

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Σχεδιασμός και Υλοποίηση Ρομποτικής Πλατφόρμας
Χαρτογράφησης σε Περιβάλλον ROS 2»



Της φοιτήτριας
Σιδηρόγλου Ευμορφίας
Αρ. Μητρώου: 2019149

Επιβλέπουσα
Παπαδοπούλου Μαρία
Επίκουρη Καθηγήτρια

23 Φεβρουαρίου 2026

Τίτλος Δ.Ε.: Σχεδιασμός και υλοποίηση ρομποτικής πλατφόρμας χαρτογράφησης σε περιβάλλον ROS2.

Κωδικός Δ.Ε.: 25214

Ονοματεπώνυμο φοιτήτριας: Ευμορφία Σιδηρόγλου

Ονοματεπώνυμο εισηγητή: Μαρία Παπαδοπούλου

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε.: 31/3/2025

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε.: 19/2/2026

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 διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της φοιτήτριας Σιδηρόγλου Ευμορφίας που την εκπόνησε. 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 διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

«Στον πατέρα μου, που μου έδειξε ότι η επιμονή είναι πιο δυνατή από κάθε εμπόδιο.»

Πρόλογος

Η επιλογή του θέματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας βασίστηκε στο προσωπικό ενδιαφέρον για τον τομέα της ρομποτικής και στην πρόκληση που αυτός αντιπροσωπεύει. Η ενασχόληση με την ανάπτυξη ενός ρομποτικού συστήματος αποτέλεσε ευκαιρία να αναδειχθεί ότι, παρά τις αρχικές δυσκολίες που ενδέχεται να παρουσιαστούν, η δημιουργία μίας ολοκληρωμένης και λειτουργικής πλατφόρμας είναι εφικτή μέσα από συστηματική προσέγγιση, μεθοδικότητα και επιμονή.

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας δόθηκε η δυνατότητα ενασχόλησης με διαφορετικούς και αλληλένδετους τομείς γνώσης, οι οποίοι καλύπτουν τόσο τον σχεδιασμό και την υλοποίηση του ρομποτικού συστήματος όσο και την ανάπτυξη του λογισμικού του με χρήση σύγχρονων εργαλείων και τεχνολογιών. Η διαδικασία αυτή συνέβαλε στη συνολική κατανόηση της αρχιτεκτονικής και της λειτουργίας ενός αυτόνομου ρομποτικού συστήματος, καθώς και στη σύνδεση θεωρητικών εννοιών με πρακτική εφαρμογή.

Αρχικός προσανατολισμός της εργασίας αποτέλεσε η υλοποίηση λειτουργιών χαρτογράφησης εσωτερικών χώρων. Κατά την εξέλιξή της, κατέστη σαφές ότι η χαρτογράφηση αποτελεί θεμελιώδες στάδιο για την υποστήριξη πιο σύνθετων λειτουργιών, και συγκεκριμένα για την αυτόνομη πλοήγηση. Στο πλαίσιο αυτό, η δημιουργία χάρτη αξιοποιήθηκε ως βάση για τη λήψη αποφάσεων κίνησης και την πλοήγηση του ρομπότ στον χώρο, αναδεικνύοντας τη στενή σχέση μεταξύ αντίληψης περιβάλλοντος και αυτονομίας.

Η ολοκλήρωση της εργασίας ανέδειξε ότι η υλοποίηση ενός λειτουργικού και αξιόπιστου ρομποτικού συστήματος δεν αποτελεί αποκλειστικό αντικείμενο μεγάλων ερευνητικών κέντρων ή βιομηχανικών εφαρμογών, αλλά μπορεί να επιτευχθεί και σε ακαδημαϊκό πλαίσιο, όταν υπάρχει η απαραίτητη διάθεση για μάθηση, πειραματισμό και δημιουργία.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τον σχεδιασμό και την υλοποίηση μίας αρθρωτής ρομποτικής πλατφόρμας εδάφους με δυνατότητες χαρτογράφησης και αυτόνομης πλοήγησης σε εσωτερικούς χώρους, αξιοποιώντας το λογισμικό ROS 2.

Το σύστημα βασίζεται σε υπολογιστική μονάδα Raspberry Pi 5 και ενσωματώνει αισθητήρα LiDAR για την αντίληψη του περιβάλλοντος, καθώς και σύστημα οδήγησης με τροχούς mecanum που επιτρέπουν πανκατευθυντική κίνηση. Η αρχιτεκτονική του λογισμικού οργανώθηκε σε διακριτούς κόμβους με αξιοποίηση των μηχανισμών επικοινωνίας του ROS 2 και των δυνατοτήτων του υποκείμενου middleware DDS.

Για τη δημιουργία χαρτών χρησιμοποιήθηκε το SLAM Toolbox, ενώ για την πλοήγηση ενσωματώθηκε η πλατφόρμα Navigation2. Η εκτίμηση της κατάστασης του ρομπότ υλοποιήθηκε μέσω συγχώνευσης δεδομένων οδομετρίας και αδρανειακού αισθητήρα με χρήση φίλτρου Εκτεταμένου Kalman (EKF).

Πραγματοποιήθηκε πειραματική αξιολόγηση του συστήματος σε εσωτερικό περιβάλλον με στόχο την αποτίμηση της ποιότητας χαρτογράφησης, της ακρίβειας εντοπισμού και της ικανότητας ακολούθησης τροχιάς.

Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η προτεινόμενη πλατφόρμα μπορεί να λειτουργήσει ως αξιόπιστη και επεκτάσιμη βάση για ερευνητικές και εκπαιδευτικές εφαρμογές στον τομέα της κινητής ρομποτικής.

«Design and Implementation of a Mapping Robotic Platform Using ROS 2»

«Evmorfia Sidiroglou»

Abstract

This thesis presents the design and implementation of a modular ground robotic platform capable of indoor mapping and autonomous navigation using ROS 2.

The system is built around a Raspberry Pi 5 and integrates a LiDAR sensor for environment perception, as well as a mecanum wheel drive system enabling omnidirectional motion. The software architecture is organized into distributed ROS 2 nodes utilizing topics, services and actions, while relying on DDS middleware for decentralized communication.

SLAM Toolbox is employed for map generation and Navigation2 for global planning and local motion control. State estimation is achieved through sensor fusion of wheel odometry and inertial measurements using an Extended Kalman Filter (EKF).

Experimental evaluation in indoor environments assessed mapping quality, localization accuracy and trajectory tracking performance. The results demonstrate that the developed platform provides a reliable and extensible basis for research and educational applications in mobile robotics.

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να εκφράσω την βαθιά μου ευγνωμοσύνη στον πατέρα μου, ο οποίος με στήριξε από τα πρώτα έτη των σπουδών μου, πιστεύοντας σε εμένα και ενθαρρύνοντάς με σε κάθε μου βήμα. Με βοήθησε ουσιαστικά και στα πρώτα στάδια της διπλωματικής μου εργασίας και, παρόλο που δεν βρίσκεται σήμερα εδώ για να δει την ολοκλήρωσή της, τον ευχαριστώ από καρδιάς για όλα όσα μου προσέφερε και για τη δύναμη που μου έδωσε να συνεχίσω.

Ευχαριστώ θερμά τη μητέρα μου για τη διαρκή της στήριξη, την υπομονή και τη συμπαράστασή της καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Για τις ώρες που περίμενε, για την κατανόηση στις δύσκολες περιόδους και για την αδιάλειπτη παρουσία της σε κάθε στάδιο αυτής της διαδρομής.

Ευχαριστώ επίσης τους συγγενείς μου, καθώς και τους φίλους και τις φίλες μου, για τη στήριξη, το ενδιαφέρον και την ενθάρρυνση που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια. Η παρουσία και η βοήθειά τους, με κάθε τρόπο, αποτέλεσαν σημαντικό στήριγμα στην πορεία μου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κύριο Βάσσιο Βασίλη για τη συμβουλευτική του υποστήριξη κατά τη διαδικασία επιλογής θέματος και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε.

Τον κύριο Ιντζέ Ιωάννη για την πολύτιμη βοήθειά του στα πρώτα μου βήματα, καθώς και για τη συνεχή υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, την κυρία Παπαδοπούλου Μαρία για την καθοδήγησή της, την υπομονή της καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας, τις ουσιαστικές της συμβουλές και τη συμβολή της στην επιτυχή ολοκλήρωση και αξιολόγηση της εργασίας.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	iii
Περίληψη	iv
Abstract	v
Ευχαριστίες	vi
Περιεχόμενα	vii
Κατάλογος Σχημάτων	xi
Κατάλογος Πινάκων	xii
Συντομογραφίες	xiii
1 Εισαγωγή	1
1.1 Γενική ιδέα	1
1.2 Στόχος και σκοπός εργασίας	1
1.3 Περιγραφή πράξης	2
1.4 Συνοπτική παρουσίαση κεφαλαίων	2
2 Θεωρητικό υπόβαθρο	4
2.1 Ρομπότ	4
2.1.1 Τεχνολογική εξέλιξη	4
2.1.2 Κατηγορίες ρομποτικών συστημάτων	6
2.1.3 Μικροεπεξεργαστές και μικροελεγκτές	8
2.1.4 Αισθητήρες και ενεργοποιητές	11
2.1.5 Ιεραρχική και λειτουργική αρχιτεκτονική επικοινωνίας	15
2.1.6 Μορφές αυτονομίας	18
2.2 Κινητά Ρομπότ	22
2.2.1 Μη Επανδρωμένα Οχήματα Εδάφους (UGV)	23
2.2.2 Βαθμοί ελευθερίας και κινηματικοί περιορισμοί	25
2.2.3 Κινηματικές αρχιτεκτονικές	27
2.2.4 Περιβαλλοντικοί παράγοντες	35
2.3 Έλεγχος Κίνησης	36
2.3.1 Μαθηματική μοντελοποίηση κινητήρα	36
2.3.2 Οδηγοί κινητήρων και Διαμόρφωση Πλάτους Παλμού	37
2.3.3 Ανοικτός και κλειστός βρόχος ελέγχου	40
2.3.4 Αναλογικός-Ολοκληρωτικός-Παραγωγικός έλεγχος	43
2.4 Εντοπισμός Θέσης	45
2.4.1 Διατύπωση προβλήματος εντοπισμού Θέσης	45
2.4.2 Πιθανοκρατική θεμελίωση και αναδρομική εκτίμηση	46
2.4.3 Φίλτρα εκτίμησης κατάστασης	47
2.4.4 Συγχώνευση πληροφορίας και πολυαισθητηριακή εκτίμηση	49
2.4.5 Περιορισμοί μοντέλου και πραγματικές προκλήσεις	50
2.5 Ταυτόχρονος Εντοπισμός Θέσης και Χαρτογράφηση (SLAM)	51
2.5.1 Αισθητήρες Χαρτογράφησης	52
2.5.2 Μέθοδοι και Τεχνικές	52
2.5.3 Περιορισμοί και Ανοικτά Ερευνητικά Ζητήματα	54
2.6 Πλοήγηση Κινητών Ρομπότ	54
2.6.1 Αρχιτεκτονική θεώρηση	55
2.6.2 Σχεδιασμός διαδρομής	56
2.6.3 Αποφυγή εμποδίων και εκτέλεση κίνησης	57
2.6.4 Παράγοντες δυσκολίας	57
2.6.5 Σύνοψη	59
3 Robot Operating System (ROS)	60
3.1 Ιδεολογία και αρχιτεκτονική	60
3.1.1 ROS 1: αρχιτεκτονική και περιορισμοί	60
3.1.2 ROS 2: σχεδιασμός και εξέλιξη	61
3.2 Διανομές και κύκλος ζωής	63
3.3 Μέθοδοι επικοινωνίας	63
3.3.1 Θέματα (Topics)	64

3.3.2	Υπηρεσίες (Services)	65
3.3.3	Ενέργειες (Actions)	66
3.4	Περιβάλλον ανάπτυξης και Workspace	67
3.5	Δομή πακέτου και κατηγορίες αρχείων	68
3.6	Εκτέλεση και διαμόρφωση συστήματος	69
3.7	Περιγραφή ρομπότ και γεωμετρικό μοντέλο (URDF/Xacro)	70
3.7.1	Άκαμπτα σώματα (<link>)	70
3.7.2	Κινηματικές συνδέσεις (<joint>)	71
3.8	Σύστημα μετασχηματισμών (TF)	72
3.8.1	Χρονική διαχείριση και κατηγορίες μετασχηματισμών	73
3.8.2	Δημοσίευση μετασχηματισμών	73
3.8.3	Βασικά παγκόσμια και τοπικά πλαίσια αναφοράς	74
3.9	Προχωρημένα μοντέλα κόμβων	75
3.9.1	Κόμβοι κύκλου ζωής (Lifecycle Nodes)	75
3.9.2	Συνθέσιμοι κόμβοι (Composable Nodes)	76
3.10	Οπτικοποίηση και προσομοίωση	77
3.10.1	RViz2	77
3.10.2	Gazebo	79
3.11	Πακέτα ανώτερου επιπέδου	80
3.11.1	Πακέτο Εντοπισμού Θέσης (Localization)	80
3.11.2	Πακέτα Χαρτογράφησης (SLAM)	81
4	Σύστημα Πλοήγησης (Navigation2)	83
4.1	Αρχιτεκτονική του Navigation2 και εντοπισμός συμπεριφοράς	83
4.2	Υβριδικό σχήμα σχεδιασμού πλοήγησης	85
4.3	Αναπαράσταση περιβάλλοντος και χάρτες κόστους	86
4.3.1	Αρχιτεκτονική πολυεπίπεδων χαρτών (Layered Costmap)	87
4.4	Καθολικός σχεδιασμός διαδρομής	87
4.4.1	Ολονομικοί και κινηματικά εφικτοί σχεδιαστές	88
4.5	Τοπικός έλεγχος τροχιάς και παρακολούθηση διαδρομής	89
4.5.1	Αντιδραστικές μέθοδοι	89
4.5.2	Προβλεπτικές μέθοδοι	89
4.5.3	Γεωμετρικές και ελεγκτικές προσεγγίσεις	90
4.6	Ασφάλεια κίνησης και μηχανισμοί ανάκαμψης	90
4.7	Εξομάλυνση διαδρομής	92
4.8	Υποδομή εκτέλεσης και διαχείριση κύκλου ζωής	92
4.9	Περιορισμοί και λειτουργικές απαιτήσεις	93
4.10	Σύνοψη	93
5	Σχεδιασμός και υλισμικό	95
5.1	Αρχιτεκτονική και στοιχειώδη εξαρτήματα	95
5.2	Ενεργοποιητές και τροχοί	97
5.2.1	Κινητήρες	97
5.2.2	Πολυκατευθυντικοί τροχοί	99
5.3	Μονάδα ελέγχου κίνησης	101
5.3.1	Υποσύστημα οδήγησης κινητήρων	104
5.3.2	Μονάδα αδρανειακής μέτρησης (IMU)	105
5.3.3	Διεπαφή Εξωτερικού Διακόπτη Τροφοδοσίας	106
5.4	Υπολογιστική μονάδα υψηλού επιπέδου	109
5.4.1	Υποσύστημα θερμικής διαχείρισης	111
5.4.2	Υποσύστημα αποθήκευσης δεδομένων	112
5.5	Αισθητήρας αποτύπωσης περιβάλλοντος (LiDAR)	113
5.5.1	Ρόλος και αρχή λειτουργίας	113
5.5.2	Μηχανική ενσωμάτωση	113
5.5.3	Ηλεκτρική διεπαφή και λειτουργία	114
5.5.4	Τεχνικά χαρακτηριστικά	115
5.5.5	Σύστημα συντεταγμένων και περιορισμοί	116
5.6	Ασύρματη επικοινωνία - USB Wi-Fi προσαρμογέας	117

5.7	Τροφοδοσία	118
5.7.1	Διάταξη και επιλογή στοιχείων	118
5.7.2	Συνολική χωρητικότητα και αποθηκευμένη ενέργεια	118
5.7.3	Κύκλωμα διαχείρισης και προστασίας (BMS)	119
5.7.4	Συναρμολόγηση και μόνωση	119
5.7.5	Φόρτιση και παρακολούθηση	120
5.8	Αμάξωμα	121
5.8.1	Κύριο δομικό μέρος	122
5.8.2	Άνω κάλυμμα	124
5.9	Διασύνδεση και επικοινωνία υποσυστημάτων	126
6	Μεσολογισμικό και λογισμικό	128
6.1	Λογική δομή	128
6.1.1	Λειτουργικό σύστημα και περιβάλλον ανάπτυξης	128
6.1.2	Επισκόπηση πακέτων λογισμικού	128
6.1.3	Ροή δεδομένων και αλληλεπίδραση κόμβων	129
6.2	Αρχιτεκτονική και ροή δεδομένων αισθητήρα LiDAR	130
6.2.1	Χαμηλό επίπεδο: Επικοινωνία υλικού και ανάγνωση δεδομένων	130
6.2.2	Μεσαίο επίπεδο: Ανάλυση πρωτοκόλλου και ανακατασκευή μετρήσεων	130
6.2.3	Υψηλό επίπεδο: Φιλτράρισμα και σύνθεση πλήρους σάρωσης	130
6.2.4	Ενοποίηση στο ROS 2 και δημοσίευση δεδομένων	130
6.2.5	Προσαρμοσμένα αρχεία εκκίνησης	131
6.2.6	Παραμετροποίηση και έλεγχος γωνιακής περιοχής σάρωσης	131
6.3	Περιγραφή και κατάσταση του ρομπότ	131
6.3.1	Γεωμετρικά μοντέλα και επεξεργασία πλεγμάτων	132
6.3.2	Ορισμός πλαισίων αναφοράς βάσης	132
6.3.3	Τοποθέτηση αισθητήρα LiDAR	132
6.3.4	Τοποθέτηση και προσανατολισμός μονάδας IMU	132
6.3.5	Δέντρο μετασχηματισμών (TF)	133
6.4	Παραγωγή οδομετρίας	133
6.4.1	Δεδομένα από κωδικοποιητές κινητήρων	134
6.4.2	Ενσωμάτωση IMU και φιλτράρισμα	134
6.4.3	Συγχώνευση δεδομένων μέσω robot_localization	134
6.5	Χρήση του Slam_Toolbox	135
6.6	Σύστημα Πλοήγησης Navigation2 (Nav2)	137
6.6.1	Δομή εκκίνησης και ενοποίηση	137
6.6.2	Παγκόσμιος σχεδιασμός διαδρομής	137
6.6.3	Τοπικός έλεγχος κίνησης	138
6.6.4	Costmaps	138
6.6.5	Εξομάλυνση ταχύτητας και επίπεδο ασφάλειας	138
6.6.6	Διαχείριση κύκλου ζωής	139
6.6.7	Σχεδιαστική φιλοσοφία παραμετροποίησης	139
6.7	Αποσφαλμάτωση	139
6.7.1	Έλεγχος τοπολογίας συστήματος	139
6.7.2	Ανάλυση ροής δεδομένων	139
6.7.3	Χρονική και αριθμητική ανάλυση σημάτων	140
6.7.4	Οπτική επαλήθευση γεωμετρικής συνέπειας	140
6.7.5	Έλεγχος μετασχηματισμών	140
6.7.6	Μεθοδολογική προσέγγιση	140
7	Δοκιμές και αποτελέσματα	142
7.1	Περιβάλλον δοκιμής	142
7.2	Αξιολόγηση χαρτογράφησης	142
7.2.1	Επίδραση της γραμμικής ταχύτητας	142
7.2.2	Ακρίβεια χάρτη	143
7.3	Αξιολόγηση οδομετρίας	145
7.3.1	Ακρίβεια μετατόπισης θέσης	145
7.3.2	Ακρίβεια προσανατολισμού	145

7.4	Αξιολόγηση πλοήγησης	146
7.5	Αξιολόγηση ασύρματης επικοινωνίας	147
7.6	Ενεργειακή αξιολόγηση	148
7.7	Περιορισμοί και διορθώσεις	148
8	Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης	148
8.1	Συμπεράσματα	148
8.2	Προτάσεις βελτίωσης και μελλοντική εργασία	149
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	149
A	Επεξεργασία πρωτογενών δεδομένων LiDAR	159
B	Μετατροπή δεδομένων LiDAR σε μήνυμα ROS LaserScan	164
Γ	Εκκίνηση και παραμετροποίηση του κόμβου LiDAR	167

Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Χρονοδιάγραμμα βασικών σταδίων της εξέλιξης των ρομποτικών συστημάτων.	5
2.2	Σχηματική κατηγοριοποίηση ρομποτικών συστημάτων ανάλογα με τον τομέα εφαρμογής.	7
2.3	Εσωτερική αρχιτεκτονική μικροεπεξεργαστή και μικροελεγκτή [21].	8
2.4	Ενδεικτικές πλακέτες μικροελεγκτή και υπολογιστή μίας πλακέτας [30, 31].	9
2.5	Πλατφόρμες ανώτερου επιπέδου υπολογιστικής υποδομής για απαιτητικές ρομποτικές εφαρμογές [32, 33].	10
2.6	Σχηματική αναπαράσταση του κλειστού βρόχου αντίληψης και δράσης σε ρομποτικό σύστημα [40].	12
2.7	Ενδεικτική κατηγοριοποίηση ηλεκτρικών κινητήρων με βάση την αρχή λειτουργίας και τον τρόπο διέγερσης του μαγνητικού πεδίου.	13
2.8	Σημεία τομής λειτουργικής και προθεσιακής αυτονομίας για ενδεικτικές εφαρμογές [45].	20
2.9	Βαθμός μη ντετερμινιστικής αυτονομίας σε ρομπότ πλοήγησης [45].	21
2.10	Ιεραρχική ταξινόμηση κινητών ρομπότ κατά περιβάλλον λειτουργίας και, στην περίπτωση των επίγειων συστημάτων, κατά μηχανισμό κίνησης [51].	22
2.11	Σύγκριση της λειτουργικής συμπεριφοράς AGV και AMR κατά την παρουσία εμποδίων [55]. . . .	24
2.12	Βαθμοί ελευθερίας ενός άκαμπτου σώματος στον τρισδιάστατο χώρο.	25
2.13	Χαρακτηριστικές μορφές κίνησης διαφορικής οδήγησης ως συνάρτηση των γωνιακών ταχυτήτων των κινητήριων τροχών [58].	28
2.14	Γεωμετρική απεικόνιση της συνθήκης Ackermann και του στιγμιαίου κέντρου καμπυλότητας (ICR) [60].	29
2.15	Χαρακτηριστικές μορφές κίνησης τετρατροχικής διάταξης με τροχούς τύπου omni [62].	32
2.16	Συνδυασμοί γωνιακών ταχυτήτων σε τετρατροχική διάταξη mecanum.	33
2.17	Χαρακτηριστικές διαμορφώσεις κίνησης διάταξης swerve [67].	34
2.18	Λειτουργικές καταστάσεις H-bridge για αντιστροφή της πολικότητας στα άκρα του DC κινητήρα [74].	38
2.19	Χρονική αναπαράσταση σήματος PWM για διαφορετικούς λόγους ενεργοποίησης και αντίστοιχη μεταβολή της μέσης τάσης [75].	39
2.20	Δομή ανοικτού και κλειστού βρόχου ελέγχου [77].	40
2.21	Σήματα τετραδικής διάταξης αυξητικού κωδικοποιητή και προσδιορισμός φοράς περιστροφής. . . .	42
2.22	Τυπικός κλειστός βρόχος PID ελέγχου ταχύτητας DC κινητήρα [82].	43
2.23	Δυναμικό γραφικό μοντέλο (Hidden Markov Model) για την εκτίμηση κατάστασης.	46
2.24	Σχηματική σύγκριση διάδοσης της συνδιακύμανσης σε μη γραμμικό μετασχηματισμό για EKF και UKF.	48
3.1	Συγκριτική απεικόνιση της αρχιτεκτονικής ROS 1 και ROS 2 [95].	62
3.2	Απεικόνιση του μοντέλου publish-subscribe (many-to-many) στο ROS 2.	64
3.3	Απεικόνιση του μοντέλου service-client στο ROS 2.	65
3.4	Εσωτερική υλοποίηση ενός μηχανισμού Action.	66
3.5	Οπτικοποίηση πλαισίων αναφοράς (TF tree) σε ρομπότ PR2. Κάθε τριάδα αξόνων (κόκκινος, πράσινος, μπλε) αντιστοιχεί σε τοπικό σύστημα συντεταγμένων.	73
3.6	Οπτικοποίηση ρομποτικού μοντέλου στο RViz2.	78
3.7	Σύγκριση περιβάλλοντος προσομοίωσης (αριστερά) και παραγόμενης χαρτογραφικής αναπαράστασης στο RViz2 (δεξιά).	80
4.1	Αρχιτεκτονική του Navigation2.	84
4.2	Ζώνες ασφαλείας Collision Monitor. Η εξωτερική περιοχή επιβραδύνει την κίνηση (slowdown), ενώ η εσωτερική επιβάλλει πλήρη παύση (stop).	91
5.1	Συνοπτική αρχιτεκτονική υλισμικού του ρομποτικού συστήματος και διασύνδεση των βασικών υποσυστημάτων.	96
5.2	Κινητήρας DC JGB37-520B με ενσωματωμένο κωδικοποιητή.	97
5.3	Διάγραμμα καλωδίωσης και σήματα κωδικοποιητή AB φάσης του κινητήρα.	98
5.4	Μηχανικές διαστάσεις και γεωμετρία άξονα εξόδου του κινητήρα.	98
5.5	Πολυκατευθυντικοί τροχοί Mecanum διαμέτρου 75 mm.	99
5.6	Μηχανικές διαστάσεις και βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά τροχού Mecanum (μονάδες σε χιλιοστά).	100
5.7	Ανάδειξη των βασικών διεπαφών της επεκτάσιμης πλακέτας [96].	102
5.8	Μηχανικές διαστάσεις της μονάδας ελέγχου κίνησης (μονάδες σε χιλιοστά) [96].	103
5.9	Σύστημα συντεταγμένων και προσανατολισμός αξόνων της αδρανειακής μονάδας.	105
5.10	Κάτω όψη της πλακέτας, όπου διακρίνεται η διεπαφή σύνδεσης εξωτερικού διακόπτη [96].	107
5.11	Σχηματικό διάγραμμα διεπαφής εξωτερικού διακόπτη τροφοδοσίας [96].	107

5.12	Εξωτερικός διακόπτης τύπου rocker SPST με ενσωματωμένη φωτεινή ένδειξη LED [99].	108
5.13	Βασικές διεπαφές και συνδέσεις της πλακέτας Raspberry Pi 5 [100].	109
5.14	Μηχανικές διαστάσεις και σημεία στήριξης της πλακέτας Raspberry Pi 5 (μονάδα σε χιλιοστά) [100].	110
5.15	Τοποθέτηση της ενεργής ψύκτρας Raspberry Pi Active Cooler επάνω στην πλακέτα Raspberry Pi 5 [101].	111
5.16	Τοποθέτηση της πλακέτας Raspberry Pi M.2 HAT+ και μονάδας SSD επάνω στο Raspberry Pi 5 [102].	112
5.17	Γενική όψη του αισθητήρα LiDAR LD19.	114
5.18	Μηχανικές διαστάσεις και σημεία στερέωσης του αισθητήρα LiDAR LD19 (μονάδες σε χιλιοστά).	114
5.19	Διεπαφή σύνδεσης και ορισμός ακροδεκτών του αισθητήρα LD19.	115
5.20	Εξωτερικός USB ασύρματος προσαρμογέας Wi-Fi με εξωτερική κεραία.	117
5.21	Στοιχεία ιόντων λιθίου τύπου IMR 26650 που χρησιμοποιήθηκαν στη συστοιχία.	118
5.22	Κύκλωμα διαχείρισης και προστασίας μπαταρίας (BMS) τύπου 3S.	119
5.23	Ολοκληρωμένη συστοιχία μπαταριών μετά τη συναρμολόγηση και μόνωση.	120
5.24	Ενσωματωμένο ψηφιακό βολτόμετρο LED για την παρακολούθηση της τάσης της συστοιχίας. . .	120
5.25	Συνολική όψη του αμαξώματος στο περιβάλλον σχεδίασης.	121
5.26	Κύριο δομικό μέρος του αμαξώματος στο περιβάλλον Tinkercad	123
5.27	Άνω κάλυμμα του δομικού μέρους στο περιβάλλον Tinkercad.	125
6.1	TF tree του ρομποτικού συστήματος	133
7.1	Σύγκριση φυσικού χώρου και παραγόμενου χάρτη για ταχύτητα 0.08 m/s.	143

Κατάλογος Πινάκων

5.1	Τεχνικά χαρακτηριστικά κινητήρα JGB37-520	99
5.2	Τεχνικά χαρακτηριστικά τροχών Mecanum	101
5.3	Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή STM32F103RCT6	103
5.4	Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του οδηγού κινητήρων AM2857	104
5.5	Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της μονάδας IMU ICM-20948	106
5.6	Αντιστοίχιση ακροδεκτών εξωτερικού διακόπτη rocker με τη διεπαφή της πλακέτας.	108
5.7	Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της υπολογιστικής μονάδας Raspberry Pi 5	110
5.8	Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της ενεργής ψύκτρας Raspberry Pi Active Cooler	112
5.9	Βασικά χαρακτηριστικά υποσυστήματος αποθήκευσης	113
5.10	Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα LiDAR LD19	115
5.11	Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά USB ασύρματου προσαρμογέα Wi-Fi	117
5.12	Βασικές παράμετροι τρισδιάστατης εκτύπωσης κύριου δομικού μέρους	124
5.13	Βασικές παράμετροι τρισδιάστατης εκτύπωσης άνω καλύμματος	126
7.1	Επίδραση της γραμμικής ταχύτητας στη χαρτογράφηση (πρώτο πέρασμα)	143
7.2	Ακρίβεια απόστασης χάρτη (SLAM + Nav2)	144
7.3	Ακρίβεια οδομετρίας συστήματος σε μετατόπιση θέσης	145
7.4	Ακρίβεια οδομετρίας συστήματος σε περιστροφή	146
7.5	Αποτελέσματα γραμμικής μετατόπισης 1 m	146
7.6	Αποτελέσματα περιστροφής 90°	146
7.7	Συγκριτική αξιολόγηση ασύρματης σύνδεσης	147

Συντομογραφίες

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΙΠΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Γενική ιδέα

Η ρομποτική αποτελεί έναν από τους ταχύτερα αναπτυσσόμενους τομείς της σύγχρονης τεχνολογίας, με εφαρμογές που εκτείνονται από τη βιομηχανική παραγωγή και τις μεταφορές έως την υγεία, την εκπαίδευση και την εξερεύνηση δυσπρόσιτων ή επικίνδυνων περιοχών. Η πρόοδος σε τομείς όπως οι αισθητήρες, η επεξεργαστική ισχύς και οι τεχνολογίες υπολογισμού και ανάλυσης δεδομένων έχει συμβάλει καθοριστικά στη βελτίωση των δυνατοτήτων και της αξιοπιστίας των σύγχρονων ρομποτικών εφαρμογών.

Ιδιαίτερη σημασία στο πλαίσιο αυτό αποκτούν τα κινητά ρομπότ (mobile robots), τα οποία έχουν τη δυνατότητα να κινούνται αυτόνομα στον χώρο και να εκτελούν αποστολές σε περιβάλλοντα που δεν είναι εκ των προτέρων γνωστά. Κοινό χαρακτηριστικό των περισσότερων σύγχρονων εφαρμογών τους αποτελεί η ανάγκη για αξιόπιστη αυτόνομη πλοήγηση, η οποία επιτρέπει την ασφαλή και ακριβή κίνηση σε δυναμικά και αδόμητα περιβάλλοντα.

Η λειτουργία κινητών ρομπότ σε άγνωστες περιοχές προϋποθέτει τη δυνατότητα αντίληψης του περιβάλλοντος, τη δημιουργία κατάλληλης αναπαράστασής του και τον σχεδιασμό ασφαλών κινήσεων εντός αυτού. Η υποστήριξη των λειτουργιών αυτών βασίζεται σε σύγχρονες μεθόδους επεξεργασίας δεδομένων αισθητήρων και σε εργαλεία λογισμικού που επιτρέπουν τη μετάβαση από το θεωρητικό επίπεδο στην πρακτική υλοποίηση ολοκληρωμένων ρομποτικών συστημάτων.

Παρά τη σημαντική εξέλιξη των διαθέσιμων τεχνολογιών, η πλειονότητα των υφιστάμενων κινητών ρομποτικών πλατφορμών με δυνατότητες χαρτογράφησης και αυτόνομης πλοήγησης παραμένει είτε οικονομικά δυσπρόσιτη είτε περιορίζεται κυρίως σε περιβάλλοντα προσομοίωσης. Επιπλέον, πολλές εμπορικές λύσεις βασίζονται σε κλειστές ή δύσκολα τροποποιήσιμες κατασκευές, γεγονός που περιορίζει την ευελιξία και τη δυνατότητα προσαρμογής τους σε διαφορετικά εκπαιδευτικά και ερευνητικά σενάρια.

Ως αποτέλεσμα, η παρουσία προσιτών και επεκτάσιμων κινητών ρομποτικών πλατφορμών σε πανεπιστημιακά εργαστήρια, αλλά και σε εφαρμογές εφαρμοσμένης έρευνας, παραμένει περιορισμένη. Το κενό αυτό καθιστά αναγκαία τη διερεύνηση λύσεων που γεφυρώνουν τη θεωρητική εκπαίδευση με την πρακτική υλοποίηση, προσφέροντας ευέλικτα ρομποτικά συστήματα ικανά να λειτουργούν σε πραγματικά, άγνωστα περιβάλλοντα.

1.2 Στόχος και σκοπός εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως βασικό στόχο την ανάπτυξη μίας ολοκληρωμένης και ευέλικτης κινητής ρομποτικής πλατφόρμας για χρήση σε εσωτερικούς χώρους. Στο πλαίσιο αυτό, σκοπός της είναι η μελέτη, η υλοποίηση και η αξιολόγηση των βασικών λειτουργιών που απαιτούνται ώστε ένα κινητό ρομπότ να μπορεί να κινείται αυτόνομα, να χαρτογραφεί το περιβάλλον του και να το εξερευνά χωρίς την ανάγκη συνεχούς ανθρώπινης καθοδήγησης.

Πέρα από τον αμιγώς ακαδημαϊκό χαρακτήρα, η εργασία στοχεύει στη δημιουργία μίας λειτουργικής πλατφόρμας που μπορεί να αξιοποιηθεί ως εργαλείο εκπαίδευσης και πρακτικής εξάσκησης στον τομέα της ρομποτικής. Η διαδικασία σχεδιασμού και υλοποίησης τέτοιων συστημάτων βασίζεται σε ε-

παναληπτικές δοκιμές, αξιολόγηση εναλλακτικών προσεγγίσεων και σταδιακή βελτίωση, στοιχεία που αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της μαθησιακής και ερευνητικής διαδικασίας. Στο πλαίσιο αυτό, οι δυσκολίες και οι αστοχίες που προκύπτουν κατά την ανάπτυξη ενός ρομποτικού συστήματος μπορούν να λειτουργήσουν δημιουργικά, οδηγώντας σε βαθύτερη κατανόηση και σε πιο αποδοτικές τεχνικές λύσεις.

1.3 Περιγραφή πράξης

Η υλοποίηση της εργασίας οργανώθηκε σε διαδοχικά στάδια, με στόχο τη συστηματική ανάπτυξη της ρομποτικής πλατφόρμας. Στα αρχικά στάδια, έως την απόκτηση της απαραίτητης εμπειρίας στον τρισδιάστατο σχεδιασμό και την τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής, χρησιμοποιήθηκαν έτοιμες εμπορικές πλατφόρμες ως βάση για δοκιμές και αξιολόγηση λογισμικού.

Στη συνέχεια, αξιοποιώντας τις γνώσεις που αποκτήθηκαν, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μέσω 3D εκτύπωσης ένα πλήρως προσαρμοσμένο αμάξωμα. Κατά τη φάση αυτή πραγματοποιήθηκαν διαδοχικές τροποποιήσεις τόσο στο μηχανικό πλαίσιο όσο και σε επιμέρους εξαρτήματα, όπως οι κινητήρες και οι τροχοί, με σκοπό την επιλογή του συνδυασμού που προσφέρει τη βέλτιστη λειτουργική απόδοση.

Ακολούθησε η ενσωμάτωση του συστήματος κίνησης με τροχούς τύπου Mecanum και του ηλεκτρονικού εξοπλισμού, ο οποίος περιλάμβανε την υπολογιστική μονάδα Raspberry Pi 5, την πλακέτα ελέγχου βασισμένη σε μικροελεγκτή STM32 (στην οποία ενσωματώνεται και η μονάδα αδρανειακής μέτρησης - IMU), καθώς και τον αισθητήρα LiDAR για την αντίληψη του περιβάλλοντος.

Σε επόμενο στάδιο δόθηκε έμφαση στην ανάπτυξη του λογισμικού περιβάλλοντος. Ως μεσολογισμικό πλαίσιο χρησιμοποιήθηκε το ROS 2, στο οποίο ενσωματώθηκαν πακέτα για την παραγωγή οδομετρίας, τη συγχώνευση δεδομένων αισθητήρων, τη χαρτογράφηση του χώρου μέσω SLAM Toolbox και την υλοποίηση αυτόνομης πλοήγησης με το Nav2.

Τέλος, η ρομποτική πλατφόρμα δοκιμάστηκε σε ελεγχόμενο εσωτερικό περιβάλλον, με στόχο την αξιολόγηση της ακρίβειας της χαρτογράφησης και της αξιοπιστίας της πλοήγησης. Η συστηματική αυτή διαδικασία επέτρεψε την ολοκληρωμένη αποτίμηση της λειτουργίας του συστήματος και ανέδειξε τόσο τις δυνατότητες όσο και τους περιορισμούς της προτεινόμενης πλατφόρμας.

1.4 Συνοπτική παρουσίαση κεφαλαίων

Η παρούσα διπλωματική εργασία οργανώνεται σε έξι κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται η γενική ιδέα, οι στόχοι και το πλαίσιο στο οποίο εντάσσεται η εργασία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρο, όπου εξετάζονται βασικές έννοιες της ρομποτικής, οι κατηγορίες αισθητήρων και ενεργοποιητών, καθώς και μέθοδοι και αλγόριθμοι που σχετίζονται με τη χαρτογράφηση, την πλοήγηση και την αυτόνομη εξερεύνηση κινητών ρομποτικών πλατφορμών.

Το τρίτο κεφάλαιο επικεντρώνεται στον σχεδιασμό και την υλοποίηση του υλισμικού της πλατφόρμας. Παρουσιάζονται οι βασικοί ενεργοποιητές και οι τροχοί, η μονάδα ελέγχου κίνησης με την πλακέτα STM32 και τον ενσωματωμένο αισθητήρα IMU, καθώς και ο αισθητήρας LiDAR και η υπολογιστική

μονάδα Raspberry Pi 5. Επιπλέον, περιγράφονται το αμάξωμα που κατασκευάστηκε μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης και το σύστημα τροφοδοσίας που υποστηρίζει τη λειτουργία του ρομπότ.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται το μεσολογισμικό και το λογισμικό της πλατφόρμας. Αναλύεται η εγκατάσταση και ρύθμιση του ROS 2, καθώς και η αξιοποίηση εξειδικευμένων πακέτων για την παραγωγή οδομετρίας, τη συγχώνευση δεδομένων αισθητήρων, τη χαρτογράφηση με το SLAM Toolbox και την πλοήγηση με το Nav2.

Το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τις δοκιμές και τα αποτελέσματα της πειραματικής αξιολόγησης. Εξετάζεται η απόδοση της πλατφόρμας σε εσωτερικό περιβάλλον, με έμφαση στην ακρίβεια της χαρτογράφησης, την αξιοπιστία της πλοήγησης και την αποτελεσματικότητα της αυτόνομης εξερεύνησης.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας. Συνοψίζονται τα κύρια ευρήματα, αναδεικνύονται οι περιορισμοί του συστήματος και προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντικές βελτιώσεις και επεκτάσεις της πλατφόρμας.

Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Ρομπότ

Η λέξη ρομπότ είναι αναμφίβολα ευρέως γνωστή, ωστόσο η ακριβής σημασία της δεν είναι πάντοτε απολύτως σαφής. Ετυμολογικά, προέρχεται από τους σλαβικούς όρους *robota* και *robotnik*, που σημαίνουν «καταναγκαστική εργασία» και «εργάτης», αντίστοιχα [1].

Ο όρος εμφανίστηκε για πρώτη φορά το 1921 από τον Τσέχο συγγραφέα Κάρελ Τσάπεκ, στο θεατρικό έργο *Rossum's Universal Robots*, όπου τα ρομπότ παρουσιάζονται ως ανθρωπόμορφες μηχανές με σκοπό την εκτέλεση ανθρώπινων εργασιών [2]. Η αρχική αυτή προσέγγιση αποτέλεσε αφετηρία για τον προβληματισμό σχετικά με τη σχέση ανθρώπου και τεχνολογίας, ο οποίος παραμένει επίκαιρος έως σήμερα.

Σε εννοιολογικό επίπεδο, απαντάται συχνά η περιγραφή των ρομπότ με βάση ένα σύνολο κοινών λειτουργικών χαρακτηριστικών, όπως η δυνατότητα αντίληψης του περιβάλλοντος, η επεξεργασία πληροφοριών και η εκτέλεση δράσεων μέσω συνδυασμού μηχανικών και λογισμικών στοιχείων. Η προσέγγιση αυτή αποτυπώνει με σαφήνεια τον τρόπο λειτουργίας πολλών σύγχρονων ρομποτικών συστημάτων και είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε τεχνικά και μηχανικά συμφραζόμενα. Ωστόσο, στη σύγχρονη βιβλιογραφία επισημαίνεται ότι η περιγραφή αυτή δεν επαρκεί για τη διατύπωση ενός ενιαίου και καθολικά αποδεκτού ορισμού του ρομπότ. Τα ρομπότ συγκροτούν μια ετερογενή κατηγορία τεχνητών συστημάτων, η οποία περιλαμβάνει διαφορετικές μορφές, βαθμούς αυτονομίας και τρόπους αλληλεπίδρασης με τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Ως αποτέλεσμα, τα χαρακτηριστικά που θεωρούνται καθοριστικά για τον χαρακτηρισμό ενός συστήματος ως ρομπότ διαφοροποιούνται ανάλογα με το τεχνολογικό, κοινωνικό ή εφαρμοσμένο πλαίσιο στο οποίο αυτό εξετάζεται [3].

Στο πλαίσιο αυτό, η μελέτη και η ανάπτυξη των ρομποτικών συστημάτων εντάσσονται στον ευρύτερο επιστημονικό και τεχνολογικό κλάδο της ρομποτικής. Η ρομποτική αποτελεί διεπιστημονικό τεχνολογικό κλάδο που ασχολείται με τη σχεδίαση, την κατασκευή και τον έλεγχο ρομποτικών συστημάτων, συνδυάζοντας στοιχεία μηχανικής, ηλεκτρονικής, πληροφορικής και αυτοματισμού. Η εξέλιξή της είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την πρόοδο της τεχνολογίας και τις εκάστοτε ανάγκες εφαρμογής, γεγονός που έχει οδηγήσει στη διαμόρφωση διαφορετικών μορφών και χρήσεων ρομπότ σε διαχρονικό επίπεδο.

Στο επόμενο υποκεφάλαιο εξετάζεται η τεχνολογική εξέλιξη της ρομποτικής και οι βασικοί σταθμοί που οδήγησαν στη σημερινή της μορφή.

