

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

# Μοντελοποίηση και ψηφιακή αναπαράσταση συμπεριφοράς πλοίων με χρήση τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης

---

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Δημοσθένης, Α, Συγγούνας

**Επιβλέπων :** Δημήτριος Ασκούνης, Καθηγητής, Τομέας Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων

Αθήνα, Οκτώβρης 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ  
ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

# Μοντελοποίηση και ψηφιακή αναπαράσταση συμπεριφοράς πλοίων με χρήση τεχνολογιών τεχνητής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημοσθένης, Α, Συγγούνας

**Επιβλέπων :** Δημήτριος Ασκούνης, Καθηγητής, Τομέας Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων  
και Συστημάτων Αποφάσεων

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 31<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2021.

Αθήνα, Οκτώβριος 2021

.....

Δημήτριος Ασκούνης

.....

Ιωάννης Ψαρράς

.....

Χρυσόστομος (Χάρης) Δούκας

.....

Δημοσθένης, Α, Συγγούνας

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright ©Δημοσθένης, Συγγούνας, 2021

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

# Περιεχόμενα

<b>Περίληψη</b> .....	<b>8</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>9</b>
<b>Πρόλογος</b> .....	<b>10</b>
<b>1. Εισαγωγή</b> .....	<b>11</b>
1.1 Αντικείμενο-Σκοπός.....	11
1.2 Θεωρητικό υπόβαθρο .....	12
1.3 Σχετικές Εργασίες .....	13
1.4 Οδηγός επόμενων κεφαλαίων .....	15
<b>2. Προσομοιωτής</b> .....	<b>16</b>
2.1 Περιγραφή του προσομοιωτή.....	16
2.2 Περιγραφή του σκάφους και των αισθητήρων που επιλέχθηκαν .....	17
<b>3. Camera-deep learning αναγνώριση αντικειμένων</b> .....	<b>20</b>
3.1 Περιγραφή διάταξης καμερών.....	20
3.2 Νευρωνικό δίκτυο και εκπαίδευση .....	21
3.3 Διαδικασία εκπαίδευσης .....	22
3.4 Αποτελέσματα και επιδόσεις.....	23
<b>4. Lidar-Συλλογή και Ομαδοποίηση σημείων</b> .....	<b>25</b>
4.1 Περιγραφή συστήματος Lidar .....	25
4.2 Συλλογή δεδομένων και απεικόνιση τους.....	25
4.3 Μέτρηση απόστασης από τα αναγνωρισμένα εμπόδια.....	26
<b>5. Αλγόριθμος κίνησης-αποφυγής εμποδίων</b> .....	<b>28</b>
5.1 Κίνηση σκάφους.....	28
5.2 Αποφυγή εμποδίων.....	30
<b>6. Αρχιτεκτονική Συστήματος</b> .....	<b>32</b>
<b>7. Use Cases του αλγόριθμου πλοήγησης</b> .....	<b>33</b>
7.1 Κίνηση με εφαρμογή κανόνων .....	33
<b>8. Επίλογος-Συμπεράσματα</b> .....	<b>38</b>
<b>9. Αρχεία προσομοίωσης-Κώδικας</b> .....	<b>39</b>
<b>10. Βιβλιογραφία</b> .....	<b>39</b>



## Περίληψη

Στη ναυτιλία και τις θαλάσσιες μεταφορές, η βέλτιστη και η ασφαλής πλοήγηση αποτελούν ζητήματα υψίστης σημασίας. Για αυτό το λόγο, ο τομέας των αυτόνομων μη-επανδρωμένων σκαφών κεντρίζει όλο και περισσότερο το ενδιαφέρον την ναυτικής βιομηχανίας. Πρόκειται για σκάφη τα οποία έχουν τη δυνατότητα να κινούνται στη θάλασσα χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση αναγνωρίζοντας τον περιβάλλοντα χώρο γύρω τους μέσα από την βοήθεια αισθητήρων. Στην διπλωματική εργασία λοιπόν, γίνεται μία υλοποίηση και ψηφιακή αναπαράστασης ενός αυτόνομου ρομποτικού σκάφους σε προσομοιωτή βασισμένο στη πλατφόρμα Gazebo. Πιο συγκεκριμένα γίνεται επιλογή και υλοποίηση αισθητήρων, ανάπτυξη αλγορίθμου κίνησης αλλά και αλγορίθμου πλοήγησης και αλληλεπίδρασης με εμπόδια. Ο αλγόριθμος πλοήγησης είναι υλοποιημένος με βάση τους κανόνες COLREGs, που αποτελούν τους Διεθνείς κανονισμούς για την Αποφυγή Συγκρούσεων στην θάλασσα - ΔΚΑΣ (Collision Regulations), που θεσπίστηκαν το 1972 για την αποφυγή συγκρούσεων στις θαλάσσιες μεταφορές.



## Abstract

Optimized navigation and situational awareness are of utmost importance for safe sea operations. The need for such operations along with the rapid growth of sensor technology has shifted maritime industry's attention towards the use of autonomous Unmanned Surface Vehicles (USVs), vessels that can travel autonomously through space. Therefore, there is an increasing demand for real-time motion planning and autonomous navigation at sea that can potentially eliminate human error and promote safety. To this end, an approach to an autonomous vessel setup and algorithm is presented in this thesis. Furthermore, the real-time algorithm employs navigation rules based on the Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREGs) of 1972. The proposed real-time algorithm is applied on several maritime use cases and the results are demonstrated through the use of a marine vessel simulator based on the Gazebo, an open-source 3D robotics simulator.

## Πρόλογος

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου σε όλους τους ανθρώπους που με βοήθησαν κατά την υλοποίηση της διπλωματικής εργασίας αλλά και καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλο το εκπαιδευτικό προσωπικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με το οποίο συνεργάστηκα κατά την φοίτηση μου στην Σχολή. Η εμπειρία αυτή μου προσέφερε γνώσεις και ικανότητες αλλά συνέβαλε και στη καλλιέργεια μου ως άνθρωπος. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες μου στη διπλωματική εργασία για την καθοδήγηση τους και τις συμβουλές τους. Χωρίς τις οδηγίες τους δεν θα ήταν εφικτή η υλοποίηση της εργασίας. Ακόμα, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους ανθρώπους του MarineTraffic Research με τους οποίους συνεργάστηκα στο πλαίσιο πρακτικής εργασίας, οι οποίοι μου έδωσαν τη δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα πολύ ενδιαφέρον πρότζεκτ αποτέλεσμα του οποίου αποτελεί και η διπλωματική εργασία. Τέλος, είμαι ευγνώμων στους φίλους μου, τους συμφοιτητές μου και την οικογένεια μου για τη διαρκή στήριξη κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Αντικείμενο-Σκοπός

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη και η χρήση της τεχνητής νοημοσύνης για την ψηφιακή αναπαράσταση και μοντελοποίηση ενός μη-επανδρωμένου σκάφους.

Είναι γεγονός πως στη σύγχρονη εποχή η τεχνητή νοημοσύνη και οι κλάδοι της, έχουν διεισδύσει σε κάθε πτυχή της κοινωνίας. Για παράδειγμα, τα αυτοκίνητα πλέον έχουν τη δυνατότητα να κινούνται αυτόνομα, χωρίς καμία παρέμβαση του οδηγού. Μπορούν να κινούνται στους δρόμους, να φρενάρουν σε έκτακτες ανάγκες και να σταθμεύουν με την αξιοποίηση των πληροφοριών που λαμβάνουν μέσω των αισθητήρων που διαθέτουν. Η τεχνολογική εξέλιξη αυτή, έχει ήδη συμβάλει στην ραγδαία μείωση των δυστυχημάτων και στη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου ενώ αναμένεται και στο μέλλον η καθολική υιοθέτηση των αυτόνομων οχημάτων[27]. Στα αυτοκίνητα χρησιμοποιούνται κάμερες και radar ή lidar που αξιοποιούνται για την αναγνώριση εμποδίων και την μέτρηση των αποστάσεων ανάμεσα σε αυτά και το αυτοκίνητο.

Αντίστοιχα με τα αυτοκίνητα, ένας τομέας που επιδέχεται αντίστοιχη εισαγωγή συστημάτων αυτοματοποίησης και αυτονομίας, είναι ο τομέας της ναυτιλίας και των σκαφών. Είναι γεγονός ότι στη θάλασσα οι συνθήκες είναι τελείως διαφορετικές από ότι στο δρόμο. Παράμετροι όπως ο αέρας και το κύμα μπορούν με τις απότομες αλλαγές τους να δημιουργήσουν προβλήματα στα πλοία. Ακόμη, στη θάλασσα οι πορείες που θα ακολουθήσει ένα πλεούμενο δεν είναι προδιαγεγραμμένες αφού δεν υπάρχουν δρόμοι. Επαφίεται λοιπόν στην ικανότητα του κυβερνήτη του πλοίου, αλλά και στην άριστη γνώση όλων των κανόνων ναυσιπλοΐας, για την αποφυγή ατυχημάτων και την αλληλεπίδραση με τα υπόλοιπα πλοία. Η πρόκληση, λοιπόν, της ανάπτυξης και ενσωμάτωσης τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης στα πλοία είναι αρκετά μεγάλη αφού οι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι πάρα πολλές και σε πραγματικό χρόνο.

Στην διπλωματική εργασία γίνεται μελέτη, σχεδιασμός και ανάπτυξη καινοτόμων υπηρεσιών τεχνητής νοημοσύνης πάνω σε ένα περιβάλλον εξομοίωσης κίνησης αυτόνομων, μη επανδρωμένων πλοίων.

## 1.2 Θεωρητικό υπόβαθρο

Η εξέλιξη στους τομείς της ρομποτικής, της τεχνολογίας των αισθητήρων αλλά και των συστημάτων πλοήγησης, έχει οδηγήσει τα τελευταία χρόνια στη ραγδαία ανάπτυξη μη επανδρωμένων αυτόνομων σκαφών. Τέτοια σκάφη είναι είτε επιφάνειες, είτε υποβρύχιας λειτουργίας, τα οποία είναι ικανά να πλοηγούνται. Η αυξανόμενη ζήτηση για αυτά τα οχήματα πηγάζει από το αυξανόμενο ενδιαφέρον σε διάφορους τομείς, όπως η επιστημονική έρευνα, οι θαλάσσιες μεταφορές, τα αμυντικά συστήματα αλλά και ο τομέας της εξερεύνησης του ωκεανού.[1]

Ο Διεθνής Οργανισμός Ναυσιπλοΐας (International Maritime Organisation) [2] εκφράζει επίσης το ενδιαφέρον του για αυτόνομα σκάφη και εξετάζει κατά πόσο οι υπάρχοντες οδηγίες του μπορούν να εφαρμοστούν σε σκάφη με διάφορους βαθμούς αυτονομίας. Ακόμα, η Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Ασφάλειας Ναυσιπλοΐας παρέχει υποστήριξη στην Ευρωπαϊκή επιτροπή για την πρακτική εφαρμογή τεχνολογικών λύσεων σε αυτόνομα σκάφη επιφάνειας (Maritime Autonomous Surface Ships-MASS) μέσω ερευνών που χρηματοδοτούνται από την Ευρωπαϊκή Ένωση.[3] Η παραπάνω μελέτη ονομάζεται SAFE-MASS. Το αντικείμενο της μελέτης είναι να αναλυθούν οι πιθανοί κίνδυνοι και τα νομικά κενά που θα προκληθούν από την εφαρμογή κάποιων επιπέδων αυτονομίας. Από την άλλη πλευρά, η εφαρμογή ρομποτικής αυτονομίας στα σκάφη αναμένεται να μειώσει και τα κόστη λειτουργίας των σκαφών, να μειώσει τα σφάλματα που προκαλούνται από τον ανθρώπινο παράγοντα αλλά και να εισάγουν περιβαλλοντικά οφέλη μέσα από την πιο αποδοτική χρήση των καυσίμων.

