



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Μελέτη και προσομοίωση του κινηματικού
και δυναμικού μοντέλου μη επανδρωμένου
ρομποτικού σκάφους επιφανείας

ΤΙΜΠΙΛΗ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ-ΝΕΦΕΛΗ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ

ΚΑΡΡΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ
Αναπληρωτής Καθηγητής

Λαμία Φεβρουάριος 2025



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Μελέτη και προσομοίωση του κινηματικού και δυναμικού μοντέλου μη επανδρωμένου ρομποτικού σκάφους επιφανείας

ΤΙΜΠΙΑΗ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ-ΝΕΦΕΛΗ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ

ΚΑΡΡΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ
Αναπληρωτής Καθηγητής

Λαμία Φεβρουάριος 2025



UNIVERSITY OF
THESSALY

SCHOOL OF SCIENCE

DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE & TELECOMMUNICATIONS

Study and simulation of the kinematic and dynamic model of unmanned robotic surface vessel

TIMPILI ANASTASIA-NEFELI

FINAL THESIS

ADVISOR

KARRAS GEORGIOS
Associate Professor

Lamia February 2025

«Με ατομική μου ευθύνη και γνωρίζοντας τις κυρώσεις ⁽¹⁾, που προβλέπονται από της διατάξεις της παρ. 6 του άρθρου 22 του Ν. 1599/1986, δηλώνω ότι:

1. Δεν παραθέτω κομμάτια βιβλίων ή άρθρων ή εργασιών άλλων αυτολεξεί **χωρίς να τα περικλείω σε εισαγωγικά** και χωρίς να αναφέρω το συγγραφέα, τη χρονολογία, τη σελίδα. Η αυτολεξεί παράθεση χωρίς εισαγωγικά χωρίς αναφορά στην πηγή, είναι λογοκλοπή. Πέραν της αυτολεξεί παράθεσης, λογοκλοπή θεωρείται και η παράφραση εδαφίων από έργα άλλων, συμπεριλαμβανομένων και έργων συμφοιτητών μου, καθώς και η παράθεση στοιχείων που άλλοι συνέλεξαν ή επεξεργάστηκαν, χωρίς αναφορά στην πηγή. Αναφέρω πάντοτε με πληρότητα την πηγή κάτω από τον πίνακα ή σχέδιο, όπως στα παραθέματα.

2. Δέχομαι ότι η αυτολεξεί **παράθεση χωρίς εισαγωγικά**, ακόμα κι αν συνοδεύεται από αναφορά στην πηγή σε κάποιο άλλο σημείο του κειμένου ή στο τέλος του, είναι αντιγραφή. Η αναφορά στην πηγή στο τέλος π.χ. μιας παραγράφου ή μιας σελίδας, δεν δικαιολογεί συρραφή εδαφίων έργου άλλου συγγραφέα, έστω και παραφρασμένων, και παρουσίασή τους ως δική μου εργασία.

3. Δέχομαι ότι υπάρχει επίσης περιορισμός στο μέγεθος και στη συχνότητα των παραθεμάτων που μπορώ να εντάξω στην εργασία μου εντός εισαγωγικών. Κάθε μεγάλο παράθεμα (π.χ. σε πίνακα ή πλαίσιο, κλπ), προϋποθέτει ειδικές ρυθμίσεις, και όταν δημοσιεύεται προϋποθέτει την άδεια του συγγραφέα ή του εκδότη. Το ίδιο και οι πίνακες και τα σχέδια

4. Δέχομαι όλες τις συνέπειες σε περίπτωση λογοκλοπής ή αντιγραφής.

Ημερομηνία: 19 /02/ 2025

Ο – Η Δηλ.

(1) «Όποιος εν γνώσει του δηλώνει ψευδή γεγονότα ή αρνείται ή αποκρύπτει τα αληθινά με έγγραφη υπεύθυνη δήλωση του άρθρου 8 παρ. 4 Ν. 1599/1986 τιμωρείται με φυλάκιση τουλάχιστον τριών μηνών. Εάν ο υπαίτιος αυτών των πράξεων σκόπευε να προσπορίσει στον εαυτόν του ή σε άλλον περιουσιακό όφελος βλάπτοντας τρίτον ή σκόπευε να βλάψει άλλον, τιμωρείται με κάθειρξη μέχρι 10 ετών.»

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία επικεντρώνεται στη μοντελοποίηση και προσομοίωση του Blue Boat, ενός μη επανδρωμένου θαλάσσιου οχήματος (USV). Αρχικά, παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά και οι εφαρμογές του Blue Boat, ακολουθούμενα από την ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου που περιγράφει τη δυναμική του συστήματος. Υλοποιούνται βασικές μαθηματικές προσομοιώσεις, παρέχοντας σημαντικά στοιχεία για την κατανόηση της απόδοσης του οχήματος. Στη συνέχεια, γίνεται εισαγωγή στη θεωρία του MPC, παρουσιάζοντας τα πλεονεκτήματά του και τη δυναμική του εφαρμογή στο Blue Boat.

Η ανάλυση του κώδικα που αναπτύχθηκε για τις προσομοιώσεις συνοδεύεται από επεξήγηση της μεθοδολογίας, καθώς και από αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Οι προσομοιώσεις απεικονίζονται μέσω διαγραμμάτων, συγκρίνοντας τη συμπεριφορά του συστήματος με μελέτη κινηματικού δυναμικού μοντέλου και με MPC.

Τέλος, καταγράφονται τα βασικά συμπεράσματα της μελέτης και προτείνονται μελλοντικές βελτιώσεις και εφαρμογές για ρομποτικά συστήματα στον θαλάσσιο χώρο. Η εργασία συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση και αξιοποίηση των δυνατοτήτων των USVs, ενώ θέτει τη βάση για περαιτέρω έρευνα στον τομέα του ελέγχου και της αυτόνομης πλοήγησης.

ABSTRACT

This thesis focuses on modeling and simulating the Blue Boat, an unmanned marine vehicle (USV). First, the main features and applications of the Blue Boat are presented, followed by the development of a mathematical model that describes the system's dynamics. Basic mathematical simulations are implemented, providing important data for understanding the vehicle's performance. Then, an introduction to the theory of MPC is made, presenting its advantages and dynamic application to the Blue Boat.

The code developed for the simulations is analyzed, followed by an explanation of the methodology, as well as an evaluation of the results. The simulations are presented through diagrams, comparing the system's behavior with that of a kinematic dynamic model study and with MPC.

Finally, the main conclusions of the study are recorded and future improvements and applications for robotic systems in the marine environment are proposed. The work contributes to a better understanding and exploitation of the capabilities of USVs while laying the foundation for further research in the field of control and autonomous navigation.

Table of Contents

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	I
ABSTRACT	III
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</u>	<u>1</u>
1.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ BLUE BOAT USV.....	1
1.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ MODEL PREDICTIVE CONTROL (MPC).....	2
1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	4
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΤΟ BLUE BOAT USV ΚΑΙ Η ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ.....</u>	<u>6</u>
2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ BLUE BOAT.....	6
2.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ USVs	8
2.3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΤΟΥ BLUE BOAT.....	10
2.3.Α ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΓΩΝΙΑΣ.....	10
2.3.Β ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΙΝΗΣΗΣ	11
2.3.Γ ΟΙ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΚΙΝΗΣΗΣ.....	12
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	12
2.4 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	13
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ</u>	
<u>ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟΥ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....</u>	<u>15</u>
3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ.....	15
3.2 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟΥ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	17
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ MPC, ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΩΔΙΚΑ ΚΑΙ</u>	
<u>ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ.....</u>	<u>23</u>
4.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ MODEL PREDICTIVE CONTROL	23
4.1.Α ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	23
4.1.Β ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ MPC ΣΤΟ BLUE BOAT USV	25
4.2 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	26
4.3 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ.....	31
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</u>	<u>34</u>
<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>	<u>36</u>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Εισαγωγή

1.1 Παρουσίαση του Blue Boat USV

Η ανάπτυξη των μη επανδρωμένων σκαφών επιφάνειας (USV) αντιπροσωπεύει μια από τις πιο καινοτόμες εξελίξεις στον τομέα της ναυσιπλοΐας και της περιβαλλοντικής έρευνας. Το Blue Boat 120, που έχει σχεδιαστεί από την Blue Robotics, αποτελεί μια ευέλικτη πλατφόρμα η οποία συνδυάζει την τεχνολογία αιχμής με τη δυνατότητα προσαρμογής, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Με έμφαση στην αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητα του, ενσωματώνει σχεδιαστικές καινοτομίες που του επιτρέπουν να επιχειρεί σε απαιτητικά περιβάλλοντα, όπως παράκτιες περιοχές ή υδάτινες επιφάνειες με έντονη βλάστηση.

Η αρχιτεκτονική του μοντέλου περιλαμβάνει ένα βαθύ σκάφος ειδικά σχεδιασμένο ώστε να αποτρέπει την προσκόλληση φυτών και υπολειμμάτων. Αυτή η χαρακτηριστική προσέγγιση στον σχεδιασμό επιτρέπει στο σκάφος να διατηρεί υψηλή απόδοση ακόμα και σε περιοχές με πυκνή υδάτινη βλάστηση, καθιστώντας το ιδανικό για αποστολές περιβαλλοντικής παρακολούθησης, όπως η συλλογή δεδομένων για την ποιότητα του νερού. Παράλληλα, η στιβαρή κατασκευή και η ευελιξία του το καθιστούν κατάλληλο για επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης, όπου οι συνθήκες συχνά είναι απρόβλεπτες.

Η τεχνολογία που ενσωματώνεται στο Blue Boat 120 βασίζεται σε προηγμένα συστήματα πλοήγησης, όπως το Navigator Flight Controller και δέκτες GNSS/GPS. Αυτά τα συστήματα επιτρέπουν την αυτοματοποιημένη πλοήγηση με εξαιρετική ακρίβεια, εξασφαλίζοντας την εκτέλεση κρίσιμων αποστολών χωρίς την ανάγκη συνεχούς ανθρώπινης παρέμβασης. Το σκάφος είναι σε θέση να ακολουθεί προκαθορισμένες διαδρομές με ακρίβεια GPS, να επιστρέφει αυτόματα στη βάση του σε περίπτωση απώλειας σύνδεσης και να ακολουθεί συγκεκριμένα αντικείμενα, παρέχοντας ένα ευρύ φάσμα επιλογών για αποστολές που απαιτούν ακρίβεια και αυτονομία.

Αξιοσημείωτο είναι ότι το Blue Boat 120 μπορεί να μεταφέρει φορτίο έως 15 κιλά, δίνοντας τη δυνατότητα ενσωμάτωσης διαφόρων αισθητήρων και συσκευών. Αυτές οι επιλογές περιλαμβάνουν ειδικά μηχανήματα όπως υδρογραφικούς ηχοσυνδέτες για τη χαρτογράφηση του βυθού, συστήματα παρακολούθησης ποιότητας νερού, καθώς και κάμερες υψηλής ευκρίνειας για την καταγραφή δεδομένων. Η ευελιξία στον εξοπλισμό διευκολύνει την προσαρμογή του σκάφους σε διαφορετικά ερευνητικά πεδία, από περιβαλλοντικές μελέτες έως την ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών ναυσιπλοΐας.

Η ευρεία γκάμα εφαρμογών αυτού του μοντέλου αναδεικνύει την αξία του ως «εργαλείο» έρευνας και ανάπτυξης. Στον τομέα της περιβαλλοντικής παρακολούθησης, το σκάφος μπορεί να συμβάλει στην κατανόηση κρίσιμων ζητημάτων, όπως η μόλυνση των υδάτινων πόρων, ενώ σε αποστολές έρευνας και διάσωσης παρέχει σημαντική υποστήριξη σε δυσπρόσιτες περιοχές. Παράλληλα, η χρήση του σε ερευνητικές εργασίες επιτρέπει τη δοκιμή μοντέλων και τεχνολογιών, προσφέροντας ακριβή και αξιόπιστα δεδομένα.

Το Blue Boat 120 δεν αποτελεί απλώς ένα ακόμη μη επανδρωμένο σκάφος επιφάνειας, αλλά μια ολοκληρωμένη πλατφόρμα που ανταποκρίνεται στις σύγχρονες προκλήσεις της ναυσιπλοΐας και της περιβαλλοντικής έρευνας. Η συνδυασμένη ικανότητά του να λειτουργεί σε απαιτητικά περιβάλλοντα, μαζί με τις προηγμένες δυνατότητες πλοήγησης και την ευελιξία του, το καθιστούν έναν αξιόπιστο συνεργάτη για ερευνητές και επαγγελματίες. Με τη χρήση τεχνολογιών αιχμής και την προσαρμοστικότητα που προσφέρει, θέτει νέα πρότυπα στην κατηγορία των μη επανδρωμένων σκαφών επιφάνειας.

1.2 Εισαγωγή στον έλεγχο Model Predictive Control (MPC)

Ο έλεγχος Model Predictive Control (MPC) αποτελεί μια προηγμένη μέθοδο ελέγχου που χρησιμοποιείται για την επίτευξη βέλτιστης λειτουργίας σε συστήματα με πολυπλοκότητα και περιορισμούς. Η λειτουργία του βασίζεται στην επίλυση ενός βελτιστοποιητικού προβλήματος σε πραγματικό χρόνο, λαμβάνοντας υπόψη τόσο την παρούσα κατάσταση του συστήματος όσο και την προβλεπόμενη συμπεριφορά του στο μέλλον. Μέσω ενός μαθηματικού μοντέλου, υπολογίζει τις βέλτιστες ενέργειες που πρέπει να εκτελεστούν για ένα καθορισμένο χρονικό ορίζοντα, προσαρμόζοντας συνεχώς την απόκρισή του σε νέες συνθήκες και ενσωματώνοντας περιορισμούς όπως οι φυσικές δυνατότητες του συστήματος ή οι περιβαλλοντικοί παράγοντες.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου MPC είναι η δυνατότητά της να διαχειρίζεται πολυμεταβλητά συστήματα με υψηλό βαθμό αλληλεπίδρασης μεταξύ των παραμέτρων τους. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές όπου η δυναμική των συστημάτων είναι μη γραμμική και απαιτείται συντονισμένη διαχείριση πολλών εισόδων και εξόδων. Επιπλέον, η μέθοδος προσφέρει ενσωμάτωση περιορισμών που αφορούν τόσο τη λειτουργική ασφάλεια όσο και τη βέλτιστη απόδοση. Σε πραγματικές συνθήκες, όπως αυτές που συναντώνται σε θαλάσσια περιβάλλοντα, ο MPC αποδεικνύεται ανθεκτικός στις διαταραχές και τις αβεβαιότητες, προσαρμόζοντας τις αποφάσεις ελέγχου με βάση τις εκάστοτε εξωτερικές επιδράσεις, όπως οι κυματισμοί ή οι άνεμοι.

Η χρήση του ελέγχου (MPC) στο Blue Boat 120, ένα μη επανδρωμένο σκάφος επιφάνειας, προσφέρει σημαντικές δυνατότητες για τη βελτιστοποίηση της αυτονομίας και της πλοήγησης. Το Blue Boat έχει σχεδιαστεί ως μια πλατφόρμα για υδρογραφικές έρευνες και ανάπτυξη αυτόνομων συστημάτων, με την ευελιξία να ενσωματώνει ποικίλους αισθητήρες και λογισμικό. Η εφαρμογή του MPC σε αυτή την πλατφόρμα επιτρέπει τη βελτίωση της πλοήγησης, εξασφαλίζοντας την ακριβή παρακολούθηση προγραμματισμένων διαδρομών και την ταχεία απόκριση σε εξωτερικές διαταραχές. Παράλληλα, ενισχύει την αποδοτικότητα, μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας και αυξάνοντας τη διάρκεια αποστολών σε δύσκολες συνθήκες.

Ένας από τους βασικούς στόχους της εφαρμογής έλεγχου (MPC) στο Blue Boat είναι η διατήρηση σταθερότητας κατά τη διάρκεια της πλεύσης, ανεξαρτήτως εξωτερικών διαταραχών. Η ακρίβεια στην πλοήγηση αποτελεί επίσης καθοριστικό παράγοντα, καθώς το σκάφος πρέπει να ακολουθεί τη σχεδιασμένη πορεία με ακρίβεια, ακόμα και σε περιβάλλοντα όπου οι κυματισμοί και τα ρεύματα ενδέχεται να μεταβάλλουν την τροχιά του. Η αποτελεσματική διαχείριση της ενέργειας, που συνεπάγεται τη βέλτιστη χρήση των διαθέσιμων πόρων, είναι επίσης κρίσιμη, καθώς εξασφαλίζει την επιτυχή ολοκλήρωση μακροχρόνιων αποστολών χωρίς την ανάγκη συχνής επαναφόρτισης ή ανεφοδιασμού.