2.1.1 Τεχνολογική εξέλιξη

Η εξέλιξη της ρομποτικής δεν υπήρξε γραμμική, αλλά διαμορφώθηκε μέσα από διαδοχικές αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο τα ρομποτικά συστήματα σχεδιάζονται, ελέγχονται και αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον τους. Οι πρώιμες ρομποτικές κατασκευές βασίζονταν αποκλειστικά σε μηχανικές αρχές και προκαθορισμένες κινήσεις, χωρίς δυνατότητα αντίληψης ή προσαρμογής, θέτοντας ωστόσο τις βάσεις για την έννοια της αυτοματοποίησης [4].

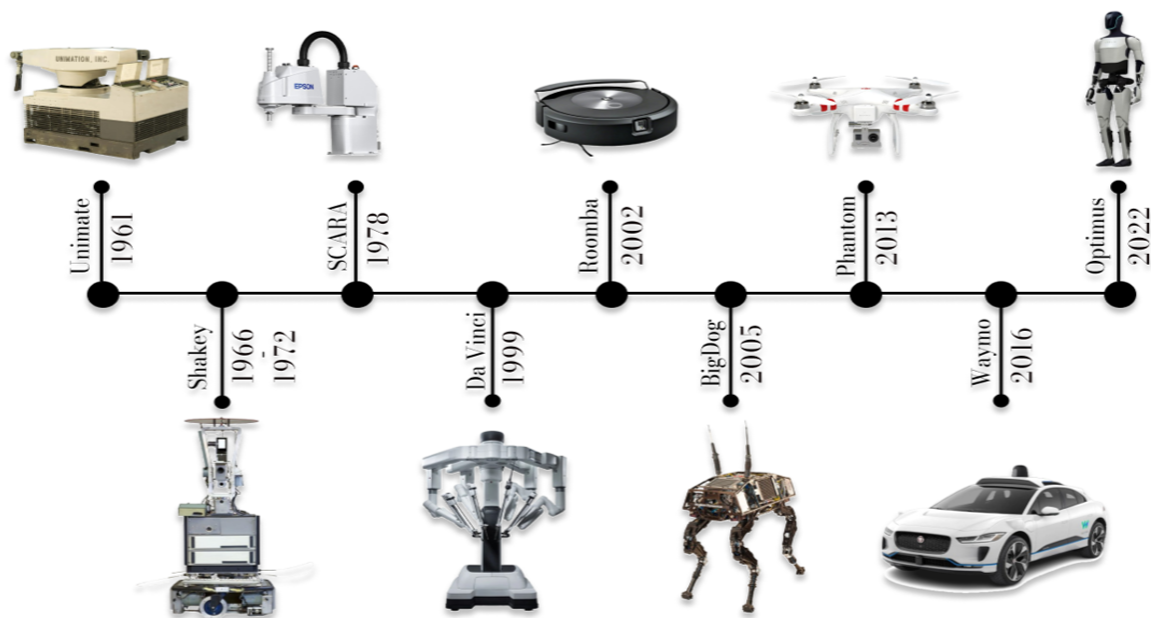
Η εισαγωγή των προγραμματιζόμενων βιομηχανικών ρομπότ στα μέσα του 20ού αιώνα σηματοδότησε το πρώτο ουσιαστικό βήμα προς την ευέλικτη μηχανοποίηση της παραγωγής. Τα συστήματα αυτά εκτε-

λούσαν αυστηρά καθορισμένες ακολουθίες εντολών σε πλήρως ελεγχόμενα περιβάλλοντα, χωρίς καμία κατανόηση του χώρου ή της κατάστασής τους [5]. Παράλληλα, ερευνητικές πλατφόρμες όπως το *Shakey* ανέδειξαν για πρώτη φορά τη δυνατότητα ενοποίησης βασικής αντίληψης, υπολογιστικής επεξεργασίας και σχεδιασμού ενεργειών, εισάγοντας την ιδέα της ρομποτικής ως πλαισίου λήψης αποφάσεων και όχι απλώς εκτέλεσης κινήσεων [6].

Κατά τις επόμενες δεκαετίες, η ενσωμάτωση μικροεπεξεργαστών, αισθητήρων και μηχανισμών ανατροφοδότησης επέτρεψε την ανάπτυξη ρομπότ με αυξημένη λειτουργική ευελιξία. Η έμφαση μετατοπίστηκε σταδιακά από τη μηχανική ακρίβεια προς το λογισμικό και την επεξεργασία αισθητηριακών δεδομένων, διευρύνοντας το πεδίο εφαρμογών της ρομποτικής πέρα από τη βιομηχανία [7]. Παράλληλα, σε τομείς όπως η ιατρική, τα ρομπότ χρησιμοποιήθηκαν κυρίως ως εργαλεία υψηλής ακρίβειας υπό άμεσο ανθρώπινο έλεγχο, χωρίς ουσιαστική αυτονομία [8].

Η συστηματική αξιοποίηση της κινητικότητας και η πρόοδος στη μηχανική όραση και τη συγχώνευση δεδομένων αισθητήρων επέτρεψαν στα ρομπότ να λειτουργούν σε λιγότερο προβλέψιμα περιβάλλοντα. Τεχνικές εντοπισμού και χαρτογράφησης του χώρου συνέβαλαν καθοριστικά στη βελτίωση της πλοήγησης και της χωρικής αντίληψης, ανοίγοντας τον δρόμο για εφαρμογές εκτός αυστηρά ελεγχόμενων πλαισίων [9, 10].

Το χρονοδιάγραμμα της Εικόνας 2.1 παρουσιάζει ενδεικτικά χαρακτηριστικά ρομποτικά συστήματα που σηματοδότησαν βασικά στάδια της τεχνολογικής εξέλιξης, χωρίς να αποσκοπεί στην αναλυτική περιγραφή του καθενός.



Εικόνα 2.1: Χρονοδιάγραμμα βασικών σταδίων της εξέλιξης των ρομποτικών συστημάτων.

Στη σύγχρονη πορεία εξέλιξης της ρομποτικής, η ανάπτυξη δεν χαρακτηρίζεται απλώς από την αύξηση των εφαρμογών, αλλά από μια βαθύτερη αλλαγή στην αρχιτεκτονική της ρομποτικής νοημοσύνης. Τα παραδοσιακά, αυστηρά αρθρωτά συστήματα αντικαθίστανται σταδιακά από ενοποιημένες προσεγγίσεις, όπου η αντίληψη, η λήψη αποφάσεων και η δράση αντιμετωπίζονται ως αλληλένδετες διεργασίες. Η εισαγωγή μεγάλης κλίμακας μοντέλων μηχανικής μάθησης (foundation models), καθώς και αρχιτε-

κτονικών όρασης–γλώσσας–δράσης, επιτρέπει στα ρομπότ να συνδέουν οπτική πληροφορία, γλωσσικές εντολές και κινητικές ενέργειες σε ενιαίο υπολογιστικό πλαίσιο [11].

Παράλληλα, δίνεται βάση ολοένα και περισσότερο σε υβριδικές αρχιτεκτονικές έλεγχου, όπου οι κλασικές μέθοδοι εξασφαλίζουν σταθερότητα και ασφάλεια σε χαμηλό επίπεδο, ενώ οι μέθοδοι μάθησης υποστηρίζουν τον ανώτερου επιπέδου σχεδιασμό και τη λήψη αποφάσεων [12]. Ο διαχωρισμός αυτός επιτρέπει τη συνύπαρξη αξιοπιστίας και ευελιξίας, ιδίως σε δυναμικά και αδόμητα περιβάλλοντα.

Η ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων υποστηρίζεται από τη χρήση προσομοίωσης υψηλής πιστότητας και συνθετικών δεδομένων. Το χάσμα μεταξύ προσομοιωμένου και πραγματικού κόσμου, γνωστό ως χάσμα πραγματικότητας, αντιμετωπίζεται μέσω τεχνικών τυχαιοποίησης παραμέτρων και γενετικών μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης, τα οποία επιτρέπουν την εκπαίδευση σε ευρύ φάσμα σεναρίων, συμπεριλαμβανομένων σπάνιων ή ακραίων καταστάσεων [13]. Στο ίδιο πλαίσιο, η έννοια των ψηφιακών διδύμων επεκτείνει την προσομοίωση σε συνεχή σύνδεση μεταξύ φυσικού και ψηφιακού συστήματος, υποστηρίζοντας τη μακροχρόνια ανάλυση και βελτιστοποίηση της ρομποτικής συμπεριφοράς [14].

Τέλος, αναγνωρίζεται ότι η νοημοσύνη των ρομποτικών συστημάτων δεν προκύπτει αποκλειστικά από αλγοριθμικές διεργασίες, αλλά και από τη φυσική τους ενσώματη μορφή. Η συμμόρφωση, η κατανεμμένη αίσθηση και η φυσική αλληλεπίδραση με το περιβάλλον συμβάλλουν στη διαμόρφωση ασφαλούς και αποδοτικής συμπεριφοράς, συμπληρώνοντας τις υπολογιστικές προσεγγίσεις μάθησης [15]. Στο πλαίσιο αυτό, η μαλακή ρομποτική (*soft robotics*) αξιοποιεί υλικά και μηχανισμούς με εγγενή ελαστικότητα, επιτρέποντας στο ρομπότ να προσαρμόζεται παθητικά σε αβεβαιότητες του περιβάλλοντος και να μειώνει τις απαιτήσεις σε πολύπλοκο έλεγχο.

Η τεχνολογική αυτή ωρίμανση και η σταδιακή ενσωμάτωση προηγμένων δυνατοτήτων αντίληψης οδήγησαν στην εμφάνιση μιας μεγάλης ποικιλίας ρομποτικών συστημάτων, καθώς τα ρομπότ έπαψαν να περιορίζονται σε αυστηρά ελεγχόμενα περιβάλλοντα και επεκτάθηκαν σε πλήθος τομέων της ανθρώπινης δραστηριότητας.

Στην υποενότητα που ακολουθεί παρουσιάζονται βασικά κριτήρια ταξινόμησης των ρομποτικών συστημάτων, τα οποία συμβάλλουν στην κατανόηση της ποικιλίας και της διαφοροποίησής τους.

2.1.2 Κατηγορίες ρομποτικών συστημάτων

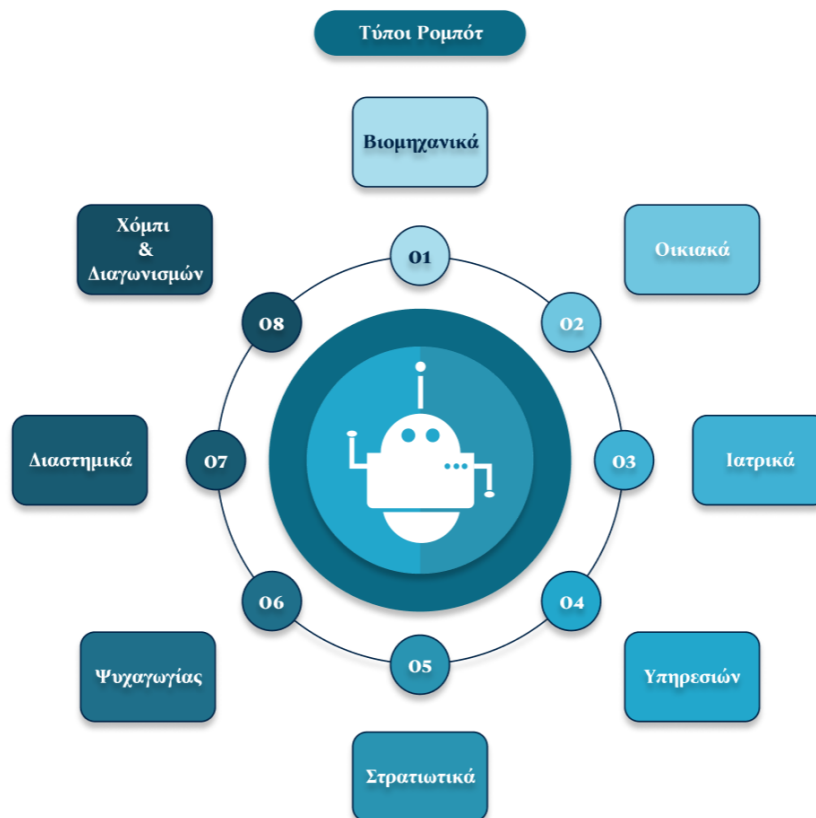
Τα ρομποτικά συστήματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση διαφορετικά κριτήρια, ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας, το περιβάλλον δράσης και τον σκοπό χρήσης τους. Η κατηγοριοποίηση αυτή δεν είναι μοναδική, καθώς κάθε προσέγγιση εξυπηρετεί διαφορετικές ανάγκες ανάλυσης και θεωρητικής μελέτης [16].

Ένα βασικό κριτήριο κατηγοριοποίησης αφορά την κινητική διάταξη των ρομπότ. Με βάση αυτό, τα ρομποτικά συστήματα διακρίνονται σε σταθερά (*fixed*) και κινητά (*mobile*). Τα σταθερά ρομπότ, όπως οι κλασικοί βιομηχανικοί βραχίονες, λειτουργούν εντός ενός αυστηρά καθορισμένου χώρου εργασίας και εκτελούν επαναλαμβανόμενες διεργασίες υψηλής ακρίβειας. Αντιθέτως, τα κινητά ρομπότ διαθέτουν μηχανισμούς μετακίνησης που τους επιτρέπουν να πλοηγούνται στον χώρο και να αλληλεπιδρούν με δυναμικά και μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα [17].

Ένα δεύτερο κριτήριο κατηγοριοποίησης σχετίζεται με το περιβάλλον στο οποίο λειτουργούν τα ρομποτικά συστήματα. Με βάση αυτό, τα ρομπότ μπορούν να αναπτυχθούν σε επίγεια, εναέρια ή θαλάσσια περιβάλλοντα. Κάθε κατηγορία επιβάλλει διαφορετικές απαιτήσεις ως προς τον σχεδιασμό, τον έλεγχο και τις δυνατότητες αντίληψης. Για παράδειγμα, τα εναέρια ρομπότ δίνουν έμφαση στη σταθερότητα και την αεροδυναμική συμπεριφορά, ενώ τα θαλάσσια ρομπότ απαιτούν στεγανότητα και προσαρμογή σε μεταβαλλόμενες υδροστατικές συνθήκες [17].

Παράλληλα, τα ρομποτικά συστήματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν και με βάση τον τομέα εφαρμογής τους. Οι εφαρμογές της ρομποτικής εκτείνονται από οικιακά περιβάλλοντα και καθημερινές χρήσεις, έως απαιτητικούς επαγγελματικούς τομείς, όπως η βιομηχανία, η ιατρική και η άμυνα, καθώς και σε εξαιρετικά δύσβατα ή απομακρυσμένα περιβάλλοντα, όπως η εξερεύνηση του διαστήματος.

Στην Εικόνα 2.2 παρουσιάζεται ενδεικτικά μία κατηγοριοποίηση με βάση το πεδίο εφαρμογής, η οποία αναδεικνύει το εύρος χρήσης των ρομπότ, από εφαρμογές χαμηλής πολυπλοκότητας έως αποστολές υψηλών απαιτήσεων και περιορισμένης ανθρώπινης πρόσβασης.



Εικόνα 2.2: Σχηματική κατηγοριοποίηση ρομποτικών συστημάτων ανάλογα με τον τομέα εφαρμογής.

Παρά την ποικιλία μορφών, λειτουργιών και τομέων εφαρμογής, τα ρομποτικά συστήματα βασίζονται σε έναν κοινό λειτουργικό πυρήνα, ο οποίος επιτρέπει την αντίληψη του περιβάλλοντος, την επεξεργασία πληροφοριών και τη λήψη αποφάσεων. Ο πυρήνας αυτός αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο της ρομποτικής λειτουργίας και είναι ανεξάρτητος από τη μορφή ή τον σκοπό χρήσης του εκάστοτε συστήματος.

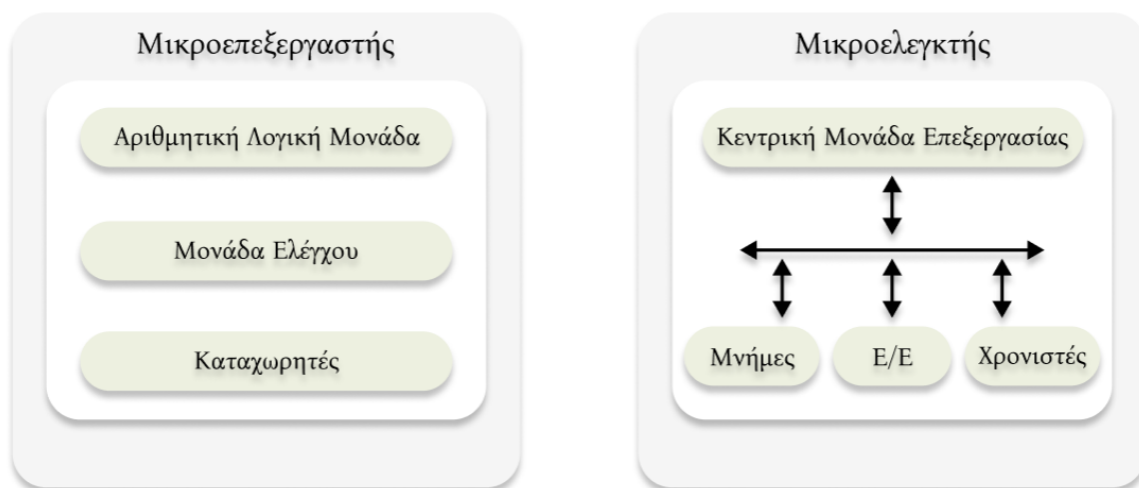
Στην επόμενη υποενότητα θα παρουσιαστεί ένα από τα σημαντικότερα μέρη ενός ρομποτικού συστήματος, ο «εγκέφαλος», ο οποίος είναι υπεύθυνος για την επεξεργασία των δεδομένων και τον έλεγχο των λειτουργιών.

2.1.3 Μικροεπεξεργαστές και μικροελεγκτές

Οι μικροελεγκτές (Microcontrollers - MCUs) και οι μικροεπεξεργαστές (Microprocessors - MPUs) αποτελούν βασικά δομικά στοιχεία των σύγχρονων ενσωματωμένων και ρομποτικών συστημάτων, εξυπηρετώντας διαφορετικούς αλλά συμπληρωματικούς ρόλους λόγω ουσιωδών διαφορών στην αρχιτεκτονική και στη λειτουργία τους. Οι MPUs σχεδιάζονται ως υπολογιστικές μονάδες υψηλής απόδοσης, με επίκεντρο έναν ισχυρό επεξεργαστικό πυρήνα που συνεργάζεται με εξωτερικές μνήμες και περιφερειακά υποσυστήματα μέσω διαύλων δεδομένων. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει αυξημένη υπολογιστική ευελιξία και την εκτέλεση σύνθετων εφαρμογών, ωστόσο συνεπάγεται αυξημένη πολυπλοκότητα συστήματος, υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας και συχνά εξάρτηση από λειτουργικά συστήματα γενικού σκοπού για τη διαχείριση πόρων και διεργασιών [18].

Αντίθετα, οι MCUs υιοθετούν μια έντονα ενοποιημένη αρχιτεκτονική, ενσωματώνοντας στο ίδιο ολοκληρωμένο κύκλωμα τον επεξεργαστικό πυρήνα, τη μνήμη και βασικές περιφερειακές μονάδες, όπως χρονομετρητές, μετατροπείς αναλογικού-ψηφιακού σήματος και διεπαφές επικοινωνίας. Η υψηλή αυτή ενσωμάτωση οδηγεί σε απλούστερα, μικρότερα και οικονομικότερα συστήματα με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, τα οποία είναι κατάλληλα για εφαρμογές με σαφώς καθορισμένες λειτουργίες και περιορισμένους υπολογιστικούς πόρους [19, 20]. Για τον λόγο αυτό, οι μικροελεγκτές χρησιμοποιούνται εκτενώς σε ενσωματωμένες εφαρμογές ελέγχου, αυτοματισμού και ρομποτικής.

Στο ακόλουθο σχήμα απεικονίζονται τα βασικά εσωτερικά δομικά στοιχεία ενός μικροεπεξεργαστή και ενός μικροελεγκτή, αναδεικνύοντας τον διαφορετικό βαθμό ενοποίησης των δύο αρχιτεκτονικών.



Εικόνα 2.3: Εσωτερική αρχιτεκτονική μικροεπεξεργαστή και μικροελεγκτή [21].

Οι παραπάνω αρχιτεκτονικές επιλογές επηρεάζουν άμεσα και τη χρονική συμπεριφορά των δύο κατηγοριών. Οι MPUs λειτουργούν συνήθως υπό γενικού σκοπού λειτουργικά συστήματα, τα οποία υποστηρίζουν πολυδιεργασία και σύνθετη διαχείριση πόρων, εισάγοντας όμως μεταβλητότητα και περιορισμένη προβλεψιμότητα ως προς τον χρόνο εκτέλεσης των διεργασιών [22, 23]. Αντίθετα, οι MCUs μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς λειτουργικό σύστημα (bare-metal) ή με ελαφριά λειτουργικά πραγματικού χρόνου (Real-Time Operating System - RTOS), επιτρέποντας ντετερμινιστική συμπεριφορά και αξιόπιστη απόκριση σε εξωτερικά γεγονότα και βρόχους ελέγχου [24].

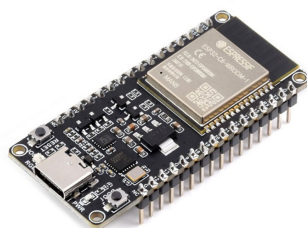
Στην πράξη, τα ολοκληρωμένα κυκλώματα μικροελεγκτών και μικροεπεξεργαστών σπάνια χρησιμοποιούνται αυτούσια· αντιθέτως, ενσωματώνονται σε πλακέτες ανάπτυξης (development boards), οι οποίες παρέχουν την απαραίτητη υλική υποδομή για την υλοποίηση, τον προγραμματισμό και τη δοκιμή ρομποτικών εφαρμογών. Στο πλαίσιο της ρομποτικής και γενικότερα των ενσωματωμένων συστημάτων, οι πλακέτες που βασίζονται σε μικροελεγκτές χρησιμοποιούνται κυρίως για λειτουργίες χαμηλού επιπέδου ελέγχου, όπως η άμεση αλληλεπίδραση με αισθητήρες και ενεργοποιητές, ενώ οι πλακέτες που βασίζονται σε μικροεπεξεργαστές αξιοποιούνται ως κεντρικές υπολογιστικές μονάδες ανώτερου επιπέδου [25].

Χαρακτηριστικά παραδείγματα πλακετών μικροελεγκτών αποτελούν οι οικογένειες ESP32 της Espressif Systems και STM32 της STMicroelectronics, οι οποίες αντιπροσωπεύουν διαφορετικές σχεδιαστικές προσεγγίσεις στα ενσωματωμένα συστήματα. Οι ESP32 ενσωματώνουν ασύρματες διεπαφές επικοινωνίας και χρησιμοποιούνται κυρίως σε δικτυωμένες και διασυνδεδεμένες εφαρμογές (Internet of Things - IoT), ενώ οι STM32 βασίζονται σε πυρήνες ARM Cortex-M και χρησιμοποιούνται εκτενώς σε εφαρμογές αυτοματισμού και ρομποτικής με αυξημένες απαιτήσεις αξιοπιστίας και ελέγχου [19].

Αντίστοιχα, για λειτουργίες κεντρικής επεξεργασίας και εποπτικού ελέγχου χρησιμοποιούνται πλακέτες βασισμένες σε μικροεπεξεργαστές, όπως οι υπολογιστές μονής πλακέτας (Single Board Computers - SBCs), οι οποίοι παρέχουν πλήρες υπολογιστικό σύστημα με δυνατότητα εκτέλεσης λειτουργικού συστήματος και αναλαμβάνουν διεργασίες αυξημένων απαιτήσεων σε υπολογιστικούς πόρους, όπως η επεξεργασία δεδομένων αισθητήρων, η πλοήγηση, η αντίληψη και η λήψη αποφάσεων [26, 27]. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η οικογένεια Raspberry Pi της Raspberry Pi Foundation, η οποία βασίζεται σε επεξεργαστές αρχιτεκτονικής ARM και διαθέτει εκτεταμένη υποστήριξη λογισμικού, ενώ εναλλακτικές πλατφόρμες όπως οι Banana Pi και Orange Pi προσφέρουν υλοποιήσεις με έμφαση στην αυξημένη υπολογιστική ισχύ ή στις δυνατότητες αποθήκευσης [28–30].

Παρακάτω παρουσιάζεται μία πλακέτα μικροελεγκτή (ESP32-C6), η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για διασύνδεση περιφερειακών και ενσωματωμένη ασύρματη επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο, καθώς και ένας υπολογιστής μονής πλακέτας (Orange Pi 5), ο οποίος προσφέρει αυξημένη υπολογιστική ισχύ και ευελιξία.

Πλακέτα μικροελεγκτή



ESP32-C6

Μονάδα ελέγχου πραγματικού χρόνου

Υπολογιστής Μονής Πλακέτας (SBC)



Orange Pi 5

Υπολογιστική πλατφόρμα ταχείας ανάπτυξης

Εικόνα 2.4: Ενδεικτικές πλακέτες μικροελεγκτή και υπολογιστή μίας πλακέτας [30, 31].

Σε ακόμη υψηλότερο επίπεδο της υπολογιστικής ιεραρχίας συναντώνται οι μικροϋπολογιστές (mini-PC)

και οι βιομηχανικές μητρικές πλακέτες (industrial motherboards). Τα συστήματα αυτά προσφέρουν αυξημένες δυνατότητες επεξεργασίας, επεκτασιμότητα και υψηλή αξιοπιστία, καθιστώντας τα κατάλληλα για βιομηχανικές ή αυτόνομες εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Το κύριο μειονέκτημά τους είναι η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και το μεγαλύτερο οικονομικό κόστος.

Στην Εικόνα 2.5 απεικονίζονται ένας μικροϋπολογιστής γενικού σκοπού (ASUS NUC - Next Unit of Computing - 13 Pro), ο οποίος παρέχει αυξημένες υπολογιστικές δυνατότητες σε συμπαγή μορφή, και μία βιομηχανική μητρική πλακέτα (NexCOBOT RCB600), σχεδιασμένη για αξιόπιστη λειτουργία σε απαιτητικά βιομηχανικά περιβάλλοντα και εφαρμογές αυτόνομων κινητών ρομπότ [32, 33].

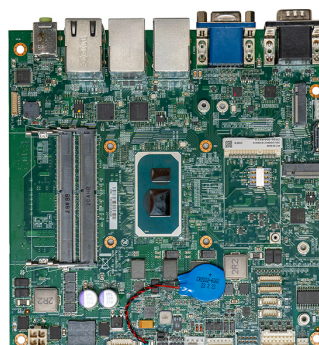
Μικρός Υπολογιστής (mini-PC)



ASUS NUC 13 Pro

Συμπαγής υπολογιστής υψηλής ισχύος

Βιομηχανική μητρική πλακέτα



RCB600

Υπολογιστική πλατφόρμα υψηλής αξιοπιστίας

Εικόνα 2.5: Πλατφόρμες ανώτερου επιπέδου υπολογιστικής υποδομής για απαιτητικές ρομποτικές εφαρμογές [32, 33].

Τα τελευταία χρόνια, έχουν αναπτυχθεί και υπολογιστικά συστήματα με ενσωματωμένες μονάδες επιτάχυνσης, όπως Μονάδες Επεξεργασίας Γραφικών (Graphics Processing Unit - GPU), χαρακτηριστικό παράδειγμα των οποίων αποτελεί η πλατφόρμα Jetson Orin Nano της Nvidia, καθώς και Νευρωνικές Μονάδες Επεξεργασίας (Neural Processing Unit - NPU), οι οποίες προσφέρουν σημαντική επιτάχυνση σε αλγορίθμους μηχανικής μάθησης και υπολογιστικής όρασης [34, 35].

Στο πλαίσιο των σύγχρονων ρομποτικών συστημάτων, οι δύο τεχνολογίες δεν λειτουργούν ανταγωνιστικά αλλά συμπληρωματικά, συνδυαζόμενες σε ιεραρχικές αρχιτεκτονικές ελέγχου. Σε αυτές, ο έλεγχος πραγματικού χρόνου και η άμεση αλληλεπίδραση με αισθητήρες και ενεργοποιητές υλοποιούνται από μικροελεγκτές, ενώ οι λειτουργίες υψηλού υπολογιστικού φορτίου, όπως η πλοήγηση, η αντίληψη και η λήψη αποφάσεων, ανατίθενται σε μικροεπεξεργαστές [36]. Για τον λόγο αυτό, είναι ιδιαίτερα διαδεδομένες οι υβριδικές αρχιτεκτονικές, όπου συνδυάζεται ένας κεντρικός υπολογιστικός κόμβος με έναν μικροελεγκτή. Σε αυτή την προσέγγιση, το σύστημα κεντρικής επεξεργασίας αναλαμβάνει την εκτέλεση σύνθετων αλγορίθμων και λειτουργιών στρατηγικού σχεδιασμού, ενώ ο μικροελεγκτής διαχειρίζεται τον έλεγχο πραγματικού χρόνου και την άμεση αλληλεπίδραση με το υλικό.

Ωστόσο, για να μπορέσει ο υπολογιστικός πυρήνας να εκτελέσει τις παραπάνω λειτουργίες, απαιτείται η συνεχής παροχή δεδομένων από το περιβάλλον και η δυνατότητα επιβολής ενεργειών σε αυτό. Στα ρομποτικά συστήματα, τα δεδομένα συλλέγονται μέσω αισθητήρων, ενώ η αλληλεπίδραση με το περιβάλλον επιτυγχάνεται μέσω ενεργοποιητών και κινητήρων. Στην επόμενη υποενότητα παρουσιάζονται οι βασικές κατηγορίες αισθητήρων και ενεργοποιητών που χρησιμοποιούνται στα ρομποτικά συστήματα.

2.1.4 Αισθητήρες και ενεργοποιητές

Οι αισθητήρες αποτελούν θεμελιώδες στοιχείο κάθε ρομποτικού συστήματος, καθώς μέσω αυτών καθίσταται δυνατή η αντίληψη τόσο της κατάστασης του ίδιου του ρομπότ όσο και του περιβάλλοντος στο οποίο αυτό λειτουργεί. Σε αντίθεση με την κλασική προσέγγιση που αντιμετωπίζει τους αισθητήρες ως μεμονωμένες συσκευές μέτρησης φυσικών μεγεθών, στη ρομποτική η αισθητήρια διαδικασία προσεγγίζεται ως πρόβλημα πληροφορίας και αντίληψης, άρρηκτα συνδεδεμένο με τη λήψη αποφάσεων και τη δράση του συστήματος [37,38].

Συνεπώς, οι αισθητήρες δεν λειτουργούν αυτόνομα, αλλά εντάσσονται σε έναν κλειστό βρόχο αντίληψης και δράσης (perception-action loop), όπου τα δεδομένα που συλλέγονται επεξεργάζονται και ερμηνεύονται από διεργασίες αντίληψης και εκτίμησης κατάστασης. Οι διεργασίες αυτές καθοδηγούν τον έλεγχο της κίνησης και της συμπεριφοράς του ρομπότ, καθιστώντας σαφές ότι η αισθητήρια πληροφορία δεν αποτελεί αυτοσκοπό, αλλά μέσο για τη συνεπή λειτουργία και την ουσιαστική αλληλεπίδραση του συστήματος με το περιβάλλον [37].

Μια βασική διάκριση που προκύπτει στη ρομποτική αφορά το είδος της πληροφορίας που παρέχουν οι αισθητήρες και τη σχέση της είτε με το ίδιο το ρομπότ είτε με το περιβάλλον του. Οι **ιδιοδεκτικοί (proprioceptive) αισθητήρες** παρέχουν μετρήσεις που αφορούν την εσωτερική κατάσταση του ρομπότ, όπως τη θέση, την ταχύτητα, τον προσανατολισμό, την κίνηση των αρθρώσεων και γενικότερα δυναμικά μεγέθη που περιγράφουν τη συμπεριφορά του συστήματος. Η πληροφορία αυτή εκφράζει την κίνηση του ρομπότ ως προς το εσωτερικό του σύστημα αναφοράς (dead reckoning) και αποτελεί βασικό στοιχείο για την παρακολούθηση της κίνησης, τη σταθερότητα και τον έλεγχο της δυναμικής του [39].

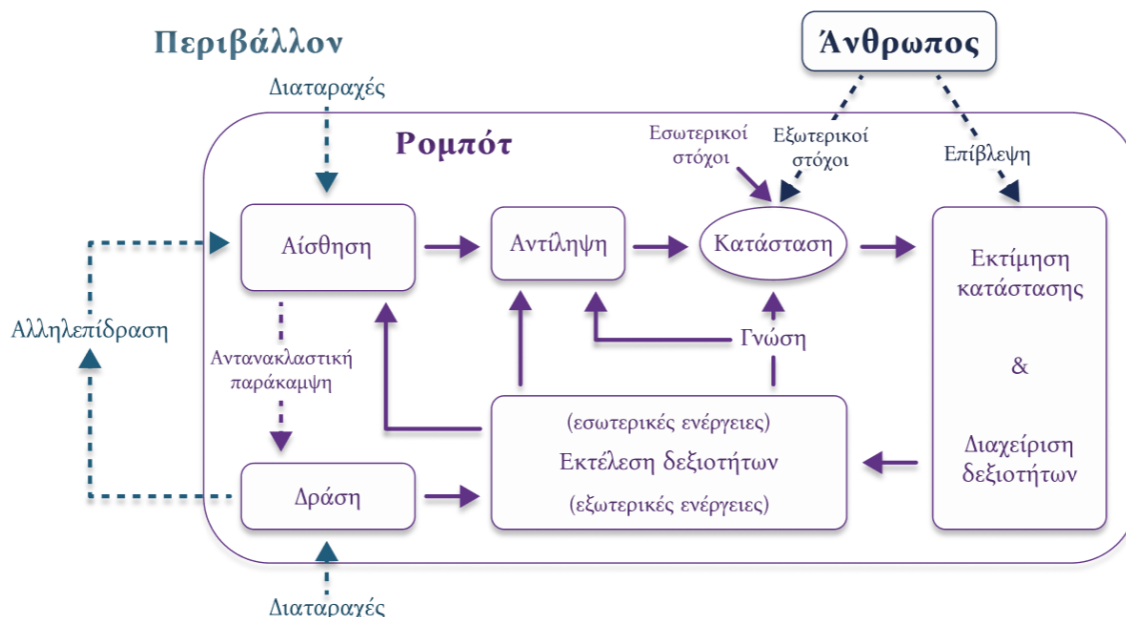
Αντίθετα, οι **εξωδεκτικοί (exteroceptive) αισθητήρες** συλλέγουν πληροφορία που αφορά το περιβάλλον και επιτρέπουν στο ρομπότ να αντιλαμβάνεται τη γεωμετρία του χώρου, την παρουσία εμποδίων και τις χωρικές σχέσεις με αντικείμενα ή επιφάνειες σε σχέση με το σύστημα αναφοράς του. Η κατηγορία αυτή αισθητήρων είναι κρίσιμη για λειτουργίες όπως η πλοήγηση, η αποφυγή συγκρούσεων και η αλληλεπίδραση με το περιβάλλον [37].

Μεταξύ των δύο αυτών κατηγοριών εντοπίζεται η **εξω-ιδιοδεκτική (exproprioceptive) αισθητήρια πληροφορία**, η οποία περιγράφει τη θέση του σώματος του ρομπότ ή επιμέρους τμημάτων του σε σχέση με τη διάταξη του περιβάλλοντος. Η πληροφορία αυτή γεφυρώνει την εσωτερική κατάσταση του συστήματος με εξωτερικά χωρικά χαρακτηριστικά και χρησιμοποιείται εκτενώς σε προβλήματα εντοπισμού, χαρτογράφησης και ελέγχου βασισμένου στην αντίληψη [39].

Ανεξαρτήτως κατηγορίας, ένα κρίσιμο χαρακτηριστικό της αισθητήριας διαδικασίας στη ρομποτική είναι η εγγενής αβεβαιότητα των μετρήσεων. Οι αισθητήρες επηρεάζονται από θόρυβο, περιορισμούς ακρίβειας και μεταβαλλόμενες συνθήκες περιβάλλοντος, με αποτέλεσμα τα δεδομένα που παρέχουν να μην αναπαριστούν με απόλυτη ακρίβεια την πραγματικότητα. Ως εκ τούτου, η αντίληψη του περιβάλλοντος δεν συνιστά απλή ανάγνωση μετρήσεων, αλλά διαδικασία εκτίμησης υπό αβεβαιότητα, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη χρήση πολλαπλών αισθητήρων και τον συνδυασμό της πληροφορίας που αυτοί παρέχουν, ενισχύοντας τη σταθερότητα και την ανθεκτικότητα του συστήματος [37].

Η μετάβαση από την αντίληψη στη φυσική δράση του ρομποτικού συστήματος πραγματοποιείται μέ-

σω του ίδιου κλειστού βρόχου αντίληψης και δράσης, όπου η εκτιμώμενη κατάσταση οδηγεί στη λήψη αποφάσεων και, τελικά, στην εκτέλεση ενεργειών.



Εικόνα 2.6: Σχηματική αναπαράσταση του κλειστού βρόχου αντίληψης και δράσης σε ρομποτικό σύστημα [40].

Στο Σχήμα 2.6 απεικονίζεται η συνολική αρχιτεκτονική λειτουργίας ενός ρομποτικού συστήματος και ο κλειστός βρόχος αλληλεπίδρασης μεταξύ του ρομπότ, του περιβάλλοντος και του ανθρώπου. Η διαδικασία ξεκινά από την αίσθηση, μέσω της οποίας το ρομπότ συλλέγει πληροφορία από το περιβάλλον. Η πληροφορία αυτή επεξεργάζεται στο επίπεδο της αντίληψης ώστε να διαμορφωθεί μια ερμηνεία της τρέχουσας κατάστασης, η οποία σε συνδυασμό με την αποθηκευμένη γνώση και τους στόχους του συστήματος οδηγεί στη λήψη αποφάσεων και στην παραγωγή εντολών δράσης.

Στο ίδιο σχήμα αποτυπώνεται και ο ρόλος του περιβάλλοντος μέσω διαταραχών, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν τόσο τη διαδικασία αίσθησης όσο και την εκτέλεση των δράσεων. Οι διαταραχές αυτές εισάγουν αβεβαιότητα και δυναμικές μεταβολές, οι οποίες λαμβάνονται υπόψη στον κλειστό βρόχο αντίληψης και δράσης. Παράλληλα, η δράση του ρομπότ μεταβάλλει το περιβάλλον, το οποίο καθορίζει τις επόμενες αισθητήριες εισόδους, διατηρώντας τον κλειστό χαρακτήρα της διαδικασίας.

Επιπλέον, στο σχήμα αναδεικνύεται η ύπαρξη απευθείας διαδρομών από την αίσθηση προς τη δράση, γνωστών ως αντανακλαστικές παρακάμψεις. Οι διαδρομές αυτές επιτρέπουν στο ρομποτικό σύστημα να αντιδρά άμεσα σε κρίσιμες καταστάσεις, χωρίς να απαιτείται η πλήρης διέλευση από όλα τα ανώτερα επίπεδα αντίληψης και λήψης αποφάσεων. Με τον τρόπο αυτό ενισχύεται η ταχύτητα απόκρισης και η λειτουργική ασφάλεια του ρομπότ, ιδιαίτερα σε δυναμικά και απρόβλεπτα περιβάλλοντα.

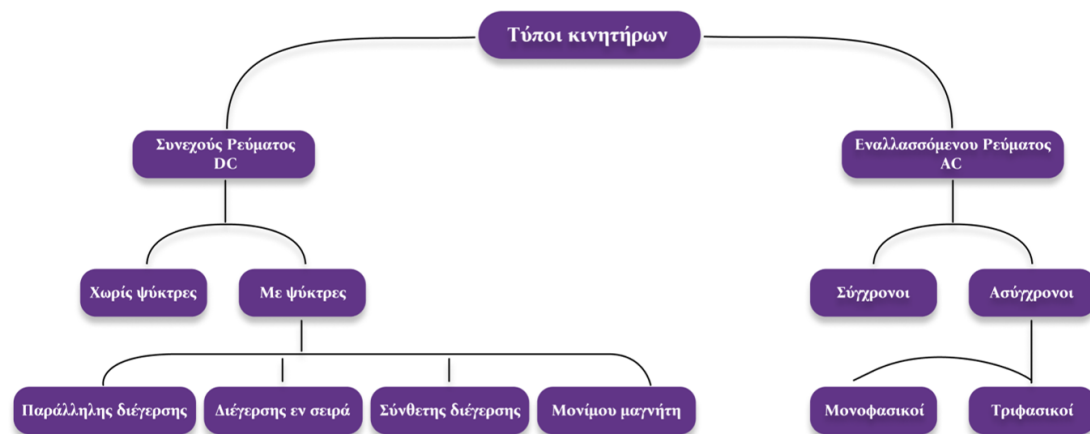
Συμπληρωματικά προς τους αισθητήρες, οι ενεργοποιητές αποτελούν τον μηχανισμό μέσω του οποίου το σύστημα υλοποιεί τις αποφάσεις του και αλληλεπιδρά φυσικά με το περιβάλλον. Μέσω αυτών, τα ηλεκτρικά σήματα εντολών μετατρέπονται σε μηχανική κίνηση ή σε άλλη μορφή φυσικού έργου, ολοκληρώνοντας τον κλειστό βρόχο αντίληψης και δράσης.

Οι ενεργοποιητές δεν λειτουργούν ως απομονωμένα στοιχεία, αλλά εντάσσονται σε ολοκληρωμένες αλ-

σίδες δράσης που περιλαμβάνουν πηγές ενέργειας, ηλεκτρονικά ισχύος, μηχανικές μεταδόσεις και διεπαφές επαφής με το περιβάλλον. Η επιλογή της τεχνολογίας ενεργοποίησης επηρεάζει άμεσα τη δυναμική συμπεριφορά, την ακρίβεια ελέγχου και τα λειτουργικά όρια του συστήματος, καθιστώντας αναγκαίο τον συμβιβασμό μεταξύ διαφορετικών απαιτήσεων σχεδίασης.

Με βάση την αρχή λειτουργίας και τη μορφή ενέργειας που μετατρέπεται σε μηχανικό έργο, οι ενεργοποιητές στη ρομποτική κατηγοριοποιούνται σε ηλεκτρικούς, υδραυλικούς, πνευματικούς και ενεργοποιητές βασισμένους σε έξυπνα ή λειτουργικά υλικά. Οι ηλεκτρικοί ενεργοποιητές κυριαρχούν στις περισσότερες ρομποτικές εφαρμογές, λόγω της υψηλής ακρίβειας ελέγχου, της καλής επαναληψιμότητας και της εύκολης ενσωμάτωσης με ηλεκτρονικά και υπολογιστικά συστήματα.

Στο πλαίσιο αυτό, οι ηλεκτρικοί κινητήρες αποτελούν την κυρίαρχη υποκατηγορία ηλεκτρικών ενεργοποιητών. Η βασική κατηγοριοποίησή τους πραγματοποιείται με βάση το είδος της ηλεκτρικής τροφοδοσίας και αποτυπώνεται σχηματικά στο Σχήμα 2.7.



