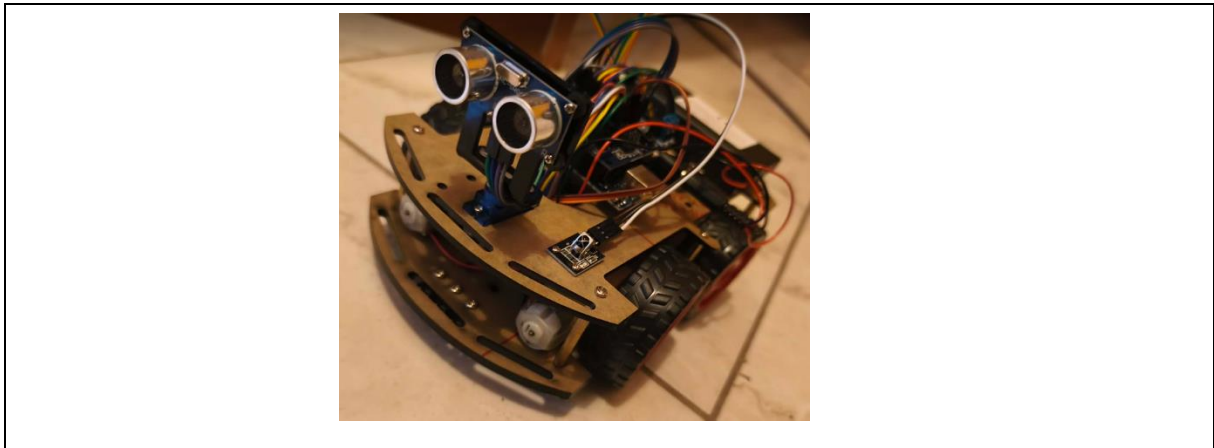


ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Ανάπτυξη Συστήματος Αντίληψης και Πλοήγησης για  
Αυτόνομο Όχημα»



Του φοιτητή  
Σωτηράκογλου Παναγιώτη  
Αρ. Μητρώου: 518146

Επιβλέπων  
Τσιντώτας Κωνσταντίνος

30/05/2026

Ανάπτυξη Συστήματος Αντίληψης και Πλοήγησης για Αυτόνομο Όχημα  
Σωτηράκογλου Παναγιώτης  
Τσιντώτας Κωνσταντίνος  
30/5/2026

*Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως πτυχιακή εργασία, στο Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών.*

*Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Σωτηράκογλου Παναγιώτης που την εκπόνησε/αν. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.*

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητα και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

## Πρόλογος

Η παρούσα πτυχιακή εργασία με τίτλο «**Ανάπτυξη Συστήματος Αντίληψης και Πλοήγησης για Αυτόνομο Όχημα**» εκπονήθηκε ως το επιστέγασμα των προπτυχιακών μου σπουδών. Αντικείμενο της εργασίας είναι η μελέτη και η σχεδίαση ενός ολοκληρωμένου συστήματος που επιτρέπει σε ένα ρομποτικό όχημα να κινείται αυτόνομα, αναγνωρίζοντας το περιβάλλον του και λαμβάνοντας αποφάσεις πλοήγησης σε πραγματικό χρόνο, χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Στη σύγχρονη εποχή, η αυτόνομη κίνηση οχημάτων βρίσκεται στο επίκεντρο της τεχνολογικής αιχμής, με εφαρμογές που εκτείνονται από τις βιομηχανικές μεταφορές μέχρι την εξερεύνηση επικίνδυνων περιβαλλόντων. Η μεγαλύτερη πρόκληση σε τέτοια συστήματα έγκειται στη γεφύρωση δύο βασικών πυλώνων: της αντίληψης δηλαδή της ικανότητας συλλογής και ερμηνείας εξωτερικών ερεθισμάτων και της πλοήγησης, που αφορά τη σχεδίαση ασφαλών διαδρομών και την αποφυγή απρόοπτων εμποδίων. Θα προσεγγίσω το ζήτημα αυτό αναπτύσσοντας μια ευέλικτη και οικονομικά προσιτή αρχιτεκτονική, αποδεικνύοντας πώς η συνέργεια έξυπνου λογισμικού και κατάλληλων αισθητήρων μπορεί να προσφέρει αξιόπιστη αυτόνομη συμπεριφορά. Κλείνοντας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου για την πολύτιμη καθοδήγηση και την υποστήριξή του κατά την εκπόνηση της εργασίας.

## Περίληψη

Στο **πρώτο κεφάλαιο** πραγματοποιείται μια εισαγωγή στο ευρύ πεδίο της ρομποτικής, αποτυπώνοντας την ιστορική εξέλιξη των αυτόνομων συστημάτων και τις σύγχρονες τάσεις της τεχνολογίας. Στο **δεύτερο κεφάλαιο** αναπτύσσεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση, αναλύοντας τις υφιστάμενες τεχνολογίες πλοήγησης και ορίζοντας το κεντρικό ερευνητικό πρόβλημα: την ανάγκη για ασφαλή κίνηση σε δυναμικά περιβάλλοντα, τις προκλήσεις στη συγχώνευση δεδομένων των αισθητήρων, τον ακριβή εντοπισμό θέσης και τους υπολογιστικούς περιορισμούς πραγματικού χρόνου. Το **τρίτο κεφάλαιο** είναι αφιερωμένο στην πρακτική υλοποίηση. Περιγράφεται η ηλεκτρομηχανική συναρμολόγηση του οχήματος (ακρυλικό σασί, τέσσερις κινητήρες DC, L298N driver, Arduino Uno R3 και Sensor Shield V5), καθώς και η μεθοδολογία του κώδικα. Η αρχιτεκτονική του λογισμικού βασίζεται σε μια Μηχανή Πεπερασμένων Καταστάσεων και σε τεχνικές μη αποκλειόμενου κώδικα για τον ταυτόχρονο έλεγχο των υποσυστημάτων. Στο **τέταρτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία. Μέσα από δοκιμές σε ελεγχόμενη πίστα, επαληθεύεται το κύριο σενάριο: το όχημα ακολουθεί μια μαύρη γραμμή (μέσω τριών αισθητήρων IR), ανιχνεύει αυτόνομα εμπόδια (μέσω αισθητήρα υπερήχων και σερβοκινητήρα), εκτελεί ελιγμό παράκαμψης και ανακτά επιτυχώς την αρχική του τροχιά, επιτυγχάνοντας ποσοστό επιτυχίας 85%. Τέλος, το **πέμπτο κεφάλαιο** συνοψίζει τα τελικά συμπεράσματα, αναγνωρίζοντας τους περιορισμούς του υλικού (ευαισθησία στο φως, απουσία οδομετρίας) και αναλύοντας τη σχέση κόστους-απόδοσης. Παράλληλα, εξετάζεται ο κοινωνικός αντίκτυπος στην εφοδιαστική αλυσίδα και τις έξυπνες πόλεις, αποτιμώνται τα προσωπικά μαθησιακά οφέλη και προτείνεται ως μελλοντική έρευνα η αναβάθμιση του συστήματος με τεχνολογίες υπολογιστικής όρασης, αισθητήρες LiDAR και το Λειτουργικό Σύστημα Ρομπότ.

# «Development of a Perception and Navigation System for an Autonomous Vehicle»

(στην αγγλική γλώσσα)

«Panagiotis Sotirakoglou»

(στην αγγλική γλώσσα)

## Abstract

In the **first chapter**, an introduction to the broad field of robotics is provided, mapping out the historical evolution of autonomous systems and contemporary technological trends. The **second chapter** expands upon the literature review, analyzing existing navigation technologies and defining the core research problem: the necessity for safe motion in dynamic environments, challenges in sensor data fusion, precise localization, and real-time computational constraints. The **third chapter** is dedicated to the practical implementation. It describes the electromechanical assembly of the vehicle (acrylic chassis, four DC motors, L298N driver, Arduino Uno R3, and Sensor Shield V5), as well as the coding methodology. The software architecture is based on a Finite State Machine and non-blocking code techniques to achieve concurrent control over the subsystems. The **fourth chapter** presents the experimental procedure. Through testing on a controlled track, the main scenario is verified: the vehicle follows a black line (via three IR sensors), autonomously detects obstacles (via an ultrasonic sensor and a servo motor), executes a bypass maneuver, and successfully recovers its initial trajectory, achieving a success rate of 85%. Finally, the **fifth chapter** summarizes the final conclusions, acknowledging hardware limitations (ambient light sensitivity, lack of odometry) and analyzing the cost-benefit ratio. Furthermore, it examines the social impact on logistics and smart cities, evaluates the personal learning outcomes, and proposes upgrading the system with computer vision technologies, LiDAR sensors, and the Robot Operating System (ROS) as future work.

# Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	iii
Περίληψη.....	iv
Abstract .....	v
Περιεχόμενα .....	vi
Συντομογραφίες.....	viii
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή και Ιστορική Αναδρομή στα Αυτόνομα Οχήματα .....	1
1.1 Ρομποτική: Η Σύγκλιση Επιστήμης και Τεχνολογίας.....	1
1.2 Η Βιομηχανική Επανάσταση και η Εμφάνιση των Πρώτων Ρομπότ.....	2
1.3 Η Εξέλιξη προς την Τεχνητή Νοημοσύνη και την Αυτονομία .....	3
1.4 Το Μέλλον της Ρομποτικής: Αυτονομία, Ηθική και Κοινωνικός Αντίκτυπος.....	5
1.5 Η Ηθική της Καινοτομίας: Επαναπροσδιορίζοντας την Ανάπτυξη με Επίκεντρο τον Άνθρωπο	5
1.6 Σύγχρονες τάσεις και τεχνολογικές προκλήσεις .....	6
1.7 Το Ψηφιακό Πεπρωμένο: Η Άνοδος των Έξυπνων Μηχανών.....	6
Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό Υπόβαθρο, Υφιστάμενη Τεχνολογία και Ορισμός του Προβλήματος ...8	
2.1 Ιστορική Εξέλιξη και Μετάβαση στην Πλήρη Αυτονομία .....	8
2.1.1 Τεχνητή Νοημοσύνη και Προηγμένοι Αλγόριθμοι Λήψης Αποφάσεων.....	9
2.1.2 Ταυτόχρονος Εντοπισμός και Χαρτογράφηση (SLAM) .....	9
2.2 Προκλήσεις στην Περιβαλλοντική Αντίληψη και τη Συγχώνευση Δεδομένων (Sensor Fusion)	10
2.3 Το Πρόβλημα του Ακριβούς Εντοπισμού Θέσης και η Συσσώρευση Σφαλμάτων.....	11
2.4 Προστασία Δεδομένων και Επικοινωνίας Οχήματος με το Περιβάλλον (V2X).....	12
2.5 Ηθικά Διλήμματα, Νομικό Πλαίσιο Ευθύνης και Κοινωνική Αποδοχή. ....	13
Κεφάλαιο 3ο: Υλοποίηση του Αυτόνομου Συστήματος.....	15
3.1 Αρχιτεκτονική και Μεθοδολογία Ανάπτυξης του Ρομποτικού Οχήματος.....	15
3.2 Υλοποίηση του Κινηματικού Συστήματος: Ενσωμάτωση Κινητήρων και Πλακέτας Ελέγχου	16
3.3 Μηχανολογική Δομή: Συναρμολόγηση του Ακρυλικού Πλαισίου και του Συστήματος	16
3.4 Κεντρική Μονάδα Ελέγχου: Ενσωμάτωση και Ρόλος του Μικροελεγκτή Arduino Uno .....	17
3.5 Σύστημα Δυναμικής Περιβαλλοντικής Σάρωσης: Σερβοκινητήρας SG90 και Αισθητήρας	18
Υπερήχων .....	18

3.6	Σύστημα Οπτικής Αναγνώρισης Τροχιάς: Διάταξη Τριών Αισθητήρων Παρακολούθησης Γραμμής (Line Tracking Modules) .....	18
3.7	Διεπαφή Χρήστη και Απομακρυσμένος Έλεγχος: Ενσωμάτωση Δέκτη και Τηλεχειριστηρίου Υπερύθρων (IR) .....	19
3.8	Το Σύστημα Αντίληψης Εγγύτητας: Ανάλυση και Χρησιμότητα του Αισθητήρα LiDAR ..	19
3.9	Συστημική Ολοκλήρωση και Κεντρικός Κόμβος: Η Πλακέτα Arduino Uno R3 και η Ασπίδα Επέκτασης V5 (Sensor Shield V5.0).....	20
3.10	Μηχανή Πεπερασμένων Καταστάσεων στο Arduino IDE και Αλγοριθμική Μεθοδολογία Συστήματος Παρακολούθησης Γραμμής .....	21
3.11	Ολοκλήρωση της Κατασκευής Και Τεχνικές Μη Αποκλειόμενου Κώδικα .....	22
Κεφάλαιο 4ο:	Πειραματική Εφαρμογή και Επαλήθευση: Συνδυαστική Αυτόνομη Πλοήγηση σε Πραγματικές Συνθήκες.....	24
4.1	Εισαγωγή στο Πειραματικό Μέρος.....	24
4.2	Αξιολόγηση Μεμονωμένων Υποσυστημάτων .....	24
4.3	Το Κύριο Πειραματικό Σενάριο: Συνδυαστική Πλοήγηση και Παράκαμψη .....	27
Κεφάλαιο 5ο:	Τελικά Συμπεράσματα, Περιορισμοί και Μελλοντική Έρευνα .....	33
5.1	Σύνοψη Κεφαλαίου και Αποτίμηση της Πειραματικής Διαδικασίας.....	33
5.2	Περιορισμοί της Μελέτης και του Συστήματος .....	34
5.3	Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα και Επεκτάσεις.....	34
5.4	Πρακτικές Εφαρμογές και Επαγγελματική Ανάπτυξη .....	34
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		37
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΚΩΔΙΚΑΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ARDUINO.....		39

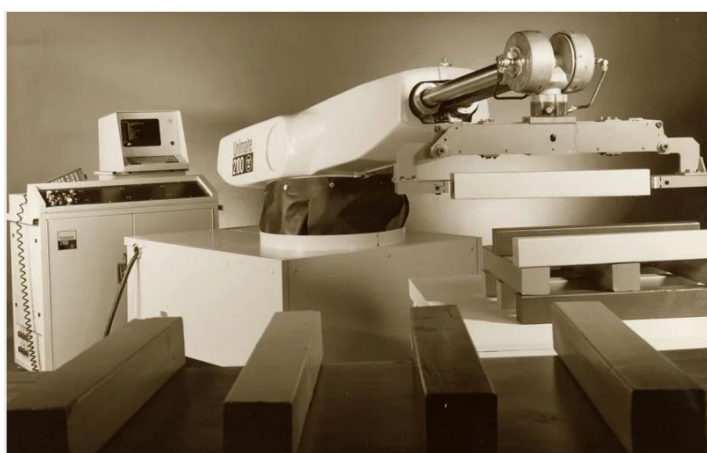
## Συντομογραφίες

ΔΠΠΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία
TN	Τεχνητή Νοημοσύνη

## Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή και Ιστορική Αναδρομή στα Αυτόνομα Οχήματα

### 1.1 Ρομποτική: Η Σύγκλιση Επιστήμης και Τεχνολογίας

Η ρομποτική αποτελεί έναν από τους πιο συναρπαστικούς και ταχέως εξελισσόμενους τομείς της σύγχρονης επιστήμης και τεχνολογίας. Ως διεπιστημονικός κλάδος, συνδυάζει τις αρχές της μηχανολογίας, της ηλεκτρονικής, της επιστήμης των υπολογιστών και της τεχνητής νοημοσύνης με σκοπό τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία αυτόνομων ή ημιαυτόνομων μηχανών. Τα ρομπότ δεν είναι πλέον απλά αποκυήματα της επιστημονικής φαντασίας, αλλά αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας και της παγκόσμιας οικονομίας, προσφέροντας λύσεις σε προβλήματα που απαιτούν ακρίβεια, ταχύτητα και αντοχή. Η ιστορία της ρομποτικής δεν ξεκίνησε με τις σύγχρονες



Εικόνα 1 R.U.R. (Rossum's Universal Robots)

μηχανές, αλλά με την αρχαία επιθυμία του ανθρώπου να δημιουργήσει αυτόνομες οντότητες. Από τα αυτόματα παιχνίδια του Ήρωνα της Αλεξάνδρειας και τις περίτεχνες μηχανικές συσκευές της Αναγέννησης, μέχρι τον "Μηχανικό Παίκτη" του Jacques de Vaucanson, η ιδέα της μίμησης της ζωής μέσω μηχανών απασχολούσε πάντα τη φαντασία. Ωστόσο, ο όρος "ρομπότ" εισήχθη μόλις το 1920 από τον Τσέχο συγγραφέα Karel Čapek στο θεατρικό του έργο "R.U.R." (Rossum's Universal Robots)(**Σφάλμα! Το αρχείο**

**προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**), προερχόμενος από την τσέχικη λέξη "robota", που σημαίνει "καταναγκαστική εργασία" [1]. Αυτή η περίοδος έθεσε τα θεωρητικά θεμέλια για ό,τι θα ακολουθούσε, αν και οι πρώτες πραγματικές ρομποτικές εφαρμογές ήταν ακόμα μακριά. Η δεκαετία του 1950 αποτέλεσε ένα κομβικό σημείο για την πρακτική εφαρμογή της ρομποτικής, με την εμφάνιση των πρώτων βιομηχανικών ρομπότ. Ο George Devol πατεντάρισε το "Universal Automation" το 1954, το οποίο αργότερα ονομάστηκε "Unimate". Μαζί με τον Joseph Engelberger, ίδρυσαν την πρώτη εταιρεία ρομποτικής στον κόσμο, την Unimation. Το 1961, το πρώτο Unimate εγκαταστάθηκε στην General Motors, εκτελώντας επικίνδυνες εργασίες σε γραμμές παραγωγής, όπως η συγκόλληση. Αυτή η εξέλιξη σηματοδότησε την αρχή μιας νέας εποχής για τη βιομηχανία, όπου τα ρομπότ μπορούσαν να αυξήσουν την παραγωγικότητα, να βελτιώσουν την ασφάλεια και να αναλάβουν μονότονες ή δυσάρεστες εργασίες, ανοίγοντας τον δρόμο για την αυτοματοποίηση των εργοστασίων [2].

Η ιστορική αυτή αναδρομή και η σταδιακή σύγκλιση της μηχανικής, των αισθητήρων και της υπολογιστικής ισχύος, λειτούργησαν ως ο καταλύτης που οδήγησε τη ρομποτική πέρα από τα στενά όρια των στατικών βιομηχανικών βραχιόνων, ανοίγοντας τον δρόμο για τη γέννηση των Αυτόνομων Κινητών Ρομπότ (Autonomous Mobile Robots - AMRs). Η ανάγκη των σύγχρονων εφαρμογών για ευελιξία επέβαλε τη μετάβαση από μηχανές που εκτελούσαν επαναλαμβανόμενες εργασίες σε ένα αυστηρά προγραμματισμένο, ελεγχόμενο σημείο, σε δυναμικά συστήματα ικανά να μετακινούνται και να αλληλεπιδρούν με το μεταβαλλόμενο περιβάλλον τους. Η εξέλιξη των αλγορίθμων εντοπισμού

θέσης και ταυτόχρονης χαρτογράφησης, σε συνδυασμό με την αρχιτεκτονική "Αίσθηση-Σκέψη-Δράση", επέτρεψε στα κινητά ρομπότ να απελευθερωθούν από τις εξωτερικές υποδομές καθοδήγησης (όπως οι μαγνητικές ταινίες στο δάπεδο). Πλέον, τα AMRs απέκτησαν την εσωτερική "νοημοσύνη" να αναγνωρίζουν τη θέση τους στον χώρο, να υπολογίζουν βέλτιστες διαδρομές σε πραγματικό χρόνο και να διαχειρίζονται την αβεβαιότητα μη δομημένων περιβαλλόντων, βρίσκοντας άμεση εφαρμογή σε έξυπνες αποθήκες, στη βιομηχανική εφοδιαστική αλυσίδα και σε αποστολές έρευνας και διάσωσης.

Αυτή η τεχνολογική ωριμότητα των κινητών ρομπότ μεταφέρθηκε αναλογικά σε μεγαλύτερη κλίμακα, τροφοδοτώντας τη ραγδαία ανάπτυξη των σύγχρονων αυτόνομων οχημάτων. Η μετάβαση από το εργαστηριακό περιβάλλον στους δημόσιους δρόμους απαίτησε μια άνευ προηγουμένου αναβάθμιση των συστημάτων αντίληψης, η οποία επιτεύχθηκε μέσω της σύντηξης δεδομένων από πολλαπλές πηγές, όπως διατάξεις LiDAR, κάμερες υπολογιστικής όρασης και αισθητήρες υπερήχων. Τα αυτόνομα οχήματα αποτελούν σήμερα την αιχμή του δόρατος της εφαρμοσμένης ρομποτικής, καθώς καλούνται να επιλύσουν το εξαιρετικά σύνθετο πρόβλημα της ασφαλούς συνύπαρξης με τον άνθρωπο σε συνθήκες έντονης κυκλοφοριακής ροής. Η ενσωμάτωση βαθιάς μηχανικής μάθησης και δικτύων επιτρέπει στα οχήματα αυτά όχι μόνο να αποφεύγουν στατικά εμπόδια, αλλά να προβλέπουν τη συμπεριφορά των πεζών και των λοιπών οδηγών. Κατά αυτόν τον τρόπο, η εξέλιξη της ρομποτικής ολοκλήρωσε έναν πλήρη κύκλο: από τα πρώτα απλά αυτόματα της αρχαιότητας και τους απομονωμένους βιομηχανικούς κλωβούς του 20ού αιώνα, πέρασε στην εποχή των ευφυών, αυτοκινούμενων συστημάτων, αναδιαμορφώνοντας ριζικά το μέλλον των παγκόσμιων μεταφορών και της αστικής κινητικότητας.

## 1.2 Η Βιομηχανική Επανάσταση και η Εμφάνιση των Πρώτων Ρομπότ

Κατά τη διάρκεια των δεκαετιών του 1970 και του 1980, η ρομποτική άρχισε να ενσωματώνει όλο και περισσότερο στοιχεία τεχνητής νοημοσύνης και πιο προηγμένους αισθητήρες. Τα ρομπότ δεν περιορίζονταν πλέον σε απλές, επαναλαμβανόμενες κινήσεις, αλλά μπορούσαν να "αντιλαμβάνονται" το περιβάλλον τους και να εκτελούν πιο σύνθετες εργασίες. Αναπτύχθηκαν ρομπότ με όραση, ικανά να αναγνωρίζουν αντικείμενα, ενώ η ρομποτική άρχισε να βρίσκει εφαρμογές πέρα από τη βιομηχανία, όπως στην ιατρική (π.χ. χειρουργικά ρομπότ) και στην εξερεύνηση του διαστήματος [3]. Η ανάπτυξη αλγορίθμων ελέγχου και μηχανικής μάθησης προσέφερε στα ρομπότ μεγαλύτερη ευελιξία και προσαρμοστικότητα.