Η ανάπτυξη ενός αξιόπιστου μαθηματικού μοντέλου για την αναπαράσταση των δυναμικών του σκάφους αποτελεί πρόκληση για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου MPC. Το μοντέλο αυτό πρέπει να λαμβάνει υπόψη παράγοντες όπως η αντίσταση του νερού, οι δυνάμεις πρόωσης, καθώς και οι εξωτερικές διαταραχές. Επιπλέον, οι θαλάσσιες συνθήκες, όπως οι αλλαγές στον κυματισμό και οι απότομες αλλαγές ανέμου, απαιτούν από τον ελεγκτή να μπορεί να προσαρμόζεται άμεσα σε μεταβαλλόμενα δεδομένα. Η ενσωμάτωση αυτών των παραμέτρων στο πρόβλημα βελτιστοποίησης του MPC καθιστά τη μέθοδο ιδιαίτερα αποτελεσματική για εφαρμογές σε δυναμικά περιβάλλοντα.

Η δυνατότητα χρήσης της μεθόδου MPC στο Blue Boat ενισχύει την αυτονομία του, καθιστώντας το ένα ιδανικό εργαλείο για περιβαλλοντική παρακολούθηση και υδρογραφικές έρευνες. Οι αισθητήρες που μπορούν να ενσωματωθούν στο σκάφος, όπως υδρογραφικοί ηχοσυνδέτες και συστήματα μέτρησης ποιότητας νερού, επιτρέπουν τη συλλογή δεδομένων υψηλής ακρίβειας. Η ανθεκτικότητα του MPC στις διαταραχές εξασφαλίζει ότι το σκάφος μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί αξιόπιστα ακόμα και σε ακραίες συνθήκες, παρέχοντας δεδομένα απαραίτητα για την κατανόηση και διαχείριση των θαλάσσιων οικοσυστημάτων.

Η προσέγγιση που προσφέρει αυτή η μέθοδος ελέγχου είναι ζωτικής σημασίας για την εξέλιξη των αυτόνομων συστημάτων ναυσιπλοΐας. Η εφαρμογή της στο Blue Boat υποδεικνύει τον τρόπο με τον οποίο οι προηγμένες μέθοδοι ελέγχου μπορούν να ενισχύσουν την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία των μη επανδρωμένων σκαφών, ανοίγοντας τον δρόμο για νέες δυνατότητες στην έρευνα και την ανάπτυξη. Σε συνδυασμό με την ευελιξία που παρέχει το Blue Boat ως πλατφόρμα, ο MPC προσφέρει μια μοναδική ευκαιρία για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας σε δύσκολες και μεταβαλλόμενες συνθήκες.

1.3 Σκοπός και στόχοι της πτυχιακής εργασίας

Η παρούσα πτυχιακή εργασία επικεντρώνεται στη θεωρητική και πρακτική μελέτη του κινηματικού και δυναμικού μοντέλου ενός μη επανδρωμένου ρομποτικού σκάφους επιφανείας (Unmanned Surface Vehicle - USV). Τα USV είναι αυτόνομα σκάφη που χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές, όπως η ναυτιλία, η έρευνα, η παρακολούθηση περιβαλλοντικών συνθηκών και η συλλογή δεδομένων σε θαλάσσιες περιοχές. Ο κύριος στόχος της μελέτης αυτής είναι η ανάλυση της λειτουργίας και των χαρακτηριστικών του μοντέλου αυτού, καθώς και η προσομοίωση της συμπεριφοράς του υπό διάφορες συνθήκες, με σκοπό την κατανόηση και τη βελτίωση της απόδοσής του.

Στο πρώτο στάδιο της εργασίας, θα πραγματοποιηθεί η ανάπτυξη του κινηματικού μοντέλου του σκάφους. Αυτό περιλαμβάνει τις βασικές εξισώσεις κίνησης, που καθορίζουν τη σχέση μεταξύ των ταχυτήτων και των γωνιακών ταχυτήτων του σκάφους και των δυνάμεων που ασκούνται επάνω του. Η ανάλυση αυτή θα συνδέσει τη θεωρητική κινηματική με την πραγματική πλοήγηση του σκάφους, λαμβάνοντας υπόψη τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, όπως τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά του σκάφους, τις περιβαλλοντικές διαταραχές (π.χ., κύματα, ρεύματα) και τη σταθερότητα κατά την κίνηση. Μέσω αυτής της ανάλυσης, θα εξεταστεί η αντίδραση του σκάφους σε διαφορετικές συνθήκες, όπως η πλεύση σε ευθεία γραμμή και η αλλαγή κατεύθυνσης.

Στη συνέχεια, θα αναπτυχθεί το δυναμικό μοντέλο, το οποίο θα αναλύσει τις δυνάμεις και ροπές που δρουν στο σκάφος κατά τη διάρκεια της πλοήγησης. Οι δυνάμεις αυτές περιλαμβάνουν τις υδροδυναμικές αντιστάσεις που δημιουργούνται κατά την κίνηση του σκάφους μέσα στο νερό, καθώς και τις δυνάμεις που ασκούνται από τα πηδάλια και τις προπέλες του σκάφους. Η ανάλυση του δυναμικού μοντέλου θα εξετάσει επίσης την επίδραση εξωτερικών παραμέτρων, όπως τα κύματα, τα ρεύματα και οι αλλαγές στην κατεύθυνση του ανέμου, οι οποίες επηρεάζουν τη σταθερότητα και την πλοήγηση του σκάφους. Η ακριβής κατανόηση αυτών των δυνάμεων είναι κρίσιμη για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και της αυτονομίας του σκάφους (USV) σε πραγματικές συνθήκες.

Η επόμενη φάση της εργασίας θα περιλαμβάνει την υλοποίηση προσομοιώσεων σε εξειδικευμένο λογισμικό, με σκοπό την επικύρωση των θεωρητικών μοντέλων και την ανάλυση της συμπεριφοράς του USV υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Μέσω αυτών των προσομοιώσεων, θα αξιολογηθεί η ακρίβεια των θεωρητικών μοντέλων και η αποτελεσματικότητα της πλοήγησης του σκάφους υπό διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Η ανάλυση αυτή θα συμβάλει στην καλύτερη κατανόηση των παραμέτρων που επηρεάζουν τη λειτουργία του USV και θα εντοπίσει τυχόν περιορισμούς ή αδυναμίες στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται.

Ταυτόχρονα για την μελέτη της συμπεριφοράς του μοντέλου αυτού θα χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο ελέγχου Model Predictive Control (MPC) που αποτελεί μια προηγμένη μέθοδο ελέγχου και χρησιμοποιείται για την επίτευξη βέλτιστης λειτουργίας σε συστήματα με πολυπλοκότητα και περιορισμούς. Η λειτουργία του βασίζεται στην επίλυση ενός βελτιστοποιητικού προβλήματος σε πραγματικό χρόνο, λαμβάνοντας υπόψη τόσο την παρούσα κατάσταση του συστήματος όσο και την προβλεπόμενη συμπεριφορά του στο μέλλον.

Πλεονέκτημα της μεθόδου MPC είναι η δυνατότητά της να τελειοποιεί σε υψηλό βαθμό αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραμέτρων λειτουργίας του μη επανδρωμένου σκάφους (USV). Σε πραγματικές συνθήκες, όπως αυτές που συναντώνται σε θαλάσσια περιβάλλοντα, ο MPC αποδεικνύεται ανθεκτικός στις διαταραχές και τις αβεβαιότητες, προσαρμόζοντας τις αποφάσεις ελέγχου με βάση τις εκάστοτε εξωτερικές επιδράσεις, όπως οι κυματισμοί ή οι άνεμοι.

Επομένως η χρήση του ελέγχου (MPC) στο Blue Boat 120, θα προσφέρει σημαντικές δυνατότητες για τη βελτιστοποίηση της αυτονομίας και της πλοήγησης. Επειδή το σκάφος αυτό έχει σχεδιαστεί ως μια πλατφόρμα για υδρογραφικές έρευνες και ανάπτυξη αυτόνομων συστημάτων, με την ευελιξία να ενσωματώνει ποικίλους αισθητήρες και λογισμικό, η εφαρμογή του MPC σε αυτή την πλατφόρμα επιτρέπει τη βελτίωση της πλοήγησης, εξασφαλίζοντας την ακριβή παρακολούθηση προγραμματισμένων διαδρομών και την ταχεία απόκριση σε εξωτερικές διαταραχές. Με αυτό τον τρόπο ενισχύει την αποδοτικότητα, μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας και αυξάνοντας τη διάρκεια αποστολών σε δύσκολες συνθήκες.

Με την ολοκλήρωση αυτής της πτυχιακής εργασίας, αναμένεται να επιτευχθεί μια εις βάθος κατανόηση της κινηματικής και δυναμικής συμπεριφοράς ενός ρομποτικού σκάφους (USV). Η συνεισφορά της μελέτης αυτής θα είναι καθοριστική για τη σχεδίαση και ανάπτυξη πιο αποδοτικών και λειτουργικών ρομποτικών σκαφών επιφανείας, που θα είναι ικανά να ανταπεξέλθουν σε πραγματικές θαλάσσιες συνθήκες και να επιτελούν πολύπλοκες αποστολές αυτόνομα. Οι γνώσεις που θα αποκτηθούν από αυτή την εργασία μπορούν να χρησιμεύσουν ως βάση για τη μελλοντική εξέλιξη των τεχνολογιών USV και την εφαρμογή τους σε διάφορους τομείς, από την έρευνα και την παρακολούθηση του περιβάλλοντος, μέχρι τις εμπορικές και στρατηγικές εφαρμογές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Το Blue Boat USV και η Μοντελοποίηση του

2.1 Χαρακτηριστικά και λειτουργικότητα του Blue Boat

Το Blue Boat 120 είναι ένα προηγμένο μη επανδρωμένο σκάφος επιφάνειας (USV), το οποίο έχει σχεδιαστεί για να ικανοποιεί τις αυξημένες απαιτήσεις των υδρογραφικών ερευνών και των ρομποτικών συστημάτων. Πρόκειται για μια πλατφόρμα υψηλής απόδοσης που παρέχει πλήρη αυτονομία και ευελιξία, καθιστώντας το ιδανικό για διάφορες εφαρμογές, όπως η παρακολούθηση θαλάσσιων περιβαλλόντων, η συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, καθώς και η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών στον τομέα της ρομποτικής και της ναυσιπλοΐας.

Ο πυρήνας του συστήματος του Blue Boat 120 είναι το ανοικτού κώδικα λογισμικό BlueOS, το οποίο επιτρέπει την εύκολη ενσωμάτωση διαφόρων αισθητήρων και συστημάτων ελέγχου. Το BlueOS υποστηρίζει προηγμένες μεθόδους ελέγχου και ναυσιπλοΐας, προσφέροντας τη δυνατότητα προσαρμογής του σκάφους στις ανάγκες των χρηστών. Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά το Blue Boat 120 εξαιρετικά ευέλικτο για επιστημονικές και ερευνητικές αποστολές, όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια και εξειδικευμένος εξοπλισμός. Ειδικότερα, το BlueOS διευκολύνει την ενσωμάτωση συστημάτων ελέγχου και παρακολούθησης, όπως ηχοβολιστών και αισθητήρων ποιότητας νερού, που είναι απαραίτητοι για υδρογραφικές έρευνες.

Η σχεδίαση του Blue Boat 120 ξεχωρίζει για την ικανότητά του να επιχειρεί σε δύσκολες συνθήκες, όπως περιοχές με έντονη βλάστηση ή λιμνάζοντα ύδατα, όπου το σκάφος μπορεί να αντιμετωπίσει προβλήματα από την προσκόλληση φυτών και υπολειμμάτων. Η ειδικά διαμορφωμένη κατασκευή του σκάφους αποτρέπει αυτή την προσκόλληση, καθιστώντας το ιδανικό για αποστολές σε περιοχές με έντονη βλάστηση ή σε λιμνάζοντα ύδατα, όπου η καθαριότητα του σκάφους είναι κρίσιμη για την ομαλή λειτουργία του. Η ευελιξία του Blue Boat 120 να λειτουργεί σε τέτοιες περιοχές καθιστά το σκάφος πολύτιμο εργαλείο για περιβαλλοντικές μελέτες και έρευνες που απαιτούν ακριβή δεδομένα σε δύσκολες συνθήκες.

Το Blue Boat 120 έχει επίσης αναπτύξει μια ευέλικτη ηλεκτρονική αρχιτεκτονική που επιτρέπει την προσαρμογή του με ποικίλους αισθητήρες και συστήματα μέτρησης, όπως ηχοβολιστές και αισθητήρες ποιότητας νερού, καθιστώντας το ιδανικό για επιστημονικές αποστολές που απαιτούν συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Ο σχεδιασμός του σκάφους είναι συμπαγής και ανθεκτικός, εξασφαλίζοντας τη μακροχρόνια απόδοσή του σε απαιτητικά περιβάλλοντα και επιτρέποντας την εύκολη μεταφορά και χρήση σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές.

Η ικανότητα φορτίου του Blue Boat 120 φτάνει τα 15 kg, γεγονός που επιτρέπει την εγκατάσταση ποικιλίας εξοπλισμού και αισθητήρων για την υποστήριξη πολύπλοκων επιστημονικών αποστολών. Από τη λήψη δεδομένων για την ποιότητα του νερού, μέχρι την υδρογραφική χαρτογράφηση, το Blue Boat 120 παρέχει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης των κατάλληλων αισθητήρων που χρειάζονται οι ερευνητές για τις εργασίες τους. Η δυνατότητα προσαρμογής της φόρτωσης το καθιστά εξαιρετικά ευέλικτο για διαφορετικούς τύπους αποστολών, είτε πρόκειται για παρακολούθηση θαλάσσιων περιβαλλόντων, είτε για εξειδικευμένες επιστημονικές έρευνες.

Όσον αφορά τις τεχνικές του επιδόσεις, το Blue Boat 120 διαθέτει μέγιστη ταχύτητα 3 m/s (6 kts) χωρίς φορτίο, επιτρέποντας την ταχεία κάλυψη μεγάλων αποστάσεων και την εκτέλεση σύνθετων αποστολών σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα. Η μέγιστη στατική θράυση του σκάφους είναι 8.2 kgf, κάτι που το καθιστά ικανό να αντιμετωπίσει τις αντίξοες συνθήκες που ενδέχεται να προκύψουν κατά τη διάρκεια των αποστολών του. Επιπλέον, η αυτονομία του εξαρτάται από τον αριθμό των μπαταριών που χρησιμοποιούνται, με την επιλογή 8 μπαταριών να προσφέρει έως και 62 ώρες λειτουργίας, καλύπτοντας αποστάσεις έως 220 km. Η δυνατότητα μακροχρόνιας λειτουργίας του το καθιστά ιδανικό για εκτελέσεις μεγάλων αποστολών χωρίς την ανάγκη συνεχούς επαναφόρτισης.

Η δυνατότητα αυτονομίας του μοντέλου αυτού ενισχύεται με την ενσωμάτωση του Navigator Flight Controller και του GPS, που παρέχουν πλήρη αυτονομία στη ναυσιπλοΐα. Οι λειτουργίες του, όπως η πλοήγηση με βάση σημεία (waypoint navigation), η διατήρηση της θέσης (position hold), το geo-fencing και η αυτόματη επιστροφή στη βάση (automatic return-to-home), καθιστούν το Blue Boat 120 ιδανικό για μακροχρόνιες αποστολές χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Η εύκολη σχεδίαση και εκτέλεση αποστολών μέσω drag-and-drop επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργούν σύνθετες αποστολές γρήγορα και με ευκολία, κάνοντάς το ένα ισχυρό εργαλείο για ερευνητές και επαγγελματίες στον τομέα της υδρογραφίας και των θαλάσσιων ερευνών.

Το Blue Boat 120 βρίσκει εφαρμογή σε πολλούς τομείς, από τη συλλογή δεδομένων για περιβαλλοντική παρακολούθηση μέχρι την υποστήριξη υδρογραφικών ερευνών και την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών στον τομέα της ρομποτικής. Η ευελιξία του και η δυνατότητά του να λειτουργεί σε δύσκολα περιβάλλοντα το καθιστούν ιδανικό εργαλείο για εφαρμογές που απαιτούν αξιόπιστα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα υψηλή αποδοτικότητα και χαμηλό κόστος λειτουργίας.

2.2 Εφαρμογές και πλεονεκτήματα των USVs

Τα Unmanned Surface Vehicles (USVs) αποτελούν μια προηγμένη καινοτομία που έχει βρει εφαρμογή σε ποικιλία τομέων, επιτρέποντας την εκτέλεση αποστολών που προηγουμένως ήταν δύσκολο ή επικίνδυνο να πραγματοποιηθούν με επανδρωμένα σκάφη. Χρησιμοποιώντας τεχνολογίες αιχμής, τα USVs έχουν αναδειχθεί ως ιδιαίτερα χρήσιμα εργαλεία για έρευνες, επιχειρησιακές αποστολές και άλλες εξειδικευμένες εφαρμογές. Η αυτόνομη λειτουργία τους και η ικανότητα να συλλέγουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα στους τομείς όπου εφαρμόζονται.