Η πλοήγηση σε άσχημες καιρικές συνθήκες αλλά και σε περιοχές με συμφόρηση από πλοία, όπως τα λιμάνια, είναι μία απαιτητική εργασία ακόμα και για τους πιο έμπειρους καπετάνιους. Για αυτό το λόγο όλα τα πλοία είναι υποχρεωμένα να ακολουθούν τους διεθνείς κανονισμούς για την αποφυγή συγκρούσεων στη θάλασσα (COLREGs)[4]. Πιο συγκεκριμένα, οι κανόνες αυτοί ορίζουν τις ενέργειες που πρέπει να πραγματοποιηθούν όταν δύο πλοία πλησιάζουν το ένα το άλλο. Δυστυχώς, το 56% των σημαντικών συγκρούσεων στη θάλασσα έχουν γίνει λόγω της μη τήρησης των κανονισμών COLREGs, γεγονός το οποίο εγείρει τη σημασία που έχει, τα αυτόνομα πλοία να μελετηθούν και να αναπτυχθούν με βάση αυτούς τους κανόνες. Από τη μία πλευρά, υποστηρίζεται ότι τα αυτόνομα πλοία πρέπει να αντιμετωπίζονται σαν ακυβέρνητα πλοία, ή πλοία με

περιορισμένες δυνατότητες ελιγμών έτσι ώστε να τους παραχωρείται προτεραιότητα σύμφωνα με τον κανόνα 18 του COLREGs. Από την άλλη πλευρά, αυτό αντιτίθεται στη βασική αρχή των αυτόνομων, μη-επανδρωμένων πλοίων, ότι δηλαδή θα πρέπει να συμπεριφέρονται σαν να είχαν κυβερνήτη και να παρουσιάζουν αναμενόμενη συμπεριφορά με σεβασμό στους κανόνες COLREGs έτσι ώστε τα υπόλοιπα πλοία να γνωρίζουν τι ελιγμούς θα κάνουν. Για αυτό το λόγο, στόχος της διπλωματικής είναι να γίνει μία προσέγγιση του θέματος της πλοήγησης ενός αυτόνομου-μη επανδρωμένου σκάφους σε πραγματικό-χρόνο και σε δυναμικό περιβάλλον με τη τήρηση των κανόνων ναυσιπλοΐας COLREGs.

### **1.3 Σχετικές Εργασίες**

Η πολυπλοκότητα του προβλήματος της πλοήγησης ενός αυτόνομου σκάφους πηγάζει από το γεγονός ότι το περιβάλλον στη θάλασσα είναι εξαιρετικά δυναμικό και πολυδιάστατο [5, 6, 7]. Για αυτό το λόγο, αποτελεί ένα πρόβλημα που απασχολεί τους ερευνητές αρκετά χρόνια. Προγραμματίζοντας τη βέλτιστη διαδρομή και αποφεύγοντας τα εμπόδια με σεβασμό στους κανόνες, τα σκάφη επιτυγχάνουν όχι μόνο τη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας αλλά και την αύξηση της ασφάλειας στη θάλασσα. Προς αυτήν την κατεύθυνση, πολλές τεχνικές έχουν προταθεί για το πρόβλημα του σχεδιασμού κίνησης στη θάλασσα.

Αρκετές μελέτες αφορούν το πρόβλημα της πλοήγησης σε στατικό περιβάλλον. Μία ομάδα πρότεινε μία νέα μέθοδο πλοήγησης [8] όπου βασίζεται στις τοπολογικές σχέσεις των αντικειμένων. Επιπρόσθετα, ανέπτυξε ένα μαθηματικό μοντέλο του αυτόνομου σκάφους έτσι ώστε να είναι δυνατή η περιγραφή του σκάφους ως προς τους βαθμούς ελευθερίας του. Αυτό το μοντέλο δίνει τη δυνατότητα η κίνηση που θα προταθεί από τον αλγόριθμο πλοήγησης να είναι εφικτή από το σκάφος. Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω τεχνικών προσφέρει μία αποδοτική τεχνική σχεδιασμού κίνησης, τεκμηριωμένη με αριθμητικές προσομοιώσεις. Οι συγγραφείς μίας άλλης μελέτης [9] χρησιμοποίησαν τον αλγόριθμο Dijkstra έτσι ώστε ένα αυτόνομο σκάφος να πλοηγηθεί στο λιμάνι του

Πόρτσμουθ. Η κάτοψη του λιμανιού μετατρέπεται σε δυαδική εικόνα όπου τα μαύρα πίζελ της περιοχής αντιστοιχούν σε εμπόδια και τα λευκά πίζελ σε ελεύθερο χώρο.

Ως προς τη κατεύθυνση του δυναμικού και πολυδιάστατου περιβάλλοντος, μία ομάδα πρότεινε [10] έναν υβριδικό, τοπικό και παγκόσμιο, αλγόριθμο σχεδιασμού κίνησης. Πιο συγκεκριμένα, ο παγκόσμιος αλγόριθμος χαράζει πορεία από τη τοποθεσία του σκάφος έως τον στόχο. Ο τοπικός αλγόριθμος χρησιμοποιείται για την αποφυγή των εμποδίων που συναντούνται κατά την κίνηση. Ωστόσο, ο τοπικός αλγόριθμος δεν εξασφαλίζει βέλτιστο αποτέλεσμα ενώ ο παγκόσμιος αλγόριθμος δεν μπορεί εύκολα να αναγνωρίσει τα δυναμικά εμπόδια στο περιβάλλον. Για αυτό το λόγο, οι συγγραφείς επέλεξαν τον συνδυασμό τους, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο A\* για να βρουν ένα βέλτιστο μονοπάτι ανάμεσα στο σκάφος και το στόχο ενώ ο αλγόριθμος δυναμικού παραθύρου(DWA) χρησιμοποιείται για την αποφυγή των εμποδίων στο τοπικό μονοπάτι.

Παρά το γεγονός ότι έχει διεξαχθεί ευρέως έρευνα για το σχεδιασμό κίνησης στη θάλασσα, μόνο τα τελευταία χρόνια οι ερευνητές άρχισαν να λαμβάνουν υπόψη τους κανόνες πλοήγησης. Όπως εξηγήθηκε παραπάνω, είναι αναγκαίο οι αλγόριθμοι πλοήγησης να σέβονται τους κανόνες COLREGs έτσι ώστε να καταστεί δυνατό τα αυτόνομα πλοία να λειτουργήσουν σε πραγματικές συνθήκες. Προς αυτήν την κατεύθυνση κινείται μία μελέτη [11] όπου αναπτύχθηκε ένα σύστημα αποφάσεων για αποφυγή συγκρούσεων το οποίο είναι ικανό να λάβει υπόψη αρκετούς κανόνες αλλά και την ικανότητα ελιγμών των σκαφών. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός μοντέλου που ανιχνεύει το ρίσκο σύγκρουσης και ενός αλγορίθμου που προγραμματίζει μια αλληλουχία κινήσεων σύμφωνα που τους κανόνες που του έχουν δοθεί. Ο κίνδυνος σύγκρουσης και η απόφαση ενημερώνονται ενσωματώνοντας μία μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων στον αλγόριθμο Velocity Obstacle όπου μοντελοποιεί τη συμπεριφορά των κοντινών πλοίων. Προς την ίδια κατεύθυνση, οι συγγραφείς μίας ακόμη μελέτης [12] επεξεργάστηκαν τον αλγόριθμο Velocity Obstacle έτσι ώστε να συμφωνεί με τους κανόνες COLREGs και αξιολόγησαν την προσέγγιση τους τόσο σε προσομοιωμένα όσο και σε πραγματικά σενάρια. Σε μια ακόμη εργασία [13] οι συγγραφείς παρουσίασαν έναν αλγόριθμο αναζήτησης μονοπατιού ο οποίος ονομάζεται «local normal distribution-based trajectory». Ο αλγόριθμος δημιουργεί βέλτιστες τροχιές που υπακούν στους κανόνες COLREGs και εξάγει σημεία τα οποία ακολουθεί το σκάφος.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μια προσπάθεια προσέγγισης του μη επανδρωμένου-αυτόνομου σκάφους σε προσομοιωτή με αληθινές καιρικές συνθήκες και υλοποίηση τεχνικών αξιοποίησης των αισθητήρων με σκοπό τη δημιουργία αλγορίθμου πλοήγησης και αποφυγής εμποδίων. Θα γίνει, επίσης, αξιολόγηση του αλγορίθμου σε σενάρια κίνησης που θα δημιουργηθούν στο προσομοιωτή.

#### **1.4 Οδηγός επόμενων κεφαλαίων**

Στα επόμενα κεφάλαια θα γίνει:

- Περιγραφή του προσομοιωτή θαλάσσιου περιβάλλοντος και τους λόγους που οδήγησαν στην επιλογή του
- Ανάλυση της χρήσης του συστήματος LIDAR και περιγραφή της υλοποίησης της τεχνικής αξιοποίησης των δεδομένων του
- Ανάλυση της χρήσης του κυκλώματος καμερών και περιγραφή των τεχνικών αξιοποίησης των εικόνων που λαμβάνουν
- Ανάλυση του αλγορίθμου κίνησης που υλοποιήθηκε συνδυάζοντας τα δεδομένα από το LIDAR και τις κάμερες

## 2. Προσομοιωτής

Για τους σκοπούς της εργασίας ήταν απαραίτητο να γίνει χρήση ενός προσομοιωμένου περιβάλλοντος έτσι ώστε να αναπτυχθούν και να δοκιμαστούν οι λειτουργίες του σκάφους.

### 2.1 Περιγραφή του προσομοιωτή

Σημαντικές παράμετροι απόφασης κατά την επιλογή του προσομοιωτή ήταν οι εξής:

- Θαλάσσιο περιβάλλον με αληθινές συνθήκες αέρα και κύματος και δυναμική αλληλεπίδραση τους με το ρομποτικό σκάφος
- Δυνατότητα υλοποίησης σε περιβάλλον που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πραγματικό ρομποτικό σύστημα σκάφους για δοκιμή σε πραγματικές συνθήκες

Για αυτούς τους λόγους δοκιμάστηκαν αρκετοί προσομοιωτές [14][15][16] που μπορούσαν να παρέχουν ένα θαλάσσιο περιβάλλον για ρομποτικό σκάφος. Ωστόσο αυτός που επιλέχθηκε είναι ο προσομοιωτής [17] που αναπτύχθηκε από την ομάδα του ROBOTX για τον ψηφιακό διαγωνισμό Virtual RobotX 2019. Ο διαγωνισμός αυτός [18] αφορά μη επανδρωμένα αυτόνομα σκάφη.

Ο προσομοιωτής αυτός είναι υλοποιημένος στο πρόγραμμα Gazebo Sim [19] το οποίο αποτελεί πρόγραμμα για κάθε είδους ρομποτικές προσομοιώσεις. Η αρχιτεκτονική του βασίζεται στη C++ ενώ το ρομποτικό σκάφος που περιέχει λειτουργεί με το ROS (Robot Operating System). Δίνεται η δυνατότητα για ρύθμιση οποιασδήποτε παραμέτρου στο περιβάλλον προσομοίωσης αλλά και για την προσθήκη και ρύθμιση αισθητήρων στο σκάφος.