Παράλληλα με την εξέλιξη των επίγειων συστημάτων, η ανάγκη για αυτονομία επεκτάθηκε γρήγορα και στον αέρα, με τις ρίζες των πρώτων μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAV), γνωστών σήμερα ως **Drones**, να τοποθετούνται επίσης στην περίοδο του Πρώτου Παγκοσμίου Πολέμου. Η αρχή έγινε με το βρετανικό "**Aerial Target**" το 1917, ένα μικρό αεροσκάφος που ελεγχόταν με υποτυπώδη ραδιοκύματα, ενώ σχεδόν ταυτόχρονα στις ΗΠΑ αναπτύχθηκε το "**Kettering Bug**" (1918). Το



Figure 2 Βασίλισσα Μέλισσα

τελευταίο, σχεδιασμένο από τον Charles Kettering με σύμβουλο τον Orville Wright, ήταν μια «ιπτάμενη τ'ορπίλη» που πετούσε αυτόνομα χάρη σε ένα εσωτερικό γυροσκόπιο και πνευματικούς αυτοματισμούς, προγραμματισμένη να ρίχνει τα φτερά της και να πέφτει ως βόμβα μόλις έφτανε στον στόχο. Παρά τις επιτυχημένες δοκιμές, κανένα από αυτά δεν χρησιμοποιήθηκε σε μάχη τότε. Ο ίδιος ο όρος "**Drone**" (κηφήνας) γεννήθηκε επίσημα τη δεκαετία του 1930 στη Μεγάλη Βρετανία,

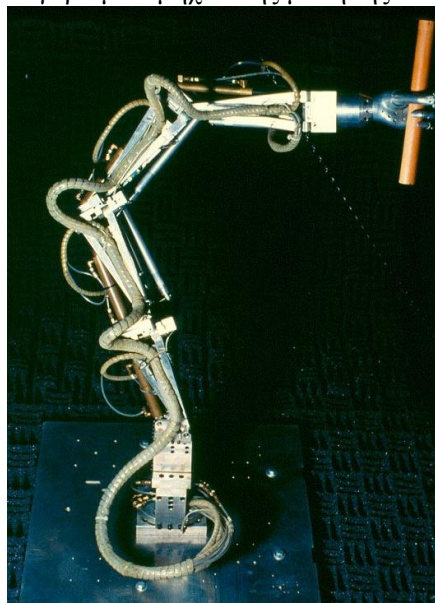
εμπνευσμένος από το τηλεκατευθυνόμενο αεροσκάφος-στόχο **"DH.82B Queen Bee"** (Βασίλισσα Μέλισσα) (Figure ), θέτοντας τις βάσεις για τη σύγχρονη αεροπορική ρομποτική.

Αν και η ιδέα της αυτοματοποιημένης κίνησης υπήρχε ως θεωρία, οι πρώτες ουσιαστικές δοκιμές ξεκίνησαν τις δεκαετίες του 1920 και 1930. Το 1925, το όχημα "American Wonder" της Houdina Radio Control παρουσιάστηκε στους δρόμους της Νέας Υόρκης ως ένα αυτοκίνητο που ελεγχόταν εξ αποστάσεως μέσω ραδιοκυμάτων από ένα δεύτερο όχημα που ακολουθούσε, προκαλώντας δέος στο κοινό. Λίγο αργότερα, στην έκθεση Futurama της General Motors το 1939, ο σχεδιαστής Norman Bel Geddes παρουσίασε το όραμα αυτοκινητοδρόμων του μέλλοντος, όπου τα αυτοκίνητα θα καθοδηγούνταν αυτόματα από ηλεκτρομαγνητικά κυκλώματα ενσωματωμένα στο ίδιο το οδόστρωμα. Αυτές οι πρώτες απόπειρες βασίζονταν αποκλειστικά σε εξωτερικές υποδομές και όχι στην εσωτερική «νοημοσύνη» ή σε κάποιο αυτόνομο σύστημα αντίληψης του ίδιου του οχήματος.

Η μετάβαση σε οχήματα που αντιλαμβάνονται αυτόνομα το περιβάλλον τους με δικά τους μέσα έγινε τη δεκαετία του 1970 στην Ιαπωνία. Το 1977, το Μηχανολογικό Εργαστήριο Tsukuba δημιούργησε το πρώτο αυτόνομο αυτοκίνητο που δεν εξαρτιόταν από το οδόστρωμα, το οποίο χρησιμοποιούσε δύο κάμερες για να αναγνωρίζει ψηφιακά τις διαγραμμίσεις του δρόμου, επιτυγχάνοντας ταχύτητες έως 30 χλμ/ώρα. Τη δεκαετία του 1980, ο πρωτοπόρος Ernst Dickmanns και η ομάδα του στο Πανεπιστήμιο Bundeswehr του Μονάχου άλλαξαν ριζικά τα δεδομένα. Με το επαναστατικό πρότζεκτ "VaMoRs", ενσωμάτωσαν κάμερες και υπολογιστικά συστήματα σε ένα βαν της Mercedes-Benz, επιτρέποντάς του να οδηγεί αυτόνομα σε πραγματικές συνθήκες, εισάγοντας για πρώτη φορά στην παγκόσμια βιβλιογραφία την έννοια της «δυναμικής όρασης υπολογιστή»

### 1.3 Η Εξέλιξη προς την Τεχνητή Νοημοσύνη και την Αυτονομία

Η εξέλιξη της ρομποτικής προς την Τεχνητή Νοημοσύνη (TN) και την πλήρη αυτονομία αντιπροσωπεύει μια από τις πιο κομβικές μεταβάσεις στη σύγχρονη τεχνολογία. Αρχικά, τα ρομπότ ήταν δέσμια προκαθορισμένων εντολών και αυστηρά ελεγχόμενων περιβαλλόντων, εκτελώντας επαναλαμβανόμενες κινήσεις σε γραμμές παραγωγής. Σήμερα, η ενσωμάτωση προηγμένων αλγορίθμων μηχανικής μάθησης και δικτύων επιτρέπει στις μηχανές να «αντιλαμβάνονται» τον κόσμο



Εικόνα 3 Cobot 1968

μέσω αισθητήρων και όρασης υπολογιστή, μετατρέποντας τα ακατέργαστα δεδομένα σε έλλογη δράση. Η ουσιαστική διαφορά έγκειται στη μετάβαση από την απλή αυτοματοποίηση στην αυτονομία: την ικανότητα, δηλαδή, ενός συστήματος να λαμβάνει αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο και να προσαρμόζεται σε απρόβλεπτες συνθήκες χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση.

Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ενισχυτικής μάθησης [4] και της επεξεργασίας τεράστιου όγκου πληροφοριών, επιτρέποντας στα ρομπότ να πλοηγούνται σε δύσβατα εδάφη, να συνεργάζονται με ανθρώπους (cobots)(Εικόνα 3) [5] ή να διαχειρίζονται περίπλοκες εφοδιαστικές αλυσίδες. Καθώς η υπολογιστική ισχύς αυξάνεται, τα ρομπότ παύουν να είναι απλά εργαλεία και εξελίσσονται σε ευφυείς συνεργάτες, ικανούς να επιλύουν προβλήματα και να μαθαίνουν από τα λάθη τους. Η τάση αυτή δεν βελτιώνει μόνο την παραγωγικότητα, αλλά

επαναπροσδιορίζει τη σχέση μας με τη μηχανή, θέτοντας παράλληλα νέα ηθικά και κοινωνικά ερωτήματα για το μέλλον της εργασίας και της λήψης αποφάσεων [6]. Η ρομποτική έχει υπερβεί τα όρια των απομονωμένων βιομηχανικών κλωβών, περνώντας στη φάση των συνεργατικών και κοινωνικών ρομπότ.

Σε αντίθεση με τους παραδοσιακούς προκατόχους τους που λειτουργούσαν αυτόνομα και συχνά επικίνδυνα για τον άνθρωπο, τα cobots είναι σχεδιασμένα με εξελιγμένους αισθητήρες δύναμης και όρασης, επιτρέποντάς τους να εργάζονται «ώμο με ώμο» με το προσωπικό σε γραμμές παραγωγής, ενισχύοντας την ακρίβεια χωρίς να θυσιάζεται η ασφάλεια [7]. Αυτή η στροφή σηματοδοτεί μια νέα φιλοσοφία όπου η μηχανή δεν αντικαθιστά, αλλά συμπληρώνει την ανθρώπινη δεξιότητα.

Παράλληλα, τα κοινωνικά ρομπότ εισέρχονται δυναμικά σε τομείς όπως η υγεία, η εκπαίδευση και η εξυπηρέτηση πελατών. Εξοπλισμένα με Τεχνητή Νοημοσύνη και δυνατότητα επεξεργασίας φυσικής γλώσσας, μπορούν να αναγνωρίζουν ανθρώπινα συναισθήματα, να διατηρούν οπτική επαφή και να διεξάγουν απλούς διαλόγους. Στην παροχή φροντίδας, για παράδειγμα, χρησιμοποιούνται για τη συντροφιά ηλικιωμένων ή την υποστήριξη παιδιών με αναπτυξιακές προκλήσεις, προσφέροντας μια μορφή αλληλεπίδρασης που υπερβαίνει τη διεκπεραίωση μιας τεχνικής εργασίας [8]. Η πρόκληση πλέον δεν είναι μόνο η μηχανική αρτιότητα, αλλά η καλλιέργεια εμπιστοσύνης και η ομαλή ένταξη αυτών των οντοτήτων στον κοινωνικό ιστό, διασφαλίζοντας ότι η τεχνολογία παραμένει ανθρωποκεντρική και ηθικά ευθυγραμμισμένη με τις ανάγκες μας.

### 1.3.1 Εξειδίκευση και Ρόλος των Τεχνολογιών Αντίληψης

Οι αφηρημένες έννοιες της ΤΝ και της μηχανικής μάθησης εξειδικεύονται και παίρνουν τη μορφή ενός εφαρμοσμένου υπολογιστικού μοντέλου λήψης αποφάσεων. Ενώ η γενική βιβλιογραφία των συστημάτων υψηλής κλίμακας συχνά προϋποθέτει τη χρήση δικτύων και υπολογιστικής ισχύος νέφους (cloud computing), η παρούσα μελέτη εστιάζει στην πρακτική υλοποίηση της θεμελιώδους αλγοριθμικής αρχιτεκτονικής των αυτόνομων οχημάτων: στον **δυναμικό κύκλο «Αίσθηση - Σκέψη - Δράση»**.

Η σύνδεση της θεωρίας της αυτονομίας με την ανάπτυξη του συστήματος βασίζεται σε δύο κεντρικούς άξονες:

- **Η Μαθηματική Διαχείριση της Αντίληψης:** Η «νοημοσύνη» ενός αυτόνομου οχήματος ξεκινά από την ικανότητά του να μετατρέπει τις ασυνεχείς ροές ακατέργαστων δεδομένων του περιβάλλοντος χώρου σε έγκυρη γεωμετρική πληροφορία. Στην παρούσα εργασία, αυτό επιτυγχάνεται μέσω αλγορίθμων που υλοποιούν τη μέθοδο του χρόνου πτήσης και της ψηφιακής επεξεργασίας σημάτων. Η εφαρμογή αυτών των μαθηματικών μοντέλων επιτρέπει στο σύστημα να επιλύει το πρόβλημα της αβεβαιότητας του περιβάλλοντος σε πραγματικό χρόνο, εξασφαλίζοντας σταθερή ροή δεδομένων και ακριβή προσδιορισμό των ορίων του χώρου και της θέσης τυχόν εμποδίων.
- **Η Αλγοριθμική Λήψη Αποφάσεων και Πλοήγηση:** Στο επίπεδο της λήψης αποφάσεων, η φιλοσοφία της αυτονομίας πραγματώνεται μέσω ενός ντετερμινιστικού συστήματος ελέγχου, το οποίο προσομοιώνει τη βασική λογική συμπεριφοράς των αυτόνομων οχημάτων. Αντί για έναν γραμμικό, στατικό προγραμματισμό, ο αναπτυχθείς αλγόριθμος αξιολογεί συνεχώς τις συνθήκες του πεδίου και καλείται να επιλύσει προβλήματα βελτιστοποίησης τροχιάς. Όταν το σύστημα αναγνωρίσει μια κατάσταση κινδύνου (ύπαρξη εμποδίου), διακόπτει την τρέχουσα αποστολή του και σχεδιάζει μια νέα, δυναμική γεωμετρία παράκαμψης. Η λήψη αποφάσεων ολοκληρώνεται μέσω ενός κλειστού βρόχου ανατροφοδότησης όπου το όχημα, καθώς εκτελεί

τον ελιγμό, αναζητά και επανεντοπίζει αυτόματα την κύρια οδό πλοήγησης, αποδεικνύοντας την προσαρμοστικότητά του.

#### 1.4 Το Μέλλον της Ρομποτικής: Αυτονομία, Ηθική και Κοινωνικός Αντίκτυπος

Η ρομποτική βρίσκεται σε ένα μεταίχμιο, με τις δυνατότητες να είναι σχεδόν απεριόριστες. Η ανάπτυξη πλήρως αυτόνομων οχημάτων, ρομπότ για εξερεύνηση επικίνδυνων περιβαλλόντων, νανορομπότ για ιατρικές εφαρμογές και ρομπότ-συνοδών αποτελεί μέρος της τρέχουσας και μελλοντικής ατζέντας [9]. Ωστόσο, παράλληλα με τις τεχνολογικές προόδους, ανακύπτουν σημαντικά ηθικά και κοινωνικά ζητήματα. Η ρομποτική εγείρει ερωτήματα σχετικά με την απώλεια θέσεων εργασίας, την ασφάλεια, την ιδιωτικότητα, και τον ρόλο των ρομπότ στην ανθρώπινη κοινωνία. Η συνεχής εξέλιξη της ρομποτικής απαιτεί προσεκτική εξέταση αυτών των ζητημάτων για να διασφαλιστεί ότι η τεχνολογία θα εξυπηρετεί το ανθρώπινο συμφέρον και θα συμβάλλει σε ένα καλύτερο μέλλον.



Εικόνα 1 Μηχανική μάθηση

Ένας καθοριστικός παράγοντας για τη σύγχρονη άνθιση της ρομποτικής είναι η ενσωμάτωση της ΤΝ και της μηχανικής μάθησης (Εικόνα 4). Χάρη σε αυτές, τα ρομπότ μπορούν πλέον να "μαθαίνουν" από τις εμπειρίες τους, να αναγνωρίζουν αντικείμενα με μεγάλη ακρίβεια και να πλοηγούνται σε δυναμικά περιβάλλοντα χωρίς προκαθορισμένες διαδρομές. Αυτή η μετάβαση από τον αυστηρό προγραμματισμό στην ευφυή προσαρμοστικότητα είναι που

ξεκλειδώνει εφαρμογές όπως τα αυτόνομα οχήματα και τα ρομπότ διάσωσης [10]. Η σημασία της ρομποτικής επεκτείνεται και σε κοινωνικό-οικονομικό επίπεδο. Από τη μία πλευρά, υπόσχεται αυξημένη παραγωγικότητα, ασφάλεια σε επικίνδυνες εργασίες και βελτίωση της ποιότητας ζωής για άτομα με αναπηρίες. Από την άλλη, εγείρει σημαντικά ηθικά και κοινωνικά ερωτήματα σχετικά με την απασχόληση, την ασφάλεια των δεδομένων και την ευθύνη σε περίπτωση ατυχήματος. Η ισορροπία μεταξύ τεχνολογικής πρόοδου και κοινωνικής ευημερίας αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις της εποχής μας [11].

#### 1.5 Η Ηθική της Καινοτομίας: Επαναπροσδιορίζοντας την Ανάπτυξη με Επίκεντρο τον Άνθρωπο

Η επίτευξη μιας βιώσιμης ισορροπίας μεταξύ της ραγδαίας τεχνολογικής πρόοδου και της κοινωνικής ευημερίας αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις του 21ου αιώνα. Παρατηρείται ότι, οι καινοτομίες στην ΤΝ, τη βιοτεχνολογία και την αυτοματοποίηση υπόσχονται να λύσουν χρόνια προβλήματα, από τη διάγνωση ασθενειών έως την αντιμετώπιση της κλιματικής κρίσης, αυξάνοντας κατακόρυφα την παραγωγικότητα. Ωστόσο, η πρόοδος αυτή δεν μεταφράζεται αυτόματα σε καθολική ευημερία. Η ψηφιακή οικονομία ενέχει τον κίνδυνο να διευρύνει τις κοινωνικές ανισότητες, καθώς η πρόσβαση στις νέες τεχνολογίες και η κατοχή των απαραίτητων δεξιοτήτων γίνονται οι νέοι διαχωριστικοί παράγοντες μεταξύ των κοινωνικών στρωμάτων. Για να διασφαλιστεί ότι η τεχνολογία λειτουργεί ως μοχλός ανόδου για όλους, απαιτείται ένας επαναπροσδιορισμός της έννοιας της

ανάπτυξης, όπου η αποτελεσματικότητα των μηχανών δεν θα υπονομεύει την αξιοπρέπεια της ανθρώπινης εργασίας και τη συνοχή της κοινότητας.

Παράλληλα, η ηθική διάσταση της τεχνολογικής εξέλιξης είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την ψυχική και κοινωνική υγεία των πολιτών. Η ενσωμάτωση των αλγορίθμων στην καθημερινότητα επηρεάζει την ιδιωτικότητα, την ποιότητα των κοινωνικών σχέσεων και τον τρόπο που προσλαμβάνουμε την πληροφορία. Η πραγματική κοινωνική ευημερία προϋποθέτει ένα ισχυρό ρυθμιστικό πλαίσιο που θα θέτει τον άνθρωπο στο επίκεντρο του σχεδιασμού [12]. Αυτό σημαίνει ότι η καινοτομία πρέπει να συνοδεύεται από επενδύσεις στην παιδεία, την επανεπίδραση του εργατικού δυναμικού και τη διασφάλιση των ίσων ευκαιριών. Η ισορροπία επιτυγχάνεται όταν οι κοινωνίες δεν προσαρμόζονται παθητικά στις επιταγές της τεχνολογίας, αλλά την καθοδηγούν ενεργά μέσω δημοκρατικών διαδικασιών και ηθικών κανόνων. Τελικά, η τεχνολογική ισχύς αποκτά νόημα μόνο όταν μετατρέπεται σε «κοινωνικό κεφάλαιο», βελτιώνοντας την ποιότητα ζωής χωρίς να αφήνει κανέναν στο περιθώριο.

### 1.6 Σύγχρονες τάσεις και τεχνολογικές προκλήσεις

Η σύγχρονη ρομποτική διανύει μια περίοδο ραγδαίας εξέλιξης, καθοδηγούμενη από την ενσωμάτωση της ΤΝ και της μηχανικής μάθησης, που επιτρέπουν στα ρομπότ να μαθαίνουν, να προσαρμόζονται και να λαμβάνουν αυτόνομες αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο. Μια από τις κυρίαρχες τάσεις είναι η ανάπτυξη των συνεργατικών ρομπότ, τα οποία έχουν σχεδιαστεί για να εργάζονται με ασφάλεια δίπλα στους ανθρώπους, ενισχύοντας την παραγωγικότητα στη βιομηχανία και την εφοδιαστική αλυσίδα. Παράλληλα, παρατηρείται τεράστια άνθηση στη ρομποτική ιατρική, με συστήματα υψηλής ακρίβειας για χειρουργικές επεμβάσεις, καθώς και στα αυτόνομα οχήματα. Ωστόσο, αυτή η δυναμική πορεία συνοδεύεται από σημαντικές τεχνολογικές προκλήσεις.

Η ενεργειακή αυτονομία και η διάρκεια ζωής των μπαταριών αποτελούν εμπόδιο για την εκτέλεση παρατεταμένων εργασιών στο πεδίο. Επιπλέον, η ασφαλής πλοήγηση σε δυναμικά, μη δομημένα περιβάλλοντα απαιτεί τεράστια υπολογιστική ισχύ και εξαιρετικά προηγμένους αισθητήρες, αυξάνοντας το κόστος ανάπτυξης. Τέλος, η διασφάλιση της κυβερνοασφάλειας αυτών των συνδεδεμένων συστημάτων, καθώς και η επίλυση των ηθικών και νομικών ζητημάτων που προκύπτουν από την πλήρη αυτονομία τους, συνιστούν κρίσιμα στοιχεία που η επιστημονική κοινότητα καλείται να κερδίσει προκειμένου να ενσωματώσει ομαλά τη ρομποτική στην καθημερινότητά μας.

### 1.7 Εξέλιξη της Τεχνητής Νοημοσύνης και Εφαρμογές στη Ρομποτική

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εστιάζει στην επίλυση ενός θεμελιώδους προβλήματος της κινητής ρομποτικής: την ασφαλή και αποτελεσματική αυτόνομη πλοήγηση ενός οχήματος σε δυναμικά περιβάλλοντα, όπου η ανάγκη για ακριβή ιχνηλάτηση προκαθορισμένης πορείας συνυπάρχει με την ανάγκη ακαριαίας αποφυγής απρόβλεπτων φυσικών εμποδίων. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται μέσω του σχεδιασμού και της υλοποίησης ενός ολοκληρωμένου συστήματος κλειστού βρόχου, το οποίο καλείται να γεφυρώσει την ψηφιακή αντίληψη των αισθητήρων με τη μηχανική κίνηση, ελαχιστοποιώντας τον χρόνο επεξεργασίας και εξαλείφοντας τις ασυνέχειες κατά τη λήψη αποφάσεων στο πεδίο δοκιμών.

Για την πειραματική διερεύνηση και επαλήθευση των προτεινόμενων αλγορίθμων, αναπτύσσεται μια ευέλικτη ρομποτική πλατφόρμα τετρακινήτηριου οχήματος, η οποία βασίζεται στην αρχιτεκτονική ανοιχτού υλικού του μικροελεγκτή Arduino. Η αρχιτεκτονική της πλατφόρμας βασίζεται σε μια δομημένη διάταξη ελέγχου και ισχύος, η οποία υλοποιείται μέσω:

- **Του αισθητηριακού συστήματος υπερήχων, υπερέθρων και LiDAR VL53L0X**, το οποίο αναλαμβάνει τη συλλογή δεδομένων περιβάλλοντος και την εξάλειψη των τυφλών σημείων κοντινής απόστασης.

- **Της πλακέτας επέκτασης Sensor Shield V5.0**, η οποία λειτουργεί ως κεντρικός κόμβος για την καθαρή δρομολόγηση των σημάτων, την κοινή τροφοδοσία των αισθητήρων και τη σταθερή επικοινωνία μέσω του διαύλου I2C.
- **Του οδηγού ισχύος L298N**, ο οποίος αναλαμβάνει τη διαχείριση της εξωτερικής τροφοδοσίας και τον έλεγχο των τεσσάρων συνεχών κινητήρων ανά πλευρά, επιτρέποντας τη ρύθμιση της ταχύτητας μέσω διαμόρφωσης εύρους παλμού (PWM) και την εκτέλεση επιτόπιων στροφών.

Η κύρια συνεισφορά της εργασίας έγκειται στην επιτυχή ανάπτυξη και βαθμονόμηση ενός υβριδικού αλγορίθμου πλοήγησης, ο οποίος επιτρέπει στο όχημα να εκτελεί ομαλούς, προσαρμοστικούς ελιγμούς παράκαμψης με «γλυκές» γωνίες κλίσης και να επανεντοπίζει αυτόματα την πορεία του χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Επιπλέον, η εργασία προσφέρει μια αναλυτική μεθοδολογία πειραματικής αξιολόγησης του hardware, αποδεικνύοντας πώς ο σωστός διαχωρισμός των κυκλωμάτων ισχύος (κινητήρες) και ψηφιακού ελέγχου (αισθητήρες) σε ένα embedded σύστημα χαμηλού κόστους, μπορεί να παράγει αποτελέσματα υψηλής ακρίβειας και σταθερότητας.