Μία από τις βασικές εφαρμογές των μη επανδρωμένων αυτών σκαφών είναι η υδρογραφική έρευνα. Τα USVs χρησιμοποιούνται για τη χαρτογράφηση θαλάσσιων περιοχών και τη συλλογή δεδομένων σχετικά με τη μορφολογία του πυθμένα, τη θερμοκρασία του νερού, τη χημική σύνθεση και άλλες περιβαλλοντικές παραμέτρους. Με αυτό τον τρόπο, μπορούν να εκτελούν λεπτομερείς και ακριβείς μετρήσεις, μειώνοντας τον κίνδυνο για το προσωπικό που θα εκτελούσε την ίδια αποστολή με παραδοσιακό σκάφος. Επιπλέον, τα USVs είναι σε θέση να λειτουργούν σε δύσκολες και επικίνδυνες θαλάσσιες συνθήκες, όπως υψηλά κύματα ή ισχυρούς ανέμους, χωρίς τον κίνδυνο να θέσουν σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές.

Μια άλλη σημαντική εφαρμογή αυτών των μοντέλων είναι η παρακολούθηση περιβαλλοντικών παραμέτρων, όπου χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της θαλάσσιας βιοποικιλότητας, την καταγραφή της θερμοκρασίας των υδάτων και τη μελέτη των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στους θαλάσσιους οικοτόπους. Εξοπλισμένα με σύγχρονους αισθητήρες και τεχνολογία GPS, τα USVs παρέχουν πολύτιμα δεδομένα που συμβάλλουν στην κατανόηση των περιβαλλοντικών αλλαγών και στην ανάπτυξη στρατηγικών για την προστασία των οικοσυστημάτων.

Τα USVs βρίσκουν επίσης εφαρμογή στο στρατιωτικό τομέα, όπου χρησιμοποιούνται για την επιτήρηση και αναγνώριση σε πραγματικό χρόνο. Η ικανότητα τους να λειτουργούν χωρίς πλήρωμα μειώνει τους κινδύνους και τα έξοδα σε αποστολές, ενώ προσφέρουν δυνατότητες που προηγουμένως ήταν διαθέσιμες μόνο σε επανδρωμένα σκάφη. Τα USVs χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και εξουδετέρωση ναυτικών ναρκών, την παρακολούθηση στρατηγικών περιοχών και την υποστήριξη επιχειρήσεων ηλεκτρονικού πολέμου.

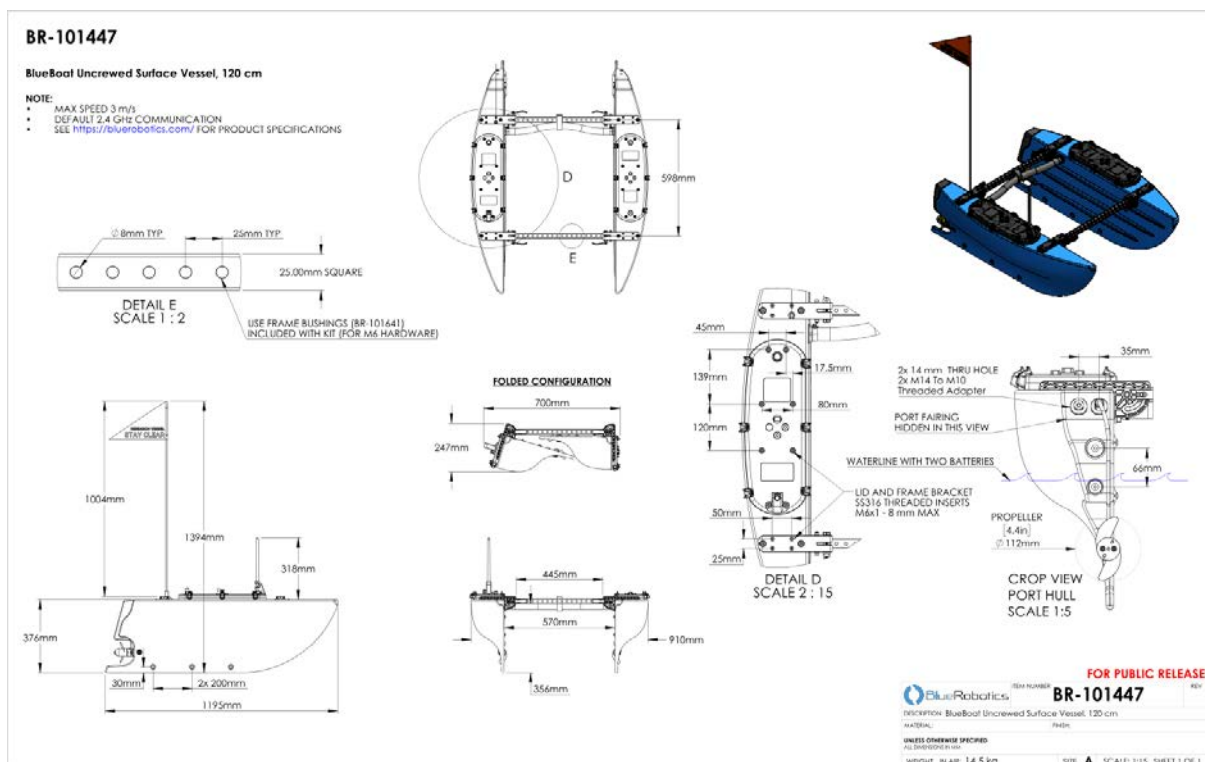
Στο πεδίο των εμπορικών εφαρμογών, τώρα, αξιοποιούνται για την παρακολούθηση ιχθυο-αποθεμάτων, τη διαχείριση της αλιείας και τη συλλογή δεδομένων που βοηθούν στη διατήρηση των φυσικών πόρων. Στη βιομηχανία της αλιείας, τα USVs συνεισφέρουν στην παρακολούθηση της υπεραλίευσης, παρέχοντας ακριβή και έγκαιρα δεδομένα σχετικά με τις θέσεις και τους πληθυσμούς των ψαριών.

Οι δυνατότητες επιπλέον των σκαφών αυτών επεκτείνονται και σε άλλους τομείς, όπως η έρευνα και διάσωση, η επιθεώρηση υποθαλάσσιων αγωγών, η παρακολούθηση υποδομών, και η παρακολούθηση φυσικών καταστροφών. Χάρη στις υψηλές τους ταχύτητες, την αυτονομία και την ευελιξία τους, τα USVs μπορούν να ανταποκριθούν σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, μειώνοντας τον χρόνο αντίδρασης και εξασφαλίζοντας αποτελεσματική επικοινωνία και συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

Τα πλεονεκτήματα που έχουν είναι πολυάριθμα και περιλαμβάνουν τη μείωση του κόστους, καθώς δεν απαιτούν πλήρωμα για την εκτέλεση των αποστολών, μειώνοντας τα έξοδα εκπαίδευσης, ασφάλισης και λειτουργίας. Επίσης, η απουσία πληρώματος επιτρέπει την εκτέλεση αποστολών σε επικίνδυνες συνθήκες χωρίς να διακινδυνεύεται η ανθρώπινη ζωή. Επιπλέον, τα USVs προσφέρουν υψηλή αυτονομία και μπορούν να λειτουργούν για μεγάλες χρονικές περιόδους χωρίς την ανάγκη συνεχούς ανθρώπινης παρέμβασης, γεγονός που τα καθιστά ιδανικά για μακροχρόνιες αποστολές.

Η ευελιξία τους επιτρέπει να προσαρμόζονται σε διαφορετικές εφαρμογές και αποστολές, καθώς μπορούν να ενσωματώσουν διάφορους αισθητήρες ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε αποστολής. Από τη συλλογή περιβαλλοντικών δεδομένων μέχρι την παρακολούθηση στρατηγικών περιοχών, τα USVs είναι σε θέση να εκτελούν ένα ευρύ φάσμα λειτουργιών. Το γεγονός ότι είναι εξοπλισμένα με προηγμένες τεχνολογίες πλοήγησης και ανίχνευσης εμποδίων, εξασφαλίζει τη συλλογή αξιόπιστων δεδομένων και την αποτελεσματική εκτέλεση των αποστολών.

Τα USVs είναι ένα από τα πιο υποσχόμενα «εργαλεία» για το μέλλον, καθώς η συνεχής εξέλιξη των τεχνολογιών που τα υποστηρίζουν, όπως η τεχνητή νοημοσύνη και τα συστήματα μηχανικής μάθησης, θα επιτρέψει την περαιτέρω βελτίωση της πλοήγησης, της λήψης αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο και της αποδοτικότητας των αποστολών.[1],[2],[3],[4]



Εικόνα 1:Blue Boat 120, USV [16]

2.3 Μαθηματική περιγραφή της δυναμικής του Blue Boat

Η δυναμική του Blue Boat USV (Unmanned Surface Vehicle) περιγράφεται από μαθηματικές εξισώσεις που συνδέουν τις ταχύτητες του σκάφους, τις γωνιακές ταχύτητες και τις εξωτερικές δυνάμεις που επηρεάζουν την κίνησή του. Οι εξισώσεις αυτές είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο το σκάφος αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του και πώς οι δυνάμεις που ασκούνται πάνω του καθορίζουν την κίνησή του στο νερό. Μέσω αυτών των εξισώσεων, μπορεί να μοντελοποιηθεί η συμπεριφορά του σκάφους σε διάφορες καταστάσεις, επιτρέποντας τη μελέτη της δυναμικής του, τη βελτίωση του ελέγχου και την πρόβλεψη της απόδοσης σε πραγματικές συνθήκες.

2.3.α Εξισώσεις Θέσης και Γωνίας

Η θέση και η γωνία του σκάφους περιγράφονται από μια σειρά εξισώσεων που σχετίζουν τις ταχύτητες και τις εξωτερικές επιρροές, όπως οι δυνάμεις που προέρχονται από τα ρεύματα ή τον άνεμο. Οι βασικές εξισώσεις θέσης και γωνίας είναι οι εξής:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u * \cos(\psi) - v * \sin(\psi) + V_x \\ \dot{y} &= u * \sin(\psi) + v * \cos(\psi) + V_y \\ \dot{\psi} &= r \end{aligned}$$

Οι παραπάνω εξισώσεις περιγράφουν τις χρονικές παραγώγους της θέσης του σκάφους στους άξονες x και y , καθώς και την ταχύτητα περιστροφής γύρω από τον κατακόρυφο άξονα (την γωνιακή ταχύτητα r). Οι παράμετροι που περιλαμβάνονται στην εξίσωση είναι οι εξής:

- $\dot{x}, \dot{y}$: Η ταχύτητα του σκάφους κατά τους άξονες x και y , δηλαδή οι χρονικές παράγωγοι των συντεταγμένων της θέσης του σκάφους.
- u, v είναι οι ταχύτητες του σκάφους στους άξονες x (ευθεία κίνηση) και y (πλάγια κίνηση), αντίστοιχα.
- ψ είναι η γωνία του σκάφους σε σχέση με το σύστημα αναφοράς (προσανατολισμός).
- r είναι η γωνιακή ταχύτητα γύρω από τον κατακόρυφο άξονα (ταχύτητα περιστροφής του σκάφους γύρω από τον άξονά του).
- V_x, V_y είναι οι εξωτερικές διαταραχές με τη μορφή ταχυτήτων που επηρεάζουν την κίνηση του σκάφους κατά τους άξονες x και y , όπως τα ρεύματα ή ο άνεμος.

Οι πρώτες δύο εξισώσεις καθορίζουν τις ταχύτητες του σκάφους κατά τις κατευθύνσεις x και y , ενώ η τρίτη εξίσωση περιγράφει την αλλαγή της γωνίας προσανατολισμού του σκάφους. Αυτές οι εξισώσεις χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την κίνηση του σκάφους σε σχέση με τις δυνάμεις που δρουν πάνω του και τα χαρακτηριστικά της κίνησης του.

2.3.β Εξισώσεις Κίνησης

Η κίνηση του σκάφους επηρεάζεται από τις δυνάμεις και τις ροπές που ασκούνται πάνω του, καθώς και από τις εσωτερικές δυνάμεις και τις ροπές ελέγχου. Οι εξισώσεις κίνησης του σκάφους περιγράφονται ως εξής:

$$\begin{aligned} \dot{u} &= F_u(u,v,r) + \tau_u \\ \dot{v} &= F_v(u,v,r) + \tau_v \\ \dot{r} &= F_r(u,v,r) + \tau_r \end{aligned}$$

Αυτές οι εξισώσεις περιγράφουν την κίνηση του σκάφους μέσω των επιδράσεων που έχουν οι εξωτερικές και εσωτερικές δυνάμεις στις ταχύτητες του σκάφους. Ειδικότερα:

- $F_u(u,v,r)$, $F_v(u,v,r)$, $F_r(u,v,r)$: Είναι οι δυνάμεις που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση του σκάφους με το περιβάλλον του (π.χ., η υδροδυναμική αντίσταση, η αντίσταση αέρα) και την κίνησή του. Αυτές οι δυνάμεις καθορίζουν την αλλαγή των ταχυτήτων u , v και την γωνιακή ταχύτητα r .
- τ_u , τ_v , τ_r : Είναι οι ροπές ελέγχου που επιβάλλονται στους άξονες u , v και r , οι οποίες καθορίζουν την αλλαγή των ταχυτήτων και την περιστροφή του σκάφους μέσω των χειριστηρίων ή των εξαρτημάτων του (όπως οι προπέλες και τα πηδάλια).

Η κίνηση του σκάφους είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού αυτών των εξωτερικών και εσωτερικών επιδράσεων. Οι εξισώσεις κίνησης αποτελούν το θεμέλιο για την ανάλυση της ευστάθειας του σκάφους και της απόδοσής του υπό διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος.

2.3.γ Οι Δυνάμεις Κίνησης

Για να κατανοηθεί καλύτερα η κίνηση του σκάφους, είναι αναγκαίο να αναλυθούν οι συγκεκριμένες δυνάμεις που επηρεάζουν τις ταχύτητες και τη γωνιακή ταχύτητα του σκάφους. Οι δυνάμεις αυτές περιγράφονται ως εξής:

$$\begin{aligned}F_u(u,v,r) &= r * v * (m_2 / m_1) - u * (d_1 / m_1) \\F_v(u,v,r) &= -u * (m_1 / m_2) - v * (d_2 / m_2) \\F_r(u,v,r) &= -r * (d_3 / m_3) + v * u * ((m_2 - m_1) / m_3)\end{aligned}$$

Αυτές οι εξισώσεις περιγράφουν τη δύναμη που επηρεάζει κάθε μία από τις ταχύτητες του σκάφους και τη γωνιακή ταχύτητα, λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση του σκάφους με το περιβάλλον του. Οι παράμετροι που περιλαμβάνονται στις εξισώσεις είναι:

- m_1, m_2, m_3 : είναι οι μάζες του σκάφους, οι οποίες ενδέχεται να αναφέρονται σε διαφορετικά μέρη του (π.χ., το κύριο σώμα και τα εξαρτήματα του σκάφους).
- d_1, d_2, d_3 : είναι παράγοντες αντίστασης ή μηχανικοί συντελεστές που σχετίζονται με τις δυνάμεις και τις ροπές στο σύστημα κίνησης.
- Η δύναμη F_u επηρεάζει την ταχύτητα u μέσω ενός μηχανικού όρου που εξαρτάται από τις γωνιακές ταχύτητες και την αντίσταση.
- Η δύναμη F_v επηρεάζει την ταχύτητα v με παρόμοιο τρόπο, ενώ η δύναμη F_r επηρεάζει την γωνιακή ταχύτητα r μέσω των αλληλεπιδράσεων των ταχυτήτων του σκάφους και των μηχανικών του χαρακτηριστικών.

Οι δυνάμεις αυτές καθορίζουν την κίνηση του σκάφους μέσα στο νερό, με βάση τις αλληλεπιδράσεις του σκάφους με τις υδροδυναμικές συνθήκες και τις αντιστάσεις που αναπτύσσονται στην κίνηση του σκάφους. Οι μηχανικοί συντελεστές και οι μάζες που αναφέρονται στις εξισώσεις επηρεάζουν άμεσα τη συμπεριφορά του σκάφους και τη σταθερότητά του σε διαφορετικές ταχύτητες και συνθήκες.

Συμπεράσματα

Η αναλυτική περιγραφή της δυναμικής του Blue Boat USV μέσω των μαθηματικών αυτών εξισώσεων παρέχει μια πλήρη κατανόηση της συμπεριφοράς του σκάφους, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις δυναμικές αλληλεπιδράσεις και τις εξωτερικές επιρροές. Οι εξισώσεις αυτές είναι καθοριστικές για την προσομοίωση και την ανάλυση της πλοήγησης του σκάφους υπό διαφορετικές συνθήκες και είναι θεμελιώδεις για την ανάπτυξη αλγορίθμων ελέγχου και βελτιστοποίησης του USV.