Εικόνα 2.7: Ενδεικτική κατηγοριοποίηση ηλεκτρικών κινητήρων με βάση την αρχή λειτουργίας και τον τρόπο διέγερσης του μαγνητικού πεδίου.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7, οι ηλεκτρικοί κινητήρες διακρίνονται αρχικά σε κινητήρες συνεχούς ρεύματος (Direct Current - DC) και κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (Alternating Current - AC). Η διάκριση αυτή αποτελεί τη βάση για την κατανόηση των διαφορετικών αρχών λειτουργίας και των χαρακτηριστικών ελέγχου που εμφανίζουν οι επιμέρους τύποι κινητήρων.

- **Κινητήρες συνεχούς ρεύματος (Direct Current - DC):** Χαρακτηρίζονται από σχεδόν γραμμική σχέση μεταξύ της ηλεκτρικής διέγερσης και της παραγόμενης ροπής, γεγονός που διευκολύνει τον έλεγχο ταχύτητας και θέσης σε κλειστό βρόχο. Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει κινητήρες με διαφορετικό τρόπο δημιουργίας του μαγνητικού πεδίου, καθώς και ειδικότερες αρχιτεκτονικές κίνησης που χρησιμοποιούνται ευρέως στη ρομποτική.

- *Κινητήρες με ψήκτρες (Brushed DC Motors):* Το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται είτε μέσω τυλιγμάτων διέγερσης είτε μέσω μόνιμων μαγνητών. Παρουσιάζουν απλή κατασκευή και υψηλή ροπή εκκίνησης, ωστόσο η ύπαρξη μηχανικών επαφών μεταξύ ψηκτρών και συλλέκτη οδηγεί σε φθορά και αυξημένες απαιτήσεις συντήρησης. Ανάλογα με τον τρόπο διέγερσης, διακρίνονται σε:

- * *Παράλληλης διέγερσης (Shunt wound)*: Το τύλιγμα διέγερσης συνδέεται παράλληλα με το τύλιγμα του δρομέα, με αποτέλεσμα σχετικά σταθερή ταχύτητα λειτουργίας υπό μεταβαλλόμενο φορτίο, αλλά περιορισμένη ροπή εκκίνησης.
 - * *Διέγερσης εν σειρά (Series wound)*: Το τύλιγμα διέγερσης συνδέεται εν σειρά με το τύλιγμα του δρομέα, προσφέροντας πολύ υψηλή ροπή εκκίνησης, με τίμημα τη σημαντική μεταβολή της ταχύτητας ανάλογα με το φορτίο.
 - * *Σύνθετης διέγερσης (Compound wound)*: Συνδυάζει χαρακτηριστικά παράλληλης και εν σειρά διέγερσης, επιτυγχάνοντας συμβιβασμό μεταξύ ροπής εκκίνησης και σταθερότητας ταχύτητας, με αυξημένη όμως πολυπλοκότητα.
 - * *Μόνιμου μαγνήτη (Permanent magnet DC motors)*: Το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται μέσω μόνιμων μαγνητών, εξαλείφοντας την ανάγκη τυλίγματος διέγερσης και οδηγώντας σε απλούστερη κατασκευή και προβλέψιμη συμπεριφορά, ιδιαίτερα σε μικρά και μεσαία συστήματα.
- *Κινητήρες χωρίς ψήκτρες (Brushless DC - BLDC)*: Αξιοποιούν μόνιμους μαγνήτες στον δρομέα και ηλεκτρονική μεταγωγή για τη δημιουργία του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου, εξαλείφοντας τη μηχανική φθορά. Προσφέρουν υψηλή απόδοση, αυξημένη αξιοπιστία και καλή δυναμική συμπεριφορά, καθιστώντας τους BLDC κινητήρες κυρίαρχη επιλογή σε σύγχρονα ρομποτικά συστήματα κίνησης.
 - *Βηματικοί κινητήρες (Stepper motors)*: Επιτρέπουν έλεγχο θέσης μέσω διακριτών βημάτων, χωρίς την απαραίτητη χρήση αισθητήρων ανάδρασης. Η λειτουργία τους βασίζεται συνήθως σε μόνιμους μαγνήτες ή υβριδικές δομές και προσφέρει απλότητα υλοποίησης και ικανοποιητική ακρίβεια σε εφαρμογές χαμηλής ταχύτητας και περιορισμένων δυναμικών απαιτήσεων.
 - *Σερβοκινητήρες (Servo motors)*: Δεν αποτελούν ξεχωριστή αρχή λειτουργίας κινητήρα, αλλά ολοκληρωμένα συστήματα κίνησης που συνδυάζουν ηλεκτρικό κινητήρα (συνήθως DC ή BLDC), αισθητήρες ανάδρασης και σύστημα ελέγχου. Η διάταξη αυτή επιτρέπει ακριβή και σταθερό έλεγχο θέσης, ταχύτητας και ροπής ακόμη και υπό μεταβαλλόμενα φορτία.
- **Κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (Alternating Current - AC)**: Βασίζονται στη δημιουργία περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου στον στάτη μέσω εναλλασσόμενης τροφοδοσίας και διακρίνονται σε σύγχρονους και ασύγχρονους (επαγωγικούς) κινητήρες. Παρότι χαρακτηρίζονται από υψηλή μηχανική αντοχή και ενεργειακή απόδοση, η πιο σύνθετη σχέση μεταξύ τάσης, συχνότητας και παραγόμενης ροπής καθιστά τον ακριβή έλεγχο θέσης πιο απαιτητικό, περιορίζοντας τη χρήση τους σε εφαρμογές ρομποτικής ακρίβειας χωρίς προηγμένες τεχνικές ελέγχου.

Συνολικά, αισθητήρες και ενεργοποιητές συγκροτούν τον θεμελιώδη μηχανισμό μέσω του οποίου ένα ρομποτικό σύστημα αντιλαμβάνεται το περιβάλλον του, εκτιμά την κατάστασή του και δρα εντός αυτού. Η στενή τους διασύνδεση απαιτεί αξιόπιστη και χρονικά συνεπή ανταλλαγή δεδομένων και εντολών μεταξύ των επιμέρους υποσυστημάτων, γεγονός που οδηγεί φυσικά στην ανάγκη χρήσης κατάλληλων πρωτοκόλλων επικοινωνίας, τα οποία αποτελούν το αντικείμενο της επόμενης ενότητας.

2.1.5 Ιεραρχική και λειτουργική αρχιτεκτονική επικοινωνίας

Η επικοινωνία σε ένα σύγχρονο ρομποτικό σύστημα δεν αποτελεί μία ενιαία και ομοιογενή διαδικασία, αλλά ένα πολυεπίπεδο σύνολο μηχανισμών που εκτείνεται από το επίπεδο του υλικού έως την αλληλεπίδραση με απομακρυσμένες υποδομές. Δεν περιορίζεται στην απλή μεταφορά δεδομένων μεταξύ εξαρτημάτων, αλλά επηρεάζει άμεσα την αυτονομία, την ποιότητα ελέγχου και την ασφάλεια του συστήματος.

Ένα ρομπότ μπορεί να θεωρηθεί ως ένας καταναμημένος επικοινωνιακός κόμβος, στον οποίο συνυπάρχουν ετερογενή υποσυστήματα με διαφορετικές απαιτήσεις ως προς την καθυστέρηση, την αξιοπιστία και το εύρος ζώνης. Οι απαιτήσεις αυτές διαφοροποιούνται σημαντικά μεταξύ εσωτερικών βρόχων ελέγχου πραγματικού χρόνου και ανώτερων επιπέδων συνεργασίας ή εποπτείας, καθιστώντας αναγκαία την υιοθέτηση μιας ιεραρχικής και λειτουργικής προσέγγισης στην ανάλυση της επικοινωνίας.

Η ιεραρχική θεώρηση επιτρέπει τη συστηματική κατηγοριοποίηση των μηχανισμών επικοινωνίας όχι με βάση το φυσικό μέσο ή το πρωτόκολλο, αλλά με βάση τον ρόλο τους στο συνολικό σύστημα. Κεντρικές παράμετροι σχεδιασμού αποτελούν η χρονική προβλεψιμότητα (determinism), η αξιοπιστία (reliability) και το απαιτούμενο εύρος ζώνης (bandwidth), οι οποίες διαφοροποιούνται από επίπεδο σε επίπεδο.

Επίπεδο Υποσυστημάτων - Εσωτερική Επικοινωνία Ρομπότ (Intra-Robot Communication)

Το χαμηλότερο επίπεδο επικοινωνίας αφορά τη διασύνδεση του κεντρικού επεξεργαστή με αισθητήρες, ενεργοποιητές και περιφερειακές μονάδες εντός του ίδιου ρομποτικού συστήματος. Η επικοινωνία σε αυτό το επίπεδο χαρακτηρίζεται από άμεση σύζευξη υλικού, ελάχιστη καθυστέρηση και σταθερή χρονική συμπεριφορά, χωρίς τη μεσολάβηση ενδιάμεσου λογισμικού ή δικτυακών μηχανισμών.

Οι δίαυλοι αισθητήρων και περιφερειακών, όπως το I²C (Inter-Integrated Circuit) και το SPI (Serial Peripheral Interface), χρησιμοποιούνται ευρέως για τη διασύνδεση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Το SPI προσφέρει σύγχρονη επικοινωνία υψηλής ταχύτητας και ακριβή έλεγχο χρονισμού, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για αισθητήρες με αυξημένες απαιτήσεις καθυστέρησης. Αντίθετα, το I²C ευνοεί την απλότητα καλωδίωσης και την υποστήριξη πολλαπλών συσκευών στο ίδιο bus, με αντάλλαγμα χαμηλότερη ρυθμοαπόδοση. Νεότερες επεκτάσεις, όπως το I³C (Improved Inter-Integrated Circuit), επιχειρούν να γεφυρώσουν το χάσμα μεταξύ απλότητας και απόδοσης.

Η ασύγχρονη σειριακή επικοινωνία μέσω UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) χρησιμοποιείται κυρίως για τη διασύνδεση ετερογενών υποσυστημάτων, όπως μικροελεγκτών και υπολογιστικών μονάδων υψηλότερου επιπέδου, καθώς και για σκοπούς παραμετροποίησης και αποσφαλμάτωσης. Παρότι δεν παρέχει εγγυημένα χρονικά όρια απόκρισης, η απλότητα και η σημείο-προς-σημείο φύση της την καθιστούν ιδιαίτερα διαδεδομένη σε ενδοσυστημικές εφαρμογές.

Έλεγχος Κίνησης και Πραγματικός Χρόνος (Actuation Layer)

Ένα κρίσιμο υποσύνολο της εσωτερικής επικοινωνίας αφορά την ανταλλαγή δεδομένων που σχετίζεται άμεσα με τον έλεγχο κίνησης. Σε αυτό το επίπεδο, ακόμη και μικρές χρονικές αποκλίσεις ή διακυμάνσεις καθυστέρησης μπορούν να οδηγήσουν σε αστάθεια του συστήματος, καθιστώντας απαραίτητη τη χρήση πρωτοκόλλων με εγγενή υποστήριξη πραγματικού χρόνου.

Το CAN (Controller Area Network) αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου διαύλου, προσφέροντας ανθεκτικότητα σε ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο, μηχανισμό προτεραιοποίησης μηνυμάτων και προβλέψιμη πρόσβαση στο μέσο. Για εφαρμογές με αυστηρότερες απαιτήσεις συγχρονισμού, όπως ο ταυτόχρονος έλεγχος πολλαπλών αξόνων, χρησιμοποιούνται πρωτόκολλα βιομηχανικού Ethernet, με κυριότερο το EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology), το οποίο επιτυγχάνει εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση και ακριβή χρονικό συγχρονισμό των κόμβων.

Επίπεδο Ενδιάμεσου Λογισμικού - Διανομή Δεδομένων (Middleware Layer)

Πάνω από τα επίπεδα υλικού και δικτύου, τα ρομποτικά συστήματα αξιοποιούν ενδιάμεσο λογισμικό (middleware) για τη διαχείριση της ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ διεργασιών και υποσυστημάτων. Ο βασικός ρόλος του middleware είναι η αποσύνδεση των παραγωγών και καταναλωτών δεδομένων, επιτρέποντας την ανάπτυξη κατανεμημένων και επεκτάσιμων αρχιτεκτονικών.

Το επικρατέστερο αρχιτεκτονικό μοντέλο στο επίπεδο αυτό είναι το μοντέλο δημοσίευσης-εγγραφής (publish-subscribe), το οποίο επιτρέπει την ασύγχρονη και χαλαρά συζευγμένη ανταλλαγή δεδομένων. Στο πλαίσιο αυτό, το DDS (Data Distribution Service) αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα data-centric middleware, παρέχοντας μηχανισμούς ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service - QoS) για αξιόπιστη και χρονικά ελεγχόμενη διανομή δεδομένων σε κατανεμημένα συστήματα.

Συμπληρωματικά, το Zenoh εισάγει μια ενοποιημένη προσέγγιση επικοινωνίας από το άκρο έως το cloud (edge-to-edge και edge-to-cloud), γεφυρώνοντας περιβάλλοντα DDS με συστήματα Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT), με μειωμένο επικοινωνιακό φορτίο και ευέλικτη τοπολογία. Αντίστοιχα, πρωτόκολλα επικεντρωμένα στο μήνυμα, όπως το MQTT και το MQTT-SN, χρησιμοποιούνται κυρίως για τηλεμετρία και εποπτεία, χωρίς να προορίζονται για κλειστούς βρόχους ελέγχου.

Επικοινωνία Ρομπότ-Περιβάλλον (Robot-to-Environment Communication)

Σε ανώτερο επίπεδο, το ρομπότ αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του μέσω υποσυστημάτων αντίληψης που παράγουν ροές δεδομένων υψηλού όγκου και αυξημένης πληροφορικής πυκνότητας. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της χωρικής δομής, της δυναμικής κατάστασης και των χαρακτηριστικών του περιβάλλοντος.

Σε αντίθεση με τα κατώτερα επίπεδα ελέγχου, οι απαιτήσεις επικοινωνίας εδώ μετατοπίζονται προς το υψηλό εύρος ζώνης και την αποδοτική μεταφορά πληροφορίας. Η καθυστέρηση παραμένει σημαντική, ωστόσο μικρές απώλειες δεδομένων ή μεταβολές στον χρόνο απόκρισης μπορούν συχνά να αντιμετωπιστούν σε ανώτερο επίπεδο επεξεργασίας, χωρίς να επηρεάζεται άμεσα η ευστάθεια του συστήματος.

Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται ενσύρματες και ασύρματες τεχνολογίες βασισμένες στη στοίβα TCP/IP, όπως το Ethernet και το Wi-Fi, με επιλογή μεταξύ TCP και UDP ανάλογα με τον επιθυμητό συμβιβασμό μεταξύ αξιοπιστίας και καθυστέρησης. Πέραν της κλασικής χρήσης τους, τα ασύρματα δίκτυα διερευνώνται και ως μέσο αντίληψης μέσω τεχνικών όπως το WiFi sensing.

Επικοινωνία Πολλαπλών Ρομπότ και Συνεργατικά Συστήματα (Multi-Robot Communication)

Η επικοινωνία μεταξύ πολλαπλών ρομποτικών μονάδων αποτελεί βασικό στοιχείο συνεργατικών και

σμηνιακών συστημάτων. Η αποκέντρωση, η κινητικότητα και η απουσία σταθερής υποδομής καθιστούν αναγκαία τη χρήση ad-hoc δικτύων και κινητών δικτύων πολλαπλών κόμβων (Mobile Ad-hoc Networks - MANETs).

Σε περιβάλλοντα με περιορισμένη ή διαλείπουσα συνδεσιμότητα, υιοθετούνται στρατηγικές περιοδικής ανταλλαγής δεδομένων και συγχώνευσης πληροφορίας, επιτρέποντας τη λειτουργία συνεργατικών συστημάτων ακόμη και υπό αυστηρούς περιορισμούς επικοινωνίας.

Οριζόντια Θέματα: Ασφάλεια και Ακεραιότητα (Security and Integrity)

Η ασφάλεια και η ακεραιότητα της επικοινωνίας αποτελούν οριζόντιες απαιτήσεις που διατρέχουν όλα τα επίπεδα της αρχιτεκτονικής. Η αξιόπιστη λειτουργία ενός ρομποτικού συστήματος προϋποθέτει προστασία από απώλεια σύνδεσης, αλλοίωση δεδομένων και μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση.

Σε επίπεδο ενσωματωμένων διαύλων, δικτύων και middleware, κρίσιμη σημασία αποκτούν η αυθεντικοποίηση, η κρυπτογράφηση και ο έλεγχος ακεραιότητας δεδομένων. Η υιοθέτηση αρχών σχεδίασης με γνώμονα την ασφάλεια (security-by-design) και μηχανισμών ασφαλούς αποτυχίας (fail-safe) είναι καθοριστική για την ασφαλή λειτουργία ρομποτικών συστημάτων σε πραγματικές συνθήκες.

Συνολικά, η ιεραρχική προσέγγιση της επικοινωνίας παρέχει ένα συνεκτικό πλαίσιο κατανόησης των τεχνολογικών επιλογών και των σχετικών συμβιβασμών. Στην επόμενη υποενότητα εξετάζονται οι βαθμοί αυτονομίας, οι οποίοι αξιοποιούν αυτή την επικοινωνιακή υποδομή για την υλοποίηση ολοένα και πιο σύνθετων λειτουργικών συμπεριφορών.

2.1.6 Μορφές αυτονομίας

Η αυτονομία αποτελεί μία από τις πλέον κεντρικές αλλά και ασαφώς οριοθετημένες έννοιες στη σύγχρονη ρομποτική. Παρότι χρησιμοποιείται συχνά ως γενικός χαρακτηρισμός για προηγμένα ρομποτικά συστήματα, δεν υφίσταται ένας ενιαίος και καθολικά αποδεκτός ορισμός της έννοιας, αλλά ένα σύνολο προσεγγίσεων που αντανakλούν διαφορετικές τεχνικές, λειτουργικές και θεσμικές οπτικές [3]. Η αυτονομία προσεγγίζεται, συνεπώς, ως πολυδιάστατη ιδιότητα ρομποτικών συστημάτων, η οποία διαμορφώνεται από τον βαθμό ανθρώπινης εμπλοκής, το περιβάλλον λειτουργίας και τους κανονιστικούς περιορισμούς.

Η ανάγκη αποσαφήνισης της έννοιας καθιστά κρίσιμη τη διάκριση μεταξύ αυτοματοποιημένων (automatic) και αυτόνομων (autonomous) συστημάτων. Τα αυτοματοποιημένα συστήματα εκτελούν προκαθορισμένες λειτουργίες βάσει συγκεκριμένων κανόνων ή αλγορίθμων, χωρίς δυνατότητα ουσιαστικής ανασχεδίασης της συμπεριφοράς τους σε μη αναμενόμενες συνθήκες. Αντιθέτως, τα αυτόνομα συστήματα διαθέτουν ικανότητα σχεδιασμού και λήψης αποφάσεων σε επίπεδο στόχων, γεγονός που τους επιτρέπει να προσαρμόζουν ενεργά τη συμπεριφορά τους όταν μεταβάλλεται το περιβάλλον λειτουργίας [41]. Η διάκριση αυτή είναι ουσιώδης, καθώς η ύπαρξη υψηλού βαθμού αυτοματοποίησης δεν συνεπάγεται κατ' ανάγκη αντίστοιχο επίπεδο αυτονομίας, κάτι που εξηγεί γιατί πολλά σύγχρονα ρομποτικά και κυβερνοφυσικά συστήματα παραμένουν εξαρτημένα από ανθρώπινη εποπτεία ή παρέμβαση σε κρίσιμα στάδια λειτουργίας.

Η διαφοροποίηση μεταξύ αυτοματοποίησης και αυτονομίας οδηγεί φυσικά στη θεώρηση της αυτονομίας όχι ως δυαδικού χαρακτηριστικού, αλλά ως συνεχούς φάσματος. Ήδη από τις πρώιμες μελέτες εποπτικού ελέγχου, η αυτονομία συνδέθηκε με τη σταδιακή μετατόπιση του ρόλου του ανθρώπου από άμεσο χειριστή σε επόπτη του συστήματος [42]. Μεταγενέστερα μοντέλα ανέδειξαν ότι η αυτονομία μπορεί να εκδηλώνεται σε διαφορετικά στάδια της διαδικασίας αντίληψης και δράσης, όπως στην απόκτηση πληροφορίας, στην ανάλυση, στη λήψη αποφάσεων και στην υλοποίηση ενεργειών [43]. Στο πλαίσιο αυτό, η αύξηση του βαθμού αυτονομίας συνοδεύεται από γνωστικές προκλήσεις για τον άνθρωπο, όπως η απώλεια επίγνωσης κατάστασης και το φαινόμενο *out-of-the-loop*, όπου η δυνατότητα έγκαιρης και αποτελεσματικής ανθρώπινης παρέμβασης μειώνεται σημαντικά [44]. Κατά συνέπεια, η επιλογή του βαθμού αυτονομίας συνιστά σχεδιαστική απόφαση που οφείλει να λαμβάνει υπόψη τόσο τις τεχνικές δυνατότητες του συστήματος όσο και τους ανθρώπινους περιορισμούς.

Η θεώρηση της αυτονομίας ως συνεχούς φάσματος οδήγησε στη διαμόρφωση πλαισίων βαθμίδων αυτονομίας, με σκοπό την περιγραφή και σύγκριση ρομποτικών συστημάτων ως προς τον βαθμό ανεξαρτησίας τους από τον άνθρωπο. Σε χαμηλά επίπεδα, ο άνθρωπος διατηρεί πλήρη έλεγχο και το σύστημα λειτουργεί υποστηρικτικά, ενώ σε υψηλότερα επίπεδα το ρομπότ αναλαμβάνει πρωτοβουλία, με τον άνθρωπο να περιορίζεται σε ρόλο εποπτείας ή παρέμβασης σε εξαιρετικές περιπτώσεις [42]. Παρά τη χρησιμότητά τους, τα επίπεδα αυτονομίας αποτυπώνουν κυρίως τη λειτουργική ανεξαρτησία και δεν επαρκούν για την πλήρη περιγραφή της συμπεριφοράς ενός συστήματος σε σύνθετα και δυναμικά περιβάλλοντα.

Η αδυναμία των κλασικών βαθμίδων αυτονομίας να αποτυπώσουν το σύνολο των πτυχών της ρομποτικής συμπεριφοράς οδήγησε στην ανάπτυξη πολυδιάστατων προσεγγίσεων, στις οποίες η αυτονομία αναλύεται σε διακριτές μορφές που αφορούν διαφορετικούς άξονες ανθρώπινης και ρομποτικής εμπλοκής [45].

Η **λειτουργική (operational)** αυτονομία ορίζεται ως ο βαθμός ανθρώπινης αποδέσμευσης κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του ρομπότ. Αφορά το κατά πόσο οι ενέργειες του συστήματος εκτελούνται χωρίς άμεση ανθρώπινη παρέμβαση σε πραγματικό χρόνο και αποτελεί την κυρίαρχη αντίληψη της αυτονομίας στη βιβλιογραφία της αλληλεπίδρασης ανθρώπου-ρομπότ. Υψηλή λειτουργική αυτονομία αντιστοιχεί σε πλήρη απουσία ανθρώπινης παρέμβασης, ενώ χαμηλή λειτουργική αυτονομία συναντάται σε περιπτώσεις τηλεχειρισμού ή εποπτευόμενης λειτουργίας. Η διάσταση αυτή εστιάζει αποκλειστικά στον εξωτερικό, ως προς το ρομπότ, παράγοντα του ανθρώπινου ελέγχου και δεν συνεπάγεται κατ' ανάγκη ύπαρξη εσωτερικής στοχοκατευθυνόμενης συμπεριφοράς.

Η **προθεσιακή (intentional)** αυτονομία αφορά τον βαθμό στον οποίο το ρομπότ εμπλέκεται σκόπιμα στη συμπεριφορά του, διαθέτοντας εσωτερική αναπαράσταση και γνώση του στόχου προς τον οποίο ενεργεί. Σε αντίθεση με τη λειτουργική αυτονομία, η προθεσιακή αυτονομία προσδιορίζεται ενδογενώς, χωρίς άμεση αναφορά σε εξωτερικούς παράγοντες, και συνδέεται με την ύπαρξη στοχοκατευθυνόμενης, μη τυχαίας συμπεριφοράς. Ένα ρομπότ μπορεί να λειτουργεί πλήρως ανεξάρτητα από τον άνθρωπο, αλλά εφόσον δεν αποδίδει σκοπό ή στόχο στις ενέργειές του, να εμφανίζει χαμηλή προθεσιακή αυτονομία.

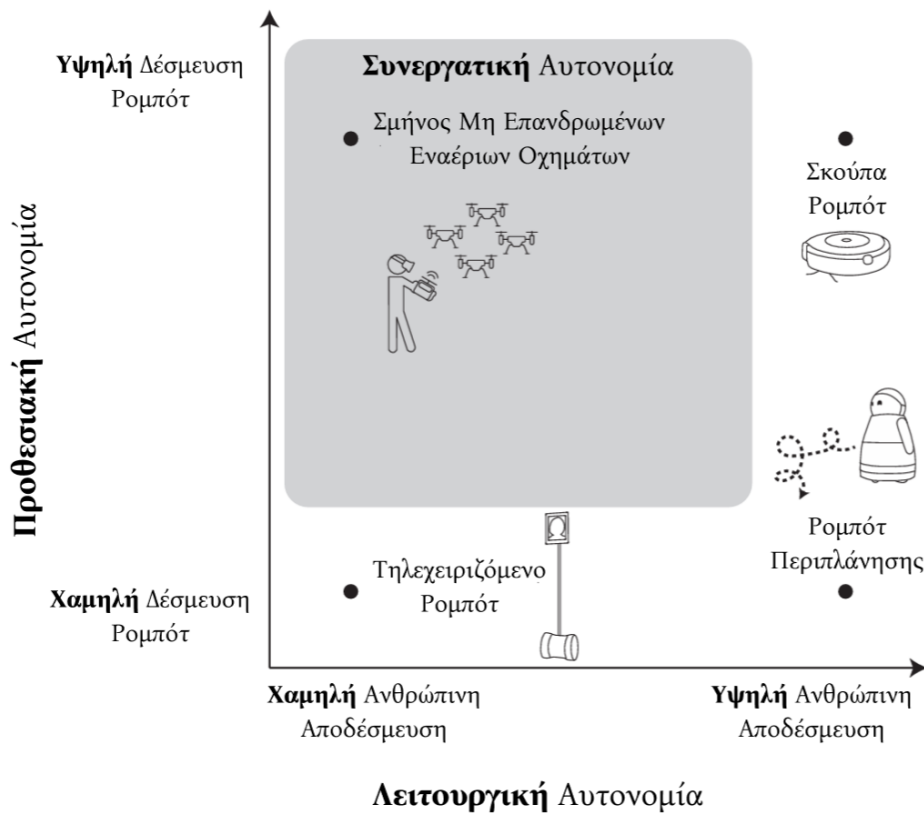
Η **συνεργατική (shared)** αυτονομία περιγράφει καταστάσεις στις οποίες τόσο ο άνθρωπος όσο και το ρομπότ είναι ταυτόχρονα και σκόπιμα εμπλεκόμενοι κατά τη λειτουργία του συστήματος. Αποτελεί σύνθετη μορφή αυτονομίας, καθώς προκύπτει από τον συνδυασμό λειτουργικής και προθεσιακής αυτονομίας, και εκδηλώνεται είτε μέσω ταυτόχρονου είτε μέσω εναλλασσόμενου ελέγχου. Η συνεργατική αυτονομία αναδεικνύει την αυτονομία ως κατανεμημένο χαρακτηριστικό της ανθρώπινης-ρομποτικής αλληλεπίδρασης και όχι ως ιδιότητα αποκλειστικά του ρομπότ.

Η **γνωστική (cognitive)** αυτονομία αφορά τον βαθμό στον οποίο το ρομπότ αναλαμβάνει γνωστικές διεργασίες, όπως αντίληψη, συλλογισμό, λήψη αποφάσεων και σχεδιασμό ενεργειών. Σε ορισμένες περιπτώσεις περιλαμβάνει και μορφές ηθικού συλλογισμού. Η γνωστική αυτονομία δεν προϋποθέτει κατ' ανάγκη προθεσιακή αυτονομία, καθώς ένα ρομπότ μπορεί να επεξεργάζεται πληροφορίες και να λαμβάνει σύνθετες αποφάσεις ακόμη και χωρίς σαφή εσωτερική στοχοκατεύθυνση.

Τέλος, η **φυσική (physical)** αυτονομία αναφέρεται στον βαθμό στον οποίο το ρομπότ μπορεί να εκτελεί φυσική δράση χωρίς εξωτερικούς περιορισμούς. Περιλαμβάνει τόσο την κινητική αυτονομία, δηλαδή την ελευθερία κίνησης στο φυσικό περιβάλλον, όσο και την ενεργειακή αυτονομία, η οποία σχετίζεται με τη διαθεσιμότητα και αυτοδιαχείριση των ενεργειακών πόρων. Ακόμη και συστήματα με υψηλή λειτουργική ή γνωστική αυτονομία ενδέχεται να περιορίζονται σημαντικά από φυσικούς ή μηχανικούς παράγοντες.

Η Εικόνα 2.8 παρουσιάζει μια εννοιολογική ταξινόμηση της ρομποτικής αυτονομίας βασισμένη σε δύο άξονες: τη Λειτουργική Αυτονομία (οριζόντιος άξονας), και την Προθεσιακή Αυτονομία (κάθετος άξονας). Στο χαμηλότερο επίπεδο και των δύο αξόνων τοποθετείται το Τηλεχειριζόμενο Ρομπότ, το οποίο λειτουργεί ως εργαλείο υπό πλήρη και συνεχή ανθρώπινο έλεγχο. Το Ρομπότ Περιπλάνησης εμφανίζει υψηλή λειτουργική αυτονομία, καθώς κινείται ανεξάρτητα χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, αλλά χαμηλή προθεσιακή αυτονομία, δεδομένου ότι η συμπεριφορά του δεν είναι στοχοκατευθυνόμενη. Αντιθέτως, τα Σμήνη Μη Επανδρωμένων Εναέριων Οχημάτων εντάσσονται στην περιοχή της Συνεργατικής Αυτονομίας, καθώς συνδυάζουν υψηλό βαθμό προθεσιακής εμπλοκής για την επίτευξη κοινού σκοπού με κατανεμημένο έλεγχο και ανθρώπινη συμμετοχή στον συντονισμό κατά τη λειτουργία. Τέλος, η Σκούπα

Ρομπότ καταλαμβάνει υψηλή θέση και στους δύο άξονες, καθώς εκτελεί στοχοκατευθυνόμενες εργασίες καθαρισμού με πλήρη αποδέσμευση από τον άνθρωπο κατά τη λειτουργία. Παρότι οι στόχοι της έχουν καθοριστεί εκ των προτέρων, το σύστημα διαθέτει εσωτερική αναπαράσταση του σκοπού της λειτουργίας του και λαμβάνει αποφάσεις για την επίτευξή του, γεγονός που αντιστοιχεί σε υψηλή προθεσιακή αυτονομία.



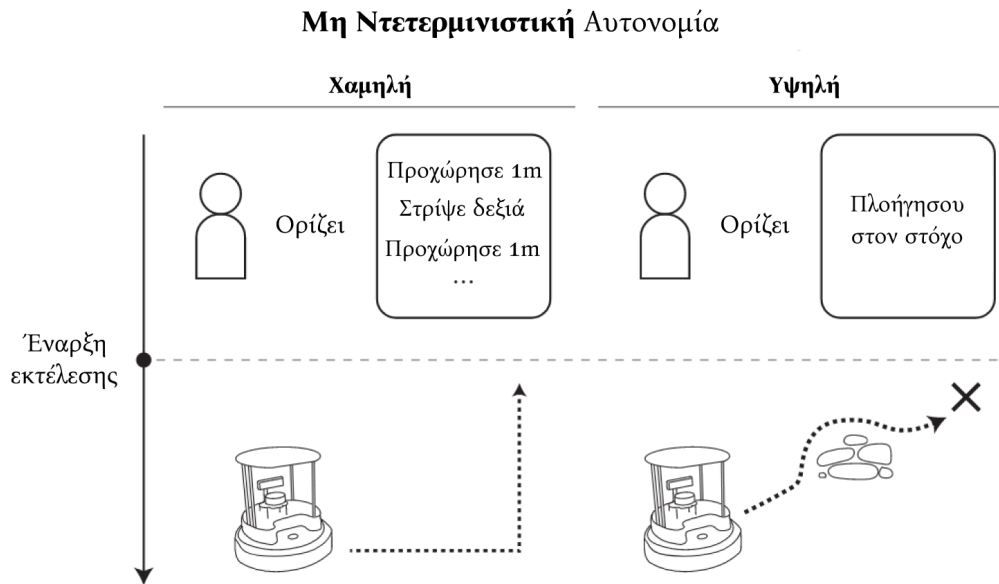
Εικόνα 2.8: Σημεία τομής λειτουργικής και προθεσιακής αυτονομίας για ενδεικτικές εφαρμογές [45].

Πέρα από τις μορφές αυτονομίας που εκδηλώνονται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, διακρίνονται και διαστάσεις που αφορούν τον βαθμό καθορισμού της συμπεριφοράς πριν από την εκτέλεση.

Η **μη ντετερμινιστική (non-deterministic)** αυτονομία αφορά τον βαθμό στον οποίο η συμπεριφορά του ρομπότ δεν καθορίζεται πλήρως πριν από τον χρόνο λειτουργίας του. Χαμηλή μη ντετερμινιστική αυτονομία παρατηρείται σε συστήματα των οποίων οι ενέργειες είναι αυστηρά προγραμματισμένες ή προκαθορισμένες εκ των προτέρων, χωρίς δυνατότητα ουσιαστικής απόκλισης ή βελτιστοποίησης κατά τη λειτουργία. Αντίθετα, υψηλή μη ντετερμινιστική αυτονομία χαρακτηρίζει ρομπότ που δεν λαμβάνουν πλήρη περιγραφή της ακολουθίας ενεργειών τους πριν από τη λειτουργία, αλλά επιλέγουν και προσαρμόζουν τη συμπεριφορά τους δυναμικά σε πραγματικό χρόνο *κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης (runtime)*, ανταποκρινόμενα σε νέες καταστάσεις ή ερεθίσματα από το περιβάλλον ή τους ανθρώπους. Παρότι στην πράξη η μη ντετερμινιστική αυτονομία συχνά συσχετίζεται με την προθεσιακή αυτονομία, οι δύο έννοιες παραμένουν διακριτές, καθώς ένα ρομπότ μπορεί να επιδεικνύει στοχοκατευθυνόμενη συμπεριφορά κατά τη λειτουργία του, ενώ η συμπεριφορά αυτή έχει πλήρως καθοριστεί εκ των προτέρων. Η μη ντετερμινιστική αυτονομία αποτυπώνει έτσι μια ξεχωριστή διάσταση της αυτονομίας, η οποία διαφοροποιείται ακόμη και σε συστήματα με υψηλή λειτουργική ή προθεσιακή αυτονομία.

Η διάκριση μεταξύ χαμηλής και υψηλής μη ντετερμινιστικής αυτονομίας απεικονίζεται σχηματικά στο

Σχήμα 2.9, μέσω του παραδείγματος ενός ρομπότ πλοήγησης όπου μεταβάλλεται ο βαθμός προκαθορισμού της συμπεριφοράς πριν και κατά τον χρόνο εκτέλεσης.



Εικόνα 2.9: Βαθμός μη ντετερμινιστικής αυτονομίας σε ρομπότ πλοήγησης [45].

Η ανάλυση των μορφών αυτονομίας αναδεικνύει τις πολλαπλές διαστάσεις της ανεξαρτησίας ενός ρομποτικού συστήματος, ωστόσο η πρακτική υλοποίησή τους περιορίζεται από θεμελιώδεις τεχνολογικούς και φυσικούς παράγοντες.

Παρά την πρόοδο της τεχνητής νοημοσύνης και της ρομποτικής, η επίτευξη υψηλών επιπέδων αυτονομίας προσκρούει σε θεμελιώδεις τεχνολογικούς περιορισμούς. Το κόστος και η απόδοση των ενεργοποιητών, η περιορισμένη ενεργειακή πυκνότητα των φορητών πηγών ενέργειας, οι αυστηρές απαιτήσεις πραγματικού χρόνου και η απουσία κοινής λογικής και αιτιακής κατανόησης περιορίζουν την αξιόπιστη αυτόνομη λειτουργία σε μη δομημένα περιβάλλοντα [46]. Οι περιορισμοί αυτοί επιβεβαιώνονται από μελέτες εφαρμοσμένης αυτονομίας, ιδίως στον τομέα των αυτόνομων οχημάτων, όπου ακόμη και ώριμα συστήματα παραμένουν εξαρτημένα από περιορισμένα λειτουργικά περιβάλλοντα, ανθρώπινη παρέμβαση και αυστηρούς κανονισμούς ασφαλείας [47].

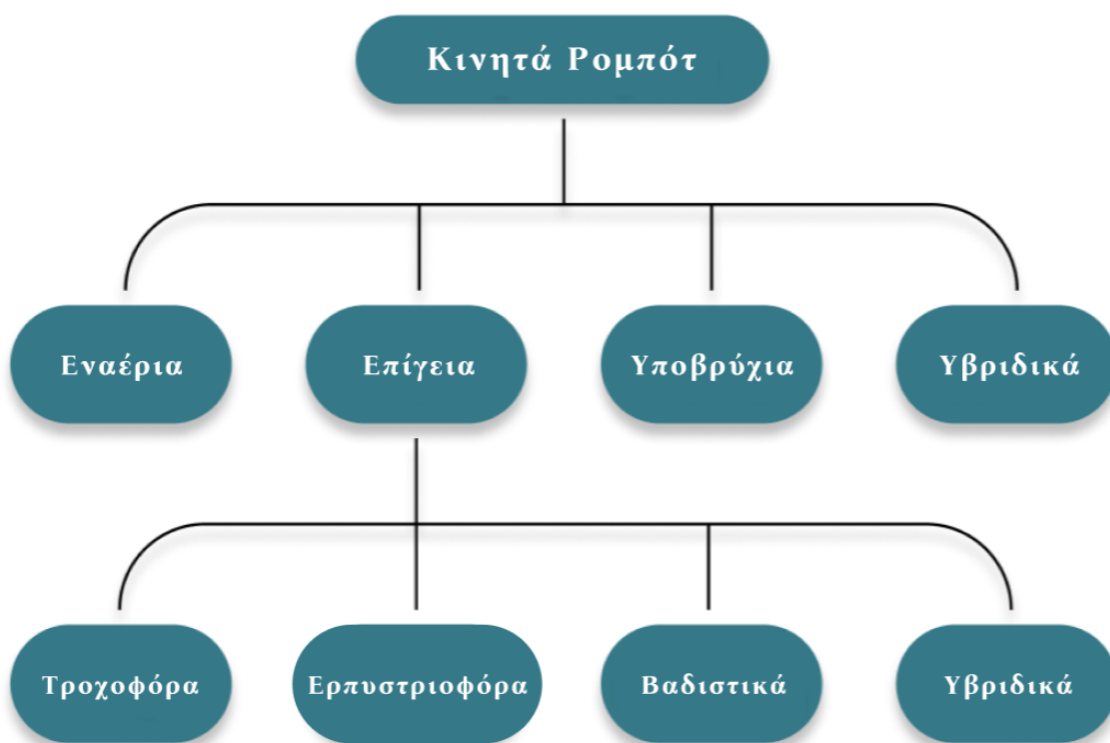
Επιπρόσθετα, η τεχνική διάσταση της αυτονομίας συνδέεται άμεσα με ζητήματα ασφάλειας, πιστοποίησης και νομικής ευθύνης. Η μετατόπιση της λήψης αποφάσεων από τον άνθρωπο στη μηχανή δημιουργεί κενά απόδοσης ευθύνης και νέες προκλήσεις για το ισχύον κανονιστικό πλαίσιο [48]. Για τον λόγο αυτό, διεθνή πρότυπα και κανονισμοί περιορίζουν ρητά τις επιτρεπτές μορφές αυτόνομης συμπεριφοράς, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα άμεσης ανθρώπινης συνύπαρξης. Η αυτονομία, συνεπώς, πρέπει να αντιμετωπίζεται ως συστημική ιδιότητα που διαμορφώνεται από την τεχνολογία, τον άνθρωπο και το θεσμικό πλαίσιο, και όχι ως απομονωμένο χαρακτηριστικό λογισμικού ή αλγορίθμου.

Μεταβατικά, η έννοια των επιπέδων αυτονομίας αποκτά ιδιαίτερη σημασία στην περίπτωση των κινητών ρομπότ, όπου η λειτουργία σε άγνωστα και δυναμικά περιβάλλοντα απαιτεί αυξημένη αντίληψη του χώρου, αξιόπιστη πλοήγηση και λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο. Για τον λόγο αυτό, στα επόμενα υποκεφάλαια εξετάζονται τα κινητά ρομπότ και οι βασικές τεχνολογίες που επιτρέπουν την επίτευξη αυξημένων επιπέδων αυτονομίας, όπως η χαρτογράφηση, ο εντοπισμός θέσης και η αυτόνομη πλοήγηση.

2.2 Κινητά Ρομπότ

Η έννοια της αυτονομίας αποκτά ιδιαίτερη βαρύτητα στα κινητά ρομποτικά συστήματα, καθώς η μετακίνηση σε μη δομημένα ή δυναμικά περιβάλλοντα απαιτεί συνδυασμό αντίληψης, εκτίμησης κατάστασης και ελέγχου. Σε αντίθεση με τα σταθερά ρομποτικά συστήματα, στα κινητά ρομπότ η θέση και ο προσανατολισμός μεταβάλλονται συνεχώς στον χρόνο. Η κατάσταση του συστήματος εξελίσσεται δυναμικά, ενώ κάθε μετατόπιση εκτιμάται σχετικώς και επηρεάζεται από σωρευτικά σφάλματα, καθιστώντας την κίνηση εγγενή πηγή αβεβαιότητας [49].

Τα κινητά ρομπότ ταξινομούνται πρωτίστως με βάση το περιβάλλον λειτουργίας τους σε εναέρια, επίγεια, υποβρύχια και υβριδικά συστήματα. Στο Σχήμα 2.10 παρουσιάζεται μία ενδεικτική ιεραρχική ταξινόμηση, η οποία αναδεικνύει τη διαφοροποίηση τόσο ως προς το περιβάλλον όσο και, στην περίπτωση των επίγειων συστημάτων, ως προς τον μηχανισμό κίνησης [50, 51].



Εικόνα 2.10: Ιεραρχική ταξινόμηση κινητών ρομπότ κατά περιβάλλον λειτουργίας και, στην περίπτωση των επίγειων συστημάτων, κατά μηχανισμό κίνησης [51].

Οι επιμέρους κατηγορίες διαφέρουν ουσιαδώς ως προς τη δυναμική τους συμπεριφορά και τις απαιτήσεις ελέγχου. Τα εναέρια συστήματα χαρακτηρίζονται από έντονη δυναμική σύζευξη και αυξημένες ανάγκες σταθεροποίησης, ενώ τα υποβρύχια λειτουργούν σε περιβάλλοντα υψηλής αντίστασης και περιορισμένης αισθητηριακής πληροφόρησης. Τα υβριδικά επιχειρούν να συνδυάσουν χαρακτηριστικά διαφορετικών κατηγοριών, αυξάνοντας αναλόγως την πολυπλοκότητα σχεδιασμού και ελέγχου [50].