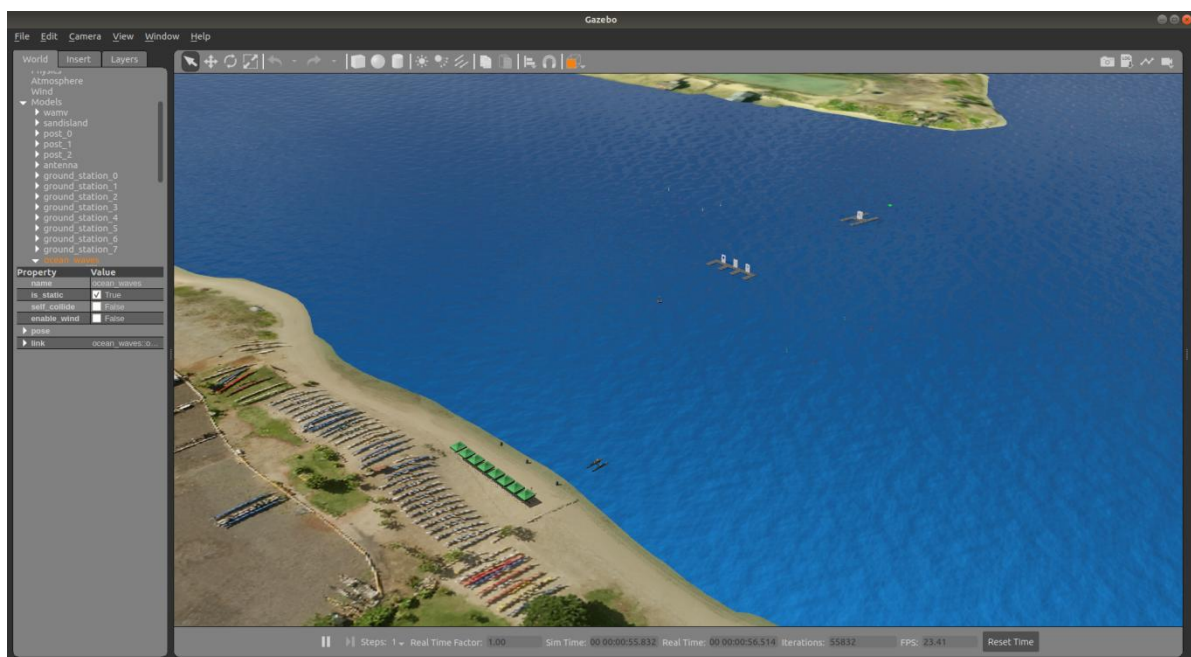


Figure 1 Περιβάλλον προσομοίωσης



Στο προσομοιωτή δημιουργήσα τρία διαφορετικά περιβάλλοντα τα οποία περιγράφονται στα αρχεία xml με ονόματα goal, vrx και custom. Το περιβάλλον goal περιέχει το σκάφος και δημοσιεύει σε ROS Topics συντεταγμένες στις οποίες πρέπει να κινηθεί το σκάφος. Σχεδιάστηκε με σκοπό την αξιολόγηση του αλγορίθμου κίνησης. Το περιβάλλον vrx περιέχει το σκάφος και εμπόδια μέσα στη θάλασσα και σχεδιάστηκε με σκοπό τη δοκιμή και την αξιολόγηση της λειτουργίας των αισθητήρων. Τέλος, το περιβάλλον custom περιέχει το σκάφος και άλλα 5 προσαρμοσμένα σκάφη τα οποία κινούνται ακολουθώντας συγκεκριμένες τροχιές έτσι ώστε να γίνει δοκιμή και αξιολόγηση του αλγορίθμου πλοήγησης και αποφυγής εμποδίων.

## 2.2 Περιγραφή του σκάφους και των αισθητήρων που επιλέχθηκαν

Το σκάφος που επιλέχθηκε αποτελεί ένα πλωτό μέσο σε σχήμα Η. Επέλεξα να εξοπλιστεί με τρεις προπέλες οι οποίες τοποθετήθηκαν:

- Δύο στο πίσω μέρος από τα δύο πόδια του σκάφους
- Μία στον κεντρικό άξονα του σκάφους που χρησιμοποιείται για τη σταθεροποίηση του

Κάθε προπέλα έχει δυνατότητα στροφής μέχρι 90 μοίρες δεξιά και αριστερά δίνοντας τη δυνατότητα για ελιγμούς. Κάθε προπέλα μπορεί να ελεγχθεί από τα αντίστοιχα ROS Topics της όπου δίνονται εντολές είτε για την ώθηση είτε για τη γωνία. Οι εντολές ώθησης δίνονται σε Newton και μεταφράζονται από την κατάλληλη συνάρτηση σε ταχύτητα περιστροφής της προπέλας ενώ οι εντολές γωνίας δίνονται σε μοίρες [17]. Σε πραγματικό επίπεδο αλλά και σε επίπεδο προσομοίωσης, οι προπέλες του σκάφους τροφοδοτούνται από μπαταρίες.



Figure 2 Ρομποτικό σκάφος



Figure 3 Ρομποτικό σκάφος

Το σκάφος επίσης εξοπλίστηκε με κάμερα, Lidar, GPS και IMU.

Η κάμερα τοποθετήθηκε στο μπροστά μέρος του σκάφους, έχει ρυθμό ανανέωσης 30 Hz και μοτίβο χρωμάτων R8G8B8

Το Lidar τοποθετήθηκε επίσης στο μπροστινό μέρος του σκάφους 30 εκατοστά πάνω από τη κάμερα και 20 εκατοστά πίσω της. Έχει ρυθμό ανανέωσης 10 Hz και εκπέμπει 16 κάθετα laser το καθένα εκ των οποίων έχει 1875 δείγματα σε ακτίνα 360 μοιρών. Το εύρος του είναι 130 μέτρα.

Ακόμη, τοποθετήθηκε αισθητήρας GPS με ρυθμός ανανέωσης 20 Hz για την λήψη των συντεταγμένων του σκάφους και αισθητήρας IMU (αδράνειας) με ρυθμό ανανέωσης 100 Hz για την μέτρηση των δυνάμεων που δέχεται το σκάφος.

Το σκάφος και η διάταξη των αισθητήρων του περιγράφεται στο αρχείο XML `wamv_gazebo.urdf.xacro` όπου έχουν ρυθμιστεί η διάταξη των προπελών αλλά και οι θέσεις και οι παράμετροι των αισθητήρων.

Τέλος, στο πλαίσιο της διπλωματικής δημιουργήσα τις εξής ρυθμον ρουτίνες:

- Δημοσίευση στα ROSTopic κάθε προπέλας εντολών για τη κίνηση τους. (StartBoth, StartRightEngine, StartLeftEngine, StartLateralEngine)
- Διάβασμα πληροφοριών που αφορούν τη κατεύθυνση από το ROSTopic του αισθητήρα IMU και μετατροπή τους από quaternion σε μοίρες. (getOrientation)
- Διάβασμα συντεταγμένων από τον αισθητήρα GPU. (getLatandLong)

### 3. Camera-deep learning αναγνώριση αντικειμένων

Σε ένα σύστημα αυτόνομης κίνησης οι κάμερες έχουν κομβικό ρόλο στην αναγνώριση και αλληλεπίδραση των αντικειμένων που βρίσκονται γύρω από το σκάφος[20]. Όπως και στον άνθρωπο τα μάτια και η όραση του επιτρέπουν να κινείται, έτσι και στα αυτόνομα οχήματα οι κάμερες αποτελούν την 'όραση' τους και ένα από τα εργαλεία για την ασφαλή κίνηση τους. Στο πλαίσιο της διπλωματικής σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε μια κάμερα deep learning αναγνώρισης αντικειμένων μέσα στο περιβάλλον εξομοίωσης αυτονομων μη επανδρωμένων πλοίων.

#### 3.1 Περιγραφή διάταξης καμερών

Στο αυτόνομο, μη επανδρωμένο σκάφος έπρεπε να ληφθούν υπόψη ορισμένοι παράγοντες για την επιλογή του τύπου και του πλήθους των καμερών που θα επιλεγούν αλλά και του μέρους πάνω στο σκάφος. Πιο συγκεκριμένα, για τον τύπο της κάμερας υπήρχαν δύο επιλογές, απλή monocular κάμερα και stereo κάμερα. Οι monocular κάμερες μπορούν αξιόπιστα να αναγνωρίσουν με τη χρήση του κατάλληλου νευρωνικού δικτύου εικόνες σύμβολα και εύκολα διαχωρίσιμα αντικείμενα όπου δεν είναι σημαντική η τρίτη διάσταση του βάθους. Οι stereo κάμερες έχουν τη δυνατότητα να λάβουν τον κόσμο στη τρισδιάστατη απεικόνιση του. Με άλλα λόγια, λόγω της διπλής κάμερας είναι δυνατό να υπολογιστεί και το βάθος στην εικόνα. Ωστόσο, η συγκεκριμένη δυνατότητα ανεβάζει σημαντικά την υπολογιστική πολυπλοκότητα. Συμπερασματικά, λόγω του γεγονότος ότι στη συγκεκριμένη εργασία εξετάζεται και προτείνεται ένα σύστημα το οποίο θα μπορεί να εγκατασταθεί και να λειτουργήσει σε πραγματικό σκάφος, έγινε η επιλογή της monocular κάμερας έτσι ώστε να διατηρηθεί το υπολογιστικό κόστος χαμηλό. Για τον υπολογισμό του βάθους και τη δημιουργία ενός 3D μοντέλου του περιβάλλοντα χώρου του σκάφους, χρησιμοποιείται το Lidar όπως θα περιγραφεί στο επόμενο κεφάλαιο.

Όσον αφορά το πλήθος και τη τοποθέτηση των καμερών, δεδομένου ότι στην εργασία εξετάζεται αλγόριθμος κίνησης, επιλέχθηκε μία κάμερα, η οποία τοποθετήθηκε στο μπροστινό μέρος του σκάφους. Η κάμερα αυτή παρέχει μία εικόνα 1280x720 pixel στο ROSTopic που της έχει ανατεθεί.

Η κάμερα ρυθμίστηκε έτσι ώστε να δημοσιεύει σε ROSTopic την εικόνα της σε μορφή RAW.

