποτικού σμήνους, η οποία απαιτεί την ανάθεση ρόλων και την διαφοροποίηση των αρμοδιοτήτων των ρομπότ στην λειτουργία του σμήνους. Για την επίτευξη της επιθυμητής συμπεριφοράς είναι αναγκαίο να αναθέσουμε ρόλους σε κάθε ρομπότ του σμήνους. Η γεωμετρία του επιλεγμένου σχηματισμού καθώς και οι ενέργειες για την διατήρησή του, επιβάλλουν τον καθορισμό των ρόλων ρομπότ-αρχηγός και ρομπότ-ακόλουθος.

Ο ρόλος του ρομπότ-αρχηγού είναι καταλυτικός για την διατήρηση του σχηματισμού. Ο αρχηγός ορίζει το σημείο αναφοράς για τις θέσεις των ακόλουθων και καθορίζει τον προσανατολισμό του σχηματισμού. Ο αρχηγός είναι το μόνο ρομπότ που κινείται ελεύθερα στον χώρο χωρίς να δεσμεύεται από ενέργειες διατήρησης σχηματισμού. Επιπλέον, ο αρχηγός γνωρίζει την θέση των ακολούθων κάθε χρονική στιγμή, ενώ έχει την ικανότητα αμφίδρομης επικοινωνίας με τα υπόλοιπα άτομα στο σμήνος. Η αμφίδρομη επικοινωνία χρησιμοποιείται για σηματοδότηση. Μέσω των ιδιοτήτων αυτών, ο αρχηγός είναι σε θέση να διατηρεί την συνοχή του σχηματισμού.

Ο ρόλος των ρομπότ-ακόλουθων είναι λιγότερο επιφορτισμένος από αυτόν του αρχηγού. Οι ακόλουθοι πλοηγούνται προς τις επιθυμητές θέσεις, οι οποίες ορίζονται από τον

αρχηγό αλλά η διαδικασία του υπολογισμού της είναι καθαρά κατανοητή εργασία. Οι ακόλουθοι δεν γνωρίζουν το σημείο στόχο, η γνώση του στόχου είναι ιδιότητα μόνο του αρχηγού. Οι ακόλουθοι προσεγγίζουν με μεγάλη ακρίβεια τις θέσεις που συμπληρώνουν τον σχηματισμό. Μέσω της αμφίδρομης επικοινωνίας με τον αρχηγό στα πλαίσια της σηματοδότησης εξασφαλίζεται η αποφυγή σύγκρουσης των ατόμων του σμήνους.

Με βάση την συμβολή των δύο διαφορετικών ρόλων στην συνολική συμπεριφορά του σμήνους μπορούμε να αποδόσουμε και τον ανάλογο βαθμό ευθύνης σε κάθε ρόλο. Η πλοήγηση και ο σχηματισμός με βεβαιότητα θα αποτύχουν στο ενδεχόμενο της πτώσης του κόμβου του αρχηγού. Το σμήνος δεν είναι δυνατόν να συσταθεί χωρίς την ύπαρξη του αρχηγού. Το ενδεχόμενο της δυσλειτουργίας κάποιου ακόλουθου δεν επηρεάζει την ολοκλήρωση του αλγόριθμου. Όπως αναφέρθηκε, οι ακόλουθοι λειτουργούν κατανοητά και έτσι η πτώση κάποιου ακόλουθου δεν επηρεάζει τα υπόλοιπα ρομπότ.

Τέλος, θα σχολιάσουμε τον όρο «στόχος» ή «τελική θέση του σμήνους». Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό η τελική θέση της πλοήγησης δίνεται ως παράμετρος κατά την έναρξη του αλγόριθμου. Με το όρο «στόχος» περιγράφουμε την τελική κατάσταση κατά την οποία ο αρχηγός έχει φτάσει στην τελική θέση που δόθηκε ως παράμετρος και οι ακόλουθοι βρίσκονται ακινητοποιημένοι στις θέσεις που συμπληρώνουν τον σχηματισμό. Με αυτή την παραδοχή μπορούμε να ορίσουμε τελικές θέσεις και για τους ακόλουθους, οι οποίες εξαρτώνται από την τελική θέση του αρχηγού.

3.3 Ο σχηματισμός του σμήνους

Ένα σημαντικό ζήτημα για την οργάνωση αλλά και την συλλογική κίνηση του ρομποτικού σμήνους είναι η επιλογή του σχηματισμού. Με την έννοια του σχηματισμού περιγράφουμε την συμπεριφορά του σμήνους στον χώρο. Ένας σχηματισμός μπορεί να έχει την μορφή οποιουδήποτε γνωστού γεωμετρικού σχήματος. Όπως προκύπτει από την μελέτη της βιβλιογραφίας, η σχετική θέση των ρομπότ καθορίζει άμεσα την μορφή του σχηματισμού. Ωστόσο, ο καθορισμός ενός αυστηρού σχηματισμού δεν είναι απαραίτητος για την ύπαρξη ενός σμήνους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ένα σμήνος αποτελούμενο από μυρμήγκια.

Ο σχηματισμός που επιλέχθηκε στην παρούσα εργασία προέκυψε ως απόρροια της παρατήρησης της συμπεριφοράς των αποδημητικών πτηνών. Κατά την μετανάστευση αρκετά είδη πτηνών οργανώνονται και πετούν σε σχήμα τριγώνου. Η συμπεριφορά αυτή απαιτεί την εκλογή ενός ατόμου το οποίο θα οδηγεί τον σχηματισμό. Η ανάγκη τους για σχηματισμό είναι κυρίως βιολογική, καθώς η αεροδυναμική ιδιότητα του σχήματος

βοηθά στην αποδοτικότερη αξιοποίηση των ρευμάτων και επιτρέπει στο σμήνος να ταξιδεύει μεγαλύτερες αποστάσεις. Την συγκεκριμένη αρχή εκμεταλλεύονται και τα μαχητικά αεροσκάφη, τα οποία συχνά μπορούν να παρατηρηθούν να πετούν σε σχηματισμό V.

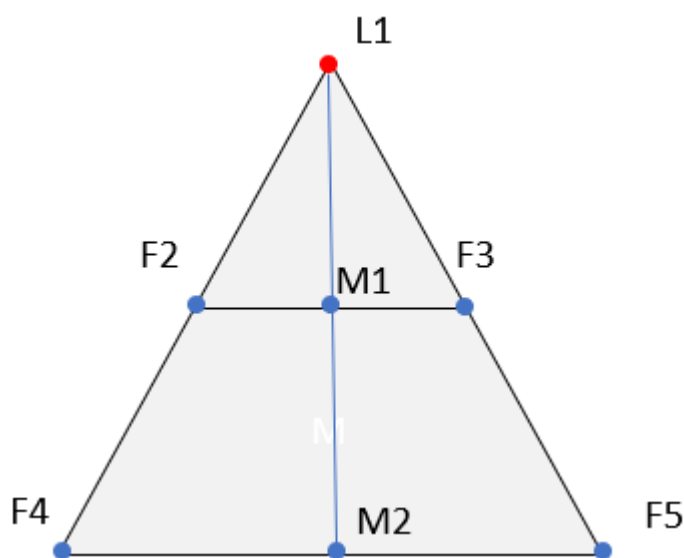


Εικόνα 10. Ο Σχηματισμός V στην φύση



Εικόνα 11. Ο σχηματισμός V κατά την πτήση αεροσκαφών

Στην ρομποτική εφαρμογή που αναπτύξαμε χρησιμοποιούμε τον σχηματισμό τριγώνου. Αναθέτουμε σε ένα ρομπότ την ιδιότητα του αρχηγού και στα υπόλοιπα την ιδιότητα του ακόλουθου. Όπως προαναφέρθηκε, ο αριθμός των ρομπότ που έχουμε στην διάθεσή μας είναι πέντε. Γεγονός που μας επιτρέπει να κατασκευάσουμε ένα τρίγωνο συμμετρικό ως προς μια διάμεσό του. Η περιγραφή του σχηματισμού με ένα αυστηρώς καθορισμένο γεωμετρικό σχήμα, μας επιτρέπει να γνωρίζουμε χαρακτηριστικά του τριγώνου όπως, τα μήκη των ευθυγράμμων τμημάτων που το αποτελούν, αλλά και τις γωνίες του. Τέλος, αριθμούμε τα ρομπότ σε αντιστοιχία με τον αριθμό της ακμής την οποία αναπαριστούν. Έτσι, μπορούμε να αναφερθούμε στον αρχηγό με τον αριθμό 1 και στους ακόλουθους με τους αριθμούς 2 έως 5.



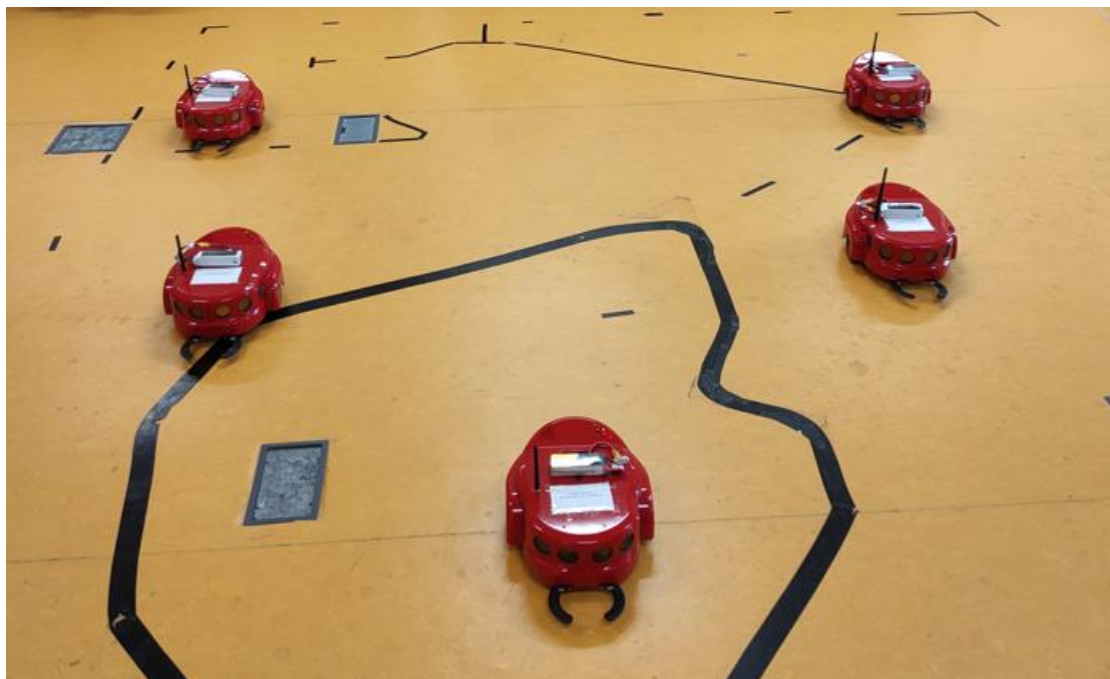
Εικόνα 12. Η γεωμετρία του σχηματισμού

Η γεωμετρία του σχηματισμού φαίνεται στην Εικόνα 12. Στις αριθμημένες κορυφές 1-5 τοποθετούμε το κάθε ρομπότ. Το γράμμα στο όνομα της κάθε κορυφής δίνει το ρόλο του συγκεκριμένου ρομπότ, αν πρόκειται για τον αρχηγό “L”, αν πρόκειται για ακόλουθο “F”. Ενώ, για μελλοντική αναφορά έχουν σημειωθεί οι ακμές M_1, M_2 . Οι αποστάσεις καθορίστηκαν έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα ισοσκελές τρίγωνο. Η σχεδίαση έγινε με αυτό τον τρόπο, ώστε οι αποστάσεις των ρομπότ 2-3 και 4-5 να είναι ίσες για λόγους συμμετρίας. Οι αποστάσεις μεταξύ των ρομπότ 1-2 και 1-3 ισούνται με 1.4m, ενώ οι αποστάσεις μεταξύ των 1-4 και 1-5 με 2.8m. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, το τρίγωνο που σχηματίσαμε είναι συμμετρικό ως προς την διάμεσό του L_1M_2 .

Με την γεωμετρική ανάλυση του σχήματος μπορούμε να αποφανθούμε για όλα τα χαρακτηριστικά του τριγώνου. Συγκεκριμένα, παρατηρούμε δυο ισοσκελή και

ορθογώνια τρίγωνα τα $L_1F_3F_2$ και $L_1F_5F_4$. Σύμφωνα με την σχεδίαση ισχύουν οι εξής ισότητες για τα ευθύγραμμα τμήματα: $L_1F_2 = L_1F_3$, $M_1F_2 = M_1F_3$, $M_1L_1 = M_1M_2$, $L_1F_4 = L_1F_5$ και $M_2F_4 = M_2F_5$. Τέλος, υπολογίζουμε τις γωνίες των τριγώνων ως εξής: $F_2L_1M_1 = M_1L_1F_3 = 0.785 \text{ rad}$ καθώς η διάμεσος διχοτομεί την ορθή γωνία L_1 . Οι γωνίες F_2, F_3, F_4, F_5 ισούνται με 0.785 rad ως γωνίες στην βάση των ισοσκελών τριγώνων $L_1F_3F_2$ και $L_1F_5F_4$ αντίστοιχα.

Οι αποστάσεις μεταξύ του αρχηγού και των ακόλουθων, δηλαδή οι αποστάσεις των ευθυγράμμων τμημάτων $L_1F_2, L_1F_3, L_1F_4, L_1F_5$ είναι κρίσιμες για την διατήρηση του σχηματισμού κατά την εκτέλεση του αλγόριθμου. Ωστόσο, είναι αναγκαίο να αντιμετωπίσουμε τις αποστάσεις με κάποια ελαστικότητα καθώς ο αλγόριθμος πλοήγησης που αναπτύξαμε περιέχει και την αποφυγή εμποδίων. Συγκεκριμένα, επιτρέπουμε σε κάποιο ρομπότ να «βγει» εκτός σχηματισμού κατά την αποφυγή ενός εμποδίου. Η συμπεριφορά αυτή είναι επιτρεπτή καθώς δεν μπορούμε να γνωρίζουμε την θέση των εμποδίων εκ των προτέρων.



Εικόνα 13. Το ρομποτικό σμήνος

Στην Εικόνα 13 παρουσιάζεται το ρομποτικό σμήνος σε σχηματισμό. Με βάση τον σχηματισμό τριγώνου μπορούμε με ευκολία να ξεχωρίσουμε το κάθε ρομπότ ανάλογα με τον ρόλο του. Ο αρχηγός βρίσκεται στην κορυφή του τριγώνου και καθορίζει τον προσανατολισμό του σχηματισμού, ενώ οι ακόλουθοι έχουν τοποθετηθεί στις θέσεις που

συμπληρώνουν το νοητό τρίγωνο. Το παρόν στιγμιότυπο απεικονίζει τις θέσεις των ρομπότ μετά το τέλος του αλγόριθμου πλοήγησης.

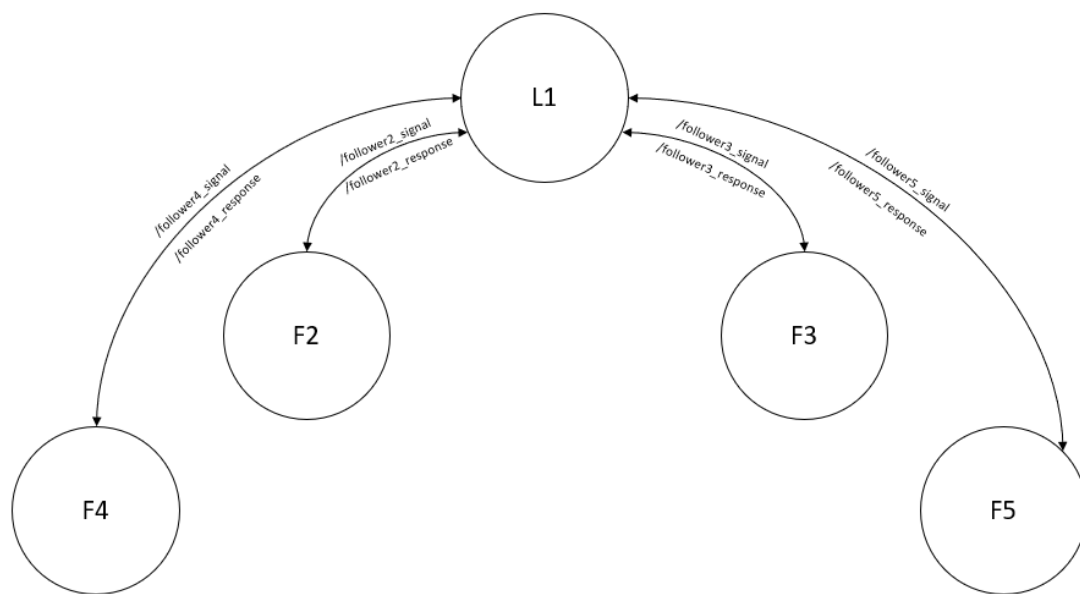
3.3.1 Η διατήρηση του σχηματισμού

Όπως προαναφέρθηκε οι αποστάσεις του κάθε ρομπότ από τον αρχηγό αλλά και από τους υπόλοιπους ακόλουθους είναι τα κριτήρια για την συνοχή του σμήνους. Επομένως, είναι αναγκαία η ανάπτυξη μιας λογικής για την διατήρηση του σχηματισμού του σμήνους. Οι ενέργειες για την διατήρηση του σχηματισμού μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιέχει τις ενέργειες που πρέπει να γίνουν πριν την έναρξη της πλοήγησης. Ενώ, η δεύτερη περιέχει τις ενέργειες που γίνονται κατά την πλοήγηση.

Η ανάγκη ύπαρξης της πρώτης κατηγορίας οφείλεται στο γεγονός ότι τα ρομπότ ενδέχεται να μην βρίσκονται σε σχηματισμό κατά την έναρξη του αλγόριθμου. Στην περίπτωση αυτή, πριν την πλοήγηση πρέπει να συσταθεί ο σχηματισμός τριγώνου. Με δεδομένη την γεωμετρία του σχηματισμού, της θέσης και της κατεύθυνσης κάθε ρομπότ υπολογίζουμε την επιθυμητή θέση για κάθε ρομπότ, ώστε να τοποθετηθεί στον σχηματισμό. Η κορυφή του τριγώνου είναι πάντα η θέση του αρχηγού. Σύμφωνα με αυτό και με την εξίσωση ευθείας $y = ax + b$, όπου (x, y) είναι η επιθυμητή θέση κάθε ρομπότ, υπολογίζουμε τις θέσεις στις οποίες πρέπει να κατευθύνουμε τα ρομπότ. Η παράμετρος a είναι η κλίση του ευθύγραμμου τμήματος που περιγράφει την επιθυμητή απόσταση αρχηγού-ακόλουθου και ισούται με την αντίστοιχη γωνία του αντίστοιχου ισοσκελούς τριγώνου. Η εύρεση της τιμής της παραμέτρου b γίνεται με αντικατάσταση της θέσης του αρχηγού στην εκάστοτε εξίσωση ευθείας. Η απόσταση αρχηγού-ακόλουθου περιγράφεται από την υποτείνουσα κάθε ορθογώνιου τριγώνου στο εσωτερικό του ισοσκελούς τριγώνου.

Η διαδικασία του αρχικού σχηματισμού γίνεται σύμφωνα με την τεχνική του αμοιβαίου αποκλεισμού. Χρησιμοποιώντας αμοιβαίο αποκλεισμό στην κίνηση των ρομπότ κατά την αρχική φάση του σχηματισμού εξασφαλίζουμε την κίνηση ενός μόνο ρομπότ κάθε φορά. Ο αρχηγός έχει την ευθύνη της σηματοδότησης. Συγκεκριμένα, δίνει το δικαίωμα κίνησης σε ένα ρομπότ κάθε φορά και το αφαιρεί όταν το ρομπότ βρεθεί στην επιθυμητή θέση. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου όλα τα άτομα του σμήνους να «βρεθούν» σε σχηματισμό. Η χρήση αμοιβαίου αποκλεισμού είναι αναγκαία. Το ζήτημα της αποφυγής εμποδίων γίνεται δυσκολότερο έχοντας πέντε ρομπότ κινούμενα ταυτόχρονα, καθώς το καθένα αποτελεί ένα κινούμενο εμπόδιο για κάθε άλλο. Η σηματοδότηση απαιτεί την επικοινωνία κάθε ρομπότ με τον αρχηγό του σμήνους. Η επικοινωνία αρχηγού-ακόλουθου είναι αμφίδρομη. Ο αρχηγός δίνει το δικαίωμα κίνησης, έπειτα ο ακόλουθος

μετά την άφιξή του στο επιθυμητό σημείο ενημερώνει τον αρχηγό, ώστε να δοθεί το δικαίωμα στο επόμενο ρομπότ. Συγκεκριμένα, η επικοινωνία κάθε ρομπότ με τον αρχηγό επιτυγχάνεται με την αξιοποίηση κάποιου topic (Ενότητα 2.3.3 Επικοινωνία ρομπότ – ρομπότ στα πλαίσια του σμήνους). Η επικοινωνία που επιτυγχάνεται μέσω ενός topic είναι μονόδρομη. Για τον λόγο αυτό δημιουργήσαμε δύο ξεχωριστά topic για κάθε αμφίδρομη επικοινωνία. Το πρώτο για την σηματοδότηση από τον αρχηγό προς τον ακόλουθο και το δεύτερο για την ενημέρωση του αρχηγού από τον ακόλουθο. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία του αρχικού σχηματισμού, κάθε άτομο του σμήνους βρίσκεται στην επιθυμητή θέση και ο αλγόριθμος πλοήγησης μπορεί να ξεκινήσει.

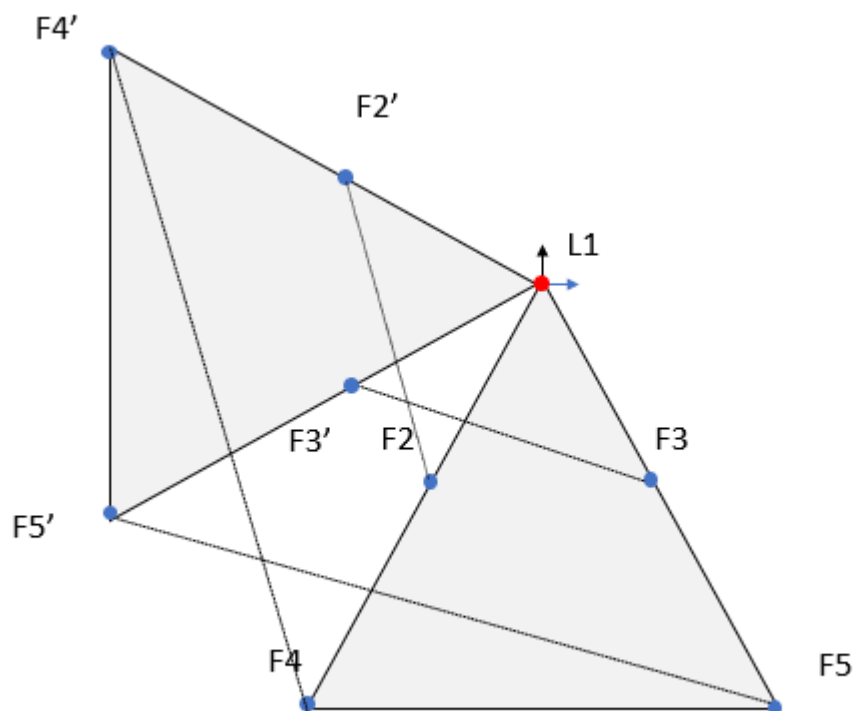


Εικόνα 14. Απεικόνιση των topic για την σηματοδότηση

Στην Εικόνα 14 παρουσιάζεται η σχηματική αναπαράσταση των απαιτούμενων Ros topic για την υλοποίηση του μηχανισμού του αμοιβαίου αποκλεισμού. Κάθε κατευθυνόμενη ακμή ενώνει τον κόμβο-αρχηγό με κάποιον κόμβο-ακόλουθο. Η ύπαρξη της κάθε ακμής υποδηλώνει την ύπαρξη δύο topic, ένα για κάθε διαφορετική κατεύθυνση. Τα ονόματα των topic σημειώνονται πάνω στις ακμές. Συγκεκριμένα, τα topic με κατάληξη “signal” αφορούν την κατεύθυνση αρχηγός-ακόλουθος και μεταφέρουν το μήνυμα της σηματοδότησης. Ενώ, τα topic με κατάληξη “response” αφορούν την κατεύθυνση ακόλουθος-αρχηγός και μεταφέρουν την ενημέρωση του ακόλουθου προς τον αρχηγό.