Στην κατηγορία των επίγειων συστημάτων, η περαιτέρω διάκριση βασίζεται στον μηχανισμό κίνησης, οδηγώντας σε τροχοφόρες, ερπυστριοφόρες, ποδοκίνητες και υβριδικές διατάξεις [52]. Κάθε επιλογή συνεπάγεται διαφορετική σχέση μεταξύ ενεργειακής απόδοσης, ικανότητας προσαρμογής στο έδαφος και πολυπλοκότητας υλοποίησης.

Οι βασικές κατηγορίες επίγειων κινητών ρομπότ συνοψίζονται ως εξής:

- **Τροχοφόρα (Wheeled):**

- Υψηλή ενεργειακή απόδοση και απλή μηχανική κατασκευή.
- Περιορισμένη ικανότητα υπέρβασης εμποδίων και ευαισθησία σε ολίσθηση.

- **Ερπυστριοφόρα (Tracked):**

- Αυξημένη πρόσφυση και σταθερότητα σε ανώμαλα εδάφη.
- Μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας και μηχανική πολυπλοκότητα.

- **Ρομπότ με πόδια (Legged):**

- Υψηλή προσαρμοστικότητα σε αδόμητα περιβάλλοντα.
- Αυξημένες απαιτήσεις ελέγχου και υπολογιστικών πόρων.

- **Υβριδικά (Hybrid):**

- Συνδυασμός στοιχείων ταχύτητας και ευελιξίας.
- Αυξημένη μηχανική και ελεγκτική πολυπλοκότητα.

Η πραγματική συμπεριφορά κάθε διάταξης εξαρτάται άμεσα από τις ιδιότητες της επιφάνειας κύλισης και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Φαινόμενα όπως η μεταβολή της τριβής, η ολίσθηση και οι ανωμαλίες του εδάφους οδηγούν σε αποκλίσεις από το ιδανικό κινηματικό μοντέλο [52]. Συνεπώς, η επιλογή μηχανισμού κίνησης δεν συνιστά ζήτημα απόλυτης υπεροχής, αλλά σχεδιαστικό συμβιβασμό σε συνάρτηση με τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

Στο παρόν έργο, το ενδιαφέρον εστιάζεται στα επίγεια τροχοφόρα ρομπότ, καθώς αποτελούν την πλέον διαδεδομένη επιλογή σε εφαρμογές εσωτερικών χώρων και προσφέρουν ισορροπία μεταξύ απλότητας, ενεργειακής αποδοτικότητας και ελεγχόμενης πολυπλοκότητας [49, 50].

2.2.1 Μη Επανδρωμένα Οχήματα Εδάφους (UGV)

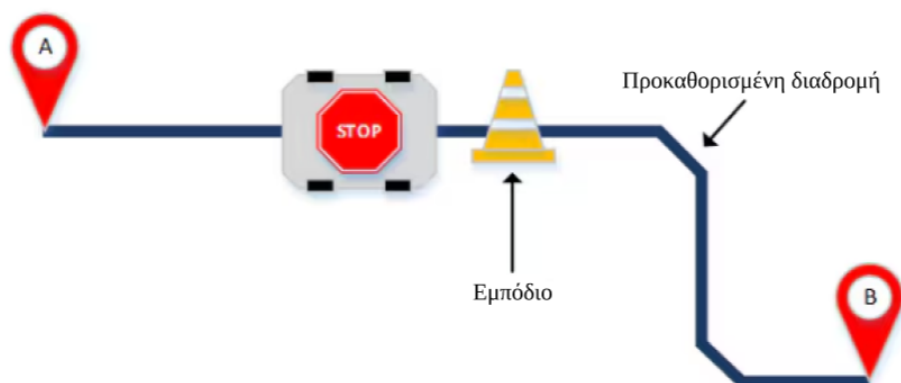
Στο πλαίσιο των επίγειων τροχοφόρων κινητών ρομπότ, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα συστήματα που λειτουργούν χωρίς ανθρώπινο χειριστή επί του οχήματος και είναι ικανά να εκτελούν αποστολές μετακίνησης ή μεταφοράς σε πραγματικά περιβάλλοντα. Τα συστήματα αυτά αναφέρονται συλλογικά ως Μη Επανδρωμένα Οχήματα Εδάφους (Unmanned Ground Vehicles – UGV) και αποτελούν ευρύτερη κατηγορία που περιλαμβάνει πλατφόρμες με διαφορετικά επίπεδα αυτονομίας και αρχιτεκτονικές πλοήγησης.

Η αυτονομία στα UGV δεν αποτελεί δυαδική ιδιότητα, αλλά εκφράζεται ως συνεχές φάσμα δυνατοτήτων, το οποίο εξαρτάται από την ικανότητα του συστήματος σε επίπεδο αντίληψης (perception), εκτίμησης κατάστασης (state estimation) και ελέγχου (control). Στο φάσμα αυτό εντάσσονται τόσο πλατφόρμες που ακολουθούν προκαθορισμένες διαδρομές, όσο και συστήματα ικανά να αντιλαμβάνονται το περιβάλλον και να λαμβάνουν αποφάσεις πλοήγησης σε δυναμικές συνθήκες [53].

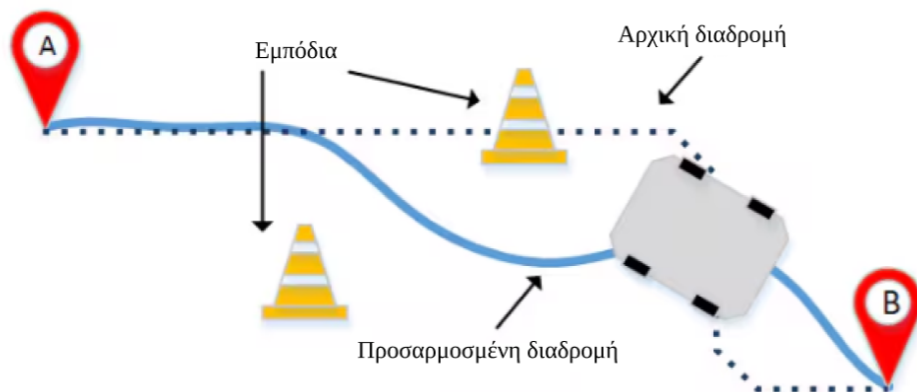
Η διαφοροποίηση αυτή οδήγησε στην καθιέρωση των όρων Αυτοματοποιημένα Οχήματα Καθοδήγησης (Automated Guided Vehicles – AGV) και Αυτόνομα Κινητά Ρομπότ (Autonomous Mobile Robots – AMR), οι οποίοι περιγράφουν διακριτές προσεγγίσεις εντός της κατηγορίας των UGV. Τα AGV βασίζονται σε εξωτερικές υποδομές καθοδήγησης και προκαθορισμένες διαδρομές, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα αξιόπιστα σε σταθερά και δομημένα περιβάλλοντα. Αντίθετα, τα AMR ενσωματώνουν αισθητήρες και αλγορίθμους που επιτρέπουν εκτίμηση θέσης και δυναμική αναπροσαρμογή τροχιάς, προσφέροντας αυξημένη ευελιξία σε μεταβαλλόμενες συνθήκες [54].

Η διαφορά αυτή αποτυπώνεται και στη λειτουργική τους συμπεριφορά κατά την παρουσία εμποδίων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.11.

AGV - Προκαθορισμένη διαδρομή και διακοπή κίνησης



AMR - Δυναμική προσαρμογή διαδρομής



Εικόνα 2.11: Σύγκριση της λειτουργικής συμπεριφοράς AGV και AMR κατά την παρουσία εμποδίων [55].

Η διάκριση μεταξύ AGV και AMR δεν συνιστά απόλυτο διαχωρισμό, αλλά αποτυπώνει διαφορετικά επίπεδα λειτουργικής αυτονομίας που επιλέγονται ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Στον χώρο της ενδοεφοδιαστικής και των εφαρμογών εσωτερικών χώρων, τα AMR έχουν αποκτήσει αυξανόμενο ενδιαφέρον λόγω της δυνατότητάς τους να λειτουργούν χωρίς εκτεταμένες υποδομές και να προσαρμόζονται σε δυναμικά περιβάλλοντα [54].

Η μετάβαση από συστήματα καθοδηγούμενα από εξωτερικές υποδομές σε συστήματα αυξημένης αυτονομίας συνεπάγεται μετατόπιση της έμφασης από την απλή εκτέλεση διαδρομής στην ολοκληρωμένη

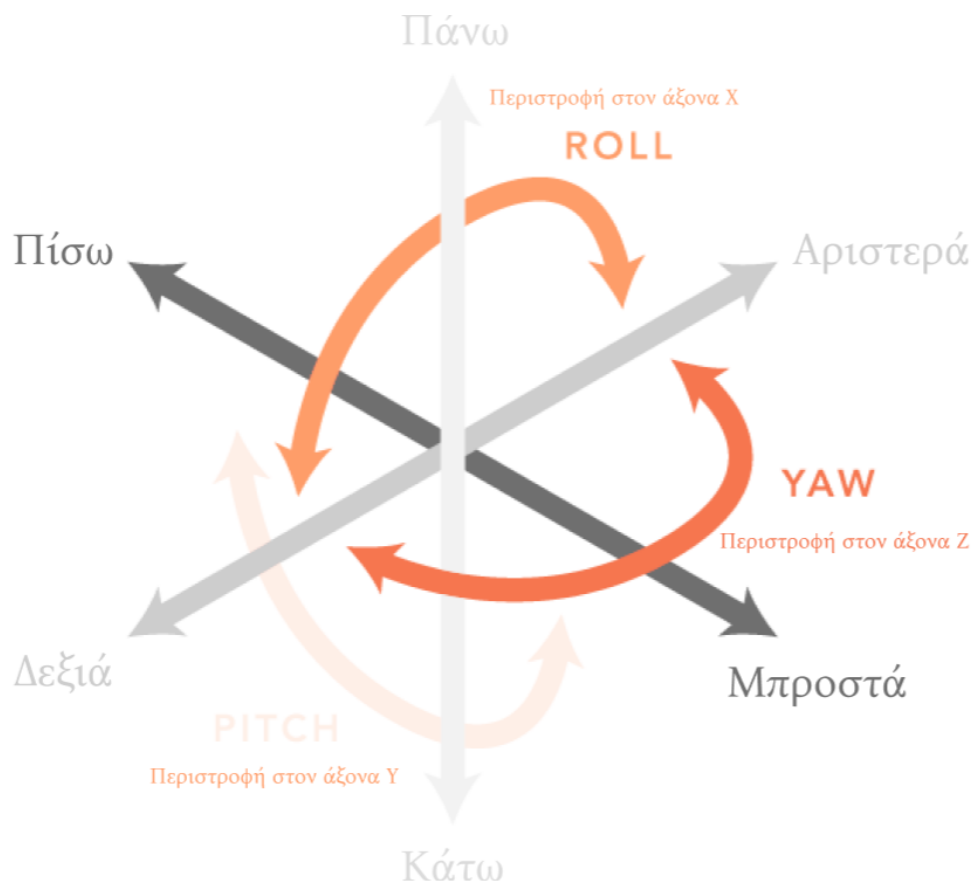
αντίληψη και λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο. Υπό συνθήκες αβεβαιότητας, η πλοήγηση εξαρτάται πλέον από την αλληλεπίδραση μεταξύ αντίληψης, εκτίμησης κατάστασης και ελέγχου, γεγονός που καθορίζει τη σχεδίαση των ανώτερων επιπέδων πλοήγησης [49].

2.2.2 Βαθμοί ελευθερίας και κινηματικοί περιορισμοί

Η μηχανική δομή και ο μηχανισμός κίνησης ενός UGV καθορίζουν άμεσα τις κινηματικές του δυνατότητες. Η γεωμετρία επαφής τροχού-εδάφους και η διάταξη των ενεργοποιητών επιβάλλουν περιορισμούς, οι οποίοι επηρεάζουν όχι μόνο την ευκινησία του συστήματος αλλά και το σύνολο των εφικτών κινήσεων που μπορεί να εκτελέσει.

Η κινηματική ανάλυση παρέχει το θεωρητικό πλαίσιο που συνδέει τις ταχύτητες των ενεργοποιητών με τη στιγμιαία μεταβολή της θέσης και του προσανατολισμού του ρομπότ. Σε αντίθεση με τη δυναμική, η οποία εξετάζει δυνάμεις και ροπές, η κινηματική περιορίζεται στη γεωμετρική περιγραφή της κίνησης, ανεξάρτητα από τα αίτια που την προκαλούν.

Ένα άκαμπτο σώμα στον τρισδιάστατο χώρο διαθέτει έξι βαθμούς ελευθερίας: τρεις μεταφορικούς κατά τους άξονες x , y , z και τρεις περιστροφικούς, οι οποίοι αντιστοιχούν στις γωνίες roll, pitch και yaw [49].



Εικόνα 2.12: Βαθμοί ελευθερίας ενός άκαμπτου σώματος στον τρισδιάστατο χώρο.

Στα επίπεδα κινητά ρομπότ, η επαφή με το έδαφος περιορίζει ουσιαστικά την κίνηση στο επίπεδο. Η μετατόπιση κατά τον άξονα z , καθώς και οι περιστροφές roll και pitch, καταστέλλονται, με αποτέλεσμα το σύστημα να περιγράφεται επαρκώς από τρεις βαθμούς ελευθερίας στο επίπεδο: δύο μεταφορικούς και έναν περιστροφικό (yaw) [50].

Η γενικευμένη συντεταγμένη (pose) ενός επίγειου κινητού ρομπότ γράφεται ως:

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

όπου x και y περιγράφουν τη θέση στο επίπεδο και θ τον προσανατολισμό ως προς αδρανειακό σύστημα αναφοράς.

Η ύπαρξη τριών βαθμών ελευθερίας στο επίπεδο δεν συνεπάγεται ότι το ρομπότ μπορεί να κινηθεί στιγμιαία προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Οι γεωμετρικοί περιορισμοί της επαφής τροχού-εδάφους καθορίζουν ποιες στιγμιαίες ταχύτητες είναι εφικτές.

Οι περιορισμοί αυτοί εκφράζονται γενικά ως:

$$A(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} = 0 \quad (2)$$

όπου $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta}]^T$ είναι το διάνυσμα στιγμιαίων ταχυτήτων και $A(\mathbf{q})$ πίνακας που περιγράφει τους κινηματικούς περιορισμούς του συστήματος [56].

Στις περισσότερες τροχοφόρες διατάξεις, οι περιορισμοί αυτοί είναι μη ολοκληρώσιμοι (non-integrable), δηλαδή δεν μπορούν να μετασχηματιστούν σε αλγεβρικούς περιορισμούς αποκλειστικά ως προς τις συντεταγμένες θέσης. Το χαρακτηριστικό αυτό οδηγεί στον ορισμό των μη ολονομικών (non-holonomic) συστημάτων. Στα συστήματα αυτά, η διάσταση του εφικτού χώρου στιγμιαίων ταχυτήτων είναι μικρότερη από τη διάσταση του χώρου διαμόρφωσης (configuration space).

Η διάκριση αυτή είναι ουσιώδης. Ο χώρος διαμόρφωσης περιγράφει όλες τις δυνατές θέσεις και προσανατολισμούς του σώματος, ενώ ο χώρος ταχυτήτων τις στιγμιαία επιτρεπτές κατευθύνσεις κίνησης. Ένα σύστημα μπορεί να διαθέτει τρισδιάστατο χώρο διαμόρφωσης, αλλά μόνο διδιάστατο εφικτό χώρο ταχυτήτων.

Με βάση τη σχέση μεταξύ βαθμών ελευθερίας και ανεξάρτητων συνιστωσών ταχύτητας, τα κινητά ρομπότ διακρίνονται σε ολονομικά (holonomic) και μη ολονομικά (non-holonomic) [57]. Στα ολονομικά συστήματα, ο αριθμός των ανεξάρτητων στιγμιαίων ταχυτήτων ισούται με τους βαθμούς ελευθερίας στο επίπεδο, ενώ στα μη ολονομικά οι περιορισμοί μειώνουν τον αριθμό αυτό.

Κατά συνέπεια, ορισμένες κινήσεις δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν άμεσα, αλλά απαιτούν σύνθεση μεταφορικών και περιστροφικών κινήσεων. Το χαρακτηριστικό αυτό δεν αποτελεί εγγενές μειονέκτημα: επηρεάζει όμως τον σχεδιασμό ελέγχου και τη μορφή της κίνησης που μπορεί να επιτευχθεί.

Η κατανόηση των βαθμών ελευθερίας και των κινηματικών περιορισμών αποτελεί θεμελιώδη προϋπόθεση για την ανάλυση των επιμέρους κινηματικών διατάξεων, οι οποίες επιβάλλουν διαφορετικούς εφικτούς χώρους ταχυτήτων και εξετάζονται στη συνέχεια.

2.2.3 Κινηματικές αρχιτεκτονικές

Παρότι οι βαθμοί ελευθερίας ενός επίγειου ρομπότ καθορίζονται από τη διάστασή του στον χώρο, η πραγματική κινηματική του συμπεριφορά εξαρτάται από την αρχιτεκτονική της διάταξης των τροχών και τον τρόπο μετάδοσης της κίνησης. Η γεωμετρική τοποθέτηση των τροχών, ο τύπος επαφής με το έδαφος και η ύπαρξη ή μη μηχανισμού διεύθυνσης επιβάλλουν συγκεκριμένους κινηματικούς περιορισμούς, οι οποίοι καθορίζουν τον αριθμό των ανεξάρτητων στιγμιαίων ταχυτήτων και επηρεάζουν άμεσα τη μορφή των εφικτών τροχιών [56].

Οι κινηματικές αρχιτεκτονικές διαφοροποιούνται ως προς:

- τη δυνατότητα πλευρικής μετατόπισης,
- τη δυνατότητα περιστροφής επί τόπου,
- το επιτρεπτό εύρος καμπυλότητας τροχιάς,
- την ευαισθησία σε ολίσθηση και ανωμαλίες εδάφους,
- την πολυπλοκότητα ελέγχου και μηχανικής υλοποίησης.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται οι βασικότερες κινηματικές διατάξεις επίγειων τροχοφόρων ρομπότ, ξεκινώντας από τις απλούστερες μη ολονομικές μορφές και καταλήγοντας στις ολονομικές ομνικατευθυντικές διατάξεις.

Διαφορική Οδήγηση (Differential Drive)

Η διαφορική οδήγηση αποτελεί μία από τις πλέον διαδεδομένες κινηματικές διατάξεις επίγειων κινητών ρομπότ. Η βασική γεωμετρία της περιλαμβάνει δύο ανεξάρτητους κινητήριους τροχούς τοποθετημένους στον ίδιο άξονα, ενώ η ευστάθεια επιτυγχάνεται μέσω παθητικού τροχού τύπου *caster*, ο οποίος προσανατολίζεται ελεύθερα χωρίς να επιβάλλει πρόσθετους κινηματικούς περιορισμούς [58].

Κινηματικά, η διάταξη είναι ισοδύναμη με το μοντέλο *unicycle* για χαμηλές ταχύτητες [49]. Η γενικευμένη συντεταγμένη του συστήματος παραμένει $\mathbf{q} = [x \ y \ \theta]^T$, όπως ορίστηκε προηγουμένως.

Έστω r η ακτίνα των τροχών και L η μεταξύ τους απόσταση. Αν ω_L και ω_R είναι οι γωνιακές ταχύτητες των τροχών, οι γραμμικές τους ταχύτητες δίνονται από:

$$v_L = r\omega_L, \quad v_R = r\omega_R \quad (3)$$

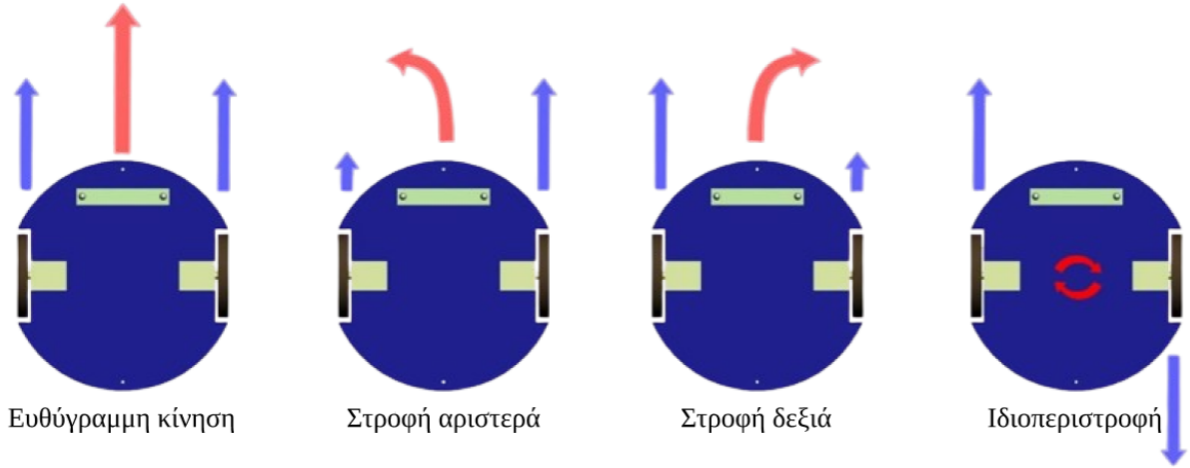
Η γραμμική ταχύτητα του σώματος και η γωνιακή ταχύτητα περί τον κατακόρυφο άξονα προκύπτουν ως:

$$v = \frac{v_R + v_L}{2}, \quad \omega = \frac{v_R - v_L}{L} \quad (4)$$

Η κινηματική περιγραφή στο αδρανειακό σύστημα αναφοράς γράφεται:

$$\dot{x} = v \cos \theta, \quad \dot{y} = v \sin \theta, \quad \dot{\theta} = \omega \quad (5)$$

που αντιστοιχεί στο κλασικό μοντέλο unicycle.



Εικόνα 2.13: Χαρακτηριστικές μορφές κίνησης διαφορικής οδήγησης ως συνάρτηση των γωνιακών ταχυτήτων των κινητήριων τροχών [58].

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13, προκύπτουν οι ακόλουθες περιπτώσεις:

- $\omega_L = \omega_R$: ευθύγραμμη κίνηση,
- $\omega_L \neq \omega_R$: κίνηση σε κυκλικό τόξο,
- $\omega_L = -\omega_R$: περιστροφή επί τόπου ($v = 0, \omega \neq 0$).

Παρά τη δυνατότητα περιστροφής επί τόπου, η διάταξη παραμένει μη ολονομική. Η συνθήκη μη πλευρικής ολίσθησης επιβάλλει περιορισμό της μορφής:

$$\dot{x} \sin \theta - \dot{y} \cos \theta = 0 \quad (6)$$

ο οποίος δρα σε επίπεδο ταχυτήτων και μειώνει τη διάσταση του εφικτού χώρου στιγμιαίων ταχυτήτων [49]. Έτσι, παρότι ο χώρος διαμόρφωσης είναι τρισδιάστατος, ο αριθμός ανεξάρτητων στιγμιαίων ταχυτήτων είναι δύο.

Η ακτίνα καμπυλότητας της τροχιάς δίνεται από:

$$R = \frac{L}{2} \frac{v_R + v_L}{v_R - v_L} \quad (7)$$

ενώ η συνολική μεταβολή προσανατολισμού γράφεται:

$$\Delta\theta = \frac{\Delta s_R - \Delta s_L}{L} \quad (8)$$

όπου Δs_R και Δs_L είναι οι διανυθείσες αποστάσεις του δεξιού και του αριστερού τροχού αντίστοιχα.

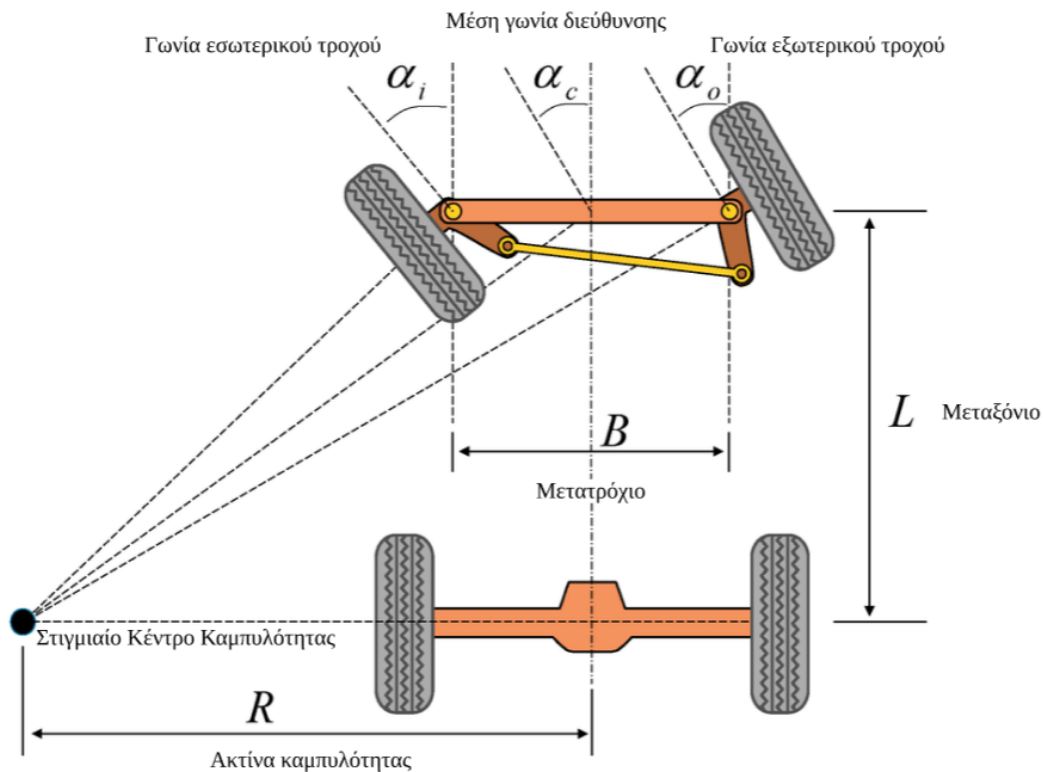
Η διαφορική οδήγηση χαρακτηρίζεται από απλή μηχανική υλοποίηση και υψηλή ενεργειακή απόδοση. Σε τετρατροχικές διατάξεις τύπου skid-steering, ωστόσο, οι τροχοί δεν εφάπτονται ιδανικά στις κυκλικές τροχιές κατά τη στροφή, γεγονός που οδηγεί σε πλευρική ολίσθηση και απόκλιση από το ιδανικό κινηματικό μοντέλο [49].

Κινηματική Διάταξη Τύπου Αυτοκινήτου (Γεωμετρία Ackermann)

Σε αντίθεση με τη διαφορική οδήγηση, όπου η καμπυλότητα της τροχιάς προκύπτει από τη διαφορά ταχυτήτων των κινητήριων τροχών, στη διάταξη τύπου αυτοκινήτου η μεταβολή κατεύθυνσης επιτυγχάνεται μέσω μηχανισμού διεύθυνσης, ο οποίος επιβάλλει γεωμετρικές σχέσεις μεταξύ των γωνιών των εμπρόσθιων τροχών.

Στην απλούστερη μορφή τους, οι διατάξεις αυτές εμφανίζονται ως τρίκυκλες (tricycle drive), όπου ένας εμπρόσθιος τροχός είναι ταυτόχρονα κινητήριος και στρεφόμενος, ενώ οι υπόλοιποι λειτουργούν παθητικά. Η κινηματική τους περιγραφή είναι ισοδύναμη με το μονοτροχιακό (bicycle) μοντέλο [59].

Η αρχή Ackermann βασίζεται στην απαίτηση ώστε, κατά την κίνηση σε κυκλική τροχιά, οι προεκτάσεις των αξόνων των εμπρόσθιων τροχών να συγκλίνουν σε κοινό στιγμιαίο κέντρο καμπυλότητας (Instantaneous Center of Curvature – ICR), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.14.



Εικόνα 2.14: Γεωμετρική απεικόνιση της συνθήκης Ackermann και του στιγμιαίου κέντρου καμπυλότητας (ICR) [60].

Αν L είναι το μεταξόνιο και B το μετατρόχιο, οι γωνίες διεύθυνσης του εσωτερικού (α_i) και του εξωτερικού (α_o) τροχού ικανοποιούν:

$$\tan \alpha_i = \frac{L}{R - \frac{B}{2}}, \quad \tan \alpha_o = \frac{L}{R + \frac{B}{2}} \quad (9)$$

όπου R είναι η ακτίνα καμπυλότητας της τροχιάς.

Στην κινηματική ανάλυση χρησιμοποιείται το μονοτροχιακό (bicycle) μοντέλο, στο οποίο η γωνία διεύθυνσης συμβολίζεται ως α και ταυτίζεται με τη μέση γωνία διεύθυνσης α_c :

$$\alpha \equiv \alpha_c \quad (10)$$

Υπό τον ορισμό της γενικευμένης συντεταγμένης $\mathbf{q} = [x \ y \ \theta]^T$, και για γραμμική ταχύτητα v , οι κινηματικές εξισώσεις στο αδρανειακό σύστημα αναφοράς δίνονται από:

$$\dot{x} = v \cos \theta, \quad \dot{y} = v \sin \theta, \quad \dot{\theta} = \frac{v}{L} \tan \alpha \quad (11)$$

ενώ η ακτίνα καμπυλότητας συνδέεται με τη γωνία διεύθυνσης μέσω:

$$R = \frac{L}{\tan \alpha} \quad (12)$$

Όπως και η διαφορική διάταξη, η αρχιτεκτονική Ackermann είναι μη ολονομική, καθώς επιβάλλεται περιορισμός μη πλευρικής ολίσθησης στο επίπεδο ταχυτήτων. Η γεωμετρική ευθυγράμμιση των τροχών με το ICR περιορίζει την πλευρική ολίσθηση και εξασφαλίζει ομαλή κατανομή των ταχυτήτων κύλισης, οδηγώντας σε βελτιωμένη δυναμική συμπεριφορά σε υψηλότερες ταχύτητες και αυξημένη ενεργειακή αποδοτικότητα.

Ωστόσο, λόγω της εξάρτησης της καμπυλότητας από τη γωνία διεύθυνσης και της μη ολονομικής φύσης του συστήματος, η στιγμιαία ευκινησία σε στενούς χώρους παραμένει περιορισμένη σε σύγκριση με ολονομικές διατάξεις.

Ολονομικές Διατάξεις (Omnidirectional - Omni / Mecanum)

Η ανάλυση των διαφορικών και διατάξεων τύπου αυτοκινήτου ανέδειξε ότι, παρά τους τρεις βαθμούς ελευθερίας στο επίπεδο, η ύπαρξη μη ολοκληρώσιμων κινηματικών περιορισμών περιορίζει τον στιγμιαίο χώρο εφικτών ταχυτήτων. Στις διατάξεις αυτές, η συνθήκη μη πλευρικής ολίσθησης επιβάλλει περιορισμό σε επίπεδο ταχυτήτων, χαρακτηρίζοντάς τες ως μη ολονομικές.

Υπάρχουν, ωστόσο, κινηματικές αρχιτεκτονικές στις οποίες ο περιορισμός αυτός αίρεται μέσω κατάλληλης γεωμετρίας τροχού, επιτρέποντας την παραγωγή ανεξάρτητων στιγμιαίων ταχυτήτων κατά τις διευθύνσεις x και y του συστήματος σώματος. Οι διατάξεις αυτές αναφέρονται ως ολονομικές (holonomic)

και ανήκουν στην κατηγορία των ομνι-κατευθυντικών (omnidirectional) κινητών ρομπότ [57].

Στα ολonoμικά συστήματα, ο αριθμός των ανεξάρτητων στιγμιαίων ταχυτήτων ισούται με τους βαθμούς ελευθερίας στο επίπεδο:

$$\text{rank}(J) = 3, \quad (13)$$

όπου J ο κινηματικός πίνακας που συνδέει τις γωνιακές ταχύτητες των τροχών με το διάνυσμα ταχυτήτων του σώματος $\mathbf{v} = [v_x \ v_y \ \omega]^T$.

Η ολonoμικότητα δεν προκύπτει από απουσία τριβής, αλλά από γεωμετρική ανακατεύθυνση των αντιδράσεων επαφής μέσω ειδικής διάταξης τροχών, η οποία επιτρέπει ελεγχόμενη πλευρική κύλιση.

Οι συνηθέστερες υλοποιήσεις βασίζονται σε τροχούς με παθητικούς κυλίνδρους (rollers), όπως οι τροχοί τύπου omni (90°) και mecanum (45°), οι οποίοι εξετάζονται στη συνέχεια.

Τροχοί Τύπου Omni (90° Rollers)

Οι τροχοί τύπου omni φέρουν παθητικούς κυλίνδρους τοποθετημένους κάθετα (90°) ως προς τον κύριο άξονα κύλισης. Οι κύλινδροι αυτοί επιτρέπουν ελεύθερη εγκάρσια κύλιση, χωρίς ανάπτυξη σημαντικής πλευρικής δύναμης [59].

Στην omni διάταξη, η εγκάρσια συνιστώσα ταχύτητας δεν παράγεται άμεσα από την κινητήρια ροπή του τροχού, αλλά προκύπτει από την παθητική περιστροφή των rollers. Με τον τρόπο αυτό αίρεται ο πλευρικός περιορισμός, καθιστώντας δυνατή την ανεξάρτητη ρύθμιση των v_x , v_y και ω .

Σε τετρατροχική συμμετρική διάταξη, ο αριθμός ενεργοποιητών υπερβαίνει τη διάσταση του χώρου ταχυτήτων. Το σύστημα διαθέτει τέσσερις ενεργοποιητές για τρεις βαθμούς ελευθερίας, οδηγώντας σε πλεονασμό ενεργοποίησης (actuation redundancy).

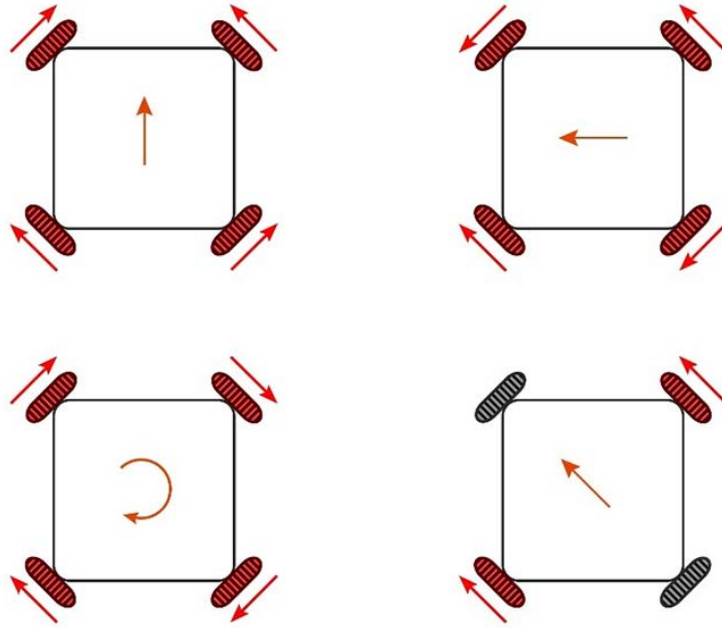
Ο κινηματικός πίνακας είναι μη τετραγωνικός ($J \in \mathbb{R}^{4 \times 3}$), γεγονός που απαιτεί χρήση ψευδοαντίστροφου για την επίλυση της άμεσης κινηματικής, ενώ παράλληλα παρέχει ευελιξία στην κατανομή ροπών μεταξύ των τροχών [61].

Για συμμετρική τετρατροχική διάταξη με αποστάσεις L_x και L_y από το κέντρο μάζας, η αντίστροφη κινηματική ως προς το διάνυσμα ταχυτήτων $\mathbf{v}$ λαμβάνει τη μορφή:

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -(L_x + L_y) \\ 1 & 1 & (L_x + L_y) \\ 1 & 1 & -(L_x + L_y) \\ 1 & -1 & (L_x + L_y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Ο πίνακας έχει βαθμίδα $\text{rank}(J) = 3$, εξασφαλίζοντας πλήρη ελεγχσιμότητα των τριών βαθμών ελευθερίας στο επίπεδο.

Η ολονομική φύση της διάταξης επιτρέπει ανεξάρτητη μεταφορική κίνηση κατά x και y , καθώς και περιστροφή επί τόπου, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.15.



Εικόνα 2.15: Χαρακτηριστικές μορφές κίνησης τετρατροχικής διάταξης με τροχούς τύπου omni [62].

Παρά την ιδανική κινηματική ανεξαρτησία, η επαφή των παθητικών κυλίνδρων με το έδαφος είναι διακριτή και όχι συνεχής. Η διαδοχική επαφή των rollers εισάγει ευαισθησία στις ιδιότητες της επιφάνειας κύλισης και μπορεί να οδηγήσει σε μικρής κλίμακας ολίσθηση ή δονήσεις, ιδίως σε ανώμαλα δάπεδα [57].

Συνεπώς, η θεωρητικά πλήρης ολονομική συμπεριφορά διαφοροποιείται από την πραγματική δυναμική απόδοση.

Διάταξη Mecanum (45° Rollers)

Σε αντίθεση με τους τροχούς τύπου omni, όπου η εγκάρσια συνιστώσα κίνησης προκύπτει παθητικά μέσω ελεύθερης περιστροφής των rollers, στη διάταξη mecanum η εγκάρσια κίνηση παράγεται ενεργά λόγω της κεκλιμένης γεωμετρίας των κυλίνδρων.

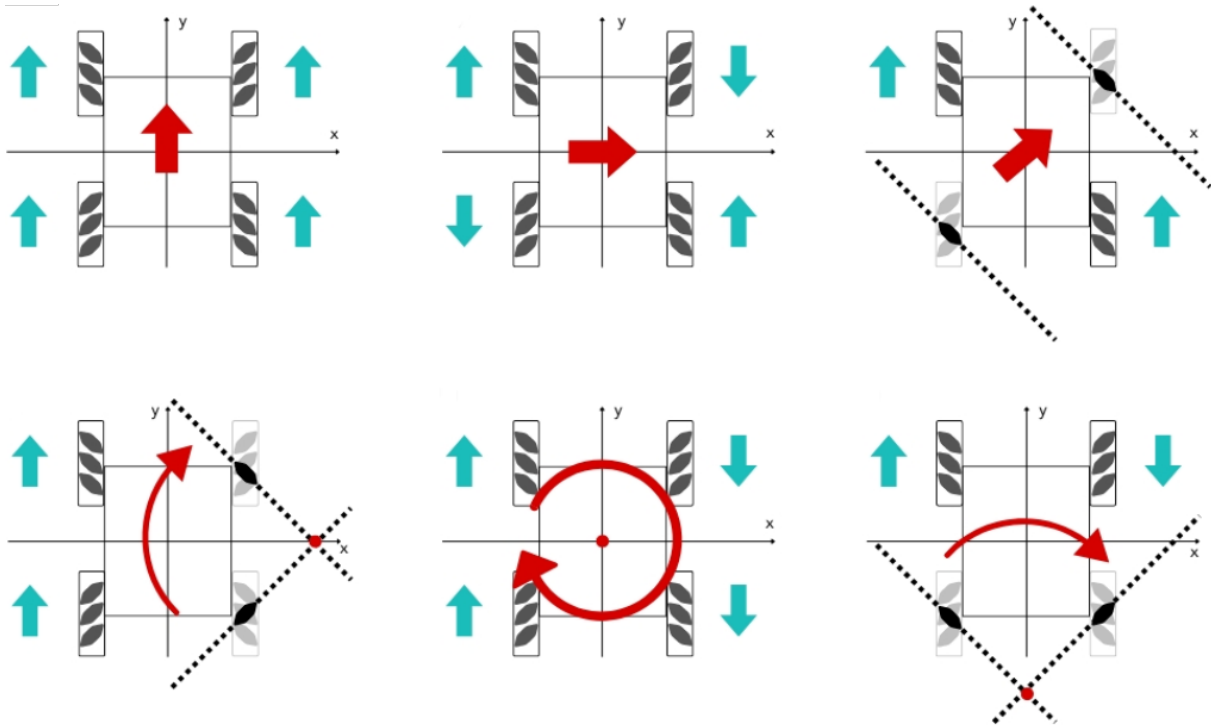
Οι rollers τοποθετούνται υπό γωνία $\delta = 45^\circ$ ως προς τον κύριο άξονα κύλισης, με αποτέλεσμα η κινητήρια δύναμη κάθε τροχού να αναλύεται σε δύο συνιστώσες:

$$F_x = F_T \cos \delta, \quad F_y = F_T \sin \delta, \quad (15)$$

οι οποίες για $\delta = 45^\circ$ είναι ίσες. Η διαγώνια σύνθεση των συνιστωσών από τους τέσσερις τροχούς επιτρέπει καθαρή μεταφορά κατά x ή y , καθαρή περιστροφή περί τον κατακόρυφο άξονα, καθώς και σύνθετη διαγώνια κίνηση.

Η ανάλυση των διανυσματικών συνιστωσών δείχνει ότι από τους θεωρητικά δυνατούς συνδυασμούς κατευθύνσεων των τεσσάρων τροχών, σημαντικός αριθμός οδηγεί σε καταστάσεις μηδενικής ή ανεπαρκούς συνισταμένης δύναμης, λόγω μερικής ή πλήρους ακύρωσης των επιμέρους συνιστωσών. Η παρατήρηση

αυτή υπογραμμίζει ότι η επιθυμητή κίνηση δεν προκύπτει από αυθαίρετους συνδυασμούς ταχυτήτων, αλλά από συγκεκριμένες σχέσεις μεταξύ των γωνιακών ταχυτήτων των τροχών, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.16.



Εικόνα 2.16: Συνδυασμοί γωνιακών ταχυτήτων σε τετρατροχική διάταξη mecatronum.

Η ιδανική κινηματική προσέγγιση της διάταξης mecatronum βασίζεται στην παραδοχή καθαρής κύλισης (pure rolling constraint), θεωρώντας σταθερό σημείο επαφής και γραμμική ανάλυση των δυνάμεων επαφής. Υπό αυτήν την υπόθεση, η σχέση μεταξύ γωνιακών ταχυτήτων και ταχύτητας πλατφόρμας μπορεί να περιγραφεί μέσω γραμμικού κινηματικού μοντέλου.

Στην πραγματικότητα, ωστόσο, η συνθήκη καθαρής κύλισης δεν ικανοποιείται αυστηρά. Αναλυτικά δυναμικά μοντέλα εισάγουν ρητούς όρους ολίσθησης (slip terms), δείχνοντας ότι η επαφή τροχού-εδάφους περιλαμβάνει μικρο-ολίσθηση ακόμη και σε ιδανικές συνθήκες [63].

Η απόκλιση αυτή συνδέεται άμεσα με τη γεωμετρία του τροχού. Στη διάταξη mecatronum, ο άξονας του roller σχηματίζει λοξή γωνία ως προς τον κύριο άξονα περιστροφής του τροχού, με αποτέλεσμα το σημείο επαφής να μετατοπίζεται κατά μήκος της επιφάνειας του roller κατά την κύλιση [64]. Επιπλέον, οι rollers έχουν πεπερασμένο μήκος και καμπυλότητα, ενώ η επαφή με το έδαφος μεταφέρεται διαδοχικά από roller σε roller. Η επαφή είναι επομένως διακριτή και όχι συνεχής, γεγονός που οδηγεί σε περιοδική μεταβολή της κανονικής δύναμης [57].