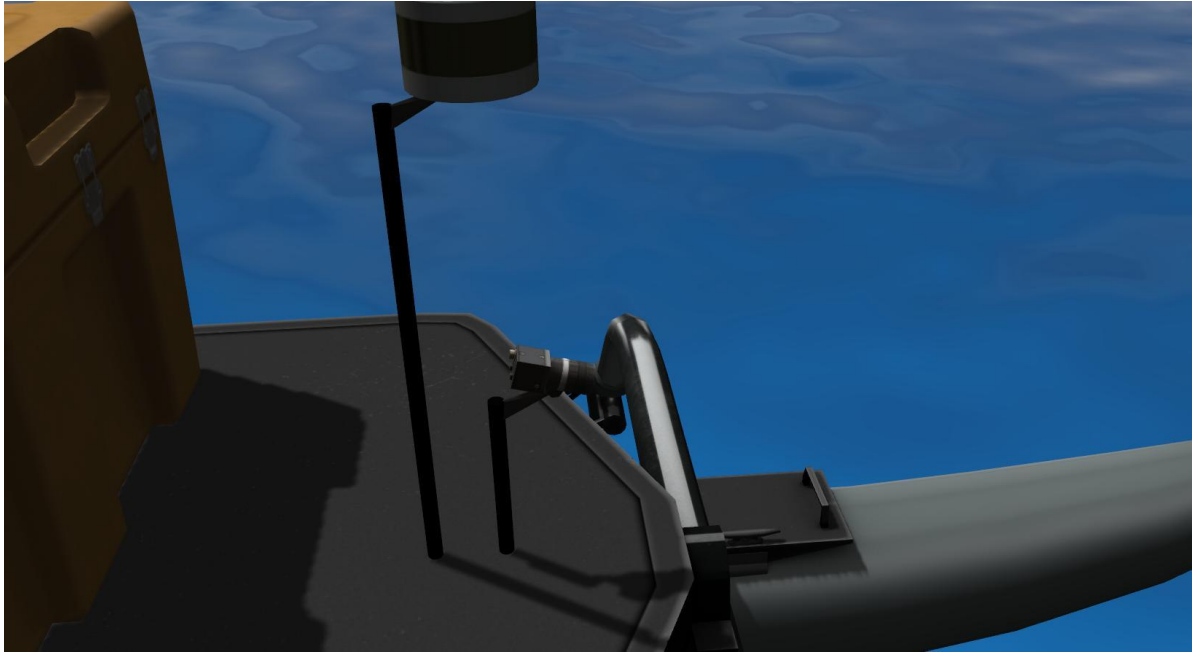


Figure 4 Κάμερα σκάφους

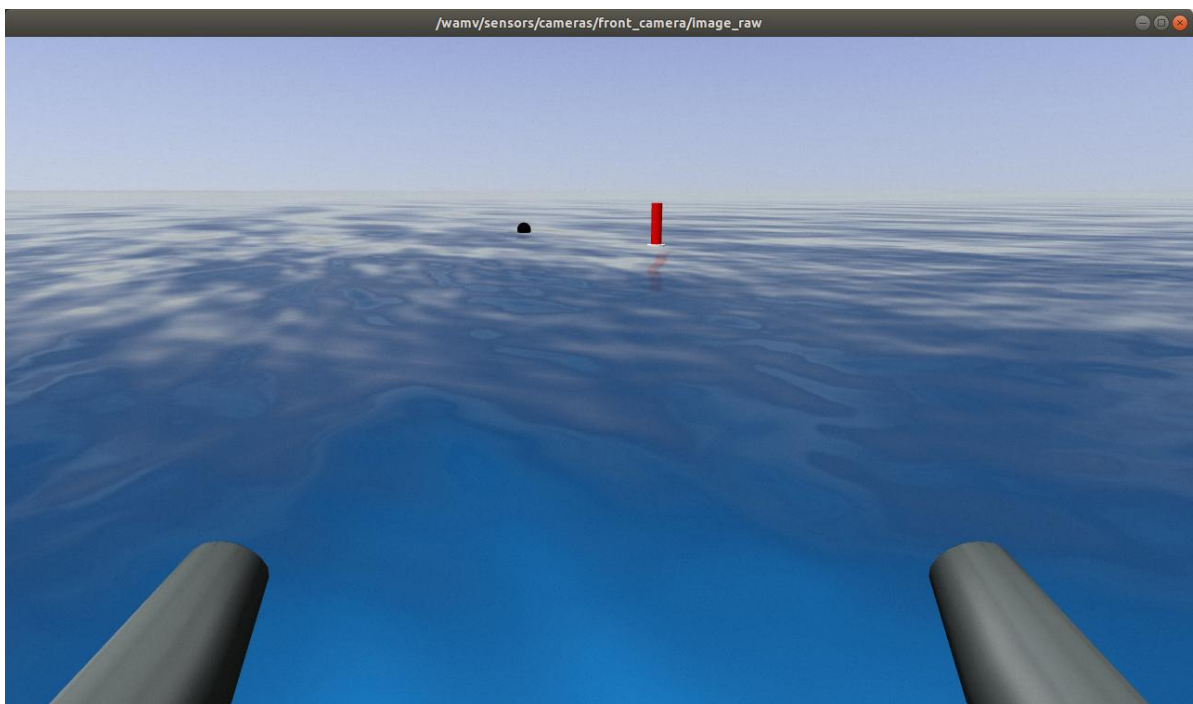


Figure 5 Εικόνα κάμερας

### 3.2 Νευρωνικό δίκτυο και εκπαίδευση

Για την αξιοποίηση των πληροφοριών που εξάγονται από τη κάμερα, είναι αναγκαίο να γίνει χρήση ενός νευρωνικού δικτύου, κατάλληλα εκπαιδευμένου έτσι ώστε να αναγνωρίζει τα αντικείμενα που βρίσκονται γύρω από το σκάφος, είτε πρόκειται για άλλα σκάφη είτε για εμπόδια. Εξετάστηκαν αρκετά νευρωνικά δίκτυα, αλλά αυτό που επιλέχθηκε είναι το αρκετά διαδεδομένο Darknet [29] όπου σε συνδυασμό με το σύστημα Yolo [21] επιτυγχάνει σε πραγματικό χρόνο αναγνώριση αντικειμένων. Πρόκειται για ένα

deep-learning νευρωνικό σύστημα. Το νευρωνικό σύστημα Yolo έχει υπάρξει αντικείμενο μελέτης από πολλούς επιστήμονες με σκοπό την βελτίωση του με αποτέλεσμα να υπάρχουν μέχρι σήμερα 4 δημοσιευμένες εκδόσεις του, με την έκδοση Yolon4 να αποτελεί την πιο σύγχρονη και βέλτιστη[22]. Δεδομένου ότι πρόκειται για σκάφος και υπάρχει η ανάγκη για μειωμένο υπολογιστικό κόστος, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί μια παραλλαγή του Yolon4, το Yolon4-tiny [22] όπου πρόκειται για μία παραλλαγή του Yolon4 με λιγότερο πολύπλοκο δίκτυο και λιγότερες παραμέτρους, έτσι ώστε να πετυχαίνει ταχύτατη αναγνώριση αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο μειώνοντας την υπολογιστική πολυπλοκότητα. Πράγματι, όπως θα αναλυθεί και στις επόμενες παραγράφους επιτυγχάνονται αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Για τους σκοπούς της διπλωματικής πραγματοποιήθηκε εγκατάσταση του framework Darknet με τέτοιο τρόπο ώστε να λειτουργεί από το ROS. Αυτό συνέβη ώστε να είναι δυνατή η χρήση του συστήματος σε πραγματικό ρομποτικό σκάφος. Ακόμα, προστέθηκε στο Darknet λειτουργία τέτοια ώστε να δημοσιεύονται σε δύο ROSTopic ο αριθμός των αντικειμένων που εντοπίζονται από το νευρωνικό δίκτυο και τα bounding boxes τους. Η λειτουργία αυτή θα χρησιμεύσει στα επόμενα κεφάλαια όπου θα συνδυαστούν οι πληροφορίες της κάμερας με το Lidar.

### **3.3 Διαδικασία εκπαίδευσης**

Για να λειτουργήσει επιτυχώς το νευρωνικό σύστημα, θα πρέπει να εκπαιδευτούν τα βάρη του ως προς τα αντικείμενα που θα πρέπει να εντοπίζει. Δεδομένου ότι το δίκτυο θα τροφοδοτείται με εικόνες από έναν προσομοιωτή ήταν αναγκαίο να συλλεχθεί ένα σύνολο εικόνων από τα αντικείμενα που θα αλληλεπιδράσει το σκάφος στις προσομοιώσεις που θα γίνουν.

Η συνήθης διαδικασία που ακολουθείται είναι η συλλογή των εικόνων από έτοιμα Google Datasets, ωστόσο επειδή γίνεται χρήση του προσομοιωτή θεωρήθηκε αναγκαίο οι εικόνες που θα τροφοδοτηθούν για την εκπαίδευση του δικτύου να προέρχονται από τον προσομοιωτή. Οι κλάσεις για τις οποίες έγινε εκπαίδευση είναι 12 και αφορούν άλλα σκάφη, ίδιας μορφής με το σκάφος που εξετάζεται στην εργασία, κώνους που επιπλέουν στην επιφάνεια της θάλασσας σε διάφορα χρώματα και εμπόδια τα οποία στο πλαίσιο του προσομοιωτή παρουσιάζονται ως μπάλες τριών μεγεθών. Επιλέχθηκε ως ικανός αριθμός για την εκπαίδευση του νευρωνικού περίπου 150 bounding boxes για κάθε κλάση. Συνολικά δηλαδή συλλέχθηκαν περίπου 1500 εικόνες. Οι εικόνες συλλέχθηκαν με τυχαίο τρόπο μέσα από τη κάμερα του σκάφους στον προσομοιωτή έτσι ώστε το σύνολο δεδομένων να είναι αξιόπιστο. Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν πίστες όπου αποτελούνταν από τα προς εκπαίδευση αντικείμενα. Σε αυτές τις πίστες το σκάφος κινούνταν με τυχαίο τρόπο συλλέγοντας εικόνες από 4 κάμερες κάθε 5 δευτερόλεπτα. Με αυτό τον τρόπο συλλέχθηκαν τα δεδομένα τα οποία είχαν όψεις των αντικειμένων από πολλαπλές γωνίες και αποστάσεις.

Για κάθε εικόνα έγινε η σημείωση των bounding boxes που υπήρχαν αλλά και των κλάσεων τους με τη χρήση του Annotation Tool LabelImg [23]. Η διαδικασία επαναλήφθηκε για το σύνολο των 1500 εικόνων όπου τελικά δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα αρχεία μορφής TXT όπου σημειωνόταν οι τοποθεσίες και η κλάση κάθε bounding box.

Στη συνέχεια όλα τα δεδομένα τροφοδοτήθηκαν σε ένα jupyter notebook στο οποίο υπήρχε εγκατεστημένο το framework Darknet, ρυθμίστηκαν οι παράμετροι της εκπαίδευσης με τη διαδικασία που περιγράφεται στη βιβλιογραφία[22]. Το παραπάνω jupyter notebook επιλέχθηκε να 'τρέξει' στη πλατφόρμα Google Colab[24] διότι η διαδικασία της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου έχει πολύ μεγάλη υπολογιστική πολυπλοκότητα όπου η χρήση κοινών οικιακών υπολογιστών την καθιστά ιδιαίτερα χρονοβόρα. Αξίζει να σημειωθεί ότι επιλέχθηκε μεγάλο network resolution για να αυξηθεί η ακρίβεια στον εντοπισμό των bounding boxes.

### 3.4 Αποτελέσματα και επιδόσεις

Τα αποτελέσματα ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητικά. Επετεύχθη Mean Average Precision(mAP) περίπου 65% , average IoU 80% ενώ και στην πράξη οι επιδόσεις ήταν εξαιρετικές. Το νευρωνικό δίκτυο λειτούργησε στον προσομοιωτή σε real-time με περίπου 4 FPS σε μία κάρτα γραφικών πολύ χαμηλών προδιαγραφών (Nvidia GeForce GT 710, 2GB, 192 Cuda cores). Οι εντοπισμοί των αντικειμένων μέσα από την κάμερα ήταν ακριβείς και με μεγάλους βαθμούς σιγουριάς ακόμα και σε μεγαλύτερες αποστάσεις.