2.4 Περιορισμοί και παραδοχές του μοντέλου

Κατά την ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου του Blue Boat 120, είναι απαραίτητο να εξεταστούν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά και την απόδοση του σκάφους σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Η διαδικασία αυτή απαιτεί μια σειρά από παραδοχές και περιορισμούς, οι οποίοι συντελούν στην απλοποίηση του μοντέλου, ώστε να διευκολυνθεί η ανάλυση των δυναμικών του σκάφους, καθώς και η αξιολόγηση των επιδόσεών του σε διάφορες αποστολές.

Μία από τις κύριες παραδοχές που γίνεται κατά την ανάπτυξη του μοντέλου είναι ότι οι εξωτερικές συνθήκες παραμένουν σταθερές. Αυτή η υπόθεση επιτρέπει την επικέντρωση στις βασικές δυναμικές του σκάφους, χωρίς να επηρεάζεται η ανάλυση από παραμέτρους όπως οι ροές, οι άνεμοι ή άλλοι εξωτερικοί παράγοντες. Αν και αυτή η απλοποίηση διευκολύνει την αρχική ανάλυση και τα πρώτα στάδια σχεδίασης, μπορεί να μην αντικατοπτρίζει πλήρως την πραγματικότητα, ειδικά σε περιβάλλοντα με έντονες διακυμάνσεις. Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι εξωτερικές συνθήκες μπορεί να μεταβληθούν γρήγορα, επηρεάζοντας την πλοήγηση και τη σταθερότητα του σκάφους. Για την αντιμετώπιση αυτών των διαφορών, θα χρειαστεί να ενσωματωθούν πρόσθετοι αισθητήρες και αλγόριθμοι προσαρμογής, ώστε να διασφαλιστεί η ορθή λειτουργία του σκάφους σε πραγματικές συνθήκες.

Μια άλλη σημαντική παραδοχή είναι η απλοποίηση της κίνησης του σκάφους σε ευθύγραμμες και ομαλές τροχιές. Αυτή η υπόθεση αγνοεί τυχόν ταλαντώσεις ή περιστροφές που μπορεί να προκύψουν λόγω των κυμάτων ή άλλων περιβαλλοντικών παραμέτρων. Η χρήση αυτής της προσέγγισης επιτρέπει τη μείωση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας του μοντέλου, ωστόσο, μπορεί να οδηγήσει σε ανακρίβειες όταν το σκάφος λειτουργεί σε δύσκολες θαλάσσιες συνθήκες, με έντονα κύματα ή ρεύματα. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η δυναμική του σκάφους μπορεί να αποδειχθεί πιο πολύπλοκη, με την ανάγκη να ληφθούν υπόψη οι αλληλεπιδράσεις με το περιβάλλον, όπως οι ταλαντώσεις που επηρεάζουν την ακριβή θέση και κατεύθυνση του σκάφους.

Οι μηχανικές δυνατότητες του Blue Boat 120, όπως η μέγιστη ικανότητα φορτίου των 15 kg, επηρεάζουν άμεσα την απόδοση του σκάφους κατά τη διάρκεια των αποστολών του. Η υπέρβαση αυτής της ικανότητας φορτίου μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της σταθερότητας του σκάφους και σε αυξημένη κατανάλωση ενέργειας, καθώς η επιπλέον επιβάρυνση αυξάνει τη δύναμη που απαιτείται για την κίνηση του σκάφους. Η δυναμική απόκριση του σκάφους, δηλαδή η ικανότητά του να αντιδρά σε εξωτερικές δυνάμεις, επηρεάζεται επίσης από τα υλικά κατασκευής και τον σχεδιασμό του. Η αντοχή και η ευκαμψία των υλικών παίζουν κρίσιμο ρόλο στην ικανότητα του σκάφους να διατηρεί τη σταθερότητά του υπό διαφορετικές συνθήκες, όπως οι άνεμοι και τα κύματα. Η αλληλεπίδραση με το περιβάλλον μπορεί να προκαλέσει μικρές ή μεγάλες αλλαγές στην πορεία και τη στάθμη του σκάφους, γεγονός που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την εκτίμηση της απόδοσής του.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που πρέπει να εξεταστεί κατά την ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου είναι η ακρίβεια του συστήματος πλοήγησης και των αισθητήρων. Η ακριβής μέτρηση της θέσης, της κατεύθυνσης και των ταχυτήτων του σκάφους είναι κρίσιμη για την επιτυχία της αποστολής. Σφάλματα στις μετρήσεις της θέσης ή στην κατεύθυνση του σκάφους μπορεί να οδηγήσουν σε αποκλίσεις από την επιθυμητή πορεία και να επηρεάσουν την αποτελεσματικότητα του σκάφους. Επομένως, είναι απαραίτητο να ενσωματωθούν ακριβή συστήματα πλοήγησης και αξιόπιστοι αισθητήρες για την παρακολούθηση της κατάστασης του σκάφους σε πραγματικό χρόνο.

Η διαχείριση της ενέργειας αποτελεί έναν ακόμη παράγοντα που καθορίζει την απόδοση του σκάφους, καθώς η αυτονομία του εξαρτάται από την κατανάλωση ενέργειας των συστημάτων του κατά τη διάρκεια της αποστολής. Η βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και η αποτελεσματική διαχείριση των μπαταριών είναι κρίσιμες για την επίτευξη μεγάλων αποστάσεων και χρόνων λειτουργίας, ιδίως κατά τη διάρκεια των ερευνητικών αποστολών. Η ανάπτυξη αλγορίθμων που θα επιτρέπουν την αποτελεσματική χρήση της ενέργειας κατά τη διάρκεια της αποστολής είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση της μεγιστοποίησης της αυτονομίας του σκάφους.

Αυτές οι παραδοχές και περιορισμοί παρέχουν μια βάση για την ανάπτυξη και τη βελτίωση του μαθηματικού μοντέλου του Blue Boat 120, προσφέροντας κατευθυντήριες γραμμές για την αξιολόγηση της απόδοσης του σκάφους σε διάφορες συνθήκες και τις δυνατότητες προσαρμογής του κατά τη διάρκεια των ερευνητικών αποστολών. Η σωστή κατανόηση και εφαρμογή αυτών των παραδοχών είναι απαραίτητη για την επίτευξη των επιθυμητών αποτελεσμάτων και την ανάπτυξη ακριβών και αξιόπιστων μοντέλων πλοήγησης και ελέγχου.[9][10]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Μαθηματικές Προσομοιώσεις και Ανάλυση Κινηματικού και Δυναμικού Μοντέλου

3.1 Περιγραφή της μεθοδολογίας

Για την ανάπτυξη μιας προσομοίωσης κίνησης οχήματος, χρησιμοποιείται μια αριθμητική προσέγγιση που επιτρέπει την εκτίμηση της τροχιάς του οχήματος με βάση τις αρχικές συνθήκες και τις φυσικές δυνάμεις που επηρεάζουν την κίνησή του. Στόχος αυτής της προσομοίωσης είναι να κατανοήσουμε τη δυναμική του οχήματος και να παρατηρήσουμε την επίδραση των βασικών παραμέτρων, όπως η ταχύτητα, η γωνία κατεύθυνσης και η θέση, χωρίς την παρέμβαση ενός συστήματος ελέγχου.

Η κίνηση του οχήματος περιγράφεται μέσω διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες αναπαριστούν τις βασικές μεταβλητές κίνησης, όπως η θέση στο χώρο, η ταχύτητα και η γωνία κατεύθυνσης. Στο πλαίσιο αυτό, το μοντέλο λαμβάνει υπόψη δυνάμεις που ασκούνται στο όχημα, όπως η επιτάχυνση και η τριβή, οι οποίες επηρεάζουν την ταχύτητα και τη γωνία του. Η θέση του οχήματος σε κάθε χρονική στιγμή εξαρτάται από την ταχύτητα και την κατεύθυνση, οι οποίες με τη σειρά τους επηρεάζονται από τις εξωτερικές δυνάμεις και τις επιταχύνσεις.

Για την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν την κίνηση του οχήματος, χρησιμοποιείται η μέθοδος Runge-Kutta (RK45), η οποία είναι μια αριθμητική μέθοδος ολοκλήρωσης που παρέχει υψηλή ακρίβεια σε συστήματα δυναμικών εξισώσεων. Η μέθοδος RK45 υπολογίζει την επόμενη τιμή μιας μεταβλητής με βάση τις προηγούμενες, χρησιμοποιώντας μια σειρά ενδιάμεσων υπολογισμών που ενισχύουν την ακρίβεια της εκτίμησης. Κάθε επόμενη τιμή υπολογίζεται σε διακριτά χρονικά βήματα, επιτρέποντας την αναπαράσταση της τροχιάς του οχήματος στον χώρο με τρόπο που προσεγγίζει τη φυσική πραγματικότητα.

Στην εφαρμογή αυτής της μεθόδου, το πρώτο βήμα είναι ο καθορισμός των αρχικών συνθηκών του συστήματος, όπως η θέση, η ταχύτητα και η γωνία του οχήματος στην αρχή της προσομοίωσης. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι ρυθμοί μεταβολής αυτών των παραμέτρων με βάση τις διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τη δυναμική του οχήματος. Η εφαρμογή της μεθόδου Runge-Kutta επιτρέπει την υπολογιστική πρόβλεψη των επόμενων θέσεων και ταχυτήτων του οχήματος σε διακριτά χρονικά βήματα, διασφαλίζοντας ότι η προσομοίωση παραμένει ακριβής και συνεπής με τις φυσικές αρχές του συστήματος.

Η υλοποίηση αυτής της προσομοίωσης μπορεί να γίνει σε γλώσσες προγραμματισμού όπως η Python ή η MATLAB, οι οποίες διαθέτουν βιβλιοθήκες για την αριθμητική ολοκλήρωση των διαφορικών εξισώσεων. Η Python, για παράδειγμα, παρέχει την βιβλιοθήκη SciPy που περιλαμβάνει έτοιμες συναρτήσεις για την εφαρμογή μεθόδων ολοκλήρωσης, όπως η Runge-Kutta, καθιστώντας την υλοποίηση εύκολη και αποδοτική.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης περιλαμβάνουν την τροχιά του οχήματος στον δισδιάστατο χώρο, η οποία μπορεί να απεικονιστεί γραφικά για να παρατηρηθεί η δυναμική του συστήματος υπό διαφορετικές αρχικές συνθήκες. Με τη χρήση γραφημάτων, είναι δυνατή η οπτική αναπαράσταση των αλλαγών στην ταχύτητα και τη θέση του οχήματος, επιτρέποντας την ανάλυση των επιπτώσεων των εξωτερικών δυνάμεων και των αρχικών συνθηκών στην κίνηση του οχήματος.

3.2 Υλοποίηση Κινηματικού και Δυναμικού Μοντέλου

Για την προσομοίωση της κίνησης του οχήματος, δημιουργήθηκε η κλάση **Vehicle**, η οποία ενσωματώνει όλες τις παραμέτρους και χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τη δυναμική του οχήματος. Η κλάση αυτή περιλαμβάνει τις βασικές εξισώσεις κίνησης που καθορίζουν την αλληλεπίδραση των μεταβλητών του συστήματος (θέση, ταχύτητες, περιστροφή) και επιτρέπει την προσομοίωση της κίνησης του οχήματος στο πεδίο x, y . Η υλοποίηση της κλάσης στοχεύει στην αναπαράσταση της φυσικής συμπεριφοράς του οχήματος κατά την κίνησή του υπό την επίδραση δυνάμεων και ροπών.

Για την επίλυση του συστήματος των διαφορικών εξισώσεων, χρησιμοποιούμε τη μέθοδο αριθμητικής ολοκλήρωσης **solve_ivp** από τη βιβλιοθήκη SciPy. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει τη δυναμική παρακολούθηση της εξέλιξης της θέσης και των ταχυτήτων του οχήματος με υψηλή ακρίβεια, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα να καταγράψουμε την τροχιά του οχήματος σε κάθε χρονικό βήμα.

Η κλάση **Vehicle** περιλαμβάνει τις παρακάτω βασικές συνιστώσες:

- **Ταχύτητες και περιστροφή:** Η εξίσωση της περιστροφής καθορίζει τη γωνιακή ταχύτητα $\dot{\theta}$, η οποία επηρεάζει άμεσα την κυκλική τροχιά που παρατηρείται στην προσομοίωση. Οι γραμμικές ταχύτητες u και v αντιστοιχούν στις ταχύτητες μετάφρασης κατά τους άξονες x και y , οι οποίες συνδυάζονται για να καθορίσουν την κίνηση του οχήματος.
- **Τριβές και απορρόφηση:** Για να προσομοιώσουμε τη φυσική αντίσταση του οχήματος σε διάφορες συνθήκες, προστίθενται συντελεστές τριβής και απορρόφησης. Αυτοί οι συντελεστές ρυθμίζουν την αλληλεπίδραση της δύναμης κίνησης και της αντίστασης του περιβάλλοντος, με σκοπό τη διατήρηση ισορροπίας και την προσομοίωση των επιδράσεων που προκαλούν οι περιβαλλοντικοί παράγοντες.
- **Εξωτερικές επιδράσεις:** Περιλαμβάνονται εξωτερικές ταχύτητες V_x και V_y , οι οποίες προσομοιώνουν τις επιδράσεις περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως ρεύματα ή άνεμος, στις κινήσεις του οχήματος. Αυτές οι ταχύτητες επηρεάζουν τις συνιστώσες ταχύτητας u και v , καθώς το όχημα αντιδρά στις διαταραχές από το εξωτερικό περιβάλλον.

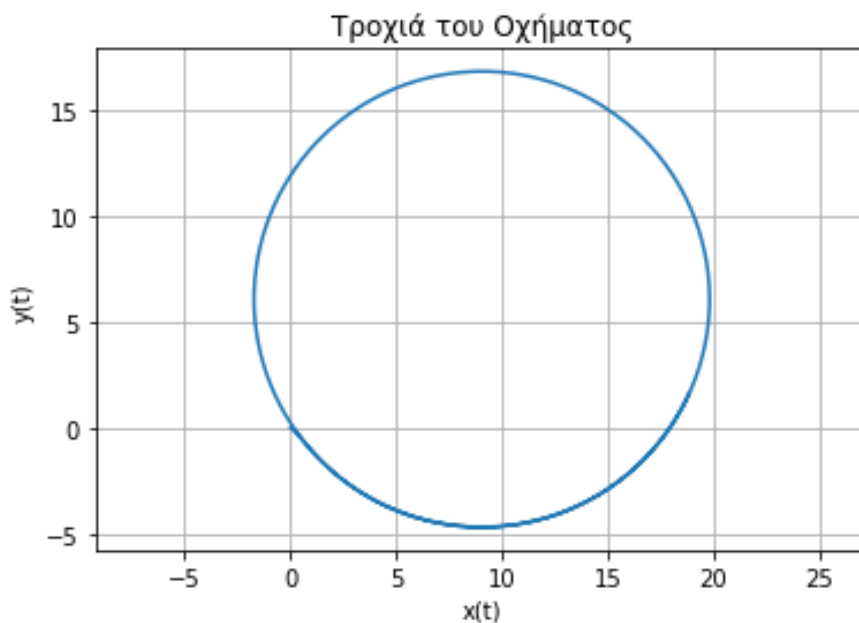
Ακολουθεί ο κώδικας που υλοποιεί αυτήν την προσομοίωση. Στον κώδικα, η κλάση **Vehicle** ενσωματώνει όλες τις παραμέτρους που προαναφέρθηκαν, και η μέθοδος **solve_ivp** χρησιμοποιείται για την ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης και την καταγραφή της τροχιάς του οχήματος. Με την εκτέλεση αυτού του κώδικα, μπορούμε να παρατηρήσουμε την επίδραση των δυνάμεων και ροπών, καθώς και την αλληλεπίδραση του οχήματος με το περιβάλλον.