Η περιοδική αυτή μεταβολή επηρεάζει άμεσα την αναπτυσσόμενη εφαπτομενική δύναμη τριβής, εισάγοντας μικρο-ολίσθηση, ιδίως σε επιφάνειες χαμηλής πρόσφυσης. Δεδομένου ότι η εγκάρσια συνιστώσα δύναμης παράγεται ενεργά μέσω της γεωμετρίας των rollers, οι πλατφόρμες mecatronum εμφανίζουν αυξημένη ευαισθησία στον συντελεστή τριβής του δαπέδου, γεγονός που οδηγεί σε απόκλιση από το ιδανικό γραμμικό κινηματικό μοντέλο.

Η δυναμική συμπεριφορά επηρεάζεται επιπλέον από την κατανομή μάζας της πλατφόρμας. Όταν το

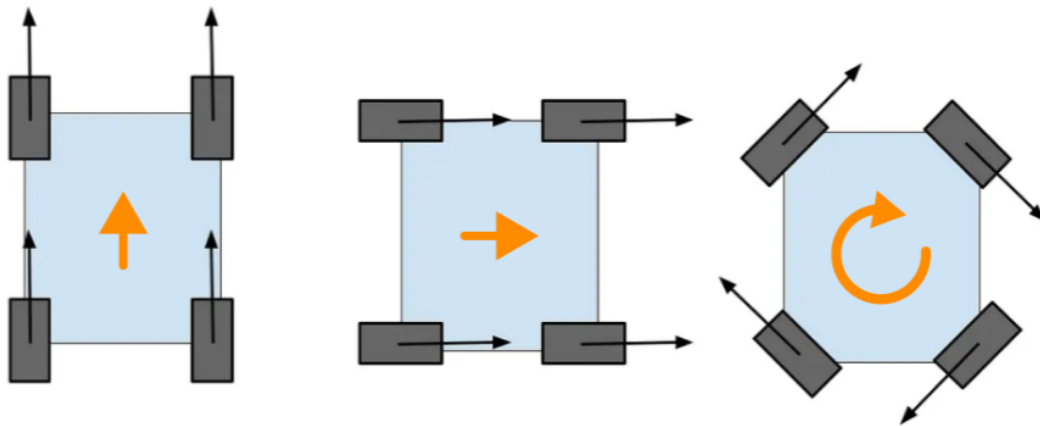
κέντρο μάζας δεν συμπίπτει με το γεωμετρικό κέντρο, οι δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται στους τροχούς δεν είναι συμμετρικές, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μη ισορροπημένης ροπής γύρω από τον κατακόρυφο άξονα. Η ροπή αυτή μπορεί να εκδηλωθεί ως ανεπιθύμητη περιστροφική εκτροπή (yaw drift), ακόμη και υπό συμμετρικές εντολές κίνησης [63].

Οι θεωρητικές αυτές προβλέψεις επιβεβαιώνονται και πειραματικά. Σε μετρήσεις mecanum συστημάτων έχουν καταγραφεί αποκλίσεις τροχιάς κατά καθαρή εγκάρσια κίνηση, ανεπιθύμητη περιστροφική εκτροπή (yaw drift), αυξημένοι κραδασμοί λόγω της διακριτής επαφής των rollers και μεταβολή της ακρίβειας σε συνάρτηση με την κατανομή μάζας [65].

Διατάξεις Ανεξάρτητης Διεύθυνσης (Swerve Drive)

Τα φαινόμενα ολίσθησης και η διακριτή επαφή με το έδαφος που παρατηρούνται στις roller-based διατάξεις, και ιδίως στη mecanum, οδήγησαν στη διερεύνηση εναλλακτικών λύσεων για την επίτευξη ανεξάρτητου ελέγχου των $\dot{x}$, $\dot{y}$ και $\dot{\theta}$ στο επίπεδο, χωρίς χρήση παθητικών rollers και χωρίς εισαγωγή ελεγχόμενης εγκάρσιας ολίσθησης. Μία τέτοια προσέγγιση αποτελεί η διάταξη ανεξάρτητης διεύθυνσης τροχών (swerve drive).

Στη διάταξη αυτή, κάθε τροχός διαθέτει ανεξάρτητο μηχανισμό προσανατολισμού (steering) και ανεξάρτητο έλεγχο γραμμικής ταχύτητας (drive), επιτρέποντας την παραγωγή του επιθυμητού διάνυσματος ταχύτητας μέσω ενεργού προσανατολισμού και όχι μέσω γεωμετρικής αποσύνθεσης δυνάμεων. Η επαφή ελαστικού-εδάφους παραμένει συνεχής, γεγονός που συνδέεται με αυξημένη πρόσφυση και μειωμένη ολίσθηση σε σύγκριση με τις roller-based διατάξεις [66]. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.17, οι τροχοί ευθυγραμμίζονται με το στιγμιαίο διάνυσμα ταχύτητας που αντιστοιχεί στην επιθυμητή μεταφορική ή περιστροφική κίνηση.



Εικόνα 2.17: Χαρακτηριστικές διαμορφώσεις κίνησης διάταξης swerve [67].

Η μηχανική υλοποίηση περιλαμβάνει δύο κινητήρες ανά τροχό (drive και steering), μειωτήρες μετάδοσης, μηχανισμό περιστροφής (swivel bearing) και σύστημα μετάδοσης κίνησης. Η αρχιτεκτονική αυτή συνεπάγεται αυξημένο βάρος και πολυπλοκότητα, αποτελώντας συνειδητό σχεδιαστικό συμβιβασμό με στόχο τη βελτίωση της ακρίβειας κίνησης και της πρόσφυσης [68].

Η κινηματική περιγραφή βασίζεται στη γενική εξίσωση κίνησης άκαμπτου σώματος στο επίπεδο. Έστω ότι το κέντρο της πλατφόρμας διαθέτει γραμμική ταχύτητα $\mathbf{v}_c = [v_x \ v_y]^T$ και γωνιακή ταχύτητα ω .

Η στιγμιαία ταχύτητα του i -οστού τροχού, ο οποίος βρίσκεται στη θέση $\mathbf{r}_i = [r_{ix} \ r_{iy}]^T$ ως προς το κέντρο μάζας, δίνεται από:

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{v}_c + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_i \quad (16)$$

όπου $\boldsymbol{\omega} = [0 \ 0 \ \omega]^T$. Το μέτρο και η γωνία διεύθυνσης του τροχού προκύπτουν ως:

$$v_i = \|\mathbf{v}_i\|, \quad \phi_i = \text{atan2}(v_{iy}, v_{ix}) \quad (17)$$

Με τον τρόπο αυτό, το διάνυσμα ελέγχου (v_x, v_y, ω) μετασχηματίζεται σε σύνολο εντολών (v_i, ϕ_i) για κάθε τροχό. Ο αντίστοιχος κινηματικός πίνακας έχει βαθμίδα $\text{rank}(J) = 3$, εξασφαλίζοντας πλήρη κινηματική ελεγχσιμότητα στο επίπεδο [49].

Παρά την πλήρη βαθμίδα του κινηματικού μοντέλου, η μεταβολή κατεύθυνσης δεν είναι στιγμιαία, καθώς απαιτείται χρόνος για τον αναπροσανατολισμό των τροχών. Για τον λόγο αυτό, η διάταξη χαρακτηρίζεται ως *pseudo-omnidirectional* [57].

2.2.4 Περιβαλλοντικοί παράγοντες

Η θεωρητική κινηματική ανάλυση ορίζει τον εφικτό χώρο ταχυτήτων κάθε διάταξης υπό ιδανικές συνθήκες κύλισης. Στην πράξη, όμως, η συμπεριφορά αποκλίνει από το ιδανικό μοντέλο, καθώς η επαφή τροχού–εδάφους επηρεάζεται από την ποιότητα της επιφάνειας, την κατανομή της τριβής, τις μικροανωμαλίες, τις κλίσεις και το μεταφερόμενο φορτίο. Οι παράγοντες αυτοί μεταβάλλουν τη μετάδοση των δυνάμεων και συνεπώς την πραγματική κινηματική απόκριση.

Το «ιδανικό» περιβάλλον μιας διάταξης δεν προκύπτει από απόλυτη υπεροχή, αλλά από τη συμβατότητα μεταξύ μηχανισμού επαφής και χαρακτηριστικών της επιφάνειας κύλισης:

- Οι διατάξεις συνεχούς επαφής (διαφορική, Ackermann) προσεγγίζουν πληρέστερα το θεωρητικό μοντέλο σε επιφάνειες με επαρκή και ομοιόμορφη πρόσφυση.
- Οι διατάξεις με rollers (omni, mecanum) αποδίδουν καλύτερα σε επίπεδα και ομοιογενή δάπεδα με ελεγχόμενη τριβή.
- Οι διατάξεις ανεξάρτητης διεύθυνσης (swerve) εμφανίζουν αυξημένη προσαρμοστικότητα σε μικτά περιβάλλοντα, υπό την προϋπόθεση κατάλληλου σχεδιασμού ελέγχου.

Επομένως, η κινηματική αρχιτεκτονική δεν αξιολογείται ανεξάρτητα από το περιβάλλον λειτουργίας. Η πραγματική απόδοση εξαρτάται από την ικανότητα του συστήματος ελέγχου να αντισταθμίζει αβεβαιότητες και μεταβολές στην επαφή τροχού–εδάφους, γεγονός που μετατοπίζει την ανάλυση από την καθαρή γεωμετρία στη δυναμική και στον έλεγχο κίνησης.

2.3 Έλεγχος Κίνησης

Η κινηματική περιγραφή ενός τροχοφόρου κινητού ρομπότ καθορίζει τη γεωμετρική σχέση μεταξύ των ταχυτήτων των τροχών και της ταχύτητας του σώματος στο επίπεδο. Αν και αποτελεί θεμελιώδες εργαλείο για τον σχεδιασμό πλοήγησης και την παραγωγή αναφορών κίνησης, η προσέγγιση αυτή προϋποθέτει ότι οι επιθυμητές ταχύτητες μπορούν να αναπαραχθούν με επαρκή ακρίβεια από το φυσικό σύστημα, κάτι που στην πράξη δεν είναι δεδομένο.

Η φυσική υλοποίηση των αναφορών ταχύτητας δεν πραγματοποιείται υπό ιδανικές συνθήκες. Το κινητό ρομπότ αποτελεί δυναμικό σύστημα με μάζα και κατανομή μάζας που καθορίζουν την αδρανειακή του συμπεριφορά, ενώ οι τριβές και η επαφή τροχού-εδάφους εισάγουν μη γραμμικότητες και ενδεχόμενη ολίσθηση. Παράλληλα, οι κινητήρες και τα στάδια ισχύος παρουσιάζουν πεπερασμένη δυναμική απόκριση, χρονικές καθυστερήσεις και φαινόμενα κορεσμού που περιορίζουν τη διαθέσιμη ροπή και ταχύτητα. Οι παράγοντες αυτοί δεν περιγράφονται από το ιδανικό κινηματικό μοντέλο, αλλά επηρεάζουν καθοριστικά την πραγματική συμπεριφορά του συστήματος [69].

Η οργάνωση του ελέγχου ακολουθεί συνήθως ιεραρχική δομή, ώστε να διαχωρίζεται η παραγωγή εντολών κίνησης από τη φυσική τους υλοποίηση. Διακρίνονται τρία επίπεδα:

- **Υψηλού επιπέδου (High-level control):** καθορισμός των επιθυμητών γραμμικών και γωνιακών ταχυτήτων του σώματος (v, ω) βάσει σχεδιασμού τροχιάς και πλοήγησης.
- **Μεσαίου επιπέδου (Mid-level control):** μετατροπή των ταχυτήτων σώματος σε επιμέρους ταχύτητες τροχών μέσω του κατάλληλου κινηματικού μοντέλου.
- **Χαμηλού επιπέδου (Low-level control):** έλεγχος των κινητήρων (ρεύμα και ταχύτητα) μέσω βρόχων ανάδρασης, ώστε οι ζητούμενες ταχύτητες τροχών να υλοποιούνται με ακρίβεια.

Η αποτελεσματικότητα της συνολικής κίνησης εξαρτάται από τη συνεργασία των επιπέδων αυτών. Η παραγωγή αναφορών (v, ω) δεν επαρκεί από μόνη της, καθώς η πραγματική συμπεριφορά καθορίζεται από τη δυναμική του συστήματος.

Συνεπώς, καθίσταται αναγκαία η διάκριση μεταξύ κινηματικού και δυναμικού ελέγχου. Ο κινηματικός έλεγχος παράγει αναφορές ταχύτητας βάσει γεωμετρικών σχέσεων, ενώ ο δυναμικός έλεγχος εξασφαλίζει τη φυσική υλοποίησή τους μέσω βρόχων ανάδρασης [70]. Η μετάβαση από την επιθυμητή γεωμετρική συμπεριφορά στην πραγματική δυναμική απόκριση αποτελεί τον πυρήνα του ελέγχου κίνησης.

2.3.1 Μαθηματική μοντελοποίηση κινητήρα

Στο χαμηλότερο επίπεδο της ιεραρχίας, η φυσική υλοποίηση των εντολών ταχύτητας πραγματοποιείται μέσω των ηλεκτρομηχανικών ενεργοποιητών. Η κατανόηση της δυναμικής συμπεριφοράς του κινητήρα συνεχούς ρεύματος (DC motor) αποτελεί θεμελιώδες βήμα για τον σχεδιασμό βρόχων ελέγχου ταχύτητας. Ως ηλεκτρομηχανικό σύστημα μετατροπής ηλεκτρικής ισχύος σε μηχανική ροπή, η απόκρισή του εξαρτάται όχι μόνο από την εφαρμοζόμενη τάση αλλά και από τις εσωτερικές ηλεκτρικές και μηχανικές παραμέτρους.

Σε απλοποιημένο μοντέλο οπλισμού (armature-controlled motor), η παραγόμενη ροπή είναι ανάλογη του ρεύματος του κινητήρα:

$$T = K_t I \quad (18)$$

όπου T η ροπή, I το ρεύμα οπλισμού και K_t η σταθερά ροπής. Η σχέση αυτή δείχνει ότι ο έλεγχος του ρεύματος οδηγεί άμεσα σε έλεγχο της μηχανικής ροπής και, κατά συνέπεια, της επιτάχυνσης του τροχού [71].

Παράλληλα, η περιστροφή του κινητήρα δημιουργεί αντιηλεκτρεγερτική δύναμη (Back Electromotive Force - Back-EMF), η οποία είναι ανάλογη της γωνιακής ταχύτητας:

$$e = K_e \omega \quad (19)$$

όπου e η αναπτυσσόμενη αντιηλεκτρεγερτική τάση, ω η γωνιακή ταχύτητα και K_e η σταθερά αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης. Η Back-EMF λειτουργεί ως εσωτερικός μηχανισμός ανάδρασης, περιορίζοντας το ρεύμα καθώς αυξάνεται η ταχύτητα [72].

Συνδυάζοντας τις ηλεκτρικές και μηχανικές σχέσεις, η εφαρμοζόμενη τάση στον κινητήρα περιγράφεται από την εξίσωση οπλισμού:

$$V = L \frac{dI}{dt} + RI + K_e \omega \quad (20)$$

όπου V η εφαρμοζόμενη τάση, R η αντίσταση και L η επαγωγή του οπλισμού. Η παρουσία της επαγωγής και της μηχανικής αδράνειας εισάγει καθυστέρηση και μεταβατική συμπεριφορά, γεγονός που καθιστά απαραίτητο τον σχεδιασμό κατάλληλου κλειστού βρόχου ελέγχου.

Η μαθηματική μοντελοποίηση, ακόμη και σε απλοποιημένη μορφή, επιτρέπει την κατανόηση της σχέσης μεταξύ τάσης, ρεύματος, ροπής και ταχύτητας, καθώς και των φυσικών περιορισμών που επηρεάζουν την απόκριση του συστήματος. Για τον λόγο αυτό, το μοντέλο του κινητήρα αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία θεμελιώνεται ο έλεγχος ταχύτητας των τροχών σε κινητά ρομπότ [71].

2.3.2 Οδηγοί κινητήρων και Διαμόρφωση Πλάτους Παλμού

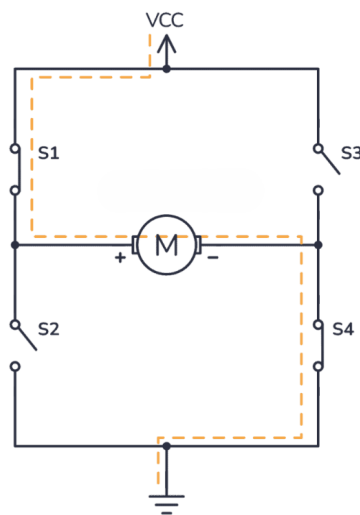
Η πρακτική υλοποίηση του ελέγχου τάσης που περιγράφηκε προηγουμένως προϋποθέτει κατάλληλη διασύνδεση μεταξύ του ελεγκτή και του κινητήρα. Στην πράξη, η τάση αυτή δεν μπορεί να εφαρμοστεί απευθείας από τον μικροελεγκτή, καθώς οι ακροδέκτες του παρέχουν περιορισμένο ρεύμα και λειτουργούν σε χαμηλή τάση. Οι κινητήρες απαιτούν σημαντικά υψηλότερα ρεύματα, ιδίως κατά την εκκίνηση ή σε μεταβολές φορτίου, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την παρεμβολή σταδίου ισχύος (οδηγού κινητήρα), το οποίο επιτρέπει την ασφαλή και ελεγχόμενη τροφοδότηση του κινητήρα [72].

Η συνηθέστερη τοπολογία οδηγού για DC κινητήρες είναι η διάταξη H-bridge, η οποία αποτελείται

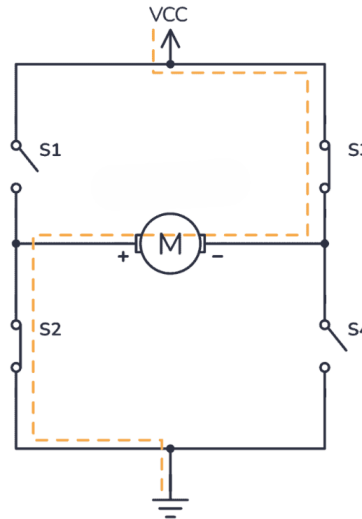
από τέσσερα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος, συνήθως MOSFET ή IGBT, οργανωμένα σε δύο κατακόρυφα σκέλη. Ο κινητήρας συνδέεται μεταξύ των ενδιάμεσων κόμβων τους, σχηματίζοντας την χαρακτηριστική διάταξη γέφυρας [73].

Η βασική, απλοποιημένη αρχιτεκτονική της διάταξης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.18, όπου τα στοιχεία ισχύος παριστάνονται ως ιδανικοί διακόπτες.

Ενεργοποίηση διαγωνίου S1–S4



Ενεργοποίηση διαγωνίου S2–S3



Εικόνα 2.18: Λειτουργικές καταστάσεις H-bridge για αντιστροφή της πολικότητας στα άκρα του DC κινητήρα [74].

Κατά τη λειτουργία της γέφυρας, κάθε φορά άγει μόνο ένα διαγώνιο ζεύγος τρανζίστορ:

- Όταν ενεργοποιούνται τα στοιχεία S1 και S4, το ρεύμα ρέει από την τροφοδοσία μέσω του S1, διέρχεται από τον κινητήρα και επιστρέφει στη γείωση μέσω του S4, επιβάλλοντας συγκεκριμένη πολικότητα στα άκρα του κινητήρα.
- Όταν ενεργοποιούνται τα στοιχεία S2 και S3, η διαδρομή του ρεύματος αντιστρέφεται, με αποτέλεσμα την αντιστροφή της πολικότητας και συνεπώς της φοράς περιστροφής [73].

Στην πράξη, τα κάτω στοιχεία της γέφυρας υλοποιούνται συνήθως με NMOS, ενώ στο άνω σκέλος χρησιμοποιούνται PMOS ή εναλλακτικά NMOS με κατάλληλο κύκλωμα οδήγησης υψηλής πλευράς (high-side driver). Η αγωγή επιτυγχάνεται μέσω κατάλληλης διαφοράς τάσης μεταξύ πύλης και πηγής (V_{GS}).

Ωστόσο, για τη ρύθμιση της ταχύτητας δεν αρκεί η στατική ενεργοποίηση των διακοπών της γέφυρας. Απαιτείται δυναμικός έλεγχος της μέσης εφαρμοζόμενης τάσης στα άκρα του κινητήρα, ο οποίος επιτυγχάνεται μέσω διακοπτικής οδήγησης, γνωστής ως διαμόρφωση πλάτους παλμού (Pulse Width Modulation – PWM).

Κατά την τεχνική αυτή, οι διακόπτες της γέφυρας ενεργοποιούνται και απενεργοποιούνται με σταθερή συχνότητα, ενώ μεταβάλλεται η διάρκεια αγωγής τους εντός κάθε περιόδου.

Ο λόγος ενεργοποίησης (duty cycle) ορίζεται ως:

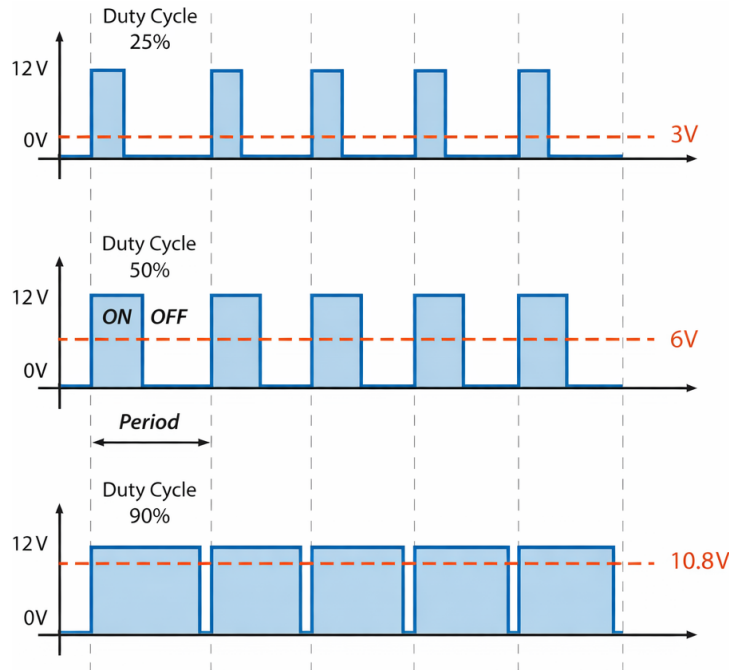
$$D = \frac{T_{ON}}{T_{PWM}} \quad (21)$$

όπου T_{ON} ο χρόνος κατά τον οποίο το σήμα βρίσκεται στη στάθμη υψηλής τάσης και T_{PWM} η συνολική περίοδος της παλμοσειράς.

Η μεταβολή του λόγου ενεργοποίησης μεταβάλλει τη μέση εφαρμοζόμενη τάση, η οποία προσεγγίζεται από:

$$V_{avg} = D \cdot V_{supply} \quad (22)$$

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.19, η αύξηση του duty cycle οδηγεί σε αύξηση της μέσης εφαρμοζόμενης τάσης, χωρίς μεταβολή της στιγμιαίας στάθμης τάσης, η οποία παραμένει ίση με την τάση τροφοδοσίας.



Εικόνα 2.19: Χρονική αναπαράσταση σήματος PWM για διαφορετικούς λόγους ενεργοποίησης και αντίστοιχη μεταβολή της μέσης τάσης [75].

Η επιλογή της συχνότητας PWM επηρεάζει άμεσα τη μορφή του ρεύματος στον οπλισμό του κινητήρα. Η ηλεκτρική χρονική σταθερά του κινητήρα ορίζεται ως:

$$T_e = \frac{L}{R} \quad (23)$$

όπου L η επαγωγή και R η αντίσταση του οπλισμού [72]. Όταν η περίοδος της παλμοσειράς είναι σημαντικά μικρότερη από τη χρονική σταθερά του συστήματος, το ρεύμα μεταβάλλεται ομαλά και η παραγόμενη ροπή εμφανίζει περιορισμένο κυματισμό. Αντίθετα, σε χαμηλότερες συχνότητες παρατηρείται

εντονότερος κυματισμός ρεύματος, ο οποίος μπορεί να οδηγήσει σε κραδασμούς και μη ομαλή λειτουργία.

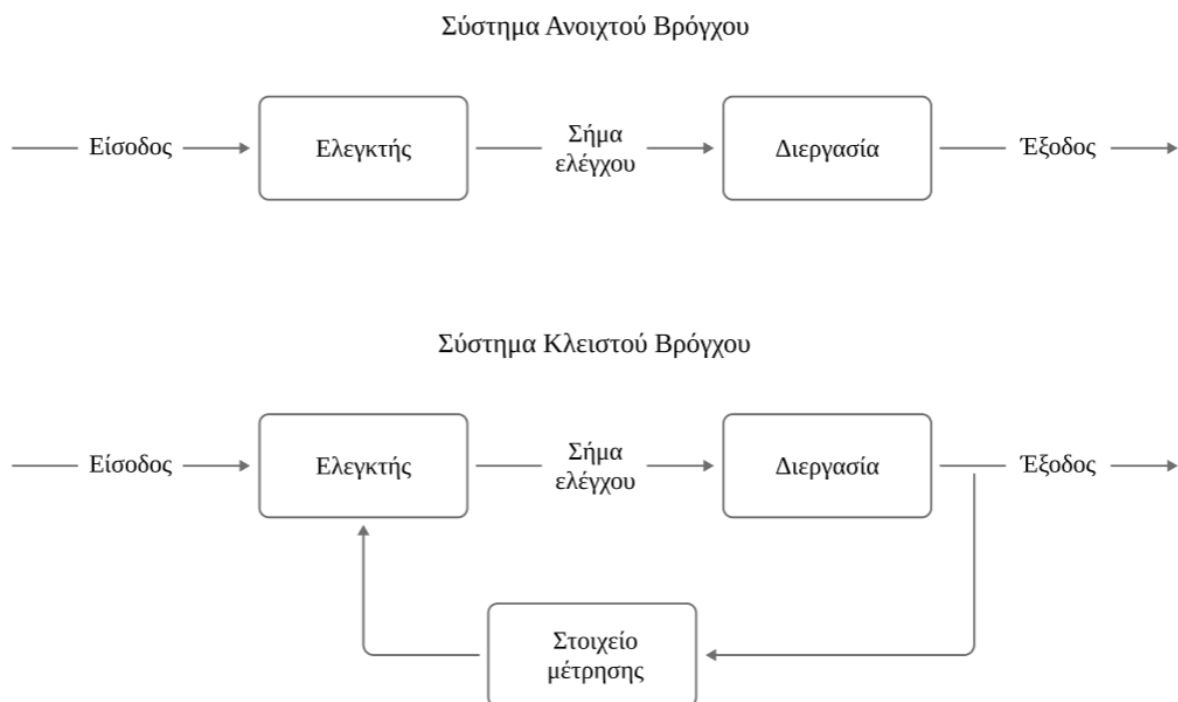
Συνεπώς, το στάδιο οδηγού και η διαμόρφωση πλάτους παλμού αποτελούν τη λειτουργική διασύνδεση μεταξύ του ελεγκτή και του ηλεκτρομηχανικού συστήματος, επιτρέποντας αποδοτική, αμφίδρομη και ελεγχόμενη ρύθμιση της ταχύτητας του κινητήρα.

2.3.3 Ανοικτός και κλειστός βρόχος ελέγχου

Η εφαρμογή σήματος PWM με σταθερό λόγο ενεργοποίησης (duty cycle) αντιστοιχεί σε ανοικτό βρόχο ελέγχου (open-loop control), καθώς η εφαρμοζόμενη τάση καθορίζεται αποκλειστικά από το σήμα ελέγχου, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η πραγματική ταχύτητα του κινητήρα. Σε αυτή την περίπτωση, μεταβολές φορτίου, τριβές, πτώσεις τάσης ή μη γραμμικότητες της δυναμικής οδηγούν σε αποκλίσεις μεταξύ επιθυμητής και πραγματικής απόκρισης.

Αν και ο ανοικτός βρόχος παρουσιάζει προφανή περιορισμό ως προς την αντιστάθμιση διαταραχών, δεν αποτελεί εκ φύσεως ανεπαρκή στρατηγική. Σε συστήματα με σχετικά προβλέψιμη δυναμική και για μικρά χρονικά διαστήματα, η εκτέλεση προκαθορισμένης ακολουθίας ελέγχων μπορεί να παράγει ικανοποιητική απόδοση, ιδιαίτερα όταν η δυναμική συμπεριφορά είναι δύσκολο να μοντελοποιηθεί με ακρίβεια [76].

Η βασική διαφορά ανοικτού και κλειστού βρόχου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.20. Στον κλειστό βρόχο, η έξοδος του συστήματος μετράται και επιστρέφει στον ελεγκτή μέσω ανάδρασης, επιτρέποντας τη διόρθωση του σφάλματος.



Εικόνα 2.20: Δομή ανοικτού και κλειστού βρόχου ελέγχου [77].

Ένας κλειστός βρόχος ελέγχου δεν αρκεί να παρέχει ανάδραση, αλλά οφείλει να ικανοποιεί απαιτήσεις σταθερότητας, ικανοποιητικής απόσβεσης και μικρού μόνιμου σφάλματος, ώστε η απόκριση να παρα-

μένει ελεγχόμενη υπό διαταραχές [77].

Στο πλαίσιο του ελέγχου ταχύτητας κινητήρα, η επιθυμητή γωνιακή ταχύτητα ω_{ref} συγκρίνεται με τη μετρούμενη ω , και ορίζεται το σφάλμα:

$$e(t) = \omega_{ref}(t) - \omega(t). \quad (24)$$

Το σφάλμα αυτό χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση του duty cycle του PWM, ώστε η απόκριση να συγκλίνει στην επιθυμητή τιμή [78, 79]. Η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας αυτής εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα της ανάδρασης και την ακρίβεια της μέτρησης.

Στην πράξη, η υλοποίηση κλειστού βρόχου προϋποθέτει τη μέτρηση της κατάστασης του κινητήρα, δηλαδή της γωνιακής θέσης και/ή της γωνιακής ταχύτητας του άξονα. Η πληροφορία αυτή παρέχεται συνήθως από περιστροφικούς κωδικοποιητές (rotary encoders), οι οποίοι λειτουργούν ως στοιχείο ανάδρασης του συστήματος ελέγχου.

Οι κωδικοποιητές διακρίνονται, ως προς τον τρόπο λειτουργίας τους, στις ακόλουθες βασικές κατηγορίες:

- **Αυξητικοί (Incremental encoders):** Παράγουν διακριτούς παλμούς κατά την περιστροφή του άξονα. Η θέση και η ταχύτητα εξάγονται μέσω καταμέτρησης των παλμών σε συνάρτηση με τον χρόνο. Δεν παρέχουν απόλυτη πληροφορία θέσης μετά από απώλεια τροφοδοσίας.
- **Απόλυτοι (Absolute encoders):** Παρέχουν μοναδική ψηφιακή τιμή για κάθε γωνιακή θέση του άξονα, συνήθως μέσω πολυπιπτικής κωδικοποίησης. Διατηρούν πληροφορία θέσης ακόμη και μετά από διακοπή τροφοδοσίας.
- **Ημιτονοειδείς (Sine/Cosine encoders):** Παράγουν αναλογικά σήματα ημιτόνου και συνημιτόνου σε διαφορά φάσης 90° . Η γωνιακή θέση υπολογίζεται μέσω της συνάρτησης $\arctan\left(\frac{\sin}{\cos}\right)$, επιτρέποντας παρεμβολή και υψηλή θεωρητική ανάλυση [80].

Ως προς την τεχνολογία ανίχνευσης, οι κωδικοποιητές μπορεί να είναι οπτικοί, μαγνητικοί ή χωρητικοί. Οι οπτικοί βασίζονται σε διάτρητο δίσκο και σύστημα φωτοεκπομπού–φωτοδέκτη και προσφέρουν υψηλή ανάλυση, αλλά είναι ευαίσθητοι σε ρύπους. Οι μαγνητικοί βασίζονται σε μεταβολές μαγνητικού πεδίου (π.χ. αισθητήρες Hall) και παρουσιάζουν αυξημένη ανθεκτικότητα σε σκόνη και κραδασμούς [71, 81].

Η ανάλυση ενός αυξητικού κωδικοποιητή εκφράζεται σε παλμούς ανά περιστροφή (Pulses Per Revolution - PPR). Αν N είναι ο αριθμός παλμών ανά πλήρη περιστροφή και καταμετρηθούν n παλμοί, τότε η γωνιακή μετατόπιση του τροχού δίνεται από:

$$\theta = \frac{2\pi}{N} n. \quad (25)$$

Η αντίστοιχη γραμμική μετατόπιση προκύπτει ως:

$$d = r\theta, \quad (26)$$

όπου r η ακτίνα του τροχού.

Η γωνιακή ταχύτητα υπολογίζεται μέσω καταμέτρησης παλμών σε χρονικό διάστημα Δt (fixed time method) [71]:

$$\omega = \frac{2\pi\Delta N}{N\Delta t}, \quad (27)$$

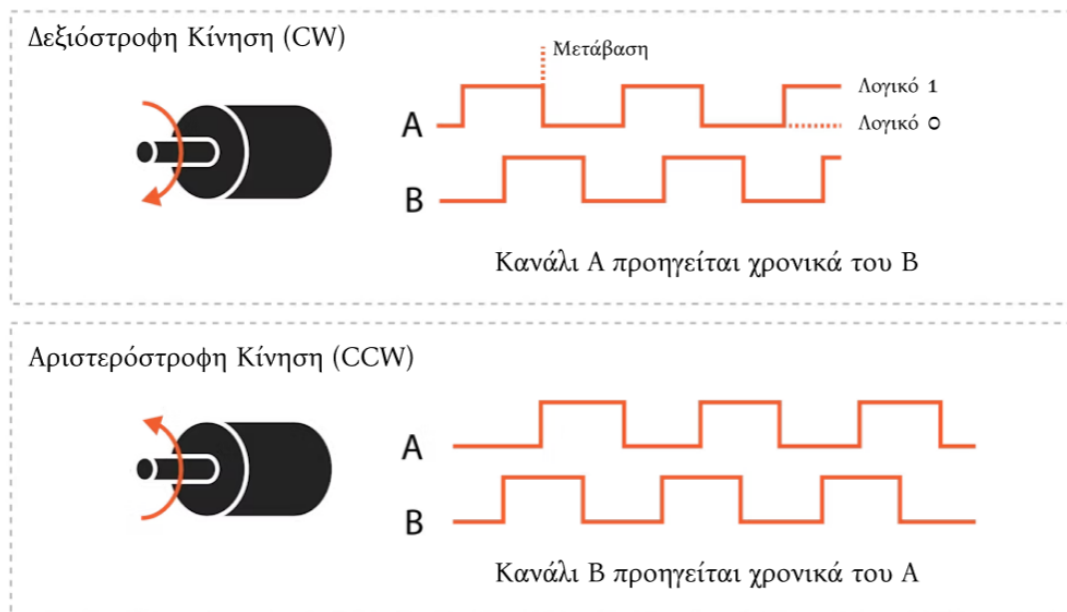
ενώ οι στροφές ανά λεπτό (Revolutions Per Minute - RPM) δίνονται από:

$$\text{RPM} = \frac{60\Delta N}{N\Delta t}. \quad (28)$$

Στην περίπτωση τετραδικής αποκωδικοποίησης (4× decoding), ο αριθμός N στην παραπάνω σχέση αντιστοιχεί στον συνολικό αριθμό μετρήσιμων μεταβάσεων ανά περιστροφή και ισούται με $4 \times PPR$, όπου PPR ο ονομαστικός αριθμός παλμών του κατασκευαστή.

Σε χαμηλές ταχύτητες, ο μικρός αριθμός παλμών ανά περίοδο δειγματοληψίας οδηγεί σε αυξημένο σχετικό σφάλμα λόγω κβάντισης.

Οι περισσότεροι αυξητικοί κωδικοποιητές λειτουργούν σε τετραδική διάταξη (quadrature), παρέχοντας δύο σήματα A και B σε διαφορά φάσης 90° . Η σχετική χρονική μετατόπιση των δύο καναλιών επιτρέπει τον προσδιορισμό της φοράς περιστροφής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.21. Όταν το κανάλι A προηγείται του B, η περιστροφή είναι δεξιόστροφη (CW), ενώ όταν το B προηγείται του A, είναι αριστερόστροφη (CCW). Με αποκωδικοποίηση και των τεσσάρων μετώπων (4× decoding) επιτυγχάνεται τετραπλασιασμός της αποτελεσματικής ανάλυσης [71].



Εικόνα 2.21: Σήματα τετραδικής διάταξης αυξητικού κωδικοποιητή και προσδιορισμός φοράς περιστροφής.

Η διακριτή φύση της μέτρησης εισάγει σφάλμα κβάντισης, το οποίο καθίσταται εντονότερο σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής, όπου ο αριθμός παλμών ανά περίοδο δειγματοληψίας είναι μικρός. Επιπλέον, μη ιδανικότητες όπως εκκεντρότητα, ανομοιομορφία εγχοπών ή μηχανικές ανοχές μπορούν να προκαλέσουν περιοδικές διακυμάνσεις στη μετρούμενη ταχύτητα [81]. Συνεπώς, η ακρίβεια της ανάδρασης επηρεάζει άμεσα τη σταθερότητα και την ποιότητα της δυναμικής απόκρισης του κλειστού βρόχου.

2.3.4 Αναλογικός-Ολοκληρωτικός-Παραγωγικός έλεγχος

Δεδομένης της μέτρησης της πραγματικής ταχύτητας, ο κλειστός βρόχος απαιτεί κατάλληλο νόμο ελέγχου για τη ρύθμιση του σφάλματος μεταξύ επιθυμητής και μετρούμενης τιμής. Ο πλέον διαδεδομένος ελεγκτής σε εφαρμογές ελέγχου ταχύτητας κινητήρων είναι ο Αναλογικός-Ολοκληρωτικός-Παραγωγικός (PID), λόγω της απλότητάς του και της ικανοποιητικής απόδοσης που επιτυγχάνει σε ευρύ φάσμα συστημάτων.

Ο PID ελεγκτής συνδυάζει τρεις διακριτούς όρους, οι οποίοι επιδρούν σε διαφορετικές πτυχές της δυναμικής του σφάλματος [82]:

- **Αναλογικός όρος (K_p):** Είναι ανάλογος του στιγμιαίου σφάλματος και καθορίζει κυρίως την ταχύτητα απόκρισης του συστήματος. Η αύξηση του K_p επιταχύνει τη σύγκλιση, ενδέχεται όμως να οδηγήσει σε αυξημένη υπερύψωση ή ταλαντωτική συμπεριφορά.
- **Ολοκληρωτικός όρος (K_i):** Βασίζεται στη χρονική ολοκλήρωση του σφάλματος και αποσκοπεί στην εξάλειψη του μόνιμου σφάλματος στη μόνιμη κατάσταση, βελτιώνοντας την ακρίβεια σε σταθερό καθεστώς λειτουργίας.
- **Παραγωγικός όρος (K_d):** Εξαρτάται από τον ρυθμό μεταβολής του σφάλματος και δρα προβλεπτικά, βελτιώνοντας τη μεταβατική συμπεριφορά και περιορίζοντας την υπερύψωση μέσω απόσβεσης των ταχέων μεταβολών.

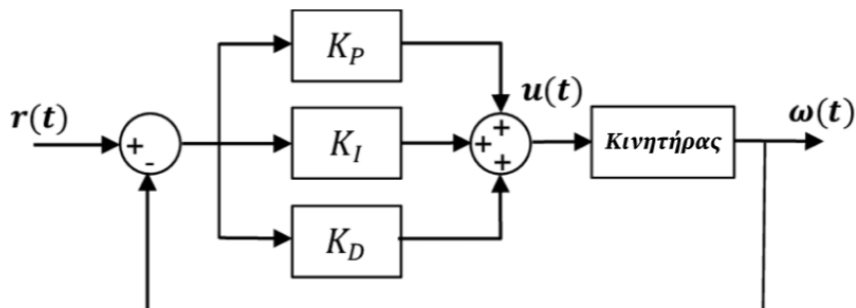
Αν οριστεί το σφάλμα ως:

$$e(t) = \omega_{\text{ref}}(t) - \omega(t),$$

τότε ο συνεχής νόμος PID δίνεται από:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}. \quad (29)$$

Το αντίστοιχο διάγραμμα κλειστού βρόχου ελέγχου ταχύτητας παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.22.



Εικόνα 2.22: Τυπικός κλειστός βρόχος PID ελέγχου ταχύτητας DC κινητήρα [82].

Η επιθυμητή ταχύτητα $\omega_{\text{ref}}(t)$ συγκρίνεται με τη μετρούμενη ταχύτητα $\omega(t)$, το σφάλμα οδηγείται στον PID ελεγκτή και η έξοδός του $u(t)$ εφαρμόζεται στον κινητήρα, ενώ η πραγματική ταχύτητα ανατροφοδοτείται κλείνοντας τον βρόχο.

Το σήμα ελέγχου $u(t)$ αντιστοιχεί στην επιθυμητή τάση του κινητήρα ή, στην πράξη, στο duty cycle του σήματος PWM, όπως υλοποιείται σε ενσωματωμένα συστήματα ελέγχου κινητήρων. Στον έλεγχο ταχύτητας κινητήρων κινητών ρομπότ, η ρύθμιση των παραμέτρων αυτών επηρεάζει άμεσα χαρακτηριστικά όπως ο χρόνος αποκατάστασης και η υπερύψωση [79].

Παρά την αποτελεσματικότητα του PID στον ιδανικό γραμμικό σχεδιασμό, στην πράξη η συμπεριφορά του επηρεάζεται από τους φυσικούς περιορισμούς του ενεργοποιητή. Το σήμα ελέγχου περιορίζεται από φυσικά όρια, καθώς το duty cycle του PWM ανήκει στο διάστημα $0 \leq D \leq 1$. Όταν ο υπολογιζόμενος νόμος ελέγχου απαιτεί τάση μεγαλύτερη από τη μέγιστη διαθέσιμη, το σύστημα εισέρχεται σε κατάσταση κορεσμού (actuator saturation), δηλαδή η πραγματική εντολή προς τον κινητήρα δεν μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω ανεξάρτητα από το μέγεθος του σφάλματος [83].

Υπό συνθήκες κορεσμού, ο ολοκληρωτικός όρος συνεχίζει να συσσωρεύει το σφάλμα στον χρόνο, παρότι η εφαρμοζόμενη τάση προς τον κινητήρα παραμένει περιορισμένη. Η συσσώρευση αυτή οδηγεί στο φαινόμενο *integrator windup*, κατά το οποίο ο ολοκληρωτικός όρος αποκτά υπερβολικά μεγάλη τιμή. Καθώς ο ενεργοποιητής παραμένει κορεσμένος, η πραγματική είσοδος του κινητήρα δεν μεταβάλλεται παρά την αύξηση της εντολής ελέγχου, με αποτέλεσμα ο ολοκληρωτής να λειτουργεί αποσυνδεδεμένα από την πραγματική απόκριση του συστήματος. Όταν το σύστημα εξέλθει από τον κορεσμό, απαιτείται σημαντικός χρόνος ώστε ο ολοκληρωτικός όρος να αποφορτιστεί, προκαλώντας καθυστερημένη αποκατάσταση, αυξημένη υπερύψωση ή ακόμη και ταλαντώσεις [84].