Η δεύτερη κατηγορία ενεργειών περιέχει τις απαραίτητες ενέργειες για την διασφάλιση του σχηματισμού κατά την πλοήγηση. Κάθε ακόλουθος έχει πρόσβαση μέσω ενός topic στην θέση και τον προσανατολισμό του αρχηγού. Με βάση τις πληροφορίες αυτές και

την εξίσωση της ευθείας, υπολογίζει την επιθυμητή θέση. Ο υπολογισμός των επιθυμητών θέσεων γίνεται κατανεμημένα σε κάθε ρομπότ-ακόλουθο. Ο αρχηγός υπολογίζει την δική του επιθυμητή θέση σύμφωνα με αλγόριθμο πλοήγησης, ενώ κάθε ακόλουθος υπολογίζει και προσεγγίζει την θέση που «συμπληρώνει» τον σχηματισμό. Με αυτό τον τρόπο η πλοήγηση του ρομποτικού σμήνους μπορεί να διαιρεθεί στην πλοήγηση του αρχηγού και την πλοήγηση των ακόλουθων. Μια εναλλακτική περιγραφή είναι η εξής, ο αρχηγός μέσω της κίνησής του μεταβάλλει τις επιθυμητές θέσεις των ακόλουθων. Η θέση και ο προσανατολισμός του αρχηγού (κορυφή L1) ορίζουν την θέση και τον προσανατολισμό του σχηματισμού. Η μεταβολή των θέσεων των ακόλουθων επιφέρει την διατήρηση του σχηματισμού καθώς οι ακόλουθοι κινούνται προς τις θέσεις οι οποίες συμπληρώνουν τον σχηματισμό. Ο συνδυασμός της πλοήγησης του αρχηγού προς τον στόχο και της πλοήγησης των ακολούθων προς τα επιθυμητά σημεία συνιστά την συμπεριφορά της πλοήγησης.



Εικόνα 15. Αλλαγή προσανατολισμού

Στην Εικόνα 15 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα αλλαγής προσανατολισμού του σμήνους. Σύμφωνα με την σχεδιάσή μας, ο αρχηγός επιβάλλει τον προσανατολισμό του στον σχηματισμό. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα ο αρχηγός περιστρέφεται κατά 90 μοίρες

δεξιόστροφα. Η περιστροφή του προκαλεί τον υπολογισμό νέων επιθυμητών θέσεων για τους ακόλουθους. Ο αρχικός προσανατολισμός του σχηματισμού αναπαριστάται με το μαύρο διάνυσμα, ενώ ο νέος με το μπλε στην κορυφή L1. Οι ακόλουθοι σύμφωνα με την τεχνική του αμοιβαίου αποκλεισμού, κινούνται προς τις επιθυμητές θέσεις. Οι πορείες που διαγράφουν οι ακόλουθοι είναι σημειωμένες στο σχήμα με διακεκομμένες γραμμές. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα δεν έχουμε την ύπαρξη εμποδίων. Ωστόσο τα ρομπότ ανταπεξέρχονται και στην περίπτωση ύπαρξης εμποδίων καθώς τα ρομπότ πλοηγούνται ελεύθερα προς τις επιθυμητές θέσεις. Με την έλευση και του τελευταίου ρομπότ στην επιθυμητή θέση, ο σχηματισμός έχει ολοκληρωθεί.

Κάθε ρομπότ έχει την ικανότητα αποφυγής εμποδίων χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις των αισθητήρων σόναρ που διαθέτει. Ωστόσο, ένα πιθανό εμπόδιο μπορεί να μην επιτρέψει την διατήρηση του σχηματισμού. Για παράδειγμα, τι θα συμβεί όταν σε κάποια επιθυμητή θέση ακόλουθου υπάρχει εμπόδιο; Αυτό το ζήτημα αντιμετωπίστηκε προσδίδοντας μια ελαστικότητα στον σχηματισμό. Η ελαστικότητα αυτή αποδίδεται στις αποστάσεις μεταξύ των ρομπότ. Με αυτή την παραδοχή, επιτρέπουμε την κίνηση ενός ρομπότ εκτός σχηματισμού μόνο στην περίπτωση που η επιθυμητή θέση δεν είναι προσβάσιμη λόγω ύπαρξης εμποδίου. Αμέσως μετά την αποφυγή, το ρομπότ επιστρέφει στον σχηματισμό.

Κατά την αποφυγή εμποδίων κάποιου ακόλουθου ρομπότ, το υπόλοιπο σμήνος συνεχίζει την κίνησή του. Παρόλα αυτά, σαν μέτρο για την διατήρηση του σχηματισμού θεωρούμε ένα άνω όριο στην απόσταση των ακόλουθων από τον αρχηγό. Στην περίπτωση που ένας ακόλουθος ξεπεράσει την μέγιστη απόσταση, το σμήνος θα σταματήσει την κίνησή του και θα περιμένει τον ακόλουθο να «μπεί» σε σχηματισμό. Η ενέργεια αυτή εξασφαλίζει την συνεκτικότητα του σμήνους. Η κίνηση των ρομπότ προς τις επιθυμητές θέσεις, η αποφυγή εμποδίων και η διατήρηση του σχηματισμού συνθέτουν την συμπεριφορά του αλγόριθμου πλοήγησης.

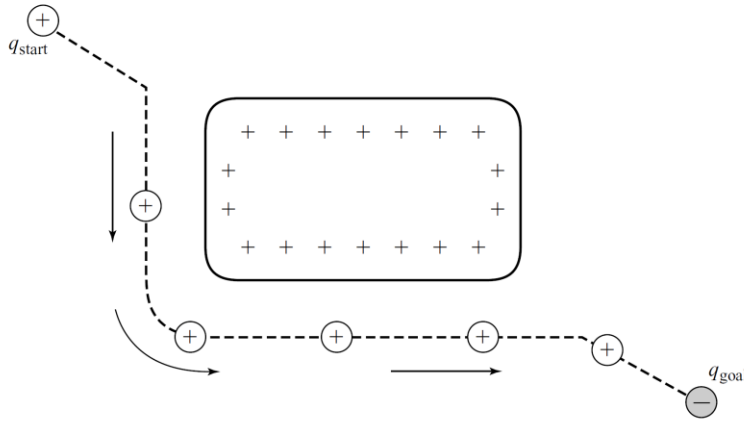
3.4 Οι συναρτήσεις Δυναμικών Πεδίων

Η βασική ιδιότητα που πρέπει να έχει ένας αλγόριθμος πλοήγησης, είναι να καθιστά δυνατή την πλοήγηση ενός ρομπότ από κάποια αρχική θέση προς την τελική. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, ο αλγόριθμος πλοήγησης έχει και την εύθυνη της αποφυγής εμποδίων. Σε αυτή την ενότητα θα αναλυθούν οι μέθοδοι με τις οποίες πετύχαμε την πλοήγηση των ρομπότ προς τις επιθυμητές θέσεις παράλληλα με την αποφυγή εμποδίων.

Για την ανάπτυξη της συμπεριφοράς του ρομποτικού σμήνους χρησιμοποιούμε την τεχνική «Διαίρει και βασίλευε». Στην προσέγγιση του προβλήματος προς επίλυση, θεωρούμε το κάθε ρομπότ ως μια αυτόνομη μονάδα. Σύμφωνα με αυτό τον συλλογισμό, το κάθε ρομπότ έχει την ικανότητα της πλοήγησης και της αποφυγής εμποδίων ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα άτομα στο σμήνος. Με αυτό τον τρόπο εργαστήκαμε για την ανάπτυξη της συμπεριφοράς κάθε ατόμου χωριστά και στην συνέχεια ορίσαμε τις ιδιότητες που διέπουν την συνολική συμπεριφορά.

Για τον καθορισμό της ατομικής συμπεριφοράς κάθε ρομπότ χρησιμοποιήθηκαν οι Συναρτήσεις Δυναμικών Πεδίων(Potential Functions). Η προσέγγιση των Δυναμικών Πεδίων αντιμετωπίζει το ρομπότ ως ένα θετικά φορτισμένο σωματίδιο κινούμενο στον χώρο. Το σωματίδιο «έλκεται» από τον αρνητικά φορτισμένο στόχο(τελική θέση), ενώ απωθείται από τα θετικά φορτισμένα εμπόδια στον χώρο. Η συγκεκριμένη παραδοχή μετατρέπει τον χώρο σε ένα διανυσματικό πεδίο. Το άθροισμα των ελκτικών και των απωστικών δυνάμεων δίνει την τιμή του δυναμικού πεδίου ως διάνυσμα σε κάθε πιθανό σημείο του χώρου. Το ρομπότ ακολουθώντας την διαδρομή που ελαχιστοποιεί την τιμή του δυναμικού πεδίου, απομακρύνεται από τα εμπόδια και κατευθύνεται προς τον στόχο. Στην τελική θέση εντοπίζεται η χαμηλότερη τιμή του δυναμικού πεδίου. Η τιμή του δυναμικού πεδίου στο σημείο του χώρου που βρίσκεται το ρομπότ χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της ταχύτητάς του. Με αυτό τον τρόπο πετυχαίνουμε την απομάκρυνσή του από τα εμπόδια, την πλοήγηση προς το χαμηλότερο δυναμικό αλλά και την ακινητοποίηση του ρομπότ στην τελική θέση.

Η πλοήγηση με Συναρτήσεις Δυναμικών πεδίων αξιοποιεί την μέθοδο Gradient Descend. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, το ρομπότ ακολουθεί το μονοπάτι το οποίο μειώνει σταδιακά την τιμή της αρνητικής παραγώγου της συνάρτησης του δυναμικού πεδίου. Η παράγωγος μειώνεται σταδιακά μέχρι να μηδενιστεί. Το σημείο μηδενισμού της παραγώγου μπορεί να είναι μέγιστο, ελάχιστο ή σαγματικό σημείο. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή της Gradient Descend θεωρούμε πως ο μηδενισμός της παραγώγου σημαίνει μόνο ότι βρισκόμαστε σε σημείο ελαχίστου. Στα πλαίσια αυτής της παραδοχής πρέπει να εξασφαλίσουμε ότι η τελική θέση του σμήνους θα είναι προσβάσιμη. Δηλαδή, τα εμπόδια που θα τοποθετηθούν στον χώρο δεν θα περικλύουν εντελώς το σημείο στόχο.



Εικόνα 16. Το αποτέλεσμα της μεθόδου

Στην Εικόνα 16, παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της μεθόδου των Δυναμικών Πεδίων. Το ρομπότ αρχικά κινείται στην κατεύθυνση που μειώνει την τιμή του δυναμικού. Στην συνέχεια, δέχεται απωθητικές δυνάμεις από το εμπόδιο οι οποίες προκαλούν αλλαγή του προσανατολισμού του. Η επίδραση των απωστικών δυνάμεων σε συνδυασμό με την έλξη από τον στόχο, προκαλούν κίνηση παράλληλη με το εμπόδιο και προς τον στόχο. Στην συνέχεια, το εμπόδιο παύει να ανιχνεύεται επομένως παύει και η επιρροή των απωστικών δυνάμεων. Η μοναδική δύναμη που δέχεται το ρομπότ στην θέση αυτή είναι η έλξη, η οποία προκαλεί αλλαγή προσανατολισμού καθώς το ρομπότ κινείται προς τον στόχο. Ο συνδυασμός του ελκτικού και του απωστικού δυναμικού οδηγεί σταδιακά τα ρομπότ στην τελική θέση, αποφεύγοντας τα εμπόδια στον χώρο.

Η συνάρτηση του Δυναμικού Πεδίου προκύπτει ως άθροισμα των συναρτήσεων του Ελκτικού και του Απωστικού Πεδίου.

$$U(q) = U(q)_{att} + U(q)_{rep} \quad (1)$$

Πρόκειται για την συνάρτηση στην οποία εφαρμόζεται η μέθοδος Gradient Descend. Σε κάθε βήμα υπολογίζουμε την παράγωγο και δίνουμε στο ρομπότ την κατάλληλη ταχύτητα. Βάσει των όσων ήδη περιγράφηκαν, η συνάρτηση που μας δίνει το μονοπάτι προς το χαμηλότερο δυναμικό είναι η $-\nabla U(q) = -\nabla U_{att}(q) - \nabla U_{rep}(q)$ (2)

Με τις $U_{att}(q)$ και $U_{rep}(q)$ να είναι γνωστές συναρτήσεις για τον υπολογισμό του Ελκτικού και Απωστικού Δυναμικού σε δεδομένο σημείο του χώρου $q(x, y)$.

3.4.1 Το Ελκτικό Δυναμικό

Το Ελκτικό Δυναμικό αποτελεί την πρώτη συνιστώσα που καθορίζει το προφίλ της μεθόδου των Δυναμικών Πεδίων. Κάθε ρομπότ δέχεται έλξη από την τελική θέση στην οποία πρέπει να βρεθεί. Όπως περιγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα, ο αρχηγός έλκεται από τον τελικό στόχο ενώ οι ακόλουθοι έλκονται από τις θέσεις οι οποίες συμπληρώνουν τον σχηματισμό.

Με βάση τις τρέχουσες και τις επιθυμητές θέσεις υπολογίζουμε την τιμή του Ελκτικού Δυναμικού για κάθε ρομπότ. Σύμφωνα με το Principles of Robot Motion [7], ο υπολογισμός του Έλκτικού Δυναμικού δίνεται από τον συνδυασμό δύο συναρτήσεων: Την συνάρτηση Κωνικού Δυναμικού Πεδίου (Conic Potential) και την Τετραγωνική Συνάρτηση Δυναμικού Πεδίου (Quadratic Potential). Η χρήση των δύο τύπων Δυναμικού πεδίου εξασφαλίζει ομαλότητα κατά την κίνηση του ρομπότ. Επιλέγουμε τον κατάλληλο τύπο πεδίου κατά την εκτέλεση του αλγόριθμου με βάση ένα ορισμένο κατώφλι για την απόσταση του ρομπότ από το στόχο. Η συνάρτηση Κωνικού Δυναμικού Πεδίου χρησιμοποιείται όταν το ρομπότ βρίσκεται σε απόσταση μεγαλύτερη από το ορισμένο κατώφλι. Η συνάρτηση αυτή καταλήγει σε μεγαλύτερες τιμές της ελκτικής δύναμης, με αποτέλεσμα το ρομπότ να κινείται με μεγαλύτερες ταχύτητες. Όταν το ρομπότ απέχει απόσταση μικρότερη από το κατώφλι, τότε χρησιμοποιείται η Τετραγωνική συνάρτηση Δυναμικού Πεδίου. Η συνάρτηση αυτή καταλήγει σε μικρότερες συγκριτικά τιμές. Ο συνδυασμός των δύο συναρτήσεων επιτρέπει στο ρομπότ να κινείται με μεγαλύτερη ταχύτητα όταν απέχει μεγάλη απόσταση από τον στόχο, ενώ όταν πλησιάσει σε αυτόν τον προσεγγίζει με μικρότερη ταχύτητα και μεγαλύτερη ακρίβεια.

$$U_{att}(q) = \begin{cases} 1/2\zeta d^2(q, q_{goal}), & d(q, q_{goal}) \leq d_{goal}^* \\ d_{goal}^* \zeta d(q, q_{goal}) - 1/2\zeta (d_{goal}^*)^2, & d(q, q_{goal}) > d_{goal}^* \end{cases} \quad (3)$$

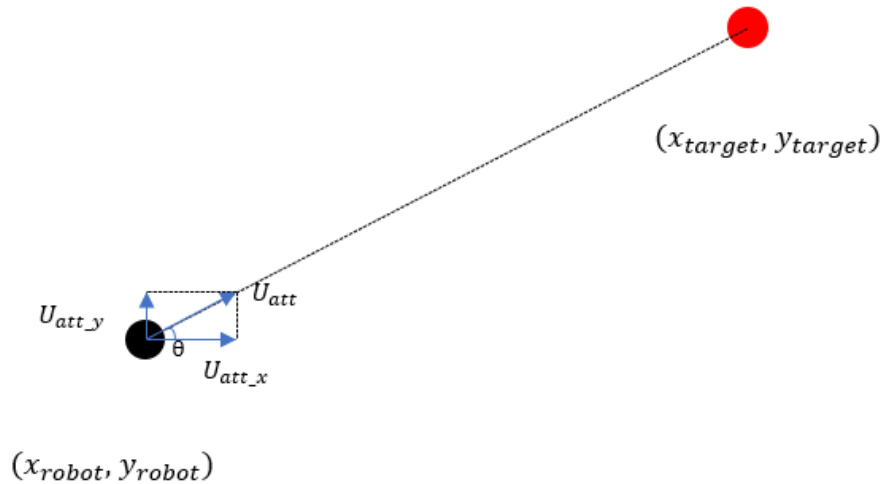
$$\nabla U_{att}(q) = \begin{cases} \zeta(q - q_{goal}), & d(q, q_{goal}) \leq d_{goal}^* \\ \frac{d_{goal}^* \zeta (q - q_{goal})}{d(q, q_{goal})}, & d(q, q_{goal}) > d_{goal}^* \end{cases} \quad (4)$$

Η παράμετρος ζ χρησιμοποιείται για την κλιμάκωση του διανύσματος που θα προκύψει. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, θέτουμε την παράμετρο ίση με 1. Η κλιμάκωση του διανύσματος της ελκτικής δύναμης είναι χρήσιμη για να δοθεί μεγαλύτερη ή μικρότερη βαρύτητα στην ελκτική δύναμη σε σχέση με την απωστική. Η παράμετρος d_{goal}^* είναι το

κατώφλι το οποίο χρησιμοποιείται για την αλλαγή του τύπου του πεδίου. Η τιμή της παραμέτρου προσαρμόζεται συνήθως πειραματικά για την επίτευξη του επιδιωκόμενου προφίλ κίνησης. Στην περιπτωσή μας, επιλέχθηκε η τιμή 0.3(m) ως κατώφλι. Τέλος, αξίζει να επισημανθεί πως τα q και q_{goal} είναι σε διανυσματική μορφή ($\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$ και $\begin{bmatrix} x_{goal} \\ y_{goal} \end{bmatrix}$), ενώ για τον υπολογισμό της απόστασης $d(q, q_{goal})$, χρησιμοποιείται η Ευκλείδεια απόσταση.

$$d(q, q_{goal}) = \sqrt{(x - x_{goal})^2 + (y - y_{goal})^2}$$

Σύμφωνα με την Διατήρηση του Σχηματισμού (Ενότητα 3.3.1), για το ρομπότ-αρχηγό η θέση $q_{goal} = \begin{bmatrix} x_{goal} \\ y_{goal} \end{bmatrix}$, όπου (x_{goal}, y_{goal}) είναι θέση του στόχου. Για τους ακόλουθους η θέση q_{goal} σε κάθε βήμα είναι η θέση την οποία πρέπει να προσεγγίσουν, ώστε να έχουμε διατήρηση του σχηματισμού. Έτσι, οι ακόλουθοι «έλκονται» στις θέσεις που διατηρούν τον σχηματισμό, καθώς ακολουθούν τον αρχηγό ο οποίος έλκεται από την τελική θέση.



Εικόνα 17. Η ελκτική δύναμη

Στην Εικόνα 17 αναπαριστάται το διάνυσμα της ελκτικής δύναμης που ασκείται στο ρομπότ ως σημειακό σώμα. Ο προσανατολισμός του ρομπότ στο συγκεκριμένο στιγμιότυπο ταυτίζεται με την κατεύθυνση του διανύσματος U_{att_x} . Η συνολική δύναμη U_{att} έχει την κατεύθυνση της διαγωνίου που συνδέει την τρέχουσα με την τελική θέση. Αναλύοντας την συνολική δύναμη στις συνιστώσες της ως προς τους άξονες x, y σχηματίζεται η γωνία θ . Αυτή είναι η γωνία που πρέπει να στραφεί το ρομπότ ώστε να

πετύχει την κατεύθυνση του συνολικού διανύσματος και να κατευθυνθεί προς το στόχο. Τέλος, το μέτρο της U_{att} είναι και η τιμή της γραμμικής ταχύτητας με την οποία το ρομπότ προσεγγίζει το στόχο.

3.4.2 Το Απωστικό Δυναμικό

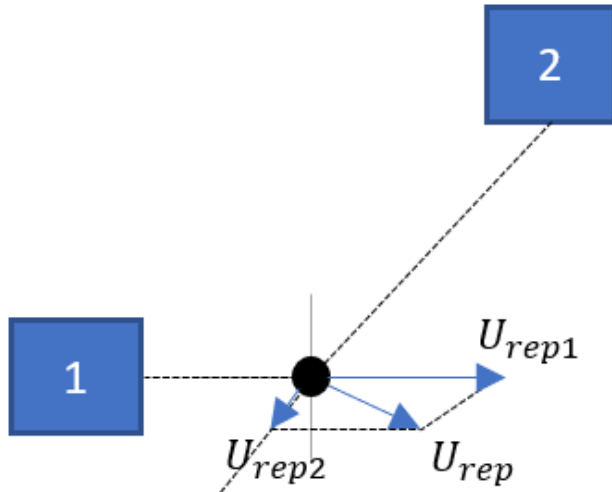
Το Απωστικό Δυναμικό είναι υπεύθυνο να κατευθύνει το ρομπότ μακριά από τα εμπόδια. Το μέτρο και η κατεύθυνση της απωστικής δύναμης εξαρτάται από την γωνία και την απόσταση του ρομπότ από το εμπόδιο. Η δύναμη αυξάνεται όσο το ρομπότ πλησιάζει προς το εμπόδιο, για αυτό το λόγο το απωστικό δυναμικό περιγράφεται από την απόσταση ρομπότ-εμποδίου στον χώρο($D(q)$).

$$U_{rep}(q) = \begin{cases} 1/2n(\frac{1}{D(q)} - \frac{1}{Q^*})^2, & D(q) \leq Q^* \\ 0, & D(q) > Q^* \end{cases} \quad (5)$$

$$\nabla U_{rep}(q) = \begin{cases} n(\frac{1}{Q^*} - \frac{1}{D(q)}) \frac{1}{D^2(q)} \nabla D(q), & D(q) \leq Q^* \\ 0, & D(q) > Q^* \end{cases} \quad (6)$$

Η παράμετρος Q^* επιτρέπει στο ρομπότ να αγνοεί εμπόδια με βάση ένα προκαθορισμένο κατώφλι απόστασης. Η παράμετρος n χρησιμοποιείται για την κλιμάκωση του απωστικού διανύσματος. Οι τιμές των παραμέτρων Q^* και n προσαρμόζονται πειραματικά με κριτήριο την επίτευξη της επιθυμητής συμπεριφοράς. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή μετά από πειράματα καταλήξαμε στην επιλογή των εξής τιμών: $Q^* = 0.8$ και $n = 0.05$.

Το ρομπότ(μοντέλο AmigoBot) στο οποίο προσαρμόστηκε η υλοποίηση της άσκησης είναι εξοπλισμένο με 8 αισθητήρες σόναρ. Με βάση την συνάρτηση για τον υπολογισμό των απωστικών διανυσμάτων, κατά την λειτουργία του ρομπότ υπολογίζουμε 8 διανύσματα. Στην συνέχεια, σύμφωνα την παραδοχή που εντιμετωπίζει το ρομπότ ως σημειακό σώμα, θεωρούμε πως όλα τα διανύσματα έχουν κοινό σημείο εφαρμογής. Με αυτό τον τρόπο υπολογίζουμε την συνισταμένη των απωστικών διανυσμάτων με σημείο εφαρμογής το σημειακό σώμα.



Εικόνα 18. Η απωστική δύναμη

Στην Εικόνα 18 απεικονίζεται η διανυσματική αναπαράσταση της απωστικής δύναμης U_{rep} , ως συνισταμένη των επιμέρους δυνάμεων. Η ύπαρξη των διανυσμάτων U_{rep1} , U_{rep2} ωφείλεται στην ανίχνευση των εμποδίων 1, 2 από τα σόναρ. Τα απωστικά διανύσματα κατευθύνουν το ρομπότ προς την αντίθετη κατεύθυνση από την οποία ανιχνεύτηκε το αντίστοιχο εμπόδιο. Όπως εύκολα μπορεί να παρατηρηθεί, το μέτρο των διανυσμάτων είναι αντιστρόφως ανάλογο της απόστασής τους από το ρομπότ. Έτσι η απωστική δύναμη που προκαλείται από το εμπόδιο 1 είναι μεγαλύτερη από αυτή που προκαλείται λόγω του εμποδίου 2 καθώς το πρώτο βρίσκεται πιο κοντά στο ρομπότ.

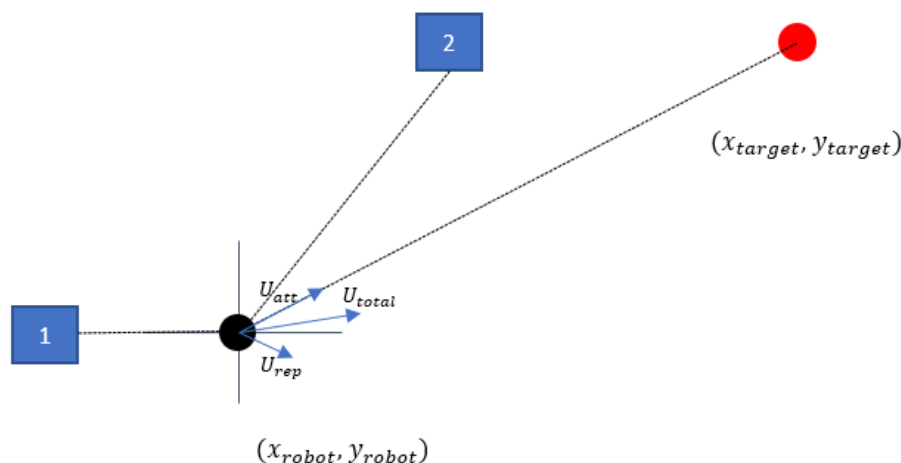
Το μοντέλο του ρομπότ που χρησιμοποιούμε διαθέτει 8 αισθητήρες σόναρ. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την ύπαρξη το πολύ 8 απωστικών διανυσμάτων, δηλαδή την ταυτόχρονη ανίχνευση 8 εμποδίων στον χώρο.