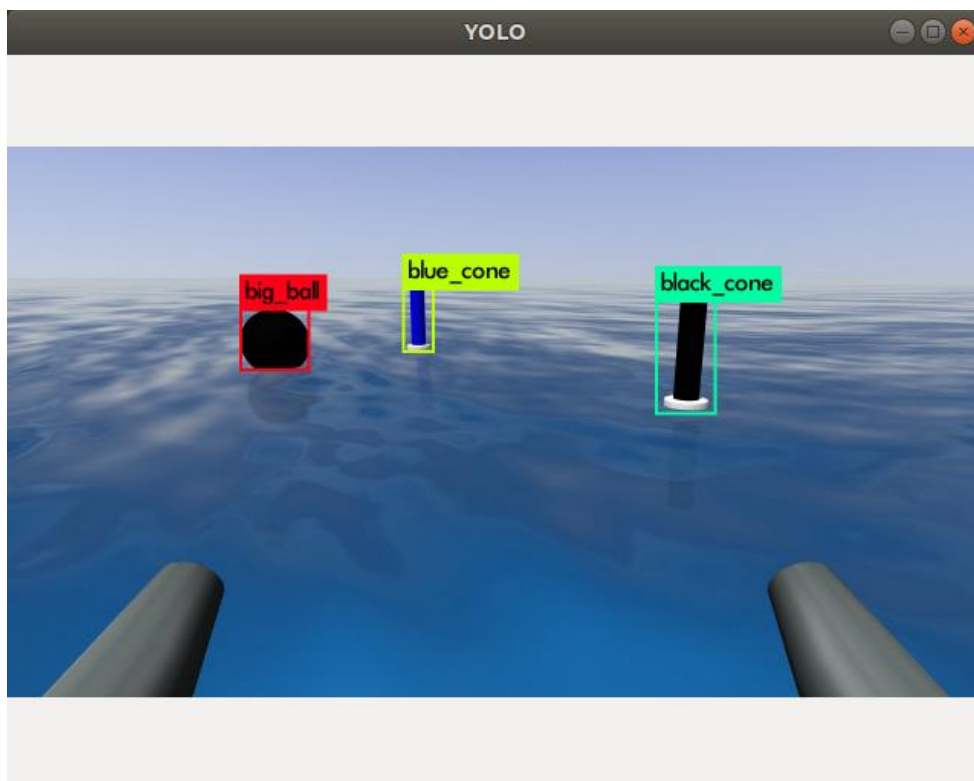


Figure 6 Λειτουργία νευρωνικού δικτύου

```
/home/dimosthenis/vrx/src/darknet_ros/darknet_ros/launch/yolo_v4.launch http://localhos...
File Edit View Search Terminal Help
FPS:2.8
Objects:
big_ball: 85% (left_x: 502 top_y: 193 width: 54 height: 49)
blue_cone: 98% (left_x: 699 top_y: 185 width: 40 height: 81)
black_cone: 100% (left_x: 737 top_y: 189 width: 55 height: 104)
)
```

Figure 7 Αποτελέσματα αναγνώρισης νευρωνικού δικτύου



## 4. Lidar-Συλλογή και Ομαδοποίηση σημείων

### 4.1 Περιγραφή συστήματος Lidar

Το Lidar αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο όργανο για την αναγνώριση αντικειμένων. Η λειτουργία του βασίζεται στην ιδέα ότι εκπέμπονται ακτίνες λέιζερ σε ακτίνα 360 μοιρών και στη συνέχεια μετράται ο χρόνος μέχρις ότου να επιστρέψει το ανακλώμενο φως πίσω στη συσκευή. Με αυτό τον τρόπο μετριέται η απόσταση από ένα αντικείμενο.[25] Σε αντίθεση με το Radar, το Lidar προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια ακόμα και σε πολύ μικρά αντικείμενα. Επίσης, επειδή οι ακτίνες ταξιδεύουν με τη ταχύτητα του φωτός, τα δεδομένα του συλλέγονται πολύ γρήγορα. Στο πλαίσιο της διπλωματικής ανέπτυξα ένα σύστημα LIDAR στο περιβάλλον προσομοίωσης το οποίο χρησιμοποιείται για την μέτρηση της απόστασης των εμποδίων που έχει ανιχνεύσει η κάμερα σε σχέση με το σκάφος.

### 4.2 Συλλογή δεδομένων και απεικόνιση τους

Το Lidar επιστρέφει τα δεδομένα του σε ένα RosTopic σε μορφή PointCloud2[26]. Μέσα από ρουτίνα python που δημιουργήθηκε τα δεδομένα αυτά μετατρέπονται σε μορφή καρτεσιανών συντεταγμένων, με τον άξονα x να αντιπροσωπεύει την πλώρη του σκάφους, μέσω της εντολής `read_points` της βιβλιοθήκης `sensor_msgs` της Python. Στη συνέχεια τα δεδομένα φιλτράρονται έτσι ώστε να διαγραφούν μέρη του σκάφους που εντοπίζονται όπως το radar στο πίσω μέρος. Τέλος, φιλτράρονται ακόμη τα σημεία που βρίσκονται εκτός οπτικού πεδίου της κάμερας.

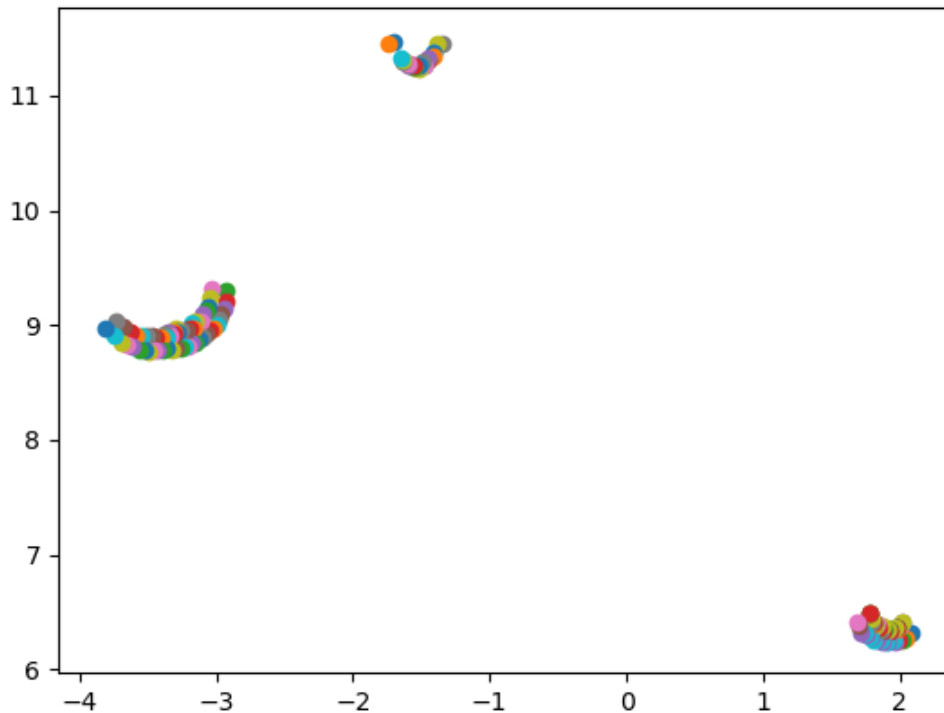


Figure 8 Απεικόνιση σε Scatterplot των δεδομένων του Lidar την ίδια χρονική στιγμή με το figure 4

### 4.3 Μέτρηση απόστασης από τα αναγνωρισμένα εμπόδια

Μέσα από το νευρωνικό δίκτυο που περιγράφηκε παραπάνω εξάγονται κάθε στιγμή δύο τύποι δεδομένων:

- Ο αριθμός των εμποδίων που βρίσκονται μπροστά στο σκάφος
- Τα bounding boxes και το είδος των εμποδίων

Τα δεδομένα αυτά συνδυάζονται με τα δεδομένα του Lidar έτσι ώστε να υπάρχει πλήρης γνώση του περιβάλλοντος χώρου του σκάφους. Για να επιτευχθεί αυτό, πραγματοποιείται k-means Clustering στα δεδομένα του Lidar που περιγράφηκαν πριν. Το k ,δηλαδή ο αριθμός των clusters που θα δημιουργηθούν, αντλείται από τα δεδομένα του νευρωνικού δικτύου. Στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται τα κέντρα κάθε cluster που έχουν προκύψει από την τελευταία επανάληψη του αλγόριθμου. Από τα x,y κάθε κέντρου υπολογίζεται η απόσταση από το σκάφος και η γωνία που σχηματίζει το αντικείμενο με το σκάφος. Τελικά, γνωρίζοντας τη θέση των bounding boxes των εντοπισμένων αντικειμένων, αλλά και τη γωνία τους σε σχέση με το σκάφος γίνεται ένωση των δεδομένων οπότε προκύπτει ένας χάρτης με τα αντικείμενα στο περιβάλλοντα χώρο του σκάφους.

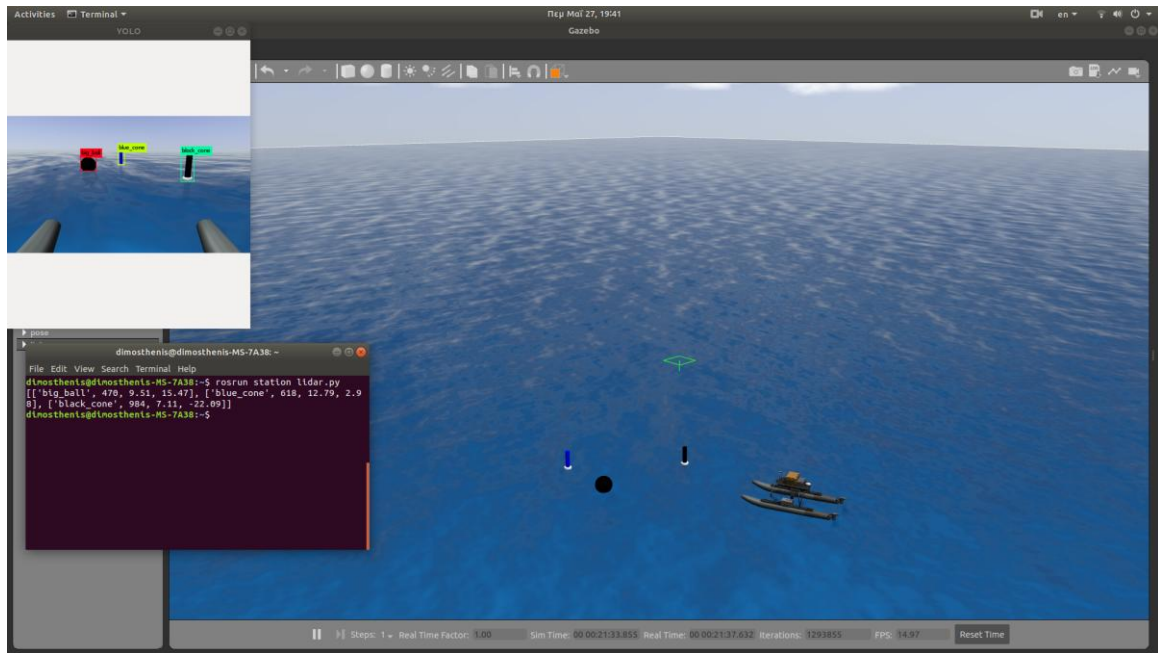


Figure 9 Αντιστοίχιση αντικειμένων

## 5. Αλγόριθμος κίνησης-αποφυγής εμποδίων

Έχοντας επιτύχει τη αναγνώριση του περιβάλλοντος χώρου του σκάφους οι προκλήσεις που απομένουν είναι η κίνηση του σκάφους σε θέσεις που του δίνονται και η αποφυγή συγκρούσεων με βάση τους κανόνες COLREG.