Για την αποφυγή του φαινομένου αυτού εφαρμόζονται τεχνικές *anti-windup*, οι οποίες τροποποιούν τη δυναμική του ολοκληρωτικού κλάδου όταν ανιχνεύεται κορεσμός. Στόχος τους είναι η διατήρηση της σταθερότητας και της μεταβατικής ποιότητας του συστήματος υπό περιορισμούς εισόδου. Τυπικές προσεγγίσεις περιλαμβάνουν τον άμεσο περιορισμό (clamping) του ολοκληρωτή ή την ανατροφοδότηση της διαφοράς μεταξύ κορεσμένης και μη κορεσμένης εντολής προς τον ολοκληρωτικό κλάδο (back-calculation), τεχνικές που έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς σε μη γραμμικά και ρομποτικά συστήματα με κορεσμό ενεργοποιητών [83, 84].

Σε ενσωματωμένα συστήματα, ο PID υλοποιείται σε διακριτό χρόνο με περίοδο δειγματοληψίας T_s :

$$u[k] = u[k-1] + K_p(e[k] - e[k-1]) + K_i T_s e[k] + \frac{K_d}{T_s}(e[k] - 2e[k-1] + e[k-2]). \quad (30)$$

Η διακριτή υλοποίηση του PID σε μικροελεγκτές αποτελεί τυπική πρακτική σε εφαρμογές ελέγχου DC κινητήρων, καθώς η περίοδος δειγματοληψίας T_s εισέρχεται ρητά στη διακριτή δυναμική του συστήματος και επηρεάζει άμεσα τη σταθερότητα και την απόδοση του βρόχου [85].

Ωστόσο, ο τοπικός έλεγχος ταχύτητας αφορά αποκλειστικά τη ρύθμιση της στιγμιαίας δυναμικής συμπεριφοράς των κινητήρων και δεν παρέχει πληροφορία για την παγκόσμια θέση του ρομπότ στο περιβάλλον. Ακόμη και υπό σταθερή λειτουργία, μικρά σφάλματα στην εκτέλεση της κίνησης συσσωρεύονται με την πάροδο του χρόνου, επηρεάζοντας τη συνολική εκτίμηση της θέσης και του προσανατολισμού. Η αντιμέτωπιση του προβλήματος αυτού εντάσσεται στο πεδίο της εκτίμησης κατάστασης, όπου λαμβάνεται ρητά υπόψη η αβεβαιότητα του μοντέλου και των μετρήσεων.

2.4 Εντοπισμός Θέσης

Η αθροιστική επίδραση των αβεβαιοτήτων που εισάγονται κατά την υλοποίηση της κίνησης οδηγεί σε αναπόφευκτη απόκλιση μεταξύ της εκτιμώμενης και της πραγματικής θέσης, ακόμη και όταν ο βρόχος ελέγχου ταχύτητας λειτουργεί ικανοποιητικά. Κατά συνέπεια, η περιγραφή της κατάστασης ενός κινητού ρομπότ δεν μπορεί να θεωρηθεί πλήρως ντετερμινιστική, αλλά απαιτεί διατύπωση στο πλαίσιο εκτίμησης υπό αβεβαιότητα [50].

Ο εντοπισμός θέσης (localization) διατυπώνεται ως πρόβλημα αναδρομικής εκτίμησης της κατάστασης ενός δυναμικού συστήματος. Η εξέλιξη της κατάστασης περιγράφεται από ένα μοντέλο κίνησης (motion model), το οποίο προβλέπει τη μεταβολή της βάσει των εντολών ελέγχου, ενώ οι αισθητηριακές μετρήσεις συνδέονται με την κατάσταση μέσω ενός μοντέλου μέτρησης (measurement model). Ο συνδυασμός πρόβλεψης και μέτρησης επιτρέπει τη διαδοχική ενημέρωση της εκτίμησης με ρητή ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας [86].

Η διαδικασία αυτή διατυπώνεται σε πιθανοκρατικό πλαίσιο, όπου η κατάσταση δεν εκφράζεται ως μοναδική τιμή αλλά ως κατανομή πιθανότητας που εξελίσσεται στον χρόνο. Η μορφή αναπαράστασης της κατανομής αυτής καθορίζει και τη μεθοδολογία εκτίμησης, οδηγώντας σε διαφορετικές κατηγορίες φίλτρων κατάστασης και τεχνικών συγχώνευσης αισθητήρων.

2.4.1 Διατύπωση προβλήματος εντοπισμού Θέσης

Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος εντοπισμού θέσης βασίζεται στην περιγραφή της στάσης του ρομπότ μέσω του διανύσματος κατάστασης

$$\mathbf{X}_k = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ \theta_k \end{bmatrix},$$

όπου x_k και y_k είναι οι καρτεσιανές συντεταγμένες και θ_k ο προσανατολισμός ως προς το παγκόσμιο σύστημα αναφοράς στο χρονικό βήμα k [50]. Η κατάσταση αυτή εξελίσσεται δυναμικά σύμφωνα με ένα μη γραμμικό μοντέλο κίνησης διακριτού χρόνου της μορφής

$$\mathbf{X}_k = f(\mathbf{X}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1}) + \mathbf{w}_{k-1},$$

όπου $\mathbf{u}_{k-1}$ είναι το διάνυσμα εισόδων ελέγχου, $f(\cdot)$ η συνάρτηση που περιγράφει τη δυναμική του συστήματος και $\mathbf{w}_{k-1}$ ο θόρυβος διεργασίας, ο οποίος μοντελοποιεί αποκλίσεις από το ιδανικό κινηματικό μοντέλο, όπως ολίσθηση, μη ιδανικές παραμέτρους ή μη γραμμικότητες [87]. Ο θόρυβος διεργασίας θεωρείται συνήθως τυχαίο διάνυσμα κανονικής κατανομής με μηδενική μέση τιμή και πίνακα συνδιακύμανσης Q_{k-1} , δηλαδή $\mathbf{w}_{k-1} \sim \mathcal{N}(0, Q_{k-1})$.

Οι αισθητηριακές μετρήσεις συνδέονται με την κατάσταση μέσω ενός μη γραμμικού μοντέλου παρατήρησης της μορφής

$$\mathbf{z}_k = h(\mathbf{X}_k) + \mathbf{v}_k,$$

όπου $h(\cdot)$ είναι η συνάρτηση μέτρησης και $\mathbf{v}_k$ ο θόρυβος μέτρησης [86]. Ο θόρυβος αυτός μοντελο-

ποιείται επίσης ως κανονική κατανομή μηδενικής μέσης τιμής και πίνακα συνδιακύμανσης R_k , δηλαδή $\mathbf{v}_k \sim \mathcal{N}(0, R_k)$.

Συνεπώς, η εκτίμηση της στάσης του ρομπότ δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί ως καθαρά γεωμετρικό πρόβλημα, αλλά ως πρόβλημα στοχαστικής εκτίμησης, στο οποίο η αβεβαιότητα αποτελεί εγγενές χαρακτηριστικό της δυναμικής και των μετρήσεων του συστήματος.

2.4.2 Πιθανοκρατική θεμελίωση και αναδρομική εκτίμηση

Η στοχαστική διατύπωση της εκτίμησης κατάστασης θεμελιώνεται στον κανόνα του Bayes και στη θεωρία των δυναμικών στοχαστικών συστημάτων. Στην προσέγγιση αυτή, η κατάσταση του ρομπότ περιγράφεται μέσω κατανομής πιθανότητας, η οποία ενημερώνεται αναδρομικά καθώς καθίστανται διαθέσιμες νέες μετρήσεις.

Η κατανομή αυτή, γνωστή ως *belief*, ορίζεται ως

$$\text{bel}(\mathbf{x}_k) = p(\mathbf{x}_k \mid \mathbf{z}_{1:k}, \mathbf{u}_{1:k}),$$

δηλαδή ως η εκ των υστέρων πιθανότητα η κατάσταση στο χρονικό βήμα k να είναι $\mathbf{x}_k$, δεδομένων όλων των προηγούμενων μετρήσεων $\mathbf{z}_{1:k}$ και εντολών ελέγχου $\mathbf{u}_{1:k}$ [88]. Η *belief* ενσωματώνει συνεπώς όλη τη διαθέσιμη πληροφορία μέχρι τη χρονική στιγμή k και αποτελεί τη συνοπτική πιθανοκρατική περιγραφή της γνώσης του συστήματος για τη θέση και τον προσανατολισμό του.

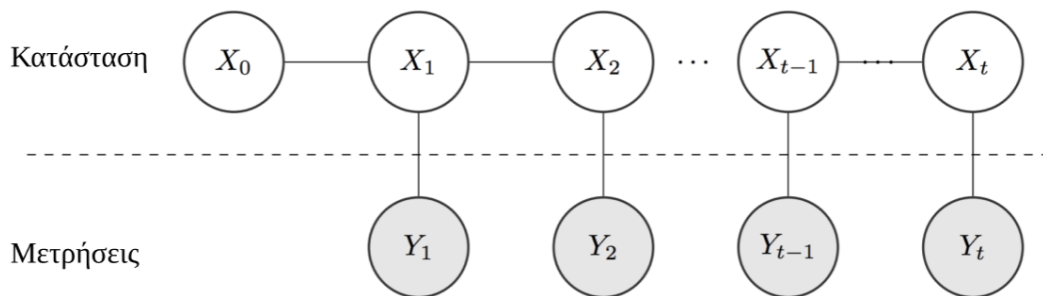
Για να καταστεί δυνατή η αναδρομική ενημέρωση της *belief*, υιοθετείται η υπόθεση Markov, σύμφωνα με την οποία η μελλοντική κατάσταση εξαρτάται αποκλειστικά από την αμέσως προηγούμενη. Υπό την παραδοχή αυτή ισχύει

$$p(\mathbf{x}_k \mid \mathbf{x}_{0:k-1}) = p(\mathbf{x}_k \mid \mathbf{x}_{k-1}),$$

ενώ οι μετρήσεις θεωρούνται υπό συνθήκη ανεξάρτητες του παρελθόντος,

$$p(\mathbf{z}_k \mid \mathbf{x}_{0:k}, \mathbf{z}_{1:k-1}) = p(\mathbf{z}_k \mid \mathbf{x}_k).$$

Η παραπάνω στοχαστική δομή μπορεί να αποτυπωθεί γραφικά μέσω ενός δυναμικού γραφικού μοντέλου, το οποίο καθιστά ρητή τη χρονική εξάρτηση των καταστάσεων και τη σχέση τους με τις αντίστοιχες μετρήσεις.



Εικόνα 2.23: Δυναμικό γραφικό μοντέλο (Hidden Markov Model) για την εκτίμηση κατάστασης.

Στο Σχήμα 2.23, οι κόμβοι X_t (αντιστοίχως της κατάστασης $\mathbf{x}_k$ που χρησιμοποιείται στη μαθηματική

διατύπωση) αναπαριστούν την ακολουθία των κρυφών καταστάσεων του συστήματος, ενώ οι μεταβλητές Y_t (αντιστοίχως των μετρήσεων $\mathbf{z}_k$) αντιστοιχούν στις παρατηρήσεις που εξαρτώνται αποκλειστικά από την τρέχουσα κατάσταση. Η οριζόντια αλυσίδα εκφράζει την ιδιότητα Markov, σύμφωνα με την οποία κάθε κατάσταση εξαρτάται μόνο από την αμέσως προηγούμενη, ενώ οι κατακόρυφες συνδέσεις αποτυπώνουν το μοντέλο μέτρησης. Η δομή αυτή αναδεικνύει τον επαναλαμβανόμενο κύκλο πρόβλεψης και διόρθωσης που διέπει την πιθανοκρατική εκτίμηση κατάστασης.

Με βάση τις παραπάνω παραδοχές, η belief ενημερώνεται μέσω της αναδρομικής εφαρμογής του κανόνα του Bayes, διαδικασία η οποία διαχωρίζεται σε στάδιο πρόβλεψης και στάδιο διόρθωσης [86]. Κατά το στάδιο πρόβλεψης, η προηγούμενη belief προωθείται χρονικά μέσω του μοντέλου κίνησης σύμφωνα με

$$\bar{\text{bel}}(\mathbf{x}_k) = \int p(\mathbf{x}_k | \mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1}) \text{bel}(\mathbf{x}_{k-1}) d\mathbf{x}_{k-1}.$$

Η ποσότητα $\bar{\text{bel}}(\mathbf{x}_k)$ αποτελεί την *a priori* εκτίμηση της κατάστασης και ενσωματώνει την αβεβαιότητα του μοντέλου διεργασίας, με αποτέλεσμα η διασπορά της κατανομής να αυξάνεται καθώς το σύστημα εξελίσσεται χωρίς νέα πληροφορία.

Κατά το στάδιο διόρθωσης, με την άφιξη νέας μέτρησης $\mathbf{z}_k$, η πρόβλεψη ενημερώνεται σύμφωνα με

$$\text{bel}(\mathbf{x}_k) = \eta p(\mathbf{z}_k | \mathbf{x}_k) \bar{\text{bel}}(\mathbf{x}_k),$$

όπου η αποτελεί παράγοντα κανονικοποίησης. Το μοντέλο μέτρησης σταθμίζει την πρόβλεψη με βάση τη συμβατότητά της προς τη νέα παρατήρηση, οδηγώντας, υπό κατάλληλες συνθήκες, σε μείωση της αβεβαιότητας.

2.4.3 Φίλτρα εκτίμησης κατάστασης

Η παραπάνω αναδρομική διατύπωση δεν επιλύεται αναλυτικά στη γενική περίπτωση μη γραμμικών ή μη Γκαουσιανών συστημάτων, όπως συμβαίνει στα κινητά ρομπότ, όπου το κινηματικό μοντέλο περιλαμβάνει μη γραμμικούς όρους (π.χ. $\sin \theta$, $\cos \theta$) και τα μοντέλα μέτρησης αισθητήρων απόστασης ή γωνίας περιγράφονται από μη γραμμικές συναρτήσεις (π.χ. τετραγωνικές ρίζες ή $\arctan(\cdot)$). Για τον λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί εξειδικευμένα φίλτρα εκτίμησης, τα οποία διαφοροποιούνται ως προς την παραμετρική ή μη παραμετρική αναπαράσταση της belief και τον τρόπο χειρισμού της μη γραμμικότητας.

Φίλτρο Kalman (Kalman Filter – KF)

Το φίλτρο Kalman αποτελεί την ακριβή υλοποίηση του Bayes filter για γραμμικά δυναμικά συστήματα με Γκαουσιανό θόρυβο. Υποθέτει γραμμικό μοντέλο κατάστασης και μέτρησης, ενώ η κατανομή της κατάστασης περιγράφεται πλήρως από τη μέση τιμή $\hat{\mathbf{x}}_k$ και τον πίνακα συνδιακύμανσης P_k . Σε κάθε χρονικό βήμα, το φίλτρο εκτιμά τη μέση τιμή και την αβεβαιότητα μέσω σταδίων πρόβλεψης και ενημέρωσης, όπου το κέρδος Kalman σταθμίζει βέλτιστα την εμπιστοσύνη μεταξύ μοντέλου και μέτρησης, οδηγώντας σε εκτίμηση ελάχιστης μέσης τετραγωνικής απόκλισης. Η εφαρμογή του εντοπίζεται σε περιπτώσεις όπου το σύστημα μπορεί να προσεγγιστεί γραμμικά και οι αβεβαιότητες είναι περίπου κανονικές, όπως σε συνδυασμούς αδρανειακών και οδομετρικών αισθητήρων.

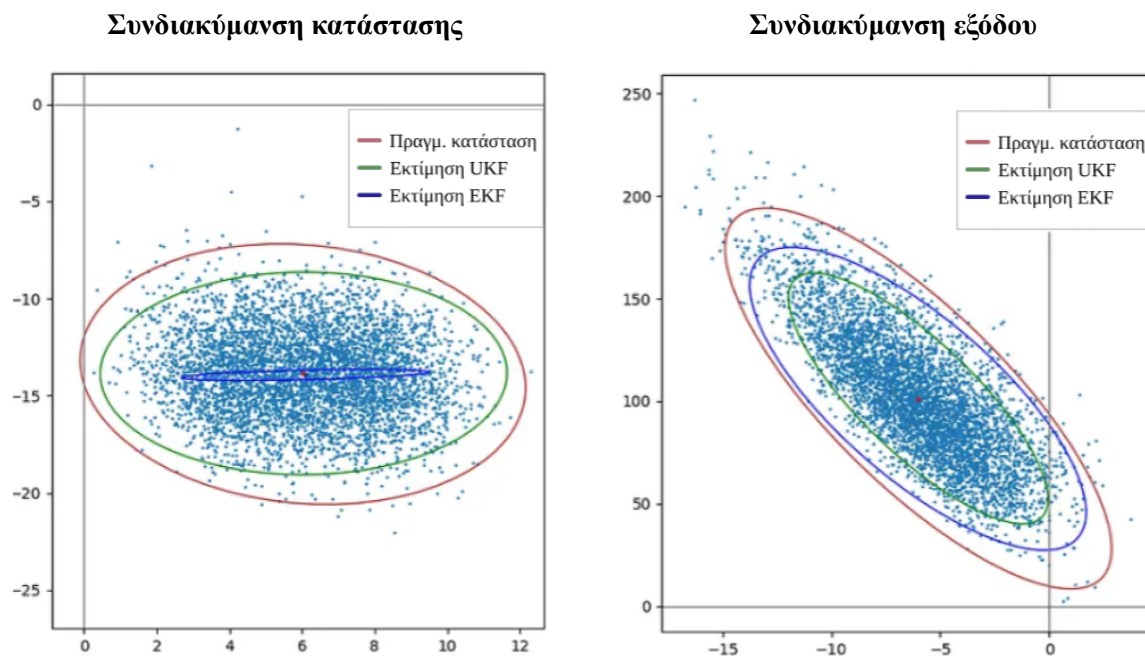
Εκτεταμένο Φίλτρο Kalman (Extended Kalman Filter – EKF)

Σε μη γραμμικά συστήματα, το EKF επεκτείνει το KF μέσω τοπικής γραμμικοποίησης των συναρτήσεων κίνησης και μέτρησης γύρω από την τρέχουσα εκτίμηση της κατάστασης. Η γραμμικοποίηση πραγματοποιείται μέσω των αντίστοιχων Ιακωβιανών πινάκων, που προκύπτουν από ανάπτυξη Taylor πρώτης τάξης. Η κατανομή της κατάστασης εξακολουθεί να περιγράφεται μέσω της μέσης τιμής και της συνδιακύμανσης, ωστόσο η ποιότητα της εκτίμησης εξαρτάται από την εγκυρότητα της τοπικής γραμμικής προσέγγισης. Σε έντονα μη γραμμικά προβλήματα, το σφάλμα γραμμικοποίησης μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια στατιστικής συνέπειας ή σε υποβάθμιση της σταθερότητας του φίλτρου.

Unscented Φίλτρο Kalman (Unscented Kalman Filter – UKF)

Το UKF αντιμετωπίζει τη μη γραμμικότητα χωρίς ρητή γραμμικοποίηση των συναρτήσεων. Αντί της ανάπτυξης Taylor, εφαρμόζει τον Unscented Transform, ο οποίος διαδίδει ένα σύνολο ντετερμινιστικά επιλεγμένων σημείων (sigma points) μέσω των μη γραμμικών συναρτήσεων. Από τα μετασχηματισμένα σημεία υπολογίζονται εκ νέου η μέση τιμή και η συνδιακύμανση της κατάστασης. Η προσέγγιση αυτή επιτυγχάνει ακριβέστερη αναπαράσταση των στατιστικών ροπών σε μη γραμμικούς μετασχηματισμούς, διατηρώντας παραμετρική περιγραφή της αβεβαιότητας και χρησιμοποιείται ευρέως σε προβλήματα σύντηξης πολλαπλών αισθητήρων. Η διαφορά μεταξύ γραμμικοποίησης και διάδοσης sigma points μπορεί να αποτυπωθεί οπτικά μέσω της διάδοσης της συνδιακύμανσης σε μη γραμμικό μετασχηματισμό.

Στο Σχήμα 2.24 παρουσιάζεται ενδεικτική σύγκριση της εκτιμώμενης κατανομής κατάστασης και εξόδου για EKF και UKF.



Εικόνα 2.24: Σχηματική σύγκριση διάδοσης της συνδιακύμανσης σε μη γραμμικό μετασχηματισμό για EKF και UKF.

Στην περίπτωση του EKF, η συνδιακύμανση διαδίδεται μέσω του Ιακωβιανού πίνακα, ο οποίος αποτελεί τοπική γραμμική προσέγγιση της μη γραμμικής συνάρτησης γύρω από την τρέχουσα εκτίμηση. Αντιθέτως, στο UKF η ίδια η μη γραμμική συνάρτηση εφαρμόζεται στα sigma points, επιτρέποντας καλύτερη

αποτύπωση της παραμόρφωσης της κατανομής εξόδου.

Παρά τα παραπάνω, τόσο το EKF όσο και το UKF διατηρούν παραμετρική Γκαουσιανή αναπαράσταση της belief, γεγονός που συνεπάγεται μονοτροπική περιγραφή της αβεβαιότητας. Σε περιβάλλοντα όπου η posterior κατανομή είναι έντονα μη Γκαουσιανή ή πολυτροπική, απαιτείται διαφορετική προσέγγιση, η οποία οδηγεί στα φίλτρα σωματιδίων.

Φίλτρο Σωματιδίων (Particle Filter) και Monte Carlo Localization (MCL)

Οι μέθοδοι σωματιδίων αποτελούν μη παραμετρική προσέγγιση της Bayesian αναδρομής. Η belief αναπαρίσταται από σύνολο σταθμισμένων δειγμάτων, επιτρέποντας την περιγραφή πολυτροπικών posterior κατανομών. Η διαδικασία περιλαμβάνει στάδια πρόβλεψης, ενημέρωσης βαρών βάσει του μοντέλου μέτρησης και επαναδειγματοληψίας.

Κατά το στάδιο πρόβλεψης, τα σωματίδια δειγματοληπτούνται από το μοντέλο κίνησης $p(\mathbf{x}_k | \mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1})$, ενώ στο στάδιο ενημέρωσης τα βάρη υπολογίζονται με βάση το μοντέλο μέτρησης $p(\mathbf{z}_k | \mathbf{x}_k)$. Η επαναδειγματοληψία διατηρεί τα σωματίδια υψηλής πιθανότητας και απορρίπτει εκείνα με χαμηλή συνεισφορά, υλοποιώντας μηχανισμό importance sampling.

Η προσέγγιση αυτή είναι κατάλληλη σε περιβάλλοντα έντονης μη γραμμικότητας ή ασυνέχειας εκτίμησης, όπως στο πρόβλημα ολικής επανατοποθέτησης (kidnapped robot problem). Στην πράξη, ο αλγόριθμος Adaptive Monte Carlo Localization (AMCL) προσαρμόζει δυναμικά τον αριθμό των σωματιδίων, εξισορροπώντας ακρίβεια και υπολογιστικό κόστος.

Συνολικά, τα φίλτρα τύπου Kalman βασίζονται σε παραμετρική αναπαράσταση της αβεβαιότητας και περιγράφουν μονοτροπικές κατανομές, ενώ τα φίλτρα σωματιδίων επιτρέπουν πολυτροπική περιγραφή της belief. Η επιλογή μεθόδου εξαρτάται από τον βαθμό μη γραμμικότητας, τη μορφή της αβεβαιότητας και τις υπολογιστικές απαιτήσεις της εφαρμογής.

2.4.4 Συγχώνευση πληροφορίας και πολυαισθητηριακή εκτίμηση

Η εκτίμηση θέσης ενός κινητού ρομπότ πραγματοποιείται υπό καθεστώς αβεβαιότητας, καθώς κάθε αισθητήρας χαρακτηρίζεται από θόρυβο, μεροληψία και περιορισμούς λειτουργίας. Οι τεχνικές εντοπισμού διακρίνονται σε σχετικές και απόλυτες. Οι σχετικές μέθοδοι, όπως η οδομετρία και η αδρανειακή πλοήγηση μέσω IMU, βασίζονται σε εσωτερικές μετρήσεις και παρουσιάζουν συσσώρευση σφάλματος με την πάροδο του χρόνου. Οι απόλυτες μέθοδοι, όπως η αντιστοίχιση με χάρτη ή η χρήση εξωτερικών σημείων αναφοράς, μπορούν να διορθώσουν την απόκλιση, αλλά δεν παρέχουν κατ' ανάγκη συνεχή και υψηλής συχνότητας εκτίμηση. Καμία από τις δύο κατηγορίες δεν επαρκεί αυτόνομα για σταθερή και μακροχρόνια αξιόπιστη εκτίμηση.

Η συγχώνευση αισθητήρων προκύπτει ως αναγκαία αρχιτεκτονική επιλογή για την ενοποίηση των πλεονεκτημάτων διαφορετικών μετρήσεων. Στη συμπληρωματική (complementary) συγχώνευση, αισθητήρες με διαφορετικά φυσικά χαρακτηριστικά καλύπτουν αδυναμίες ο ένας του άλλου. Ενδεικτικά, οι κωδικοποιητές τροχών παρέχουν καλή βραχυπρόθεσμη εκτίμηση μετατόπισης, αλλά επηρεάζονται από ολίσθηση, ενώ η IMU προσφέρει υψηλής συχνότητας γωνιακή πληροφορία, της οποίας η ολοκλήρωση

οδηγεί σε σταδιακή απόκλιση λόγω θορύβου και μεροληψίας. Ο συνδυασμός τους επιτρέπει τη σταθεροποίηση του προσανατολισμού και τον περιορισμό της σωρευτικής απόκλισης. Πέραν της συμπληρωματικής προσέγγισης, η συνεργατική (cooperative) συγχώνευση αξιοποιεί πολλαπλές μετρήσεις για την ίδια μεταβλητή, ενισχύοντας τη στατιστική αξιοπιστία της εκτίμησης μέσω πλεονασμού πληροφορίας.

Σε πιθανοκρατικό πλαίσιο, η πολυαισθητηριακή συγχώνευση υλοποιείται μέσω διαδικασιών εκτίμησης κατάστασης, όπου τα διαφορετικά μοντέλα μέτρησης ενσωματώνονται σε ενιαίο σχήμα πρόβλεψης και διόρθωσης. Η αναδρομική ενημέρωση της κατάστασης επιτρέπει τη συνεπή ενσωμάτωση πολλαπλών πηγών πληροφορίας, εφόσον οι επιμέρους μετρήσεις θεωρούνται ανεξάρτητες δεδομένης της κατάστασης. Στο πλαίσιο αυτό, τα φίλτρα εκτίμησης που παρουσιάστηκαν προηγουμένως αποτελούν τις τυπικές υλοποιήσεις της αναδρομικής συγχώνευσης, ενσωματώνοντας το μοντέλο κίνησης στο στάδιο πρόβλεψης και τα μοντέλα μέτρησης στο στάδιο διόρθωσης.

Προχωρημένες προσεγγίσεις επιτρέπουν την προσαρμοστική αναπροσαρμογή των πινάκων θορύβου διεργασίας και μέτρησης, ώστε το φίλτρο να ανταποκρίνεται σε μεταβολές των συνθηκών λειτουργίας ή της ποιότητας των αισθητήρων. Η δυνατότητα αυτή ενισχύει την ανθεκτικότητα της εκτίμησης σε μη ιδανικά ή δυναμικά περιβάλλοντα.

Η συγχώνευση πληροφορίας δεν εξαλείφει το σφάλμα, αλλά μειώνει την αβεβαιότητα και αυξάνει την αξιοπιστία της εκτίμησης θέσης. Αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο της σύγχρονης αρχιτεκτονικής εντοπισμού, γεφυρώνοντας την κινηματική πρόβλεψη με τη διορθωτική πληροφορία που προέρχεται από το περιβάλλον.

2.4.5 Περιορισμοί μοντέλου και πραγματικές προκλήσεις

Η μαθηματική διατύπωση του εντοπισμού θέσης βασίζεται σε συγκεκριμένες παραδοχές σχετικά με το μοντέλο κίνησης, το μοντέλο μέτρησης και τη στατιστική περιγραφή του θορύβου. Στην πράξη, οι παραδοχές αυτές δεν ικανοποιούνται πλήρως, γεγονός που επηρεάζει άμεσα την αξιοπιστία της εκτίμησης. Η απόκλιση μεταξύ θεωρητικού μοντέλου και πραγματικής συμπεριφοράς αποτελεί θεμελιώδη πηγή σφάλματος σε κάθε σύστημα εντοπισμού θέσης.

Τα σφάλματα που επηρεάζουν την οδομετρία και τις αισθητηριακές μετρήσεις διακρίνονται σε συστηματικά (systematic) και μη συστηματικά (non-systematic). Τα συστηματικά σφάλματα προκύπτουν από σταθερές αποκλίσεις στις παραμέτρους του συστήματος, όπως λανθασμένη εκτίμηση της διαμέτρου τροχού ή της απόστασης μεταξύ των τροχών, και μπορούν σε σημαντικό βαθμό να περιοριστούν μέσω διαδικασιών βαθμονόμησης. Αντίθετα, τα μη συστηματικά σφάλματα οφείλονται σε απρόβλεπτες μεταβολές, όπως ολίσθηση, ανομοιογένεια επιφάνειας ή μικρομεταβολές τριβής, και δεν μπορούν να διορθωθούν με στατική παραμετροποίηση. Η στοχαστική φύση τους οδηγεί σε σταδιακή απόκλιση της εκτίμησης, ακόμη και όταν το μοντέλο είναι ορθά ρυθμισμένο.

Κεντρικό ρόλο σε αυτή την απόκλιση διαδραματίζει η παραβίαση της μη ολισθητικής υπόθεσης (non-holonomic constraint), η οποία αποτελεί βασική προϋπόθεση της κινηματικής περιγραφής των τροχοφόρων ρομπότ. Η υπόθεση αυτή θεωρεί ότι δεν υφίσταται εγκάρσια ολίσθηση στον τροχό. Σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, ιδίως κατά απότομες επιταχύνσεις, αλλαγές κατεύθυνσης ή κίνηση σε επιφάνειες χαμηλής πρόσφυσης, η υπόθεση αυτή δεν ισχύει αυστηρά, με αποτέλεσμα η πρόβλεψη του μοντέλου

να αποκλίνει από την πραγματική κίνηση. Η ολίσθηση δεν είναι απαραίτητα συμμετρική ούτε εύκολα μοντελοποιήσιμη, γεγονός που δυσχεραίνει την ακριβή παραμετροποίηση του πίνακα συνδιακύμανσης διεργασίας Q_k .

Επιπλέον, οι περισσότερες μέθοδοι τύπου Kalman προϋποθέτουν ότι οι πίνακες συνδιακύμανσης Q_k και R_k είναι γνωστοί και σταθεροί. Στην πράξη, όμως, η ένταση του θορύβου μεταβάλλεται δυναμικά, ανάλογα με τις συνθήκες περιβάλλοντος ή την απόδοση των αισθητήρων. Εσφαλμένη επιλογή των παραμέτρων αυτών μπορεί να οδηγήσει είτε σε υπερεκτίμηση της αξιοπιστίας του μοντέλου είτε σε υπερβολική ευαισθησία στις μετρήσεις. Για τον λόγο αυτό έχουν προταθεί προσεγγίσεις προσαρμοστικής εκτίμησης και μεταβλητής συνδιακύμανσης, καθώς και τεχνικές variational Bayesian εκτίμησης, οι οποίες επιτρέπουν δυναμική αναπροσαρμογή των παραμέτρων κατά τη διάρκεια λειτουργίας.

Ένα επιπλέον πρακτικό πρόβλημα αφορά την υποβάθμιση ή την απώλεια μετρήσεων. Σε πραγματικά περιβάλλοντα, αισθητήρες μπορεί να παρέχουν ελλιπή ή αλλοιωμένα δεδομένα λόγω απόκρυψης, ανακλάσεων, παρεμβολών ή ηλεκτρονικού θορύβου. Η αναδρομική συγχώνευση πληροφορίας οφείλει να διαχειρίζεται ασύγχρονες ή περιστασιακά μη διαθέσιμες μετρήσεις χωρίς να οδηγείται σε αριθμητική αστάθεια ή απότομη απόκλιση της εκτίμησης.

Ακόμη και με χρήση εξελιγμένων φίλτρων εκτίμησης, ο καθαρός εντοπισμός θέσης επί γνωστού μοντέλου κίνησης παρουσιάζει εγγενή όρια. Η συσσώρευση σφάλματος σε μακροχρόνια λειτουργία, ιδιαίτερα όταν η εξάρτηση από εξωτερικές αναφορές είναι περιορισμένη, οδηγεί σε σταδιακή υποβάθμιση της ακρίβειας. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει την ανάγκη για μεθόδους που δεν περιορίζονται στην εκτίμηση της στάσης, αλλά συνδυάζουν την εκτίμηση θέσης με τη συνεχή ανακατασκευή και βελτιστοποίηση της χωρικής αναπαράστασης του περιβάλλοντος.

2.5 Ταυτόχρονος Εντοπισμός Θέσης και Χαρτογράφηση (SLAM)

Η εκτίμηση θέσης (localization) προϋποθέτει την ύπαρξη γνωστού χάρτη του περιβάλλοντος. Σε αυτή την περίπτωση, το πρόβλημα διατυπώνεται ως η εκτίμηση της κατάστασης του ρομπότ $\mathbf{x}_k$ δεδομένων των εντολών κίνησης $\mathbf{u}_{1:k}$ και των μετρήσεων $\mathbf{z}_{1:k}$, υπό γνωστή χωρική αναπαράσταση. Ωστόσο, σε πλήθος πραγματικών εφαρμογών, το ρομπότ καλείται να λειτουργήσει σε άγνωστο περιβάλλον, όπου δεν υφίσταται εκ των προτέρων διαθέσιμη χαρτογραφική πληροφορία.

Η ανάγκη ταυτόχρονης εκτίμησης της θέσης και του περιβάλλοντος οδηγεί στη διατύπωση του προβλήματος SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). Στο πλαίσιο αυτό, το ρομπότ οφείλει να εκτιμήσει τη κοινή κατανομή:

$$p(\mathbf{x}_k, \mathbf{m} \mid \mathbf{z}_{1:k}, \mathbf{u}_{1:k}), \quad (31)$$

όπου $\mathbf{m}$ η αναπαράσταση του χάρτη. Το πρόβλημα παρουσιάζει εγγενή κυκλική εξάρτηση: για την εκτίμηση της θέσης απαιτείται γνώση του χάρτη, ενώ για την κατασκευή του χάρτη απαιτείται γνώση της θέσης. Η αλληλεξάρτηση αυτή καθιστά το SLAM μη γραμμικό και υψηλής διαστατικότητας πρόβλημα, με αυξημένες απαιτήσεις υπολογιστικής σταθερότητας.

Η σωρευτική απόκλιση της οδομετρίας, οι αβεβαιότητες αισθητήρων και η πιθανή παρουσία δυναμικών στοιχείων στο περιβάλλον καθιστούν αναγκαία την πιθανοκρατική διατύπωση και τη χρήση τεχνικών εκτίμησης κατάστασης και βελτιστοποίησης.

2.5.1 Αισθητήρες Χαρτογράφησης

Η ποιότητα και η σταθερότητα ενός συστήματος SLAM εξαρτάται άμεσα από τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται. Οι κυριότερες κατηγορίες αισθητήρων περιλαμβάνουν:

LiDAR Οι αισθητήρες LiDAR παρέχουν άμεσες μετρήσεις απόστασης μέσω εκπομπής και ανίχνευσης παλμών λέιζερ. Χαρακτηρίζονται από υψηλή γεωμετρική ακρίβεια και ανεξαρτησία από συνθήκες φωτισμού, καθιστώντας τους κατάλληλους για χαρτογράφηση εσωτερικών και εξωτερικών χώρων. Οι μετρήσεις τους επιτρέπουν άμεση κατασκευή πυκνών ή αραιών χωρικών αναπαραστάσεων.

Οπτικοί αισθητήρες Οι μονοχρωματικές, στερεοσκοπικές και RGB-D κάμερες χρησιμοποιούνται σε οπτικό SLAM. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στην εξαγωγή χαρακτηριστικών ή στην άμεση αξιοποίηση της φωτεινότητας των pixels. Παρέχουν πλούσια πληροφορία υφής, αλλά επηρεάζονται από μεταβολές φωτισμού και δυναμικά αντικείμενα.

IMU Οι μονάδες αδρανειακής μέτρησης προσφέρουν υψηλής συχνότητας δεδομένα επιτάχυνσης και γωνιακής ταχύτητας. Ενισχύουν τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της κίνησης και μειώνουν την εξάρτηση από εξωτερικές παρατηρήσεις, ιδιαίτερα σε περιόδους φτωχής οπτικής πληροφορίας.

Απόλυτες αναφορές Συστήματα όπως GPS ή RTK χρησιμοποιούνται κυρίως σε εξωτερικούς χώρους για παροχή απόλυτης θέσης. Ωστόσο, η ακρίβειά τους επηρεάζεται από παρεμβολές και γεωμετρικούς περιορισμούς του περιβάλλοντος.

2.5.2 Μέθοδοι και Τεχνικές

Οι μέθοδοι SLAM διαφοροποιούνται ως προς τον τύπο αισθητήρων, τη μαθηματική διατύπωση και τον τρόπο αναπαράστασης του περιβάλλοντος. Η σύγχρονη βιβλιογραφία διακρίνει κυρίως τις ακόλουθες κατηγορίες:

Visual SLAM Το Visual SLAM βασίζεται αποκλειστικά σε δεδομένα εικόνας από μονοχρωματικές, στερεοσκοπικές ή RGB-D κάμερες. Η εκτίμηση κίνησης προκύπτει μέσω γεωμετρικών συσχετίσεων μεταξύ διαδοχικών καρέ.

Οι μέθοδοι διακρίνονται σε:

- **Feature-Based Methods:** Εξάγουν διακριτά χαρακτηριστικά (π.χ. γωνίες, σημεία ενδιαφέροντος) και τα συσχετίζουν μεταξύ διαδοχικών εικόνων. Η εκτίμηση θέσης επιτυγχάνεται μέσω επίλυσης προβλημάτων γεωμετρικής ανακατασκευής (PnP, bundle adjustment). Παρουσιάζουν καλή ανθεκτικότητα σε μεγάλες μετακινήσεις αλλά εξαρτώνται από την ποιότητα των χαρακτηριστικών.
- **Direct Methods:** Δεν βασίζονται σε εξαγωγή χαρακτηριστικών, αλλά αξιοποιούν απευθείας την ένταση των pixels. Η εκτίμηση θέσης επιτυγχάνεται μέσω ελαχιστοποίησης φωτομετρικού σφάλματος. Προσφέρουν πυκνότερη αναπαράσταση αλλά απαιτούν υψηλή σταθερότητα φωτισμού.

Το Visual SLAM επηρεάζεται έντονα από μεταβολές φωτισμού, θολώσεις κίνησης και δυναμικά αντικείμενα, γεγονός που περιορίζει την απόδοσή του σε απαιτητικά περιβάλλοντα.

LiDAR SLAM Το LiDAR SLAM βασίζεται σε γεωμετρικές μετρήσεις απόστασης και κατασκευάζει τον χάρτη μέσω ευθυγράμμισης νεφών σημείων (point cloud registration).

Κεντρικές τεχνικές περιλαμβάνουν:

- ICP (Iterative Closest Point)
- Scan matching
- NDT (Normal Distributions Transform)

Η μέθοδος χαρακτηρίζεται από υψηλή γεωμετρική ακρίβεια και μειωμένη εξάρτηση από φωτισμό, αλλά απαιτεί αυξημένη υπολογιστική ισχύ, ιδιαίτερα σε 3D περιβάλλοντα.

Visual-Inertial SLAM Η συνδυαστική χρήση οπτικών δεδομένων και IMU οδηγεί σε συστήματα Visual-Inertial SLAM (VI-SLAM). Η IMU παρέχει υψηλής συχνότητας πληροφορία κίνησης, η οποία χρησιμοποιείται για πρόβλεψη μεταξύ διαδοχικών καρέ εικόνων. Η οπτική πληροφορία λειτουργεί ως διόρθωση της αδρανειακής πρόβλεψης.

Η σύζευξη μπορεί να υλοποιηθεί:

- **Χαλαρά συνδεδεμένα (loosely coupled):** Ξεχωριστή εκτίμηση οπτικής και αδρανειακής πληροφορίας και συγχώνευση σε ανώτερο επίπεδο.
- **Στενά συνδεδεμένα (tightly coupled):** Κοινή βελτιστοποίηση όλων των παρατηρήσεων σε ενιαίο πρόβλημα.

Η δεύτερη προσέγγιση προσφέρει αυξημένη ακρίβεια και ανθεκτικότητα σε απότομες κινήσεις.

Graph-Based και Factor Graph SLAM Σε σύγχρονες υλοποιήσεις, το πρόβλημα SLAM διατυπώνεται ως γράφος περιορισμών (pose graph ή factor graph). Οι κόμβοι αντιστοιχούν σε καταστάσεις (poses) και οι ακμές σε περιορισμούς που προκύπτουν από μετρήσεις ή οδομετρία.

Η τελική εκτίμηση προκύπτει μέσω μη γραμμικής βελτιστοποίησης ελαχιστοποιώντας συνολικό σφάλμα:

$$\min_{\mathbf{x}} \sum_i \|\mathbf{e}_i(\mathbf{x})\|_{\Omega_i}^2 \quad (32)$$

όπου $\mathbf{e}_i$ τα επιμέρους σφάλματα και Ω_i οι πίνακες πληροφορίας.

Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει αποδοτική διαχείριση μεγάλων περιβαλλόντων και αποτελεσματική διόρθωση μέσω loop closure.

Dense και Sparse Αναπαράστασεις Οι μέθοδοι διακρίνονται επίσης ως προς την πυκνότητα της χωρικής αναπαράστασης:

- **Sparse SLAM:** Χρησιμοποιεί περιορισμένο σύνολο χαρακτηριστικών σημείων.
- **Dense SLAM:** Κατασκευάζει πλήρη γεωμετρική ή ημι-πυκνή αναπαράσταση.

Οι dense μέθοδοι προσφέρουν λεπτομερέστερη αναπαράσταση αλλά αυξημένες υπολογιστικές απαιτήσεις.

2.5.3 Περιορισμοί και Ανοικτά Ερευνητικά Ζητήματα

Παρά τη σημαντική πρόοδο των τελευταίων δεκαετιών, το πρόβλημα SLAM παραμένει ενεργό πεδίο έρευνας. Η διαχείριση δυναμικών περιβαλλόντων, η κλιμάκωση σε μεγάλης έκτασης περιοχές, η μείωση υπολογιστικού κόστους σε ενσωματωμένες πλατφόρμες και η σημασιολογική κατανόηση του χώρου αποτελούν βασικές προκλήσεις.

Σύγχρονες ερευνητικές κατευθύνσεις περιλαμβάνουν τη σημασιολογική χαρτογράφηση (semantic SLAM), τη χρήση νευρωνικών αναπαραστάσεων χώρου (neural implicit maps), καθώς και την ενσωμάτωση τεχνικών βαθιάς μάθησης στην ανίχνευση χαρακτηριστικών και στο loop closure.

Η εξέλιξη των μεθόδων SLAM συνδέεται άμεσα με την πρόοδο στην υπολογιστική ισχύ και στις τεχνικές βελτιστοποίησης, καθιστώντας το θεμέλιο λίθο για σύγχρονα αυτόνομα ρομποτικά συστήματα.