3.4.3 Το συνολικό Δυναμικό

Η πλοήγηση του ρομπότ ωφείλεται στον συνδυασμό των δυνάμεων έλξης και απώθησης που του ασκούνται. Τα διανύσματα της έλξης και της απώθησης, όπως περιγράφηκαν και στις ενότητες 3.4.1, 3.4.2 εφαρμόζονται πάνω στο σημειακό σώμα. Για τον υπολογισμό του συνολικού διανύσματος αρκεί να υπολογίσουμε την συνισταμένη αυτών των δυνάμεων. Με τη χρήση των συναρτήσεων 2, 4, 6 υπολογίζουμε την τιμή του διανύσματος, το οποίο καθορίζει την ταχύτητα του ρομπότ. Το μέτρο του τελικού διανύσματος που υπολογίσαμε χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της γραμμικής ταχύτητας του ρομπότ. Ενώ, η κατεύθυνση του διανύσματος αυτού ορίζει την τιμή της γωνιακής του ταχύτητας.

Η δύναμη της έλξης έχει την ιδιότητα να κλιμακώνεται σύμφωνα με την απόσταση του ρομπότ από την επιθυμητή θέση. Η ιδιότητα αυτή σε συνδυασμό με τις ενέργειες του αρχηγού για την διατήρηση της συνοχής του σχηματισμού προσδίδει μια ενδιαφέρουσα ιδιότητα στην συμπεριφορά του σμήνους. Η επαναφορά των ακόλουθων στις επιθυμητές θέσεις μπορεί να παρομοιαστεί με την επαναφορά ενός ελατηρίου. Το ελατήριο κινείται με ταχύτητα ανάλογη της απόστασής του από το σημείο ισορροπίας. Κατά τον ίδιο τρόπο, στην περίπτωση που ένας ακόλουθος βρίσκεται μακριά από την επιθυμητή θέση κινείται προς αυτήν και ηρεμεί(μειώνει την ταχύτητά του). Τέλος, καθορίζοντας την οριακή απόσταση στην οποία επιτρέπουμε το ρομπότ να βρεθεί, περιορίζουμε την επιμήκυνση του ελατηρίου οριοθετώντας έτσι τις ταχύτητες που αναπτύσσονται.

Συνοψίζοντας, η μέθοδος των Συναρτήσεων Δυναμικού Πεδίου είναι υπεύθυνη για την πλοήγηση των ρομπότ. Το διανυσματικό πεδίο στον διδιάστατο χώρο προκαλεί μεταβολή του μέτρου και της ταχύτητας των ρομπότ, οδηγώντας τα με ασφάλεια στην τελική θέση.



Εικόνα 19. Η συνισταμένη δύναμη

Στην Εικόνα 19 παρουσιάζεται η σύνθεση των δυνάμεων έλξης και απώθησης. Η συνισταμένη αυτών(U_{total}) αποτελεί την συνολική δύναμη, την οποία αξιοποιούμε για τον έλεγχο του ρομπότ(καθορισμός της ταχύτητας του ρομπότ). Η φορά και το μέτρο των διανυσμάτων αλλάζει κατά την διάρκεια της κίνησης, καθώς το ρομπότ μετακινείται σε θέσεις με διαφορετική τιμή του Δυναμικού Πεδίου.

Η ύπαρξη διανύσματος απώθησης δεν είναι πάντα απαραίτητο. Η απουσία απωθητικών δυνάμεων σημαίνει πως το ρομπότ δεν έχει ανιχνεύσει εμπόδια στο χώρο, σε αυτή την περίπτωση η συνολική δύναμη ταυτίζεται με την ελκτική.

3.5 Η ροή του αλγόριθμου

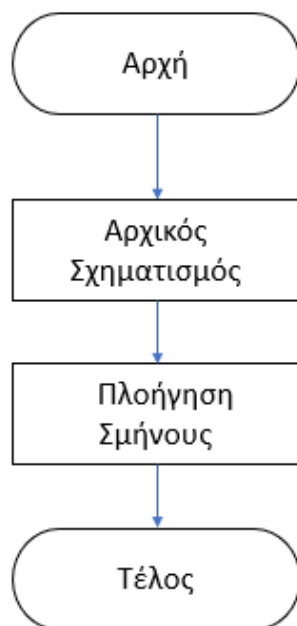
Σε αυτή την ενότητα περιγράφουμε την ροή του αλγόριθμου πλοήγησης βήμα προς βήμα και την σύνδεση των επιμέρους λειτουργιών του κάθε ρομπότ για την διαμόρφωση της συμπεριφοράς του σμήνους.

Κατά την εκκίνηση του αλγόριθμου αποδεχόμαστε το γεγονός ότι τα ρομπότ μπορεί να είναι διάσπαρτα στον χώρο. Επομένως, η πρώτη μέριμνα του αλγόριθμου είναι η σύσταση του σχηματισμού. Όπως περιγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα, τα ρομπότ με βάση τον μηχανισμό του αμοιβαίου αποκλεισμού κινούνται προς τις επιθυμητές θέσεις. Πρόκειται για τις τελικές θέσεις της πρώτης φάσης του αλγόριθμου, οι οποίες καθορίζονται σύμφωνα με την θέση και τον προσανατολισμό του αρχηγού. Η διαδικασία αυτή ξεκινάει με την αλλαγή προσανατολισμού του αρχηγού. Ο αρχηγός αποκτά τον προσανατολισμό του στόχου, που θα είναι και ο αρχικός προσανατολισμός του σχηματισμού. Κατά την φάση αυτή, το κάθε ρομπότ κινείται ελεύθερα χωρίς να υπακούει σε περιορισμούς. Η κίνηση των ρομπότ γίνεται με την χρήση των Συναρτήσεων Δυναμικών Πεδίων, με τελική θέση την θέση που συμπληρώνει τον σχηματισμό. Τα ρομπότ πλοηγούνται σε αυτή την αρχική φάση του αλγόριθμου αυτόνομα από την τυχαία αρχική θέση προς την καθορισμένη τελική. Η αποφυγή εμποδίων εξασφαλίζει την ασφαλή πλοήγηση των ρομπότ, η οποία είναι αναγκαία καθώς δεν μπορούμε να γνωρίζουμε την κατανομή των εμποδίων στο χώρο. Για τον λόγο αυτό είναι πιθανό η ύπαρξη κάποιου εμποδίου να μην επιτρέπει την πρόσβαση στην τελική θέση. Σε αυτή την περίπτωση, επιτρέπουμε την ακινητοποίηση του ρομπότ στην καλύτερη προσεγγιστικά εφικτή θέση. Η φάση του αρχικού σχηματισμού τερματίζεται από τον κόμβο του αρχηγού όταν λάβει την απόκριση από τον τελευταίο ακόλουθο(ρομπότ5). Η διαδικασία του αρχικού σχηματισμού είναι απαραίτητη και γίνεται πάντα κατά την έναρξη του αλγόριθμου. Μας επιτρέπει να αναδιοργανώνουμε το σμήνος και να του δίνουμε τον προσανατολισμό του τελικού σημείου.

Η δεύτερη φάση του αλγόριθμου είναι η πλοήγηση του σμήνους. Η πλοήγηση τόσο για τον αρχηγό όσο και για τους ακόλουθους ξεκινά με αρχική θέση την θέση που έφτασε το ρομπότ κατά την φάση του αρχικού σχηματισμού. Η συμπεριφορά του κάθε ρομπότ στην φάση αυτή διέπεται από τους κανόνες που ορίσαμε για την διατήρηση του σχηματισμού. Η κίνηση του αρχηγού προς το τελικό σημείο δημιουργεί επιθυμητές θέσεις για τον κάθε ακόλουθο. Οι επιθυμητές θέσεις των ακόλουθων αλλάζουν σε κάθε χρονική στιγμή καθώς ο αρχηγός πλοηγείται ελεύθερα προς το τελικό σημείο. Οι ακόλουθοι προσεγγίζουν σε κάθε χρονική στιγμή την επιθυμητή θέση που γνωρίζουν. Η μόνη περίπτωση σταθεροποίησης των επιθυμητών θέσεων των ακόλουθων είναι η περίπτωση

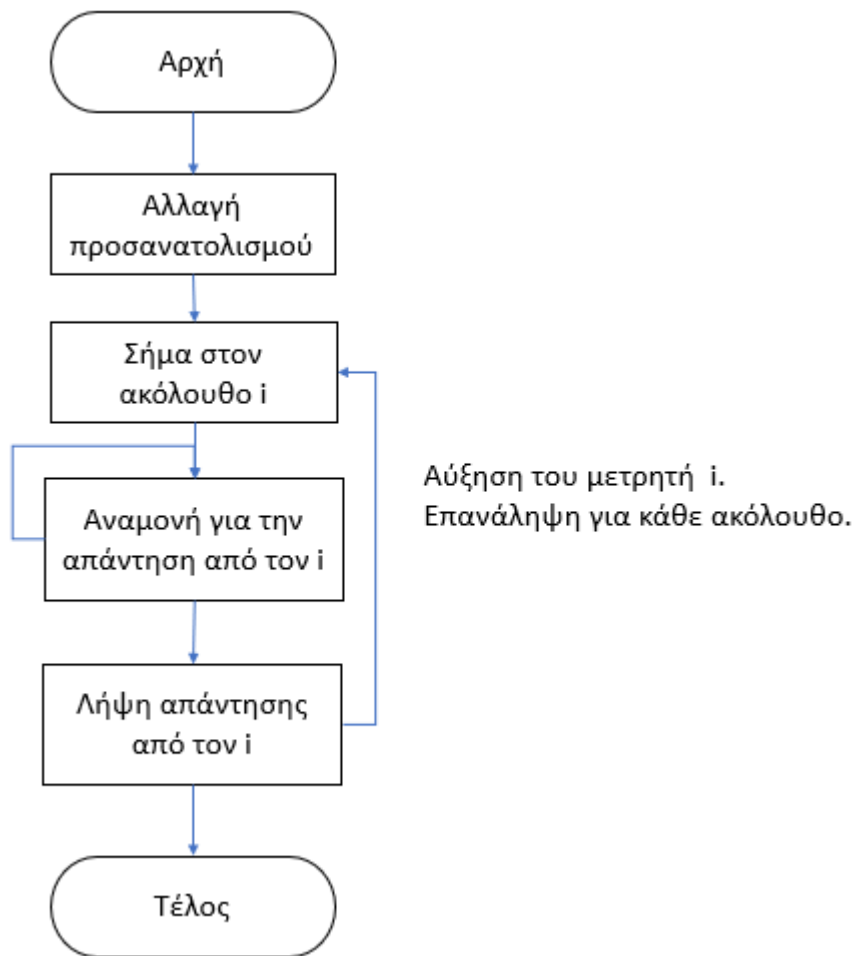
στην οποία ο αρχηγός έχει φτάσει στο τελικό σημείο. Ο αρχηγός ακινητοποιείται και στην συνέχεια ακινητοποιούνται και οι ακόλουθοι, οι οποίοι έχουν προσεγγίσει με ακρίβεια τις σταθερές πλέον τελικές τους θέσεις.

Η τεχνική αυτή συνδυάζει την συμπεριφορά του κάθε ατόμου στο σμήνος για την σύνθεση του συνολικού προφίλ της πλοήγησης. Με την χρήση των Συναρτήσεων Δυναμικών Πεδίων αυτόνομα σε κάθε ρομπότ, σε συνδυασμό με τον υπολογισμό των επιθυμητών θέσεων σύμφωνα με την γεωμετρία του σχηματισμού πετυχαίνουμε την πλοήγηση του ρομποτικού σμήνους. Τέλος, με την χρήση των τεχνικών για την διατήρηση του σχηματισμού πετυχαίνουμε την συνοχή του σχηματισμού κατά την προσέγγιση οποιασδήποτε τελικής θέσης στο επίπεδο.



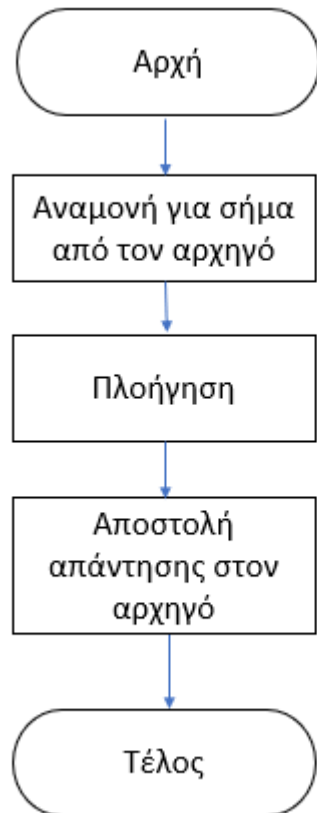
Εικόνα 20. Διάγραμμα ροής των φάσεων του αλγόριθμου

Στην Εικόνα 20 φαίνεται η διαδοχή των δύο φάσεων του αλγόριθμου που περιγράφηκαν. Στην συνέχεια παρουσιάζουμε ως διαγράμματα ροής τις δύο φάσεις ξεχωριστά, τόσο από την σκοπιά το αρχηγού όσο και από των ακόλουθων.



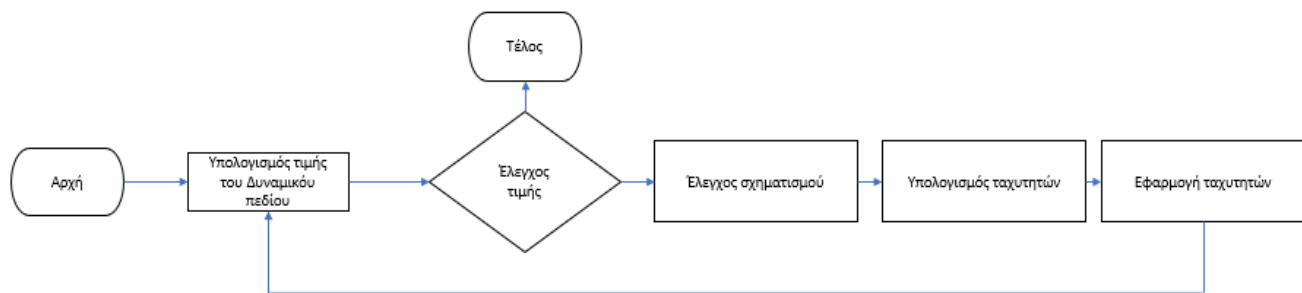
Εικόνα 21. Διάγραμμα ροής αρχηγού (Φάση 1η)

Στην Εικόνα 21 παρουσιάζονται ως διάγραμμα ροής οι αρμοδιότητες του αρχηγού κατά την πρώτη φάση του αλγόριθμου. Αρχικά, ο αρχηγός μεταβάλλει τον προσανατολισμό του σύμφωνα με το τελικό σημείο. Στην συνέχεια, σύμφωνα με την τεχνική του αμοιβαίου αποκλεισμού, στέλνει σήμα σε όλους τους ακόλουθους διαδοχικά. Στην συνέχεια περιμένει για την λήψη της απάντησης από τον ακόλουθο που έχει λαβει το σήμα και κινείται. Κατά την φάση αυτή οι ακόλουθοι κινούνται μόνο όταν λάβουν το σήμα από τον αρχηγό. Η αναμονή του αρχηγού για απάντηση, εξασφαλίζει τον αμοιβαίο αποκλεισμό στο δικαίωμα κίνησης των ακολούθων. Η αποστολή της απάντησης από τον ακόλουθο συνεπάγεται το γεγονός ότι ο ίδιος έχει φτάσει στην επιθυμητή θέση και έχει ακινητοποιηθεί. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου φτάσει και ο ακόλουθος 5 στην δική του επιθυμητή θέση.



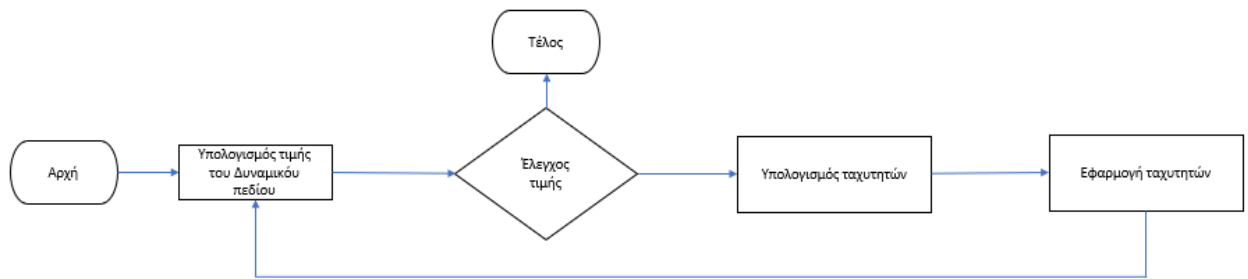
Εικόνα 22. Διάγραμμα ροής ακόλουθων (Φάση 1η)

Η συμπεριφορά των ακόλουθων κατά την πρώτη φάση φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα ροής. Κάθε ακόλουθος αναμένει να έρθει η σειρά του, ώστε να κινηθεί. Η πλοήγηση γίνεται αυτόνομα όπως περιγράψαμε στην αντίστοιχη ενότητα. Τέλος, ειδοποιεί τον αρχηγό, ώστε να του αφαιρέσει το δικαίωμα κίνησης και να δωθεί στον επόμενο ακόλουθο. Στο σημείο αυτό οι ενέργειες του ακόλουθου όσον αφορά την πρώτη φάση έχουν τελειώσει. Στην περίπτωση που ο ακόλουθος που στέλνει την απάντηση είναι ο πέμπτος, η φάση του αρχικού σχηματισμού τελειώνει.



Εικόνα 23. Το διάγραμμα ροής του αρχηγού(Φάση2)

Σύμφωνα με την σχεδιάσή μας, η πλοήγηση του αρχηγού επιτυγχάνεται με την επιβολή ελέγχου πάνω στις ταχύτητές του. Η διαδικασία περιγράφεται από ένα βρόχο επανάληψης. Στην αρχή κάθε επανάληψης έχουμε τον υπολογισμό της τιμής του πεδίου στο σημείο που βρίσκεται ο αρχηγός. Το ρομπότ ακολουθεί το μονοπάτι στο οποίο μειώνεται η τιμή του πεδίου. Στην τελική θέση παρατηρούνται οι μικρότερες τιμές του διανύσματος. Ωστόσο ο έλεγχος του επόμενου βήματος είναι απαραίτητος, ώστε να ανιχνεύσουμε την έλευση του ρομπότ στην τελική θέση και να τερματίσουμε τον αλγόριθμο. Ο τερματισμός γίνεται με βάση μια ελάχιστη τιμή για τον διάνυσμα του πεδίου. Ο προσδιορισμός της τιμής γίνεται πειραματικά και είναι σε αναλογία με τις παραμέτρους κλιμάκωσης του απωστικού και ελκτικού δυναμικού. Στην περίπτωση που ο αρχηγός δεν έχει φτάσει στον στόχο θα ελέγξει όλες τις αποστάσεις του από τους ακόλουθους. Η ενέργεια αυτή γίνεται στα πλαίσια διατήρησης του σχηματισμού. Ο αρχηγός μέσω της επικοινωνίας με τους ακόλουθους, έχει πρόσβαση στις θέσεις τους. Υπολογίζει τις αποστάσεις και σε περίπτωση που ανιχνευτεί κάποιος ακόλουθος σε μεγαλύτερη απόσταση από το επιτρεπτό, ο αρχηγός σταματάει την κίνησή του. Σε αντίθετη περίπτωση, υπολογίζονται οι ταχύτητες (γραμμική και γωνιακή) και εφαρμόζονται στους κινητήρες του ρομπότ. Οι ενέργειες επαναλαμβάνονται μέχρις ότου ο αρχηγός βρεθεί στην τελική θέση, όπου και ακινητοποιείται.



Εικόνα 24. Το διάγραμμα ροής των ακόλουθων(Φάση2)

Ο βρόχος του διαγράμματος ροής για τους ακόλουθους παρουσιάζεται στην Εικόνα24. Μετά το τέλος της πρώτης φάσης, οι ακόλουθοι βρίσκονται ακινητοποιημένοι στις τελικές θέσεις, όπως αυτές υπολογίστηκαν κατά την φάση αυτή. Η κίνηση του αρχηγού κατά την δεύτερη φάση μεταβάλλει τις τελικές θέσεις των ακόλουθων. Η συμπεριφορά της πλοήγησης των ακόλουθων στην δεύτερη φάση μπορεί παρομοιαστεί ως ένα «κυνηγητό». Οι ακόλουθοι πλοηγούνται προς τις επιθυμητές θέσεις οι οποίες συνεχώς μετατοπίζονται λόγω της κίνησης του αρχηγού. Ομοίως με την συμπεριφορά του αρχηγού, οι ακόλουθοι υπολογίζουν την τιμή στου πεδίου στο σημείο που βρίσκονται και ελέγχουν για τερματισμό με βάση ένα κατώφλι. Τα διαγράμματα ροής αρχηγού – ακόλουθων έχουν την ίδια σχεδόν μορφή. Με την μόνη διαφορά να ωφείλεται στις ενέργειες για την διατήρηση του σχηματισμού που εκτελεί ο αρχηγός. Η ομοιότητα των διαγραμμάτων ροής ωφείλεται στο γεγονός ότι κάθε ρομπότ πλοηγείται αυτόνομα, με τον ίδιο αλγόριθμο πλοήγησης και τις ίδιες συνθήκες ελέγχου(Συναρτήσεις Δυναμικών Πεδίων).

Κεφάλαιο 4. Το περιβάλλον

προσομοίωσης

Gazebo

Η αναπαράσταση λειτουργίας μιας διαδικασίας του φυσικού κόσμου καλείται προσομοίωση. Η τεχνική της προσομοίωσης στον τομέα της Ρομποτικής είναι ένα απαραίτητο τμήμα της ανάπτυξης κάθε ρομποτικής εφαρμογής. Η προσομοίωση μας δίνει την δυνατότητα να εκτελέσουμε εικονικά σε κάποιο περιβάλλον τον αλγόριθμο που αναπτύσσουμε. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγουμε την εκτέλεση της υπο ανάπτυξης εφαρμογής στο υλικό, καθώς μια ακανόνιστη συμπεριφορά μπορεί να οδηγήσει σε φθορές και βλάβες του υλικού. Μετά το τέλος της ανάπτυξης της επιθυμητής συμπεριφοράς, είμαστε σε θέση να εγγυηθούμε για την συμπεριφορά του συστήματος και μπορούμε να εκτελέσουμε με ασφάλεια την εφαρμογή στο υλικό.

Η τεχνική της προσομοίωσης απαιτεί την χρήση μοντέλων. Τα μοντέλα είναι εικονικά αντίγραφα των αντικειμένων του πραγματικού κόσμου, που χρησιμοποιούνται κατά την εκτέλεση της εφαρμογής. Η μοντελοποίηση των αντικειμένων πρέπει να γίνεται με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη πιστότητα στα πραγματικά αντικείμενα, γεγονός που θα επιτρέψει την ευκολότερη μετάβαση από την προσομοίωση στον πραγματικό κόσμο.

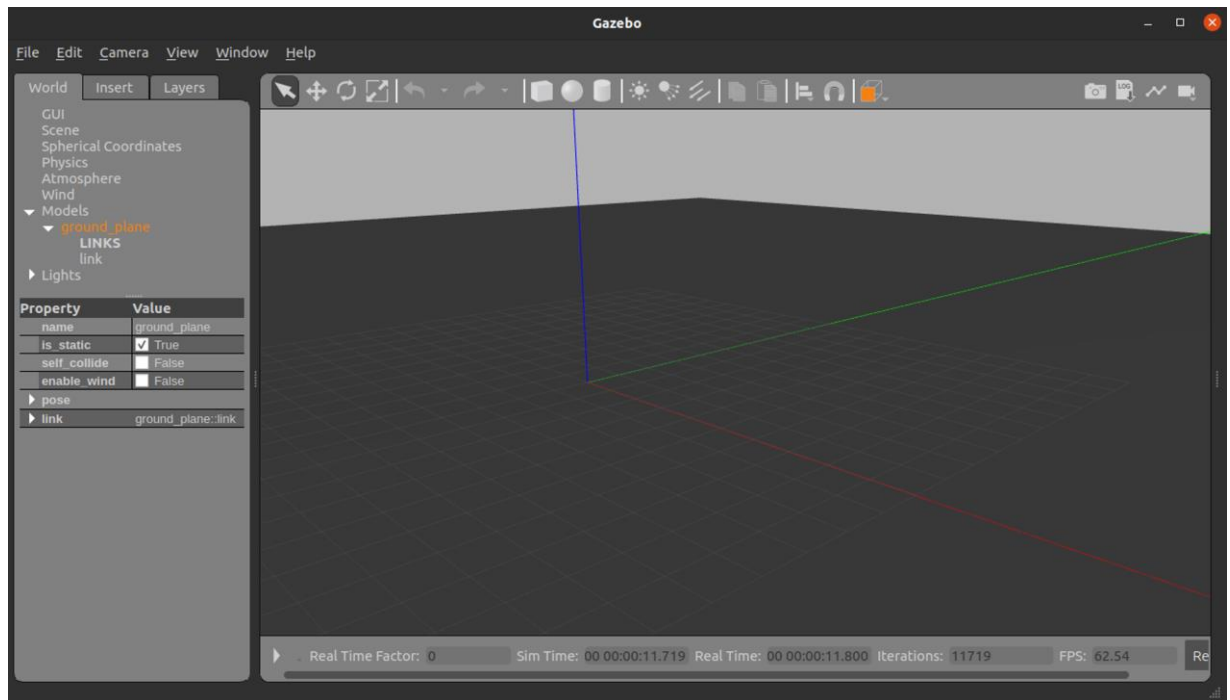
Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον προσομοίωσης Gazebo[14]. Το Gazebo είναι ένας τρισδιάστος προσομοιωτής ρομποτικής, ο οποίος παρέχει διεπαφές για την επικοινωνία με τα μοντέλα, καθώς και εργαλεία μοντελοποίησης. Μέσω του Gazebo μπορεί να προσομοιωθεί το περιβάλλον του πραγματικού κόσμου, καθώς ενσωματώνει μηχανή φυσικής. Η μηχανή φυσικής προσδίδει ρεαλιστικότητα στο περιβάλλον και μας δίνει μεγαλύτερη ακρίβεια στον έλεγχο της ρομποτικής εφαρμογής. Στις ενότητες που ακολουθούν περιγράφουμε τις διαδικασίες της δημιουργίας του περιβάλλοντος και της μοντελοποίησης των ρομπότ. Τέλος, πιστοποιούμε την σωστή λειτουργία του αλγόριθμου πλοήγησης του ρομποτικού σμήνους με την χρήση γραφικών παραστάσεων.