Αυτό το κείμενο παρέχει μια πλήρη ανάλυση της υλοποίησης πριν από τον κώδικα και συνδέεται φυσικά με τον κώδικα που ακολουθεί, κάνοντάς τον πιο κατανοητό και ελκυστικό για τον αναγνώστη. Όταν προσθέσεις τον κώδικα σου, ο αναγνώστης θα είναι σε θέση να καταλάβει ακριβώς πώς κάθε μέρος του κώδικα σχετίζεται με την ανάλυση που παρουσιάστηκε πριν από αυτόν.


```

1 #!/usr/bin/env python
2
3 import numpy as np
4 from scipy.integrate import solve_ivp
5 import matplotlib.pyplot as plt
6
7 # Ορισμός κλάσης Vehicle για το όχημα
8 class Vehicle:
9     def __init__(self, x=0.0, y=0.0, psi=0.0, u=0.0, v=0.0, r=0.0, vx=0.0, vy=0.0, tau_u=0.05, tau_v=0.0, tau_r=0.01):
10         # Αρχικοί παράμετροι του οχήματος (θέση, ταχύτητα, γωνία κλπ)
11         self.state = np.array([x, y, psi, u, v, r])
12         # Μειωμένοι συντελεστές τριβής (για τις ταχύτητες και τις γωνίες)
13         self.X_u = 0.01
14         self.Y_v = 0.01
15         self.N_r = 0.005
16         # Μειωμένοι συντελεστές μάζας και απορρόφησης (ανάλογα με τις κατευθύνσεις κίνησης)
17         self.m1 = 10 # Μάζα του οχήματος κατά τη μετάβαση
18         self.m2 = 12 # Μάζα του οχήματος κατά την περιστροφή
19         self.m3 = 8 # Μάζα του οχήματος για τις εξωτερικές αντιδράσεις
20         self.d1 = 5 # Απορρόφηση του οχήματος σε σχέση με τη μετάβαση
21         self.d2 = 6 # Απορρόφηση του οχήματος σε σχέση με την περιστροφή
22         self.d3 = 3 # Απορρόφηση του οχήματος σε σχέση με τις εξωτερικές αντιδράσεις
23         # Εξωτερικές επιδράσεις (ταχύτητες vx και vy)
24         self.Vx = vx
25         self.Vy = vy
26         # Αυξανόμενοι συντελεστές για τις δυνάμεις ανάλογα με την ταχύτητα
27         self.tau_u = tau_u
28         self.tau_v = tau_v
29         self.tau_r = tau_r
30
31     # Συνάρτηση που περιγράφει τη δυναμική του οχήματος (ή εξισώσεις κίνησης)
32     def dynamics(self, t, state):
33         x, y, psi, u, v, r = state
34         # Υπολογισμός της ταχύτητας και των κινητικών παραμέτρων του οχήματος
35         dxdt = u * np.cos(psi) - v * np.sin(psi) + self.Vx # Ρυθμός μεταβολής της θέσης στο x
36         dydt = u * np.sin(psi) + v * np.cos(psi) + self.Vy # Ρυθμός μεταβολής της θέσης στο y
37         dpsidt = r # Ρυθμός μεταβολής της γωνίας (περιστροφή)
38         # Υπολογισμός των δυνάμεων στο u, v, r (ταχύτητες και περιστροφή)
39         du_dt = self.Fu(u, v, r) + self.tau_u # Δύναμη στην ταχύτητα u
40         dv_dt = self.Fv(u, v, r) + self.tau_v # Δύναμη στην ταχύτητα v
41         dr_dt = self.Fr(u, v, r) + self.tau_r # Δύναμη στην περιστροφή r
42         # Καταγραφή τιμών σε κάθε βήμα (για έλεγχο)
43         print(f"t={t:.2f}, x={x:.2f}, y={y:.2f}, psi={psi:.2f}, u={u:.2f}, v={v:.2f}, r={r:.2f}")
44         # Επιστροφή των υπολογισμένων ρυθμών μεταβολής για την επόμενη χρονική στιγμή
45         return [dxdt, dydt, dpsidt, du_dt, dv_dt, dr_dt]
46
47     # Συνάρτηση υπολογισμού της δύναμης για την ταχύτητα u
48     def Fu(self, u, v, r):
49         return r * v * (self.m2 / self.m1) - u * (self.d1 / self.m1)
50
51     # Συνάρτηση υπολογισμού της δύναμης για την ταχύτητα v
52     def Fv(self, u, v, r):
53         return -u * (self.m1 / self.m2) - v * (self.d2 / self.m2)
54
55     # Συνάρτηση υπολογισμού της δύναμης για την περιστροφή r
56     def Fr(self, u, v, r):
57         return -r * (self.d3 / self.m3) + v * u * ((self.m2 - self.m1) / self.m3)
58
59     # Αρχικές συνθήκες του συστήματος (θέση, ταχύτητες και γωνία)
60     initial_state = [0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0]
61
62     # Χρονικό διάστημα για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης
63     t_span = [0, 500] # Από το t=0 έως t=500
64
65     # 5000 χρονικά σημεία για την εκτίμηση
66     t_eval = np.linspace(0, 500, 5000)
67
68     # Δημιουργία ενός αντικειμένου για το όχημα με τις παραπάνω παραμέτρους
69     vehicle = Vehicle()
70
71     # Χρησιμοποίηση της συνάρτησης solve_ivp για την επίλυση των εξισώσεων κίνησης
72     sol = solve_ivp(vehicle.dynamics,
73                     t_span,
74                     initial_state,
75                     method='RK45', # Χρησιμοποίηση του αλγορίθμου Runge-Kutta
76                     t_eval=t_eval, # Τα σημεία όπου θα εκτιμηθεί η λύση
77                     atol=1e-6, # Αυστηρότερα όρια ανοχής για την ακριβή λύση
78                     rtol=1e-6) # Σχετική ανοχή για την ακριβή λύση
79
80     # Εξαγωγή των λύσεων για τις θέσεις x και y του οχήματος
81     x_sol = sol.y[0]
82     y_sol = sol.y[1]
83
84     # Δημιουργία γραφήματος για την τροχιά του οχήματος
85     plt.figure()
86     plt.plot(x_sol, y_sol)
87     plt.xlabel('x(t)') # Άξονας x (θέση στον άξονα x)
88     plt.ylabel('y(t)') # Άξονας y (θέση στον άξονα y)
89     plt.title('Τροχιά του Οχήματος') # Τίτλος του γραφήματος
90     plt.grid(True) # Ενεργοποίηση του πλέγματος στο γράφημα
91     plt.axis('equal') # Ισορροπία στις κλίμακες των αξόνων
92     plt.show() # Εμφάνιση του γραφήματος

```



1. Ερμηνεία Γράφηματος

Το παραγόμενο διάγραμμα παρουσιάζει την τροχιά του μη επανδρωμένου θαλάσσιου οχήματος (USV) κατά την προσομοίωση της δυναμικής του στο επίπεδο x, y . Η τροχιά που απεικονίζεται στο διάγραμμα έχει τη μορφή ενός κύκλου, γεγονός που υποδεικνύει ότι το όχημα εκτελεί μια περιοδική κίνηση στην επιφάνεια του νερού. Αυτή η συμπεριφορά προκαλείται από την αλληλεπίδραση των δυνάμεων που ασκούνται στο σκάφος και των ροπών που παράγονται λόγω της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής (r) και των γραμμικών ταχυτήτων (u, v), οι οποίες παραμένουν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Ο κυκλικός τρόπος κίνησης υποδεικνύει επίσης την ικανότητα του συστήματος να διατηρεί μια σταθερή κατεύθυνση και ταχύτητα στο πλαίσιο ενός περιοδικού ελέγχου, γεγονός που είναι κρίσιμο για διάφορες ναυτικές εφαρμογές.

Ο κύκλος στο γράφημα εμφανίζεται ως αποτέλεσμα της σταθερής και ελεγχόμενης περιστροφής του σκάφους γύρω από το κέντρο του συστήματος συντεταγμένων, με τη γωνία προσανατολισμού (ψ) να μεταβάλλεται συνεχώς. Αυτό δείχνει ότι η εφαρμογή ενός ελεγκτή, όπως το MPC (Model Predictive Control), καταφέρνει να συνδυάσει τις δυνάμεις και τις ροπές με τέτοιο τρόπο ώστε το σκάφος να ακολουθεί μια σταθερή πορεία, διατηρώντας την τροχιά του και προσαρμοζόμενο με ελάχιστο λάθος στην επιθυμητή κατεύθυνση.

2. Ανάλυση της Τροχιάς

Η κυκλική κίνηση του USV που καταγράφηκε στο γράφημα προκύπτει από την ισορροπία μεταξύ των δυνάμεων και των ροπών που ασκούνται στο σκάφος. Για να κατανοήσουμε την αιτία αυτής της συμπεριφοράς, είναι σημαντικό να αναλύσουμε τα βασικά συστατικά του μοντέλου κίνησης του σκάφους.

Μεταβλητές κατάστασης

- **x, y :** Αντιπροσωπεύουν τη θέση του σκάφους στο επίπεδο αναφοράς (x, y). Αυτές οι μεταβλητές συνδέονται με τη δυναμική του σκάφους και επηρεάζονται από τις ταχύτητες u και v .
- **ψ (γωνία προσανατολισμού):** Αναπαριστά τη γωνία που σχηματίζει το σκάφος σε σχέση με έναν σταθερό άξονα αναφοράς, συνήθως τον άξονα x . Η γωνία αυτή μεταβάλλεται με την γωνιακή ταχύτητα r , η οποία καθορίζει τον ρυθμό περιστροφής του σκάφους.
- **u, v :** Είναι οι γραμμικές ταχύτητες του σκάφους κατά τους άξονες x και y . Η ταχύτητα u αναφέρεται στην ταχύτητα μετάφρασης κατά τον άξονα x (ευθεία κατεύθυνση), ενώ η ταχύτητα v αναφέρεται στην ταχύτητα κατά τον άξονα y (διατομή της τροχιάς).
- **r :** Η γωνιακή ταχύτητα (ρυθμός περιστροφής) αναφέρεται στην ταχύτητα περιστροφής του σκάφους γύρω από τον κατακόρυφο άξονα. Η γωνιακή ταχύτητα είναι υπεύθυνη για την αλλαγή της κατεύθυνσης του σκάφους και αποτελεί βασικό παράγοντα στη διαμόρφωση της τροχιάς του.

Δυνάμεις και Ροπές

- **F_u, F_v, F_r :** Οι δυνάμεις που επηρεάζουν την κίνηση του σκάφους κατά τους άξονες x, y και γύρω από τον κατακόρυφο άξονα. Αυτές οι δυνάμεις καθορίζουν την επιτάχυνση του σκάφους σε κάθε κατεύθυνση και έχουν άμεση σχέση με τις γραμμικές ταχύτητες και την γωνιακή ταχύτητα.
- **Δυνάμεις Αντίστασης και Απόσβεσης:** Οι συντελεστές απόσβεσης (d_1, d_2, d_3) και οι μάζες (m_1, m_2, m_3) του συστήματος είναι παράγοντες που επηρεάζουν την αντίσταση και την αποσβεστική δύναμη του σκάφους κατά την κίνηση του. Οι συντελεστές αυτοί συνδέονται με τις εσωτερικές τριβές του συστήματος και επηρεάζουν την εξέλιξη των ταχυτήτων (u, v, r) σε κάθε χρονική στιγμή.

Η κυκλική τροχιά που παρατηρείται μπορεί να εξηγηθεί μέσω της ισορροπίας αυτών των δυνάμεων και ροπών. Η γωνιακή ταχύτητα (r) παραμένει σχεδόν σταθερή κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, προκαλώντας συνεχή περιστροφή γύρω από το κέντρο της τροχιάς, ενώ οι γραμμικές ταχύτητες (u, v) παραμένουν σταθερές και συνδυάζονται για να σχηματίσουν έναν κύκλο στο επίπεδο x, y .

3. Σχέση με Πραγματικές Εφαρμογές:

Η κυκλική κίνηση του σκάφους έχει πρακτικές εφαρμογές στην πλοήγηση και την καθοδήγηση μη επανδρωμένων θαλάσσιων οχημάτων. Κάποιες κοινές εφαρμογές περιλαμβάνουν:

- **Περιπολίες σε περιοχές με ελεγχόμενη κατεύθυνση:** Το USV μπορεί να εκτελεί περιοδικές περιπολίες γύρω από μια περιοχή ή σημείο ενδιαφέροντος, όπως μια περιοχή με κίνδυνο μόλυνσης ή σε τοποθεσίες όπου απαιτείται συνεχής επιτήρηση.
- **Παρακολούθηση ενός στόχου ή σημείου:** Η δυνατότητα του σκάφους να κινείται σε κυκλική τροχιά γύρω από έναν συγκεκριμένο στόχο, είτε αυτός είναι άλλο σκάφος, ένα πλωτό αντικείμενο ή σημείο με ενδιαφέρον, είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για εφαρμογές παρακολούθησης.
- **Αναμονή σε σταθερή θέση:** Ειδικά σε περιβάλλοντα με έντονες καιρικές συνθήκες, το USV μπορεί να χρειάζεται να παραμείνει σε μια σταθερή θέση και να διατηρεί μια περιοδική κίνηση για να αποφύγει την επίδραση εξωτερικών διαταραχών όπως άνεμος ή θαλάσσιο ρεύμα.

Η δυνατότητα ελέγχου της κυκλικής τροχιάς μέσω προσαρμογής των δυνάμεων (u , v , r) είναι κρίσιμη για τη σταθερότητα και την αξιοπιστία του συστήματος, επιτρέποντας στο USV να προσαρμόζεται σε μεταβαλλόμενες συνθήκες και να επιτυγχάνει τη σωστή πορεία και κατεύθυνση.

4. Προτάσεις για Πειραματισμούς

Για να ενισχυθεί η κατανόηση της συμπεριφοράς του συστήματος και να βελτιωθεί η απόδοσή του, προτείνονται οι εξής πειραματισμοί:

- **Αλλαγή των εξωτερικών δυνάμεων (V_x , V_y):** Η προσθήκη εξωτερικών διαταραχών, όπως ανέμους ή ρευμάτων νερού, μπορεί να προκαλέσει διαταραχές στην τροχιά του σκάφους και να απαιτήσει την προσαρμογή των δυνάμεων και ροπών που ασκούνται πάνω του. Η αντίδραση του συστήματος σε αυτές τις διαταραχές μπορεί να προσφέρει χρήσιμες πληροφορίες για τη βελτίωση των παραμέτρων ελέγχου.
- **Αλλαγή των συντελεστών τριβής (d_1 , d_2 , d_3):** Οι συντελεστές τριβής καθορίζουν την αδράνεια και την αντίσταση του συστήματος. Η εκτέλεση προσομοιώσεων με διαφορετικούς συντελεστές τριβής μπορεί να αποκαλύψει τη συμπεριφορά του συστήματος σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως αλλαγές στην κατάσταση της θάλασσας ή την παρουσία οργανισμών που μπορεί να επηρεάζουν την τριβή του σκάφους.
- **Πειραματισμός με διαφορετικές αρχικές συνθήκες:** Η αλλαγή των αρχικών τιμών για τις ταχύτητες u , v , και τη γωνιακή ταχύτητα r μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικές τροχιές, όπως ελλειπτικές ή ευθύγραμμες. Αυτό θα επιτρέψει την ανάλυση της ευαισθησίας του συστήματος σε αρχικές παραμέτρους και την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η αρχική κατάσταση επηρεάζει τη μελλοντική πορεία του σκάφους.

5. Συμπεράσματα

Η κυκλική τροχιά του USV που καταγράφηκε στην προσομοίωση αποδεικνύει την ορθή εφαρμογή των εξισώσεων κίνησης του συστήματος και την ισορροπία των δυνάμεων που ασκούνται στο σκάφος. Η σταθερή και προβλέψιμη τροχιά καταδεικνύει ότι το μαθηματικό μοντέλο του USV, όπως έχει υλοποιηθεί στον κώδικα, είναι κατάλληλο για την περιγραφή και πρόβλεψη της δυναμικής του οχήματος κατά τη διάρκεια της πλεύσης. Η κυκλική κίνηση και η ικανότητα ελέγχου της απόστασης και της γωνίας κατεύθυνσης παρέχουν ισχυρά εργαλεία για να επιτευχθεί η σταθερή πλοήγηση του USV σε πραγματικές εφαρμογές.

Η δυνατότητα διαχείρισης και βελτιστοποίησης αυτών των δυνάμεων μέσω ενός αλγορίθμου όπως το MPC προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στην πραγματική ζωή, επιτρέποντας στα οχήματα να εκτελούν αποστολές με μεγάλη ακρίβεια και αξιοπιστία. Οι παραπάνω προτάσεις πειραματισμών προσφέρουν ευκαιρίες για περαιτέρω βελτίωση και προσαρμογή του συστήματος σε διάφορες συνθήκες και προκλήσεις, καθιστώντας το κατάλληλο για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στον τομέα των μη επανδρωμένων θαλάσσιων οχημάτων.

.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Εισαγωγή στον Έλεγχο MPC, Ανάλυση Κώδικα και Προσομοιώσεις

4.1 Θεωρητική εισαγωγή στο Model Predictive Control

4.1.α Βασικές έννοιες και πλεονεκτήματα

Το Model Predictive Control (MPC) αποτελεί μια προηγμένη και εξελιγμένη μέθοδο ελέγχου που βασίζεται σε μαθηματικά μοντέλα δυναμικών συστημάτων και αναγνωρίζει την ανάγκη για προσαρμογή και βελτιστοποίηση της λειτουργίας ενός συστήματος με βάση τις μελλοντικές του καταστάσεις. Στην καρδιά του MPC βρίσκεται η ικανότητα πρόβλεψης, η οποία επιτρέπει στο σύστημα να εκτιμήσει και να προβλέψει τις μελλοντικές καταστάσεις του σε ένα καθορισμένο χρονικό ορίζοντα. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την προσαρμογή των ενεργειών ελέγχου με στόχο τη βέλτιστη απόδοση, λαμβάνοντας υπόψη τις μεταβαλλόμενες συνθήκες που μπορεί να επηρεάσουν το σύστημα. Η πρόβλεψη των μελλοντικών καταστάσεων δίνει τη δυνατότητα στο σύστημα να αντιδράσει κατάλληλα και να αναλάβει ενέργειες που θα εξασφαλίσουν τη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων, προλαμβάνοντας ή διορθώνοντας τις αποκλίσεις πριν αυτές γίνουν κρίσιμες.