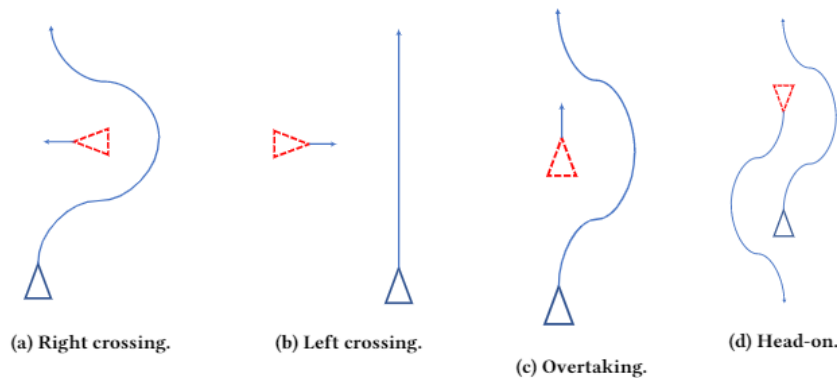


Figure 10 Κανόνες COLREGs εφαρμόσιμοι στην πλοήγηση

### 5.1 Κίνηση σκάφους

Το σκάφος, όπως έχει περιγραφεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, εξοπλίζεται με τρεις προπέλες δύο στο πίσω μέρος και μία στο κέντρο. Προφανώς, για να κινηθεί το σκάφος ευθεία θα δοθούν ίδιες εντολές στις δύο μηχανές στο πίσω μέρος. Από την άλλη πλευρά, το σκάφος πρέπει να έχει και την δυνατότητα στροφής πριν κινηθεί προς μία κατεύθυνση. Συνήθως, τα πλοία για να στρίψουν προς μία κατεύθυνση χρησιμοποιούν τις μηχανές τους σε αντίθετη φορά. Δεδομένου ότι το ζήτημα είναι να κινηθεί με ακρίβεια σε ορισμένες συντεταγμένες, πρέπει η στροφή του σκάφους να είναι όσο το δυνατόν πιο πολύ επιτόπια, δηλαδή το σκάφος ιδανικά να στρίψει γύρω από τον άξονα z του. Παρατηρώντας τον αισθητήρα αδράνειας του σκάφους θεωρήθηκε ως ιδανική αναλογία για τις εντολές των μηχανών η  $\frac{1}{2}$ . Πιο συγκεκριμένα, εφόσον το σκάφος πρέπει να στρίψει αριστερά θα δοθεί εντολή  $x$  Newton στην πίσω δεξιά μηχανή και  $-2x$  Newton στην πίσω αριστερά μηχανή, όπου  $x$  ένας θετικός αριθμός. Αντίστοιχα, και για την δεξιά στροφή.

Για να στρίψει το σκάφος προς ορισμένες μοίρες που του δίνονται, ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία. Αρχικά, διαβάζονται τα δεδομένα από τον αισθητήρα IMU. Τα δεδομένα αυτά είναι σε μορφή quaternion[28]. Μετατρέπονται σε roll pitch yaw όπου το yaw τελικά είναι οι μοίρες της κατεύθυνσης του σκάφους. Στη συνέχεια αποφασίζεται από τη διαφορά της κατεύθυνσης και της τελικής κατεύθυνσης αν το σκάφος θα στρίψει δεξιόστροφα ή αριστερόστροφα. Έπειτα, όσο η διαφορά των δύο κατευθύνσεων είναι μεγαλύτερη από 10 μοίρες δίνονται εντολές στις δύο μηχανές με επαναληπτικό τρόπο. Μόλις οι διαφορά της κατεύθυνσης του σκάφους και την κατεύθυνσης στόχου γίνει μικρότερη από 10 οι εντολές στροφής δίνονται ανά 1 δευτερόλεπτο έτσι ώστε να επιτευχθεί μεγάλη ακρίβεια με περιθώριο λάθους 1-2 μοίρες.

Για να κινηθεί το σκάφος προς δοθέντες συντεταγμένες αρχικά υπολογίζεται η γωνία στην οποία πρέπει να στρίψει το σκάφος έτσι ώστε να έχει κατεύθυνση τη θέση στόχο. Αυτή η γωνία υπολογίζεται από την κλίση της ευθείας που ενώνει τα δύο σημεία. Στη συνέχεια, το σκάφος στρίβει με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω και κατευθύνεται ευθεία ώσπου η ευκλείδεια απόσταση των δύο σημείων να μηδενιστεί.

Όλες οι παραπάνω λειτουργίες έχουν υλοποιηθεί σε ρουτίνες python.



Figure 11 Κίνηση προς σημείο στόχος

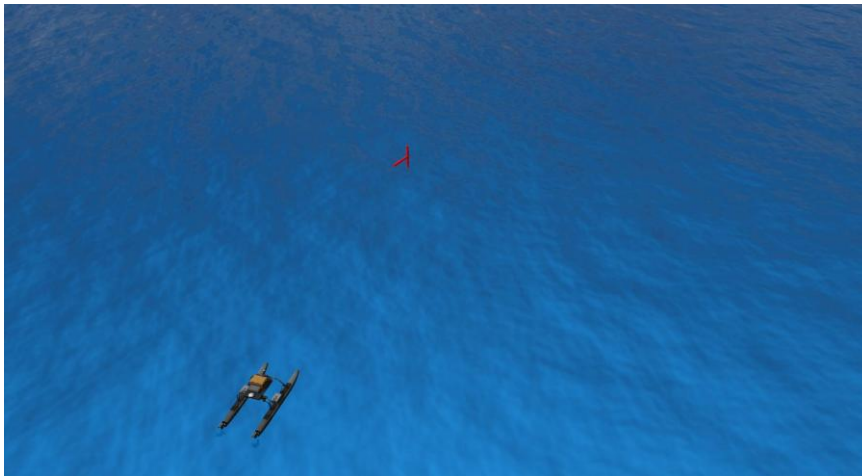


Figure 12 Κίνηση προς σημείο στόχος

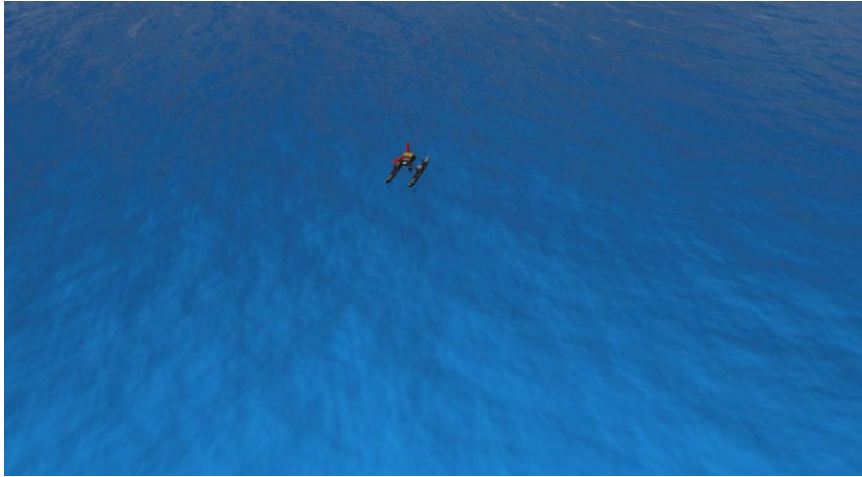


Figure 13 Κίνηση προς σημείο στόχος

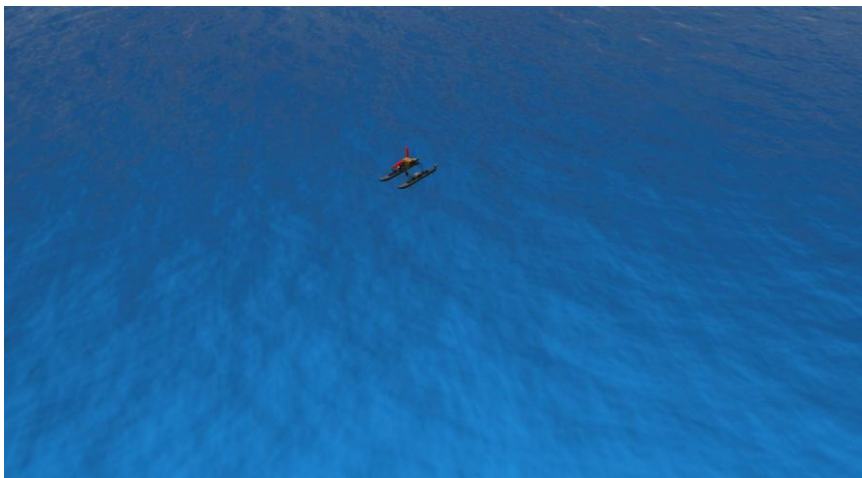


Figure 14 Κίνηση προς σημείο στόχος

## 5.2 Αποφυγή εμποδίων

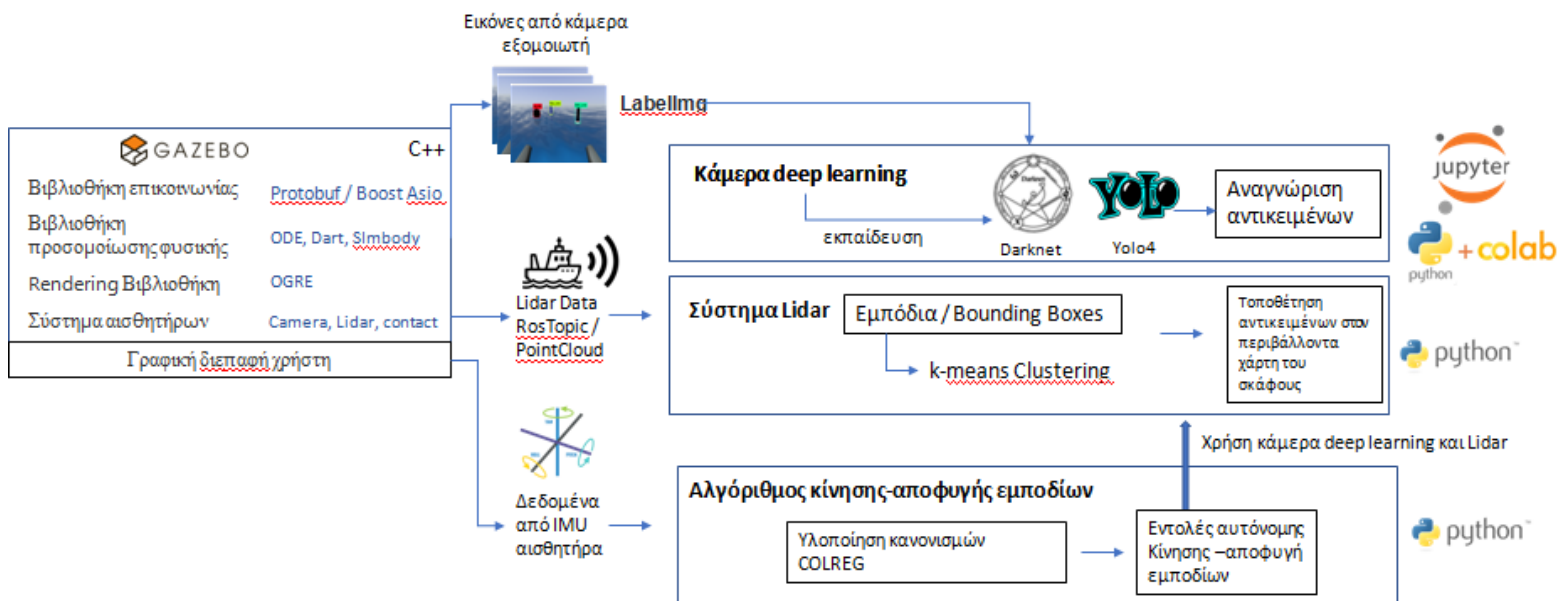
Κατά τη διάρκεια της διαδρομής του, το σκάφος θα συναντήσει άλλα σκάφη με τα οποία θα πρέπει να αλληλεπιδράσει έτσι ώστε να αποφευχθεί μια σύγκρουση. Οι κινήσεις και οι ελιγμοί που θα γίνουν θα πρέπει να συμφωνούν με τους κανόνες COLREG έτσι ώστε να υπάρχει ασφάλεια. Για να συμβεί αυτό, το σκάφος κατά τη διάρκεια μιας διαδρομής του από ένα σημείο σε ένα άλλο καλεί κάθε στιγμή μια συνάρτηση η οποία αποφασίζει πώς πρέπει να κινηθεί το σκάφος.