4.1 Περιγραφή του περιβάλλοντος

Μέσω του προσομοιωτή Gazebo μπορούμε να δημιουργήσουμε περιβάλλοντα με αρκετή ρεαλιστικότητα. Ωστόσο η αύξηση του ρεαλισμού προκαλεί αύξηση των υπολογιστικών πόρων που απαιτούνται. Για τις ανάγκες της παρούσας άσκησης χρησιμοποιούμε ένα απλό σχετικά περιβάλλον καθώς επικεντρωνόμαστε μόνο στην πλοήγηση. Για την απόδοση των δυνάμεων που αναπτύσσονται μεταξύ των ρομπότ και του εδάφους(π.χ. τριβές) χρησιμοποιούμε την μηχανή φυσικής ODE.

Το περιβάλλον που χρησιμοποιούμε για την προσομοίωση αποτελείται από τα βασικά μοντέλα που χρειαζόμαστε. Αρχικά, προσθέτουμε το μοντέλο του εδάφους, στο οποίο επιβάλλουμε την ύπαρξη τριβής, ώστε να πετύχουμε την ομαλή κίνηση των ρομπότ. Στην συνέχεια χρειαζόμαστε το εικονικό μοντέλο του AmigoBot. Η βιβλιοθήκη του Gazebo περιέχει κάποια ήδη υλοποιημένα μοντέλα για γνωστά ρομπότ που μπορούμε να επιλέξουμε και να χειριστούμε αμέσως. Ωστόσο, το AmigoBot δεν είναι ένα από αυτά και έτσι θα χρειαστεί να δημιουργήσουμε ένα εικονικό μοντέλο για το ρομπότ. Τέλος, χρειαζόμαστε να εισάγουμε εμπόδια στον χώρο. Τα εμπόδια μπορεί να είναι είτε βασικά γεωμετρικά σχήματα, τα οποία προσφέρει το περιβάλλον απευθείας, είτε σύνθετα μοντέλα αντικειμένων του πραγματικού κόσμου(π.χ, τραπέζια, καρέκλες), τα οποία εισάγονται από βιβλιοθήκες γραφικών του Gazebo. Επίσης, μπορούμε να σχεδιάσουμε και να εισάγουμε δικά μας μοντέλα εμποδίων με την χρήση κάποιου προγράμματος σχεδίασης όπως το Blender ή το MeshLab. Στην περίπτωσή μας, χρησιμοποιούμε τα γνωστά στερεά σώματα που προσφέρει το Gazebo(κύβους, κυλίνδρους και σφαίρες) καθώς επικεντρωνόμαστε κυρίως στην αποφυγή κατά την πλοήγηση και όχι τόσο στον ρεαλισμό των εμποδίων.

Συγκεκριμένα, το περιβάλλον που σχεδιάσαμε για την προσομοίωση της παρούσας άσκησης αποτελείται από το έδαφος, τα πέντε μοντέλα AmigoBot και ένα αριθμό από εμπόδια σε σχήμα κύβων και ορθογωνίων παραλληλεπιπέδων.



Εικόνα 25. Το περιβάλλον του Gazebo

Στην Εικόνα 25 παρουσιάζεται το περιβάλλον του προσομοιωτή Gazebo. Οι τρεις άξονες(x, y, z) αποτυπώνονται με κόκκινο, πράσινο και μπλε χρώμα αντίστοιχα. Πάνω από την απεικόνιση της σκηνής βρίσκεται η λίστα των εργαλείων. Το Gazebo προσφέρει εργαλεία για την μετακίνηση, περιστροφή και κλιμάκωση των αντικειμένων. Επίσης, επιτρέπει την εισαγωγή συγκεκριμένων γεωμετρικών στερεών με ευκολία. Στην συνέχεια, έχουμε την επιλογή να προσθέσουμε πηγές φωτισμού αλλά και να αλλάξουμε την γωνία προβολής της σκηνής. Τέλος, δίνεται η δυνατότητα λήψης στιγμιοτύπων και βίντεο κατά την διάρκεια εκτέλεσης της προσομοίωσης. Στα αριστερά του παραθύρου υπάρχουν οι καρτέλες διαχείρισης της προσομοίωσης. Η καρτέλα World περιέχει την λίστα με τα αντικείμενα που ήδη υπάρχουν στην σκηνή. Από την ίδια καρτέλα μπορούμε να μεταβάλλουμε τις ιδιότητες των ενεργών αντικειμένων. Η καρτέλα Insert μας επιτρέπει να εισάγουμε μοντέλα στην σκηνή. Με χρήση του εξερευνητή αρχείων του λειτουργικού συστήματος μπορούμε να επιλέξουμε το μοντέλο που θέλουμε να εμφανίσουμε. Τέλος, η καρτέλα Layers περιέχει την λίστα με τις υφές που χρησιμοποιούνται στην σύνθεση της σκηνής. Συνήθως η καρτέλα αυτή χρησιμοποιείται για να δοθεί ρεαλισμός στην σκηνή της προσομοίωσης. Στην παρούσα εργασία εστιάζουμε στην συμπεριφορά του αλγόριθμου πλοήγησης, για αυτό το λόγο δεν θα κάνουμε χρήση της συγκεκριμένης καρτέλας. Στο κάτω μέρος του παραθύρου έχουμε την δυνατότητα να σταματήσουμε και να εκκινήσουμε την προσομοίωση.

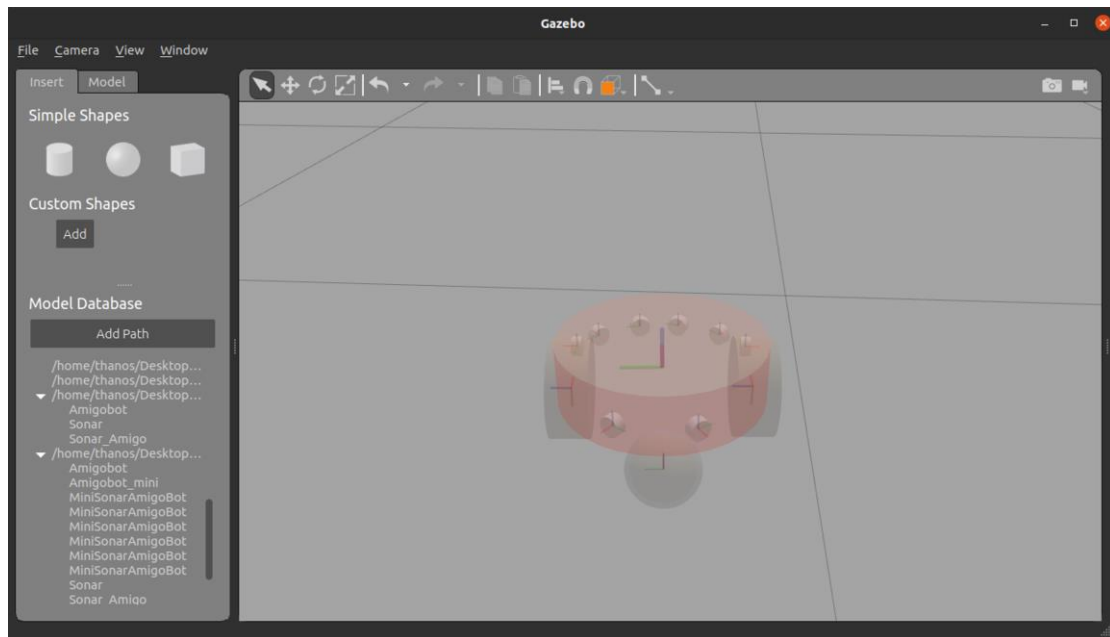
4.2 Η μοντελοποίηση του ρομπότ

Για την επιτυχημένη μοντελοποίηση των ρομπότ πρέπει να μελετήσουμε πρώτα το πραγματικό AmigoBot και να παρατηρήσουμε τις ιδιότητες που χαρακτηρίζουν την λειτουργία του. Αυτές είναι οι ιδιότητες τις οποίες πρέπει να αποδώσουμε με ακρίβεια, ώστε να δημιουργήσουμε ένα πιστό εικονικό μοντέλο στο πραγματικό ρομπότ. Κάποιες από τις ιδιότητες είναι οι εξής: Το σχήμα και οι διαστάσεις του σώματος του ρομπότ, η μορφή της κίνησής του, το είδος των επενεργητών, το είδος και η τοποθεσία των αισθητήρων.

Το εργαλείο μοντελοποίησης του Gazebo (Gazebo model editor), μας επιτρέπει την δημιουργία των επιμέρους τμημάτων του ρομπότ και την σύνδεση μεταξύ τους. Το εργαλείο περιγράφει τα μέρη του ρομπότ ως links (συνδέσμους) και δίνει την δυνατότητα σύνδεσης διαφορετικών συνδέσμων με joints(αρθρώσεις). Τόσο οι σύνδεσμοι όσο και οι αρθρώσεις έχουν ιδιότητες με βάση την μηχανή φυσικής που χρησιμοποιείται. Αυτές τις ιδιότητες μπορούμε να τις τροποποιήσουμε, ώστε να πετύχουμε την επιθυμητή συμπεριφορά. Όλοι οι σύνδεσμοι πρέπει να είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους μέσω κάποιας άρθρωσης. Στην συνέχεια το εργαλείο μοντελοποίησης εξάγει την οπτική αναπαράσταση του μοντέλου ως αρχείο με την κατάληξη .sdf. Τα αρχεία αυτά χειριζόμαστε στην συνέχεια προγραμματιστικά για να προκαλέσουμε την εμφάνιση του μοντέλου στο περιβάλλον της προσομοίωσης. Όμως, η λειτουργία του model editor δεν αρκεί για να έχουμε ένα λειτουργικό μοντέλο ρομπότ. Η μοντελοποίηση παράγει το μόνο την οπτική αναπαράσταση του μοντέλου, χωρίς να εισάγει κάποια διεπαφή για την λειτουργικότητά του. Έτσι, ενώ έχουμε δημιουργήσει το μοντέλο δεν μπορούμε να το θέσουμε σε κίνηση δίνοντας ταχύτητες στους επενεργητές του, ούτε να λάβουμε δεδομένα από τους αισθητήρες. Για την υλοποίηση των λειτουργιών του ρομπότ χρησιμοποιούμε βιβλιοθήκες(plugin) που παρέχει το Gazebo, τις οποίες εισάγουμε χειροκίνητα στον κώδικα των .sdf αρχείων.

Η πρώτη κίνηση είναι να δημιουργήσουμε το σώμα του ρομπότ. Όλα τα μέρη του ρομπότ τα προσεγγίζουμε με την χρήση τρισδιάστων κυλίνδρων διαφορετικών μεγεθών. Αρχικά, αναπαριστούμε το σώμα του ρομπότ ως έναν κύλινδρο στον οποίο προσαρτούμε με την χρήση αρθρώσεων δύο κυλινδρικούς τροχούς και ένα σφαιρικό caster wheel. Τέλος, προσθέτουμε τους αισθητήρες σόναρ περιμετρικά του ρομπότ με σεβασμό στην μορφή του αληθινού μοντέλου. Τα στερεά σώματα που αποτελούν τα μέρη του ρομπότ έχουν τις γνωστές ιδιότητες των στερεών σωμάτων π.χ. μάζα, μήκος και ύψος. Οι επιλογές των

τιμών των ιδιοτήτων αυτών έγιναν σε αναλογία με τις ιδιότητες του πραγματικού ρομπότ. Η σημαντικότερη παράμετρος σε κάθε σώμα, η οποία πρέπει να καθοριστεί με ακρίβεια είναι ο τριδιάστατος πίνακας αδράνειας (inertia matrix) [15]. Ο πίνακας αδράνειας περιγράφει τον τρόπο κατανομής της μάζας στο σώμα του γεωμετρικού στερεού. Οι συνιστώσες του πίνακα αδράνειας είναι αναγκαίο να υπολογιστούν με ακρίβεια, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του κάθε σώματος. Η κατανομή της μάζας ορίζει την συμπεριφορά των στερεών υπο την επίδραση ροπών. Η μηχανή φυσικής του προσομοιωτή αναλαμβάνει τον υπολογισμό των δυνάμεων και των ροπών. Ωστόσο, είναι αναγκαίο να ορίσουμε χειροκίνητα τους πίνακες αδράνειας, ώστε να προσδιορίσουμε την επιθυμητή συμπεριφορά κάθε σώματος που συνθέτει το εικονικό μοντέλο. Η μοντελοποίηση της κίνησης και των αισθητήρων εξηγείται εκτενώς στις επόμενες υποενότητες.



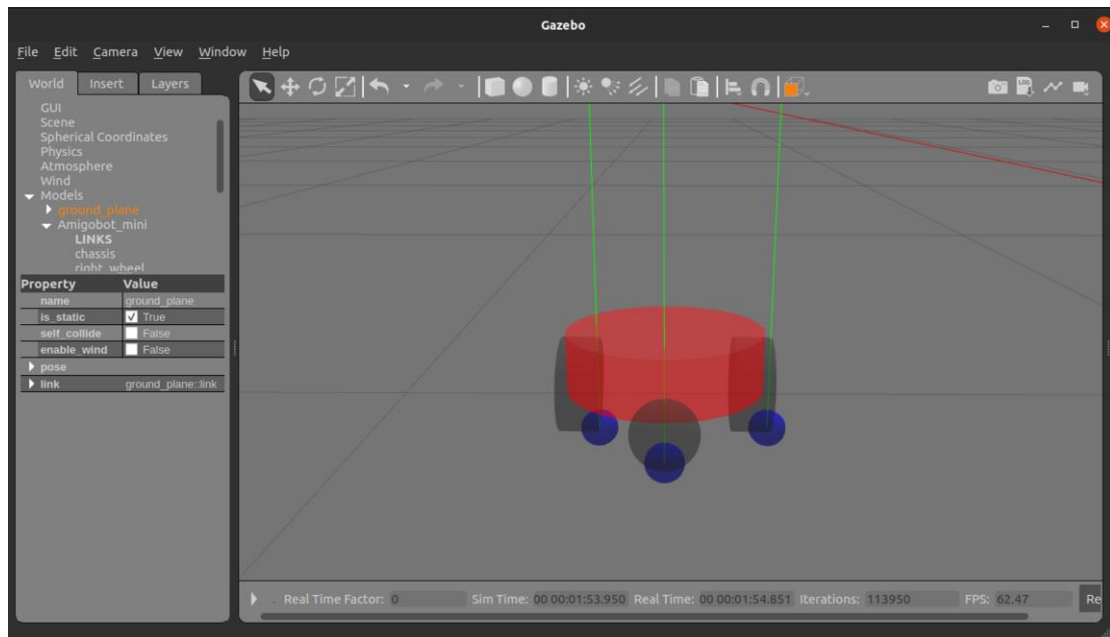
Εικόνα 26. Το ρομποτικό μοντέλο

Στην Εικόνα 26 παρουσιάζουμε την τελική μορφή του εικονικού μοντέλου. Το παράθυρο που απεικονίζεται είναι ο προσομοιωτής Gazebo κατά την λειτουργία του model editor. Το μοντέλο που έχουμε κατασκευάσει φαίνεται διαφανές, ώστε να μπορούμε με ευκολία να έχουμε πρόσβαση σε όλα τα αντικείμενα ακόμα και αν αυτά βρίσκονται στο εσωτερικό του. Κάθε σώμα έχει το δικό του ορθοκανονικό σύστημα αξόνων. Η ιδιότητα αυτή επιτρέπει να προσδιορίζουμε τον προσανατολισμό και την θέση κάθε σώματος σε σχέση με το σύστημα αξόνων που ορίζει την σκηνή.

Οι καρτέλες που προσφέρει ο model editor προσφέρουν την λειτουργία εισαγωγής μοντέλων(Καρτέλα Insert) και την επεξεργασία του τρέχοντος μοντέλου(Καρτέλα Model). Η καρτέλα Insert υλοποιείται από τον εξερευνητή αρχείων του λειτουργικού συστήματος και επιτρέπει την φόρτωση του κατάλληλου μοντέλου(σε μορφή αρχείου .sdf) στο εργαλείο μοντελοποίησης για επεξεργασία. Η καρτέλα Model περιέχει την λίστα των αρθρώσεων και συνδέσμων που συνθέτουν το μοντέλο. Με την επιλογή κάποιου στοιχείου από την λίστα, έχουμε πρόσβαση και μπορούμε να επεξεργαστούμε τις ιδιότητές του. Μπορούμε για παράδειγμα, να αλλάξουμε το χρώμα του σώματος του ρομπότ ή να αλλάξουμε τον προσανατολισμό κάποιου αισθητήρα σόναρ.

4.2.1 Η μοντελοποίηση της κίνησης

Όπως παρουσιάστηκε και στο Κεφάλαιο 2 , στο οποίο περιγράψαμε το αληθινό ρομπότ της εργασίας, το AmigoBot είναι ένα ρομπότ διαφορικής οδήγησης. Αυτή είναι η βασικότερη ιδιότητα της κίνησης που πρέπει να αποδόσουμε και στο εικονικό μοντέλο. Κατά την σχεδίαση του ρομπότ τοποθετήσαμε δύο κυλινδρικούς τροχούς και ένα σφαιρικό caster wheel. Σε κάθε κυλινδρικό τροχό επιτρέπουμε την περιστροφή γύρω από τον άξονα y , σύμφωνα με τις ταχύτητες που υπολογίζουμε. Η κίνηση του caster wheel γίνεται ελεύθερα στους άξονες x , y χωρίς να ενεργεί πάνω του κάποιος επενεργητής. Ο καθορισμός του επιθυμητού προφίλ κίνησης των τροχών γίνεται με την επιλογή των κατάλληλων αρθρώσεων για την σύνδεση τους με το σώμα του ρομπότ. Για την σύνδεση των τροχών στο σώμα του ρομπότ χρησιμοποιούμε περιστροφικές αρθρώσεις, ενώ για την σύνδεση του caster wheel σφαιρική άρθρωση. Οι διαφορετικοί τύποι αρθρώσεων είναι ήδη υλοποιημένοι σε βιβλιοθήκες του Gazebo και μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν για την μοντελοποίηση κάθε ρομπότ. Για την ομαλή κίνηση του ρομπότ εισάγουμε συντελεστή τριβής σε κάθε σημείο επαφής του ρομπότ με το έδαφος(τροχοί), όπως κάναμε και στο έδαφος.



Εικόνα 27. Τα σημεία επαφής με το έδαφος.

Η Εικόνα 27 είναι ένα στιγμιότυπο του προσομοιωτή. Στην σκηνή έχουμε εισάγει το εικονικό μοντέλο με την μορφή που του αποδόθηκε μέσω του εργαλείου model editor. Χρησιμοποιώντας τις επιλογές κάτω από την καρτέλα View, έχουμε την δυνατότητα να αλλάξουμε τον τρόπο εμφάνισης του μοντέλου. Στην πραγματικότητα το εικονικό μοντέλο είναι αδιαφανές, ωστόσο τις ανάγκες της αξιολόγησής του επιλέγουμε την διαφάνεια. Τα σημεία που εμφανίζονται ως μπλε κύκλοι είναι τα σημεία επαφής του μοντέλου με το έδαφος. Για να αποτρέψουμε την ολίσθηση του ρομπότ στο έδαφος, προσθέσαμε την ύπαρξη τριβής σε κάθε σύνδεσμο του ρομπότ που έχει επαφή με το έδαφος.

Η λειτουργικότητα της κίνησης ολοκληρώνεται με την εισαγωγή του plug-in. Ένα plug-in είναι ένα έτοιμο τμήμα κώδικα, το οποίο παρέχεται από τις βιβλιοθήκες του Gazebo και υλοποιεί κάποια καθορισμένη λειτουργία. Το Gazebo παρέχει μια πληθώρα από plug-in για την επίτευξη της λειτουργικότητας των ρομπότ. Σε κάθε περίπτωση όμως, μπορούμε να υλοποιήσουμε και το δικό μας plug-in για την κάλυψη ιδιαίτερων αναγκών. Στην περίπτωση μας εισάγουμε το differential_drive_controller plug-in. Όπως, προδίδει και το όνομά του πρόκειται για έναν ελεγκτή διαφορικής οδήγησης. Οι γραμμές κώδικα του plug-in εισάγονται στο τέλος του αρχείου .sdf, το οποίο περιέχει την περιγραφή του ρομπότ. Στην συνέχεια αρκεί να επεξεργαστούμε τις παραμέτρους που προσφέρει ο ελεγκτής στα επιθυμητά χαρακτηριστικά του μοντέλου. Ανάμεσα στις παραμέτρους που

μπορούμε να ρυθμίσουμε είναι η μέγιστη ταχύτητα του ρομπότ, η μέγιστη τιμή της ροπής, αλλά και τα ονόματα των ROS topic από τα οποία θα λαμβάνει και θα στέλνει πληροφορίες. Οι υπόλοιπες παράμετροι σχετίζονται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των τροχών και των αρθρώσεων που τους συνδέουν με το σώμα του ρομπότ. Οι παράμετροι αυτοί πρέπει να ρυθμιστούν με ακρίβεια, ώστε ο ελεγκτής να έχει την επιθυμητή συμπεριφορά.

Ο ελεγκτής που χρησιμοποιούμε αναλαμβάνει τον ρόλο να προσομοιώνει τους αληθινούς επενεργητές του ρομπότ. Επίσης, υπολογίζει και εφαρμόζει τις κατάλληλες ροπές στους τροχούς, για δεδομένη ταχύτητα, ώστε να έχουμε την επιθυμητή συμπεριφορά. Τέλος, προσομοιώνει την λειτουργία των περιστροφικών κωδικοποιητών των αληθινών ρομπότ. Με την χρήση του topic `/cmd_vel` στέλνουμε τις ταχύτητες που θέλουμε να δώσουμε στο ρομπότ. Το topic `/odom` παρέχει πληροφορίες για την θέση και τον προσανατολισμό του ρομπότ με βάση την κίνηση των τροχών του.

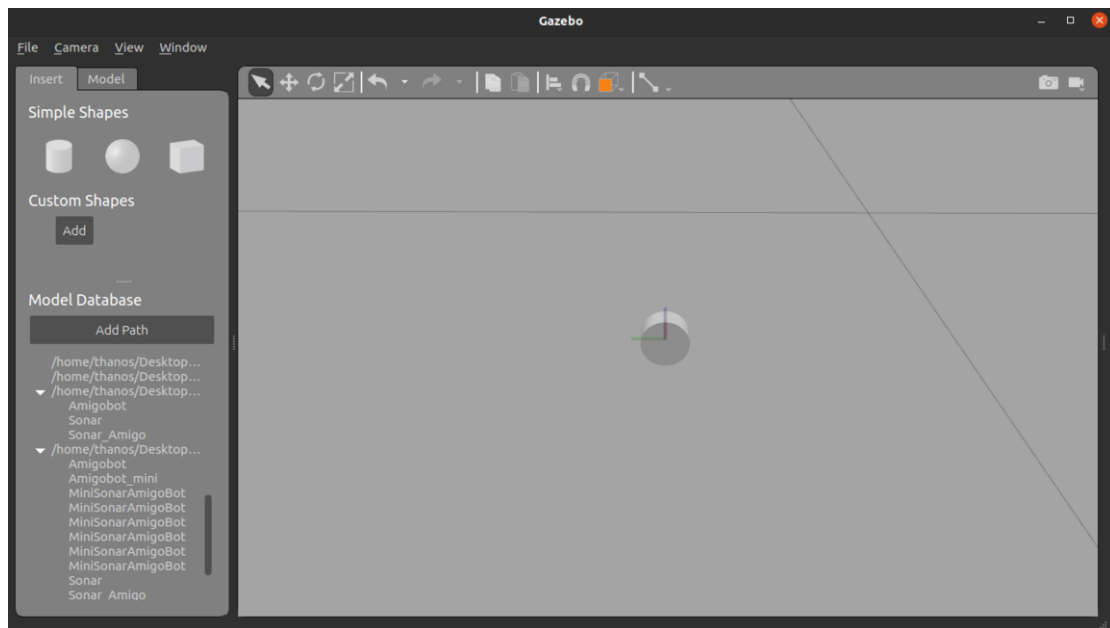
Συνοπτικά, η χρήση του ελεγκτή διαφορικής οδήγησης μας παρέχει μια διεπαφή για τον χειρισμό του ρομπότ. Εκτός από τον καθορισμό της κίνησης προσφέρει και τις απαραίτητες πληροφορίες για τον εντοπισμό του ρομπότ. Τέλος, μετά την επιτυχή εισαγωγή και ρύθμιση των παραμέτρων του ελεγκτή, έχουμε ένα ρομποτικό μοντέλο διαφορικής οδήγησης πάνω στο οποίο έχουμε απόλυτο έλεγχο μέσω ανάθεσης ταχυτήτων, ενώ γνωρίζουμε την θέση και την ταχύτητά του κάθε χρονική στιγμή. Μετά από αυτό το βήμα το ρομπότ μπορεί να κινηθεί στο περιβάλλον προσομοίωσης, να αλλάξει προσανατολισμό και να ακινητοποιηθεί.