2.6 Πλοήγηση Κινητών Ρομπότ

Η χαρτογράφηση και ο εντοπισμός θέσης αποτελούν θεμελιώδη προαπαιτούμενα για την αυτόνομη λειτουργία ενός κινητού ρομπότ, καθώς παρέχουν αναπαράσταση του περιβάλλοντος και εκτίμηση της κατάστασής του σε αυτό.

Ωστόσο, η διαθεσιμότητα ενός χάρτη και μιας εκτίμησης θέσης δεν συνεπάγεται αυτομάτως την ικανότητα αξιόπιστης κίνησης. Για να καταστεί δυνατή η μετάβαση του ρομπότ προς έναν επιθυμητό στόχο, απαιτείται η λήψη αποφάσεων και η εκτέλεση κίνησης σε πραγματικό περιβάλλον.

Η πλοήγηση έρχεται να καλύψει αυτό το κενό, αντιμετωπίζοντας το πρόβλημα της μετακίνησης ως διαδικασία που εκτελείται υπό συνθήκες αβεβαιότητας, δυναμικών μεταβολών και λειτουργικών περιορισμών, με πρωτεύον κριτήριο την ασφάλη και αξιόπιστη κίνηση του ρομπότ.

Σε αντίθεση με τον στατικό υπολογισμό μιας διαδρομής, η κίνηση ενός ρομπότ στο φυσικό περιβάλλον απαιτεί συνεχή προσαρμογή και αξιόπιστη εκτέλεση των αποφάσεων, ακόμη και όταν η πληροφορία για το περιβάλλον είναι ελλιπής ή μεταβάλλεται με τον χρόνο.

Για τον λόγο αυτό, η πλοήγηση αποτελεί κεντρικό και ιδιαίτερα σύνθετο πρόβλημα της ρομποτικής, το οποίο δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί ως μεμονωμένο στάδιο υπολογισμού, αλλά ως ολοκληρωμένη διαδικασία.

2.6.1 Αρχιτεκτονική θεώρηση

Η πλοήγηση κινητών ρομπότ μπορεί να διατυπωθεί σε θεμελιώδες επίπεδο ως πρόβλημα λήψης αποφάσεων, στο οποίο ζητείται η παραγωγή μιας ακολουθίας ενεργειών $A^* = \{a_0, a_1, a_2, \dots\}$, όπου κάθε a_i αντιστοιχεί σε μια επιμέρους ενέργεια. Η ακολουθία αυτή στοχεύει στη μεταφορά του ρομπότ από μια αρχική κατάσταση s σε έναν καθορισμένο στόχο g , εντός ενός περιβάλλοντος E , λαμβάνοντας υπόψη τόσο την αποφυγή συγκρούσεων όσο και τη φυσική εκτέλεση της κίνησης.

Η διαδικασία πραγματοποιείται με τρόπο που ελαχιστοποιεί μια συνάρτηση κόστους $J(E, s, g)$, η οποία εκφράζει τα κριτήρια βελτιστοποίησης της κίνησης και επιτρέπει την ενσωμάτωση παραμέτρων όπως η ασφάλεια, η αποδοτικότητα και η ομαλότητα της μετακίνησης [50].

Η διατύπωση αυτή αποτυπώνει συνοπτικά τον πυρήνα του προβλήματος της πλοήγησης, χωρίς να δεσμεύεται σε συγκεκριμένες μεθόδους υλοποίησης ή αισθητηριακές διατάξεις, αναδεικνύοντας τη γενικότητα της έννοιας και την ανεξαρτησία της από επιμέρους τεχνολογικές επιλογές.

Υπό αυτό το πρίσμα, η πλοήγηση δεν συνιστά μεμονωμένο αλγοριθμικό στάδιο, αλλά σύνθετη λειτουργία που προκύπτει από τη συνεργασία πολλαπλών υποσυστημάτων.

Η αντίληψη του περιβάλλοντος, η εκτίμηση της κατάστασης του ρομπότ, η διαδικασία λήψης αποφάσεων και η εκτέλεση της κίνησης συνδέονται στενά και αλληλεπιδρούν δυναμικά, επηρεάζοντας καθοριστικά τη συνολική συμπεριφορά μετακίνησης.

Στο πλαίσιο αυτό, η αποτυχία της πλοήγησης δεν μπορεί να αποδοθεί αποκλειστικά σε έναν «κακό» αλγόριθμο, αλλά συχνά αποτελεί αποτέλεσμα ασυνέπειας ή αλληλεπίδρασης μεταξύ των επιμέρους λειτουργικών σταδίων. Ανακρίβειες στην αντίληψη, σφάλματα στην εκτίμηση κατάστασης ή περιορισμοί στην αξιόπιστη εκτέλεση της κίνησης είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε αποτυχία, ακόμη και όταν ο σχεδιασμός θεωρείται θεωρητικά βέλτιστος.

Η συστημική φύση του προβλήματος, σε συνδυασμό με τις διαφορετικές χρονικές και χωρικές κλίμακες

στις οποίες λαμβάνονται οι αποφάσεις, καθιστά σαφές ότι η πλοήγηση δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί μονολιθικά. Οι περιορισμοί πραγματικού χρόνου και οι υπολογιστικές απαιτήσεις επιβάλλουν την υιοθέτηση ιεραρχικής αρχιτεκτονικής, στην οποία οι λειτουργίες κατανέμονται σε επίπεδα με διακριτό ρόλο και χρονικό ορίζοντα.

Στο πλαίσιο αυτής της ιεραρχικής οργάνωσης, σε ανώτερο επίπεδο λαμβάνονται αποφάσεις που αφορούν τη γενική πορεία του ρομπότ προς τον στόχο. Σε κατώτερο επίπεδο, η κίνηση προσαρμόζεται τοπικά σε πραγματικό χρόνο, ώστε να αντιμετωπίζονται άμεσες μεταβολές, αβεβαιότητες και εμποδία. Τέλος, η εκτέλεση της κίνησης διασφαλίζει τη μετάφραση των αποφάσεων σε φυσική και δυναμικά εφικτή μετακίνηση του ρομπότ.

Ο διαχωρισμός αυτός επιτρέπει τη σαφή αποσύνδεση μεταξύ μακροπρόθεσμου σχεδιασμού και βραχυπρόθεσμης προσαρμογής και αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό των σύγχρονων αρχιτεκτονικών πλοήγησης. Η ιεραρχική οργάνωση δεν αποτελεί απλώς σχεδιαστική επιλογή, αλλά άμεση συνέπεια της φύσης του προβλήματος, καθώς η αβεβαιότητα, οι δυναμικές μεταβολές του περιβάλλοντος και οι λειτουργικοί περιορισμοί του ρομπότ καθιστούν αναγκαίο τον διαχωρισμό μεταξύ στρατηγικού σχεδιασμού και τοπικής προσαρμογής.

2.6.2 Σχεδιασμός διαδρομής

Ο σχεδιασμός διαδρομής αποτελεί βασική λειτουργία της πλοήγησης και αναφέρεται στον καθορισμό μιας πορείας που συνδέει την αρχική κατάσταση του ρομπότ με έναν επιθυμητό στόχο εντός του περιβάλλοντος. Σε θεμελιώδες επίπεδο, ο ρόλος του σχεδιασμού διαδρομής είναι να παρέχει καθοδήγηση υψηλού επιπέδου, προσδιορίζοντας *πού* πρέπει να κινηθεί το ρομπότ ώστε να προσεγγίσει τον στόχο του.

Η διαδικασία αυτή βασίζεται κυρίως σε γεωμετρική αναπαράσταση του περιβάλλοντος και στην αποφυγή περιοχών που θεωρούνται μη προσπελάσιμες. Ο σχεδιασμός διαδρομής δεν αποσκοπεί στην πλήρη περιγραφή της κίνησης, αλλά στον προσδιορισμό μιας εφικτής και συνεκτικής πορείας, η οποία λειτουργεί ως σημείο αναφοράς για τα κατώτερα επίπεδα της πλοήγησης. Κατά συνέπεια, ο σχεδιασμός διαδρομής δεν ενσωματώνει άμεσα χρονικές ή δυναμικές παραμέτρους, όπως ταχύτητα και επιτάχυνση, ούτε εγγύαται από μόνος του την ασφαλή εκτέλεση της κίνησης.

Στη βιβλιογραφία γίνεται συχνά διάκριση μεταξύ καθολικού (global) και τοπικού (local) σχεδιασμού διαδρομής. Ο καθολικός σχεδιασμός αφορά τη δημιουργία μιας συνολικής πορείας προς τον στόχο, λαμβάνοντας υπόψη την ευρύτερη δομή του περιβάλλοντος και λειτουργώντας σε μακροπρόθεσμο χωρικό ορίζοντα. Αντίθετα, ο τοπικός σχεδιασμός διαδρομής εξετάζει περιορισμένες περιοχές του χώρου και επιτρέπει την επικαιροποίηση ή προσαρμογή της πορείας σε μικρότερη κλίμακα, χωρίς ωστόσο να μεταβάλλει τον θεμελιώδη χαρακτήρα της διαδικασίας ως γεωμετρικής καθοδήγησης.

Παρά τη χρησιμότητά του, ο σχεδιασμός διαδρομής παρουσιάζει εγγενείς περιορισμούς σε δυναμικά και αβέβαια περιβάλλοντα. Η ύπαρξη κινούμενων εμποδίων, η ατελής πληροφορία για το περιβάλλον και οι απαιτήσεις λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο καθιστούν αδύνατη την αποκλειστική βασιζόμενη σε αυτόν πλοήγηση. Για τον λόγο αυτό, ο σχεδιασμός διαδρομής δεν μπορεί να θεωρηθεί αυτοτελής λύση, αλλά συνιστά μέρος μιας ευρύτερης αρχιτεκτονικής, στην οποία η παρεχόμενη πορεία συμπληρώνεται από μηχανισμούς τοπικής προσαρμογής και φυσικής εκτέλεσης της κίνησης.

2.6.3 Αποφυγή εμποδίων και εκτέλεση κίνησης

Η αποφυγή εμποδίων και η εκτέλεση κίνησης αποτελούν το λειτουργικό επίπεδο της πλοήγησης, στο οποίο η επιθυμητή πορεία που προκύπτει από τον σχεδιασμό διαδρομής μεταφράζεται σε πραγματική, ασφαλή και δυναμικά εφικτή κίνηση. Σε αντίθεση με τον σχεδιασμό διαδρομής, ο οποίος λειτουργεί σε μακροπρόθεσμο και αφαιρετικό επίπεδο, η αποφυγή εμποδίων αφορά άμεσες αποφάσεις που λαμβάνονται σε πραγματικό χρόνο, με κύριο στόχο την αποτροπή συγκρούσεων και τη διατήρηση της ασφάλειας του συστήματος.

Σε δυναμικά περιβάλλοντα, η παρουσία κινούμενων ή απρόβλεπτων εμποδίων καθιστά αδύνατη την πλήρη πρόβλεψη της κίνησης μέσω στατικού σχεδιασμού. Η αποφυγή εμποδίων λειτουργεί ως μηχανισμός τοπικής προσαρμογής, ο οποίος επιτρέπει την τροποποίηση της στιγμιαίας κίνησης του ρομπότ χωρίς να απαιτείται εκ νέου καθολικός επανασχεδιασμός της διαδρομής. Με τον τρόπο αυτό, διασφαλίζεται η συνέχιση της πλοήγησης ακόμη και όταν το περιβάλλον μεταβάλλεται απρόβλεπτα ή η διαθέσιμη πληροφορία είναι ελλιπής.

Η αποφυγή εμποδίων συνδέεται στενά με τον σχεδιασμό πορείας και την εκτέλεση της κίνησης, καθώς λαμβάνει υπόψη δυναμικούς και κινηματικούς περιορισμούς του ρομπότ. Παράμετροι όπως η μέγιστη ταχύτητα, η επιτάχυνση, η ικανότητα στροφής και η ομαλότητα της κίνησης επηρεάζουν άμεσα τις εφικτές αντιδράσεις του συστήματος σε τοπικό επίπεδο. Ως εκ τούτου, η αποφυγή εμποδίων δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί ως καθαρά γεωμετρικό πρόβλημα, αλλά ως διαδικασία που ενσωματώνει τη φυσική συμπεριφορά του ρομπότ.

Στη βιβλιογραφία, οι μέθοδοι αποφυγής εμποδίων συχνά βασίζονται στην αξιολόγηση του τοπικού κινδύνου και στη ρύθμιση της στιγμιαίας κίνησης με σκοπό την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας σύγκρουσης. Η έννοια του κινδύνου επιτρέπει την αντιμετώπιση αβεβαιοτήτων και δυναμικών μεταβολών, ιδίως σε περιβάλλοντα όπου η συμπεριφορά των εμποδίων δεν είναι πλήρως προβλέψιμη.

Η εκτέλεση της κίνησης αποτελεί το τελικό στάδιο της πλοήγησης, στο οποίο οι αποφάσεις αποφυγής και προσαρμογής μετατρέπονται σε εντολές κίνησης προς το σύστημα ενεργοποίησης. Η συνέπεια μεταξύ σχεδιασμού διαδρομής, τοπικής προσαρμογής και εκτέλεσης είναι κρίσιμη για τη σταθερότητα και την αξιοπιστία της πλοήγησης. Ασυνέπειες μεταξύ των επιπέδων αυτών είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε ασταθή συμπεριφορά, ακόμη και όταν κάθε επιμέρους στάδιο θεωρείται θεωρητικά ορθό.

Συνεπώς, η αποφυγή εμποδίων και η εκτέλεση κίνησης δεν αποτελούν ανεξάρτητο πρόβλημα, αλλά αναπόσπαστο μέρος της συνολικής αρχιτεκτονικής πλοήγησης. Η λειτουργία τους σε πραγματικό χρόνο και η άμεση σύνδεσή τους με τη φυσική συμπεριφορά του ρομπότ καθιστούν το επίπεδο αυτό καθοριστικό για την επιτυχή και ασφαλή αυτόνομη μετακίνηση.

2.6.4 Παράγοντες δυσκολίας

Η πολυπλοκότητα της πλοήγησης προκύπτει από τη συνδυασμένη επίδραση πολλών παραγόντων, οι οποίοι θέτουν θεμελιώδη όρια στην απόδοση κάθε συστήματος πλοήγησης. Οι παράγοντες αυτοί δεν λειτουργούν ανεξάρτητα, αλλά αλληλεπιδρούν σε διαφορετικά επίπεδα, επηρεάζοντας τόσο τον σχεδιασμό διαδρομής όσο και την τοπική προσαρμογή και την εκτέλεση της κίνησης.

Οι κυριότεροι από αυτούς συνοψίζονται ως εξής:

- **Αβεβαιότητα:** Η πλοήγηση βασίζεται σε εκτιμώμενη και όχι ακριβή πληροφορία σχετικά με το περιβάλλον και την κατάσταση του ρομπότ. Η ατελής αντίληψη και η συσσώρευση σφαλμάτων επηρεάζουν άμεσα τη λήψη αποφάσεων και καθιστούν αναγκαία τη συνεχή αναπροσαρμογή της πορείας κατά τη διάρκεια της κίνησης.
- **Δυναμικότητα του περιβάλλοντος:** Η παρουσία κινούμενων εμποδίων και μεταβαλλόμενων συνθηκών καθιστά τον στατικό σχεδιασμό ανεπαρκή, ακόμη και όταν βασίζεται σε ακριβή γεωμετρικά μοντέλα. Σε τέτοιες περιπτώσεις, απαιτούνται μηχανισμοί τοπικής αντίδρασης σε πραγματικό χρόνο, ώστε να διασφαλίζεται η ασφαλής συνέχιση της πλοήγησης χωρίς συνεχή καθολικό επανασχεδιασμό.
- **Κινηματικοί και λειτουργικοί περιορισμοί:** Η φυσική κατασκευή και η διάταξη κίνησης του ρομπότ επιβάλλουν περιορισμούς στις εφικτές κινήσεις, ανεξάρτητα από την ποιότητα του σχεδιασμού διαδρομής. Παράμετροι όπως η μέγιστη ταχύτητα, η επιτάχυνση και η ικανότητα στροφής επηρεάζουν άμεσα τη συμπεριφορά πλοήγησης και τη σταθερότητα της εκτέλεσης.
- **Δομή και προβλεψιμότητα του περιβάλλοντος:** Η πλοήγηση διαφοροποιείται σημαντικά μεταξύ δομημένων και μη δομημένων περιβαλλόντων. Σε δομημένους χώρους, η γεωμετρία και οι περιορισμοί κίνησης είναι συχνά προβλέψιμοι, διευκολύνοντας τον σχεδιασμό και την εκτέλεση. Αντίθετα, σε μη δομημένα ή ημι-δομημένα περιβάλλοντα, η ακανόνιστη γεωμετρία, η μεταβλητότητα και η αβεβαιότητα ως προς τη βατότητα των επιφανειών αυξάνουν τις απαιτήσεις σε τοπική προσαρμογή και αποφυγή εμποδίων.
- **Υπολογιστικοί και χρονικοί περιορισμοί:** Η απαίτηση λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο επιβάλλει συμβιβασμούς μεταξύ βέλτιστης λύσης και υπολογιστικής αποδοτικότητας. Οι περιορισμοί αυτοί περιορίζουν την πολυπλοκότητα των μεθόδων που μπορούν να εφαρμοστούν στην πράξη και αποτελούν βασικό λόγο υιοθέτησης ιεραρχικών και προσεγγιστικών αρχιτεκτονικών πλοήγησης.

Συνολικά, οι παραπάνω παράγοντες καταδεικνύουν ότι η πλοήγηση δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί ως απομονωμένο πρόβλημα σχεδιασμού, αλλά ως πολυεπίπεδη διαδικασία που απαιτεί συντονισμό μεταξύ σχεδιασμού διαδρομής, τοπικής προσαρμογής και εκτέλεσης της κίνησης σε πραγματικό περιβάλλον.

Τα τελευταία χρόνια, η ερευνητική δραστηριότητα στον τομέα της πλοήγησης κινητών ρομπότ έχει στραφεί έντονα προς την αξιοποίηση τεχνικών μηχανικής μάθησης, με στόχο τη βελτίωση επιμέρους λειτουργιών, όπως η λήψη αποφάσεων, η τοπική προσαρμογή και η αποφυγή εμποδίων. Οι προσεγγίσεις αυτές επιχειρούν να αντιμετωπίσουν την πολυπλοκότητα και την αβεβαιότητα των πραγματικών περιβαλλόντων μέσω δεδομένων και εκμάθησης συμπεριφορών, περιορίζοντας την ανάγκη για ρητό μοντελισμό.

Παρά τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα σε ελεγχόμενα ή προσομοιωμένα περιβάλλοντα, η ευρεία εφαρμογή καθαρά μαθησιακών προσεγγίσεων σε πραγματικά συστήματα πλοήγησης παραμένει περιορισμένη. Ζητήματα όπως η γενίκευση σε άγνωστα περιβάλλοντα, η έλλειψη εγγυήσεων ασφάλειας, η μειωμένη ερμηνευσιμότητα και οι αυξημένες απαιτήσεις σε δεδομένα καθιστούν τις μεθόδους αυτές δύσκολα αξιοποιήσιμες σε εφαρμογές όπου η αξιοπιστία αποτελεί κρίσιμο παράγοντα.

Ως αποτέλεσμα, η σύγχρονη τάση στη βιβλιογραφία δεν επικεντρώνεται στην αντικατάσταση των κλασικών μεθόδων πλοήγησης, αλλά στην ανάπτυξη υβριδικών αρχιτεκτονικών, στις οποίες μαθησιακά στοιχεία ενσωματώνονται συμπληρωματικά σε καθιερωμένα συστημικά πλαίσια. Οι αρχιτεκτονικές αυτές συνδυάζουν τη σταθερότητα, τη διαφάνεια και την προβλεψιμότητα των κλασικών προσεγγίσεων με την προσαρμοστικότητα των μαθησιακών μεθόδων, επιτυγχάνοντας ισορροπία μεταξύ απόδοσης και αξιοπιστίας σε πραγματικά περιβάλλοντα.

Οι παρατηρούμενοι περιορισμοί υπογραμμίζουν ότι, παρά την ταχεία εξέλιξη των τεχνικών μηχανικής μάθησης, η πλοήγηση κινητών ρομπότ παραμένει κατεξοχήν συστημικό πρόβλημα. Η αποτελεσματική αντιμετώπισή του απαιτεί συνδυασμό θεωρητικά θεμελιωμένων μεθόδων, αρχιτεκτονικής οργάνωσης και επιλεκτικής αξιοποίησης σύγχρονων τεχνικών, παρά την αποκλειστική εξάρτηση από μία και μόνο προσέγγιση.

2.6.5 Σύνοψη

Η πλοήγηση κινητών ρομπότ αποτελεί σύνθετη διαδικασία, η οποία καθορίζεται από αβεβαιότητα, δυναμικές συνθήκες και λειτουργικούς περιορισμούς. Η ανάλυση των βασικών παραγόντων που παρουσιάστηκαν στο παρόν κεφάλαιο παρέχει το θεωρητικό πλαίσιο για την κατανόηση και αξιολόγηση σύγχρονων αρχιτεκτονικών πλοήγησης.

Κεφάλαιο 3ο: Robot Operating System (ROS)

Η ανάπτυξη σύγχρονων ρομποτικών συστημάτων χαρακτηρίζεται από αυξημένη πολυπλοκότητα τόσο σε επίπεδο υλικού όσο και σε επίπεδο λογισμικού. Ένα κινητό ρομπότ ενσωματώνει πολλαπλούς αισθητήρες, ενεργοποιητές, αλγορίθμους εκτίμησης κατάστασης, χαρτογράφησης και πλοήγησης, οι οποίοι οφείλουν να λειτουργούν συντονισμένα και με χρονική συνέπεια. Η ανάγκη για ένα τυποποιημένο ενδιάμεσο λογισμικό, ικανό να υποστηρίζει κατανεμημένη εκτέλεση, επαναχρησιμοποίηση κώδικα και επεκτασιμότητα, οδήγησε στην ανάπτυξη του Robot Operating System (ROS).

3.1 Ιδεολογία και αρχιτεκτονική

Το ROS δεν αποτελεί λειτουργικό σύστημα με την κλασική έννοια, αλλά ένα οικοσύστημα λογισμικού που στοχεύει στη συστηματική οργάνωση της ανάπτυξης ρομποτικών εφαρμογών. Σχεδιάστηκε ως κοινή πλατφόρμα, η οποία επιτρέπει σε ερευνητικές και βιομηχανικές ομάδες να αναπτύσσουν, να ανταλλάσσουν και να επαναχρησιμοποιούν λογισμικά υποσυστήματα με ενιαίο τρόπο [89].

Η βασική του ιδεολογία στηρίζεται στη διαχωρισμένη ανάπτυξη λειτουργικών μονάδων και στην ύπαρξη τυποποιημένων διεπαφών, ώστε διαφορετικά υποσυστήματα να μπορούν να συνδυάζονται χωρίς να απαιτείται ενιαία υλοποίηση ή κοινό εσωτερικό σχεδιαστικό μοντέλο. Η προσέγγιση αυτή ενισχύει τη φορητότητα του λογισμικού και επιτρέπει τη σταδιακή εξέλιξη ενός συστήματος χωρίς συνολικό ανασχεδιασμό.

Επιπλέον, το ROS ακολουθεί γλωσσικά ουδέτερο σχεδιασμό (language agnostic design), επιτρέποντας την υλοποίηση διαφορετικών τμημάτων μιας εφαρμογής σε διαφορετικές γλώσσες προγραμματισμού, όπως C++ και Python, μέσω των αντίστοιχων βιβλιοθηκών-πελατών (client libraries), οι οποίες υλοποιούνται πάνω από έναν κοινό πυρήνα σε γλώσσα C. Οι μηχανισμοί επικοινωνίας και οι ορισμοί μηνυμάτων είναι ανεξάρτητοι της γλώσσας υλοποίησης, διασφαλίζοντας διαλειτουργικότητα μεταξύ ετερογενών λογισμικών μονάδων.

3.1.1 ROS 1: αρχιτεκτονική και περιορισμοί

Η πρώτη γενιά της πλατφόρμας υλοποίησε τις βασικές αρχές του ROS με κύρια στόχευση την ακαδημαϊκή έρευνα και την ανάπτυξη πρωτοτύπων ρομποτικών συστημάτων. Η αρχιτεκτονική της ανταποκρινόταν σε περιβάλλοντα με μεμονωμένα ρομπότ, επαρκείς υπολογιστικούς πόρους και αξιόπιστη δικτυακή υποδομή.

Το ROS 1 βασιζόταν σε κεντρικό διαχειριστή (*ROS Master*), ο οποίος ήταν υπεύθυνος για την ανακάλυψη των κόμβων και την εγκαθίδρυση των συνδέσεων. Μετά τη διαδικασία ανακάλυψης, η ανταλλαγή δεδομένων πραγματοποιούνταν απευθείας μεταξύ κόμβων, κυρίως μέσω του πρωτοκόλλου TCPROS (TCP/IP), ενώ υποστηριζόταν και UDPROS (UDP) για περιπτώσεις χαμηλότερης καθυστέρησης.

Οι βιβλιοθήκες-πελάτες (π.χ. `roscpp`, `rospy`) παρείχαν το προγραμματιστικό μοντέλο υλοποίησης κόμβων και μηχανισμών επικοινωνίας. Για βελτιστοποίηση της απόδοσης σε ανταλλαγή μεγάλων μηνυμάτων εισήχθη το *Nodelet API*, το οποίο επέτρεπε εκτέλεση πολλαπλών κόμβων στην ίδια διεργασία,

μειώνοντας τις αντιγραφές μνήμης.

Παρά την επιτυχία του σε ερευνητικά περιβάλλοντα, η ύπαρξη κεντρικού Master αποτελούσε σημείο μοναδικής αστοχίας (*single point of failure*). Επιπλέον, η αρχιτεκτονική δεν είχε σχεδιαστεί εξ αρχής για μεγάλης κλίμακας καταναμεμένα ή βιομηχανικά συστήματα, ούτε για εφαρμογές με αυστηρές απαιτήσεις χρονικής προβλεψιμότητας [90].

3.1.2 ROS 2: σχεδιασμός και εξέλιξη

Η αυξανόμενη αξιοποίηση του ROS σε πολυρομποτικά, βιομηχανικά και ενσωματωμένα συστήματα ανέδειξε θεμελιώδεις περιορισμούς της αρχικής αρχιτεκτονικής, όπως η ύπαρξη κεντρικού διαχειριστή, η περιορισμένη υποστήριξη πραγματικού χρόνου και η έλλειψη ενσωματωμένων μηχανισμών ασφάλειας. Η δεύτερη γενιά του συστήματος προέκυψε ως ουσιαστικός επανασχεδιασμός του μεσολογισμικού με στόχο την κλιμάκωση, την ανθεκτικότητα και την προβλεψιμότητα της επικοινωνίας σε καταναμεμένα περιβάλλοντα [91].

Σε επίπεδο λειτουργικού συστήματος, υποστηρίζονται Linux, Windows και macOS, ενώ παρέχεται δυνατότητα ενσωμάτωσης σε περιβάλλοντα πραγματικού χρόνου (RTOS) μέσω της αρχιτεκτονικής micro-ROS και της αξιοποίησης DDS-XRCE για ενσωματωμένες πλατφόρμες [92]. Η επιλογή αυτή επιτρέπει την ανάπτυξη εφαρμογών τόσο σε υπολογιστικά συστήματα γενικού σκοπού όσο και σε μικροελεγκτές με περιορισμένους πόρους.

Η αρχιτεκτονική είναι αποκεντρωμένη και δεν περιλαμβάνει κεντρικό μηχανισμό συντονισμού. Η δυναμική ανίχνευση και συσχέτιση οντοτήτων επικοινωνίας υλοποιείται μέσω του Data Distribution Service (DDS), το οποίο παρέχει μηχανισμό peer-to-peer επικοινωνίας και καταναμεμένης ανακάλυψης. Κάθε κόμβος ROS 2 δημιουργεί έναν DDS participant, μέσω του οποίου δηλώνονται οι οντότητες επικοινωνίας και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά τους. Οι participants ανταλλάσσουν μεταδεδομένα και, εφόσον διαπιστωθεί συμβατότητα, η σύνδεση μεταξύ publisher και subscriber εγκαθιδρύεται αυτόματα. Η απομόνωση ανεξάρτητων συστημάτων επιτυγχάνεται μέσω του Domain ID, επιτρέποντας την ταυτόχρονη λειτουργία πολλαπλών ROS 2 συστημάτων στο ίδιο δίκτυο [93].

Η επιλογή του DDS ως υποκείμενου μηχανισμού επικοινωνίας επιτρέπει την αξιοποίηση πολιτικών Ποιότητας Υπηρεσίας (Quality of Service - QoS). Το πρότυπο DDS ορίζει ευρύ φάσμα πολιτικών· ωστόσο, μέσω του ROS Middleware Interface (RMW) εκτίθεται στο επίπεδο εφαρμογής ένα βασικό και τυποποιημένο υποσύνολο πολιτικών, το οποίο καλύπτει τις συνηθέστερες ανάγκες ρομποτικών εφαρμογών. Προχωρημένες ρυθμίσεις μπορούν να αξιοποιηθούν σε χαμηλότερο επίπεδο, ανάλογα με την υλοποίηση του επιλεγμένου DDS [94]. Μεταξύ των βασικών πολιτικών που υποστηρίζονται περιλαμβάνονται:

- **Reliability:** Επιλογή μεταξύ αξιόπιστης μετάδοσης (reliable) και μετάδοσης βέλτιστης προσπάθειας (best-effort).
- **History:** Διατήρηση όλων των μηνυμάτων (keep all) ή μόνο των πιο πρόσφατων (keep last).
- **Depth:** Καθορισμός του πλήθους αποθηκευμένων μηνυμάτων όταν χρησιμοποιείται πολιτική keep last.

- **Deadline:** Μέγιστο επιτρεπτό χρονικό διάστημα μεταξύ διαδοχικών δημοσιεύσεων.
- **Durability:** Διατήρηση δεδομένων για νέους συνδρομητές (transient local) ή μη διατήρηση (volatile).

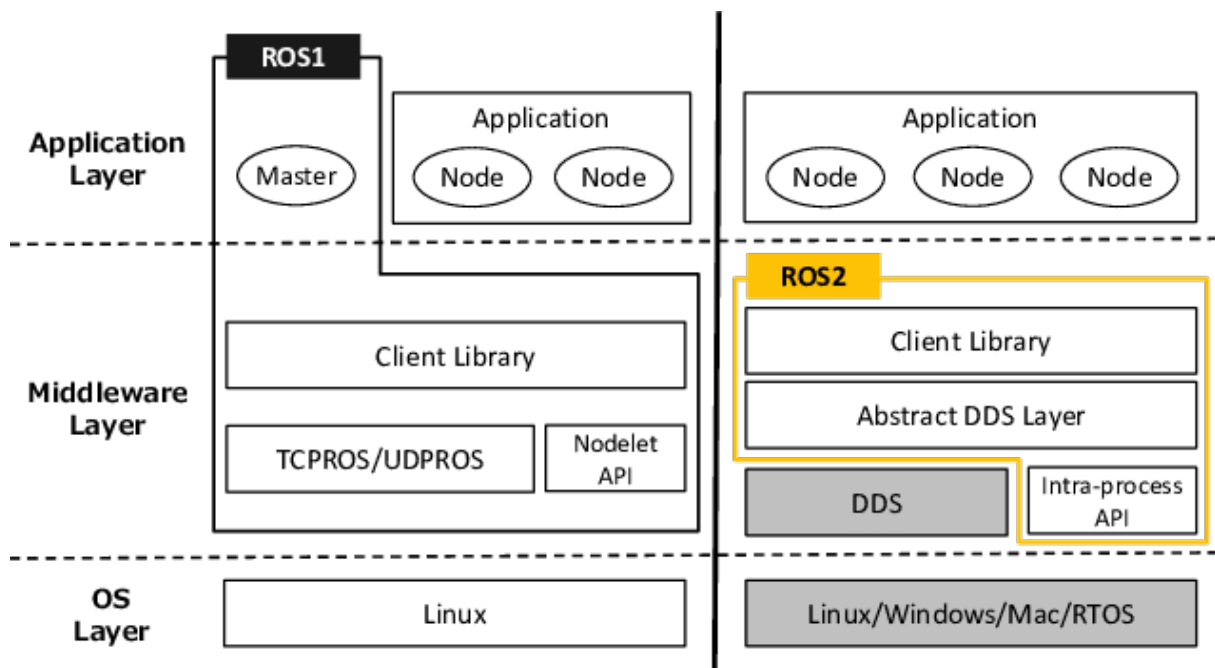
Η παραμετροποίηση των παραπάνω πολιτικών επιτρέπει έλεγχο των συμβιβασμών μεταξύ καθυστέρησης, αξιοπιστίας και προβλεψιμότητας της επικοινωνίας [91].

Σε επίπεδο λογισμικού, εισάγεται το αφαιρετικό επίπεδο ROS Middleware Interface (RMW), το οποίο διαμεσολαβεί μεταξύ της βιβλιοθήκης πελάτη (rcl) και της εκάστοτε υλοποίησης DDS. Μέσω του επιπέδου αυτού επιτυγχάνεται η εναλλακτική χρήση διαφορετικών middleware (π.χ. Cyclone DDS ή Fast DDS) χωρίς τροποποίηση του κώδικα εφαρμογής, ενώ παράλληλα εκτίθενται οι αντίστοιχες πολιτικές QoS στο επίπεδο προγραμματισμού [92]. Η στρωματοποιημένη δομή rcl-rmw-DDS διασφαλίζει ανεξαρτησία από την υποκείμενη υποδομή επικοινωνίας.

Το μοντέλο εκτέλεσης επανασχεδιάζεται μέσω των executors, οι οποίοι διαχειρίζονται callbacks, συνδρομές και χρονιστές εντός της ίδιας διεργασίας. Υποστηρίζεται η συνύπαρξη πολλαπλών κόμβων ανά διεργασία και η ενδοδιεργασιακή επικοινωνία, μειώνοντας τις αντιγραφές μνήμης και βελτιώνοντας την αποδοτικότητα του συστήματος.

Τέλος, ενσωματώνονται μηχανισμοί ασφάλειας βασισμένοι στο DDS-Security, παρέχοντας αυθεντικοποίηση, έλεγχο πρόσβασης και κρυπτογράφηση δεδομένων σε επίπεδο επικοινωνίας [91].

Η παραπάνω διαστρωμάτωση αποτυπώνεται συγκριτικά στο Σχήμα 3.1.



Εικόνα 3.1: Συγκριτική απεικόνιση της αρχιτεκτονικής ROS 1 και ROS 2 [95].

Η εξέλιξη από την πρώτη στη δεύτερη γενιά δεν περιορίζεται σε επιμέρους τεχνικές βελτιώσεις, αλλά αντανakλά μια αρχιτεκτονική μετατόπιση από ένα κυρίως ερευνητικό περιβάλλον προς μια γενικευμένη, κατανομημένη και βιομηχανικά κατάλληλη υποδομή. Στα επόμενα υποκεφάλαια παρουσιάζονται οι βασικοί μηχανισμοί επικοινωνίας μέσω των οποίων υλοποιείται στην πράξη το αρχιτεκτονικό αυτό μοντέλο.

3.2 Διανομές και κύκλος ζωής

Το οικοσύστημα του ROS διατίθεται μέσω διακριτών εκδόσεων λογισμικού, οι οποίες ονομάζονται διανομές (distributions). Κάθε διανομή αποτελεί ένα σταθερό και ελεγχόμενο σύνολο πακέτων, βιβλιοθηκών και εργαλείων, το οποίο συντηρείται για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Μετά την επίσημη κυκλοφορία μιας διανομής, επιτρέπονται κυρίως διορθώσεις σφαλμάτων και μη διασπαστικές βελτιώσεις, ώστε να διασφαλίζεται η σταθερότητα του οικοσυστήματος.

Οι διανομές ακολουθούν αλφαβητική ονοματοδοσία, με κάθε έκδοση να λαμβάνει κωδική ονομασία αποτελούμενη από δύο λέξεις με το ίδιο αρχικό γράμμα (π.χ. Foxy Fitzroy, Humble Hawksbill, Iron Irtwini, Jazzy Jalisco). Η πρακτική αυτή διευκολύνει τη σαφή αναφορά σε συγκεκριμένες εκδόσεις, ενώ παράλληλα υποδηλώνει τη χρονολογική τους σειρά.

Κάθε διανομή συνοδεύεται από προκαθορισμένο κύκλο ζωής (lifecycle), ο οποίος ορίζει το χρονικό διάστημα επίσημης υποστήριξης. Μετά τη λήξη της περιόδου αυτής (End-of-Life, EOL), δεν παρέχονται πλέον ενημερώσεις ασφαλείας ή διορθώσεις σφαλμάτων. Οι διανομές διακρίνονται σε εκδόσεις μακροχρόνιας υποστήριξης (Long Term Support - LTS) και σε ενδιάμεσες εκδόσεις μικρότερης διάρκειας υποστήριξης.

Η έννοια της διανομής δεν περιορίζεται σε οργανωτικό επίπεδο, αλλά επηρεάζει άμεσα τη σταθερότητα και την προβλεψιμότητα της επικοινωνιακής υποδομής και των μηχανισμών που παρουσιάζονται στη συνέχεια.

3.3 Μέθοδοι επικοινωνίας

Η ανταλλαγή πληροφορίας στο ROS 2 υλοποιείται μέσω τυποποιημένων μηχανισμών επικοινωνίας, οι οποίοι εξυπηρετούν διαφορετικές μορφές αλληλεπίδρασης μεταξύ κόμβων. Κάθε μηχανισμός αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο πρότυπο ροής δεδομένων και διαφοροποιείται ως προς τη χρονική συμπεριφορά, τη δέσμευση των συμμετεχόντων και τη δυνατότητα ανατροφοδότησης.

Οι μηχανισμοί αυτοί διακρίνονται σε:

- Topics, για συνεχή και ασύγχρονη ροή δεδομένων,
- Services, για συγχρονισμένες κλήσεις τύπου αίτησης-απάντησης,
- Actions, για διεργασίες μεγάλης διάρκειας με παρακολούθηση και δυνατότητα ακύρωσης.

Οι οντότητες επικοινωνίας ορίζονται από μοναδικά ονόματα που ακολουθούν κοινούς συντακτικούς κανόνες και επιτρέπουν ιεραρχική οργάνωση μέσω namespaces, συμβάλλοντας στη συνεκτική δομή του ROS graph, δηλαδή του δυναμικού γράφου που περιγράφει τους κόμβους και τις μεταξύ τους συνδέσεις κατά την εκτέλεση του συστήματος.

Η επιλογή του κατάλληλου μηχανισμού δεν αποτελεί απλώς προγραμματιστική λεπτομέρεια, αλλά επηρεάζει άμεσα τη συμπεριφορά του συστήματος ως προς τον συγχρονισμό, την προβλεψιμότητα και τη διαχείριση κατάστασης.

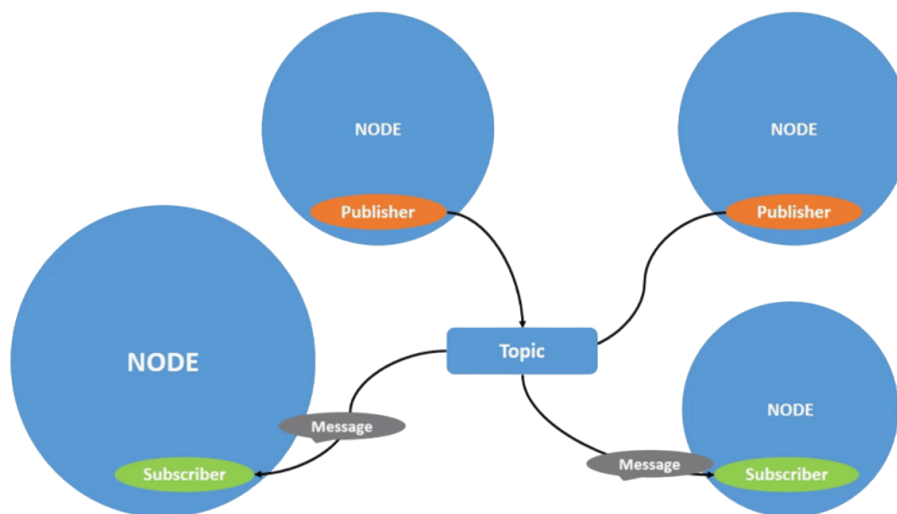
3.3.1 Θέματα (Topics)

Τα θέματα (topics) υλοποιούν το μοντέλο publish-subscribe και αποτελούν τον κύριο μηχανισμό μετάδοσης συνεχών ροών δεδομένων στο ROS 2. Κάθε topic ορίζεται από δύο βασικά στοιχεία: το όνομά του και τον τύπο διεπαφής (message interface) που καθορίζει τη δομή των δεδομένων που μεταδίδονται. Η επικοινωνία είναι δυνατή μόνο όταν εκδότες (publishers) και συνδρομητές (subscribers) χρησιμοποιούν τον ίδιο ακριβώς τύπο μηνύματος, διασφαλίζοντας τυπική συμβατότητα μεταξύ των κόμβων.

Η επικοινωνία είναι χαλαρά συζευγμένη και σε μεγάλο βαθμό ανώνυμη. Οι publishers και οι subscribers δεν έχουν γνώση της ταυτότητας ή του πλήθους των υπόλοιπων οντοτήτων που συμμετέχουν στο ίδιο topic· γνωρίζουν μόνο το όνομα του topic και τον αντίστοιχο τύπο μηνύματος. Εκδότες και συνδρομητές μπορούν να προστίθενται ή να αποσύρονται δυναμικά κατά τη λειτουργία του συστήματος, χωρίς να διακόπτεται η συνολική ροή δεδομένων.

Το μοντέλο publish-subscribe μπορεί να θεωρηθεί ως λογικός δίαυλος (bus), στον οποίο μπορούν να συνδεθούν μηδέν ή περισσότεροι publishers και subscribers (many-to-many). Όταν ένα μήνυμα δημοσιεύεται σε ένα topic, παραδίδεται σε όλους τους ενεργούς συνδρομητές. Η δημοσίευση δεν προϋποθέτει την ύπαρξη συγκεκριμένου παραλήπτη, ενώ οι συνδρομητές ενεργοποιούν τις αντίστοιχες ρουτίνες επεξεργασίας (callbacks) κατά την άφιξη νέου μηνύματος. Ένας κόμβος μπορεί να περιλαμβάνει πολλαπλούς publishers και subscribers, οι οποίοι μπορούν να σχετίζονται με διαφορετικά topics.

Η δομή αυτή απεικονίζεται σχηματικά στο Σχήμα 3.2.



Εικόνα 3.2: Απεικόνιση του μοντέλου publish-subscribe (many-to-many) στο ROS 2.

Η λειτουργία αυτή υποστηρίζεται από αυστηρή τυποποίηση (strong typing). Κάθε topic συνδέεται με συγκεκριμένο τύπο μηνύματος, του οποίου τα πεδία έχουν προκαθορισμένους τύπους και σαφώς ορισμένη σημασιολογία. Η τυποποίηση αυτή διασφαλίζει συνέπεια στη μετάδοση δεδομένων και περιορίζει ασάφειες ή σφάλματα ερμηνείας μεταξύ ετερογενών κόμβων.

Υπό το πρίσμα αυτό, τα topics ενδείκνυνται για συνεχή ροή δεδομένων, όπως αισθητηριακές μετρήσεις (LiDAR, IMU, κάμερες), οδομετρία ή κατάσταση συστήματος. Δεν παρέχουν ενσωματωμένο μηχανισμό συσχέτισης αιτήματος και απάντησης ούτε διατηρούν κατάσταση σε επίπεδο συνεδρίας μεταξύ εκδότη και συνδρομητή.