Ένα βασικό πλεονέκτημα του MPC είναι η ικανότητά του να διαχειρίζεται περιορισμούς. Αυτοί οι περιορισμοί μπορούν να αφορούν τόσο τα όρια των εισόδων όσο και των καταστάσεων του συστήματος, εξασφαλίζοντας ότι το σύστημα παραμένει εντός των επιθυμητών λειτουργικών ορίων. Αυτά τα όρια μπορεί να περιλαμβάνουν φυσικούς περιορισμούς, όπως η μέγιστη ταχύτητα ενός οχήματος ή η μέγιστη θερμοκρασία μιας χημικής διαδικασίας, καθώς και κανονιστικούς περιορισμούς που συνδέονται με περιβαλλοντικές ή άλλες ρυθμίσεις. Μέσω της δυνατότητας αυτής, το MPC προλαμβάνει την υπέρβαση επικίνδυνων ή μη επιτρεπόμενων καταστάσεων, προστατεύοντας το σύστημα από βλάβες ή ζημιές, ενώ ταυτόχρονα ενισχύει τη συνολική ασφάλεια και αξιοπιστία της διαδικασίας.

Η ευελιξία του MPC είναι επίσης ένα χαρακτηριστικό που το καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμο σε μια ποικιλία εφαρμογών. Η μεθοδολογία του MPC μπορεί να προσαρμοστεί και να εφαρμοστεί σε διάφορους τύπους συστημάτων, ανεξαρτήτως κλάδου ή τεχνολογικής εφαρμογής. Από τη βιομηχανία χημικών διαδικασιών έως την αυτοκινητοβιομηχανία και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, το MPC προσφέρει λύσεις για συστήματα που απαιτούν ακριβή και βέλτιστο έλεγχο σε σύνθετα και δυναμικά περιβάλλοντα. Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά το MPC μια εξαιρετικά ισχυρή τεχνολογία, που μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως στη διαχείριση χημικών αντιδράσεων, στη βελτίωση της πλοήγησης και της ασφάλειας των αυτόνομων οχημάτων, καθώς και στην εξισορρόπηση της προσφοράς και της ζήτησης στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Τα πλεονεκτήματα του MPC είναι ποικίλα και σημαντικά. Καταρχήν, προσφέρει βελτιωμένη απόδοση σε σύγκριση με παραδοσιακές μεθόδους ελέγχου, όπως οι PID controllers, λόγω της ικανότητάς του να αντιδρά στις μεταβολές του συστήματος και να προσαρμόζεται σε νέες συνθήκες. Αυτή η δυνατότητα προσφέρει υψηλότερα επίπεδα ακρίβειας και σταθερότητας, ακόμα και σε συστήματα που υπόκεινται σε αβεβαιότητες ή εξωτερικούς θορύβους. Επιπλέον, το MPC είναι εξαιρετικά προσαρμοστικό, ανταποκρινόμενο γρήγορα σε αλλαγές που επηρεάζουν το σύστημα ή το περιβάλλον του, εξασφαλίζοντας συνεχιζόμενη βέλτιστη απόδοση χωρίς να χρειάζεται να αναδιοργανωθούν πλήρως οι στρατηγικές ελέγχου. Αυτό καθιστά το MPC ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές όπου οι συνθήκες μπορεί να αλλάξουν ξαφνικά ή να παρουσιάσουν απρόβλεπτες μεταβολές.

Η πρόληψη των αποκλίσεων είναι ακόμα ένα ισχυρό πλεονέκτημα του MPC. Η συνεχής παρακολούθηση και η δυνατότητα πρόβλεψης επιτρέπει στο σύστημα να εντοπίζει και να διορθώνει προβλήματα πριν αυτά επηρεάσουν την απόδοση του συστήματος. Αυτή η ικανότητα παρέχει υψηλότερη αξιοπιστία και σταθερότητα στη λειτουργία του συστήματος, ενώ εξασφαλίζει την αποδοτικότητα και τη μακροχρόνια βιωσιμότητα του συστήματος.

Οι εφαρμογές του MPC είναι εκτενείς και συνεχώς διευρύνονται. Στη βιομηχανία, το MPC χρησιμοποιείται για την αυτοματοποίηση των διαδικασιών και τη διαχείριση συστημάτων που απαιτούν ακριβείς ελέγχους, όπως η χημική επεξεργασία και οι συσκευασίες προϊόντων. Στην αυτοκινητοβιομηχανία, το MPC εφαρμόζεται για τη βελτίωση της πλοήγησης και της ασφάλειας των αυτόνομων οχημάτων, ενώ στη βιομηχανία ενέργειας το MPC χρησιμοποιείται για τη διαχείριση και εξισορρόπηση της παραγωγής και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, διασφαλίζοντας την αποδοτικότητα των συστημάτων και τη διατήρηση των επιθυμητών παραμέτρων λειτουργίας. Στη ρομποτική, το MPC συμβάλλει στην ακριβή κίνηση και στην αλληλεπίδραση με το περιβάλλον, προσφέροντας αυξημένη ευχέρεια και ευελιξία στους ρομποτικούς μηχανισμούς. Ο συνδυασμός αυτών των χαρακτηριστικών καθιστά το MPC μια από τις πιο σύγχρονες και αποτελεσματικές μεθόδους ελέγχου, με εφαρμογές που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών και τεχνολογικών πεδίων, αποδεικνύοντας τη χρησιμότητά του για τη διαχείριση και την κατεύθυνση σύγχρονων πολύπλοκων συστημάτων [12],[13].

4.1.8 Εφαρμογή του MPC στο Blue Boat USV

Ο ελεγκτής Model Predictive Control (MPC) για το Blue Boat USV αποτελεί έναν θεμελιώδη μηχανισμό που διασφαλίζει τη βελτίωση της πλεύσης και της σταθερότητας του σκάφους. Η εφαρμογή αυτής της προηγμένης μεθόδου ελέγχου καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική σε συστήματα όπως το Blue Boat, όπου η ακρίβεια και η προσαρμοστικότητα στις μεταβαλλόμενες εξωτερικές συνθήκες είναι κρίσιμη για την επιτυχία των αποστολών. Ο ελεγκτής βασίζεται σε ένα δυναμικό μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει τη συμπεριφορά του σκάφους, λαμβάνοντας υπόψη βασικές παραμέτρους όπως η ταχύτητα, η γωνία κατεύθυνσης και οι δυνάμεις που ασκούνται από το περιβάλλον, όπως οι άνεμοι και τα κύματα. Αυτή η ακριβής προσομοίωση της κίνησης του Blue Boat επιτρέπει στον ελεγκτή να προβλέψει με ακρίβεια τη μελλοντική πορεία του σκάφους, διασφαλίζοντας την κατάλληλη ανταπόκριση σε εξωτερικές διαταραχές.

Το MPC υπολογίζει τις ενέργειες ελέγχου με βάση τις τρέχουσες συνθήκες του σκάφους και τις προβλέψεις για το μέλλον. Η δυνατότητα πρόβλεψης είναι θεμελιώδης, καθώς επιτρέπει στον ελεγκτή να εκτιμήσει πιθανές διαταραχές από το περιβάλλον και να προσαρμόσει αναλόγως τη συμπεριφορά του σκάφους. Το σύστημα λαμβάνει υπόψη τη δυνατότητα ταχείας προσαρμογής σε εξωτερικές μεταβολές, όπως είναι οι αλλαγές στις θαλάσσιες συνθήκες ή η εμφάνιση απρόβλεπτων δυνάμεων, προσφέροντας έναν αξιόπιστο και σταθερό μηχανισμό πλοήγησης και ελέγχου. Αυτή η προσαρμοστικότητα είναι εξαιρετικά σημαντική, καθώς διατηρεί τη σταθερότητα του σκάφους ακόμη και σε δύσκολες συνθήκες, όπως ισχυροί ανέμους ή υψηλά κύματα.

Η εφαρμογή του MPC στο Blue Boat προσφέρει μια σειρά από πλεονεκτήματα. Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα είναι η υψηλή σταθερότητα του σκάφους, η οποία εξασφαλίζεται μέσω της ικανότητας του MPC να προβλέπει και να προσαρμόζεται σε μεταβαλλόμενες εξωτερικές συνθήκες. Αυτή η ικανότητα μειώνει τις πιθανότητες εμφάνισης ανεπιθύμητων καταστάσεων, όπως η ανατροπή του σκάφους ή η απώλεια πορείας, γεγονός που αποτελεί έναν από τους κύριους στόχους της εφαρμογής του MPC. Επιπλέον, ο ελεγκτής συμβάλλει στην υψηλή ακρίβεια της πλεύσης του Blue Boat, κάτι που είναι ζωτικής σημασίας για εφαρμογές όπως η υδρογραφική έρευνα και η παρακολούθηση περιβαλλοντικών παραμέτρων. Στις συγκεκριμένες εφαρμογές, η διατήρηση της επιθυμητής πορείας με μεγάλη ακρίβεια είναι καθοριστική για την αξιοπιστία και την ποιότητα των αποτελεσμάτων.

Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα του MPC είναι η ικανότητα διαχείρισης περιορισμών. Ο ελεγκτής μπορεί να ενσωματώσει περιορισμούς ασφαλείας, όπως τα όρια ταχύτητας, τις αποστάσεις από εμπόδια ή τις ανώτατες τιμές της γωνίας κίνησης. Αυτοί οι περιορισμοί προστατεύουν το σκάφος από επικίνδυνες καταστάσεις και εξασφαλίζουν ότι το Blue Boat λειτουργεί εντός ασφαλών ορίων. Η ικανότητα ενσωμάτωσης αυτών των περιορισμών καθιστά το MPC κατάλληλο για ποικίλες εφαρμογές, όπου η ασφάλεια και η ακριβής λειτουργία είναι απαραίτητες.

Η δομή του MPC προσφέρει επίσης εξαιρετική ευελιξία, επιτρέποντας στον ελεγκτή να προσαρμόζεται εύκολα σε διαφορετικές αποστολές και θαλάσσια περιβάλλοντα. Αυτή η ευελιξία είναι ιδανική για εφαρμογές στον τομέα της ρομποτικής και των θαλάσσιων ερευνών, καθώς το Blue Boat μπορεί να αντιμετωπίσει ποικίλες συνθήκες και απαιτήσεις. Είτε πρόκειται για αποστολές παρακολούθησης, αναγνώρισης ή συλλογής δεδομένων, το MPC εξασφαλίζει την αποτελεσματική και ασφαλή λειτουργία του σκάφους.

Συμπερασματικά, η εφαρμογή του Model Predictive Control στο Blue Boat USV αποτελεί έναν εξαιρετικά αποτελεσματικό μηχανισμό για τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος. Η δυνατότητα πρόβλεψης και προσαρμογής στις μεταβαλλόμενες εξωτερικές συνθήκες καθιστά τον MPC έναν από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους ελέγχου για σύγχρονα μη επανδρωμένα σκάφη. Με την ικανότητά του να εξασφαλίζει σταθερότητα, ακρίβεια και ασφάλεια, το MPC καθιστά το Blue Boat ικανό να εκτελεί απαιτητικές θαλάσσιες αποστολές με υψηλή αξιοπιστία και απόδοση, ακόμα και σε δύσκολες και μεταβαλλόμενες θαλάσσιες συνθήκες [12],[14],[15].

4.2 Επισκόπηση του κώδικα και ανάλυση υλοποίησης

Η υλοποίηση του αλγορίθμου Predictive Control (MPC) για τη βελτιστοποίηση της πλεύσης ενός Αυτόνομου Επιφανειακού Σκάφους (Unmanned Surface Vehicle - USV) αποτέλεσε ένα από τα κύρια σημεία της εργασίας αυτής. Ο αλγόριθμος MPC αναπτύχθηκε με στόχο την επίτευξη βελτιωμένης καθοδήγησης του σκάφους, διασφαλίζοντας ότι αυτό θα ακολουθεί την επιθυμητή τροχιά και θα προσαρμόζεται κατάλληλα σε οποιεσδήποτε εξωτερικές διαταραχές ή μεταβαλλόμενες συνθήκες. Η διαδικασία υλοποίησης του αλγορίθμου μπορεί να αναλυθεί σε πέντε βασικά στάδια: καθορισμός της δυναμικής του συστήματος, ενσωμάτωση του MPC, ρύθμιση και βελτιστοποίηση των παραμέτρων, προσομοίωση και ανάλυση των αποτελεσμάτων και τελικά οπτικοποίηση των δεδομένων.

1.Καθορισμός Δυναμικής του Συστήματος

Η πρώτη φάση της υλοποίησης περιλάμβανε τον καθορισμό της δυναμικής του σκάφους και τη διαμόρφωση των εξισώσεων κίνησης. Η ακριβής αναπαράσταση της φυσικής συμπεριφοράς του σκάφους ήταν καθοριστική για τη σωστή εφαρμογή του MPC, καθώς το σύστημα χρειάζεται ένα αξιόπιστο μοντέλο για να προβλέψει την κίνηση του σκάφους και να λάβει τις κατάλληλες αποφάσεις ελέγχου. Οι βασικές μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της δυναμικής του σκάφους περιλαμβάνουν:

- **Θέση και Προσανατολισμός:** Οι μεταβλητές x , y και ψ αναφέρονται στην καρτεσιανή θέση του σκάφους (x , y) και στη γωνία κατεύθυνσης (ψ).
- **Ταχύτητες και Ρυθμοί Περιστροφής:** Οι μεταβλητές u , v και r περιγράφουν τις γραμμικές ταχύτητες (u και v) του σκάφους στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα, καθώς και τη γωνιακή ταχύτητα (r), η οποία υποδεικνύει την περιστροφή του σκάφους γύρω από τον κατακόρυφο άξονα.
- **Εξωτερικές Επιρροές:** Το μοντέλο ενσωματώνει εξωτερικές επιρροές από το περιβάλλον, όπως είναι οι ταχύτητες του ανέμου ή των κυμάτων (V_x , V_y), οι οποίες επηρεάζουν τις κινήσεις του σκάφους κατά τη διάρκεια της πλεύσης.

Αυτές οι εξισώσεις κίνησης ενσωματώθηκαν σε μία κλάση Python με την ονομασία `Vehicle`, η οποία αναπαριστά το σκάφος ως δυναμικό σύστημα και υπολογίζει τις νέες καταστάσεις του σε κάθε χρονικό βήμα, βάσει των εφαρμοζόμενων δυνάμεων και ροπών.

2. Ενσωμάτωση του Predictive Controller (MPC)

Η δεύτερη φάση της υλοποίησης αφορούσε την ενσωμάτωση του αλγορίθμου MPC. Η βιβλιοθήκη **do-mpc**, η οποία παρέχει εργαλεία για την ανάπτυξη και επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης με βάση το MPC, χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή του αλγορίθμου.

- **Μεταβλητές Κατάστασης:** Ορίστηκαν οι μεταβλητές x , y , ψ , u , v , r ως τις βασικές καταστάσεις του συστήματος, οι οποίες αναπαριστούν την τρέχουσα θέση και ταχύτητα του σκάφους.
- **Μεταβλητές Ελέγχου:** Ορίστηκαν οι δυνάμεις και ροπές ως τις είσοδοι ελέγχου. Οι μεταβλητές u , v και r αντιστοιχούν στις γραμμικές δυνάμεις κατά μήκος των αξόνων x και y , καθώς και στη ροπή γύρω από τον κατακόρυφο άξονα.

Το μοντέλο του MPC σχεδιάστηκε με βάση τις εξισώσεις κίνησης του σκάφους, ώστε να μπορεί ο αλγόριθμος να προβλέπει τις μελλοντικές καταστάσεις του σκάφους, βασιζόμενος στην τρέχουσα κατάσταση και στις εφαρμοζόμενες δυνάμεις. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης σε κάθε χρονικό βήμα, όπου ο στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί μία συνάρτηση κόστους.

Η συνάρτηση κόστους που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο MPC αποσκοπεί στη μείωση:

- Της απόστασης του σκάφους από την επιθυμητή θέση.
- Της διαφοράς της γωνίας κατεύθυνσης από την επιθυμητή κατεύθυνση.
- Του κόστους εφαρμογής των δυνάμεων και των ροπών, εξασφαλίζοντας ότι οι δυνάμεις που ασκούνται στο σκάφος παραμένουν εντός φυσικών ορίων και ότι η κατανάλωση ενέργειας διατηρείται σε ελάχιστο επίπεδο.