4.2.2 Η μοντελοποίηση των αισθητήρων

Το επόμενο χαρακτηριστικό που καλούμαστε να μοντελοποιήσουμε είναι η ύπαρξη των αισθητήρων. Όπως και κατά την μοντελοποίηση της κίνησης έτσι και κατά την μοντελοποίηση των αισθητήρων θα προσπαθήσουμε να πετύχουμε την μέγιστη πιστότητα στο αληθινό ρομπότ. Οι πραγματικοί αισθητήρες σόναρ λειτουργούν με την χρήση υπερήχων, οι οποίοι εκπέμπονται από το κάθε σόναρ ξεχωριστά. Η διασπορά των υπερήχων στο χώρο έχει κωνική μορφή. Αυτές είναι οι ιδιότητες που αποδίδουμε σε κάθε εικονικό αισθητήρα.

Χρησιμοποιώντας τον model editor του Gazebo, σχεδιάζουμε την μορφή του αισθητήρα. Πρόκειται για μια κυκλική επιφάνεια από το κέντρο της οποίας εκπέμπεται το σήμα των υπερήχων. Στην συνέχεια τοποθετούμε κάθε κυλινδρικό αισθητήρα στο σώμα του ρομπότ κατά την ίδια γωνία όπως είναι τοποθετημένοι και στο πραγματικό ρομπότ. Για την μορφή και τα χαρακτηριστικά του πραγματικού ρομπότ αντλήσαμε πληροφορίες

από τα εγχειρίδια του κατασκευαστή. Ο κάθε αισθητήρας συνδέθηκε με το σώμα του ρομπότ με μια σταθερή άρθρωση. Ο ρόλος των σταθερών αρθρώσεων είναι να «ενώσουν» το σώμα του ρομπότ με το κάθε μοντέλο αισθητήρα. Ο τύπος της σταθερής άρθρωσης δεν επιτρέπει καμία κίνηση, εξασφαλίζοντας έτσι την σταθερή θέση και προσανατολισμό των μερών που συνδέει.



Εικόνα 28. Το μοντέλο του αισθητήρα σόναρ.

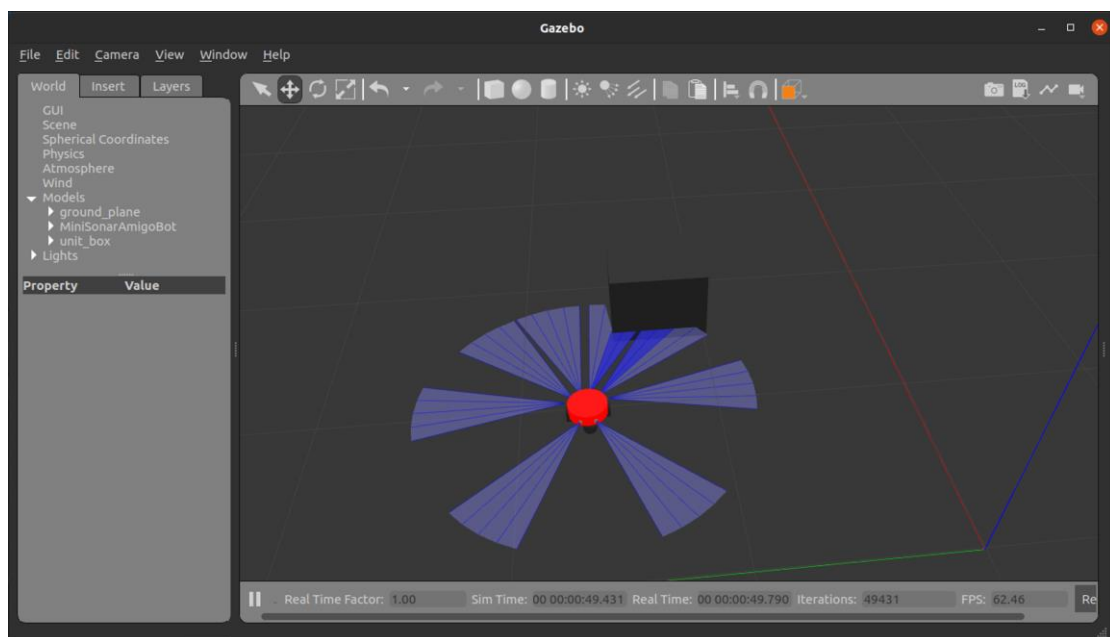
Η Εικόνα 28 αποτελεί ένα στιγμιότυπο του εργαλείου μοντελοποίησης. Με την χρήση των προσφερόμενων εργαλείων και ενός κυλίνδρου, δημιουργήσαμε το σώμα που θα αναπαραστήσει τον αισθητήρα σόναρ. Στο σώμα που κατασκευάσαμε τοποθετείται σύστημα αξόνων για τον υπολογισμό της θέσης και του προσανατολισμού του. Οι ακτίνες υπερήχων ξεκινούν από το κέντρο του κυλίνδρου και με σταθερό προσανατολισμό έχουν κατεύθυνση από το ρομπότ προς την σκηνή.

Για την λειτουργία των σόναρ χρησιμοποιήσαμε το `gazebo_ros_range` plug-in. Το συγκεκριμένο plug-in προσομοιώνει την εκπομπή και την υποδοχή των ανακλώμενων υπερήχων. Το plug-in είναι ήδη υλοποιημένο ως μέρος της βιβλιοθήκης Range του Gazebo. Οι γραμμές κώδικα του plug-in που επιλέξαμε τοποθετούνται στο αρχείο `.sdf` και μας επιτρέπουν να ρυθμίσουμε μια πληθώρα παραμέτρων για τον καθορισμό της λειτουργίας τους. Σύμφωνα με την αρχιτεκτονική του εργαλείου κατασκευής μοντέλων, κάθε σόναρ απαιτεί ξεχωριστό κώδικα για την εισαγωγή του plug-in. Το γεγονός αυτό

μας επιτρέπει να ρυθμίσουμε ξεχωριστά την συμπεριφορά του κάθε αισθητήρα. Μια από τις παραμέτρους που μπορούμε να ρυθμίσουμε σε κάθε σόναρ είναι ο ρυθμός ενημέρωσης των αισθητήρων, δηλαδή ο ρυθμός με τον οποίον εκπέμπονται τα ηχητικά κύματα. Επίσης, έχουμε την δυνατότητα αυξομείωσης της ακρίβειας των μετρήσεων με την ρύθμιση της παραμέτρου του γκαουσιανού θορύβου. Στην συνέχεια ρυθμίσαμε το εύρος του κωνικού πεδίου εκπομπής των ηχητικών κυμάτων και την γωνία εκπομπής. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, η ρύθμιση του ρυθμού εκπομπής των κυμάτων σε συνδυασμό με την τιμή του γκαουσιανού θορύβου και το εύρος του κωνικού πεδίου επηρεάζει την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα του αισθητήρα. Για να δώσουμε όσο το δυνατό μεγαλύτερη πιστότητα στο μοντέλο, ρυθμίσαμε τις τιμές του εύρους και του ρυθμού εκπομπής σύμφωνα με τα ανάλογα χαρακτηριστικά του πραγματικού ρομπότ. Η τιμή του γκαουσιανού θορύβου μπορεί να προσεγγιστεί πειραματικά στην προσπάθεια να πετύχουμε την ίδια ακρίβεια μεταξύ ρομπότ και εικονικού μοντέλου. Για τον προσδιορισμό της τιμής του θορύβου σχεδιάσαμε και εκτελέσαμε πειράματα στις μετρήσεις των αισθητήρων. Τοποθετήσαμε σε κάθε σόναρ διαδοχικά, αντικείμενα σε ίσες αποστάσεις και συγκρίναμε τις μετρήσεις του πραγματικού και του εικονικού μοντέλου του ρομπότ. Στην συνέχεια, με δοκιμές ρυθμίσαμε την τιμή του θορύβου, ώστε να έχουμε συμφωνία στις μετρήσεις. Με αυτόν τον τρόπο προσπαθήσαμε να προσεγγίσουμε τον θόρυβο των αισθητήρων του πραγματικού ρομπότ. Στην πραγματικότητα ο θόρυβος αυτός ωφείλεται στην φύση των κυμάτων που χρησιμοποιούνται και στην ακρίβεια με την οποία ο αισθητήρας καταγράφει το ηχητικό σήμα που επέστρεψε. Κατά την λειτουργία των αισθητήρων είναι εφικτό ένας αισθητήρας να λάβει ένα ηχητικό σήμα το οποίο δεν εκπέμφθηκε από αυτόν, λόγω ανάκλασης. Γεγονός το οποίο αυξάνει τον θόρυβο και μειώνει την αξιοπιστία του επηρεασμένου σόναρ. Τέλος, ρυθμίσαμε μέσω του plug-in το όνομα των topic στα οποία θα γίνει η ροή πληροφορίας των μετρήσεων. Όπως προαναφέραμε η λειτουργία του κάθε σόναρ είναι ανεξάρτητη από τα υπόλοιπα. Με βάση αυτό, απαιτούνται οκτώ topics για την ροή της πληροφορίας, ένα για κάθε διαφορετικό σόναρ. Η ανάγκη αυτή αυξάνει ραγδαία την απαίτηση σε υπολογιστικούς πόρους. Για την επίλυση του προβλήματος των πόρων επιτρέψαμε στις μετρήσεις, ανεξαρτήτως του σόναρ που τις κατέγραψε, να κυκλοφορούν στο ίδιο topic. Στην συνέχεια, το όνομα κάθε μοντέλου σόναρ χρησιμοποιείται για να αποφανθούμε ως προς τον αισθητήρα που κατέγραψε την κάθε μέτρηση. Η παρέμβαση αυτή έγινε για λόγους μείωσης του κόστους επικοινωνίας του ρομποτικού σμήνους και η λογική υλοποιείται σε επίπεδο κώδικα. Τέλος, για την οπτικοποίηση των πεδίων που καλύπτουν τα σόναρ προσθέσαμε ένδειξη για τις εκπεμπόμενες ακτίνες. Η μορφή του αισθητήρα(αρχείο .sdf) σε συνδυασμό με την εισαγωγή του plug-in οδηγεί στην ύπαρξη ενός λειτουργικού

μοντέλου του αισθητήρα. Το μοντέλο που κατασκευάσαμε θα χρησιμοποιηθεί επαναληπτικά για την αναπαράσταση όλων των αισθητήρων σε όλο το ρομποτικό σμήνος. Για να δημιουργήσουμε τα διαφορετικά σόναρ, χρησιμοποιούμε το μοντέλο που έχουμε κατασκευάσει, στο οποίο δίνουμε τον επιθυμητό προσανατολισμό και το προσαρτούμε στις κατάλληλες θέσεις με χρήση σταθερών αρθρώσεων. Με αυτό τον τρόπο η μοντελοποίηση των αισθητήρων μπορεί να επιτευχθεί με την επαναχρησιμοποίηση του αρχικού μοντέλου που σχεδιάσαμε. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η τροποποίηση του ονόματος του κάθε μοντέλου και των topics στα οποία εκπέμπει, ώστε να μπορούμε να ξεχωρίσουμε τα διαφορετικά μοντέλα.

Μετά την διαδικασία της μοντελοποίησης των σόναρ και της τοποθέτησής τους στο σώμα του ρομπότ, έχουμε την πληροφορία της ύπαρξης ή όχι εμποδίου καθώς και την γωνία και απόσταση που αυτό εντοπίστηκε. Στο σημείο αυτό η μοντελοποίηση του ρομπότ έχει ολοκληρωθεί.



Εικόνα 29. Το εικονικό μοντέλο του AmigoBot.

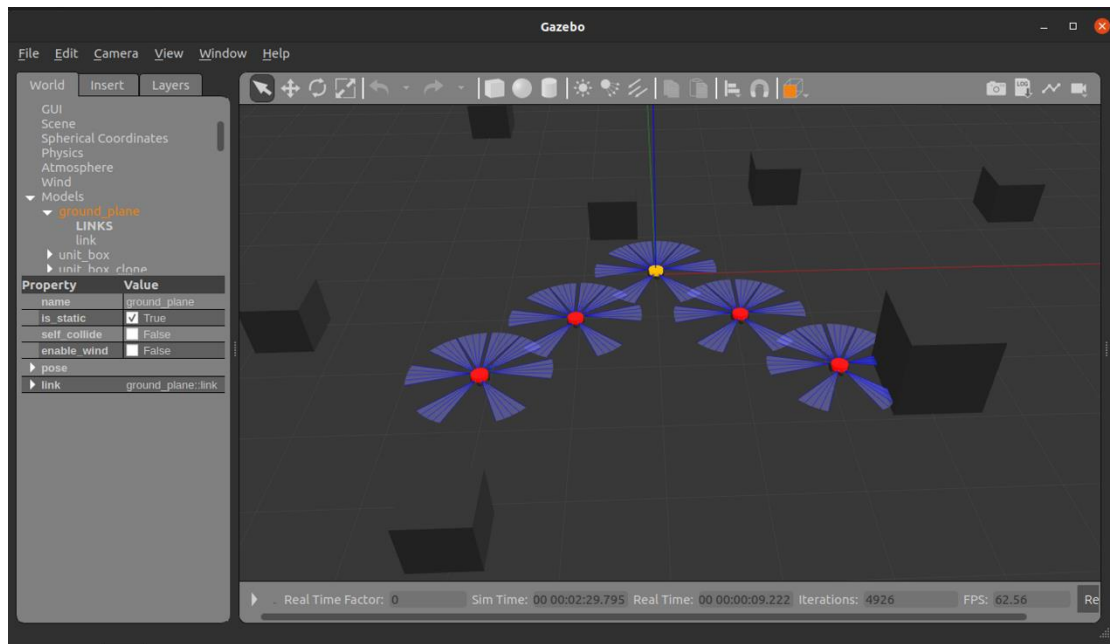
Στην Εικόνα 29 παρουσιάζεται η ολοκληρωμένη μορφή του εικονικού μοντέλου και η λειτουργία του κατά την προσομοίωση. Στο συγκεκριμένο στιγμιότυπο, το ρομπότ έχει ανιχνεύσει μέσω των αισθητήρων την ύπαρξη του εμποδίου. Η αλλαγή χρώματος στις ακτίνες γίνεται για λόγους οπτικοποίησης και υποδεικνύει ποιοι αισθητήρες έχουν ανιχνεύσει κάποιο εμπόδιο. Η γνώση του προσανατολισμού των αισθητήρων που ανίχνευσαν το εμπόδιο και της απόστασης του εμποδίου μας επιτρέπουν να

υπολογίσουμε τις θέσεις στις οποίες ανιχνεύτηκε εμπόδιο. Οι θέσεις των εμποδίων που υπολογίσαμε χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του απωστικού δυναμικού(Ενότητα 4.3.2 Το απωστικό δυναμικό). Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, οι αισθητήρες ανιχνεύουν σημεία της επιφάνειας του εμποδίου. Όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3, το συνολικό δυναμικό που υπολογίζεται θα οδηγήσει το ρομπότ με ασφάλεια στον προορισμό του.

4.2.3 Η μοντελοποίηση του εικονικού κόσμου

Η εκτέλεση της ρομποτικής εφαρμογής πραγματοποιείται στο περιβάλλον ενός εικονικού κόσμου. Ως κόσμος(Gazebo world) περιγράφεται το σύνολο όλων των αντικειμένων και η αρχική τοποθέτηση τους στην σκηνή. Ο κόσμος περιγράφει την αρχική κατάσταση από την οποία ξεκινά η προσομοίωση. Η περιγραφή ενός κόσμου γίνεται με αρχεία .world. Κατά την δημιουργία αρχείων τέτοιου τύπου ορίζουμε τα αντικείμενα που θέλουμε να εμφανίσουμε καθώς και την θέση και τον προσανατολισμό τους. Στους εικονικούς κόσμους που δημιουργήσαμε για τις ανάγκες των προσομοιώσεων της παρούσας εργασίας, εισάγουμε το ρομποτικό σμήνος και ένα πλήθος εμποδίων. Τα αρχεία .world χρησιμοποιούνται ως αρχεία εισόδου στον προσομοιωτή για να φορτωθεί το περιβάλλον που έχουμε κατασκευάσει.

Για την σύσταση του ρομποτικού σμήνους αρκεί να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο που κατασκευάστηκε. Δημιουργούμε πέντε αντίγραφα του ρομπότ και αριθμούμε το κάθε άτομο σύμφωνα με τον ρόλο του(Ενότητα 3.3 Ο σχηματισμός του σμήνους). Στην συνέχεια τοποθετούμε το κάθε μοντέλο σε κάποια αρχική θέση μέσω του αρχείου .world. Έπειτα, εισάγουμε στον κόσμο τα εμπόδια. Τα εμπόδια έχουν τυχαία μεγέθη και έχουν κατανεμηθεί τυχαία στο χώρο. Στο σημείο αυτό είμαστε σε θέση να εκτελέσουμε την ρομποτική εφαρμογή και να αξιολογήσουμε την συμπεριφορά της.



Εικόνα 30. Η σκηνή της προσομοίωσης.

Στην Εικόνα 30 παρουσιάζουμε την σκηνή της προσομοίωσης. Πρόκειται για την μορφή του εικονικού κόσμου στον οποίο εκτελούμε την πλοήγηση του σμήνους. Τα αντικείμενα που απαρτίζουν την σκηνή είναι το σύνολο των πέντε ρομπότ του σμήνους και ένα σύνολο εμποδίων διαφορετικών μεγεθών. Για την καλύτερη παρακολούθηση του αλγόριθμου επιλέξαμε να δώσουμε στο ρομπότ-αρχηγό ένα ξεχωριστό χρώμα. Ο προσανατολισμός της σκηνής είναι ο εξής: Ο άξονας που αποτυπώνεται με κόκκινο χρώμα είναι ο άξονας x, με πράσινο ο y και με μπλέ χρώμα ο άξονας z. Σαν αρχική κατάσταση επιλέξαμε να τοποθετήσουμε τα ρομπότ σε σχηματισμό. Όπως αναλύσαμε και στο ανάλογο κεφάλαιο, ο προσανατολισμός του σμήνους επιβάλεται από τον αρχηγό. Στο στιγμιότυπο που παρουσιάζεται ο προσανατολισμός του σμήνους αντιστοιχεί σε γωνία 90 μοιρών με τον άξονα x.

4.3 Πειραματικά αποτελέσματα

Στην συγκεκριμένη ενότητα εξετάζουμε κάποια σενάρια εκτέλεσης του αλγόριθμου που αναπτύξαμε. Κατά την προσομοίωση των σεναρίων συγκεντρώνουμε δεδομένα για την συμπεριφορά των ατόμων αλλά και του σμήνους. Με την χρήση των δεδομένων που συλλέξαμε, παρουσιάζουμε γραφικές παραστάσεις για όλες τις σημαντικές ιδιότητες του αλγόριθμου πλοήγησης. Μέσω του σχολιασμού και της αξιολόγησης των γραφικών παραστάσεων αποδεικνύουμε την ορθότητα και την αποτελεσματικότητα της ρομποτικής εφαρμογής που σχεδιάσαμε.

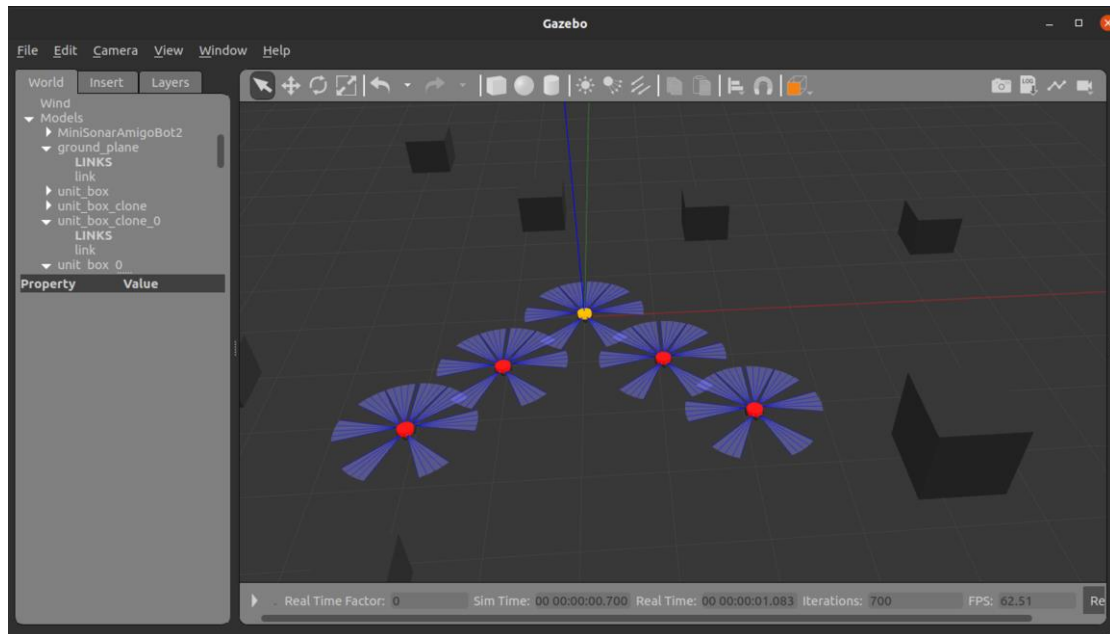
Σύμφωνα με την Ενότητα 3.5 η ροή του αλγόριθμου μπορεί να διαιρεθεί σε δύο φάσεις, την φάση του αρχικού σχηματισμού και την φάση της πλοήγησης. Συνοπτικά, η πρώτη φάση περιλαμβάνει την κίνηση των ρομπότ από τις τυχαίες θέσεις που βρίσκονται προς την θέση που συμπληρώνει τον σχηματισμό. Η δεύτερη φάση ξεκινά με το δεδομένο της ύπαρξης του σχηματισμού του ρομποτικού σμήνους και περιλαμβάνει την πλοήγηση ως σμήνος προς την τελική θέση. Η φάση αυτή είναι επιφορτισμένη με τους κανόνες που έχουμε σχεδιάσει για την διατήρηση του σχηματισμού κατά την διάρκεια της πλοήγησης. Για τον λόγο αυτό εξετάζουμε κάθε φάση του αλγόριθμου ξεχωριστά και συνθέτουμε τα συμπεράσματα της κάθε φάσης για να περιγράψουμε την ορθότητα του αλγόριθμου.

4.3.1 Αρχικός σχηματισμός (Πρώτη φάση)

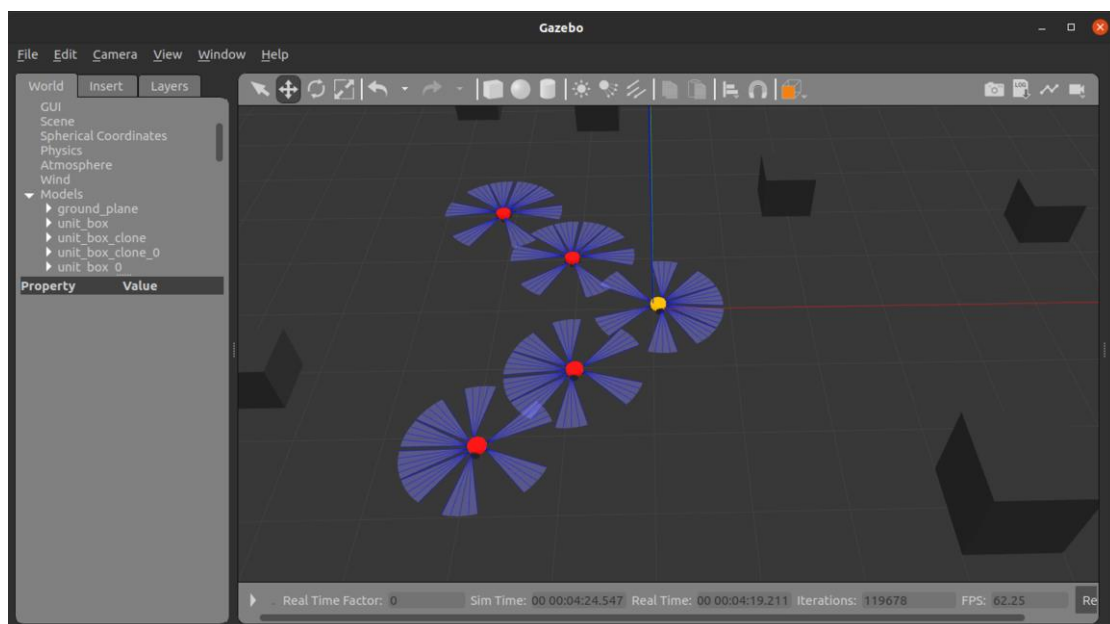
Στην ενότητα αυτή εξετάζουμε την ικανότητα των ρομπότ να κινούνται στον χώρο και να τοποθετούνται στις θέσεις που συμπληρώνουν τον σχηματισμό. Για την ανάπτυξη του σεναρίου προσομοίωσης δημιουργούμε ένα αρχείο .world, το οποίο περιγράφει την αρχική σκηνή. Η πλοήγηση των ρομπότ προς τις επιθυμητές θέσεις γίνεται με βάση τις Συναρτήσεις Δυναμικού Πεδίου. Έτσι, στο προφίλ της κίνησης ενσωματώνεται και η αποφυγή εμποδίων. Ο στόχος είναι η ατομική πλοήγηση του κάθε ρομπότ με ασφάλεια προς το σημείο που συμπληρώνει τον σχηματισμό.