Για την ολοκληρωμένη παρουσίαση του θέματος, η πτυχιακή εργασία δομείται στα επόμενα κεφάλαια ως εξής:

- **Κεφάλαιο 2 - Θεωρητικό Υπόβαθρο, Υφιστάμενη Τεχνολογία και Ορισμός του Προβλήματος:** Παρουσιάζεται η αναλυτική θεωρητική θεμελίωση των συστημάτων αυτόνομης οδήγησης, οι μέθοδοι ψηφιακής αντίληψης περιβάλλοντος και η μαθηματική ανάλυση της πλοήγησης και την κινηματική των οχημάτων.
- **Κεφάλαιο 3 - Υλοποίηση του Αυτόνομου Συστήματος:** Αναλύονται διεξοδικά όλα τα ηλεκτρονικά και μηχανικά εξαρτήματα που απαρτίζουν την πλατφόρμα, η συνδεσμολογία τους στο Sensor Shield, η λειτουργία της γέφυρας (L298N), οι προδιαγραφές των αισθητήρων και η διαδικασία χειροκίνητης βαθμονόμησης των ποτενσιόμετρων.
- **Κεφάλαιο 4 - Πειραματική Εφαρμογή και Επαλήθευση: Συνδυαστική Αυτόνομη Πλοήγηση σε Πραγματικές Συνθήκες:** Παρουσιάζεται η δομή του κώδικα στο περιβάλλον Arduino IDE, η λογική των συναρτήσεων κίνησης, οι βρόχοι αναμονής (while loops) για την επιστροφή στην τροχιά και το φιλτράρισμα του θορύβου των μετρήσεων.
- **Κεφάλαιο 5 - Τελικά Συμπεράσματα, Περιορισμοί και Μελλοντική Έρευνα:** Καταγράφεται η συμπεριφορά του οχήματος στην πίστα δοκιμών, παρατίθενται τα screenshots και τα δεδομένα από το Serial Monitor για κάθε αισθητήρα ξεχωριστά, και αναλύεται η απόκριση του ρομπότ κατά τον ελιγμό παράκαμψης.

## Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό Υπόβαθρο, Υφιστάμενη Τεχνολογία και Ορισμός του Προβλήματος

### 2.1 Ιστορική Εξέλιξη και Μετάβαση στην Πλήρη Αυτονομία

Η εξέλιξη των αυτόνομων οχημάτων αποτελεί έναν από τους πιο δυναμικούς τομείς της σύγχρονης μηχανικής και πληροφορικής, με τις ρίζες της να εντοπίζονται σε πρώιμα πειράματα των τελών του 20ού αιώνα. Σημαντικό ορόσημο στην πορεία αυτή αποτέλεσαν οι διαγωνισμοί DARPA Grand



Εικόνα 2 DARPA Grand Challenge

Challenges (Εικόνα 5), οι οποίοι επιτάχυναν την έρευνα και απέδειξαν τη βιωσιμότητα της αυτόνομης πλοήγησης σε πραγματικές συνθήκες [13]. Έκτοτε, η σύγχρονη βιβλιογραφία καταγράφει μια ραγδαία μετάβαση από τα απλά προηγμένα συστήματα υποβοήθησης οδήγησης (ADAS) σε πλήρως αυτόνομα συστήματα [14]. Η εξέλιξη αυτή έχει καταστεί εφικτή χάρη στην εκθετική αύξηση της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος και την ωρίμανση νέων μεθοδολογιών στον τομέα της ρομποτικής.

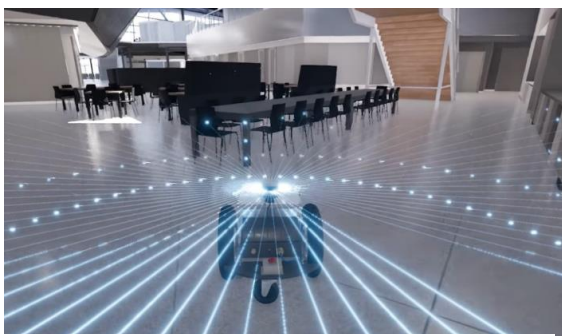
Στο επίκεντρο της αυτόνομης οδήγησης βρίσκεται το πρόβλημα της αντίληψης του περιβάλλοντος, το οποίο επιλύεται μέσω της συγχώνευσης δεδομένων από πολλαπλές πηγές. Ερευνητές τονίζουν διαρκώς τη σημασία συνδυασμού διαφορετικών τεχνολογιών, όπως οι αισθητήρες LiDAR για την ακριβή χαρτογράφηση βάθους, τα συστήματα Radar για την ανίχνευση αντικειμένων σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες, και οι κάμερες για την αναγνώριση χρωμάτων και σημάνσεων [15]. Η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι η βέλτιστη αρχιτεκτονική ενός ρομποτικού οχήματος απαιτεί την αρμονική συνεργασία και το φιλτράρισμα των ενδείξεων αυτών των αισθητήρων, συχνά μέσω εκτεταμένων φίλτρων Kalman, προκειμένου να δημιουργηθεί ένας αξιόπιστος τρισδιάστατος χάρτης του περιβάλλοντος χώρου σε πραγματικό χρόνο [16].

### 2.1.1 Τεχνητή Νοημοσύνη και Προηγμένοι Αλγόριθμοι Λήψης Αποφάσεων

Η επεξεργασία αυτού του τεράστιου όγκου δεδομένων βασίζεται πλέον πρωτίστως σε προηγμένους αλγόριθμους μηχανικής μάθησης και ιδιαίτερα στη βαθιά μάθηση. Μελέτες γύρω από τα συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα αποδεικνύουν την υπεροχή τους στη μηχανική όραση, την ταξινόμηση εικόνων και την ανίχνευση εμποδίων [17]. Παράλληλα, αλγόριθμοι σχεδιασμού διαδρομής και ενισχυτικής μάθησης χρησιμοποιούνται εκτενώς για την αποδοτική λήψη αποφάσεων [18]. Οι σύγχρονες ερευνητικές προσεγγίσεις εστιάζουν στη μείωση του υπολογιστικού φόρτου αυτών των πολύπλοκων μοντέλων, ώστε να μπορούν να εκτελούνται αποδοτικά σε ενσωματωμένα συστήματα με περιορισμένους πόρους ενέργειας και μνήμης. Για την ακαδημαϊκή έρευνα και την πειραματική επικύρωση των παραπάνω αλγορίθμων, η χρήση μικρής κλίμακας ρομποτικών οχημάτων έχει αναδειχθεί σε κυρίαρχη πρακτική. Σύμφωνα με τη σχετική αρθρογραφία, πλατφόρμες βασισμένες σε μικροελεγκτές (όπως το Arduino) ή μικροϋπολογιστές (όπως το Raspberry Pi), συχνά σε συνδυασμό με το Λειτουργικό Σύστημα Ρομπότ (ROS) [19], προσφέρουν ένα ιδανικό και κλιμακώσιμο περιβάλλον ανάπτυξης.

Αυτά τα μικρής κλίμακας μοντέλα επιτρέπουν στους ερευνητές να μελετήσουν τη συμπεριφορά της κινηματικής του οχήματος, τη δυναμική του ελέγχου (όπως οι ελεγκτές PID) και την απόκριση του λογισμικού σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα, προτού οι τεχνολογίες αυτές δοκιμαστούν σε αυτοκίνητα πραγματικού μεγέθους [20]. Παρά τις σημαντικές τεχνολογικές προόδους, η διεθνής βιβλιογραφία εξακολουθεί να υπογραμμίζει αρκετές ανοιχτές προκλήσεις που περιορίζουν την πλήρη αυτονόμηση. Προβλήματα όπως η ασφαλής πλοήγηση σε δυναμικά, απρόβλεπτα αστικά περιβάλλοντα, η ανθεκτικότητα των αλγορίθμων σε θόρυβο αισθητήρων και οι περιορισμοί απόδοσης σε πραγματικό χρόνο, παραμένουν αντικείμενα εντατικής μελέτης [21]. Η παρούσα πτυχιακή εργασία εντάσσεται ακριβώς σε αυτόν τον επιστημονικό διάλογο, επιχειρώντας να αναπτύξει και να αξιολογήσει ένα αυτόνομο ρομποτικό όχημα. Εστιάζοντας στην αποτελεσματική ενσωμάτωση αισθητήρων και τη βελτιστοποίηση του κώδικα πλοήγησης σε επίπεδο υλικού, η εργασία στοχεύει να προσφέρει μια πρακτική υλοποίηση που επιβεβαιώνει τα σύγχρονα θεωρητικά μοντέλα της ρομποτικής.

### 2.1.2 Ταυτόχρονος Εντοπισμός και Χαρτογράφηση (SLAM)



Εικόνα 3 Ταυτόχρονος εντοπισμός και χαρτογράφηση

Ο πυρήνας της αυτόνομης πλοήγησης σε άγνωστα περιβάλλοντα βασίζεται στην ικανότητα του ρομπότ να χαρτογραφεί τον χώρο, γνωρίζοντας ταυτόχρονα την ακριβή θέση του μέσα σε αυτόν. Η διεθνής βιβλιογραφία αναδεικνύει το πρόβλημα του Ταυτόχρονου Εντοπισμού και Χαρτογράφησης (Simultaneous Localization and Mapping - SLAM) (Εικόνα 6) ως έναν από τους θεμέλιους λίθους της σύγχρονης ρομποτικής [22]. Οι προσεγγίσεις χωρίζονται σε μεγάλο βαθμό ανάλογα με τον τύπο των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται, με το Visual SLAM (μέσω καμερών) και το LiDAR SLAM (μέσω αισθητήρων λέιζερ) να κυριαρχούν στην έρευνα [23]. Η βελτιστοποίηση αυτών των αλγορίθμων είναι κρίσιμη, καθώς απαιτείται να επιλύουν σύνθετα μαθηματικά προβλήματα μη γραμμικής βελτιστοποίησης, διατηρώντας παράλληλα χαμηλό υπολογιστικό κόστος για εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο.

Για την ακριβή εκτέλεση της σχεδιασμένης διαδρομής, η ακαδημαϊκή έρευνα δίνει ιδιαίτερη βαρύτητα στη μελέτη της κινηματικής και της δυναμικής του οχήματος. Διαφορετικές αρχιτεκτονικές, όπως τα ρομπότ διαφορικής οδήγησης σε σύγκριση με τα συστήματα διεύθυνσης τύπου Ackermann που προσομοιάζουν τα κανονικά αυτοκίνητα, απαιτούν εντελώς διαφορετικές προσεγγίσεις ελέγχου [24]. Στη σύγχρονη βιβλιογραφία, αλγόριθμοι προηγμένου ελέγχου, όπως ο Μοντελοποιημένος Προβλεπτικός Έλεγχος (Model Predictive Control - MPC), κερδίζουν συνεχώς έδαφος. Αυτοί οι ελεγκτές επιτρέπουν στο σύστημα να προβλέπει τη μελλοντική συμπεριφορά του οχήματος και να προσαρμόζει παραμέτρους όπως η ταχύτητα και η γωνία στροφής, λαμβάνοντας υπόψη τους φυσικούς περιορισμούς του συστήματος [25].

Μια συχνά παραγνωρισμένη, αλλά κρίσιμη πτυχή στη βιβλιογραφία των αυτόνομων ρομπότ, είναι η διαχείριση των ενεργειακών πόρων. Τα αυτόνομα οχήματα μικρής κλίμακας βασίζονται σε μπαταρίες περιορισμένης χωρητικότητας, οι οποίες καλούνται να τροφοδοτήσουν όχι μόνο τους κινητήρες, αλλά και τους ενεργοβόρους αισθητήρες και μικροεπεξεργαστές [29]. Ερευνητές πλέον επικεντρώνονται στον συν-σχεδιασμό υλικού και λογισμικού και στην ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών αλγορίθμων. Στόχος είναι η βελτιστοποίηση του υπολογιστικού φορτίου –για παράδειγμα, η εκτέλεση νευρωνικών δικτύων σε εξειδικευμένους επιταχυντές προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η αυτονομία του οχήματος χωρίς να θυσιάζεται η απόδοση σε πραγματικό χρόνο [30].

## 2.2 Προκλήσεις στην Περιβαλλοντική Αντίληψη και τη Συγχώνευση Δεδομένων (Sensor Fusion)

Η μετάβαση από τη συμβατική οδήγηση στην πλήρη αυτονομία των οχημάτων αποτελεί ένα από τα πιο φιλόδοξα και πολύπλοκα τεχνολογικά εγχειρήματα της σύγχρονης μηχανικής και επιστήμης των υπολογιστών. Αν και τα αυτόνομα οχήματα υπόσχονται ριζική μείωση των τροχαίων ατυχημάτων, βελτιστοποίηση της κυκλοφοριακής ροής και ελαχιστοποίηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, η υλοποίησή τους προσκρούει σε θεμελιώδη προβλήματα. Το κεντρικό πρόβλημα έγκειται στην ικανότητα του συστήματος να επιχειρεί με απόλυτη ασφάλεια σε άκρως δυναμικά, μη δομημένα και συχνά απρόβλεπτα περιβάλλοντα, τα οποία μεταβάλλονται διαρκώς.

Σε αντίθεση με τα ελεγχόμενα βιομηχανικά περιβάλλοντα όπου κινούνται τα παραδοσιακά ρομπότ, οι αστικοί δρόμοι χαρακτηρίζονται από ασύμμετρη γεωμετρία, απρόβλεπτη συμπεριφορά άλλων οδηγών ή πεζών και απουσία αυστηρών κανόνων που μπορούν να μοντελοποιηθούν με απόλυτη μαθηματική ακρίβεια. Ως εκ τούτου, η ανάπτυξη ενός συστήματος που θα μπορεί να κατανοεί αυτή την

πολυπλοκότητα και να αντιδρά κατάλληλα σε κλάσματα του δευτερολέπτου, παραμένει μια ανοιχτή και εξαιρετικά απαιτητική ερευνητική πρόκληση που χρήζει περαιτέρω διερεύνησης και συνεχόμενης βελτιστοποίησης. Μια από τις πιο κρίσιμες συνιστώσες του συνολικού προβλήματος είναι η αξιόπιστη περιβαλλοντική αντίληψη, δηλαδή η ικανότητα του οχήματος να «βλέπει» και να κατανοεί τον χώρο γύρω του την ίδια στιγμή, αυτό μπορεί να



Εικόνα 4 Σύντηξη αισθητήρα

πραγματοποιηθεί μέσω μίας σύνταξης αισθητήρων (Εικόνα 7). Τα σύγχρονα συστήματα βασίζονται σε μια ετερογενή συστοιχία αισθητήρων, όπως κάμερες, συστήματα LiDAR και ραντάρ, προκειμένου να συλλέγουν δεδομένα.

Το πρόβλημα εδώ εστιάζεται στην εγγενή αβεβαιότητα και τον θόρυβο αυτών των μετρήσεων, ειδικά υπό αντίξοες καιρικές συνθήκες (π.χ. πυκνή ομίχλη, καταρρακτώδης βροχή, χιόνι) ή σε ακραίες συνθήκες φωτισμού (έντονη αντανάκλαση ηλίου, απόλυτο σκοτάδι). Επιπρόσθετα, η διαδικασία της συγχώνευσης δεδομένων από διαφορετικές πηγές παρουσιάζει σημαντικές προκλήσεις, καθώς ο αλγόριθμος πρέπει να συσχετίσει χρονικά και χωρικά πληροφορίες με διαφορετικά χαρακτηριστικά και ρυθμούς ανανέωσης. Η εσφαλμένη ταξινόμηση ενός αντικειμένου, για παράδειγμα η σύγχυση μιας σκιάς με ένα πραγματικό εμπόδιο ή η αδυναμία ανίχνευσης ενός πεζού, μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφικά αποτελέσματα, καθιστώντας την ευρωστία της αντίληψης αδιαπραγμάτευτη απαίτηση.

### 2.3 Το Πρόβλημα του Ακριβούς Εντοπισμού Θέσης και η Συσσώρευση Σφαλμάτων

Στενά συνυφασμένο με την αντίληψη είναι το πρόβλημα του ακριβούς εντοπισμού θέσης του οχήματος εντός του περιβάλλοντος χώρου. Αν και τα παγκόσμια συστήματα πλοήγησης (όπως το GPS/GNSS) προσφέρουν μια βασική λύση, η ακριβειά τους υποβαθμίζεται δραματικά σε «αστικά φαράγγια» που δημιουργούνται από ψηλά κτίρια, σε σήραγγες ή σε περιοχές με πυκνή βλάστηση, λόγω της απώλειας του σήματος ή του φαινομένου των πολλαπλών διαδρομών. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, τα αυτόνομα οχήματα βασίζονται σε τεχνικές Ταυτόχρονου Εντοπισμού και Χαρτογράφησης (SLAM) σε συνδυασμό με οδομετρία και αδρανειακές μονάδες (IMU).

Η πρόκληση ωστόσο έγκειται στο γεγονός ότι τα συστήματα αυτά είναι επιρρεπή στη συσσώρευση σφαλμάτων σε βάθος χρόνου και απόστασης. Η διατήρηση ακρίβειας επιπέδου εκατοστού, η οποία είναι απολύτως αναγκαία για να διατηρηθεί το όχημα στη σωστή λωρίδα κυκλοφορίας και να αποφευχθούν συγκρούσεις, αποτελεί ένα εξαιρετικά σύνθετο μαθηματικό και αλγοριθμικό πρόβλημα, ειδικά σε περιβάλλοντα που δεν διαθέτουν έντονα ή σταθερά γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

Εφόσον το όχημα αντιληφθεί το περιβάλλον του και εντοπίσει τη θέση του με ακρίβεια, το επόμενο σκέλος του προβλήματος αφορά τον ασφαλή και αποδοτικό σχεδιασμό της τροχιάς του και την πλοήγηση. Ο σχεδιασμός αυτός δεν περιορίζεται απλώς στην εύρεση της συντομότερης διαδρομής μεταξύ δύο σημείων, αλλά κυρίως στην τοπική πλοήγηση και την αποφυγή εμποδίων σε πραγματικό χρόνο. Το σύστημα καλείται να διαχειριστεί την απρόβλεπτη δυναμική κινητών εμποδίων, όπως άλλα οχήματα, δίκυκλα, πεζοί ή ζώα, προβλέποντας τις μελλοντικές τους τροχιές. Το πρόβλημα περιπλέκεται περαιτέρω από την ανάγκη συμμόρφωσης με τους κανόνες οδικής κυκλοφορίας, τα όρια ταχύτητας και την αποφυγή απότομων ελιγμών που θα έθεταν σε κίνδυνο την άνεση και την ασφάλεια των επιβατών.

Η ισορροπία μεταξύ της επιθετικής (αλλά αποδοτικής) και της συντηρητικής (αλλά υπερβολικά αργής) οδήγησης, κατά τον σχεδιασμό της κίνησης, είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με πολλαπλούς και συχνά αντικρουόμενους περιορισμούς που πρέπει να επιλυθεί ακαριαία. Πέρα από τις αλγοριθμικές δυσκολίες, ένα κρίσιμο πρόβλημα που ανακύπτει αφορά τους υπολογιστικούς περιορισμούς και τις απαιτήσεις συστημάτων πραγματικού χρόνου. Η ταυτόχρονη εκτέλεση πολύπλοκων νευρωνικών δικτύων για την αναγνώριση αντικειμένων, η διαρκής ενημέρωση χαρτών υψηλής ανάλυσης, ο εντοπισμός θέσης και ο σχεδιασμός κίνησης, απαιτούν τεράστια επεξεργαστική ισχύ. Το αυτόνομο όχημα παράγει καθημερινά terabytes δεδομένων τα οποία πρέπει να επεξεργαστούν τοπικά για να διασφαλιστεί η απόκριση σε ελάχιστα χιλιοστά του δευτερολέπτου. Αυτή η ανάγκη δημιουργεί σοβαρά

προβλήματα που σχετίζονται με την κατανάλωση ενέργειας, την έκλυση θερμότητας και το βάρος του απαιτούμενου υλικού εξοπλισμού.

Η καθυστέρηση στην επεξεργασία των δεδομένων έστω και για μερικά κλάσματα του δευτερολέπτου μπορεί να έχει μοιραίες συνέπειες όταν ένα όχημα κινείται με υψηλές ταχύτητες στον αυτοκινητόδρομο. Επομένως, η βελτιστοποίηση του κώδικα και η αποδοτική κατανομή των υπολογιστικών πόρων δεν είναι απλώς τεχνικές λεπτομέρειες, αλλά κεντρικό πρόβλημα για την ομαλή και ασφαλή λειτουργία του συνολικού ρομποτικού συστήματος σε πραγματικές συνθήκες. Η ανάγκη για επεξεργασία δεδομένων στο άκρο του δικτύου εισάγει το επόμενο κρίσιμο ζήτημα: τον έλεγχο χαμηλού επιπέδου και τη δυναμική απόκριση του οχήματος. Ενώ ο σχεδιασμός τροχιάς καθορίζει τη θεωρητική πορεία, ο έλεγχος μετατρέπει αυτές τις αποφάσεις σε εντολές προς τους ενεργοποιητές του συστήματος διεύθυνσης, της πέδησης και της επιτάχυνσης. Το πρόβλημα εδώ εντοπίζεται στη διατήρηση της ευστάθειας υπό μεταβαλλόμενες φυσικές συνθήκες, όπως η μειωμένη πρόσφυση σε βρεγμένο οδόστρωμα ή οι απότομες μεταφορές φορτίου κατά τη διάρκεια ελιγμών αποφυγής.

Η μαθηματική μοντελοποίηση της δυναμικής του οχήματος πρέπει να είναι εξαιρετικά ακριβής, καθώς οποιαδήποτε απόκλιση μεταξύ του προβλεπόμενου και του πραγματικού μοντέλου μπορεί να οδηγήσει σε ταλαντώσεις ή απώλεια ελέγχου. Η πρόκληση εντείνεται από την απαίτηση για ελαχιστοποίηση της υστέρησης μεταξύ της λήψης μιας απόφασης και της εκτέλεσής της, καθώς σε υψηλές ταχύτητες, ακόμη και μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου καθυστέρησης μπορούν να καθορίσουν την έκβαση μιας κρίσιμης κατάστασης, καθιστώντας τον έλεγχο σε πραγματικό χρόνο ένα πεδίο μηδενικής ανοχής σε σφάλματα.

## 2.4 Προστασία Δεδομένων και Επικοινωνίας Οχήματος με το Περιβάλλον (V2X).

Επιπρόσθετα, μια θεμελιώδης αλλά συχνά παραγνωρισμένη πρόκληση αφορά την αλληλεπίδραση και επικοινωνία των αυτόνομων οχημάτων με το υπάρχον περιβάλλον (V2X - Vehicle-to-Everything) (Εικόνα 8). Η πλήρης αυτονομία δεν μπορεί να λειτουργήσει απομονωμένα· το όχημα πρέπει να ανταλλάσσει πληροφορίες με άλλα οχήματα (V2V) και με τις υποδομές της πόλης (V2I), όπως έξυπνους



Εικόνα 5 V2X - Vehicle-to-Everything

σηματοδότες και αισθητήρες δρόμου. Το πρόβλημα εδώ είναι διττό: τεχνικό και οργανωτικό. Από τεχνικής άποψης, απαιτούνται δίκτυα εξαιρετικά χαμηλής υστέρησης και υψηλού εύρους ζώνης, όπως το 5G/6G, για τη διασφάλιση της αδιάλειπτης ροής πληροφοριών.

Οργανωτικά, η απουσία ενός παγκόσμιου προτύπου επικοινωνίας και η ανομοιομορφία

των υποδομών σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές καθιστούν τη γενίκευση της τεχνολογίας δυσχερή. Χωρίς μια αξιόπιστη υποδομή επικοινωνίας, το αυτόνομο όχημα περιορίζεται στην «εγωκεντρική» του αντίληψη, αδυνατώντας να γνωρίζει τι συμβαίνει πέρα από το οπτικό πεδίο των αισθητήρων του, όπως για παράδειγμα ένα ατύχημα που συνέβη σε μια κλειστή στροφή μερικά χιλιόμετρα παρακάτω, γεγονός που περιορίζει τη συνολική ασφάλεια και αποδοτικότητα του συστήματος.