3. Ρύθμιση και Βελτιστοποίηση

Στην τρίτη φάση, οι παράμετροι του MPC ρυθμίστηκαν ώστε να καλύψουν τις ανάγκες του συστήματος. Η ρύθμιση αυτών των παραμέτρων είναι κρίσιμη για την επίτευξη της καλύτερης δυνατής απόδοσης του αλγορίθμου και τη διασφάλιση της ευστάθειας του σκάφους κατά τη διάρκεια της πλεύσης. Οι κύριοι παράμετροι που ρυθμίστηκαν περιλαμβάνουν:

- **Χρονικός Ορίζοντας Πρόβλεψης:** Ορίστηκε στις 80 χρονικές μονάδες, επιτρέποντας στον αλγόριθμο να προβλέψει τη μελλοντική πορεία του σκάφους και να πάρει αποφάσεις ελέγχου για το επόμενο διάστημα.
- **Όρια Δυνάμεων και Ροπών:** Ορίστηκαν ανώτερα και κατώτερα όρια για τις δυνάμεις και τις ροπές, προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι οι κινήσεις του σκάφους θα παραμείνουν εντός φυσικών περιορισμών, αποφεύγοντας την υπερβολική επιτάχυνση ή τις επικίνδυνες κινήσεις.
- **Ρυθμίσεις για Βελτίωση Ευστάθειας και Ακρίβειας:** Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν ρυθμίσεις στις παραμέτρους του αλγορίθμου για την ενίσχυση της ευστάθειας του σκάφους και την αύξηση της ακρίβειας στην προσέγγιση του στόχου.

4.Προσομοίωση και Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Η προσομοίωση του σκάφους ήταν το επόμενο στάδιο. Δημιουργήθηκε ένας βρόχος προσομοίωσης, στον οποίο ο αλγόριθμος MPC επαναλαμβάνει τις αποφάσεις ελέγχου σε κάθε χρονικό βήμα, υπολογίζοντας τις βέλτιστες δυνάμεις και ροπές που θα εφαρμοστούν στο σκάφος για την επίτευξη της επιθυμητής πορείας.

Σε κάθε βήμα, οι δυναμικές εξισώσεις χρησιμοποιούνται για να ενημερώσουν την τρέχουσα κατάσταση του σκάφους, και με βάση αυτή την κατάσταση, ο αλγόριθμος υπολογίζει τις δυνάμεις και τις ροπές που πρέπει να εφαρμοστούν. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης περιλαμβάνουν :

- Την τροχιά του σκάφους σε σχέση με την επιθυμητή θέση, που εμφανίζεται σε διαγράμματα.
- Την απόσταση από τον στόχο και τη γωνία κατεύθυνσης σε κάθε χρονικό βήμα.
- Τις εφαρμοζόμενες δυνάμεις και ροπές για κάθε χρονική στιγμή.

5.Οπτικοποίηση

Η τελική φάση της υλοποίησης περιλάμβανε την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, η οποία επιτρέπει την αναλυτική παρουσίαση της απόδοσης του αλγορίθμου. Δημιουργήθηκαν διαγράμματα που απεικονίζουν την τροχιά του σκάφους σε σχέση με την επιθυμητή θέση. Η σύγκριση της πραγματικής τροχιάς με την επιθυμητή αναδεικνύει τη βελτιστοποίηση που προσφέρει ο αλγόριθμος MPC στην καθοδήγηση του σκάφους, ενώ ταυτόχρονα παρέχει χρήσιμα δεδομένα για την αξιολόγηση της ακρίβειας και της αποτελεσματικότητας του συστήματος ελέγχου.

Η οπτικοποίηση της πορείας, της απόστασης από τον στόχο και των εφαρμοζόμενων δυνάμεων επιτρέπει την πλήρη κατανόηση της λειτουργίας του αλγορίθμου και προσφέρει σημαντικά συμπεράσματα για την περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης του MPC στην καθοδήγηση του σκάφους.

6.Υλοποίηση σε Python

Ακολουθεί ο κώδικας που αναπτύχθηκε για την προσομοίωση και βελτιστοποίηση του ελέγχου του Αυτόνομου Επιφανειακού Σκάφους (USV):

```

1  #!/usr/bin/env python
2  import numpy as np
3  import do_mpc
4  import matplotlib.pyplot as plt
5
6  # Ορισμός της κλάσης Vehicle για την προσομοίωση της δυναμικής του οχήματος.
7  class Vehicle:
8      def __init__(self, x=0.0, y=0.0, psi=0.0, u=0.0, v=0.0, r=0.0, Vx=0.0, Vy=0.0, tau_u=0.0, tau_v=0.0, tau_r=0.0):
9          # Αρχικοποίηση της κατάστασης του οχήματος.
10         self.state = np.array([x, y, psi, u, v, r])
11         # Μειωμένοι συντελεστές τριβής
12         self.X_u = 10.0
13         self.Y_v = 10.0
14         self.N_r = 10.0
15         # Μάζα και συντελεστές απόσβεσης
16         self.m1 = 14.5
17         self.m2 = 15.0
18         self.m3 = 5.0
19         self.d1 = 5.0 # Παράδειγμα τιμής
20         self.d2 = 2.0 # Παράδειγμα τιμής
21         self.d3 = 0.5 # Παράδειγμα τιμής
22         # Εξωτερικές επιδράσεις (ρεύματα, άνεμος κλπ)
23         self.Vx = Vx
24         self.Vy = Vy
25         self.tau_u = tau_u
26         self.tau_v = tau_v
27         self.tau_r = tau_r
28         print("Ξεκινάει η εκτέλεση του script")
29
30     # Μέθοδος για τον υπολογισμό της δυναμικής του συστήματος
31     def dynamics(self, t, state):
32         x, y, psi, u, v, r = state
33         # Υπολογισμός των παραγώγων των μεταβλητών κατάστασης
34         dxdt = u * np.cos(psi) - v * np.sin(psi) + self.Vx
35         dydt = u * np.sin(psi) + v * np.cos(psi) + self.Vy
36         dpsidt = r
37         du_dt = self.Fu(u, v, r) + self.tau_u
38         dv_dt = self.Fv(u, v, r) + self.tau_v
39         dr_dt = self.Fr(u, v, r) + self.tau_r
40         # Εκτύπωση της τρέχουσας κατάστασης για παρακολούθηση
41         print(f"t={t:.2f}, x={x:.2f}, y={y:.2f}, psi={psi:.2f}, u={u:.2f}, v={v:.2f}, r={r:.2f}")
42         return np.array([dxdt, dydt, dpsidt, du_dt, dv_dt, dr_dt])
43
44     # Ορισμός των δυνάμεων και της ροπής σύμφωνα με τη δυναμική του συστήματος
45     def Fu(self, u, v, r):
46         return r * v * (self.m2 / self.m1) - u * (self.d1 / self.m1)
47     def Fv(self, u, v, r):
48         return -u * (self.m1 / self.m2) - v * (self.d2 / self.m2)
49     def Fr(self, u, v, r):
50         return -r * (self.d3 / self.m3) + v * u * ((self.m2 - self.m1) / self.m3)
51
52     # Συνάρτηση για τη ρύθμιση του MPC με χρήση δυνάμεων και ροπών
53     def setup_mpc_with_forces(Vehicle):
54         """
55         Ρύθμιση του μοντέλου MPC χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη do-mpc και δυνάμεις/ροπές ως εισόδους ελέγχου.
56         """
57         model_type = 'continuous'
58         model = do_mpc.model.Model(model_type)
59         # Ορισμός μεταβλητών κατάστασης
60         x = model.set_variable(var_type='_x', var_name='x', shape=(1, 1))
61         y = model.set_variable(var_type='_x', var_name='y', shape=(1, 1))
62         psi = model.set_variable(var_type='_x', var_name='psi', shape=(1, 1))
63         u = model.set_variable(var_type='_x', var_name='u', shape=(1, 1))
64         v = model.set_variable(var_type='_x', var_name='v', shape=(1, 1))
65         r = model.set_variable(var_type='_x', var_name='r', shape=(1, 1))
66         # Ορισμός ελέγχων (δυνάμεις και ροπές)
67         tau_u = model.set_variable(var_type='_u', var_name='tau_u', shape=(1, 1))
68         tau_v = model.set_variable(var_type='_u', var_name='tau_v', shape=(1, 1))
69         tau_r = model.set_variable(var_type='_u', var_name='tau_r', shape=(1, 1))

```

```

70 # Δυναμική οχήματος με βάση τις δυνάμεις και τις ροπές
71 m1, m2, m3 = Vehicle.m1, Vehicle.m2, Vehicle.m3
72 d1, d2, d3 = Vehicle.d1, Vehicle.d2, Vehicle.d3
73 dxdt = u * np.cos(psi) - v * np.sin(psi) + vehicle.Vx
74 dydt = u * np.sin(psi) + v * np.cos(psi) + vehicle.Vy
75 dpsidt = r
76 dudt = Vehicle.Fu(u, v, r) + tau_u
77 dvdt = Vehicle.Fv(u, v, r) + tau_v
78 drdt = Vehicle.Fr(u, v, r) + tau_r
79 # Ορισμός εξισώσεων δυναμικής στο μοντέλο
80 model.set_rhs('x', dxdt)
81 model.set_rhs('y', dydt)
82 model.set_rhs('psi', dpsidt)
83 model.set_rhs('u', dudt)
84 model.set_rhs('v', dvdt)
85 model.set_rhs('r', drdt)
86 model.setup()
87 return model
88
89 if __name__ == "__main__":
90     # Αρχικοποίηση του οχήματος με αρχικές συνθήκες
91     vehicle = Vehicle(x=0.0, y=0.0, psi=0.0, u=0.0, v=0.0, r=0.0, Vx=0.25, Vy=0.25, tau_u=0.0, tau_v=0.0, tau_r=0.0)
92     # Ρυθμίσεις MPC
93     setup_mpc_params = {
94         'n_horizon': 80,
95         't_step': 0.05,
96         'state_discretization': 'collocation',
97         'collocation_type': 'radau',
98         'collocation_deg': 2,
99         'open_loop': 0,
100     }
101     # Δημιουργία μοντέλου και ελεγκτή MPC
102     mpc_model = setup_mpc_with_forces(vehicle)
103     mpc_controller = do_mpc.controller.MPC(mpc_model)
104     mpc_controller.set_param(**setup_mpc_params)
105     # Περιορισμοί εισόδων ελέγχου
106     mpc_controller.bounds['lower', '_u', 'tau_u'] = -10.0
107     mpc_controller.bounds['upper', '_u', 'tau_u'] = 10.0
108     mpc_controller.bounds['lower', '_u', 'tau_v'] = -10.0
109     mpc_controller.bounds['upper', '_u', 'tau_v'] = 10.0
110     mpc_controller.bounds['lower', '_u', 'tau_r'] = -5.0
111     mpc_controller.bounds['upper', '_u', 'tau_r'] = 5.0
112     # Ορισμός στόχων
113     x_target, y_target = 100.0, 20.0
114     x_real, y_real, psi_real = vehicle.state[0], vehicle.state[1], vehicle.state[2]
115     desired_psi = np.arctan2(y_target - y_real, x_target - x_real)
116     print(f"Initial position: x={x_real}, y={y_real}, psi={psi_real}")
117     print(f"Desired psi (angle): {desired_psi}")
118     # Ορισμός της συνάρτησης κόστους
119     x_sx = mpc_model._x['x']
120     y_sx = mpc_model._x['y']
121     psi_sx = mpc_model._x['psi']
122     tau_u_sx = mpc_model._u['tau_u']
123     tau_v_sx = mpc_model._u['tau_v']
124     tau_r_sx = mpc_model._u['tau_r']
125     mterm = 100 * ((x_sx - x_target)**2 + (y_sx - y_target)**2) + 20 * (psi_sx - desired_psi)**2
126     lterm = mterm + 0.05 * (tau_u_sx**2 + tau_v_sx**2 + tau_r_sx**2)
127     mpc_controller.set_objective(mterm=mterm, lterm=lterm)
128     mpc_controller.set_rterm(tau_u=0.1, tau_v=0.1, tau_r=0.1)
129     mpc_controller.setup()
130     print("MPC setup completed.")
131     # Προσομοίωση
132     n_steps = 250
133     x_history, y_history = [], []
134     current_state = vehicle.state.copy()
135
136     for i in range(n_steps):
137         mpc_controller.x0 = current_state.reshape(-1, 1)
138         control_inputs = mpc_controller.make_step(current_state)
139         tau_u, tau_v, tau_r = control_inputs[0, 0], control_inputs[1, 0], control_inputs[2, 0]
140         vehicle.tau_u, vehicle.tau_v, vehicle.tau_r = tau_u, tau_v, tau_r
141         # Ενημέρωση κατάστασης μέσω ολοκλήρωσης Euler
142         dynamics = vehicle.dynamics(0, current_state)
143         current_state += dynamics * setup_mpc_params['t_step']
144         # Καταγραφή της πορείας
145         x_history.append(current_state[0])
146         y_history.append(current_state[1])
147         distance_to_target = np.sqrt((current_state[0] - x_target)**2 + (current_state[1] - y_target)**2)
148         print(f"Step {i}: Distance to target = {distance_to_target}, Desired psi = {desired_psi}")
149
150     # Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων
151     plt.figure(figsize=(12, 8))
152     plt.plot(x_history, y_history, label='Trajectory')
153     plt.scatter(x_target, y_target, color='red', label='Target', zorder=5)
154     plt.title('Vehicle Trajectory with Forces and Torques')
155     plt.xlabel('X Position')
156     plt.ylabel('Y Position')
157     plt.grid()
158     plt.legend()
159     plt.axis('equal')
160     plt.show()

```

4.3 Ερμηνεία των γραφημάτων

Το διάγραμμα που παρουσιάζει την τροχιά του αυτόνομου επιφανειακού σκάφους (USV) σε ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, παρέχει σημαντικές πληροφορίες για την αξιολόγηση της απόδοσης του αλγορίθμου Model Predictive Control (MPC) στην καθοδήγηση του σκάφους. Η ανάλυση της τροχιάς, καθώς και η θέση του στόχου, επιτρέπει να εξάγουμε συμπεράσματα σχετικά με την ακρίβεια και την ευστάθεια του ελέγχου, καθώς και τη συμπεριφορά του σκάφους κατά τη διάρκεια της πλεύσης. Οι βασικές παρατηρήσεις και τα ευρήματα που προκύπτουν από την ανάλυση του διαγράμματος είναι τα εξής:

Η τροχιά του σκάφους αποδεικνύει την ικανότητα του συστήματος να ακολουθεί με ακρίβεια την επιθυμητή πορεία από την αρχική του θέση προς τον στόχο. Η καμπύλη που απεικονίζεται στο διάγραμμα δείχνει την ομαλή προσαρμογή του σκάφους, με τη θέση του να συγκλίνει σταθερά προς την επιθυμητή θέση του στόχου. Η σταδιακή μείωση των αποκλίσεων κατά την πορεία αποδεικνύει τη δυνατότητα του MPC να λαμβάνει συνεχώς προσαρμοσμένες αποφάσεις ελέγχου, διασφαλίζοντας την ομαλή και ασφαλή πλεύση του σκάφους. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η τροχιά δεν παρουσιάζει ξαφνικές μεταβολές ή αποκλίσεις από τη βέλτιστη πορεία, γεγονός που υποδεικνύει την αποτελεσματικότητα του MPC στην επίτευξη της στόχευσης.

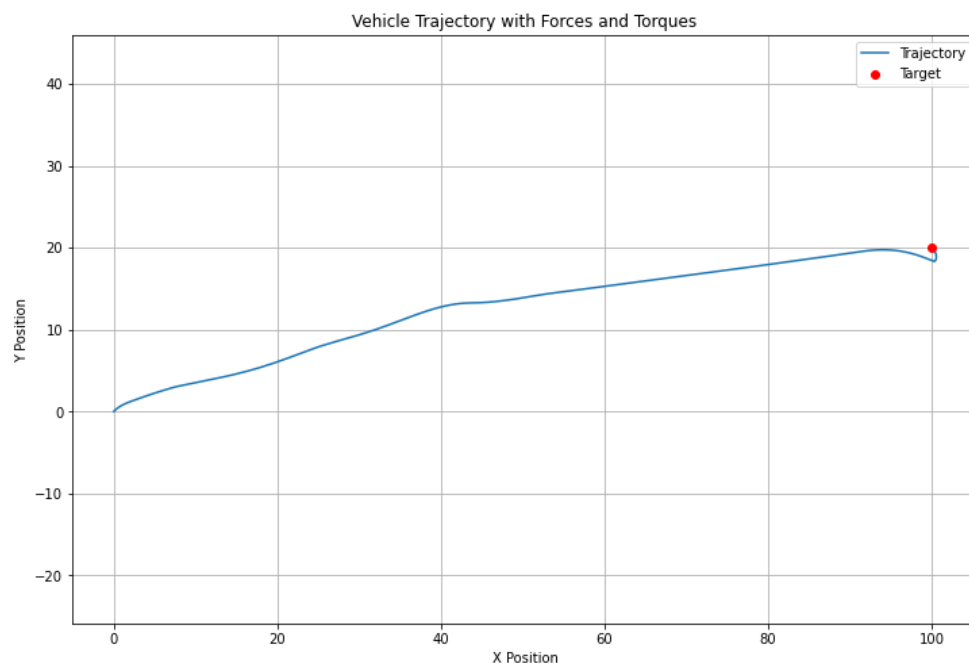
Η θέση του στόχου, η οποία είναι επισημασμένη με κόκκινο χρώμα στο διάγραμμα, αναδεικνύει την επιτυχία του αλγορίθμου στην επίτευξη υψηλής ακρίβειας κατά την προσέγγιση του στόχου. Στην περίπτωση αυτή, το σκάφος καταφέρνει να πλησιάσει την επιθυμητή θέση με εξαιρετική ακρίβεια, χωρίς να παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις από την πορεία. Αυτή η ακριβής προσέγγιση του στόχου υπογραμμίζει τη δύναμη του MPC στην πρόβλεψη των απαιτούμενων ενεργειών ελέγχου, προκειμένου να εξασφαλίσει την αποδοτική πλοήγηση του σκάφους σε πραγματικό χρόνο, ακόμα και όταν το σύστημα αντιμετωπίζει εξωτερικές διαταραχές ή περιορισμούς.