Το σενάριο πάνω στο οποίο θα εξετάσουμε τις ιδιότητες του αλγόριθμου περιγράφεται ως εξής. Υποθέτουμε, ότι το ρομποτικό σμήνος βρίσκεται σε σχηματισμό, με την κορυφή του σχήματος "V", δηλαδή το ρομπότ-αρχηγό, στην θέση(0, 0) με προσανατολισμό 90 μοιρών. Η θέση προς την οποία θέλουμε να οδηγήσουμε το σμήνος είναι η (4, 0). Σύμφωνα με τον αλγόριθμο, προκαλείται αλλαγή προσανατολισμού του σμήνους. Το ρομπότ

αρχηγός αποκτά τον προσανατολισμό του τελικού σημείου, γεγονός που μεταβάλλει τις επιθυμητές θέσεις των ακόλουθων. Στο συγκεκριμένο σενάριο εξετάζουμε την κίνηση των ρομπότ προς τις θέσεις που συμπληρώνουν τον σχηματισμό.



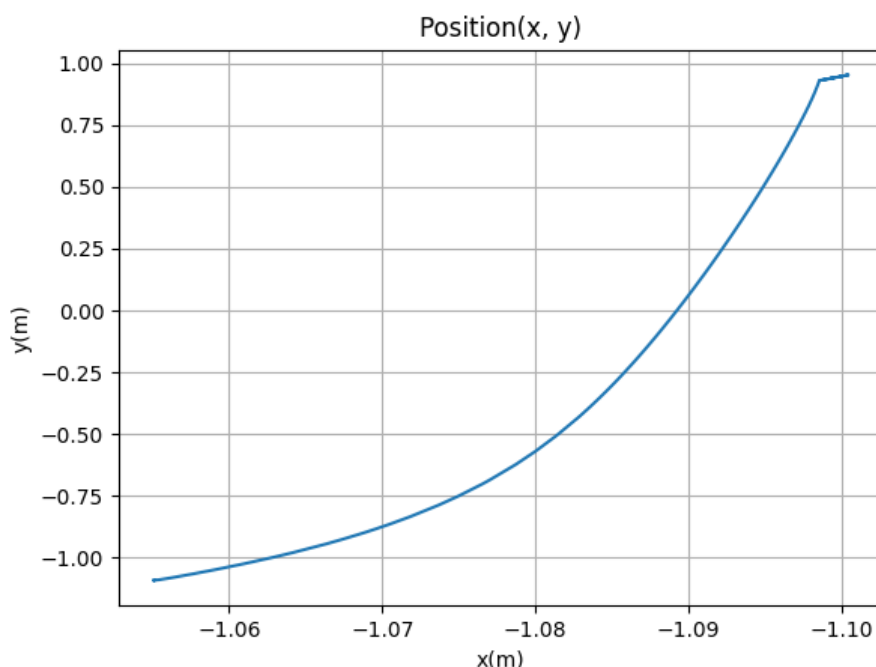
Εικόνα 31. Το σημείο εκκίνησης του σεναρίου.



Εικόνα 32. Ο προσανατολισμός του σμήνους κατά το τέλος της πρώτης φάσης.

Ο συνδυασμός των Εικόνων 31 και 32 δίνει τον αρχικό και τελικό προσανατολισμό του σμήνους κατά το τέλος της πρώτης φάσης του αλγόριθμου. Κάθε ρομπότ ακόλουθος

πλοηγείται αυτόνομα προς την τελική θέση. Το ρομπότ αρχηγός αλλάζει προσανατολισμό και παραμένει ακίνητος, καθώς η υλοποίηση της πρώτης φάσης βασίζεται στην περιστροφή γύρω από τον αρχηγό.



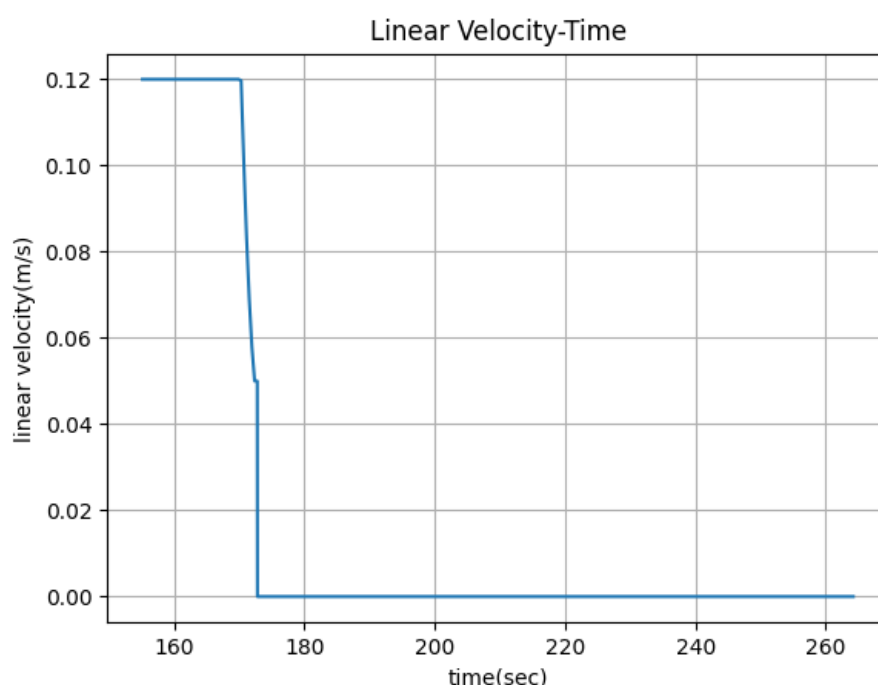
Εικόνα 33. Διάγραμμα θέσης(x, y) για τον ακόλουθο2.

Το διάγραμμα της Εικόνας 33 παρουσιάζει την μεταβολή των θέσεων του ρομπότ-ακόλουθου2. Η αρχική θέση του ρομπότ βρίσκεται κοντά στο (-1.06, -1.06), ωστόσο η αλλαγή προσανατολισμού του αρχηγού επιβάλλει την τελική θέση κοντά στο(-1.1, 1).

Υπολογίζοντας την απόσταση της τελικής θέσης από την θέση του αρχηγού, επαληθεύουμε πως ο ακόλουθος2 πληρεί την συνθήκη για την διατήρηση του σχηματισμού. Στην Ενότητα 3.3(Ο σχηματισμός του σμήνους) θέσαμε ως κριτήριο για την σύσταση του σχηματισμού τις αποστάσεις μεταξύ αρχηγού και ακόλουθων. Συγκεκριμένα ορίσαμε ότι οι ακόλουθοι2,3 πρέπει να απέχουν από τον αρχηγό απόσταση κατά προσέγγιση ίση με 1.4m ώστε να θεωρηθούν ότι βρίσκονται σε σχηματισμό. Η ίδια απόσταση για τους ακόλουθους4,5 διαμορφώνεται στα 2.8m. Η πειραματική επαλήθευση των αποστάσεων επαληθεύει την ορθότητα της συμπεριφοράς της πρώτης φάσης.

Το διάγραμμα της θέσης του ακόλουθου2 έχει μια σταθερή και ομαλή κλίση καθ'όλη την διάρκεια της κίνησης, με εξαίρεση τα τελευταία δευτερόλεπτα. Η ομαλή μεταβολή της θέσης υποδηλώνει σταθερή ταχύτητα. Κατά τα τελευταία δευτερόλεπτα της κίνησης

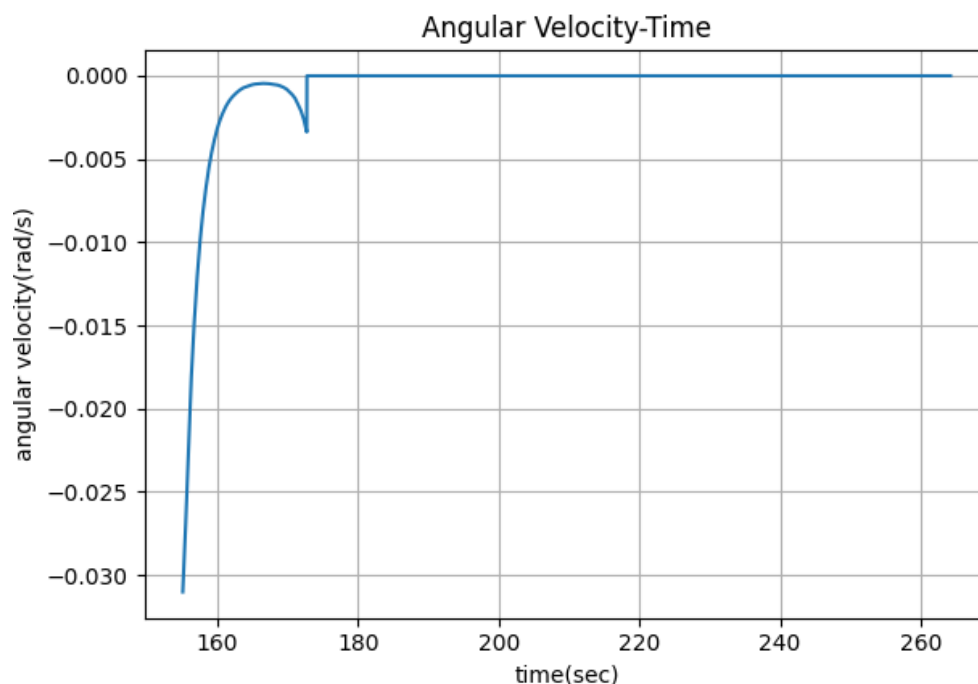
παρατηρείται και πάλι σταθερή μεταβολή αλλά με μικρότερη κλίση. Η αλλαγή της κλίσης ωφείλεται στο γεγονός ότι αλλάζουμε το είδος του ελκτικού πεδίου καθώς το ρομπότ προσεγγίζει τον στόχο. Το κωνικό πεδίο όπως και τετραγωνικό εξασφαλίζουν ομαλή κίνηση με την μόνη διαφορά να εντοπίζεται στις τιμές των ταχυτήτων. Το κωνικό δυναμικό πεδίο καταλήγει σε μεγαλύτερες ταχύτητες, καθώς χρησιμοποιείται όταν το ρομπότ απέχει μεγαλύτερες αποστάσεις από τον στόχο. Ενώ, το τετραγωνικό δυναμικό πεδίο υπολογίζει μικρότερες ταχύτητες, ώστε το ρομπότ να προσεγγίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια την θέση στόχο. Η διαφορά των υπολογιζόμενων ταχυτήτων δικαιολογεί την μεταβολή της κλίσης στο διάγραμμα της μετατόπισης.



Εικόνα 34. Διάγραμμα γραμμικής ταχύτητας για τον ακόλουθο2.

Στο διάγραμμα της Εικόνας 34 παρουσιάζεται η μεταβολή της γραμμικής ταχύτητας συναρτήσει του χρόνου. Το διάγραμμα αποτελείται από περιοχές στις οποίες παρατηρείται σταθερή ταχύτητα, ομαλή μείωση και μηδενισμός. Η μορφή του διαγράμματος περιγράφει το προφίλ κίνησης που χρησιμοποιούμε. Η μέθοδος των ελκτικών πεδίων, όπως σχολιάσαμε και στην αντίστοιχη ενότητα, υπολογίζει ταχύτητες ανάλογα με την απόσταση του ρομπότ από την τελική θέση. Κατά τα πρώτα δευτερόλεπτα της κίνησης έχουμε και την μεγαλύτερη απόσταση του ακόλουθο2 από την τελική του θέση. Σε αυτά τα δευτερόλεπτα η γραμμική ταχύτητα έχει την μέγιστη δυνατή τιμή της (0.12 m/s). Αν και η ταχύτητα φαίνεται να διατηρείται σταθερή, στην

πραγματικότητα μειώνεται υπό την επίδραση της απόστασης. Ωστόσο, η μεταβολή είναι δύσκολο να αποτυπωθεί στο διάγραμμα καθώς έχει αμελητέα τιμή. Στα επόμενα δευτερόλεπτα, το ρομπότ ως αποτέλεσμα της αρχικής του κίνησης βρίσκεται σε μικρότερη απόσταση από τον στόχο. Η προσέγγιση της τελικής θέσης προκαλεί πιο έντονη μείωση στην γραμμική ταχύτητα που εφαρμόζεται. Η κλίση της ταχύτητας του ρομπότ αντιπροσωπεύει την επιτάχυνσή του. Η κλίση στην συγκεκριμένη περιοχή μας επιτρέπει να κάνουμε λόγο για ομαλή επιβράδυνση του ρομπότ. Η αλλαγή της κλίσης κοντά στο 170^ο δευτερόλεπτο υποδεικνύει την αλλαγή του ελκτικού πεδίου (από κωνικό σε τετραγωνικό). Το τετραγωνικό πεδίο στην συνέχεια επιβραδύνει το ρομπότ μέχρι την ακινητοποίησή του. Η ακινητοποίηση συμβαίνει στην τελική θέση και ωφείλεται στον μηδενισμό του διανύσματος του δυναμικού πεδίου. Η πρώτη φάση υλοποιείται με χρήση του μηχανισμού του αμοιβαίου αποκλεισμού. Το ρομπότ μετά την άφιξη στην τελική θέση, «περιμένει» όλους τους ακόλουθους να λάβουν το δικαίωμα κίνησης και να φτάσουν στις τελικές τους θέσεις. Ο ακόλουθος 2 θα μείνει σε ακινησία μέχρι την έναρξη της δεύτερης φάσης του αλγόριθμου.



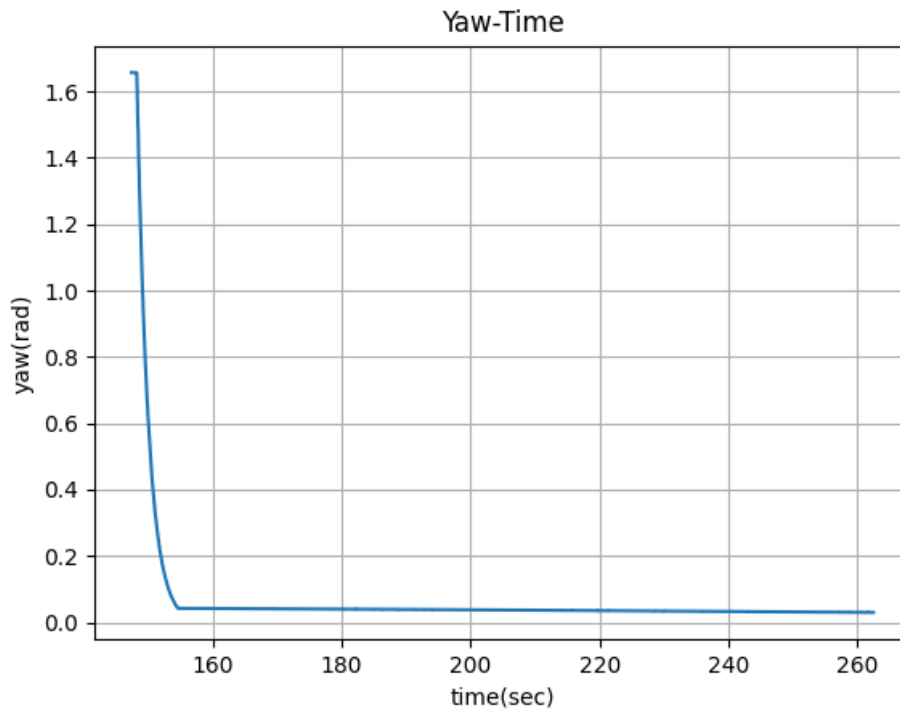
Εικόνα 35. Διάγραμμα γωνιακής ταχύτητας για τον ακόλουθο 2.

Το επόμενο διάγραμμα που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι το διάγραμμα της γωνιακής ταχύτητας του ρομπότ σε συνάρτηση με τον χρόνο. Αρχικά, το γεγονός περιστροφής του ρομπότ με αρνητική ταχύτητα υποδηλώνει αριστερόστροφη περιστροφή. Η γωνία

περιστροφής επαληθεύεται αν εξετάσουμε την αρχική και τελική θέση του ακόλουθου2 στις Εικόνες 31 και 32. Για τον υπολογισμό της γωνιακής ταχύτητας εφαρμόσαμε έναν p-controller στην διαφορά του πραγματικού προσανατολισμού από τον επιθυμητό. Υπολογίζουμε το σφάλμα, ως την διαφορά των προσανατολισμών και με δεδομένο κέρδος υπολογίζουμε την γωνιακή ταχύτητα. Η μείωση του σφάλματος προκαλεί μείωση της γωνιακής ταχύτητας, γεγονός που δικαιολογεί την μορφή του διαγράμματος. Ο μηδενισμός της ταχύτητας του ρομπότ σημαίνει εξάλειψη του σφάλματος, δηλαδή την επίτευξη του επιθυμητού προσανατολισμού. Το κέρδος του ελεγκτή προσδιορίστηκε μέσω πειραμάτων, ώστε να προσαρμόσουμε την συμπεριφορά στις απαιτήσεις της ρομποτικής εφαρμογής.

Οι συμπεριφορές που περιγράψαμε διέπουν την συμπεριφορά όλων των ακόλουθων κατά την πρώτη φάση του αλγόριθμου. Επομένως, δεν θα είχε νόημα να παραθέσουμε τα αντίστοιχα διαγράμματα όλων των ακόλουθων καθώς δεν παρέχουν κάποια επιπλέον πληροφορία.

Η συμπεριφορά του αρχηγού κατά την πρώτη φάση, η οποία έχει και περιγραφεί στην ενότητα Διατήρησης του Σχηματισμού, είναι η εξής. Ο σχηματισμός περιστρέφεται πάντα με σταθερό σημείο την κορυφή του αρχηγού. Η συμπεριφορά αυτή επιβάλλει στον αρχηγό να παραμένει στην ίδια θέση σε όλη την διάρκεια της πρώτης φάσης. Ο αρχηγός αλλάζει μόνο τον προσανατολισμό του στον προσανατολισμό του τελικού σημείου. Επομένως, τα διαγράμματα μεταβολής θέσης και γραμμικής ταχύτητας του αρχηγού κατά την πρώτη φάση είναι μηδενικά. Η περιστροφή του αρχηγού υλοποιείται επίσης με p-controller. Με την επιλογή αυτή εξασφαλίσαμε κοινή συμπεριφορά κατά την περιστροφή όλων των ρομπότ.

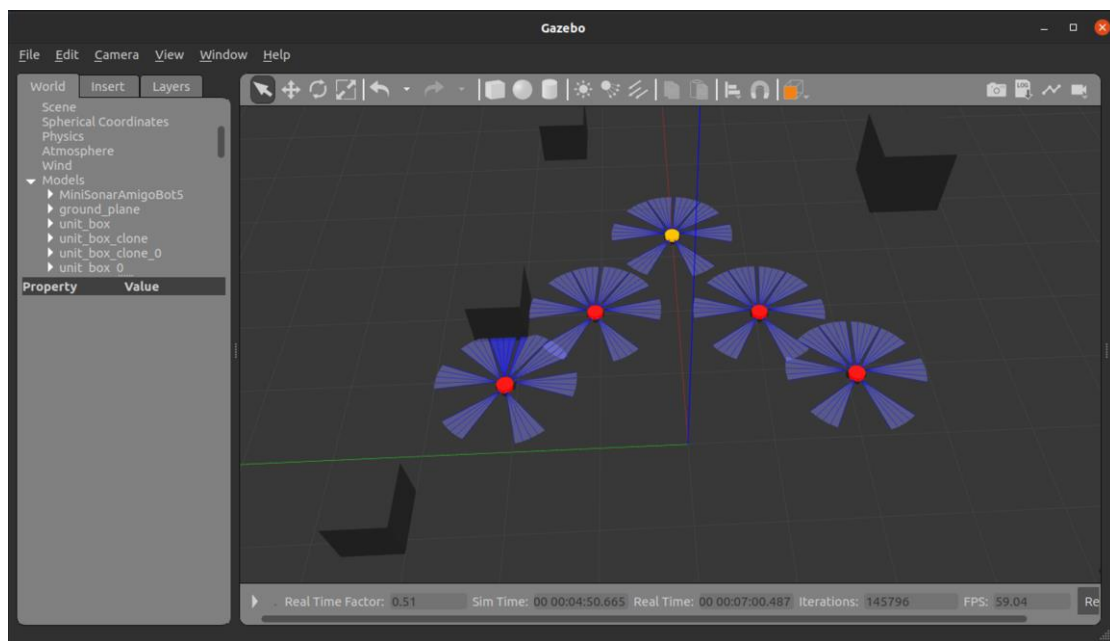


Εικόνα 36. Η μεταβολή του προσανατολισμού του αρχηγού.

Το διάγραμμα της Εικόνας 36 απεικονίζει την μεταβολή του προσανατολισμού του αρχηγού συναρτήσει του χρόνου. Όπως αναφέραμε, η χρήση του p-controller επιβάλλει το προφίλ της περιστροφής του αρχηγού. Εξετάζοντας τις Εικόνες 31 και 32, επαληθεύουμε την αλλαγή προσανατολισμού. Το ρομπότ-αρχηγός αποκτά τον προσανατολισμό με τον οποίο μπορεί να φτάσει στο σημείο στόχο και στην συνέχεια ακινητοποιείται. Η χρονική στιγμή της ακινητοποίησης του αρχηγού είναι η χρονική στιγμή έναρξης του αμοιβαίου αποκλεισμού. Αυτό επαληθεύεται εξετάζοντας την συμπεριφορά των Εικόνων 34, 35 και 36 προσεγγίζοντας το δευτερόλεπτο 160.

4.3.2 Πλοήγηση σμήνους (Δεύτερη φάση)

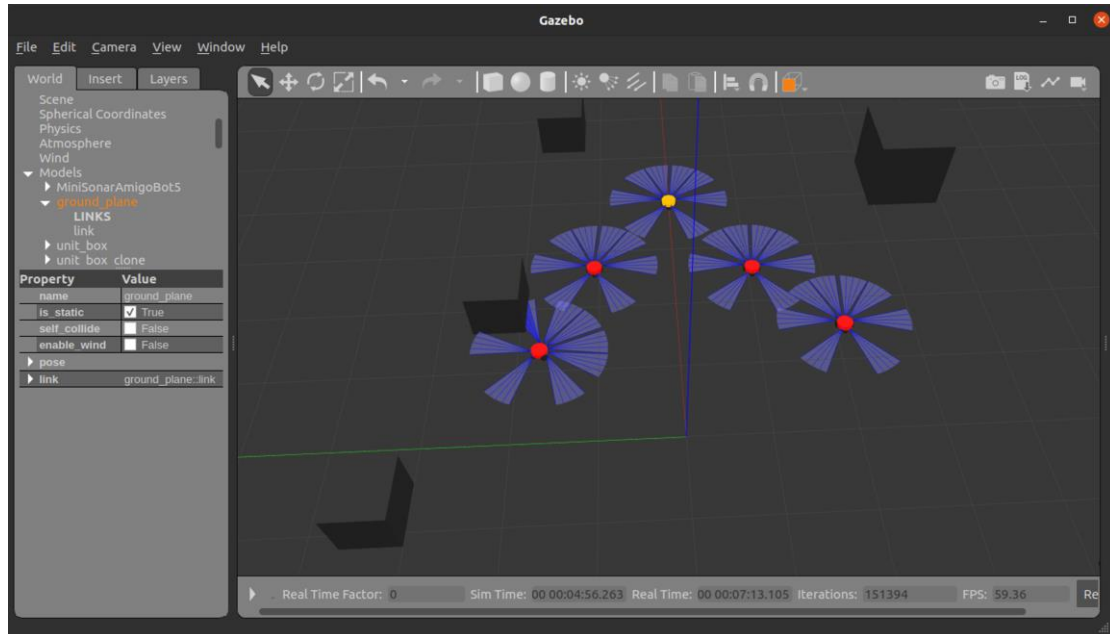
Στην συγκεκριμένη ενότητα εξετάζουμε τις ιδιότητες της πλοήγησης του ρομποτικού σμήνους. Με την παρουσίαση των αντίστοιχων διαγραμμάτων σχολιάζουμε την συμπεριφορά των ρομπότ κατά την διάρκεια της συνολικής κίνησης. Το σενάριο που εξετάζεται σε αυτή την ενότητα είναι η συνέχεια του σεναρίου της ενότητας 4.3.1. Στο σημείο αυτό, το σμήνος βρίσκεται σε σχηματισμό και έχει τον προσανατολισμό του τελικού σημείου. Αρχικά, θα περιγράψουμε την εκτέλεση για το συγκεκριμένο σενάριο. Η μορφή της σκηνής κατά την εκκίνηση της δεύτερης φάσης περιγράφεται από την Εικόνα32. Για την περιγραφή της συμπεριφοράς του σμήνους παραθέτουμε και σχολιάζουμε στιγμιότυπα από την προσομοίωση. Στην συνέχεια, μέσω διαγραμμάτων επιβεβαιώνουμε την ορθή λειτουργία του αλγόριθμου. Για την κατασκευή του σεναρίου επιλέγουμε ως τελική θέση την θέση(4, 0).



Εικόνα 37. Ανίχνευση εμποδίου(ακόλουθος4).