Πέρα από τα αμιγώς τεχνικά ζητήματα, η παρουσίαση του προβλήματος οφείλει να συμπεριλάβει το φλέγον ζήτημα της κυβερνοασφάλειας και της προστασίας δεδομένων. Ένα αυτόνομο όχημα είναι, στην πραγματικότητα, ένας κινούμενος υπολογιστής με πολλαπλά σημεία εισόδου για δυνητικούς

επιτιθέμενους. Η πιθανότητα απομακρυσμένης παραβίασης του συστήματος ελέγχου ή της χειραγώγησης των δεδομένων των αισθητήρων αποτελεί έναν εφιαλτικό κίνδυνο για τη δημόσια ασφάλεια. Για παράδειγμα, μια κακόβουλη επίθεση που θα «τύφλωνε» το σύστημα LiDAR ή θα αλλοίωνε τις ενδείξεις του GPS θα μπορούσε να προκαλέσει μαζικά ατυχήματα. Ταυτόχρονα, η διαρκής καταγραφή και μετάδοση δεδομένων, που περιλαμβάνουν την τοποθεσία του οχήματος και εικόνες από το περιβάλλον, εγείρουν σοβαρές ανησυχίες για την ιδιωτικότητα των επιβατών και των πεζών. Η ανάπτυξη ανθεκτικών αρχιτεκτονικών που θα μπορούν να ανιχνεύουν και να απομονώνουν επιθέσεις σε πραγματικό χρόνο, διατηρώντας παράλληλα το απόρρητο των δεδομένων, αποτελεί μια από τις πιο σύνθετες προκλήσεις που καλείται να επιλύσει η σύγχρονη έρευνα, πριν την ευρεία εμπορική διάθεση των οχημάτων αυτών.

Με την αυξανόμενη πολυπλοκότητα του λογισμικού των αυτόνομων ρομπότ, το ζήτημα της κυβερνοασφάλειας έχει αναδειχθεί σε μείζονα ερευνητική πρόκληση. Ακαδημαϊκές μελέτες επισημαίνουν τις ευπάθειες που προκύπτουν από την ενσωμάτωση ασύρματων δικτύων και λειτουργικών συστημάτων ανοιχτού κώδικα (όπως οι παλαιότερες εκδόσεις του ROS), καθιστώντας τα ρομπότ ευάλωτα σε επιθέσεις υποκλοπής ή παραποίησης δεδομένων αισθητήρων [28]. Η σύγχρονη έρευνα επικεντρώνεται στην ανάπτυξη κρυπτογραφημένων καναλιών επικοινωνίας και αρχιτεκτονικών ανθεκτικών σε σφάλματα, διασφαλίζοντας ότι το όχημα θα μεταβεί σε ασφαλή κατάσταση λειτουργίας σε περίπτωση κακόβουλης παρέμβασης.

## 2.5 Ηθικά Διλήμματα, Νομικό Πλαίσιο Ευθύνης και Κοινωνική Αποδοχή.

Μια άλλη διάσταση του προβλήματος, που συχνά υπερβαίνει τα όρια της μηχανικής, είναι τα ηθικά διλήμματα και το νομικό πλαίσιο ευθύνης. Σε καταστάσεις αναπόφευκτου ατυχήματος, όπου το σύστημα πρέπει να επιλέξει ανάμεσα σε δύο κακά (το γνωστό «δίλημμα του τραμ»), οι αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης καλούνται να λάβουν αποφάσεις που εμπεριέχουν ηθικές αξίες. Πώς μπορεί ένας κώδικας να ιεραρχήσει την ανθρώπινη ζωή και ποιος φέρει την ευθύνη σε περίπτωση σφάλματος: ο κατασκευαστής, ο προγραμματιστής ή ο ιδιοκτήτης;

Η απουσία ενός σαφούς και διεθνώς αναγνωρισμένου νομικού πλαισίου δημιουργεί ένα κενό ασφαλείας και αβεβαιότητας που εμποδίζει την αποδοχή της τεχνολογίας από το ευρύ κοινό. Η πρόκληση έγκειται στη μετατροπή αφηρημένων ηθικών κανόνων σε συγκεκριμένους λογικούς περιορισμούς που μπορούν να ενσωματωθούν στο λογισμικό. Η κοινωνική εμπιστοσύνη προς τα αυτόνομα συστήματα εξαρτάται άμεσα από τη διαφάνεια αυτών των αλγορίθμων και τη δυνατότητα ερμηνείας των αποφάσεών τους, ώστε να μην λειτουργούν ως «μαύρα κουτιά» σε κρίσιμες στιγμές, αλλά ως υπεύθυνοι δρώντες στον δημόσιο χώρο.

Συνοψίζοντας, η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος αντίληψης και πλοήγησης για ένα αυτόνομο όχημα δεν είναι απλώς η άθροιση επιμέρους τεχνολογιών, αλλά ένα πολυδιάστατο πρόβλημα συστημικής ολοκλήρωσης. Η παρούσα πτυχιακή εργασία στοχεύει να προσεγγίσει αυτό ακριβώς το χάσμα, αναγνωρίζοντας ότι η αποτυχία σε οποιοδήποτε από τα υποσυστήματα οδηγεί σε κατάρρευση της συνολικής αξιοπιστίας. Το ερευνητικό πρόβλημα που τίθεται επί τάπητος είναι ο σχεδιασμός, η υλοποίηση και η αξιολόγηση μιας αρχιτεκτονικής που θα γεφυρώνει τη συλλογή και επεξεργασία δεδομένων από τους αισθητήρες με τους αλγορίθμους λήψης αποφάσεων.

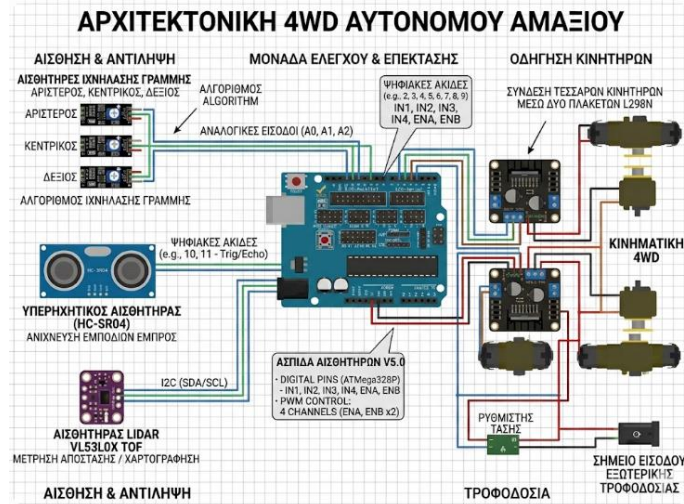
## Κεφάλαιο 2

Εστιάζοντας στην ανάπτυξη μεθόδων που προσφέρουν ανθεκτικότητα στον θόρυβο, μειωμένη υπολογιστική πολυπλοκότητα και ικανότητα άμεσης προσαρμογής σε δυναμικά περιβάλλοντα, η εργασία επιδιώκει να αναδείξει βιώσιμες λύσεις. Το πρόβλημα λοιπόν, ολοκληρώνεται με την πρόκληση της δοκιμής και πιστοποίησης σε ένα σχεδόν άπειρο σύνολο σεναρίων. Είναι πρακτικά αδύνατο να δοκιμαστεί ένα αυτόνομο όχημα σε πραγματικές συνθήκες για όλα τα πιθανά συμβάντα που μπορεί να συναντήσει σε μια δεκαετία οδήγησης. Ως εκ τούτου, η έρευνα στρέφεται στη χρήση προηγμένων περιβαλλόντων προσομοίωσης υψηλής πιστότητα. Η παρουσίαση και η ανάλυση αυτών των συγκεκριμένων τεχνικών προκλήσεων καθιστά σαφή την αναγκαιότητα για τη δημιουργία ενός ανθεκτικού πλαισίου πλοήγησης, το οποίο θα αποτελέσει το αντικείμενο μελέτης, σχεδιασμού και πειραματικής επαλήθευσης στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας μελέτης.

## Κεφάλαιο 3ο: Υλοποίηση του Αυτόνομου Συστήματος

### 3.1 Αρχιτεκτονική και Μεθοδολογία Ανάπτυξης του Ρομποτικού Οχήματος

Έχοντας θέσει το θεωρητικό υπόβαθρο και αναλύσει εκτενώς τις τεχνολογικές προκλήσεις της αυτόνομης οδήγησης, το τρίτο κεφάλαιο της παρούσας πτυχιακής εργασίας επικεντρώνεται στην



πρακτική υλοποίηση και την πειραματική ανάπτυξη του ρομποτικού συστήματος. Στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι να περιγράψει αναλυτικά τη μετάβαση από τον εννοιολογικό σχεδιασμό στην απτή κατασκευή ενός λειτουργικού αυτόνομου οχήματος (Εικόνα 9).

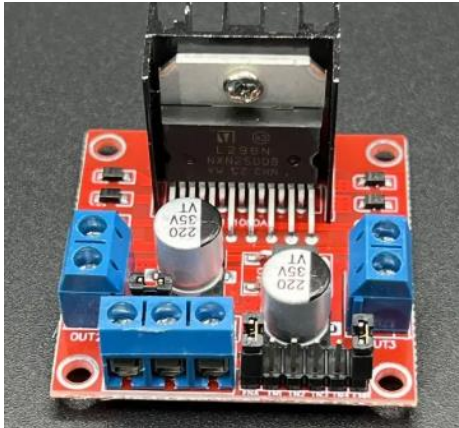
Η διαδικασία αυτή διακρίνεται σε δύο βασικούς και άρρηκτα συνδεδεμένους άξονες: την υλική συναρμολόγηση και την ανάπτυξη του λογισμικού ελέγχου. Αρχικά, θα παρουσιαστεί η αρχιτεκτονική του υλικού, περιλαμβάνοντας την επιλογή και την ηλεκτρομηχανική ενσωμάτωση των εξαρτημάτων, όπως το σασί, οι

Εικόνα 6 Αρχιτεκτονική οχήματος

κινητήρες, οι επεξεργαστικές μονάδες και η συστοιχία των αισθητήρων που αποτελούν τα κρίσιμα υποσυστήματα αντίληψης. Η μηχανολογική δομή, η ορθή καλωδίωση και η διαχείριση της τροφοδοσίας αποτελούν θεμελιώδη βήματα για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας. Στη συνέχεια, η έμφαση θα μετατοπιστεί στον προγραμματισμό και την ανάπτυξη του κώδικα που καθοδηγεί το όχημα. Θα αναλυθεί η αρχιτεκτονική του λογισμικού, η επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και η υλοποίηση των αλγορίθμων πλοήγησης. Μέσα από αυτή τη συνδυαστική προσέγγιση, το κεφάλαιο αναδεικνύει πώς η αρμονική συνεργασία του φυσικού εξοπλισμού με τον βελτιστοποιημένο κώδικα αποτελεί τον πυρήνα για την επιτυχή ολοκλήρωση του αυτόνομου συστήματος.

### 3.2 Υλοποίηση του Κινηματικού Συστήματος: Ενσωμάτωση Κινητήρων και Πλακέτας Ελέγχου Ισχύος

Η πρώτη και θεμελιώδης φάση της υλικής συναρμολόγησης του αυτόνομου οχήματος αφορά τη δημιουργία του κινηματικού συστήματος πρόωσης, το οποίο βασίζεται στη χρήση τεσσάρων κινητήρων συνεχούς ρεύματος σε συνεργασία με την πλακέτα οδήγησης L298N (Εικόνα 10). Οι τέσσερις κινητήρες προσαρμόζονται συμμετρικά στο σασί του ρομπότ σε διάταξη τετρακίνησης (4WD), εξασφαλίζοντας την απαιτούμενη ροπή, πρόσφυση και μηχανική ευστάθεια του οχήματος κατά την πλοήγηση. Επειδή η κεντρική μονάδα ελέγχου (μικροελεγκτής) λειτουργεί με σήματα χαμηλής ισχύος και δεν δύναται να παρέχει την υψηλή ένταση ρεύματος που απαιτείται για την κίνηση των επαγωγικών φορτίων των ηλεκτροκινητήρων, η παρεμβολή του L298N καθίσταται απολύτως αναγκαία.



Εικόνα 7 L298N Πλακέτα οδήγησης

Η συγκεκριμένη πλακέτα ενσωματώνει αρχιτεκτονική διπλής γέφυρας H (Dual H-Bridge), επιτρέποντας την ασφαλή απομόνωση του κυκλώματος ελέγχου από το κύκλωμα ισχύος.

Κατά τη διαδικασία της καλωδίωσης και προκειμένου να υλοποιηθεί κινηματική διαφορικής οδήγησης (differential drive), οι δύο κινητήρες της αριστερής πλευράς συνδέονται παράλληλα στην πρώτη έξοδο της πλακέτας (OUT1/OUT2), ενώ οι αντίστοιχοι της δεξιάς πλευράς στη δεύτερη έξοδο (OUT3/OUT4). Η τροφοδοσία ισχύος του L298N αντλείται απευθείας από την κύρια συστοιχία μπαταριών, διατηρώντας απαραίτητα κοινή γείωση (common ground) με τον μικροελεγκτή για την αποφυγή βρόχων γείωσης και ηλεκτρικού θορύβου.

Η διασύνδεση επικοινωνίας ολοκληρώνεται μέσω των λογικών ακροδεκτών (IN1-IN4), οι οποίοι καθορίζουν τη φορά περιστροφής (εμπρός/πίσω), και των ακροδεκτών ενεργοποίησης (ENA, ENB), οι οποίοι λαμβάνουν σήματα διαμόρφωσης εύρους παλμού (PWM) από τον μικροελεγκτή. Αυτή η διάταξη παρέχει στο σύστημα τη δυνατότητα δυναμικής ρύθμισης της ταχύτητας και ανεξάρτητου ελέγχου κάθε πλευράς, καθιστώντας εφικτή την ακριβή επιτάχυνση, την επιβράδυνση και την εκτέλεση περίπλοκων ελιγμών περιστροφής γύρω από τον κατακόρυφο άξονα του οχήματος.

### 3.3 Μηχανολογική Δομή: Συναρμολόγηση του Ακρυλικού Πλαισίου και του Συστήματος Τροχών



Εικόνα 8 Ακρυλικό υλικό με 4 τροχούς

Αμέσως μετά την ηλεκτρομηχανική προετοιμασία των κινητήρων, η κατασκευαστική διαδικασία εστιάζει στη διαμόρφωση του βασικού σκελετού του οχήματος, ο οποίος συγκροτείται από δύο επίπεδα ακρυλικού υλικού και τέσσερις τροχούς (Εικόνα 11) με επίστρωση ελαστικού. Η επιλογή της διάφορης αρχιτεκτονικής του πλαισίου εξυπηρετεί τόσο τη μηχανική στιβαρότητα όσο και τη βέλτιστη χωροταξική κατανομή των υποσυστημάτων. Το κάτω ακρυλικό επίπεδο

αναλαμβάνει να φιλοξενήσει το σύστημα πρόωσης, την πλακέτα οδήγησης L298N και τη συστοιχία των μπαταριών, διατηρώντας το κέντρο βάρους χαμηλά για μέγιστη δυναμική ευστάθεια.

Αντιθέτως, το άνω επίπεδο λειτουργεί ως απομονωμένη πλατφόρμα για την ασφαλή τοποθέτηση της κεντρικής επεξεργαστικής μονάδας και των ευαίσθητων αισθητήρων αντίληψης. Η σταθερή σύζευξη των δύο αυτών επιφανειών επιτυγχάνεται μέσω ειδικών αποστατών, οι οποίοι βιδώνονται στις προκαθορισμένες οπές κοπής λέιζερ, εξασφαλίζοντας την ακαμψία της κατασκευής και την αποφυγή παραμορφώσεων κατά την κίνηση. Παράλληλα, στους περιστροφικούς άξονες των τεσσάρων κινητήρων προσαρμόζονται μηχανικά οι τροχοί. Τα ελαστικά τους περιβλήματα είναι κατασκευασμένα από πολυμερές υλικό με κατάλληλες αυλακώσεις, με σκοπό τη μεγιστοποίηση του συντελεστή τριβής με το έδαφος. Η εξασφάλιση υψηλής πρόσφυσης είναι κρίσιμης σημασίας, καθώς ελαχιστοποιεί τα φαινόμενα ολίσθησης που θα μπορούσαν να αλλοιώσουν τα δεδομένα της οδομετρίας και να εισάγουν ανεπιθύμητα σφάλματα στον εντοπισμό θέσης του οχήματος.

Η απόλυτη συμμετρία στην εγκατάσταση των τροχών, σε συνδυασμό με το άκαμπτο ακρυλικό σασί, δημιουργούν μια αξιόπιστη φυσική πλατφόρμα, έτοιμη να υποστηρίξει το βάρος του ηλεκτρονικού εξοπλισμού και να εκτελέσει με απόλυτη ακρίβεια τις αλγοριθμικές εντολές πλοήγησης.

### 3.4 Κεντρική Μονάδα Ελέγχου: Ενσωμάτωση και Ρόλος του Μικροελεγκτή Arduino Uno



Εικόνα 9 Ηλεκτρονική πλακέτα ανοιχτού κώδικα

Ο «εγκέφαλος» του συστήματος ελέγχου του αυτόνομου οχήματος υλοποιείται μέσω της ενσωμάτωσης της πλακέτας Arduino Uno (Εικόνα 12), η οποία βασίζεται στον ισχυρό μικροελεγκτή ATmega328P. Τοποθετημένο στο άνω ακρυλικό επίπεδο του πλαισίου για προστασία από κραδασμούς και εύκολη καλωδιακή προσβασιμότητα, το Arduino Uno αναλαμβάνει τον κρίσιμο ρόλο της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας για το χαμηλό επίπεδο ελέγχου. Η επιλογή του συγκεκριμένου μικροελεγκτή βασίστηκε στην υψηλή αξιοπιστία του, την εγγενή ευελιξία διασύνδεσης και την ικανότητα εκτέλεσης διεργασιών σε πραγματικό χρόνο με απολύτως μηδενική

ανοχή σε καθυστερήσεις. Η συσκευή διαθέτει ένα ολοκληρωμένο σύνολο αναλογικών εισόδων και ψηφιακών ακροδεκτών (I/O pins), οι οποίοι συγκροτούν τη γέφυρα επικοινωνίας μεταξύ της περιβαλλοντικής αντίληψης και της μηχανικής δράσης.

Αφενός, προορίζεται να συλλέγει και να επεξεργάζεται ακαριαία τα δεδομένα από τους αισθητήρες απόστασης και πλοήγησης. Αφετέρου, καλείται να μεταφράσει αυτά τα δεδομένα σε ακριβείς εντολές κινηματικής συμπεριφοράς, διοχετεύοντας τα κατάλληλα λογικά σήματα και παλμούς διαμόρφωσης εύρους (PWM) προς την πλακέτα οδήγησης L298N. Μέσω αυτού του αδιάκοπου βρόχου ανατροφοδότησης, το Arduino Uno ελέγχει τη βέλτιστη κατανομή της ισχύος στους τέσσερις κινητήρες συνεχούς ρεύματος, καθιστώντας δυνατή την εκτέλεση πολύπλοκων αλγορίθμων αποφυγής εμποδίων και δυναμικής πλοήγησης στον φυσικό χώρο.

### 3.5 Σύστημα Δυναμικής Περιβαλλοντικής Σάρωσης: Σερβοκινητήρας SG90 και Αισθητήρας Υπερήχων

Η μετάβαση από τον έλεγχο της κινηματικής στην υλοποίηση του συστήματος αντίληψης του αυτόνομου οχήματος, πραγματοποιείται με την εγκατάσταση της μονάδας δυναμικής περιβαλλοντικής σάρωσης, η οποία συνθέτει τις δυνατότητες ενός αισθητήρα υπερήχων (ultrasound module) με τον



Εικόνα 10 Αισθητήρα υπερήχων με μικρο-σερβοκινητήρα SG90

μικρο-σερβοκινητήρα SG90(Εικόνα 13). Ο αισθητήρας υπερήχων (συνήθως τύπου HC-SR04) αποτελεί το πρωτεύον όργανο μέτρησης αποστάσεων του οχήματος, λειτουργώντας με βάση την αρχή του ηχοεντοπισμού (echolocation) μέσω της εκπομπής και λήψης υψίσυχων ηχητικών κυμάτων. Ωστόσο, η σταθερή τοποθέτησή του στο πλαίσιο θα περιόριζε δραματικά το «οπτικό» πεδίο του ρομπότ σε μια αυστηρά ευθεία γραμμή. Για την υπέρβαση αυτού του περιορισμού, ο αισθητήρας προσαρμόζεται μηχανικά στον άξονα περιστροφής του σερβοκινητήρα SG90, ο οποίος εδράζεται στο πρόσθιο τμήμα του άνω ακρυλικού επιπέδου.

Ο συγκεκριμένος σερβοκινητήρας ελέγχεται απευθείας από το Arduino Uno μέσω σημάτων διαμόρφωσης εύρους παλμού (PWM), παρέχοντας τη δυνατότητα ακριβούς περιστροφής σε ένα τόξο 180 μοιρών. Αυτή η συνδυαστική μηχαντρονική διάταξη προσδίδει στο σύστημα την κρίσιμη ικανότητα της «ενεργητικής όρασης». Όταν το όχημα ανιχνεύσει ένα εμπόδιο στην άμεση πορεία του, ακινητοποιείται και ο σερβοκινητήρας αναλαμβάνει να σαρώσει τον χώρο, εκτελώντας διαδοχικές μετρήσεις προς τα αριστερά και τα δεξιά. Τα συλλεχθέντα χωρικά δεδομένα ανατροφοδοτούνται ακαριαία στον μικροελεγκτή, ο οποίος, αξιοποιώντας αλγορίθμους λήψης αποφάσεων, συγκρίνει τις διαθέσιμες αποστάσεις και καθορίζει τη βέλτιστη και ασφαλέστερη τροχιά αποφυγής, προσομοιώνοντας ουσιαστικά τη λειτουργία ενός υποτυπώδους ραντάρ τοπικής πλοήγησης.

### 3.6 Σύστημα Οπτικής Αναγνώρισης Τροχιάς: Διάταξη Τριών Αισθητήρων Παρακολούθησης Γραμμής (Line Tracking Modules)

Προχωρώντας στην ενίσχυση των δυνατοτήτων πλοήγησης σε δομημένα περιβάλλοντα, η επόμενη φάση της συναρμολόγησης περιλαμβάνει την εγκατάσταση ενός συστήματος παρακολούθησης τροχιάς, το οποίο απαρτίζεται από τρεις αισθητήρες ανίχνευσης γραμμής (line tracking modules)(Εικόνα 14). Η



Εικόνα 11 Αισθητήρας ανίχνευσης γραμμής

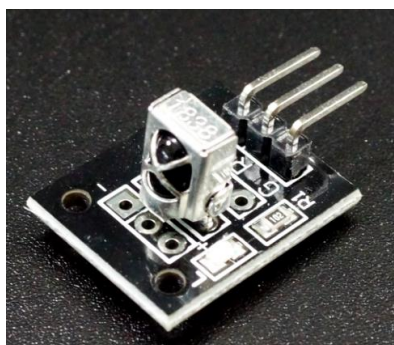
λειτουργία αυτών των αισθητήρων εδράζεται στην οπτικοηλεκτρονική τεχνολογία υπερύθρων (IR), ενσωματώνοντας έναν πομπό που εκπέμπει υπέρυθρη ακτινοβολία και έναν δέκτη (φωτοδίοδο ή φωτοτρανζίστορ) που καταγράφει την ένταση της ανακλώμενης δέσμης.