Ένα άλλο ενδιαφέρον στοιχείο που προκύπτει από την ανάλυση της τροχιάς είναι η ικανότητα του MPC να χειρίζεται στροφές και αλλαγές πορείας χωρίς απότομες κινήσεις. Η τροχιά παρουσιάζει ομαλές καμπύλες, οι οποίες υποδηλώνουν ότι το σύστημα ελέγχου είναι σε θέση να προσαρμόζει τη διαδρομή του σκάφους χωρίς να δημιουργεί απότομες επιταχύνσεις ή κινήσεις. Η διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ γραμμικής και περιστροφικής κίνησης του σκάφους είναι κρίσιμη για την αποφυγή ξαφνικών αποκλίσεων από την επιθυμητή πορεία. Η ικανότητα αυτή να πραγματοποιούνται ομαλές αλλαγές πορείας συμβάλλει στη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος, μειώνοντας τις πιθανότητες αστάθειας και επιτρέποντας την αποδοτικότερη διαχείριση των εξωτερικών συνθηκών.

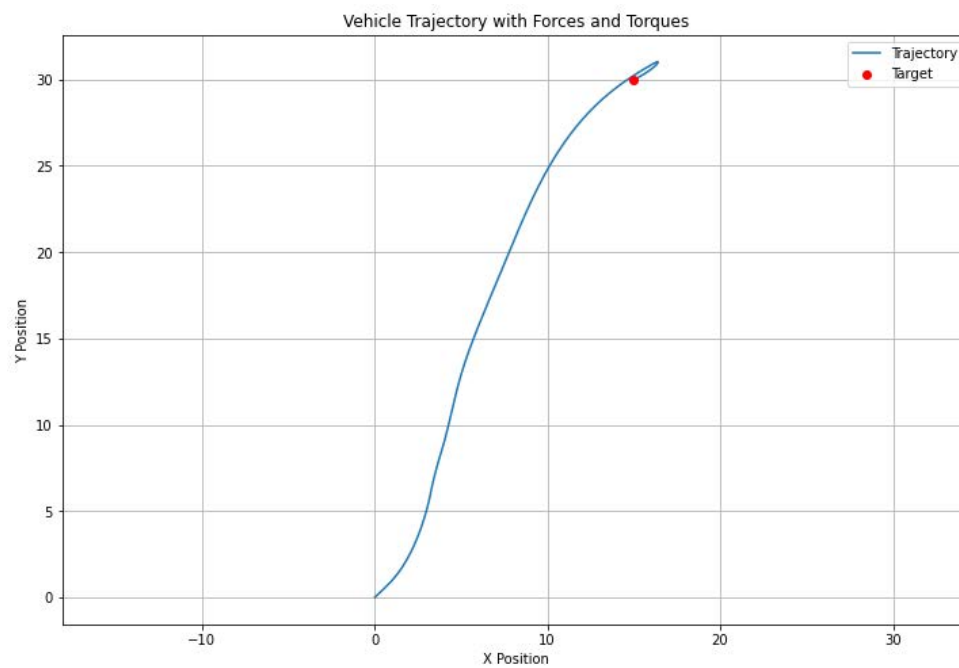
Από την άλλη πλευρά, η επίδραση των εφαρμοζόμενων δυνάμεων και ροπών αντικατοπτρίζεται στην ομαλότητα της κίνησης του σκάφους. Το MPC διαχειρίζεται τις δυνάμεις που ασκούνται στο σκάφος με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρεί την κίνησή του εντός του φυσικού περιορισμού του, μειώνοντας τις δυνάμεις που απαιτούνται για την κίνηση. Η κατανομή των δυνάμεων επιτρέπει στο σκάφος να ακολουθεί την τροχιά του με βέλτιστο τρόπο, ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζεται η ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος. Οι ρόποι εφαρμογής δυνάμεων και ροπών κατά τη διάρκεια της πλεύσης αντικατοπτρίζουν την ικανότητα του MPC να προσαρμόζει το σκάφος στις διάφορες δυναμικές καταστάσεις, μεγιστοποιώντας την απόδοση του ελέγχου.

Η γενική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από το διάγραμμα δείχνει ότι το σύστημα είναι καλά ρυθμισμένο και αποτελεσματικό, καθώς οι αποκλίσεις από την επιθυμητή τροχιά είναι ελάχιστες και εξαλείφονται γρήγορα. Η ικανότητα του MPC να προσαρμόζεται σε πραγματικό χρόνο και να διατηρεί το σκάφος κοντά στην επιθυμητή πορεία, παρά τις διαταραχές ή τις περιοριστικές συνθήκες, αποδεικνύει την υψηλή του απόδοση. Ειδικότερα, η αποδοτική χρήση των δυνάμεων για την καθοδήγηση του σκάφους μειώνει την κατανάλωση ενέργειας, διατηρώντας την πλεύση οικονομική και αποδοτική.

Συνολικά, τα ευρήματα από το διάγραμμα και οι παρατηρήσεις σχετικά με την τροχιά του σκάφους καταδεικνύουν την ισχυρή απόδοση του αλγορίθμου MPC στην καθοδήγηση του Blue Boat. Το σύστημα ελέγχου παρέχει σταθερή και ακριβή πλοήγηση του σκάφους, επιδεικνύοντας την ικανότητα του να χειρίζεται πολύπλοκες καταστάσεις και να προσαρμόζεται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του περιβάλλοντος. Τα αποτελέσματα αυτά ενισχύουν την αξιοπιστία και την αποδοτικότητα του MPC ως εργαλείου για τη βελτίωση της πλεύσης και της καθοδήγησης των μη επανδρωμένων θαλάσσιων οχημάτων, προσφέροντας μία ισχυρή βάση για την εφαρμογή του σε μελλοντικές θαλάσσιες αποστολές.



Εικόνα 2: $x_{\text{target}}=100.0$ $y_{\text{target}}=20.0$



Εικόνα 3: $x_{\text{target}}=15.0$ $y_{\text{target}}=30.0$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία εστιάζει στη μοντελοποίηση, προσομοίωση και βελτιστοποίηση της πλεύσης του Blue Boat, ενός μη επανδρωμένου θαλάσσιου οχήματος (USV). Στο πλαίσιο αυτής της μελέτης, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος Model Predictive Control (MPC) για την αναβάθμιση της λειτουργικότητας του σκάφους και τη βελτίωση της ακρίβειας της πλεύσης του. Στόχος ήταν να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα του MPC στην αντιμετώπιση των προκλήσεων που σχετίζονται με τις θαλάσσιες συνθήκες και τις δυναμικές του συστήματος, προκειμένου να επιτευχθεί μια σταθερή και ακριβής πορεία πλεύσης για το Blue Boat.

Η εφαρμογή του αλγορίθμου MPC έδειξε σημαντικά οφέλη, τόσο σε επίπεδο απόδοσης όσο και σε επίπεδο ασφάλειας. Η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων από τη λειτουργία του Blue Boat χωρίς και με την εφαρμογή του MPC ανέδειξε τη σημαντική βελτίωση στην ακρίβεια της πλεύσης. Με τον αλγόριθμο MPC, το σκάφος ήταν σε θέση να ακολουθήσει την επιθυμητή πορεία με υψηλότερη ακρίβεια, ενώ ταυτόχρονα διατηρούσε την πλεύση του ομαλή και σταθερή ακόμα και υπό δύσκολες συνθήκες. Η ικανότητα του MPC να προσαρμόζεται σε μεταβαλλόμενες εξωτερικές συνθήκες και να διαχειρίζεται περιορισμούς, όπως η αντοχή του σκάφους και οι φυσικές δυνάμεις του περιβάλλοντος, αποτέλεσε καθοριστικό παράγοντα για την επιτυχία του έργου.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αποκάλυψαν ότι ο αλγόριθμος MPC ήταν σε θέση να διαχειριστεί τις φυσικές δυνάμεις και τις εξωτερικές διαταραχές που προκύπτουν κατά τη διάρκεια της πλεύσης. Στην περίπτωση του Blue Boat, η ανάλυση των τροχιών του σκάφους και των εφαρμοζόμενων δυνάμεων αποκάλυψε την ικανότητα του MPC να μειώνει τις αποκλίσεις στην πορεία και να εξισορροπεί τις απαιτήσεις κίνησης και σταθερότητας του σκάφους. Αυτή η ικανότητα προσαρμογής στις συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες του θαλάσσιου περιβάλλοντος είναι κρίσιμη για την επιτυχία των μελλοντικών αποστολών του Blue Boat, οι οποίες περιλαμβάνουν υδρογραφικές έρευνες και παρακολούθηση περιβαλλοντικών παραμέτρων σε θαλάσσια οικοσυστήματα.

Ωστόσο, παρά τα θετικά αποτελέσματα, η εργασία αναγνώρισε ορισμένους περιορισμούς που σχετίζονται με την εφαρμογή του MPC. Ο πρώτος περιορισμός αφορά την απλοποίηση του μαθηματικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση. Αυτή η απλοποίηση μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια των προβλέψεων, ιδιαίτερα όταν τα σωματικά μοντέλα που περιγράφουν τη δυναμική του σκάφους δεν περιλαμβάνουν όλες τις δυναμικές παραμέτρους. Η ενσωμάτωση πιο σύνθετων μοντέλων που θα λαμβάνουν υπόψη μη γραμμικές δυναμικές και άλλες παραμέτρους, όπως οι αλληλεπιδράσεις του σκάφους με το νερό, μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος.

Ένας δεύτερος περιορισμός είναι η μη ενσωμάτωση σύνθετων εξωτερικών παραγόντων, όπως ο κυματισμός και ο άνεμος, οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την κίνηση του σκάφους σε πραγματικές συνθήκες. Στην παρούσα εργασία, η απουσία αυτών των παραμέτρων περιορίζει την ικανότητα του μοντέλου να ανταγωνίζεται σε συνθήκες πραγματικής θάλασσας. Η μελλοντική έρευνα μπορεί να εξετάσει την επίδραση αυτών των παραμέτρων στην πλεύση του σκάφους, αναπτύσσοντας πιο προηγμένα μοντέλα που θα ενσωματώνουν τη δυναμική των εξωτερικών συνθηκών, βελτιώνοντας έτσι την ακρίβεια και την προσαρμοστικότητα του MPC.

Μία άλλη σημαντική πτυχή που αναδείχθηκε είναι η ανάγκη για δοκιμές σε πραγματικές συνθήκες. Παρά την επιτυχία της προσομοίωσης, η επικύρωση των αποτελεσμάτων απαιτεί την πραγματοποίηση δοκιμών σε διάφορες θαλάσσιες συνθήκες, προκειμένου να εξεταστεί η συμπεριφορά του σκάφους και να αναγνωριστούν τυχόν αποκλίσεις που ενδέχεται να μην εμφανίζονται στην προσομοίωση. Οι συνθήκες θάλασσας, η κίνηση του νερού και οι περιβαλλοντικοί παράγοντες ενδέχεται να επηρεάσουν τη συμπεριφορά του σκάφους με τρόπους που δεν μπορούν να προβλεφθούν μόνο μέσω της προσομοίωσης.

Η μελλοντική κατεύθυνση της έρευνας στον τομέα αυτόν περιλαμβάνει την ενσωμάτωση πιο πολύπλοκων μαθηματικών μοντέλων, τα οποία θα λαμβάνουν υπόψη μη γραμμικές δυναμικές και σύνθετους εξωτερικούς παράγοντες. Επιπλέον, η χρήση προηγμένων αισθητήρων και η διαχείριση πολυμεταβλητών συστημάτων ενδέχεται να βελτιώσουν την απόδοση του MPC. Ειδικότερα, η εφαρμογή του MPC σε συστήματα με περισσότερους βαθμούς ελευθερίας ή σε πολυμεταβλητές παραμέτρους, όπως οι σχέσεις μεταξύ διαφόρων εξωτερικών παραμέτρων (άνεμος, κύματα, και θερμοκρασία), θα επιτρέψει μια πιο πλήρη και ρεαλιστική προσέγγιση για την αυτόνομη πλοήγηση.

Η έρευνα που διεξήχθη και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη χρήση του MPC για το Blue Boat ανοίγουν νέους δρόμους για την ανάπτυξη πιο αποδοτικών και ευέλικτων συστημάτων αυτόνομης πλοήγησης σε θαλάσσια περιβάλλοντα. Ο αλγόριθμος MPC προσφέρει τη δυνατότητα να αντιμετωπιστούν οι προκλήσεις των θαλάσσιων συνθηκών με μεγαλύτερη ακρίβεια και προσαρμοστικότητα, καθιστώντας τον ιδανικό για μελλοντικές εφαρμογές στον τομέα της ρομποτικής και των μη επανδρωμένων θαλάσσιων οχημάτων. Οι μελλοντικές εξελίξεις στον τομέα αυτό αναμένονται να ενισχύσουν περαιτέρω τη λειτουργικότητα και την αξιοπιστία των USVs, καθιστώντας τα πιο ικανά για απαιτητικές αποστολές στον θαλάσσιο χώρο.

Η παρούσα εργασία ανέπτυξε μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για τη μοντελοποίηση και προσομοίωση ενός μη επανδρωμένου θαλάσσιου οχήματος (USV), εστιάζοντας τόσο στην κινηματική όσο και στη δυναμική ανάλυση του συστήματος. Η ανάπτυξη του κινηματικού μοντέλου επέτρεψε την κατανόηση των βασικών σχέσεων μεταξύ ταχυτήτων και γωνιακών ταχυτήτων, ενώ το δυναμικό μοντέλο παρείχε βαθύτερη εικόνα των δυνάμεων και ροπών που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του σκάφους. Η εφαρμογή του αλγορίθμου MPC και η προσομοίωση των μοντέλων σε εξειδικευμένο λογισμικό επιβεβαίωσε την ακρίβεια των θεωρητικών προβλέψεων και ανέδειξε τη σημασία των περιβαλλοντικών παραγόντων στην πλοήγηση του USV. Η συνδυαστική αυτή προσέγγιση, μαζί με τη βελτιστοποίηση μέσω του MPC, παρέχει ένα στέρεο θεωρητικό και πρακτικό πλαίσιο για την περαιτέρω ανάπτυξη και βελτιστοποίηση συστημάτων αυτόνομης θαλάσσιας πλοήγησης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] <https://csmi.com/what-is-an-unmanned-surface-vehicle/>
- [2] <https://www.embention.com/en/news/usv-unmanned-surface-vehicle-applications-and-advantages/>
- [3] <https://as-proceeding.com/index.php/icaens/article/view/1064>
- [4] <https://www.linkedin.com/pulse/unmanned-surface-vehicles-revolutionizing-maritime-athanassios-hon1f>
- [5] <https://www.metricea.gr/hardware/otter-unmanned-surface-vehicle/>
- [6] https://www.researchgate.net/publication/380465192_The_Importance_of_an_Unmanned_Surface_Vehicle_A_Point_of_View
- [7] <https://bluerobotics.com/store/boat/blueboat/blueboat/>
- [8] <https://www.carcinus.co.uk/product/blueboat-blue-robotics-unmanned-surface-vessel-usv/>
- [9] https://www.researchgate.net/publication/356960673_Control_oriented_modeling_of_a_twin_thruster_autonomous_surface_vehicle
- [10] <https://vtechworks.lib.vt.edu/items/74de26f5-8e8d-4f13-9e4c-f94c4b70a7e0>
- [11] https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.integrate.solve_ivp.html
- [12] https://en.wikipedia.org/wiki/Model_predictive_control
- [13] <https://www.youtube.com/watch?v=YwodGM2eoy4>
- [14] <https://www.mathworks.com/help/mpc/gs/what-is-mpc.html>
- [15] <https://imperix.com/doc/implementation/model-predictive-control>
- [16] https://bluerobotics.com/wp-content/uploads/2023/03/BR-101447_RevA_PUBLIC_DRAWING.png