Η συνάρτηση αυτή, αρχικά, παίρνει και ενώνει τα δεδομένα από την κάμερα και το lidar με τον τρόπο που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Στη συνέχεια, εφόσον εντοπίσει κάποιο σκάφος ξαναπαίρνει ένα στιγμιότυπο των δεδομένων από τους δύο αισθητήρες. Συγκρίνοντας τα δύο στιγμιότυπα, αποφασίζει προς τα πού κινείται το άλλο σκάφος ή αν είναι ακίνητο και στη συνέχεια, από το δεύτερο στιγμιότυπο γνωρίζει και τη θέση του σε σχέση με το σκάφος. Με αυτό τον τρόπο, η συνάρτηση επιστρέφει την περίπτωση στην οποία βρίσκεται το σκάφος.

Τελικά, η βασική συνάρτηση που τρέχει στο σκάφος, ανάλογα με την απόφαση που θα της επιστραφεί, είτε θα σταματήσει το σκάφος, είτε θα συνεχίσει την πορεία του, είτε θα κάνει έναν δεξί ελιγμό αποφυγής και επαναφοράς στην πορεία του. Ο ελιγμός περιλαμβάνει μια στροφή 45 μοιρών δεξιά (όσο και το οπτικό πεδίο της κάμερας), κίνηση ευθεία και στη συνέχεια επαναυπολογισμός πορείας προς το σημείο-στόχος.

Όλος ο αλγόριθμος έχει υλοποιηθεί σε ρουτίνες `python` όπου η βασική συνάρτηση έχει ως παραμέτρους τις συντεταγμένες που ζητείται να κινηθεί το σκάφος. Τα `python scripts` λειτουργούν μέσα από κόμβους(`nodes`) που ξεκινούν σε κάθε εκτέλεση στο ROS του σκάφους. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η επικοινωνία και η άντληση δεδομένων από τα `ROSTopics` των μηχανών και των αισθητήρων.

## 6. Αρχιτεκτονική Συστήματος



Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η συνολική αρχιτεκτονική που ακολούθησα στη διπλωματική εργασία. Υπάρχουν 4 στάδια:

- Διαμόρφωση προσομοιωτή, ρύθμιση και εξοπλισμός σκάφους. Έγινε επιλογή αισθητήρων και παραμετροποίηση τους, δημιουργήθηκαν προσαρμοσμένα θαλάσσια περιβάλλοντα στον προσομοιωτή για τους σκοπούς της εργασίας.
- Ανάπτυξη συστήματος αναγνώρισης αντικειμένων από την κάμερα. Έγινε εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου YoloV4 με εικόνες που συλλέχθηκαν από τον προσομοιωτή, ρύθμιση παραμέτρων και προσαρμογή του framework έτσι ώστε να λειτουργεί στο ROS του σκάφους
- Ανάπτυξη συστήματος μέτρησης απόστασης και γωνίας με χρήση LIDAR. Το σύστημα λειτουργεί με βάση τα δεδομένα από την κάμερα και δημιουργεί έναν χάρτη των αντικειμένων που βρίσκονται γύρω από το σκάφος
- Ανάπτυξη αλγορίθμων κίνησης και αποφυγής εμποδίων. Οι αλγόριθμοι χρησιμοποιούν τα δεδομένα από τους αισθητήρες και πλοηγούν το σκάφος με βάση τους ναυτικούς κανόνες στις δοθέντες συντεταγμένες.



## 7. Use Cases του αλγόριθμου πλοήγησης

Στο πλαίσιο της διπλωματικής πραγματοποιήθηκαν μια σειρά από σενάρια χρήσης του αλγορίθμου πλοήγησης που αναπτύχθηκε. Πιο συγκεκριμένα στις εικόνες, το σκάφος με το πορτοκαλί κουτί στο επάνω μέρος αποτελεί το σκάφος που εξοπλίζεται με τους αισθητήρες και είναι προγραμματισμένο με τον αλγόριθμο. Τα υπόλοιπα σκάφη αποτελούν απλά σκάφη που ακολουθούν συγκεκριμένες τροχιές.

### 7.1 Κίνηση με εφαρμογή κανόνων



Figure 15



Figure 16



Figure 17



Figure 18

Στη περίπτωση αυτή (figure 15-18) το ξένο σκάφος κινείται από αριστερά προς τα δεξιά. Το σκάφος αναγνωρίζει την κατάσταση στην οποία βρίσκεται και συνεχίζει τη πορεία του σύμφωνα με τους κανόνες (figure 10). Το ξένο σκάφος σταματά την πορεία του έως ότου να μην υπάρχει κίνδυνος σύγκρουσης.



Figure 19



Figure 20



Figure 21



Figure 22

Αντίστοιχα στη περίπτωση (figure 19-22) αυτή το ξένο σκάφος κινείται από δεξιά προς τα αριστερά. Σύμφωνα με τους κανόνες το σκάφος πρέπει είτε να περιμένει είτε να πραγματοποιήσει ελιγμό από την δεξιά πλευρά όπως και συμβαίνει. Το ξένο σκάφος δεν διακόπτει τη πορεία του.



Figure 23



Figure 24



Figure 25



Figure 26

Στη συγκεκριμένη περίπτωση (figure 23-26) το σκάφος διασταυρώνεται με ένα ξένο σκάφος το οποίο κινείται σε αντίθετη πορεία. Στη περίπτωση αυτή το σκάφος κάνει έναν δεξί ελιγμό αποφυγής όπως υπαγορεύουν οι κανόνες και στη συνέχεια επιστρέφει στη πορεία του προς το σημείο στόχο.

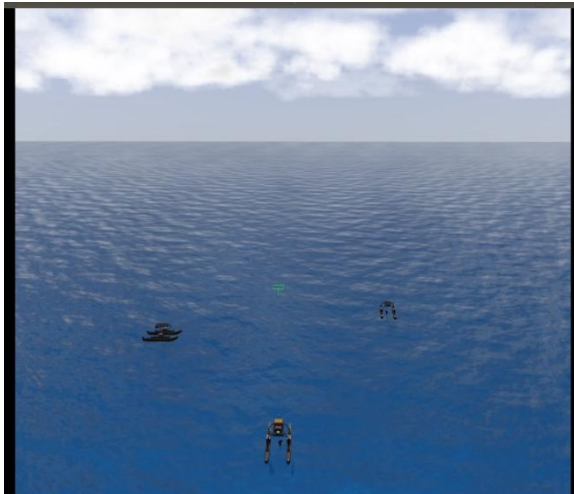


Figure 27

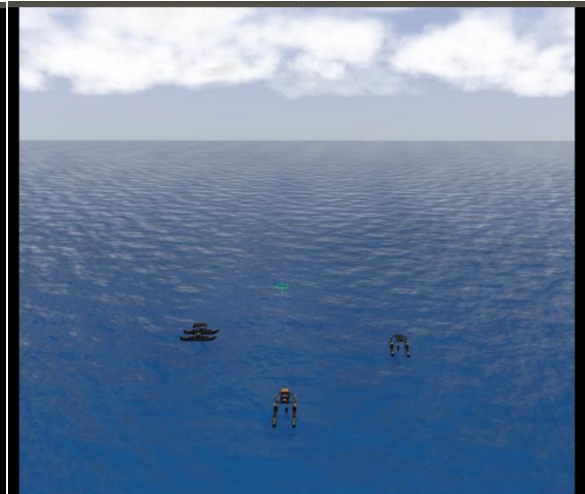


Figure 28

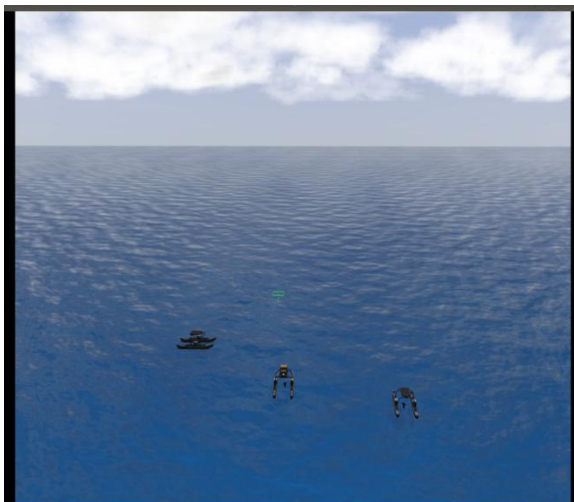


Figure 29

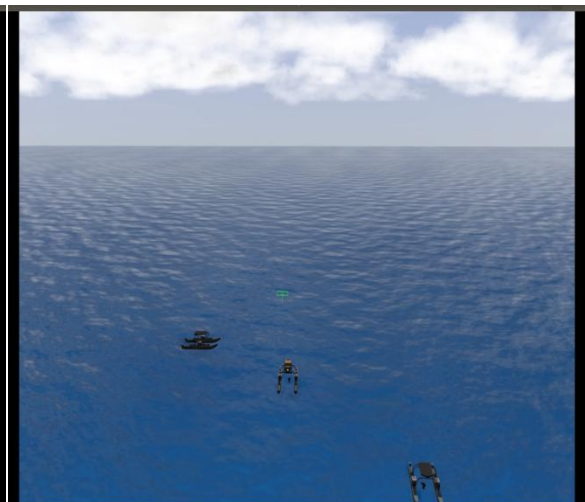


Figure 30

Στη παραπάνω περίπτωση το σκάφος εντοπίζει στη πορεία του δύο άλλα σκάφη. Το ένα βρίσκεται στο αριστερό του μέρος με πορεία προς τα δεξιά, ενώ το δεύτερο βρίσκεται μπροστά τους με αντίθετη πορεία αλλά χωρίς κίνδυνο σύγκρουσης. Το σκάφος σύμφωνα με τους κανόνες έχει προτεραιότητα και πρέπει να συνεχίσει τη πλεύση του, όπως και συμβαίνει.