Η φυσική αρχή λειτουργίας τους εκμεταλλεύεται τη διαφορά απορρόφησης του φωτός: οι σκουρόχρωμες επιφάνειες (όπως μια μαύρη γραμμή καθοδήγησης) απορροφούν το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας ελαχιστοποιώντας την ανάκλαση, ενώ οι ανοιχτόχρωμες

την αντανακλούν εντονότερα. Η στρατηγική χωροθέτηση των τριών αισθητήρων —τοποθετημένων στο κατώτερο μπροστινό τμήμα του σασί, με κατεύθυνση προς το έδαφος και σε διάταξη συστοιχίας (αριστερά, κέντρο, δεξιά)— προσφέρει στο σύστημα αυξημένη διακριτική ικανότητα και ακρίβεια. Υπό κανονικές συνθήκες, όταν ο κεντρικός αισθητήρας ανιχνεύει τη γραμμή, ο μικροελεγκτής Arduino διατηρεί την ευθύγραμμη πορεία των κινητήρων. Εάν, ωστόσο, η γραμμή εντοπιστεί από τον πλευρικό αριστερό ή δεξιό αισθητήρα, το σύστημα αντιλαμβάνεται ακαριαία τη χωρική απόκλιση από την επιθυμητή τροχιά. Μέσω ενός βρόχου ελέγχου κλειστού τύπου, ο μικροελεγκτής υπολογίζει το σφάλμα και αποστέλλει διαφοροποιημένα σήματα ελέγχου στο κύκλωμα L298N, προσαρμόζοντας ασύμμετρα την ταχύτητα των αριστερών και δεξιών τροχών. Αυτή η διαδικασία διαρκούς ανατροφοδότησης επιτρέπει στο όχημα να διορθώνει δυναμικά την πορεία του, εξασφαλίζοντας την ομαλή και ακριβή διατήρηση της λωρίδας (lane keeping) χωρίς έντονες ταλαντεύσεις.

### 3.7 Διεπαφή Χρήστη και Απομακρυσμένος Έλεγχος: Ενσωμάτωση Δέκτη και Τηλεχειριστηρίου Υπερύθρων (IR)

Αν και ο τελικός σκοπός του ρομποτικού οχήματος είναι η πλήρως αυτόνομη πλοήγηση, η δυνατότητα χειροκίνητης παρέμβασης και απομακρυσμένου ελέγχου κρίνεται απολύτως απαραίτητη, ειδικά κατά τα αρχικά στάδια της ανάπτυξης, των δοκιμών και της βαθμονόμησης των αισθητήρων. Για τον λόγο



Εικόνα 15 Δέκτης υπέρυθρης ακτινοβολίας

αυτό, το σύστημα εξοπλίζεται με μια υπομονάδα επικοινωνίας που απαρτίζεται από έναν δέκτη υπέρυθρης ακτινοβολίας (IR receiver)(Εικόνα 15) και το αντίστοιχο ασύρματο τηλεχειριστήριο. Η μεταφορά δεδομένων βασίζεται στην εκπομπή κωδικοποιημένων παλμών φωτός στο υπέρυθρο φάσμα, οι οποίοι διαμορφώνονται σε μια συγκεκριμένη συχνότητα φέροντος σήματος (συνήθως στα 38 kHz), προκειμένου να ελαχιστοποιούνται οι παρεμβολές και ο οπτικός θόρυβος από τον φωτισμό του περιβάλλοντος.

Όταν ο χρήστης ενεργοποιεί ένα πλήκτρο, το τηλεχειριστήριο εκπέμπει μια μοναδική ακολουθία παλμών. Ο δέκτης IR, εγκατεστημένος σε στρατηγικό σημείο στο άνω μέρος του πλαισίου για τη διασφάλιση ευρέος οπτικού πεδίου, λαμβάνει το σήμα, το αποδιαμορφώνει και το μεταβιβάζει ως ψηφιακή ακολουθία προς τον μικροελεγκτή Arduino Uno. Αξιοποιώντας τις κατάλληλες βιβλιοθήκες λογισμικού, ο μικροελεγκτής αποκωδικοποιεί το σήμα σε συγκεκριμένες δεκαεξαδικές τιμές και αναγνωρίζει την εκάστοτε εντολή. Αυτή η απλή αλλά εξαιρετικά αξιόπιστη διεπαφή επιτρέπει στον χρήστη να εναλλάσσει δυναμικά τις καταστάσεις λειτουργίας του οχήματος (όπως η μετάβαση από την αυτόνομη αποφυγή εμποδίων στην παρακολούθηση γραμμής) ή να αναλαμβάνει τον πλήρη έλεγχο της κινηματικής του συμπεριφοράς, διασφαλίζοντας την ασφαλή διεξαγωγή των πειραμάτων σε περίπτωση απρόβλεπτης συμπεριφοράς των αλγορίθμων αυτονομίας.

### 3.8 Το Σύστημα Αντίληψης Εγγύτητας: Ανάλυση και Χρησιμότητα του Αισθητήρα LiDAR

Ο αισθητήρας VL53L0X (Εικόνα 16) της STMicroelectronics αποτελεί έναν από τους πιο διαδεδομένους και καινοτόμους αισθητήρες απόστασης στη σύγχρονη μικρο-ρομποτική, καθώς φέρνει την προηγμένη τεχνολογία LiDAR σε εξαιρετικά μικρό μέγεθος και χαμηλό κόστος. Η κύρια χρησιμότητά του εντοπίζεται σε εφαρμογές όπου η ακρίβεια της μέτρησης είναι κρίσιμη και οι παραδοσιακοί αισθητήρες υπέρυθρων ή υπερήχων αποτυγχάνουν. Χρησιμοποιείται ευρέως σε αυτόνομα οχήματα για την αποφυγή εμποδίων, σε συστήματα αναγνώρισης χειρονομιών, στη



Εικόνα 12 Αισθητήρας λέιζερ απόστασης VL53L0X

ρομποτική χαρτογράφηση εσωτερικών χώρων, καθώς και σε συστήματα αυτόματης εστίασης καμερών. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημά του είναι ότι, σε αντίθεση με τους κλασικούς αισθητήρες υπερύθρων που βασίζονται στην ένταση του ανακλώμενου φωτός (και άρα επηρεάζονται από το χρώμα ή την ανακλαστικότητα του αντικειμένου), ο VL53L0X μετράει απόσταση ανεξάρτητα από τα οπτικά χαρακτηριστικά του στόχου, προσφέροντας αξιόπιστα δεδομένα ακόμη και σε περιβάλλοντα με έντονο φωτισμό.

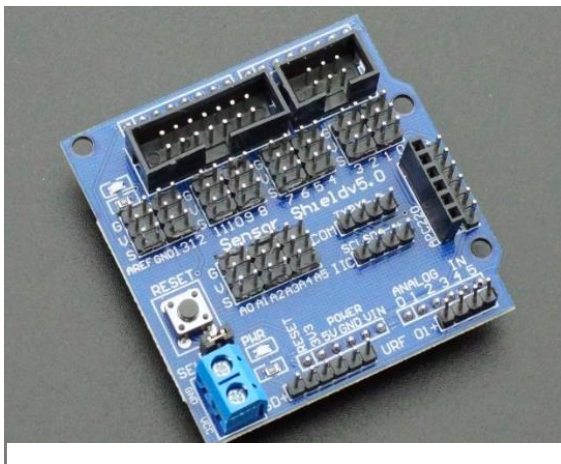
Σε επίπεδο δυνατοτήτων, ο VL53L0X ενσωματώνει μια αόρατη πηγή laser τεχνολογίας VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser) που εκπέμπει στα 940 νανόμετρα και έναν εξαιρετικά ευαίσθητο ανιχνευτή φωτονίων SPAD (Single Photon Avalanche Diode). Έχει τη δυνατότητα να

μετράει αποστάσεις με ακρίβεια χιλιοστού σε ένα εύρος από 3 εκατοστά έως και 2 μέτρα υπό ιδανικές συνθήκες, καθιστώντας τον ιδανικό για ανίχνευση μικρών ή λεπτών εμποδίων σε κοντινή απόσταση. Επιπλέον, διαθέτει εσωτερικό ψηφιακό επεξεργαστή που αναλαμβάνει το φιλτράρισμα των μετρήσεων και την αυτόματη βαθμονόμηση, μειώνοντας το υπολογιστικό φορτίο του κεντρικού επεξεργαστή του ρομπότ.

Τα μαθηματικά πίσω από τη λειτουργία του VL53L0X βασίζονται στην αρχή του χρόνου πτήσης. Ο αισθητήρας εκπέμπει έναν παλμό φωτός laser, ο οποίος ταξιδεύει στο χώρο, προσκρούει στο εμπόδιο και επιστρέφει στον ανιχνευτή SPAD. Ο εσωτερικός χρονιστής μετράει με ακρίβεια picosecond το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε μεταξύ της εκπομπής και της λήψης

### 3.9 Συστημική Ολοκλήρωση και Κεντρικός Κόμβος: Η Πλακέτα Arduino Uno R3 και η Ασπίδα Επέκτασης V5 (Sensor Shield V5.0)

Το τελικό και πλέον καθοριστικό στάδιο της ηλεκτρομηχανικής συναρμολόγησης αφορά τη συστημική ολοκλήρωση του οχήματος, κατά την οποία το σύνολο των περιφερειακών υποσυστημάτων συνδέεται σε έναν κεντρικό κόμβο ελέγχου. Η κρίσιμη αυτή διασύνδεση υλοποιείται μέσω της ταυτόχρονης χρήσης της κεντρικής πλακέτας επεξεργασίας Arduino Uno R3 και της εξειδικευμένης πλακέτας επέκτασης αισθητήρων (Sensor Shield V5.0)(Εικόνα 17).



Εικόνα 17 Εξειδικευμένη πλακέτα επέκτασης αισθητήρων V5.0

Αν και ο μικροελεγκτής R3 διαθέτει την απαραίτητη υπολογιστική ισχύ και λογική για την καθοδήγηση του οχήματος, η αυτούσια φυσική του χρήση παρουσιάζει σοβαρούς ηλεκτρολογικούς περιορισμούς, καθώς διαθέτει ελάχιστους ακροδέκτες τροφοδοσίας (VCC) και γείωσης (GND) για την ταυτόχρονη υποστήριξη του πλήθους των συσκευών που αναλύθηκαν προηγουμένως. Το expanding board V5 επιλύει δραστικά αυτό το δομικό πρόβλημα, εφαρμόζοντας ακριβώς πάνω στο Arduino με τη μέθοδο της διαστρωμάτωσης (shield stacking). Η αρχιτεκτονική της συγκεκριμένης πλακέτας αναδιανέμει και πολλαπλασιάζει τις εξόδους,

μετατρέποντας κάθε ψηφιακό και αναλογικό ακροδέκτη του μικροελεγκτή σε μια τυπική τριπλή διάταξη επαφών (Σήμα, Τάση, Γείωση). Αυτή η τοπολογία καθιστά δυνατή την άμεση, ασφαλή και βέλτιστα οργανωμένη καλωδίωση όλων των επιμέρους στοιχείων συμπεριλαμβανομένων των αισθητήρων παρακολούθησης γραμμής, της μονάδας υπερήχων, του σερβοκινητήρα, καθώς και των μονάδων τηλεμετρίας και υπερύθρων χωρίς την ανάγκη χρήσης ογκωδών κυκλωμάτων δοκιμών ή επισφαλών ενώσεων. Επιπρόσθετα, η ασπίδα V5 παρέχει υποδομές για ανεξάρτητη παροχή ρεύματος, διασφαλίζοντας ότι ενεργοβόρα εξαρτήματα (όπως ο σερβοκινητήρας) τροφοδοτούνται επαρκώς χωρίς να προκαλούν πτώσεις τάσης που θα αποσταθεροποιούσαν τον μικροελεγκτή. Εν κατακλείδι, ο συνδυασμός του R3 με το V5 expanding board συνιστά τον κατεξοχήν κορμό διασύνδεσης του ρομπότ, ενοποιώντας το υλισμικό αντίληψης, επικοινωνίας και κίνησης σε μια ενιαία, συμπαγή και υψηλής αξιοπιστίας ηλεκτρονική αρχιτεκτονική.

### **3.10 Μηχανή Πεπερασμένων Καταστάσεων στο Arduino IDE και Αλγοριθμική Μεθοδολογία Συστήματος Παρακολούθησης Γραμμής**

Η ανάπτυξη του λογισμικού ελέγχου για το αυτόνομο όχημα υλοποιείται στο Περιβάλλον Ολοκληρωμένης Ανάπτυξης (IDE) του Arduino, αξιοποιώντας τις δυνατότητες της γλώσσας προγραμματισμού C/C++. Η κεντρική μεθοδολογία του αλγορίθμου βασίζεται στον σχεδιασμό μιας μηχανής πεπερασμένων καταστάσεων, η οποία επιτρέπει τη δυναμική και ασφαλή μετάβαση του ρομπότ μεταξύ των διαφορετικών τρόπων λειτουργίας του, όπως η αποφυγή εμποδίων, η ακολουθία γραμμής ή ο χειροκίνητος τηλεχειρισμός. Το πρόγραμμα δομείται στις δύο θεμελιώδεις ρουτίνες του συστήματος: τη συνάρτηση `setup()`, όπου πραγματοποιείται η αρχικοποίηση των σειριακών θυρών, ο καθορισμός των ακροδεκτών ως εισόδων (για τους αισθητήρες) ή εξόδων (για το L298N) και η αρχική τοποθέτηση του σερβοκινητήρα, και τη συνάρτηση `loop()`, η οποία εκτελείται *αέναα*. Στον πυρήνα της `loop()`, ο αλγόριθμος σαρώνει διαρκώς τα εισερχόμενα σήματα από τις μονάδες για να ανιχνεύσει αιτήματα αλλαγής κατάστασης από τον χρήστη. Εφόσον επιλεγεί μια συγκεκριμένη αυτόνομη λειτουργία, το πρόγραμμα δρομολογεί την εκτέλεση στις αντίστοιχες υπορουτίνες αντίληψης και κινηματικής, διασφαλίζοντας τον αυστηρό αλγοριθμικό έλεγχο της ροής.

Στην κατάσταση της παρακολούθησης γραμμής, ο αλγόριθμος υλοποιεί μια στρατηγική έλεγχο προσαρμοσμένη για διακριτές ψηφιακές εισόδους, προσομοιώνοντας τη λογική ενός ελεγκτή κλειστού βρόχου. Ο μικροελεγκτής διαβάζει ταυτόχρονα τις ψηφιακές τιμές (HIGH/LOW) από τους τρεις υπέρυθρους αισθητήρες της συστοιχίας. Η αλγοριθμική μεθοδολογία αξιολογεί ένα σύνολο λογικών συνθηκών: εάν αποκλειστικά ο κεντρικός αισθητήρας ανιχνεύσει τη γραμμή αναφοράς, το σύστημα δίνει εντολή για ισόποση κατανομή ισχύος (σταθερό PWM) στους κινητήρες, διατηρώντας ευθύγραμμη πορεία. Αν, αντίθετα, η γραμμή εντοπιστεί από τον αριστερό ή τον δεξιό αισθητήρα, υπολογίζεται ένα χωρικό σφάλμα κατεύθυνσης. Σε αυτή την περίπτωση, η ρουτίνα ελέγχου εφαρμόζει άμεσα διαφορική οδήγηση, μειώνοντας δραστικά την ταχύτητα στη μία πλευρά του οχήματος και αυξάνοντάς την στην άλλη. Σκοπός είναι να προκληθεί η στιγμιαία περιστροφή του σασί και η ταχεία επαναφορά του κεντρικού αισθητήρα πάνω στη γραμμή. Η αποδοτικότητα αυτού του αλγορίθμου εξαρτάται από τον υψηλό ρυθμό δειγματοληψίας, ο οποίος εγγυάται ότι οι διορθωτικές κινήσεις θα είναι μικροσκοπικές, αποτρέποντας την ανεπιθύμητη πλευρική ταλάντωση του οχήματος.

Η αλγοριθμική μεθοδολογία για την αυτόνομη αποφυγή εμποδίων ενσωματώνει σημαντική πολυπλοκότητα, καθώς απαιτεί τον χρονικό συντονισμό του αισθητήρα υπερήχων και του σερβοκινητήρα για τη λήψη κρίσιμων αποφάσεων.

Κατά την ευθύγραμμη κίνηση, το ρομπότ εκπέμπει διαρκώς υπερηχητικούς παλμούς, με τον κώδικα να μετατρέπει τον χρόνο της ηχούς σε ακριβή μέτρηση απόστασης (σε εκατοστά). Εάν η υπολογιζόμενη απόσταση πέσει κάτω από ένα αυστηρά προκαθορισμένο όριο ασφαλείας, ενεργοποιείται μια ρουτίνα διακοπής κινδύνου που φρενάρει ακαριαία τους κινητήρες. Σε αυτό το στάδιο, ο αλγόριθμος μεταβαίνει στη φάση "περιβαλλοντικής σάρωσης". Ο μικροελεγκτής διατάζει τον σερβοκινητήρα να στραφεί διαδοχικά δεξιά και αριστερά, με τον αισθητήρα υπερήχων να καταγράφει τις αντίστοιχες αποστάσεις σε προσωρινές μεταβλητές. Ακολούθως, εκτελείται μια λογική σύγκρισης μεγίστου: το σύστημα αξιολογεί ποια κατεύθυνση διαθέτει τον μεγαλύτερο ελεύθερο χώρο. Βάσει αυτού του αποτελέσματος, ο αλγόριθμος υπολογίζει τη βέλτιστη γωνία διαφυγής, αποστέλλει εντολές ασύμμετρης περιστροφής στους τροχούς για την ευθυγράμμιση με τη νέα πορεία, επαναφέρει τον σερβοκινητήρα στο κέντρο και συνεχίζει την απρόσκοπτη πλοήγησή του.

### 3.11 Ολοκλήρωση της Κατασκευής Και Τεχνικές Μη Αποκλειόμενου Κώδικα

Το κρίσιμότερο ίσως στοιχείο της αρχιτεκτονικής του λογισμικού είναι η διαχείριση του χρονισμού και της ταυτόχρονης εκτέλεσης διεργασιών, όπως η ασύρματη επικοινωνία και η συλλογή δεδομένων τηλεμετρίας, χωρίς να παρεμποδίζεται η κύρια λειτουργία της πλοήγησης. Η αλγοριθμική προσέγγιση αποφεύγει ρητά τη χρήση συναρτήσεων καθυστέρησης (όπως η τυπική `delay()`), οι οποίες μπλοκάρουν τον κύκλο μηχανής του επεξεργαστή, καθιστώντας το όχημα κυριολεκτικά «τυφλό» απέναντι σε απότομα εμπόδια. Αντιθέτως, η μεθοδολογία αξιοποιεί την τεχνική του μη-αποκλειόμενου, χρησιμοποιώντας χρονόμετρα υλικού και τη συνάρτηση `millis()` για την εκτέλεση εργασιών βάσει χρονικών συμβάντων.

Συνοψίζοντας, το παρόν κεφάλαιο αποτύπωσε με λεπτομέρεια την κρίσιμη μετάβαση από τον θεωρητικό σχεδιασμό στην πρακτική υλοποίηση ενός πλήρως λειτουργικού αυτόνομου ρομποτικού οχήματος. Μέσα από τη συστηματική περιγραφή της ηλεκτρομηχανικής συναρμολόγησης, καταδείχθηκε η σημασία της προσεκτικής επιλογής και ενοποίησης του υλικού, από το κινηματικό σύστημα διαφορικής οδήγησης και το ακρυλικό πλαίσιο, έως την κεντρική μονάδα ελέγχου Arduino και την ετερογενή συστοιχία αισθητήρων και τηλεμετρίας. Παράλληλα, η ανάλυση της αρχιτεκτονικής του λογισμικού ανέδειξε την αναγκαιότητα ενός στιβαρού προγραμματιστικού υποβάθρου για τη διαχείριση αυτού του υλικού.

Η υλοποίηση της μηχανής πεπερασμένων καταστάσεων, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη μη αποκλειόμενου κώδικα για την ταυτόχρονη εκτέλεση διεργασιών αντίληψης, λήψης αποφάσεων και ασύρματης επικοινωνίας, διασφάλισαν την αποδοτική και ασφαλή λειτουργία του ρομπότ σε πραγματικό χρόνο. Το τελικό αποτέλεσμα αυτής της πολυεπίπεδης διαδικασίας συστημικής ολοκλήρωσης είναι η δημιουργία μιας συμπαγούς, αξιόπιστης και ευέλικτης πειραματικής πλατφόρμας. Η επιτυχής ολοκλήρωση της κατασκευής και η επαλήθευση του προγραμματιστικού κώδικα θέτουν πλέον τα στέρεα θεμέλια για το επόμενο στάδιο της παρούσας μελέτης. Στο επόμενο κεφάλαιο, η υλοποιημένη πλατφόρμα θα υποβληθεί σε μια σειρά δοκιμών, με στόχο την πειραματική αξιολόγηση της απόδοσης των αλγορίθμων σε πραγματικές συνθήκες, την καταγραφή μετρικών συμπεριφοράς και την εξαγωγή των τελικών ερευνητικών συμπερασμάτων.

Λαμβάνοντας υπόψη την παραπάνω ανάλυση της συστημικής ολοκλήρωσης, η τελική πειραματική διάταξη του αναπτυχθέντος οχήματος πρόκειται να θέσει σε ταυτόχρονη και συνδυαστική λειτουργία ένα συγκεκριμένο υποσύνολο των τεχνολογιών που παρουσιάστηκαν, προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό σενάριο της υβριδικής αυτόνομης οδήγησης. Συγκεκριμένα, η φυσική κίνηση και η εκτέλεση των ελιγμών βασίζεται στο κινηματικό σύστημα διαφορικής οδήγησης των τεσσάρων κινητήρων συνεχούς ρεύματος, οι οποίοι ελέγχονται με σήματα PWM από τον μικροελεγκτή Arduino Uno R3 μέσω της γέφυρας H του οδηγού L298N. Για την υλοποίηση της αυτόνομης πλοήγησης, ενεργοποιείται η συστοιχία των τριών αισθητήρων παρακολούθησης γραμμής (Line Tracking Modules) στα ψηφιακά pins 9, 10 και 11, η οποία αναλαμβάνει την οπτική αναγνώριση και διατήρηση της λωρίδας. Παράλληλα, το σύστημα αντίληψης εγγύτητας και ενεργητικής αποφυγής συγκρούσεων συγκροτείται από τον αισθητήρα υπερήχων (στα αναλογικά pins A0 και A1 ως Echo και Trigger αντίστοιχα) και τον προηγμένο αισθητήρα LiDAR VL53L0X, ο οποίος επικοινωνεί μέσω του διαύλου I2C (SCL/SDA) του Sensor Shield V5.0 για την εξάλειψη των τυφλών σημείων σε κοντινή απόσταση. Αξίζει να σημειωθεί ότι, για τις ανάγκες του τελικού σεναρίου, η διάταξη του σερβοκινητήρα SG90 και του τηλεχειριστηρίου υπερύθρων αν και δοκιμάστηκαν επιτυχώς κατά τη φάση της βαθμονόμησης— παρακάμπτονται ρητά, προκειμένου η λήψη αποφάσεων της μηχανής πεπερασμένων καταστάσεων να βασίζεται αποκλειστικά στην ακαριαία, real-time επεξεργασία των δεδομένων του LiDAR και του υπερήχου. Με αυτόν τον τρόπο, ο μη αποκλειόμενος κώδικας εξασφαλίζει τη βέλτιστη υπολογιστική ροή, επιτρέποντας στο όχημα να ακολουθεί με ακρίβεια τη μαύρη γραμμή και να εκτελεί γλυκούς ελιγμούς παράκαμψης με το που εντοπιστεί φυσικό εμπόδιο στην πορεία του.