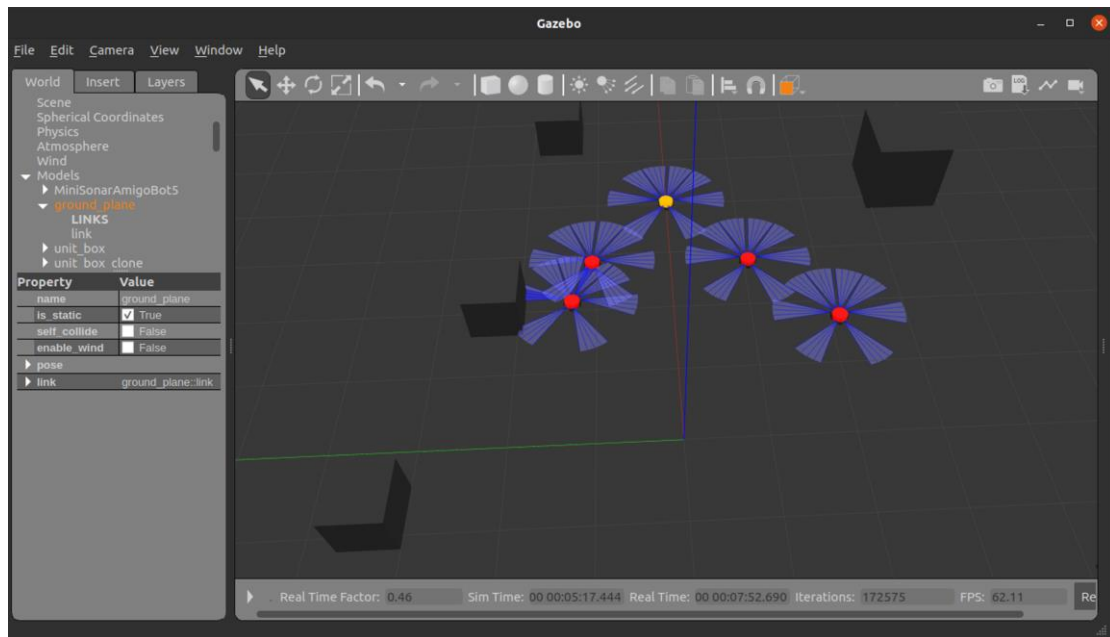
Κατά την πλοήγηση του σμήνους προς την θέση(4, 0), έχουμε ύπαρξη εμποδίου. Ο ακόλουθος4 είναι το μόνο ρομπότ που επηρεάζεται από την ύπαρξη του εμποδίου. Όπως είναι λογικό, ο ακόλουθος4 δεν είναι δυνατόν να συνεχίσει την πορεία προς το επιθυμητό σημείο. Λόγω της ελαστικότητας που έχουμε εισάγει στους κανόνες διατήρησης του σχηματισμού, ο ακόλουθος4 αποφεύγει το εμπόδιο κινούμενος προς το εσωτερικό του τριγώνου. Επιτρέπουμε δηλαδή σε κάποιο ρομπότ να κινηθεί εκτός σχηματισμού για το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την αποφυγή ενός εμποδίου, η ύπαρξη του οποίου

δεν επιτρέπει την διατήρηση του σχηματισμού. Αμέσως μετά την αποφυγή, το ρομπότ που βρίσκεται εκτός σχηματισμού μεταβαίνει ανεμπόδια πλέον στην θέση που θα συμπληρώσει τον σχηματισμό.



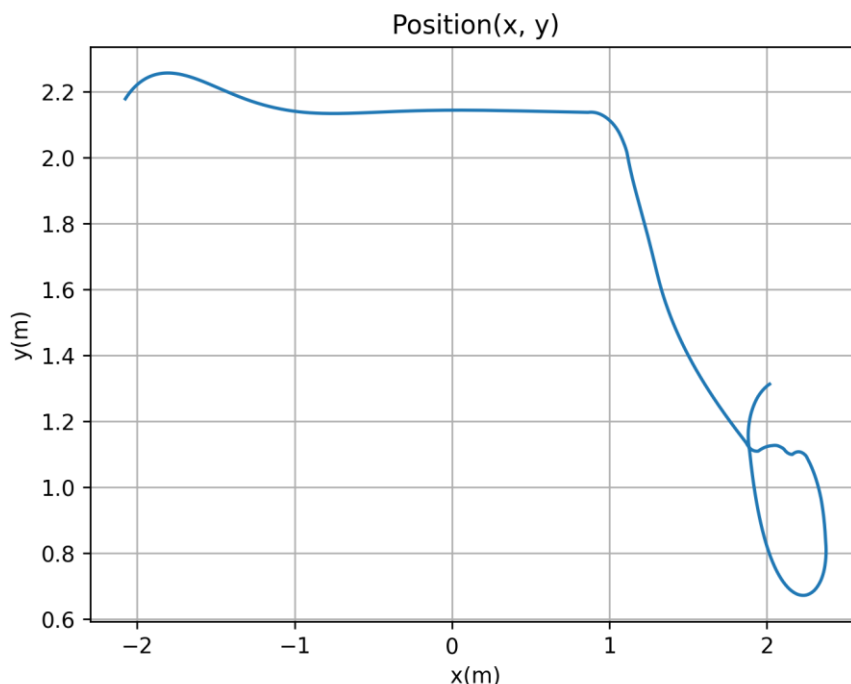
Εικόνα 38. Αποφυγή του εμποδίου.

Στην συνέχεια ο ακόλουθος4 αποφεύγει το εμπόδιο, κινούμενος προς το εσωτερικό του σχηματισμού. Κατά την διάρκεια της αποφυγής, το ρομπότ έχει γνώση του εμποδίου καθώς το ανιχνεύει με τον πλαϊνό ασιθητήρα σόναρ που διαθέτει. Το σμήνος συνεχίζει την συνδυασμένη κίνηση που εκτελεί. Ενώ, ο ακόλουθος4 κινείται περιμετρικά του εμποδίου, προσπαθώντας να βρεθεί στην επιθυμητή θέση.



Εικόνα 39. Η λήξη της πλοήγησης.

Το στιγμιότυπο της Εικόνας 39 αποτυπώνει την σκηνή κατά την λήξη της πλοήγησης του σμήνους. Ο αρχηγός βρίσκεται στην θέση (4, 0) όπως είχαμε ορίσει αρχικά, ενώ οι ακόλουθοι 2, 3, 5 βρίσκονται στις επιθυμητές θέσεις οι οποίες ορίζουν τον σχηματισμό. Ο ακόλουθος 4 έχει ακινητοποιηθεί σε μια θέση, η οποία είναι διαφορετική από την επιθυμητή. Εύκολα, μπορούμε να παρατηρήσουμε πως το ρομπότ δεν ήταν δυνατόν να καταλήξει στην επιθυμητή θέση λόγω της ύπαρξης του εμποδίου. Στην περίπτωση αυτή, η μέθοδος των Συναρτήσεων Δυναμικών Πεδίων υπολογίζει ένα ελάχιστο σημείο, στο οποίο δεν έχουμε πρόσβαση. Επομένως, είναι απαραίτητο να επιτρέπουμε στα ρομπότ να ακινητοποιούνται με κάποια ελαστικότητα μόνο στην περίπτωση που η τελική τους θέση δεν είναι προσβάσιμη. Για τον λόγο αυτό επιτρέπουμε τον τερματισμό της πλοήγησης κάθε ατόμου στο σμήνος, με βάση ένα κατώφλι στην τιμή του δυναμικού πεδίου.



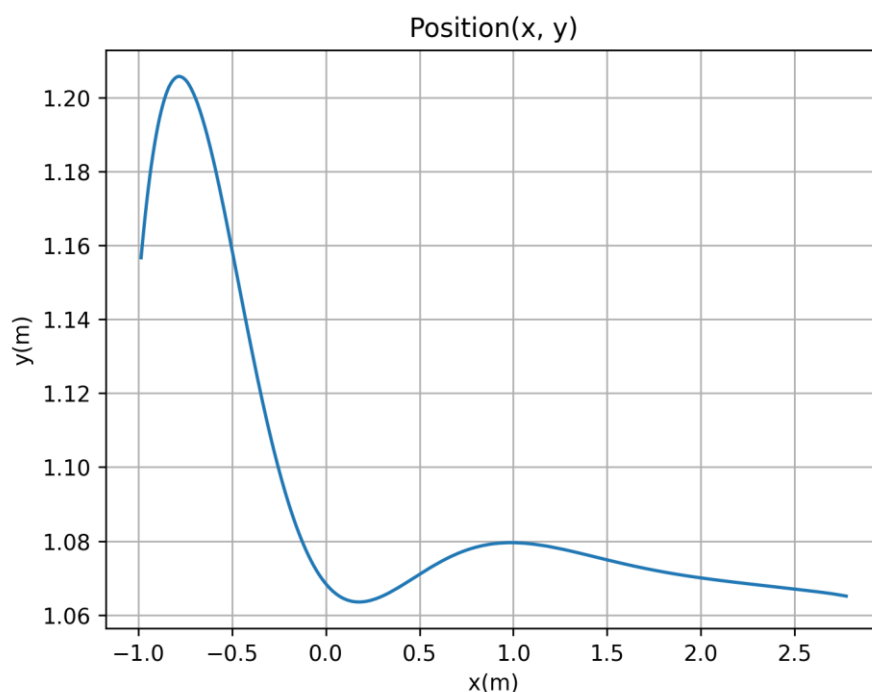
Εικόνα 40. Το διάγραμμα μετατόπισης του ακόλουθου4.

Στο συγκεκριμένο σενάριο η συμπεριφορά του ακόλουθου4 παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Στο διάγραμμα της Εικόνας 40 παρουσιάζεται η μετατόπισή του κατά την διάρκεια της δεύτερης φάσης. Το ρομπότ κινείται από την τελική θέση της πρώτης φάσης $(-2, 2)$ προς την νέα τελική θέση. Όπως έχουμε περιγράψει στο αντίστοιχο κεφάλαιο, οι ακόλουθοι έλκονται από την τελική θέση σύμφωνα με μια διαδικασία που μπορεί να παρομοιαστεί ως «κυνηγητό». Ο αρχηγός με την κίνησή του προκαλεί μετακίνηση της επιθυμητής θέσης κάθε ρομπότ. Ως αποτέλεσμα το κάθε ρομπότ-ακόλουθος προσεγγίζει την συνεχώς μεταβαλλόμενη θέση με την χρήση των Δυναμικών πεδίων.

Αρχικά, ο ακόλουθος4 μεταβάλει τον προσανατολισμό του και ξεκινά την πλοήγησή του προς την επιθυμητή θέση. Η σταθεροποίηση της κλίσης το διαγράμματος υποδηλώνει την διατήρηση σταθερής απόστασης του ρομπότ από την επιθυμητή θέση σε κάθε βήμα. Αυτή είναι η ένδειξη ότι ο ακόλουθος4 κινείται βρισκόμενος σε σχηματισμό. Η ραγδαία αλλαγή της κλίσης κοντά στην θέση $(1, 2.1)$ ευθύνεται στην ανίχνευση του εμποδίου. Το απωστικό πεδίο που αναπτύσσεται μεταξύ του ρομπότ και του εμποδίου, προκαλεί την συμπεριφορά της αποφυγής. Κατά την διάρκεια της αποφυγής το ρομπότ κινείται εκτός σχηματισμού και προς το εσωτερικό του τριγώνου. Η επόμενη περιοχή του διαγράμματος, δηλαδή ο βρόχος που σχηματίζεται, ωφείλεται στην προσπάθεια του ρομπότ να προσεγγίσει την τελική θέση. Ωστόσο, η ύπαρξη του εμποδίου αποτρέπει την πρόσβαση σε αυτό το σημείο. Έτσι, η επίδραση του ελκτικού και του απωστικού πεδίου

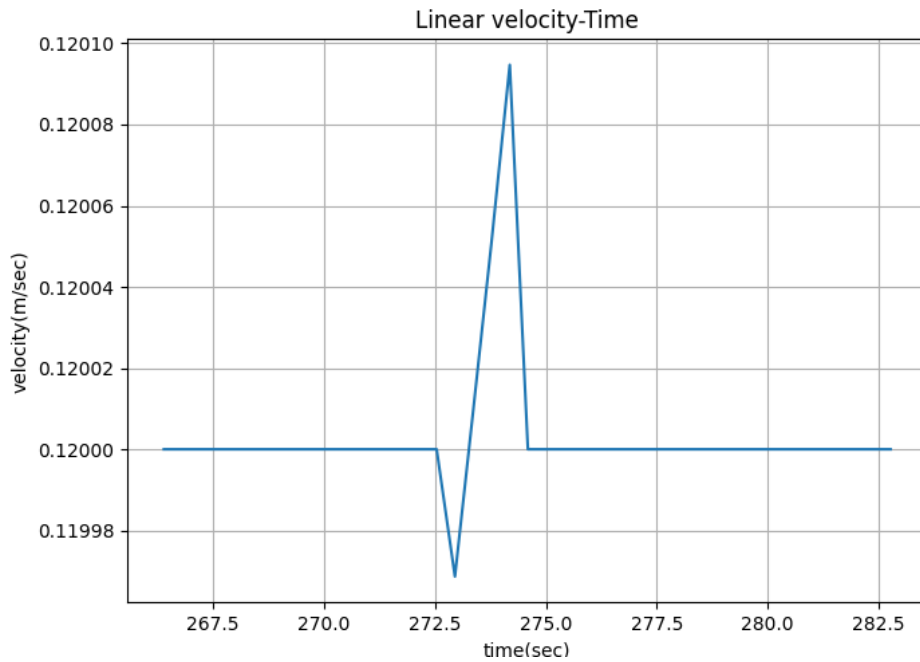
«αναγκάζουν» το ρομπότ να εξερευνήσει τις κοντινές θέσεις. Το ρομπότ ερευνεί τις κοντινές θέσεις με στόχο την έρευνα της θέσης με την μικρότερη τιμή του συνολικού δυναμικού πεδίου, στην οποία μπορεί να ακινητοποιηθεί.

Στην περίπτωση απουσίας του εμποδίου θα παρατηρούσαμε την ύπαρξη ευθείας με την χαρακτηριστική κλίση που προκαλεί η μέθοδος των Συναρτήσεων Δυναμικών Πεδίων, από την έναρτήρια θέση του ρομπότ προς την τελική.



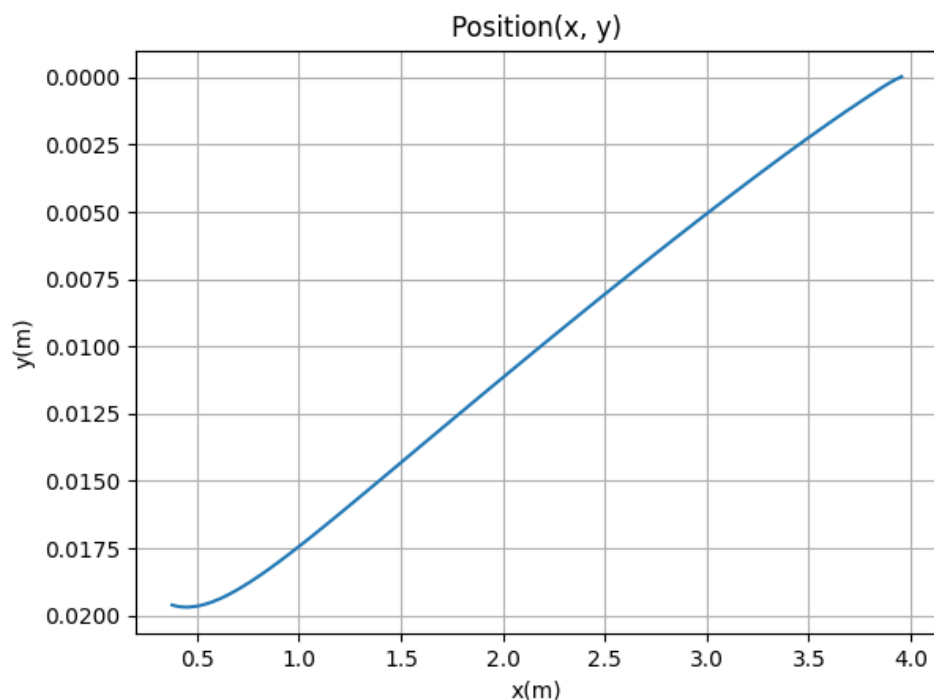
Εικόνα 41. Το διάγραμμα μετατόπισης για τον ακόλουθο2.

Για λόγους σύγκρισης της συμπεριφοράς των ακολούθων2, 4 παραθέτουμε το διάγραμμα μετατοπίσης του ακόλουθου2. Η μορφή του διαγράμματος του ακόλουθου2 αντιστοιχεί σε μετατόπιση χωρίς την ύπαρξη εμποδίου. Υποθέτοντας την απουσία του εμποδίου, τότε το διάγραμμα του ακόλουθου4 θα παρουσίαζε ευθεία με παρόμοια κλίση(σημείο(1.08, 1.00 και δεξιότερα)) όπως στην περίπτωση του ακόλουθου2. Αντί για την ύπαρξη του βρόχου, ο ακόλουθος4 θα προσέγγιζε την τελική θέση με παρόμοια συμπεριφορά με αυτή του ακόλουθου2. Οι ακόλουθοι2, 3, 5 παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά καθώς κανείς από αυτούς δεν επηρεάζεται λόγω εμποδίου. Για αυτό το λόγο τα διαγράμματα μετατόπισης, γραμμικής και γωνιακής ταχύτητας των συγκεκριμένων ακολούθων έχουν την ίδια μορφή.



Εικόνα 42. Η συμπεριφορά του ακόλουθου4 υπο την επίδραση του εμποδίου.

Στην Εικόνα 42 φαίνεται η επιρροή του εμποδίου στον υπολογισμό της γραμμικής ταχύτητας του ρομπότ. Το διάγραμμα που παρουσιάζουμε εδώ αποτελεί τμήμα της συνολικής συμπεριφοράς του ακόλουθου4. Αρχικά, το ρομπότ κινείται με σταθερή ταχύτητα. Η ομαλή κίνηση ωφείλεται στο γεγονός ότι ο ακόλουθος τις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές βρίσκεται σε σχηματισμό. Στην συνέχεια, παρατηρείται επιβράδυνση. Η συμπεριφορά αυτή ωφείλεται στην ύπαρξη του εμποδίου. Το απωστικό δυναμικό που υπολογίζεται επιδρά στο ρομπότ και επιβραδύνει την κίνησή του. Η συμπεριφορά αυτή των Δυναμικών πεδίων επιτρέπει στο ρομπότ να εξερευνήσει την περιοχή γύρω από το εμπόδιο με μικρότερες ταχύτητες και μεγαλύτερη ακρίβεια. Στην συνέχεια, παρατηρείται επιτάχυνση του ρομπότ. Σύμφωνα με την συμπεριφορά για την διατήρηση του σχηματισμού, το σμήνος δεν σταματάει την κίνησή του όταν κάποιο άτομο βρίσκεται στην φάση αποφυγής εμποδίου. Η μόνη περίπτωση που το σμήνος θα σταματήσει είναι αν το άτομο βρεθεί σε μεγάλη απόσταση από το σμήνος. Στο σημείο αυτό, ο ακόλουθος4 έχει απομακρυνθεί από το σμήνος λόγω του εμποδίου. Επιπλέον, το σμήνος συνεχίζει την κίνησή του. Έτσι, ο ακόλουθος4 αυξάνει την ταχύτητά του για να καταφέρει να φτάσει το σμήνος και να τοποθετηθεί στην επιθυμητή θέση.

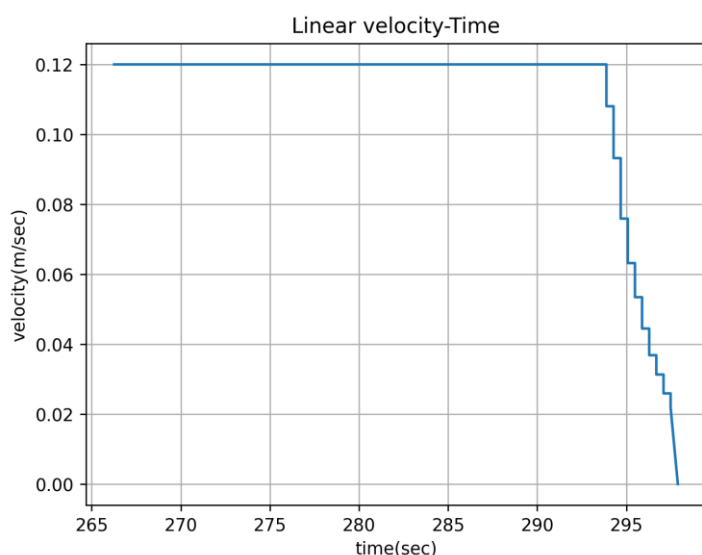


Εικόνα 43. Το διάγραμμα μετατόπισης του αρχηγού.

Σύμφωνα με το σενάριο που εξετάζουμε, ο αρχηγός ξεκινώντας από την τελική θέση $(0, 0)$ της πρώτης φάσης καταλήγει στην τελική θέση $(4, 0)$. Όπως, φαίνεται από τις τιμές των συντεταγμένων της τελικής και αρχικής θέσης υπάρχει μια μικρή απόκλιση από τις επιθυμητές τιμές. Η απόκλιση ωφείλεται στο ότι επιτρέπουμε στο ρομπότ να κινείται έχοντας ταυτόχρονα γραμμική και γωνιακή ταχύτητα. Με αυτό τον τρόπο το ρομπότ δεν χρειάζεται να ακινητοποιείται κάθε φορά που απαιτείται αλλαγή στον προσανατολισμό του. Η κίνηση αυτή εξασφαλίζει ομαλότητα στην συμπεριφορά του ρομπότ. Το σημείο ενδιαφέροντος στην παρούσα εφαρμογή είναι η επιτυχής πλοήγηση των ρομπότ προς τις τελικές θέσεις και όχι η κίνησή τους με την μεγαλύτερη ακρίβεια. Για αυτό τον λόγο μπορούμε να επιτρέψουμε αυτό το είδος κίνησης.

Όσον αφορά το προφίλ της κίνησης του αρχηγού, όπως και στην πρώτη φάση, η κίνηση όλων των ρομπότ διέπεται από την μέθοδο των Συναρτήσεων Δυναμικού Πεδίου. Η κλίση του διαγράμματος της μετατόπισης αποδίδεται στο συνολικό δυναμικό πεδίο που υπολογίζουμε σε κάθε θέση. Ο αρχηγός κατά την διάρκεια της πορείας του δεν ανίχνευσε κάποιο εμπόδιο. Αυτό μπορούμε να το συμπεράνουμε από την ομαλότητα στην μορφή του διαγράμματος. Η κλίση μεταβάλλεται ομαλά και εξαρτάται κάθε φορά από την αντίστοιχη μορφή του ελκτικού πεδίου που χρησιμοποιείται (κωνικό ή τετραγωνικό). Στην περίπτωση ύπαρξης εμποδίου, το απωστικό δυναμικό θα απομάκρυνε τον αρχηγό

από την θέση του εμποδίου. Η συμπεριφορά αυτή θα αποτυπωνόταν στο διάγραμμα με την μορφή βρόχου, καθώς το ρομπότ θα εξερευνούσε τον χώρο γύρω από το εμπόδιο. Η συμπεριφορά που περιγράφουμε είναι παρόμοια με την συμπεριφορά του ακόλουθου4, ενώ στο διάγραμμα της Εικόνας 40 παρατηρείται ο χαρακτηριστικός βρόχος.



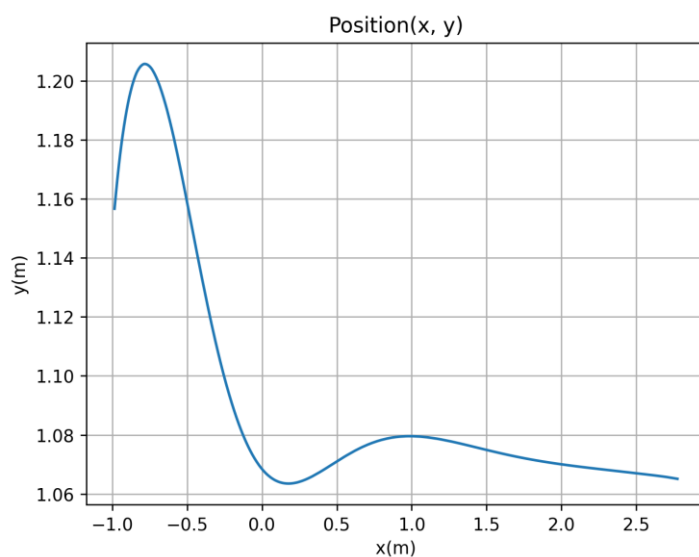
Εικόνα 44. Διάγραμμα γραμμικής ταχύτητας - χρόνου(αρχηγός).

Η συμπεριφορά του διαγράμματος της Εικόνας 40 είναι η αναμενόμενη, δεδομένου ότι ο αρχηγός δεν ανίχνευσε κανένα εμπόδιο κατά την κίνησή του. Αρχικά, το ρομπότ κινείται με την μέγιστη ταχύτητα που παρατηρείται, καθώς βρίσκεται στην μεγαλύτερη πιθανή απόσταση από τον στόχο. Στην ενότητα κατά την οποία αναφερθήκαμε στο Ελκτικό πεδίο, αναφέραμε την ύπαρξη της παραμέτρου ζ. Η παράμετρος ζ χρησιμοποιείται για την κλιμάκωση του μέτρου της έλξης και κατ' επέκταση της γραμμικής ταχύτητας του ρομπότ. Η τιμή της παραμέτρου είναι υπεύθυνη για την συγκεκριμένη συμπεριφορά. Επιλέξαμε την τιμή έτσι ώστε το ρομπότ να κινείται με την μεγαλύτερη επιτρεπτή ταχύτητα για όσο μεγαλύτερο διάστημα είναι δυνατόν. Η κίνηση αυτή έγινε στα πλαίσια της προσπάθειας να αυξήσουμε την ταχύτητα κίνησης του ρομποτικού σμήνους. Στην συνέχεια, καθώς το ρομπότ πλησιάζει την τελική θέση το είδος του ελκτικού πεδίου που χρησιμοποιείται κάθε φορά, επιβραδύνει και τελικά ακινητοποιεί το ρομπότ.