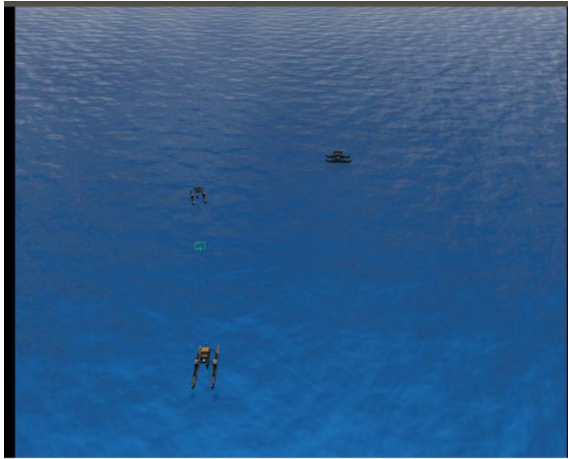


Figure 31

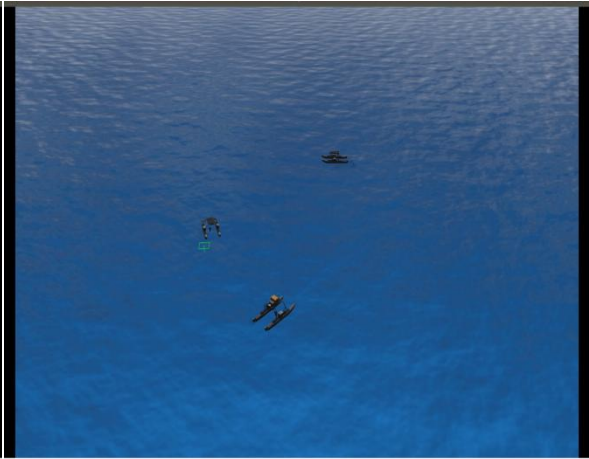


Figure 32

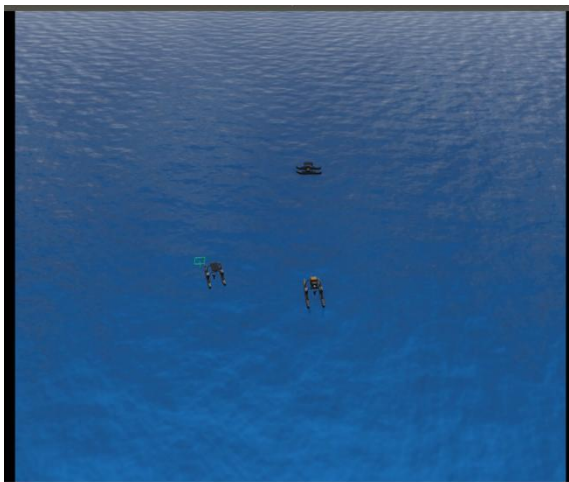


Figure 33

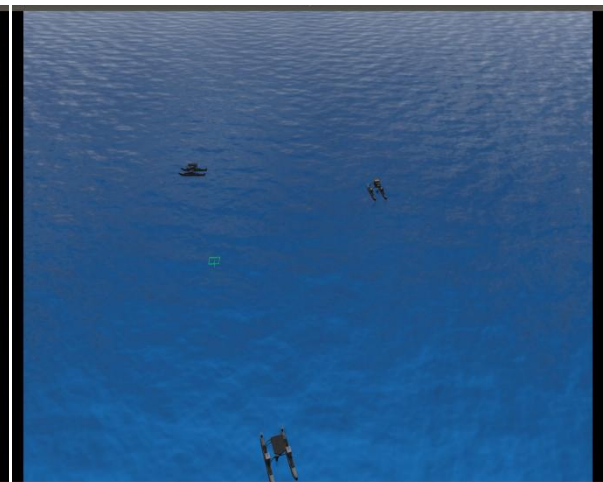


Figure 34

Στη παραπάνω περίπτωση πάλι το σκάφος διασταυρώνεται με δύο άλλα σκάφη. Αρχικά μπροστά του υπάρχει ένα σκάφος με πορεία αντίθετη και με κίνδυνο σύγκρουσης. Το σκάφος οφείλει να κάνει ελιγμό αποφυγής από δεξιά. Στη συνέχεια εντοπίζει στη πορεία του ακόμα ένα σκάφος το οποίο έρχεται από δεξιά του, με αποτέλεσμα να έχει προτεραιότητα. Οφείλει πάλι να πραγματοποιήσει ελιγμό αποφυγής. Όπως φαίνεται στις εικόνες το σκάφος εντόπισε σωστά τις συνθήκες και αντέδρασε σύμφωνα με τους κανόνες COLREGs αποφεύγοντας τη σύγκρουση.

## 8. Επίλογος-Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, στην παρούσα εργασία, υλοποιείται η δημιουργία και η μελέτη ενός αυτόνομου μη επανδρωμένου σκάφους το οποίο έχει τη δυνατότητα να μετακινηθεί με βάση συντεταγμένες που του δίνονται αλλά και να χρησιμοποιεί τους αισθητήρες του έτσι ώστε να κινείται με ασφάλεια και να αλληλεπιδρά με τα αντικείμενα ή τα σκάφη που μπορεί να συναντήσει στη θάλασσα. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση τεχνητής νοημοσύνης. Ακόμα, γίνεται μελέτη και υλοποίηση αξιοποίησης των αισθητήρων που χρειάζεται ένα σκάφος για να κινηθεί. Τέλος, έγινε επίδειξη της αποτελεσματικότητας της προσέγγισης σε ένα προσομοιωμένο θαλάσσιο περιβάλλον ενώ η υλοποίηση μπορεί κάλλιστα να λειτουργήσει σε πραγματικό περιβάλλον χωρίς τροποποιήσεις.

Είναι δεδομένο ότι ο συγκεκριμένος τομέας επιστημονικής μελέτης έχει ακόμα τεράστια περιθώρια ανάπτυξης και βελτιστοποίησης ωστόσο τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία δείχνουν ότι τα αυτόνομα σκάφη έχουν τεράστιες δυνατότητες έτσι ώστε να αποτελέσουν σημαντικό κομμάτι της ανθρώπινης καθημερινότητας και ενασχόλησης με τη ναυτιλία.

## 9. Αρχεία προσομοίωσης-Κώδικας

<https://github.com/dimosthenis8/AutonomousVessel.git>

Στον παραπάνω σύνδεσμο περιέχεται το συνολικό ROS sourcefile. Στον φάκελο station περιέχονται όλες οι ρουτίνες ργθηον που δημιουργήθηκαν ενώ ο φάκελος vrx αφορά τον προσομοιωτή και όλες τις παραμετροποιήσεις που του πραγματοποιήθηκαν.

## 10. Βιβλιογραφία

[1] Brian Bingham, Nicholas Kraus, Bruce M. Howe, Lee Freitag, Keenan Ball, Peter Koski, and Eric Gallimore. 2012. Passive and active acoustics using an autonomous wave glider. J. Field Robotics 29, 6 (2012), 911–923. <https://doi.org/10.1002/rob.21424>

[2] <http://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Autonomous-shipping.aspx>

[3] <http://www.emsa.europa.eu/mass.html>

[4] <https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/COLREG.aspx>

[5] Heesu Kim, Sang-Hyun Kim, Maro Jeon, JaeHak Kim, Soonseok Song, and Kwang-Jun Paik. 2017. A study on path optimization method of an unmanned surface vehicle under environmental loads using genetic algorithm. Ocean Engineering 142 (2017), 616 – 624. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.07.040>

[6] Lokukaluge Perera, Joao Carvalho, and Carlos Guedes Soares. 2009. Autonomous Guidance and Navigation based on the COLREGs rules and regulations of collision avoidance. Advanced Ship Design for Pollution Prevention (12 2009), 205–216. <https://doi.org/10.1201/b10565-26>

[7] Thomas Statheros, G. Howells, and K. McDonald-Maier. 2008. Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques. Journal of Navigation 61(2008), 129–142

[8] Chunhui Zhou, Shangding Gu, Yuanqiao Wen, Zhe Du, Changshi Xiao, Liang Huang, and Man Zhu. 2020. Motion planning for an unmanned surface vehicle based on topological position maps. Ocean Engineering 198 (2020), 106798. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106798>

[9] Yogang Singh, Sanjay Sharma, R. Sutton, and D Hatton. 2017. Optimal Path Planning of an Unmanned Surface Vehicle in a Real- Time Marine Environment using a Dijkstra Algorithm. 399–402. <https://doi.org/10.1201/9781315099132-70>

[10] Zheng Chen, Youming Zhang, Yougong Zhang, Yong Nie, Jianzhong Tang, and Shiqiang Zhu. 2019. A Hybrid Path Planning Algorithm for Unmanned Surface Vehicles in Complex Environment With Dynamic Obstacles. IEEE Access 7 (2019), 126439–126449. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2936689>

- [11] Wang Shaobo, Zhang Yingjun, and Li Lianbo. 2020. A collision avoidance decisionmaking system for autonomous ship based on modified velocity obstacle method. *Ocean Engineering* 215 (2020), 107910. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107910>
- [12] Yoshiaki Kuwata, Michael T. Wolf, Dimitri Zarghitzky, and Terrance L. Huntsberger. 2011. Safe maritime navigation with COLREGS using Velocity Obstacles. In 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2011, San Francisco, CA, USA, September 25-30, 2011. IEEE, 4728–4734. <https://doi.org/10.1109/IROS.2011.6094677>
- [13] Yanlong Wang, Xuemin Yu, Xu Liang, and Baoan Li. 2018. A COLREGs-based obstacle avoidance approach for unmanned surface vehicles. *Ocean Engineering* 169 (2018), 110 – 124. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.09.012>
- [14] <https://github.com/P3TE/Autonomous-Surface-Vehicle-Simulator>
- [15] <https://github.com/mathworks-robotics/awesome-matlab-robotics>
- [16] [https://github.com/disaster-robotics-proalertas/usv\\_sim\\_lsa](https://github.com/disaster-robotics-proalertas/usv_sim_lsa)
- [17] Brian Bingham and Carlos Agüero and Michael McCarrin and Joseph Klamo and Joshua Malia and Kevin Allen and Tyler Lum and Marshall Rawson and Rumman Waqar, Toward Maritime Robotic Simulation in Gazebo, Proceedings of MTS/IEEE OCEANS Conference(2019)
- [18] <https://robotx.org/about/>
- [19] <http://gazebosim.org/>
- [20] V. K. Kukkala, J. Tunnell, S. Pasricha and T. Bradley, "Advanced Driver-Assistance Systems: A Path Toward Autonomous Vehicles," in *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 7, no. 5, pp. 18-25, Sept. 2018, doi: 10.1109/MCE.2018.2828440.
- [21] Joseph Redmon, Santosh Divvala, Ross Girshick, Ali Farhadi; You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection ; Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2016, pp. 779-788
- [22] YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection; Alexey Bochkovskiy and Chien-Yao Wang and Hong-Yuan Mark Liao; 2020; 2004.10934
- [23] <https://github.com/tzutalin/labelImg>
- [24] <https://research.google.com/colaboratory>
- [25] National Oceanic and Atmospheric Administration (26 February 2021). "What is LIDAR". oceanservice.noaa.gov. US Department of Commerce.
- [26] [http://docs.ros.org/en/noetic/api/sensor\\_msgs/html/msg/PointCloud2.html](http://docs.ros.org/en/noetic/api/sensor_msgs/html/msg/PointCloud2.html)
- [27] BERTONCELLO, Michele; WEE, Dominik. Ten ways autonomous driving could redefine the automotive world. *McKinsey & Company*, 2015, 6.



[28] Fuzhen Zhang, Quaternions and matrices of quaternions, Linear Algebra and its Applications, Volume 251, 1997, Pages 21-57, ISSN 0024-3795, [https://doi.org/10.1016/0024-3795\(95\)00543-9](https://doi.org/10.1016/0024-3795(95)00543-9).

[29] Joseph Redmon, Darknet: Open Source Neural Networks in C, <http://pjreddie.com/darknet/>

[30] Ryde, Julian, and Nick Hillier. "Performance of Laser and Radar Ranging Devices in Adverse Environmental Conditions." Journal of Field Robotics, vol. 26, no. 9, 2009, pp. 712–727., doi:10.1002/rob.20310.