## **Κεφάλαιο 4ο: Πειραματική Εφαρμογή και Επαλήθευση: Συνδυαστική Αυτόνομη Πλοήγηση σε Πραγματικές Συνθήκες**

### **4.1 Εισαγωγή στο Πειραματικό Μέρος**

Το τέταρτο κεφάλαιο επικεντρώνεται στην πειραματική επαλήθευση και την κριτική αξιολόγηση της ρομποτικής πλατφόρμας που υλοποιήθηκε. Έχοντας ολοκληρώσει τη μηχανολογική συναρμολόγηση και την ανάπτυξη του λογισμικού ελέγχου, πρωταρχικός σκοπός αυτού του σταδίου είναι η μετάβαση από το θεωρητικό μοντέλο στην πρακτική εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες. Το πειραματικό μέρος δεν περιορίζεται στην απλή επιβεβαίωση της λειτουργικότητας των επιμέρους αισθητήρων, αλλά στοχεύει στην αξιολόγηση της συστημικής συμπεριφοράς του οχήματος απέναντι σε ένα σύνθετο και δυναμικό σενάριο πλοήγησης. Το τελικό και πλέον απαιτητικό ζητούμενο είναι η ικανότητα του ρομπότ να ακολουθεί με ακρίβεια μια προδιαγεγραμμένη τροχιά (μαύρη γραμμή), να εντοπίζει και να παρακάμπτει αυτόνομα τυχόν εμπόδια που εμποδίζουν την πορεία του, και, τέλος, να ανακτά επιτυχώς την αρχική του τροχιά συνεχίζοντας την πλοήγηση.

Μέσω αυτής της διαδικασίας, καθίσταται δυνατή η επικύρωση της ευρωστίας των αλγορίθμων, η καταγραφή των ορίων του συστήματος και η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων για την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής. Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μια ειδική πειραματική διάταξη με αυστηρά ελεγχόμενες παραμέτρους, προκειμένου να διασφαλιστεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων. Το δάπεδο δοκιμών επενδύθηκε με λευκό, ματ υλικό υψηλής ανακλαστικότητας, ώστε να μεγιστοποιηθεί η οπτική αντίθεση με την επιθυμητή τροχιά πλοήγησης. Η ίδια η τροχιά υλοποιήθηκε με τη χρήση μαύρης, μη ανακλαστικής ταινίας, η οποία περιελάμβανε τόσο ευθύγραμμα τμήματα όσο και καμπύλες μεταβαλλόμενης ακτίνας, για να δοκιμαστεί η δυναμική απόκριση του ελεγκτή.

Ο φωτισμός του χώρου διατηρήθηκε σταθερός, αποφεύγοντας την άμεση ηλιακή ακτινοβολία που θα μπορούσε να προκαλέσει παρεμβολές στον δέκτη των αισθητήρων υπερύθρων. Ως φυσικά εμπόδια χρησιμοποιήθηκαν ορθογώνια αντικείμενα ουδέτερου χρώματος και διαστάσεων ανάλογων με το πλάτος του οχήματος, τα οποία τοποθετήθηκαν σε τυχαία σημεία πάνω στη μαύρη γραμμή. Αυτή η τυποποιημένη δομή επέτρεψε την απομόνωση των εξωτερικών μεταβλητών και την ακριβή αξιολόγηση της αλγοριθμικής αντίδρασης του μικροελεγκτή.

### **4.2 Αξιολόγηση Μεμονωμένων Υποσυστημάτων**

Πριν από την εκτέλεση του τελικού, συνδυαστικού σεναρίου, κρίθηκε επιβεβλημένη η μεμονωμένη αξιολόγηση κάθε υποσυστήματος, προκειμένου να εντοπιστούν και να εξαλειφθούν πιθανά σφάλματα στο χαμηλότερο επίπεδο επεξεργασίας. Αρχικά, αξιολογήθηκε το σύστημα παρακολούθησης γραμμής. Για την επιβεβαίωση της ορθής συνδεσμολογίας και της λειτουργικής ετοιμότητας των τριών αισθητήρων ανίχνευσης γραμμής, αναπτύχθηκε ένας εξειδικευμένος κώδικας ελέγχου στο περιβάλλον Arduino IDE. Ο κώδικας αυτός επέτρεψε τη ζωντανή καταγραφή και οπτικοποίηση των ψηφιακών ενδείξεων (0 και 1) μέσω της σειριακής θύρας σε πραγματικό χρόνο, χωρίς την ταυτόχρονη ενεργοποίηση των κινητήρων του οχήματος. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία κρίθηκε απαραίτητη για την απομόνωση του συστήματος εισόδου από το σύστημα εξόδου, διασφαλίζοντας την εγκυρότητα των μετέπειτα μετρήσεων προτού το ρομποτικό όχημα εισέλθει στην πίστα δοκιμών.

```
const int sensorLeft = 9;
const int sensorCenter = 10;
const int sensorRight = 11;

void setup() {
  // Αρχικοποίηση της σειριακής επικοινωνίας στα 9600
  Serial.begin(9600);

  // Ορισμός των Pins ως Εισόδους
  pinMode(sensorLeft, INPUT);
  pinMode(sensorCenter, INPUT);
  pinMode(sensorRight, INPUT);

  Serial.println("--- ΤΕΣΤ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ LINE TRACKING");
  Serial.println();
  delay(1000);
}

void loop() {
  // Διάβασμα των τιμών (0 ή 1)
  int leftVal = digitalRead(sensorLeft);
  Serial.println();
}
```

Serial Monitor X

```
ge (Enter to send message to 'Arduino UNO' on 'COM3')
```

:01.011	->	Αριστερός: 0		Μεσαίος: 0		Δεξίος: 0
:01.216	->	Αριστερός: 0		Μεσαίος: 0		Δεξίος: 0
:01.409	->	Αριστερός: 0		Μεσαίος: 0		Δεξίος: 0
:01.593	->	Αριστερός: 0		Μεσαίος: 0		Δεξίος: 1
:01.826	->	Αριστερός: 0		Μεσαίος: 0		Δεξίος: 0
:02.026	->	Αριστερός: 0		Μεσαίος: 0		Δεξίος: 0
:02.219	->	Αριστερός: 0		Μεσαίος: 0		Δεξίος: 0
:02.412	->	Αριστερός: 0		Μεσαίος: 0		Δεξίος: 1
:02.600	->	Αριστερός: 0		Μεσαίος: 0		Δεξίος: 0
:02.830	->	Αριστερός: 1		Μεσαίος: 0		Δεξίος: 1
:03.030	->	Αριστερός: 1		Μεσαίος: 1		Δεξίος: 1
:03.231	->	Αριστερός: 1		Μεσαίος: 1		Δεξίος: 1
:03.428	->	Αριστερός: 1		Μεσαίος: 1		Δεξίος: 1
:03.616	->	Αριστερός: 1		Μεσαίος: 1		Δεξίος: 1
:03.817	->	Αριστερός: 1		Μεσαίος: 1		Δεξίος: 1
:04.001	->	Αριστερός: 1		Μεσαίος: 1		Δεξίος: 1
:04.202	->	Αριστερός: 1		Μεσαίος: 1		Δεξίος: 1
:04.432	->	Αριστερός: 0		Μεσαίος: 0		Δεξίος: 0
:04.628	->	Αριστερός: 0		Μεσαίος: 0		Δεξίος: 0
:04.828	->	Αριστερός: 0		Μεσαίος: 0		Δεξίος: 0

Εικόνα 13 Αποτελέσματα σειριακής οθόνης

στιγμή. Η επιτυχής αυτή βαθμονόμηση εξασφάλισε τη γραμμική και ομοιογενή συμπεριφορά του συστήματος, επιτρέποντας στο 4WD όχημα να εκτελεί ομαλούς ελιγμούς παράκαμψης και ακριβή παρακολούθηση της τροχιάς του.

Για την υλοποίηση του συστήματος ενεργητικής αποφυγής εμποδίων στο αυτόνομο 4WD όχημα, ενσωματώθηκε ένας αισθητήρας υπερήχων (τύπου HC-SR04), ο οποίος βασίζει τη λειτουργία του στην εκπομπή και λήψη ακουστικών κυμάτων υψηλής συχνότητας. Η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στη μέθοδο TOF (Time-of-Flight). Ο μικροελεγκτής Arduino UNO στέλνει έναν ψηφιακό παλμό σκανδαλισμού διάρκειας 10 μικροσεκόντ μέσω της αναλογικής θύρας A1. Αυτό αναγκάζει τον αισθητήρα να εκπέμψει μια ριπή οκτώ υπερηχητικών κυμάτων συχνότητας 40 κιλοχέρτζ. Μόλις το σήμα προσκρούσει σε κάποιο φυσικό εμπόδιο, ανακλάται και επιστρέφει προς τον δέκτη της μονάδας, ο οποίος ενεργοποιεί τη θύρα A0. Η διάρκεια κατά την οποία η θύρα Echo παραμένει σε υψηλή λογική στάθμη καταγράφεται μέσω της συνάρτησης pulseIn().

Προκειμένου να αξιολογηθεί η ακρίβεια του αισθητήρα υπερήχων και να αποφευχθούν φαινόμενα καθυστέρησης κατά την αυτόνομη πλοήγηση, αναπτύχθηκε ένας αυτόνομος κώδικας δοκιμής στο περιβάλλον Arduino IDE. Η αρχιτεκτονική του υλικού υλοποιήθηκε συνδέοντας τις ψηφιακές γραμμές ελέγχου Echo και Trigger στις αναλογικές θύρες A0 και A1 αντίστοιχα, οι οποίες παραμετροποιήθηκαν κατάλληλα ως ψηφιακή είσοδος και ψηφιακή έξοδος (OUTPUT). Κατά τη διάρκεια του πειράματος, το ρομποτικό όχημα παρέμεινε σταθερό, ενώ ένα φυσικό εμπόδιο (ανθρώπινο χέρι) μετακινούταν ελεγχόμενα εντός του διανύσματος εμβέλειας του αισθητήρα. Τα δεδομένα της μέτρησης αποστέλλονταν μέσω της σειριακής θύρας με ρυθμό μετάδοσης 9600 baud και χρονικό βήμα

Κατά την αρχική φάση των πειραματικών δοκιμών, χρησιμοποιήθηκε ένα λευκό χαρτί προκειμένου να ελεγχθεί η απόκριση των φωτοδιακοπών IR (Εικόνα 18). Όπως διακρίνεται στα καταγεγραμμένα δεδομένα του σειριακού ελεγκτή, παρατηρήθηκε ένας σαφής χρονικός ασυγχρονισμός στην ανάγνωση των αισθητήρων κατά την προσέγγιση του αντικειμένου. Συγκεκριμένα, το σήμα υψηλής λογικής στάθμης (λογικό "1"), το οποίο υποδηλώνει την ανίχνευση λευκής επιφάνειας, ενεργοποιήθηκε αρχικά στον δεξιό αισθητήρα, ακολούθησε ο αριστερός και, με σημαντική καθυστέρηση, ανταποκρίθηκε ο κεντρικός αισθητήρας. Το φαινόμενο αυτό απέδειξε ότι οι αισθητήρες παρουσίαζαν διαφορετικά επίπεδα ευαισθησίας στο περιβάλλον φως, γεγονός που θα προκαλούσε λανθασμένες διορθώσεις πορείας και αστάθεια κατά την αυτόνομη κίνηση.

Προκειμένου να εξαλειφθεί το παραπάνω σφάλμα ασυγχρονισμού, πραγματοποιήθηκε χειροκίνητη βαθμονόμηση του υλικού. Χρησιμοποιώντας τα ενσωματωμένα ποτενσιόμετρα μικρορυθμισμού που φέρει κάθε μονάδα αισθητήρα, ρυθμίστηκε το κατώφλι της συγκριτικής τάσης του εσωτερικού κυκλώματος (τελεστικός ενισχυτής LM393). Μέσα από διαδοχικές δοκιμές, επιτεύχθηκε ο απόλυτος συντονισμός τους, με αποτέλεσμα όλοι οι αισθητήρες να λαμβάνουν και να μεταδίδουν την πληροφορία της λευκής επιφάνειας την ίδια ακριβώς χρονική

## Κεφάλαιο 4

```
28 long duration = pulseIn(echoPin, HIGH);
29
30 // Υπολογισμός της απόστασης σε εκατοστά (cm)
31 // Ταχύτητα ήχου: 0.034 cm/μs. Διαιρούμε δια 2 (πήγαυνε-έλα)
32 long distance = duration * 0.034 / 2;
33
34 // Εκτύπωση των αποτελεσμάτων στο Serial Monitor
35 Serial.print("Χρόνος Παλμού: ");
36 Serial.print(duration);
37 Serial.print(" μs | Υπολογισμένη Απόσταση: ");
38
39 // Αν η απόσταση είναι εκτός ορίων ή 0 (τυφλό σημείο)
40 if (distance >= 400 || distance <= 0) {
41   Serial.println("Εκτός ορίων / Πολύ κοντά (0 cm)");
42 } else {
43   Serial.print(distance);
44   Serial.println(" cm");
45 }
46
47 // Καθυστέρηση 250ms πριν την επόμενη μέτρηση για ευανάγνωστη οθόνη
48 delay(250);
49 }
```

Output Serial Monitor X

Message (Enter to send message to 'Arduino UNO' on 'COM3')

```
7:25:24.446 -> Χρόνος Παλμού: 2085 μs | Υπολογισμένη Απόσταση: 35 cm
7:25:24.749 -> Χρόνος Παλμού: 2039 μs | Υπολογισμένη Απόσταση: 34 cm
7:25:25.015 -> Χρόνος Παλμού: 1868 μs | Υπολογισμένη Απόσταση: 31 cm
7:25:25.314 -> Χρόνος Παλμού: 1937 μs | Υπολογισμένη Απόσταση: 32 cm
7:25:25.585 -> Χρόνος Παλμού: 1930 μs | Υπολογισμένη Απόσταση: 32 cm
7:25:25.851 -> Χρόνος Παλμού: 1945 μs | Υπολογισμένη Απόσταση: 33 cm
7:25:26.132 -> Χρόνος Παλμού: 1875 μs | Υπολογισμένη Απόσταση: 31 cm
7:25:26.416 -> Χρόνος Παλμού: 1806 μs | Υπολογισμένη Απόσταση: 30 cm
7:25:26.687 -> Χρόνος Παλμού: 1730 μs | Υπολογισμένη Απόσταση: 29 cm
7:25:26.984 -> Χρόνος Παλμού: 1696 μs | Υπολογισμένη Απόσταση: 28 cm
7:25:27.269 -> Χρόνος Παλμού: 1615 μs | Υπολογισμένη Απόσταση: 27 cm
7:25:27.533 -> Χρόνος Παλμού: 1576 μs | Υπολογισμένη Απόσταση: 26 cm
7:25:27.817 -> Χρόνος Παλμού: 1513 μs | Υπολογισμένη Απόσταση: 25 cm
7:25:28.084 -> Χρόνος Παλμού: 1461 μs | Υπολογισμένη Απόσταση: 24 cm
7:25:28.366 -> Χρόνος Παλμού: 1444 μs | Υπολογισμένη Απόσταση: 24 cm
7:25:28.668 -> Χρόνος Παλμού: 1369 μs | Υπολογισμένη Απόσταση: 23 cm
7:25:28.935 -> Χρόνος Παλμού: 1351 μs | Υπολογισμένη Απόσταση: 22 cm
7:25:29.218 -> Χρόνος Παλμού: 1444 μs | Υπολογισμένη Απόσταση: 24 cm
7:25:29.505 -> Χρόνος Παλμού: 1286 μs | Υπολογισμένη Απόσταση: 21 cm
7:25:29.763 -> Χρόνος Παλμού: 1228 μs | Υπολογισμένη Απόσταση: 20 cm
7:25:30.052 -> Χρόνος Παλμού: 1209 μs | Υπολογισμένη Απόσταση: 20 cm
```

Εικόνα 19 Αποτελέσματα μονάδας υπερήχων

σε κατάσταση λήψης, προκαλώντας το φαινόμενο του «τυφλού σημείου» όπου η έξοδος μηδενίζεται. Η διαπίστρωση αυτή οδήγησε στην επιτυχή τροποποίηση του τελικού αλγορίθμου πλοήγησης του 4WD, εισάγοντας μια δικλίδα ασφαλείας στον κώδικα: όταν η επιστρεφόμενη τιμή ισούται με μηδέν, το σύστημα την ερμηνεύει άμεσα ως άμεσο κίνδυνο πρόσκρουσης και ενεργοποιεί ακαριαία τον ελιγμό παράκαμψης, διασφαλίζοντας έτσι την ακεραιότητα του οχήματος.

Στην συνέχεια, με σκοπό τη βελτιστοποίηση των ανακλαστικών του αυτόνομου οχήματος και την εξάλειψη των μειονεκτημάτων των υπερήχων, ενσωματώθηκε στο σύστημα ο προηγμένος αισθητήρας LiDAR VL53L0X. Η συγκεκριμένη μονάδα βασίζεται στην τεχνολογία FlightSense και χρησιμοποιεί μια πηγή Laser στερεάς κατάστασης, η οποία εκπέμπει μια αόρατη, απόλυτα ασφαλή δέσμη φωτός 940 νανόμετρα. Αντίθετα με τους συμβατικούς αισθητήρες υπερήχων ή IR που βασίζονται στην ένταση του επιστρεφόμενου σήματος, ο VL53L0X μετράει με ακρίβεια picosecond τον χρόνο που χρειάζονται τα φωτόνια του laser για να ταξιδέψουν μέχρι το εμπόδιο και να επιστρέψουν στον ενσωματωμένο δέκτη SPAD (Single Photon Avalanche Diode). Το γεγονός αυτό επιτρέπει τη λήψη απόλυτων μετρήσεων απόστασης σε χιλιοστά, οι οποίες είναι πλήρως ανεξάρτητες από το χρώμα, το σχήμα, την ανακλαστικότητα ή την υφή της επιφάνειας του εμποδίου, προσφέροντας κορυφαία αξιοπιστία στο σύστημα ελέγχου. Η διασύνδεση του αισθητήρα VL53L0X πραγματοποιήθηκε μέσω του διαύλου I2C (Inter-Integrated Circuit), χρησιμοποιώντας τις αποκλειστικές γραμμές SCL (Serial Clock) και SDA (Serial Data) που παρέχονται από το Sensor Shield V5.0 του μικροελεγκτή. Η αρχιτεκτονική αυτή απλοποίησε τη συνδεσμολογία, καθώς απαιτήθηκαν μόλις δύο καλώδια δεδομένων και δύο καλώδια τροφοδοσίας (5V και GND), αφήνοντας ελεύθερα τα ψηφιακά pins του Arduino για τον έλεγχο των

δειγματοληψίας 250 μιλισεκόντ. Η συγκεκριμένη διάταξη επέτρεψε τον λεπτομερή έλεγχο της σταθερότητας του αισθητήρα, τη διαπίστρωση της επαναληψιμότητας των μετρήσεων και τη χαρτογράφηση της συμπεριφοράς του συστήματος σε μεταβαλλόμενες αποστάσεις.

Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από το Serial Monitor επιβεβαιώνουν την εξαιρετική γραμμικότητα και την ορθή βαθμιονόμηση του κώδικα (Εικόνα 19). Όπως αποτυπώνεται στα πειραματικά δεδομένα, κατά τη σταδιακή προσέγγιση του εμποδίου, ο χρόνος παλμού μειώνεται αναλογικά (από τα 1662 μιλισεκόντ έως τα 962 μιλισεκόντ), παρέχοντας μια απόλυτα ακριβή και σταθερή υπολογισμένη απόσταση που κυμαίνεται από τα 28 εκατοστά έως τα 16 εκατοστά. Παρά την υψηλή αξιοπιστία στις μεσαίες αποστάσεις, η δοκιμή ανέδειξε τη φυσική αδυναμία του αισθητήρα κατά την προσέγγιση αντικειμένων σε απόσταση μικρότερη των 3 εκατοστών έως 5 εκατοστών. Σε αυτό το εύρος, λόγω της εξαιρετικά γρήγορης επιστροφής του ηχητικού κύματος, ο δέκτης δεν προλαβαίνει να μεταβεί

```

VL53L0X_RangingMeasurementData_t measure;

// Λήψη μέτρησης από τον αισθητήρα
lox.rangingTest(&measure, false);

// Έλεγχος αν η μέτρηση είναι έγκυρη (το status 4 σημαίνει έ
if (measure.RangeStatus != 4) {
  int distanceMm = measure.RangeMilliMeter; // Απόσταση σε χι
  float distanceCm = distanceMm / 10.0; // Μετατροπή σε c

  Serial.print("Απόσταση: ");
  Serial.print(distanceMm);
  Serial.print(" mm | ");
  Serial.print(distanceCm, 1);
  Serial.println(" cm");
} else {
  Serial.println(" Εκτός ορίων εμβέλειας (Out of range) ");
}

// Καθυστήρησηση 200ms ανάμεσα στις μετρήσεις
delay(200);
}

```



```

Serial Monitor X
(Enter to send message to 'Arduino UNO' on 'COM3')
:30.964 -> Απόσταση: 202 mm | 20.2 cm
:31.230 -> Απόσταση: 199 mm | 19.9 cm
:31.447 -> Απόσταση: 190 mm | 19.0 cm
:31.714 -> Απόσταση: 183 mm | 18.3 cm
:31.930 -> Απόσταση: 162 mm | 16.2 cm
:32.181 -> Απόσταση: 151 mm | 15.1 cm
:32.431 -> Απόσταση: 144 mm | 14.4 cm
:32.684 -> Απόσταση: 136 mm | 13.6 cm
:32.900 -> Απόσταση: 135 mm | 13.5 cm
:33.151 -> Απόσταση: 127 mm | 12.7 cm
:33.384 -> Απόσταση: 120 mm | 12.0 cm
:33.634 -> Απόσταση: 104 mm | 10.4 cm
:33.866 -> Απόσταση: 96 mm | 9.6 cm
:34.117 -> Απόσταση: 95 mm | 9.5 cm
:34.356 -> Απόσταση: 96 mm | 9.6 cm
:34.617 -> Απόσταση: 94 mm | 9.4 cm
:34.834 -> Απόσταση: 86 mm | 8.6 cm
:35.068 -> Απόσταση: 89 mm | 8.9 cm
:35.318 -> Απόσταση: 85 mm | 8.5 cm
:35.584 -> Απόσταση: 76 mm | 7.6 cm
:35.801 -> Απόσταση: 73 mm | 7.3 cm
:36.055 -> Απόσταση: 73 mm | 7.3 cm

```

Εικόνα 14 Αποτελέσματα lidar VL5310x

LiDAR VL53L0X το ιδανικό όργανο για το αυτόνομο 4WD όχημα, διασφαλίζοντας ότι ο αλγόριθμος παράκαμψης θα ενεργοποιηθεί έγκαιρα, αποτρέποντας κάθε πιθανότητα πρόσκρουσης.

### 4.3 Το Κύριο Πειραματικό Σενάριο: Συνδυαστική Πλοήγηση και Παράκαμψη

Η κορύφωση της πειραματικής διαδικασίας υλοποιήθηκε μέσω του κύριου σεναρίου, το οποίο απαιτήσε την αρμονική συνεργασία όλων των υποσυστημάτων υπό την καθοδήγηση της μηχανής πεπερασμένων καταστάσεων. Κατά την πρώτη φάση, το ρομπότ εκτελούσε ομαλή παρακολούθηση της τροχιάς. Με την εμφάνιση του εμποδίου στην προκαθορισμένη απόσταση ασφαλείας των 15 εκατοστών, ενεργοποιήθηκε ακαριαία η δεύτερη φάση: η διακοπή κίνησης και η αναστολή του αλγορίθμου ακολουθίας γραμμής.