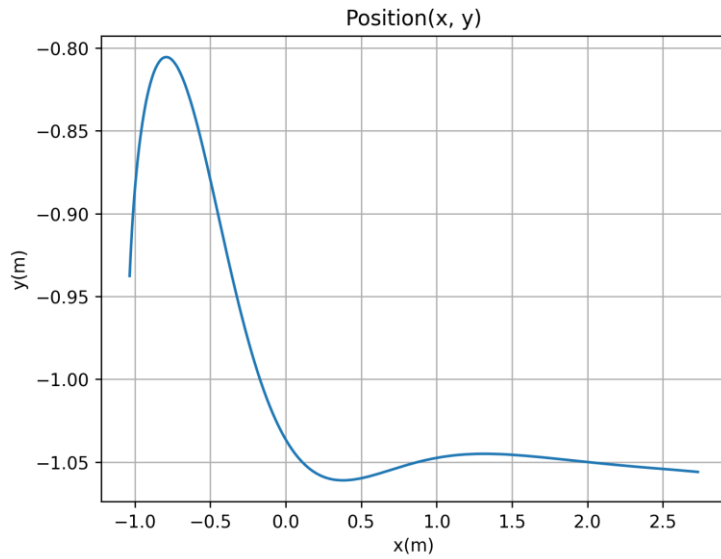
Ο τρόπος σχεδιασμού του αλγόριθμου πλοήγησης βασίστηκε στην ομοιότητα της λειτουργίας των ρομπότ. Όπως αναφέρθηκε και στο αντίστοιχο κεφάλαιο, κάθε ρομπότ έχει την ικανότητα πλοήγησης αυτόνομα και ατομικά. Έτσι, σχεδιάσαμε πρώτα τον

ατομικό αλγόριθμο πλοήγησης και στην συνέχεια εισάγαμε τις συνθήκες για την σύσταση και την διατήρηση του σχηματισμού. Κάθε ρομπότ ακόλουθος πλοηγείται προς τις επιθυμητές θέσεις αυτόνομα, ενώ ο αρχηγός είναι υπεύθυνος για τις ενέργειες που εξασφαλίζουν την συνοχή του σχηματισμού. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίσουμε την κοινή συμπεριφορά των ρομπότ-ακόλουθων. Στην περίπτωση που οι ακόλουθοι αντιμετωπίσουν τις ίδιες συνθήκες κατά την πλοήγηση του σμήνους (π.χ. απουσία εμποδίων), τότε η συμπεριφορά τους καθ' όλη την διάρκεια της πλοήγησης θα είναι κοινή. Σε αντίθετη περίπτωση, το κάθε ρομπότ ανιχνεύει τα εμπόδια που βρίσκονται κοντά του και αναπτύσσει την κατάλληλη συμπεριφορά με βάση την μέθοδο των Δυναμικών Πεδίων.

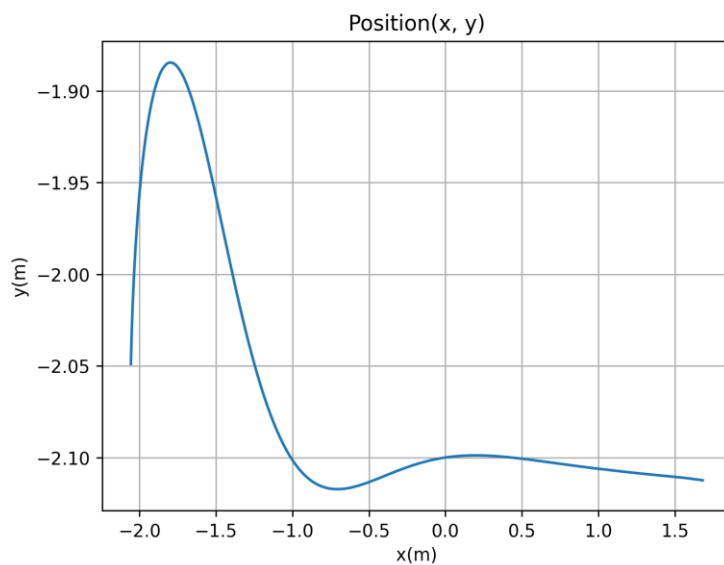
Στο σενάριο που εξετάζουμε οι ακόλουθοι 2, 3, 5 κινούνται σε όλη την διάρκεια του σεναρίου χωρίς να έχουν ανιχνεύσει κάποιο εμπόδιο. Επομένως, λόγω του σχεδιασμού του αλγόριθμου οι ακόλουθοι 2, 3, 5 παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά.



Εικόνα 45. Διάγραμμα μετατόπισης(ακόλουθος2)

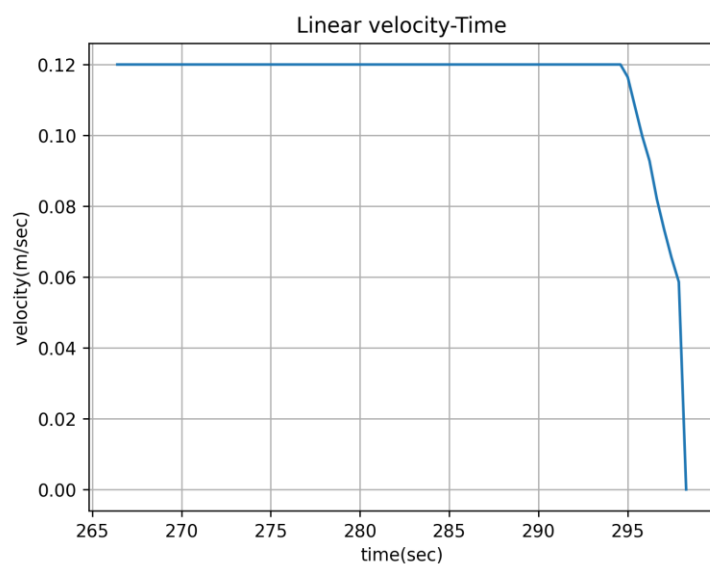


Εικόνα 46. Διάγραμμα μετατόπισης(ακόλουθος3)

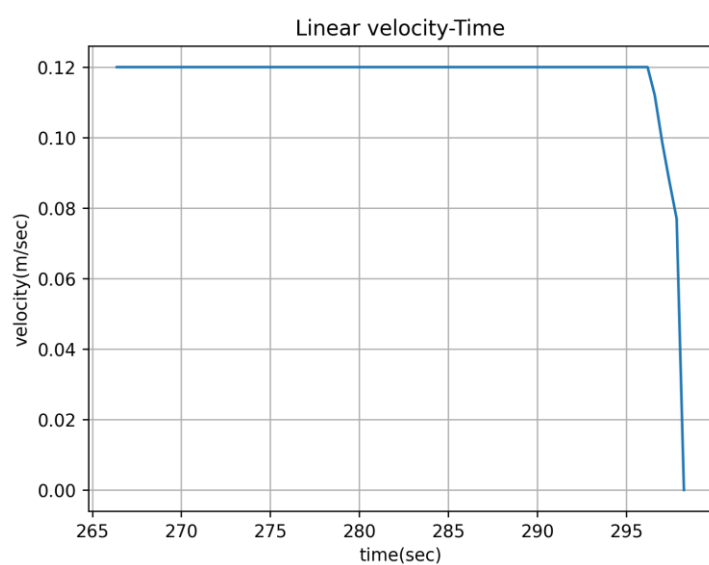


Εικόνα 47. Διάγραμμα μετατόπισης(ακόλουθος5)

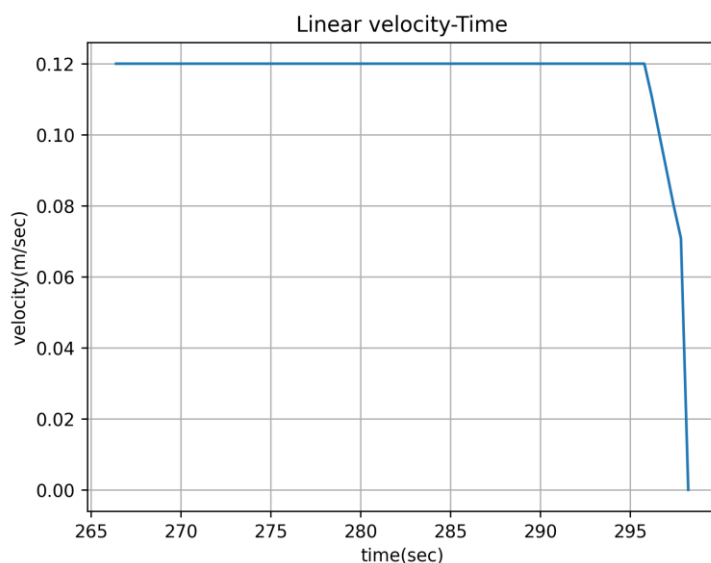
Συγκρίνοντας τα διαγράμματα των Εικόνων 45, 46 και 47, μπορούμε να παρατηρήσουμε την ομοιότητα στην συμπεριφορά των ακόλουθων. Οι ακόλουθοι 2, 3, 5 αντιμετώπισαν τις ίδιες συνθήκες σύμφωνα με το σενάριο που αναπτύξαμε. Στα τρία διαγράμματα παρατηρούμε τις αρχικές θέσεις κάθε ακόλουθου, όπως προέκυψαν κατά το τέλος την πρώτης φάσης. Όπως είναι φυσικό, τα ρομπότ έχουν διαφορετικές αρχικές και τελικές θέσεις. Ωστόσο, καταλήγουν στις τελικές θέσεις με την ίδια συμπεριφορά, όπως είναι αναμενόμενο καθώς χρησιμοποιούν την ίδια μέθοδο και τις ίδιες παραμέτρους.



Εικόνα 48. Διάγραμμα γραμμικής ταχύτητας - χρόνου(ακόλουθος2)

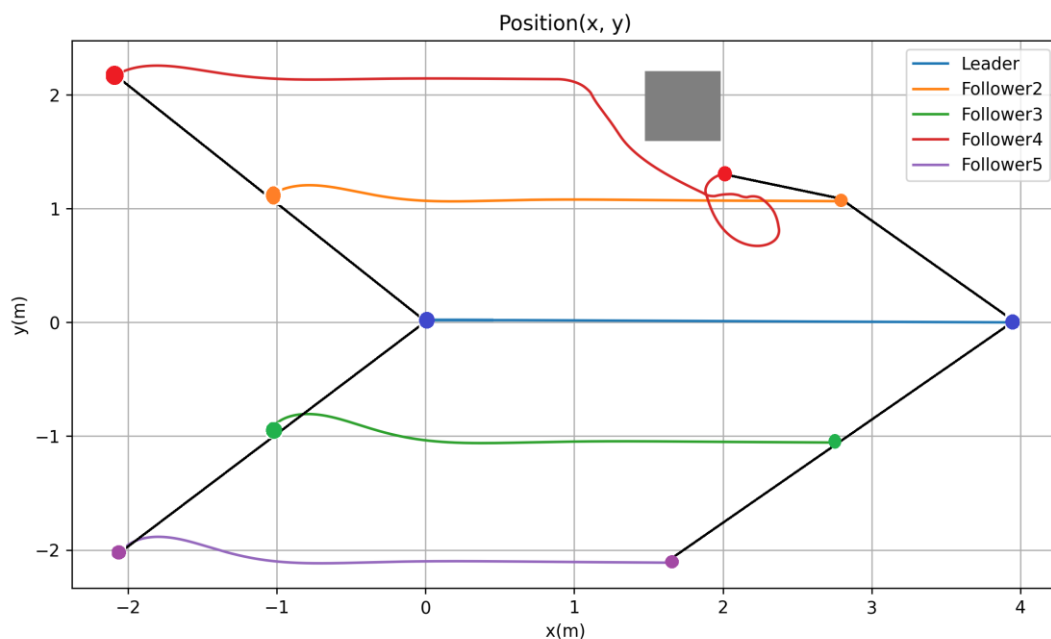


Εικόνα 49. Διάγραμμα γραμμικής ταχύτητας - χρόνου(ακόλουθος3)



Εικόνα 50. Διάγραμμα γραμμικής ταχύτητας - χρόνου(ακόλουθος5)

Τα διαγράμματα των Εικόνων 48, 49 και 50 επιβεβαιώνουν την κοινή συμπεριφορά των τριών ακόλουθων. Συγκρίνοντας τα διαγράμματα μπορούμε να παρατηρήσουμε πως οι ακόλουθοι κινήθηκαν με την ίδια ταχύτητα κατά την διάρκεια της πλοήγησης. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνει το γεγονός ότι οι ακόλουθοι 2, 3, 5 βρίσκονταν σε σχηματισμό για όλη την διάρκεια της πλοήγησης. Η μετατόπιση του αρχηγού μεταβάλλει τις επιθυμητές θέσεις των ακόλουθων. Επομένως, όταν οι ακόλουθοι βρίσκονται σε σχηματισμό είναι λογικό να ισαπέχουν από τις νέες επιθυμητές θέσεις τους καθώς η μετατόπιση του αρχηγού τους επηρεάζει με τον ίδιο τρόπο.



Εικόνα 51. Η συνολική πορεία του σμήνους.

Το διάγραμμα στην Εικόνα51 προσφέρει μια λεπτομερή απεικόνιση της πορείας που διέγραψε το ρομποτικό σμήνος. Σύμφωνα με το υπόμνημα, η πορεία κάθε ρομπότ αποτυπώνεται με το αντίστοιχο χρώμα. Οι αρχικές θέσεις των ρομπότ είναι οι επιθυμητές θέσεις όπως υπολογίστηκαν κατά την πρώτη φάση. Έχουμε σχεδιάσει τις δύο ευθείες οι οποίες επιβεβαιώνουν στην σύσταση του σχηματισμού κατά την πρώτη φάση. Στην συνέχεια οι ακόλουθοι μεταβάλλουν τον προσανατολισμό τους και κινούνται στις θέσεις που ορίζει ο αρχηγός. Εύκολα μπορούμε να παρατηρήσουμε την επιρροή του εμποδίου στην πορεία του ακόλουθου4. Ο ακόλουθος4 διαγράφει την πορεία που του επιβάλει ο αρχηγός μέχρι την στιγμή της ανίχνευσης του εμποδίου. Απεικονίζουμε το εμπόδιο με γκρι χρώμα για ευκολότερη κατανόηση της συμπεριφοράς. Ο ακόλουθος4 κινείται προς το εσωτερικό του σχηματισμού για την αποφυγή του εμποδίου. Όπως, προκύπτει από το διάγραμμα το εμπόδιο καθιστά την επιθυμητή τελική θέση του ακόλουθου4 μη προσβάσιμη. Ο ακόλουθος4 στην προσπάθειά του να προσδιορίσει μια νέα τελική θέση, εξερευνεί το περιβάλλον γύρω του κάτι το οποίο απεικονίζεται ως βρόχος. Τελικά, καταλήγει σε μια διαφορετική θέση με μικρή τιμή του δυναμικού πεδίου σύμφωνα με το κατώφλι που ορίσαμε για την ιδιότητα της ελαστικότητας του σχηματισμού. Η ιδιότητα της ελαστικότητας του σχηματισμού επιτρέπει στα ρομπότ να προσεγγίσουν μια διαφορετική θέση από την επιθυμητή, μόνο στην περίπτωση που η επιθυμητή θέση δεν είναι προσβάσιμη λόγω ύπαρξης εμποδίου. Η ιδιότητα αυτή ισχύει και κατά την εκτέλεση της πρώτης φάσης του αλγόριθμου. Στο τέλος της πλοήγησης σχεδιάζουμε τις ευθείες

που επιβεβαιώνουν τον σχηματισμό στην τελική θέση. Τόσο ο αρχηγός όσο και οι ακόλουθοι 2, 3, 5 βρίσκονται με ακρίβεια στις καθορισμένες θέσεις με εξαίρεση τον ακόλουθο 4.

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

5.1 Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε το ζήτημα της πλοήγησης ρομποτικού σμήνους τροχοφόρων ρομπότ. Μια από τις σημαντικότερες ιδιότητες που πρέπει να ικανοποιεί η συμπεριφορά του σμήνους είναι η σύσταση σχηματισμού. Για την σχεδίαση του αλγόριθμου αξιοποιήθηκε η προσέγγιση αρχηγού-ακόλουθου. Η προσέγγιση αυτή διαχωρίζει τους ρόλους των ατόμων του σμήνους και αναθέτει ευθύνες στον κάθε ρόλο.

Σύμφωνα με την σχεδιάσή μας, το ρομπότ με τον ρόλο του αρχηγού επιφορτίζεται με τις εργασίες για την σύσταση και διατήρηση του σχηματισμού. Μέσω της επικοινωνίας με τα υπόλοιπα ρομπότ(ρομπότ-ακόλουθοι), ο αρχηγός παρακολουθεί την πορεία τους και ορίζει τις θέσεις στις οποίες αυτοί πρέπει να βρεθούν, ώστε να διατηρείται σε κάθε βήμα ο επιλεγμένος σχηματισμός. Τα ρομπότ-ακόλουθοι έχουν την ιδιότητα της αυτόνομης πλοήγησης στις θέσεις που ορίζει ο αρχηγός. Κατά τον σχεδιασμό του αλγόριθμου πλοήγησης επιτρέψαμε στα ρομπότ την ατομική και ανεξάρτητη πλοήγηση. Ωστόσο, για την διατήρηση του σχηματισμού του σμήνους χρησιμοποιήσαμε τον έλεγχο της απόστασης κάθε ατόμου από τον αρχηγό. Η ιδιότητα της πλοήγησης των ατόμων υλοποιείται με βάση την μέθοδο των Συναρτήσεων Δυναμικών Πεδίων. Η μέθοδος αυτή πετυχαίνει την αποφυγή εμποδίων και την οδήγηση του ρομπότ προς την επιθυμητή θέση, αντιμετωπίζοντας το ρομπότ ως θετικά φορτισμένο σημειακό σώμα κινούμενο σε φορτισμένο χώρο. Ο συνδυασμός των ελκτικών και απωστικών δυνάμεων που ασκούνται στο ρομπότ το οδηγούν με ασφάλεια στην τελική θέση.

Η συνολική συμπεριφορά πλοήγησης του σμήνους περιγράφεται από την κίνηση σε σχηματισμό κάθε χρονική στιγμή. Ωστόσο, λόγω ύπαρξης εμποδίων στον χώρο η συνοχή του σχηματισμού δεν είναι πάντα εφικτή. Για τον λόγο αυτό εισάγαμε την ιδιότητα της ελαστικότητας στον σχηματισμό, επιτρέποντας στα ρομπότ να κινούνται εκτός σχηματισμού μόνο στην περίπτωση που η συνοχή του είναι αδύνατη. Στην περίπτωση

αυτή, τα ρομπότ αφού αποφύγουν το αντίστοιχο εμπόδιο, επιστρέφουν και πάλι στην θέση που συμπληρώνει στον σχηματισμό.

Ο αλγόριθμος που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας επιτρέπει στο σμήνος να «σαρώνει» τον χώρο με την μορφή του τριγωνικού σχηματισμού. Με άλλα λόγια, το σμήνος κινούμενο σε σχηματισμό προσφέρει μια «τριγωνική» σάρωση του περιβάλλοντος. Μέσω των αισθητήρων των ρομπότ μπορούμε να συλλέξουμε πληροφορίες για την μορφολογία του περιβάλλοντος(π.χ. θέση εμποδίων). Η χρήση ρομποτικού σμήνους μειώνει τον απαιτούμενο χρόνο για την σάρωση του περιβάλλοντος συγκριτικά με την χρήση ενός μόνο ρομπότ. Τέλος, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η πλοήγηση ρομποτικού σμήνους είναι η αποδοτικότερη μέθοδος για την εξερεύνηση άγνωστου περιβάλλοντος και για ενέργειες όπως τη χαρτογράφηση του χώρου και ο εντοπισμός αντικειμένων λόγω της κατανεμημένης φύσης του αλγόριθμου.

5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Αρχικά, μια πρόταση για μελλοντική έρευνα θα ήταν η χρήση ρομποτικού σμήνους για την έρευνα αποδοτικότερων τρόπων σάρωσης του περιβάλλοντος. Πιο συγκεκριμένα, η προσέγγιση του ρομποτικού σμήνους θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την χαρτογράφηση του χώρου. Με την ανάπτυξη ενός κατανεμημένου αλγορίθμου χαρτογράφησης θα ήταν δυνατός ο καταμερισμός του χώρου και η ανάθεση της χαρτογράφησης των υποχώρων σε κάθε ρομπότ. Μετά την ολοκλήρωση όλων των εργασιών, οι πληροφορίες των ρομπότ θα συνδυαστούν, ώστε να ο συγκροτηθεί ο συνολικός χάρτης του χώρου.

Με την αναβάθμιση των ρομπότ και την προσθήκη νέων αισθητήρων, το σμήνος θα είναι σε θέση να συλλέξει διαφορετικές πληροφορίες από το περιβάλλον(π.χ. η χρήση ανιχνευτών φωτεινότητας). Η γνώση των επιπέδων φωτεινότητας στον χώρο θα μπορούσε στην συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για την λειτουργία ρομποτικών φωτοβολταϊκών συστημάτων. Τα εξοπλισμένα με αισθητήρες και φωτοβολταϊκά πάνελ ρομπότ, θα ακολουθούν τις κινήσεις του ήλιου καθ' όλη την διάρκεια της μέρας, έχοντας ταυτόχρονα γνώση των εμποδίων στο χώρο. Αυτή η τεχνική θα μπορούσε να εξασφαλίσει την αποδοτικότερη αξιοποίηση του ηλιακού φωτός για την παραγωγή ενέργειας.

Τέλος, με την προσθήκη καμερών στα άτομα του σμήνους και με την δυνατότητα αναγνώρισης αντικειμένων μέσω νευρωνικού δικτύου, το σμήνος θα είναι σε θέση να σαρώνει το χώρο με σκοπό την ανίχνευση γνωστού αντικειμένου. Στο πλαίσιο αυτής

ικανότητας του σμήνους, θα μπορούσε να ερευνηθεί η ανάπτυξη αποδοτικού αλγορίθμου εντοπισμού, σε σενάρια που ο χρόνος εντοπισμού είναι κρίσιμος. Τα αποτελέσματα μιας έρευνας αυτού του αντικειμένου θα μπορούσαν να συμβάλλουν καθοριστικά σε έργα όπως ο εντοπισμός αγνοουμένων σε σενάρια φυσικών καταστροφών.

Βιβλιογραφία

- [1] Ying Tan, Zhong-yang Zheng. Research Advance in Swarm Robotics. Article in Defense Technology. March 2013
https://www.researchgate.net/publication/275550463_Research_Advance_in_Swarm_Robotics
- [2] Melanie Schranz, Martina Umlauft, Micha Sende and Wilfried Elmenreich. Swarm Robotic Behaviors and Current Applications. April 2020
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frobt.2020.00036/full>
- [3] Jian Yang, Yuhui Shi. Adaptive Coordinated Motion Control for Swarm Robotics Based on Brain Storm Optimization. May 2021
https://www.researchgate.net/publication/352122570_Adaptive_Coordinated_Motion_Control_for_Swarm_Robotics_Based_on_Brain_Storm_Optimization
- [4] Masato Yuasa and Ikuo Mizuuchi. A Control Method for a Swarm of Plant Pot Robots that Uses Artificial Potential Fields for Effective Utilization of Sunlight. May 2014
<https://www.fujipress.jp/jrm/rb/robot002600040505/>
- [5] Kishorekumar H Kowdiki, Ranjit Kumar Barai and Samar Bhattacharya. Leader-Follower Formation Control Using Artificial Potential Functions: A Kinematic Approach. March 2012
<https://ieeexplore.ieee.org/document/6216054>
- [6] Marcin Kiełczewski, Wojciech Kowalczyk and Bartłomiej Krysiak. Differentially-Driven Robots Moving in Formation—Leader-Follower Approach. July 2022
https://www.mdpi.com/20763417/12/14/7273?type=check_update&version=1
- [7] Howie Choset, Kevin Lynch, Seth Hutchinson, George Kantor, Wolfram Burgard, Lydia Kavraki, and Sebastian Thrun. Principles of Robot Motion. Theory, Algorithms an Implementation. 2005

- [8] Adept mobilerobots AmigoBot-AMGO_RevA.pdf
<https://www.generationrobots.com/media/AmigoBot-Adept-datasheet.pdf>
- [9] AmigoBot User's Guide ActiveMedia Robotics
<https://www.manualslib.com/manual/1403268/Activmedia-Robotics-Amigobot.html>
- [10] ActivMedia Robotics AmigoBOT Technical Manual
<https://www.manualslib.com/manual/2437460/Activmedia-Robotics-Amigobot.html>
- [11] WiBOX 2100E Device Server User Guide
https://cdn.lantronix.com/wp-content/uploads/pdf/WiBox_UG.pdf
- [12] ROS – Robot Operating System Documentation
<https://www.ros.org/>
- [13] RosAria node Documentation
<http://wiki.ros.org/ROSARIA>
- [14] Gazebo Documentation
<https://gazebo.org/docs>
- [15] 3D inertia tensors
https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_moments_of_inertia#List_of_3D_inertia_tensors