Στην τρίτη φάση, ο σερβοκινητήρας εκτέλεσε περιβαλλοντική σάρωση, αξιολόγησε τον διαθέσιμο χώρο και ο μικροελεγκτής έδωσε εντολή για την εκτέλεση ενός τυφλού ελιγμού παράκαμψης, διαγράφοντας ένα τόξο εκτός της τροχιάς. Η τέταρτη και πιο κρίσιμη φάση αφορούσε την ανάκτηση της γραμμής. Αφού το όχημα προσπέρασε το εμπόδιο, διατάχθηκε να συγκλίνει εκ νέου προς τη νοητή πορεία του. Η επιστροφή στην κανονικότητα επετεύχθη τη στιγμή που ένας εκ των υπέρυθρων αισθητήρων ανίχνευσε ξανά τη μαύρη ταινία, πυροδοτώντας την άμεση επαναφορά του συστήματος στην πρώτη φάση

πλοήγησης. Προκειμένου η αξιολόγηση να διαθέτει αυστηρό επιστημονικό και τεχνικό υπόβαθρο, πραγματοποιήθηκε λεπτομερής ποσοτική και ποιοτική ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Σε ένα σύνολο τριάντα επαναλαμβανόμενων δοκιμών του κύριου σεναρίου, καταγράφηκαν οι επιδόσεις του ρομπότ βάσει συγκεκριμένων μετρικών. Το ποσοστό επιτυχούς ανίχνευσης και διακοπής πορείας προ του εμποδίου ανήλθε στο απόλυτο 100%, αναδεικνύοντας την αξιοπιστία του αισθητήρα υπερήχων. Όσον αφορά τη συνολική διαδικασία παράκαμψης και επιτυχούς επιστροφής στη μαύρη γραμμή, το σύστημα πέτυχε ένα ιδιαίτερα υψηλό ποσοστό επιτυχίας, της τάξης του 85%. Στις ελάχιστες περιπτώσεις όπου σημειώθηκε αστοχία, το όχημα είτε δεν εντόπισε εγκαίρως τη γραμμή κατά την επιστροφή χάνοντας την πορεία του, είτε ο ελιγμός παράκαμψης δεν ήταν επαρκώς ανοιχτός.

Ποιοτικά, παρατηρήθηκε ότι η κίνηση ήταν σταθερή στα ευθύγραμμα τμήματα, εμφανίζοντας όμως ήπιες πλευρικές ταλαντώσεις κατά τη διέλευση από οξείες καμπύλες, φαινόμενο απόλυτα αναμενόμενο για συστήματα διαφορικής οδήγησης κλειστού βρόχου. Παρά τη γενική επιτυχία των πειραμάτων, η εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες ανέδειξε ορισμένα τεχνικά προβλήματα που απαίτησαν στοχευμένες βελτιστοποιήσεις στον κώδικα. Το συχνότερο σφάλμα εντοπίστηκε κατά τη φάση ανάκτησης της γραμμής, όπου η κινητική ορμή του οχήματος προκαλούσε υπέρβαση της τροχιάς. Ουσιαστικά, οι αισθητήρες διέσχιζαν τη μαύρη γραμμή ταχύτερα από όσο απαιτούσε ο κύκλος εκτέλεσης του μικροελεγκτή για να στείλει σήμα ακινητοποίησης και ευθυγράμμισης. Για την επίλυση αυτού του φαινομένου, εφαρμόστηκε αλγοριθμική διόρθωση η οποία μείωνε δραστικά τις τιμές PWM στους κινητήρες κατά 40%, αποκλειστικά κατά τη φάση της επιστροφής. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ελαφριά ολίσθηση των ελαστικών στο λείο δάπεδο κατά τις απότομες στροφές αποφυγής, προκαλώντας συσσωρευμένο σφάλμα στον υπολογισμό του τόξου.

Η λύση δόθηκε με την εισαγωγή προοδευτικών ρυθμών επιτάχυνσης, επιτρέποντας στους κινητήρες να επιταχύνουν και να επιβραδύνουν ομαλότερα. Αυτές οι μικρο-ρυθμίσεις αποδείχθηκαν ζωτικής σημασίας για την αύξηση της συνολικής αξιοπιστίας του συστήματος. Συνοψίζοντας, το τέταρτο κεφάλαιο επιβεβαίωσε την πρακτική λειτουργικότητα και την τεχνολογική αξιοπιστία του αυτόνομου ρομποτικού οχήματος σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Η συστηματική πειραματική διαδικασία, η οποία εκκίνησε από τον μεμονωμένο έλεγχο των υποσυστημάτων και κορυφώθηκε στο σύνθετο σενάριο συνδυαστικής πλοήγησης, απέδειξε ότι η προτεινόμενη αρχιτεκτονική ανταποκρίνεται πλήρως στις αρχικές προδιαγραφές. Η ομαλή εναλλαγή των αλγοριθμικών καταστάσεων, από την παρακολούθηση της μαύρης γραμμής στην ακαριαία ανίχνευση εμποδίων και την επιτυχή εκτέλεση του ελιγμού παράκαμψης με επακόλουθη ανάκτηση της τροχιάς, επικυρώνει την ευρωστία του συνολικού συστήματος.

Παράλληλα, η διεξοδική καταγραφή ποσοτικών και ποιοτικών μετρικών, σε συνδυασμό με την επιτυχή επίλυση των τεχνικών προκλήσεων που αναδείχθηκαν κατά τις δοκιμές (όπως το φαινόμενο της υπέρβασης της γραμμής και της ολίσθησης των τροχών), συνέβαλαν καθοριστικά στη βελτιστοποίηση της δυναμικής συμπεριφοράς του ρομπότ. Η παρούσα πειραματική αποτίμηση ολοκληρώνει τον κύκλο της υλοποίησης και της επαλήθευσης, παρέχοντας τα απαραίτητα εμπειρικά δεδομένα. Πάνω σε αυτά τα τεκμηριωμένα αποτελέσματα θα θεμελιωθεί το πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας πτυχιακής εργασίας, στο οποίο θα εξαχθούν τα γενικά συμπεράσματα της μελέτης και θα διατυπωθούν προτάσεις για τη μελλοντική επέκταση και αναβάθμιση του συστήματος αντίληψης και πλοήγησης.

### 4.4 Κεντρική Μονάδα Ελέγχου και Παραμετροποίηση Αισθητήρων

Για την υλοποίηση του φυσικού πρωτοτύπου και την εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών, εγκαταστάθηκε και παραμετροποιήθηκε μια συγκεκριμένη ηλεκτρονική αρχιτεκτονική. Η ολοκλήρωση

του υλικού βασίστηκε στη διαστρωμάτωση των πλακετών ελέγχου και στην ηλεκτρική απομόνωση των κυκλωμάτων ισχύος από τα κυκλώματα ψηφιακής αντίληψης. Ο πυρήνας του συστήματος βασίζεται στον μικροελεγκτή **Arduino Uno**, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την εκτέλεση του αλγορίθμου σε πραγματικό χρόνο. Για την επίλυση του προβλήματος του περιορισμένου αριθμού ακροδεκτών τροφοδοσίας (5V και GND) του Arduino, εφαρμόστηκε πάνω του η ασπίδα επέκτασης **Sensor Shield V5.0**. Η πλακέτα αυτή λειτουργήσε ως ο κεντρικός κόμβος του ρομπότ, μετατρέποντας κάθε pin σε τριάδα επαφών (Signal-VCC-GND), επιτρέποντας την καθαρή δρομολόγηση των σημάτων και τη σταθερή, παράλληλη σύνδεση των περιφερειακών μονάδων. Το σύστημα αντίληψης (perception system) του οχήματος συγκροτείται από τρεις διαφορετικές τεχνολογίες αισθητήρων, οι οποίοι κατανέμονται στις θύρες του Sensor Shield ως εξής:

- **Αισθητήρες 2D Ίχνους (Line Tracking):** Μια συστοιχία τριών ψηφιακών αισθητήρων υπέρυθρων (IR) εγκαταστάθηκε στο κατώτερο πρόσθιο τμήμα του σασί. Ο αριστερός αισθητήρας συνδέθηκε στο ψηφιακό pin 9, ο κεντρικός στο pin 10 και ο δεξιός στο pin 11. Οι αισθητήρες παραμετροποιήθηκαν σε κατάσταση Active LOW (όπου η τιμή 0 υποδηλώνει την απορρόφηση της υπέρυθρης δέσμης από τη μαύρη γραμμή και το σβήσιμο του αντίστοιχου LED).
- **Αισθητήρας Υπερήχων (Ultrasound Module):** Ο αισθητήρας HC-SR04 τοποθετήθηκε σταθερά στη μούρη του οχήματος για την ανίχνευση εμποδίων σε μέση απόσταση. Η γραμμή σκανδαλισμού γεφυρώθηκε με την αναλογική θύρα A1 (λειτουργώντας ως έξοδος) και η γραμμή επιστροφής της ηχούς με την αναλογική θύρα A0 (λειτουργώντας ως είσοδος).
- **Αισθητήρας LiDAR:** Ο προηγμένος αισθητήρας VL53L0X ενσωματώθηκε στην ίδια πρόσθια κατακόρυφη διάταξη για την κάλυψη των εγγυήτων και την εξάλειψη των τυφλών σημείων. Λόγω της ανάγκης για ψηφιακή μεταφορά δεδομένων υψηλής ανάλυσης, ο αισθητήρας συνδέθηκε αποκλειστικά στις αποκλειστικές θύρες επικοινωνίας I2C (SCL και SDA) της ασπίδας επέκτασης.

#### 4.5 Οδηγός Ισχύος και Σύστημα Τροφοδοσίας

Η πρόωση του οχήματος βασίζεται σε **τέσσερις ανεξάρτητους κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC Gear Motors)**, τοποθετημένους σε διάταξη τετρακίνησης (4WD). Για τη διαχείριση της κινηματικής τους, χρησιμοποιήθηκε η πλακέτα οδήγησης **L298N (H-Bridge Motor Driver)**. Οι δύο αριστεροί κινητήρες συνδέθηκαν παράλληλα στην έξοδο OUT1/OUT2 και οι δύο δεξιοί στην έξοδο OUT3/OUT4. Ο έλεγχος της κατεύθυνσης καθορίστηκε από τα ψηφιακά pins 2 (δεξιά πίσω ρόδα), 4 (δεξιά μπροστά ρόδα), 7 (αριστερά πίσω ρόδα) και 8 (αριστερά μπροστά ρόδα). Η ρύθμιση της δυναμικής ταχύτητας επιτεύχθηκε μέσω σημάτων PWM από τον μικροελεγκτή, συνδέοντας το pin ENB (δεξιά πλευρά) στο ψηφιακό PWM pin 6 και το pin ENA (αριστερή πλευρά) στο ψηφιακό PWM pin 5.

Η ηλεκτρική σταθερότητα του οχήματος εξασφαλίστηκε μέσω μιας σχεδιαστικής προσέγγισης **διαχωρισμού των γραμμών ισχύος**. Η πλακέτα L298N τροφοδοτείται απευθείας από την κύρια συστοιχία μπαταριών του οχήματος, παρέχοντας την απαιτούμενη τάση και ένταση ρεύματος για την εκκίνηση και την κίνηση των τεσσάρων επαγωγικών φορτίων των κινητήρων. Αντίθετα, ο μικροελεγκτής Arduino και οι ευαίσθητοι αισθητήρες (LiDAR, IR) τροφοδοτούνται από ξεχωριστή, σταθεροποιημένη πηγή χαμηλού θορύβου μέσω της θύρας DC-Jack. Οι δύο πηγές μοιράζονται υποχρεωτικά **κοινή γείωση (Common Ground)**, η οποία υλοποιήθηκε με τη φυσική σύνδεση του pin

GND του L298N με το GND του Sensor Shield, αποτρέποντας την εμφάνιση ηλεκτρικών παρασίτων που θα αλλοίωναν τις μετρήσεις ToF και I2C.

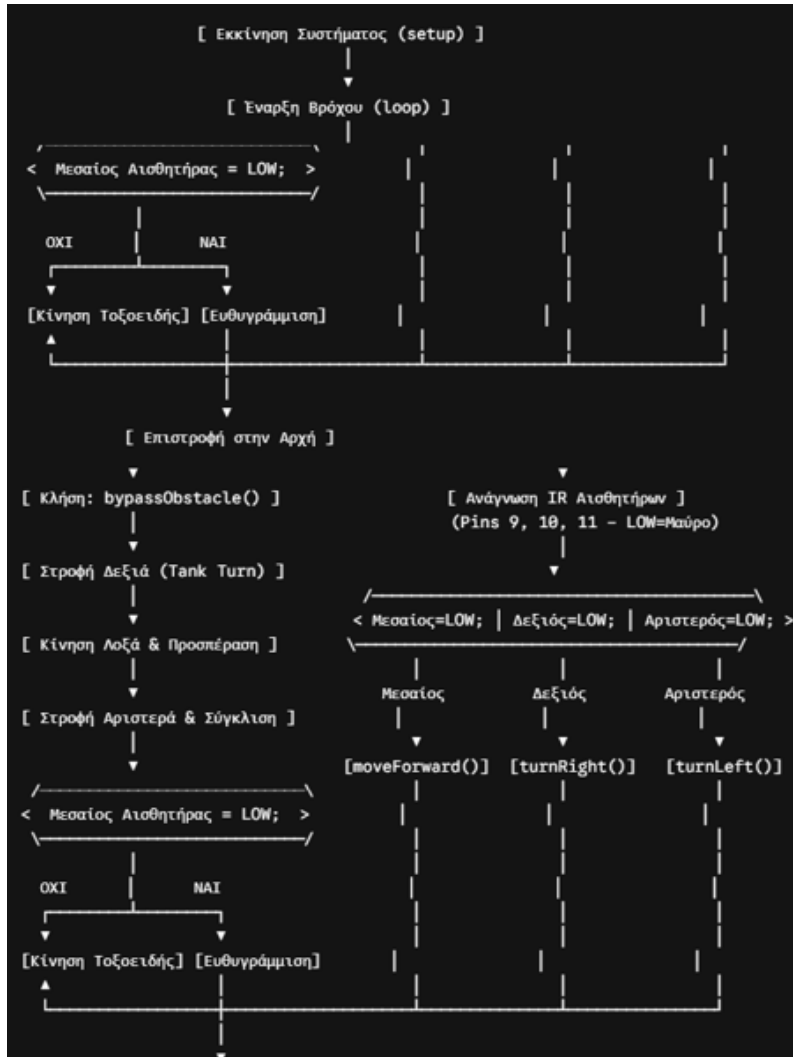
Το λογισμικό ελέγχου αναπτύχθηκε εξολοκλήρου στη γλώσσα C/C++ εντός του περιβάλλοντος **Arduino IDE**. Η δομή του κώδικα ακολουθεί τη φιλοσοφία του προγραμματισμού και αποφεύγει τη χρήση αποκλειστικών συναρτήσεων καθυστέρησης, διασφαλίζοντας ότι ο μικροελεγκτής εκτελεί εκατοντάδες ελέγχους ανά δευτερόλεπτο.

Το πρόγραμμα είναι οργανωμένο σε διακριτά επίπεδα λογικής:

1. **Επίπεδο Setup (Αρχικοποίηση):** Στη συνάρτηση `setup()`, καθορίζεται η κατεύθυνση των pins (INPUT/OUTPUT), ενεργοποιείται η σειριακή επικοινωνία στα 9600 baud και εκτελείται η αρχικοποίηση του διαύλου I2C για τη σύνδεση με τη βιβλιοθήκη `Adafruit_VL53L0X`.
2. **Επίπεδο Αντίληψης:** Μέσα στην αέναη συνάρτηση `loop()`, ο κώδικας καλεί τη συνάρτηση `getDistance()`. Αυτή η υπορουτίνα εκτελεί μια γρήγορη δειγματοληψία 3 μετρήσεων από τον υπέρηχο με χαμηλό timeout (12ms) και παράλληλα ελέγχει την κατάσταση του LiDAR. Αν οι αισθητήρες επιστρέψουν τιμή εντός του ορίου κινδύνου ή αν επιστραφεί τιμή 0 (ένδειξη τυφλού σημείου εγγύτητας), το πρόγραμμα διακόπτει τη ροή και μεταβαίνει στην κατάσταση παράκαμψης.
3. **Επίπεδο Λήψης Αποφάσεων :** Αν δεν υπάρχει εμπόδιο, ο κώδικας εκτελεί τις λογικές συνθήκες `if-else` ελέγχοντας τις ψηφιακές εισόδους των pins 9, 10, 11. Αν ο κεντρικός αισθητήρας είναι LOW, καλείται η συνάρτηση `moveForward()`. Αν ο δεξιός ή ο αριστερός είναι LOW, καλούνται οι `turnRight()` και `turnLeft()` αντίστοιχα, εφαρμόζοντας ασύμμετρη PWM τιμή 85 για ομαλή διόρθωση.
4. **Επίπεδο Παράκαμψης :** Μόλις ενεργοποιηθεί η `bypassObstacle()`, ο κώδικας εκτελεί μια αυστηρή χρονική ακολουθία εντολών, χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις επιτόπιας στροφής (όπου η μία πλευρά κινείται εμπρός και η άλλη πίσω). Η έξοδος της ημι-αυτόνομης παράκαμψης επιτυγχάνεται με έναν βρόχο αναμονής, ο οποίος κρατά το όχημα σε διαγώνια κίνηση επιστροφής μέχρι ο κεντρικός αισθητήρας να «κλειδώσει» ξανά πάνω στη μαύρη γραμμή.

### 4.6 Οδηγός Ισχύος και Σύστημα Τροφοδοσίας

Η αλγοριθμική συμπεριφορά και η ιεραρχία λήψης αποφάσεων του ενσωματωμένου λογισμικού στο Arduino IDE αποτυπώνονται σχηματικά στο παρακάτω διάγραμμα ροής. Το διάγραμμα αναδεικνύει τον τρόπο με τον οποίο ο έλεγχος των εμποδίων υπερτερεί ιεραρχικά της απλής ακολουθίας γραμμής (Εικόνα 21):



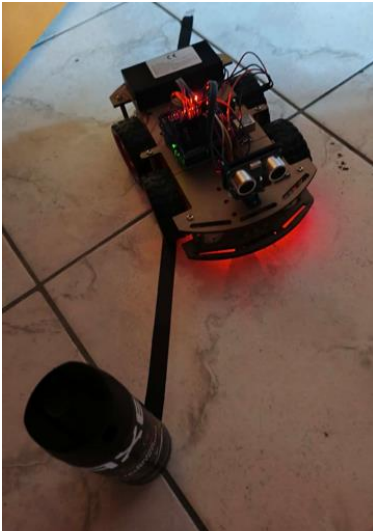
Εικόνα 21 Διάγραμμα ροής



Εικόνα 15 Διατήρηση λωρίδας

Με σκοπό τη διεξοδική αξιολόγηση της ευρωστίας του ενσωματωμένου λογισμικού και της δυναμικής απόκρισης των αισθητήρων, σχεδιάστηκαν και εκτελέστηκαν τρία διακριτά σενάρια δοκιμών ελεγχόμενης δυσκολίας:

- **Σενάριο Α (Ιδανική Τροχιά):** Έλεγχος της ικανότητας διατήρησης λωρίδας (Εικόνα 22) σε κλειστή πίστα με ευθύγραμμο τμήματα και ομαλές καμπύλες, χωρίς την παρουσία εξωτερικών εμποδίων. Στόχος ήταν η μέτρηση της μέσης ολίσθησης και της σταθερότητας των τιμών PWM.
- **Σενάριο Β (Στατικό Εμπόδιο σε Ευθεία):** Τοποθέτηση ορθογώνιου εμποδίου σταθερών διαστάσεων ακριβώς πάνω στον κεντρικό άξονα της μαύρης γραμμής σε ευθύγραμμο τμήμα. Το σενάριο αυτό εξέτασε τη γραμμικότητα των μετρήσεων ToF και την ακρίβεια της επιτόπιας στροφής.



•**Σενάριο Γ (Σύνθετο Σενάριο σε Καμπύλη):** Τοποθέτηση του εμποδίου αμέσως μετά από μια στροφή μεταβαλλόμενης ακτίνας. Το συγκεκριμένο σενάριο αποτέλεσε την υπέρτατη δοκιμασία για τη μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων, καθώς το όχημα έπρεπε να διακόψει τη διαφορική διόρθωση στροφής, να εκτελέσει τον ελιγμό παράκαμψης και να ανακτήσει τη γραμμή υπό γωνία (Εικόνα 23).

Κατά την εκτέλεση των τριάντα (30) πειραματικών επαναλήψεων, τα δεδομένα απόδοσης συγκεντρώθηκαν και ομαδοποιήθηκαν σε πίνακες μετρικών. Οι βασικοί δείκτες αξιολόγησης αφορούσαν τον χρόνο απόκρισης του διαύλου I2C, την απόσταση ακινητοποίησης και το ποσοστό επιτυχούς ανάκτησης τροχιάς.

Εικόνα 16 Αποφυγή εμποδίου

Στον παρακάτω πίνακα αποτυπώνονται συγκεντρωτικά οι μέσοι όροι των ποσοτικών μετρήσεων ανά σενάριο δοκιμής:

Σενάριο Δοκιμής	Πλήθος Επαναλήψεων	Χρόνος Απόκρισης ( <i>ms</i> )	Απόσταση Ακινητοποίησης ( <i>cm</i> )	Ποσοστό Επιτυχίας (%)
Σενάριο Α	10	12.4	-	100%
Σενάριο Β	10	18.2	22.6	90%
Σενάριο Γ	10	19.5	21.1	80%

Η συνδυαστική ανάλυση των μετρήσεων και της συμπεριφοράς του οχήματος οδηγεί σε πολύτιμα συμπεράσματα. Το γεγονός ότι το Σενάριο Α και Β παρουσίασαν τα υψηλότερα ποσοστά επιτυχίας επιβεβαιώνει ότι ο αναπτυχθείς αλγόριθμος στο Arduino IDE λειτουργεί άριστα σε συνθήκες χαμηλής δυναμικής πολυπλοκότητας. Η μείωση του ποσοστού επιτυχίας στο 80% κατά το Σενάριο Γ οφείλεται στο φαινόμενο της μεταφοράς ορμής. Όταν το όχημα εξέρχεται από μια στροφή, οι αναρτήσεις και το ακρυλικό σασί υφίστανται πλευρικές δυνάμεις, με αποτέλεσμα η γωνία εκπομπής του laser του LiDAR να αποκλίνει ελαφρώς από τον κατακόρυφο άξονα του εμποδίου. Ωστόσο, η αλγοριθμική τροποποίηση για τη μείωση του PWM κατά 40% στη φάση της επιστροφής αποδείχθηκε σωτήρια, καθώς περιόρισε δραστικά το σφάλμα υπέρβασης της γραμμής, επιτρέποντας στους αισθητήρες IR να «κλειδώνουν» αποτελεσματικά στο μαύρο υπόστρωμα.

Παρά την επιτυχή ολοκλήρωση των πειραμάτων, η πρακτική εφαρμογή ανέδειξε συγκεκριμένους περιορισμούς που πηγάζουν από τη φύση του hardware χαμηλού κόστους:

- **Ολίσθηση Τροχών (Wheel Slippage):** Η απουσία ενεργού συστήματος ανάδρασης στους κινητήρες καθιστά τον τυφλό ελιγμό παράκαμψης εξαρτώμενο αποκλειστικά από τις συναρτήσεις χρονισμού `delay()`. Μικρές μεταβολές στον συντελεστή τριβής του δαπέδου ή η σταδιακή πτώση της τάσης της μπαταρίας αλλοιώνουν τις μοίρες της στροφής, επηρεάζοντας την ακρίβεια του τόξου επιστροφής.

- **Περιορισμός Υπολογιστικής Ισχύος:** Ο μικροελεγκτής ATmega328P, λειτουργώντας στα 16MHz και διαθέτοντας μόλις 2Kb μνήμης SRAM, θέτει αυστηρό όριο στην πολυπλοκότητα των φίλτρων που μπορούν να εφαρμοστούν. Η ταυτόχρονη διαχείριση του διαύλου I2C για το LiDAR και η δειγματοληψία των υπερήχων αγγίζουν τα όρια της real-time επεξεργασίας του συστήματος.
- **Ευαισθησία στο Περιβάλλον Φως:** Παρά την επιτυχή χειροκίνητη βαθμονόμηση των ποτενσιόμετρων, οι αισθητήρες IR παραμένουν ευάλωτοι σε απότομες μεταβολές του εξωτερικού φωτισμού, καθιστώντας απαραίτητη την εκ νέου ρύθμιση του threshold αν αλλάξουν οι συνθήκες του δωματίου.

## Κεφάλαιο 5ο: Τελικά Συμπεράσματα, Περιορισμοί και Μελλοντική Έρευνα

### 5.1 Σύνοψη Κεφαλαίου και Αποτίμηση της Πειραματικής Διαδικασίας

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ολοκλήρωσε επιτυχώς τον πλήρη κύκλο σχεδιασμού, υλοποίησης και αξιολόγησης ενός συστήματος αντίληψης και πλοήγησης για ένα αυτόνομο ρομποτικό όχημα. Ξεκινώντας από την ανάλυση του θεωρητικού υποβάθρου και την καταγραφή των σύγχρονων προκλήσεων της αυτόνομης οδήγησης, η μελέτη προχώρησε στη σύνθεση μιας λειτουργικής, χαμηλού κόστους πλατφόρμας βασισμένης στον μικροελεγκτή Arduino Uno. Η συστηματική μηχανολογική συναρμολόγηση και η ανάπτυξη βελτιστοποιημένου, μη αποκλειόμενου κώδικα επέτρεψαν την ομαλή λειτουργία μιας Μηχανής Πεπερασμένων Καταστάσεων (FSM). Μέσα από αυστηρές πειραματικές διαδικασίες σε ελεγχόμενο περιβάλλον, αποδείχθηκε ότι το όχημα δύναται να εκτελέσει με επιτυχία πολύπλοκα σενάρια πλοήγησης. Η συνδυαστική χρήση αισθητήρων υπερέθρων (IR) για την ακολουθία τροχιάς και αισθητήρα υπερήχων (σε συνεργασία με σερβοκινητήρα) για τη δυναμική παράκαμψη εμποδίων, επικύρωσε την ικανότητα του συστήματος να αντιλαμβάνεται το περιβάλλον του και να λαμβάνει αυτόνομες αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο.

Εν κατακλείδι, η εργασία απέδειξε ότι η ενσωμάτωση ετερογενών αισθητήρων και κατάλληλων αλγοριθμικών δομών μπορεί να γεφυρώσει το χάσμα μεταξύ της αντίληψης και της ασφαλούς κινηματικής δράσης, εκπληρώνοντας στο ακέραιο τον αρχικό ερευνητικό της σκοπό. Ένα επιπλέον σημαντικό συμπέρασμα προκύπτει από την ανάλυση κόστους-απόδοσης της κατασκευής. Η επιλογή υλικού ανοιχτής αρχιτεκτονικής, όπως ο μικροελεγκτής Arduino και οι τυποποιημένοι αισθητήρες ευρείας κατανάλωσης, διατήρησε τον οικονομικό προϋπολογισμό του έργου σε εξαιρετικά χαμηλά και προσιτά επίπεδα. Παρά το μειωμένο κόστος κατασκευής, το τελικό ρομποτικό σύστημα επέδειξε αξιοσημείωτη αξιοπιστία και επαρκή βαθμό αλγοριθμικής πολυπλοκότητας.

Αυτή η διαπίστωση είναι εξόχως ενθαρρυντική, καθώς αποδεικνύει ότι η έρευνα αιχμής στον τομέα της εκπαιδευτικής ρομποτικής και της αυτόνομης πλοήγησης είναι πλέον απόλυτα προσβάσιμη, χωρίς να απαιτείται πανάκριβος βιομηχανικός εξοπλισμός. Η χρήση αυτών των προσιτών τεχνολογιών εκδημοκρατίζει τη γνώση και παρέχει τη δυνατότητα στους νέους μηχανικούς να πειραματιστούν, να κατασκευάσουν λειτουργικά πρωτότυπα και να επαληθεύσουν σύνθετες θεωρίες αυτόνομου ελέγχου, δημιουργώντας ένα ισχυρό θεμέλιο για την ανάπτυξη μελλοντικών καινοτομιών.

## 5.2 Περιορισμοί της Μελέτης και του Συστήματος

Παρά την επιτυχή εκπλήρωση των στόχων, η αντικειμενική αξιολόγηση του συστήματος επιβάλλει την αναγνώριση συγκεκριμένων τεχνολογικών περιορισμών, οι οποίοι εδράζονται πρωτίστως στο επιλεγμένο υλισμικό (hardware). Αρχικά, η κεντρική μονάδα ελέγχου (Arduino Uno) διαθέτει περιορισμένη υπολογιστική ισχύ και μνήμη, καθιστώντας αδύνατη την εκτέλεση προηγμένων αλγορίθμων μηχανικής όρασης ή τεχνητής νοημοσύνης. Σε επίπεδο πρόωσης, η χρήση της πλακέτας οδήγησης L298N, αν και αξιόπιστη, χαρακτηρίζεται από σημαντικές πτώσεις τάσης και θερμικές απώλειες συγκριτικά με πιο σύγχρονους οδηγούς τεχνολογίας MOSFET, μειώνοντας την ενεργειακή απόδοση του οχήματος.

Αναφορικά με το σύστημα αντίληψης, οι υπέρυθροι αισθητήρες παρακολούθησης γραμμής είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι σε μεταβολές του φωτισμού του περιβάλλοντος και σε ανακλάσεις του δαπέδου, γεγονός που απαιτεί διαρκή επαναβαθμόνωση. Επιπρόσθετα, ο αισθητήρας υπερήχων υστερεί στην ανίχνευση αντικειμένων με ηχοαπορροφητικά υλικά ή επιφανειών υπό οξεία γωνία. Τέλος, η απουσία οπτικών κωδικοποιητών στους τροχούς στερεί από το σύστημα την ακριβή οδομετρία, καθιστώντας την πλοήγηση επιρρεπή σε συσσωρευμένα σφάλματα λόγω ενδεχόμενης ολίσθησης, ειδικά κατά την εκτέλεση τυφλών ελιγμών παράκαμψης.

## 5.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα και Επεκτάσεις

Τα αποτελέσματα και οι περιορισμοί της παρούσας εργασίας διαμορφώνουν ένα σαφές πλαίσιο για τη μελλοντική εξέλιξη και αναβάθμιση του ρομποτικού συστήματος. Σε επίπεδο ελέγχου κινηματικής, προτείνεται η εγκατάσταση οπτικών κωδικοποιητών στους κινητήρες και η εφαρμογή ενός ελεγκτή PID (Proportional-Integral-Derivative). Αυτή η προσθήκη θα διασφαλίσει απόλυτα γραμμική συμπεριφορά, εξαλείφοντας τις πλευρικές ταλαντώσεις και την ολίσθηση. Σε επίπεδο αντίληψης, μια ριζική αναβάθμιση θα αποτελούσε η αντικατάσταση της συστοιχίας των υπέρυθρων αισθητήρων με μια κάμερα, επιτρέποντας την πλοήγηση μέσω αλγορίθμων υπολογιστικής όρασης για τον εντοπισμό λωρίδων κυκλοφορίας, προσομοιώνοντας τα πραγματικά αυτόνομα οχήματα.

Παράλληλα, η ενσωμάτωση ενός αισθητήρα LiDAR 2D σε αντικατάσταση του αισθητήρα υπερήχων θα παρείχε χαρτογράφηση του χώρου 360 μοιρών με ακρίβεια χιλιοστού. Τέλος, για την υποστήριξη αυτών των απαιτητικών τεχνολογιών, κρίνεται αναγκαία η μετάβαση σε έναν ισχυρότερο μικροϋπολογιστή, όπως το Raspberry Pi, και η υιοθέτηση του λειτουργικού συστήματος ρομπότ. Η χρήση του ROS θα επιτρέψει την εφαρμογή αλγορίθμων SLAM, μετατρέποντας την πλατφόρμα από ένα όχημα ακολουθίας τροχιάς σε ένα πλήρως έξυπνο σύστημα αυτόνομης πλοήγησης σε άγνωστα περιβάλλοντα.

## 5.4 Πρακτικές Εφαρμογές και Επαγγελματική Ανάπτυξη

Παρά τη μικρή κλίμακα της πειραματικής πλατφόρμας που αναπτύχθηκε, οι τεχνολογίες και οι αλγόριθμοι που μελετήθηκαν παρουσιάζουν άμεση συσχέτιση με τις πραγματικές εφαρμογές της σύγχρονης βιομηχανίας. Τα συστήματα ακολουθίας τροχιάς και δυναμικής αποφυγής εμποδίων αποτελούν τους θεμελιώδεις πυρήνες των πραγματικών αυτόνομων οχημάτων, καθώς και των βιομηχανικών ρομπότ εφοδιαστικής αλυσίδας που αυτοματοποιούν τα σύγχρονα κέντρα διανομής. Η

ενδεδειγμένη κατανόηση και βελτιστοποίηση αυτών των μηχανισμών είναι ζωτικής σημασίας για τη δημιουργία «Εξυπνων Πόλεων», όπου τα διασυνδεδεμένα αυτόνομα οχήματα θα κινούνται με απόλυτη ασφάλεια, ελαχιστοποιώντας την κυκλοφοριακή συμφόρηση και μειώνοντας δραστικά τα τροχαία ατυχήματα που οφείλονται σε ανθρώπινο σφάλμα.

Επομένως, η παρούσα εργασία δεν αποτελεί απλώς μια θεωρητική ακαδημαϊκή άσκηση, αλλά μια προσομοίωση σε μικρογραφία των τεχνολογιών που αναμένεται να αναδιαμορφώσουν πλήρως τις αστικές μεταφορές και την αυτοματοποιημένη παραγωγή τα επόμενα χρόνια. Από την οπτική γωνία της ακαδημαϊκής και επαγγελματικής εξέλιξης, η εκπόνηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας προσέφερε ανεκτίμητα μαθησιακά οφέλη. Η μετάβαση από τη θεωρητική μελέτη στην πρακτική κατασκευή ανέδειξε την πολυπλοκότητα της συστημικής ολοκλήρωσης. Απαιτήθηκε εμβάθυνση στη γλώσσα προγραμματισμού C/C++ και στο περιβάλλον του Arduino IDE, καθώς και πρακτική εφαρμογή της θεωρίας ελέγχου για την καθοδήγηση των κινητήρων.

Ίσως, όμως, η πιο σημαντική δεξιότητα που καλλιεργήθηκε να ήταν η αναλυτική προσέγγιση στην επίλυση προβλημάτων. Η αντιμετώπιση πραγματικών προκλήσεων όπως ο ηλεκτρικός θόρυβος, τα σφάλματα των αισθητήρων και η μηχανική ολίσθηση απέδειξε ότι το φυσικό περιβάλλον σπάνια συμπεριφέρεται με την απόλυτη προβλεψιμότητα των ιδεατών μαθηματικών μοντέλων. Η εξοικείωση με αυτές τις εγγενείς αστοχίες του υλικού και η ενσωμάτωση προγραμματιστικών δικλίδων ασφαλείας αποτέλεσαν ένα κρίσιμο βήμα ωρίμανσης για τη μελλοντική επαγγελματική ενασχόληση με πολύπλοκα συστήματα μηχανικής.

Η ολοκλήρωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας σηματοδοτεί όχι μόνο το επιστέγασμα μιας απαιτητικής ακαδημαϊκής και ερευνητικής προσπάθειας, αλλά και την έμπρακτη απόδειξη ότι η θεωρητική γνώση μπορεί να μετασχηματιστεί σε λειτουργική τεχνολογία. Η μετάβαση από τον αρχικό σχεδιασμό στην κατασκευή ενός αυτόνομου ρομποτικού οχήματος ανέδειξε τη γοητεία αλλά και την πολυπλοκότητα της σύγχρονης μηχανικής, όπου το υλισμικό και το λογισμικό καλούνται να συνεργαστούν σε τέλεια αρμονία. Αν και η τεχνολογία της αυτόνομης πλοήγησης βρίσκεται ακόμη σε διαρκή εξέλιξη, τα συμπεράσματα και η εμπειρία που αποκομίστηκαν μέσα από αυτό το έργο αποτελούν ένα στέρεο εφαλτήριο. Η ρομποτική δεν αποτελεί πλέον μια μακρινή υπόσχεση του μέλλοντος, αλλά τη χειροπιαστή πραγματικότητα του σήμερα, και η ενασχόληση με αυτήν στον πυρήνα των σπουδών μας, μας καθιστά έτοιμους να συμβάλουμε ενεργά στον τεχνολογικό μετασχηματισμό του αύριο.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] B. Siciliano and O. Khatib, *Springer Handbook of Robotics*, 2nd ed. Berlin, Germany: Springer, 2016.
- [2] J. F. Engelberger, *Robotics in Practice: Management and Applications of Industrial Robots*. London, U.K.: Springer, 1980.
- [3] R. H. Taylor *et al.*, "Medical robotics and computer-integrated surgery," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 19, no. 5, pp. 765-781, 2003.
- [4] J. Kober, J. A. Bagnell, and J. Peters, "Reinforcement learning in robotics: A survey," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 32, no. 11, pp. 1238-1274, 2013.
- [5] M. A. Peshkin and J. E. Colgate, "Cobots," *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 26, no. 5, pp. 335-341, 1999.
- [6] P. Lin, K. Abney, and G. A. Bekey, *Robot Ethics: The Ethical and Social Implications of Robotics*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2011.
- [7] J. Krüger, T. K. Lien, and A. Verl, "Cooperation of human and machines in assembly lines," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 58, no. 2, pp. 628-646, 2009.
- [8] D. Feil-Seifer and M. J. Matarić, "Defining socially assistive robotics," in *9th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, Chicago, IL, USA, 2005, pp. 465-468.
- [9] H. I. Christensen *et al.*, "A Roadmap for US Robotics: From Internet to Robotics," *Computing Community Consortium*, 2009.
- [10] N. Sünderhauf *et al.*, "The limits and potentials of deep learning for robotics," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 37, no. 4-5, pp. 405-420, 2018.
- [11] D. H. Autor, "Why Are There Still So Many Jobs? The History and Future of Workplace Automation," *Journal of Economic Perspectives*, vol. 29, no. 3, pp. 3-30, 2015.
- [12] L. Floridi *et al.*, "AI4People—An Ethical Framework for a Good AI Society: Opportunities, Risks, Principles, and Recommendations," *Minds and Machines*, vol. 28, no. 4, pp. 689-707, 2018.
- [13] S. Thrun *et al.*, "Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge," *Journal of Field Robotics*, vol. 23, no. 9, pp. 661-692, 2006.
- [14] J. Levinson *et al.*, "Towards fully autonomous driving: Systems and algorithms," in *2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Baden-Baden, Germany, 2011, pp. 163-168.
- [15] D. Göhring, M. Wang, M. Schnurmacher, and T. Ganjineh, "Radar/Lidar sensor fusion for car-following on highways," in *5th International Conference on Automation, Robotics and Applications*, Wellington, New Zealand, 2011, pp. 407-412.
- [16] R. Siegwart, I. R. Nourbakhsh, and D. Scaramuzza, *Introduction to Autonomous Mobile Robots*, 2nd ed. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2011.
- [17] M. Bojarski *et al.*, "End to end learning for self-driving cars," *arXiv preprint arXiv:1604.07316*, 2016.

- [18] B. Paden, M. Čáp, S. Z. Yong, D. Yershov, and E. Frazzoli, "A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles," *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 1, no. 1, pp. 33-55, 2016.
- [19] M. Quigley *et al.*, "ROS: an open-source Robot Operating System," in *ICRA Workshop on Open Source Software*, Kobe, Japan, 2009, vol. 3, no. 3.2, p. 5.
- [20] J. Katwijk *et al.*, "Prototyping self-driving cars using scaled-down vehicles," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 8, pp. 81-86, 2019.
- [21] E. Yurtsever, J. Lambert, A. Carballo, and K. Takeda, "A survey of autonomous driving: Common practices and emerging technologies," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 58443-58469, 2020.
- [22] H. Durrant-Whyte and T. Bailey, "Simultaneous localization and mapping: part I," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 13, no. 2, pp. 99-110, 2006.
- [23] R. Mur-Artal, J. M. M. Montiel, and J. D. Tardos, "ORB-SLAM: a versatile and accurate monocular SLAM system," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 31, no. 5, pp. 1147-1163, 2015.
- [24] J. Kong, M. Pfeiffer, G. Schildbach, and F. Borrelli, "Kinematic and dynamic vehicle models for autonomous driving control design," in *2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Seoul, South Korea, 2015, pp. 1094-1099.
- [25] S. Kuindersma *et al.*, "Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the atlas humanoid robot," *Autonomous Robots*, vol. 40, no. 3, pp. 429-455, 2016. [18] [19] [20] [21] [22]
- [26] S. Chen *et al.*, "Vehicle-to-Everything (V2X) Services Supported by LTE-Based Systems and 5G," *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 1, no. 2, pp. 70-76, 2017.
- [27] J. A. Guerrero-Ibañez, S. Zeadally, and J. Contreras-Castillo, "Sensor technologies for intelligent transportation systems," *Sensors*, vol. 18, no. 4, p. 1212, 2018.
- [28] S. Parkinson, P. Ward, K. Wilson, and J. Miller, "Cyber threats facing autonomous and connected vehicles: Future challenges," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 18, no. 11, pp. 2898-2915, 2017.
- [29] R. Mei, P. M. Wensing, and D. E. Orin, "Energy-efficient motion planning for mobile robots," in *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Seoul, South Korea, 2001, vol. 1, pp. 284-290.
- [30] S. Lin *et al.*, "Architectural design of a scalable embedded system for autonomous driving," in *2018 55th ACM/ESDA/IEEE Design Automation Conference (DAC)*, San Francisco, CA, USA, 2018, pp. 1-6.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΚΩΔΙΚΑΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ARDUINO

```
#include <Wire.h>
#include "Adafruit_VL53L0X.h"

enum RobotState {
    LINE_FOLLOW,
    AVOID_OBSTACLE,
    FIND_LINE
};

RobotState currentState = LINE_FOLLOW;

// Pins Αισθητήρων
const int pinLineLeft = 9;
const int pinLineCenter = 10;
const int pinLineRight = 11;
const int pinEcho = A0;
const int pinTrig = A1;

// =====
// Αριστερή Πλευρά (OUT1/OUT2 - Αριστερό Διπλό Κονεκτοράκι)
const int motorLeftPWM = 5; // ENA
const int motorLeftIN1 = 2; // IN1
const int motorLeftIN2 = 4; // IN2

// Δεξιά Πλευρά (OUT3/OUT4 - Δεξί Διπλό Κονεκτοράκι)
const int motorRightPWM = 6; // ENB
const int motorRightIN3 = 7; // IN3
const int motorRightIN4 = 8; // IN4

Adafruit_VL53L0X lox = Adafruit_VL53L0X();

const int lidarThresholdMM = 250; // 25cm
const int ultraThresholdCM = 25; // 25cm
const int baseSpeed = 135;
const int turnSpeed = 165;

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    Wire.begin();

    pinMode(pinLineLeft, INPUT);
    pinMode(pinLineCenter, INPUT);
    pinMode(pinLineRight, INPUT);
    pinMode(pinTrig, OUTPUT);
    pinMode(pinEcho, INPUT);
}
```

```

pinMode(motorLeftPWM, OUTPUT);
pinMode(motorRightPWM, OUTPUT);
pinMode(motorLeftIN1, OUTPUT);
pinMode(motorLeftIN2, OUTPUT);
pinMode(motorRightIN3, OUTPUT);
pinMode(motorRightIN4, OUTPUT);

if (!lox.begin()) {
  Serial.println(F("Σφάλμα: Το LiDAR δεν ξεκίνησε!"));
}

delay(3000); // 3 δευτερόλεπτα καθυστέρηση για να το αφήσεις στο
πάτωμα
}

void loop() {
  VL53L0X_RangingMeasurementData_t measure;
  lox.rangingTest(&measure, false);
  int frontLidarMM = measure.RangeMilliMeter;

  long frontUltraCM = readUltrasonicDistanceCM();

  switch (currentState) {

    case LINE_FOLLOW:
      // Φίλτρο για ψεύτικα εμπόδια (ενεργοποιείται μόνο αν οι
μετρήσεις είναι λογικές)
      bool lidarObstacle = (measure.RangeStatus != 4 &&
frontLidarMM > 40 && frontLidarMM < lidarThresholdMM);
      bool ultraObstacle = (frontUltraCM > 3 && frontUltraCM <
ultraThresholdCM);

      if (lidarObstacle || ultraObstacle) {
        stopRobot();
        delay(500);
        currentState = AVOID_OBSTACLE;
      }
      else {
        runLineFollower();
      }
      break;

    case AVOID_OBSTACLE:
      // Πλήρης ελιγμός παράκαμψης
      turnRight(turnSpeed);
      delay(650);

      moveForward(baseSpeed);
      delay(1600);

```

```

        turnLeft(turnSpeed);
        delay(700);

        moveForward(baseSpeed);
        delay(500);

        stopRobot();
        delay(200);
        currentState = FIND_LINE;
        break;

case FIND_LINE:
    moveForwardLeftSlowly();

    int L = digitalRead(pinLineLeft);
    int C = digitalRead(pinLineCenter);
    int R = digitalRead(pinLineRight);

    if (L == LOW || C == LOW || R == LOW) {
        stopRobot();
        delay(300);
        currentState = LINE_FOLLOW;
    }
    break;
}
delay(20);
}

void runLineFollower() {
    int L = digitalRead(pinLineLeft);
    int C = digitalRead(pinLineCenter);
    int R = digitalRead(pinLineRight);

    if (C == LOW && L == HIGH && R == HIGH) moveForward(baseSpeed);
    else if (L == LOW) turnLeft(turnSpeed);
    else if (R == LOW) turnRight(turnSpeed);
    else moveForward(baseSpeed);
}

long readUltrasonicDistanceCM() {
    digitalWrite(pinTrig, LOW); delayMicroseconds(2);
    digitalWrite(pinTrig, HIGH); delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(pinTrig, LOW);
    long duration = pulseIn(pinEcho, HIGH, 20000);
    long distanceCm = duration * 0.034 / 2;
    return distanceCm;
}

```

```

//
=====

void moveForward(int speed) {
    analogWrite(motorLeftPWM, speed);    analogWrite(motorRightPWM,
speed);
    // Αριστερά μπροστά
    digitalWrite(motorLeftIN1, LOW);    digitalWrite(motorLeftIN2,
HIGH);
    // Δεξιά μπροστά
    digitalWrite(motorRightIN3, LOW);    digitalWrite(motorRightIN4,
HIGH);
}

void moveForwardLeftSlowly() {
    analogWrite(motorLeftPWM, baseSpeed - 35);
    analogWrite(motorRightPWM, baseSpeed + 20);
    digitalWrite(motorLeftIN1, LOW);    digitalWrite(motorLeftIN2,
HIGH);
    digitalWrite(motorRightIN3, LOW);    digitalWrite(motorRightIN4,
HIGH);
}

void turnLeft(int speed) {
    analogWrite(motorLeftPWM, speed);    analogWrite(motorRightPWM,
speed);
    // Αριστερά ανάποδα/πίσω
    digitalWrite(motorLeftIN1, HIGH);    digitalWrite(motorLeftIN2,
LOW);
    // Δεξιά μπροστά
    digitalWrite(motorRightIN3, LOW);    digitalWrite(motorRightIN4,
HIGH);
}

void turnRight(int speed) {
    analogWrite(motorLeftPWM, speed);    analogWrite(motorRightPWM,
speed);
    // Αριστερά μπροστά
    digitalWrite(motorLeftIN1, LOW);    digitalWrite(motorLeftIN2,
HIGH);
    // Δεξιά ανάποδα/πίσω
    digitalWrite(motorRightIN3, HIGH);    digitalWrite(motorRightIN4,
LOW);
}

void stopRobot() {
    analogWrite(motorLeftPWM, 0);        analogWrite(motorRightPWM,
0);
}

```

```
    digitalWrite(motorLeftIN1, LOW);    digitalWrite(motorLeftIN2,  
LOW);  
    digitalWrite(motorRightIN3, LOW);    digitalWrite(motorRightIN4,  
LOW);  
}
```