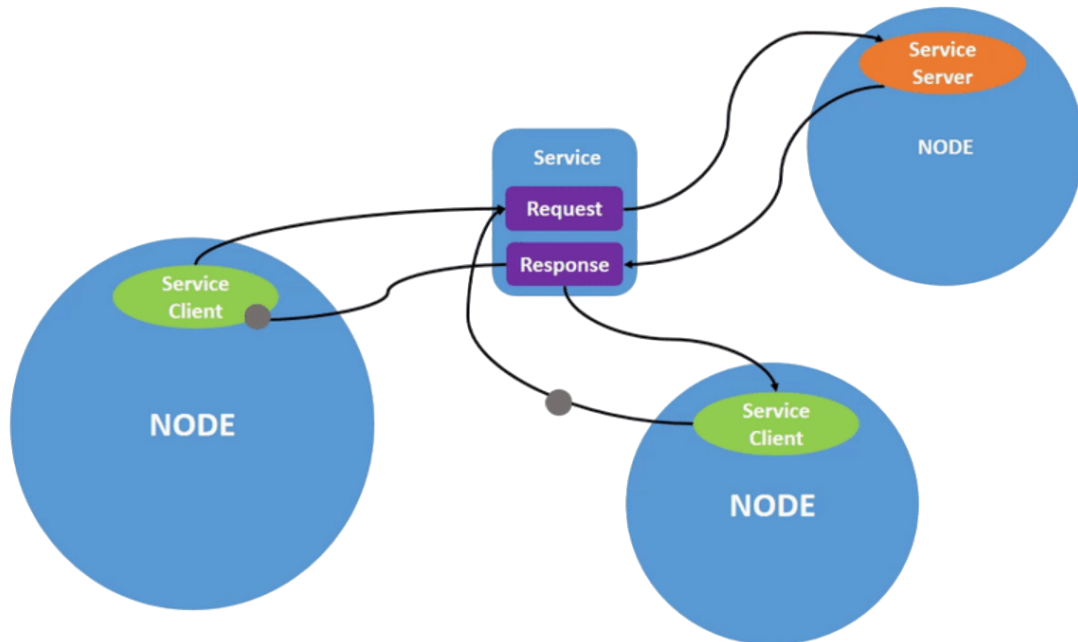
3.3.2 Υπηρεσίες (Services)

Παρότι τα topics καλύπτουν αποτελεσματικά τη συνεχή και ασύγχρονη ροή δεδομένων, δεν παρέχουν εγγενή μηχανισμό άμεσης απόκρισης σε συγκεκριμένο αίτημα. Σε περιπτώσεις όπου απαιτείται καθορισμένη αλληλεπίδραση τύπου αίτησης-απάντησης μεταξύ δύο κόμβων, το ROS 2 εισάγει τον μηχανισμό των υπηρεσιών (services), οι οποίες υλοποιούν πρότυπο απομακρυσμένης κλήσης διαδικασίας (remote procedure call).

Μια υπηρεσία ταυτοποιείται από το όνομά της και από τον τύπο διεπαφής (interface) που ορίζει τη δομή του αιτήματος (request) και της απάντησης (response). Η επικοινωνία είναι δυνατή μόνο όταν τόσο ο client όσο και ο server χρησιμοποιούν τον ίδιο ακριβώς τύπο υπηρεσίας, ώστε να υπάρχει συμφωνία ως προς τη μορφή των δεδομένων που ανταλλάσσονται.

Στο πρότυπο αυτό, ένας κόμβος-client αποστέλλει ένα αίτημα σε έναν κόμβο-server και αναμένει μία συγκεκριμένη απάντηση. Κάθε service name αντιστοιχεί σε έναν και μόνο κόμβο-server, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την επεξεργασία των αιτημάτων. Αντίθετα, μπορούν να υπάρχουν πολλαπλοί κόμβοι-client που αποστέλλουν αιτήματα προς τον ίδιο server. Σε περίπτωση ύπαρξης περισσότερων του ενός servers με το ίδιο service name, η συμπεριφορά δεν είναι καθορισμένη και η σχεδίαση του συστήματος θεωρείται λανθασμένη.

Η αρχιτεκτονική αυτή αποτυπώνεται σχηματικά στο Σχήμα 3.3, όπου παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ ενός service server και πολλαπλών service clients που αποστέλλουν αιτήματα και λαμβάνουν απαντήσεις.



Εικόνα 3.3: Απεικόνιση του μοντέλου service-client στο ROS 2.

Οι υπηρεσίες προορίζονται για λειτουργίες στιγμιαίου χαρακτήρα και αναμένεται να ολοκληρώνονται γρήγορα, καθώς η λογική της κλήσης συνδέεται άμεσα με την παραλαβή της απάντησης από τον client. Δεν ενδείκνυνται για διαδικασίες μεγάλης διάρκειας, ιδίως όταν απαιτείται ενδιάμεση ανατροφοδότηση προόδου ή δυνατότητα διακοπής (preemption). Σε τέτοιες περιπτώσεις χρησιμοποιείται ο μηχανισμός των ενεργειών (actions), ο οποίος παρουσιάζεται στη συνέχεια.

3.3.3 Ενέργειες (Actions)

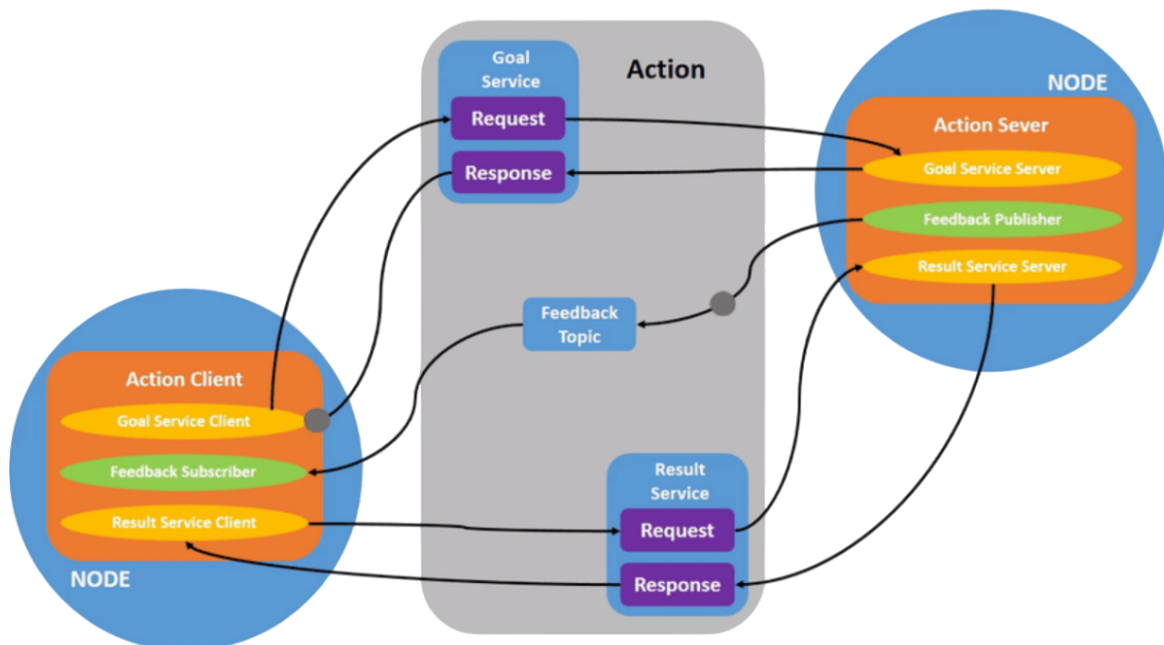
Οι ενέργειες (actions) αποτελούν μηχανισμό επικοινωνίας για μακράς διάρκειας διεργασίες, οι οποίες απαιτούν παρακολούθηση προόδου και δυνατότητα ακύρωσης. Σε αντίθεση με τις υπηρεσίες, όπου η αλληλεπίδραση ολοκληρώνεται με μία απάντηση, οι ενέργειες υποστηρίζουν εξελισσόμενη εκτέλεση στόχου με ενδιάμεση ανατροφοδότηση.

Μια ενέργεια ορίζεται από ένα όνομα και μία διεπαφή (interface), η οποία περιλαμβάνει τρία διακριτά τμήματα:

- **Goal:** τα δεδομένα που περιγράφουν τον στόχο προς εκτέλεση,
- **Result:** το τελικό αποτέλεσμα της εκτέλεσης,
- **Feedback:** ενδιάμεση πληροφορία προόδου κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης.

Το μοντέλο βασίζεται σε αρχιτεκτονική action client-action server. Ο client αποστέλλει έναν στόχο (goal) στον server, ο οποίος μπορεί να τον αποδεχθεί ή να τον απορρίψει. Εφόσον ο στόχος γίνει αποδεκτός, ο server ξεκινά την εκτέλεσή του και δύναται να αποστέλλει περιοδική ανατροφοδότηση (feedback). Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας, αποστέλλεται το τελικό αποτέλεσμα (result). Παράλληλα, ο client μπορεί να αιτηθεί ακύρωση (cancel) του στόχου κατά τη διάρκεια εκτέλεσης, ενώ ο server μπορεί να απορρίψει ή να τερματίσει πρόωρα έναν στόχο.

Η εσωτερική δομή ενός μηχανισμού Action, καθώς και τα επιμέρους κανάλια επικοινωνίας που τον συγκροτούν, απεικονίζονται στο Σχήμα 3.4.



Εικόνα 3.4: Εσωτερική υλοποίηση ενός μηχανισμού Action.

Κάθε action name αντιστοιχεί σε έναν και μόνο action server, ενώ μπορούν να υπάρχουν πολλαπλοί action clients. Επιπλέον, ένας client δύναται να αποστέλλει περισσότερους από έναν στόχους, με κάθε στόχο να διατηρεί δική του κατάσταση εκτέλεσης. Η διαχείριση της κατάστασης υλοποιείται μέσω εσωτερικής

μηχανής καταστάσεων (goal state machine), η οποία επιτρέπει μεταβάσεις όπως αποδοχή, εκτέλεση, ακύρωση ή αποτυχία.

Σε επίπεδο υλοποίησης, οι ενέργειες βασίζονται εσωτερικά σε συνδυασμό υπηρεσιών και topics. Συγκεκριμένα, η αποστολή στόχου, η ακύρωση και η παραλαβή αποτελέσματος υλοποιούνται μέσω υπηρεσιών, ενώ η ανατροφοδότηση και η κατάσταση στόχου μεταδίδονται μέσω topics. Ωστόσο, οι λεπτομέρειες αυτές είναι αφηρημένες από το επίπεδο εφαρμογής και διαχειρίζονται αυτόματα από τις βιβλιοθήκες του ROS 2.

Στην πλευρά του action client συνυπάρχουν service clients για την αποστολή στόχου και την παραλαβή αποτελέσματος, καθώς και subscriber για την ανατροφοδότηση. Αντίστοιχα, στην πλευρά του action server υλοποιούνται service servers για τη διαχείριση στόχων και αποτελεσμάτων, καθώς και publisher για την αποστολή feedback. Η πολυστρωματική αυτή δομή επιτρέπει ασύγχρονη εκτέλεση, παρακολούθηση προόδου και διαχείριση ακύρωσης, χωρίς να επιβαρύνει τον προγραμματιστή με χειροκίνητη δημιουργία των επιμέρους καναλιών επικοινωνίας.

Οι ενέργειες χρησιμοποιούνται σε ρομποτικές εφαρμογές όπου η εκτέλεση ενός στόχου απαιτεί χρόνο και δυναμική αλληλεπίδραση, όπως η πλοήγηση προς συγκεκριμένη θέση, η κίνηση βραχίονα σε στόχο ή η εκτέλεση σύνθετων ακολουθιών. Δεν ενδείκνυνται για ροές δεδομένων υψηλής συχνότητας, ούτε αντικαθιστούν τα topics για συνεχή μετάδοση πληροφορίας.

3.4 Περιβάλλον ανάπτυξης και Workspace

Η περιγραφή των μηχανισμών επικοινωνίας αφορά τη συμπεριφορά του συστήματος κατά την εκτέλεση. Ωστόσο, η ανάπτυξη ενός ρομποτικού συστήματος απαιτεί οργανωμένη δομή αρχείων, διαχείριση εξαρτήσεων και μηχανισμό μεταγλώττισης. Για τον σκοπό αυτό, το ROS 2 εισάγει την έννοια του workspace και του πακέτου ως βασικές μονάδες ανάπτυξης.

Το workspace διαχωρίζει τον κώδικα του χρήστη από την εγκατεστημένη διανομή του ROS 2 στο σύστημα, επιτρέποντας την ανεξάρτητη ανάπτυξη, μεταγλώττιση και δοκιμή πακέτων χωρίς τροποποίηση του βασικού λογισμικού της πλατφόρμας.

Στην αρχιτεκτονική του ROS 2 διακρίνεται ο *underlay* workspace, ο οποίος αντιστοιχεί στη βασική εγκατάσταση της διανομής (π.χ. /opt/ros/<distro>), και οι *overlay* workspaces, οι οποίοι περιέχουν τοπικά πακέτα που αναπτύσσονται ή τροποποιούνται από τον χρήστη. Η στοίβαξη (overlaying) πολλαπλών workspaces επιτρέπει την ταυτόχρονη συνύπαρξη διαφορετικών εκδόσεων πακέτων ή ακόμη και διαφορετικών διανομών του ROS 2, διευκολύνοντας την πειραματική ανάπτυξη και τη συντήρηση σύνθετων συστημάτων.

Ένα τυπικό workspace οργανώνεται σε διακριτούς υποκαταλόγους. Ο κατάλογος src/ περιέχει τον πηγαίο κώδικα των πακέτων. Κατά τη διαδικασία μεταγλώττισης δημιουργείται ο κατάλογος build/, όπου αποθηκεύονται τα ενδιάμεσα αρχεία κατασκευής. Τα τελικά εκτελέσιμα, βιβλιοθήκες και βοηθητικά αρχεία τοποθετούνται στον κατάλογο install/, ο οποίος αποτελεί τον χώρο εγκατάστασης (*install space*). Παράλληλα, ο κατάλογος log/ περιλαμβάνει αρχεία καταγραφής της διαδικασίας μεταγλώττισης και δοκιμών.

Η μεταγλώττιση και διαχείριση πολλαπλών πακέτων πραγματοποιείται μέσω του εργαλείου *colcon*, το οποίο λειτουργεί ως μετα-σύστημα κατασκευής (*meta-build tool*). Το *colcon* αναλαμβάνει τον τοπολογικό προσδιορισμό των εξαρτήσεων μεταξύ πακέτων και την ορθή σειρά κατασκευής τους, καλώντας το αντίστοιχο σύστημα κατασκευής κάθε πακέτου.

Μετά την κατασκευή ενός workspace, ενεργοποιείται το περιβάλλον του μέσω των αρχείων ρύθμισης (*setup scripts*) που βρίσκονται στον κατάλογο *install/*. Η διαδικασία αυτή ενημερώνει τις μεταβλητές περιβάλλοντος, ώστε το σύστημα να μπορεί να εντοπίσει και να χρησιμοποιήσει τα πακέτα του συγκεκριμένου workspace. Η έννοια αυτή είναι θεμελιώδης για τη συνδυαστική χρήση πολλαπλών workspaces και τη δυναμική επέκταση του ROS graph.

3.5 Δομή πακέτου και κατηγορίες αρχείων

Εντός ενός workspace, το πακέτο (*package*) αποτελεί τη βασική μονάδα οργάνωσης, διανομής και επαναχρησιμοποίησης λογισμικού. Κάθε πακέτο συγκεντρώνει συναφή λειτουργικότητα και δηλώνει ρητά τις εξαρτήσεις του, επιτρέποντας σαφή διαχωρισμό ευθυνών και κλιμακούμενη ανάπτυξη σύνθετων ρομποτικών συστημάτων.

Θεμελιώδες στοιχείο κάθε πακέτου είναι το αρχείο *package.xml*, το οποίο λειτουργεί ως αρχείο δήλωσης (*manifest*). Περιλαμβάνει μεταδεδομένα, όπως το μοναδικό όνομα του πακέτου, την έκδοση, τον συντηρητή, την άδεια χρήσης και τις εξαρτήσεις από άλλα πακέτα. Η παρουσία του προσδιορίζει τη ρίζα του πακέτου στο σύστημα αρχείων και επιτρέπει στα εργαλεία κατασκευής να αναλύουν τις σχέσεις μεταξύ πακέτων.

Ο τρόπος κατασκευής του πακέτου καθορίζεται από το υποκείμενο σύστημα build. Για πακέτα που υλοποιούνται σε C++, χρησιμοποιείται το σύστημα CMake μέσω του αρχείου *CMakeLists.txt*. Στο αρχείο αυτό δηλώνονται τα εκτελέσιμα αρχεία (*executables*), οι βιβλιοθήκες και οι εξαρτήσεις που απαιτούνται για τη μεταγλώττιση και σύνδεση του κώδικα. Επιπλέον, καθορίζονται οι κανόνες εγκατάστασης των παραγόμενων κόμβων στο *install space*.

Αντίστοιχα, για πακέτα που υλοποιούνται σε Python χρησιμοποιείται το *setuptools* μέσω του αρχείου *setup.py*. Στο αρχείο αυτό ορίζονται τα πακέτα Python που περιλαμβάνονται στη διανομή, οι εξαρτήσεις τους, καθώς και τα εκτελέσιμα σημεία εισόδου (*entry points*), μέσω των οποίων δημιουργούνται οι αντίστοιχοι κόμβοι.

Τα πακέτα που ακολουθούν το σύστημα *ament* χαρακτηρίζονται ως *ament_cmake* ή *ament_python*, ανάλογα με το υποκείμενο σύστημα κατασκευής. Η διαδικασία κατασκευής πραγματοποιείται μέσω του εργαλείου *colcon*, το οποίο αναλύει τις εξαρτήσεις που δηλώνονται στο *package.xml* και εκτελεί την κατασκευή των πακέτων με τη σωστή σειρά. Κατά τη διαδικασία αυτή δημιουργούνται τα απαραίτητα αρχεία στους καταλόγους *build* και *install*, διασφαλίζοντας συνεπή και αναπαραγώγιμη ανάπτυξη του συστήματος.

Μεταξύ των αρχείων που συνοδεύουν ένα πακέτο, ιδιαίτερη σημασία έχουν εκείνα που σχετίζονται με την εκκίνηση και τη ρύθμιση των κόμβων, καθώς δεν περιορίζονται στην οργάνωση του κώδικα, αλλά καθορίζουν άμεσα τη σύνθεση και τη συμπεριφορά του συστήματος κατά την εκτέλεση.

3.6 Εκτέλεση και διαμόρφωση συστήματος

Η διαδικασία κατασκευής ενός πακέτου οδηγεί στην παραγωγή εκτελέσιμων μονάδων, όπως κόμβων και βιβλιοθηκών. Ωστόσο, η ύπαρξη αυτών των εκτελέσιμων στοιχείων δεν αρκεί για τη λειτουργία ενός σύνθετου ρομποτικού συστήματος. Στην πράξη, ένα πλήρες σύστημα περιλαμβάνει πολλαπλούς κόμβους που εκτελούνται ταυτόχρονα, ενδέχεται να κατανέμονται σε διαφορετικές διεργασίες ή ακόμη και σε διαφορετικές υπολογιστικές μονάδες, και απαιτούν συντονισμένη εκκίνηση και παραμετροποίηση.

Η ανάγκη οργάνωσης της ταυτόχρονης εκκίνησης και διαμόρφωσης αυτών των διεργασιών οδήγησε στη σχεδίαση του συστήματος εκκίνησης (*launch system*). Το launch system επιτρέπει την περιγραφή της συνολικής διάταξης του συστήματος μέσω ενός αρχείου εκκίνησης (*launch file*), το οποίο καθορίζει ποια εκτελέσιμα θα εκκινηθούν, σε ποιο namespace θα ανήκουν, ποιες παράμετροι θα τους αποδοθούν και ποιες επιπλέον ρυθμίσεις θα εφαρμοστούν.

Τα αρχεία εκκίνησης μπορούν να γραφούν σε Python, XML ή YAML, με την Python να προσφέρει αυξημένη εκφραστικότητα και δυνατότητα προγραμματιστικής σύνθεσης. Κατά την εκτέλεση, το launch system αναλαμβάνει όχι μόνο την εκκίνηση των διεργασιών, αλλά και την παρακολούθηση της κατάστασής τους, επιτρέποντας τον εντοπισμό σφαλμάτων ή την αντίδραση σε τερματισμούς διεργασιών. Με τον τρόπο αυτό λειτουργεί ως μηχανισμός ενορχήστρωσης (*orchestration layer*) της εκτέλεσης.

Κεντρικό στοιχείο της διαμόρφωσης των κόμβων αποτελούν οι παράμετροι (*parameters*). Στο ROS 2 οι παράμετροι συνδέονται αποκλειστικά με μεμονωμένους κόμβους και δεν υφίσταται κεντρικός διακομιστής παραμέτρων, όπως σε προηγούμενες εκδόσεις της πλατφόρμας. Η διάρκεια ζωής μιας παραμέτρου ταυτίζεται με τη διάρκεια ζωής του αντίστοιχου κόμβου, εκτός εάν ο ίδιος ο κόμβος υλοποιεί μηχανισμό αποθήκευσης και επαναφόρτωσης.

Κάθε παράμετρος ορίζεται από ένα κλειδί, μία τιμή και έναν περιγραφέα (*descriptor*). Το κλειδί είναι συμβολοσειρά που ταυτοποιεί τη ρύθμιση, ενώ η τιμή ανήκει σε προκαθορισμένο σύνολο τύπων, όπως bool, int64, float64, string και αντίστοιχους πίνακες αυτών. Η ισχυρή τυποποίηση αποτρέπει την τυχαία μεταβολή τύπου κατά την εκτέλεση, μειώνοντας τον κίνδυνο ασυμβατότητας. Ο περιγραφέας μπορεί να περιλαμβάνει πρόσθετες πληροφορίες, όπως επιτρεπτά εύρη τιμών ή περιορισμούς.

Κατά κανόνα, ένας κόμβος οφείλει να δηλώσει ρητά τις παραμέτρους που αποδέχεται κατά την εκκίνησή του, ώστε το σύστημα να γνωρίζει εκ των προτέρων τον αναμενόμενο τύπο και το όνομα κάθε ρύθμισης. Η πρακτική αυτή περιορίζει σφάλματα λανθασμένης διαμόρφωσης. Σε ειδικές περιπτώσεις είναι δυνατή η αποδοχή μη δηλωμένων παραμέτρων, εφόσον ενεργοποιηθεί η αντίστοιχη επιλογή κατά τη δημιουργία του κόμβου.

Η αλληλεπίδραση με τις παραμέτρους υλοποιείται μέσω υπηρεσιών που δημιουργούνται αυτόματα κατά την εκκίνηση κάθε κόμβου. Οι υπηρεσίες αυτές επιτρέπουν την ανάκτηση τιμών, την τροποποίηση παραμέτρων, την περιγραφή των χαρακτηριστικών τους και τη ρύθμιση πολλαπλών παραμέτρων είτε μεμονωμένα είτε ατομικά (atomically). Η αρχιτεκτονική αυτή διασφαλίζει ότι η διαχείριση παραμέτρων εντάσσεται στο ίδιο μοντέλο επικοινωνίας βασισμένο σε υπηρεσίες.

Περαιτέρω, ένας κόμβος μπορεί να καταχωρίσει μηχανισμούς επαλήθευσης και αντίδρασης σε αλλαγές παραμέτρων μέσω ειδικών callbacks. Οι μηχανισμοί αυτοί επιτρέπουν τον έλεγχο εγκυρότητας πριν από

την αποδοχή νέων τιμών, καθώς και την προσαρμογή της εσωτερικής κατάστασης του κόμβου μετά από επιτυχή μεταβολή. Έτσι καθίσταται δυνατή η δυναμική επαναδιαμόρφωση (*runtime reconfiguration*) χωρίς επανεκκίνηση του συστήματος.

Η αρχικοποίηση των παραμέτρων μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε μέσω αρχείων YAML είτε απευθείας από το αρχείο εκκίνησης. Στην πράξη, τα αρχεία εκκίνησης και τα αρχεία παραμέτρων λειτουργούν συμπληρωματικά: το launch file περιγράφει τη δομή και τη σύνθεση του συστήματος, ενώ τα αρχεία παραμέτρων καθορίζουν τις επιμέρους ρυθμίσεις κάθε κόμβου. Η διάκριση αυτή επιτρέπει καθαρό διαχωρισμό μεταξύ αρχιτεκτονικής σύνθεσης και λειτουργικής διαμόρφωσης.

Ενώ τα αρχεία εκκίνησης και οι παράμετροι καθορίζουν τη λογική σύνθεση και τη λειτουργική συμπεριφορά του συστήματος, η αναπαράσταση της φυσικής δομής και της κινηματικής του ρομπότ απαιτεί ξεχωριστό μοντέλο περιγραφής.

3.7 Περιγραφή ρομπότ και γεωμετρικό μοντέλο (URDF/Xacro)

Η αναπαράσταση της φυσικής δομής και των κινηματικών σχέσεων ενός ρομπότ στο ROS πραγματοποιείται μέσω του *Unified Robot Description Format* (URDF). Το URDF αποτελεί τυποποιημένη μορφή περιγραφής βασισμένη σε XML, η οποία επιτρέπει τη δήλωση των άκαμπτων σωμάτων ενός ρομπότ και των κινηματικών περιορισμών που τα συνδέουν.

Σε εννοιολογικό επίπεδο, ένα μοντέλο URDF αναπαριστά το ρομπότ ως ένα κατευθυνόμενο κινηματικό δέντρο (kinematic tree), στο οποίο κάθε κόμβος αντιστοιχεί σε άκαμπτο σώμα και κάθε ακμή σε κινηματική σύνδεση. Η δομή αυτή ευθυγραμμίζεται με τη θεμελιώδη περιγραφή κινηματικών αλυσίδων στη ρομποτική, όπου η στάση και η θέση κάθε σώματος εκφράζονται ως σχετικός μετασχηματισμός ως προς ένα γονικό πλαίσιο αναφοράς. Το URDF δεν περιγράφει τη δυναμική συμπεριφορά ή τους αλγορίθμους ελέγχου, αλλά περιορίζεται στη γεωμετρική και κινηματική οργάνωση του συστήματος.

Η ρίζα ενός μοντέλου URDF ορίζεται μέσω του στοιχείου <robot>, το οποίο περικλείει το σύνολο των δομικών στοιχείων του ρομπότ. Εντός αυτού δηλώνονται τα άκαμπτα σώματα (<link>) και οι κινηματικές συνδέσεις (<joint>) που τα συσχετίζουν, συγκροτώντας το συνολικό κινηματικό δέντρο.

3.7.1 Άκαμπτα σώματα (<link>)

Κάθε στοιχείο <link> στο URDF αντιστοιχεί σε ένα άκαμπτο σώμα του ρομπότ. Στο κινηματικό δέντρο, τα links αποτελούν τους κόμβους της δομής, ενώ η σχετική τους θέση και προσανατολισμός καθορίζονται μέσω των αντίστοιχων joints. Ένα link δεν περιγράφει μόνο γεωμετρική πληροφορία, αλλά μπορεί να περιλαμβάνει δεδομένα που αφορούν τόσο την οπτική αναπαράσταση όσο και τις φυσικές του ιδιότητες.

Η περιγραφή ενός link διακρίνεται συνήθως σε τρία διακριτά επίπεδα:

- **Visual:** Καθορίζει τη γεωμετρία που χρησιμοποιείται για την οπτική απεικόνιση του ρομπότ σε εργαλεία οπτικοποίησης. Η γεωμετρία μπορεί να είναι στοιχειώδης (κύβος, κύλινδρος, σφαίρα) ή να βασίζεται σε εξωτερικό αρχείο πλέγματος (mesh). Η πληροφορία αυτή δεν επηρεάζει τους υπολογισμούς σύγκρουσης ή δυναμικής, αλλά εξυπηρετεί την αναπαράσταση.

- **Collision:** Περιγράφει τη γεωμετρία που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο συγκρούσεων. Συνήθως επιλέγεται απλουστευμένη μορφή σε σχέση με το visual μοντέλο, ώστε να μειώνεται το υπολογιστικό κόστος κατά τον έλεγχο επαφών.
- **Inertial:** Ορίζει τις αδρανειακές ιδιότητες του σώματος, όπως μάζα και πίνακα ροπών αδράνειας. Η πληροφορία αυτή είναι απαραίτητη σε περιβάλλοντα προσομοίωσης ή δυναμικής ανάλυσης, καθώς επιτρέπει τον υπολογισμό των εξισώσεων κίνησης.

Κάθε ένα από τα παραπάνω υποστοιχεία μπορεί να διαθέτει το δικό του τοπικό πλαίσιο αναφοράς μέσω του στοιχείου `<origin>`, το οποίο καθορίζει τη σχετική μετάθεση και περιστροφή ως προς το πλαίσιο του link. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατός ο διαχωρισμός μεταξύ γεωμετρικού κέντρου, κέντρου μάζας και σημείου σύνδεσης.

Η διάκριση μεταξύ οπτικής, συγκρουσιακής και αδρανειακής περιγραφής αντανακλά τον διαχωρισμό μεταξύ γεωμετρικής αναπαράστασης και φυσικής μοντελοποίησης. Το URDF, επομένως, δεν περιορίζεται σε απλή γραφική περιγραφή, αλλά επιτρέπει τη συνεπή ενσωμάτωση κινηματικών και δυναμικών χαρακτηριστικών σε ενιαίο μοντέλο.

3.7.2 Κινηματικές συνδέσεις (`<joint>`)

Τα στοιχεία `<joint>` ορίζουν τις κινηματικές σχέσεις μεταξύ δύο links και συγκροτούν τις ακμές του κινηματικού δέντρου. Κάθε joint συνδέει ένα γονικό (*parent*) με ένα θυγατρικό (*child*) link, καθορίζοντας τον σχετικό τους μετασχηματισμό και, όπου επιτρέπεται, τον βαθμό ελευθερίας μεταξύ τους.

Κάθε joint διαθέτει υποχρεωτικά στοιχεία που προσδιορίζουν:

- το γονικό και το θυγατρικό link,
- το είδος της κινηματικής σύνδεσης,
- τον αρχικό σχετικό μετασχηματισμό μέσω του στοιχείου `<origin>`.

Το στοιχείο `<origin>` ορίζει τη μετάθεση και την περιστροφή του child ως προς το πλαίσιο του parent. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται το τοπικό σύστημα αναφοράς της σύνδεσης, θεμελιώνοντας την αλυσίδα σχετικών μετασχηματισμών που περιγράφει τη στάση κάθε σώματος ως προς τη ρίζα του δέντρου.

Το URDF υποστηρίζει διαφορετικούς τύπους joints, οι οποίοι αντιστοιχούν σε διαφορετικούς κινηματικούς περιορισμούς:

- **fixed:** Σταθερή σύνδεση χωρίς βαθμούς ελευθερίας.
- **revolute:** Περιστροφική άρθρωση με περιορισμένο εύρος γωνίας.
- **continuous:** Περιστροφική άρθρωση χωρίς περιορισμό γωνίας.
- **prismatic:** Γραμμική άρθρωση κατά μήκος καθορισμένου άξονα.

Για joints με βαθμό ελευθερίας, το στοιχείο `<axis>` ορίζει τη διεύθυνση περιστροφής ή μετατόπισης στο τοπικό πλαίσιο της σύνδεσης, ενώ μπορούν να καθοριστούν όρια κίνησης μέσω του στοιχείου `<limit>`. Ο ορισμός αυτός αντανακλά την τυπική περιγραφή κινηματικών ζευγών στη ρομποτική, όπου η κίνηση ενός σώματος εκφράζεται ως παραμετρικός μετασχηματισμός ως προς το γονικό του πλαίσιο.

Δεδομένου ότι κάθε link, εκτός της ρίζας, διαθέτει ακριβώς ένα γονικό joint, το συνολικό μοντέλο URDF σχηματίζει δέντρο και όχι γενικό γράφο. Κατά συνέπεια, δεν υποστηρίζονται κλειστοί κινηματικοί βρόχοι χωρίς πρόσθετες τεχνικές ή εξωτερικούς μηχανισμούς μοντελοποίησης.

Παρότι το URDF παρέχει συνεπή και τυποποιημένη περιγραφή της δομής ενός ρομπότ, η λειτουργικότητά του περιορίζεται στην αναπαράσταση της γεωμετρίας και της κινηματικής οργάνωσης. Δεν υποστηρίζει εγγενώς κλειστούς κινηματικούς βρόχους, καθώς το μοντέλο περιορίζεται σε δενδρική (tree) δομή. Επιπλέον, δεν ενσωματώνει μηχανισμούς ελέγχου, προγραμματισμού κίνησης ή υπολογισμού δυναμικής· τα στοιχεία αυτά υλοποιούνται από ανώτερα επίπεδα λογισμικού.

Το URDF αποτελεί, επομένως, στατικό μοντέλο περιγραφής. Ορίζει ποια σώματα υπάρχουν και πώς συνδέονται μεταξύ τους, αλλά δεν περιγράφει τη χρονική εξέλιξη των σχετικών τους θέσεων κατά την κίνηση. Η μεταβολή των αρθρώσεων, η ενημέρωση των στάσεων και η διάδοση των σχετικών μετασχηματισμών στο σύστημα πραγματοποιούνται από ξεχωριστούς μηχανισμούς κατά τον χρόνο εκτέλεσης.

Στο πλαίσιο του ROS, η ανάγκη δυναμικής αναπαράστασης της θέσης και του προσανατολισμού κάθε πλαισίου αναφοράς οδηγεί στη χρήση του μηχανισμού μετασχηματισμών TF. Ενώ το URDF ορίζει τη δομή του κινηματικού δέντρου, το TF αναλαμβάνει τη διαχείριση και διάδοση των σχετικών μετασχηματισμών μεταξύ των πλαισίων αυτών κατά την εκτέλεση του συστήματος.

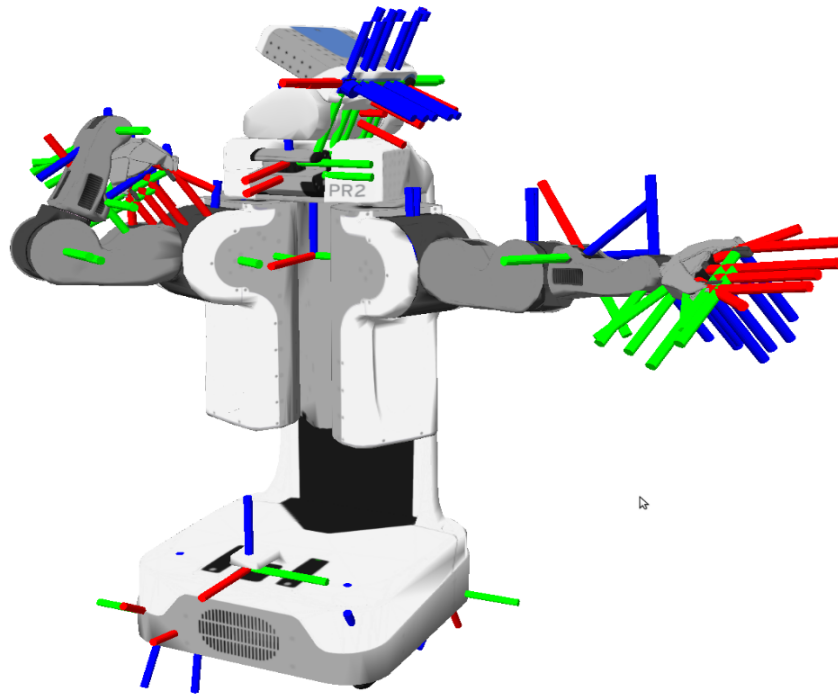
3.8 Σύστημα μετασχηματισμών (TF)

Σε ένα ρομποτικό σύστημα συνυπάρχουν πολλαπλά τρισδιάστατα πλαίσια αναφοράς, όπως το παγκόσμιο πλαίσιο (world ή map), το πλαίσιο βάσης (base_link), τα πλαίσια αισθητήρων και τα πλαίσια αρθρώσεων. Η επεξεργασία αισθητηριακών δεδομένων και ο υπολογισμός κινήσεων προϋποθέτουν τη δυνατότητα μετασχηματισμού σημείων, διανυσμάτων και στάσεων μεταξύ των πλαισίων αυτών με χρονική συνέπεια. Η διαχείριση των σχέσεων αυτών αποτελεί σύνθετο πρόβλημα, ιδίως σε καταναμεμημένα και ασύγχρονα συστήματα.

Ο μηχανισμός TF (Transform Library) παρέχει τυποποιημένο τρόπο αναπαράστασης και ανάκτησης σχετικών μετασχηματισμών μεταξύ πλαισίων αναφοράς. Κάθε πλαίσιο αντιστοιχεί σε κόμβο ενός γράφου, ενώ κάθε σχετικός μετασχηματισμός σε κατευθυνόμενη ακμή. Για την αποφυγή ασάφειας που θα προέκυπτε από πολλαπλές διαδρομές μεταξύ δύο κόμβων, η δομή περιορίζεται σε ακυκλικό γράφο μορφής δέντρου (tree structure), εξασφαλίζοντας μοναδική διαδρομή μεταξύ οποιωνδήποτε δύο πλαισίων. Ο καθαρός μετασχηματισμός μεταξύ δύο πλαισίων προκύπτει από τη σύνθεση των επιμέρους μετασχηματισμών κατά μήκος της μοναδικής αυτής διαδρομής.

Στο Σχήμα 3.5 απεικονίζεται η οπτικοποίηση των πλαισίων αναφοράς ενός ρομπότ. Κάθε link αντιστοιχεί σε ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων, ενώ οι μεταξύ τους σχέσεις συγκροτούν το συνολικό δέντρο μετασχηματισμών. Η αναπαράσταση αυτή καθιστά εμφανή τη δενδρική οργάνωση της κινηματικής δο-

μής.



Εικόνα 3.5: Οπτικοποίηση πλαισίων αναφοράς (TF tree) σε ρομπότ PR2. Κάθε τριάδα αξόνων (κόκκινος, πράσινος, μπλε) αντιστοιχεί σε τοπικό σύστημα συντεταγμένων.

3.8.1 Χρονική διαχείριση και κατηγορίες μετασχηματισμών

Κεντρικό χαρακτηριστικό του TF είναι η χρονική αποθήκευση (buffering) των μετασχηματισμών. Κάθε μετασχηματισμός συνοδεύεται από χρονική σήμανση και διατηρείται σε ιστορικό δομημένο χρονικά, επιτρέποντας την ανάκτηση του σχετικού μετασχηματισμού για συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η δυνατότητα αυτή είναι κρίσιμη, καθώς τα δεδομένα αισθητήρων συχνά φέρουν χρονική σήμανση διαφορετική από εκείνη της τρέχουσας κατάστασης του ρομπότ.

Οι μετασχηματισμοί διακρίνονται σε:

- **Δυναμικούς μετασχηματισμούς**, οι οποίοι μεταβάλλονται με τον χρόνο (π.χ. άρθρωση βραχίονα).
- **Στατικούς μετασχηματισμούς**, οι οποίοι παραμένουν αμετάβλητοι (π.χ. θέση αισθητήρα ως προς το σώμα).

Οι στατικοί μετασχηματισμοί δημοσιεύονται μία φορά και θεωρούνται χρονικά αμετάβλητοι, μειώνοντας το υπολογιστικό και επικοινωνιακό κόστος.

3.8.2 Δημοσίευση μετασχηματισμών

Η αρχιτεκτονική του TF βασίζεται στη διάκριση μεταξύ εκπομπής (*broadcasting*) και ανάκτησης (*listening*) μετασχηματισμών. Κόμβοι που παράγουν πληροφορία θέσης δημοσιεύουν σχετικούς μετασχηματισμούς,

ενώ οι καταναλωτές διατηρούν τοπικό buffer και υποβάλλουν ερωτήματα για τον μετασχηματισμό μεταξύ δύο πλαισίων σε δεδομένη χρονική στιγμή.

Η σύνδεση μεταξύ του στατικού μοντέλου URDF και του δυναμικού μηχανισμού μετασχηματισμών υλοποιείται μέσω του κόμβου *robot_state_publisher*. Ο κόμβος αυτός λαμβάνει ως είσοδο το κινηματικό δέντρο του ρομπότ σε μορφή URDF και ενημερώσεις κατάστασης αρθρώσεων, και παράγει τους αντίστοιχους μετασχηματισμούς των links στο σύστημα TF.

Κατά την εκκίνηση, το *robot_state_publisher* φορτώνει το μοντέλο από την παράμετρο *robot_description*. Στη συνέχεια, εγγράφεται στο θέμα *joint_states*, από το οποίο λαμβάνει τις τιμές των κινητών αρθρώσεων. Με βάση τις τιμές αυτές, υπολογίζεται η στάση κάθε link μέσω προώθησης κινηματικής (forward kinematics) και οι αντίστοιχοι μετασχηματισμοί δημοσιεύονται στο */tf*.

Οι μετασχηματισμοί που προκύπτουν από σταθερές συνδέσεις (fixed joints) δημοσιεύονται μία φορά στο */tf_static*, ενώ οι μετασχηματισμοί κινητών αρθρώσεων ενημερώνονται δυναμικά. Ο *robot_state_publisher* δεν εκτελεί έλεγχο ούτε εκτίμηση κατάστασης· λειτουργεί αποκλειστικά ως κινηματικός προωθητής, γεφυρώνοντας το URDF με το TF.

3.8.3 Βασικά παγκόσμια και τοπικά πλαίσια αναφοράς

Η γενική περιγραφή του μηχανισμού TF καθιστά αναγκαίο τον σαφή ορισμό των βασικών πλαισίων αναφοράς που χρησιμοποιούνται σε κινητές ρομποτικές πλατφόρμες. Στο οικοσύστημα του ROS, η σημασιολογία και η ιεραρχία των κύριων πλαισίων καθορίζονται από το πρότυπο REP-105, το οποίο υιοθετείται ευρέως τόσο σε πακέτα εντοπισμού όσο και σε συστήματα πλοήγησης.

Σύμφωνα με το πρότυπο REP-105, το οποίο καθορίζει τις σημασιολογικές συμβάσεις πλαισίων για κινητές ρομποτικές πλατφόρμες, τρία βασικά πλαίσια αναφοράς θεωρούνται θεμελιώδη για τη χωρική αναπαράσταση της κατάστασης ενός κινητού ρομπότ: τα *base_link*, *odom* και *map*.

Το πλαίσιο *base_link* είναι άκαμπτα συνδεδεμένο με το σώμα του ρομπότ και εκφράζει την τρέχουσα στάση και ταχύτητα του συστήματος ως προς τον εαυτό του. Όλες οι ταχύτητες που αφορούν την κίνηση του ρομπότ εκφράζονται τυπικά στο πλαίσιο αυτό.

Το πλαίσιο *odom* αποτελεί παγκοσμίως σταθερό πλαίσιο αναφοράς (world-fixed frame), το οποίο χρησιμοποιείται για τη βραχυπρόθεσμη εκτίμηση θέσης μέσω οδομετρικών πηγών (π.χ. κωδικοποιητές τροχών, οπτική οδομετρία ή IMU). Η στάση του ρομπότ ως προς το *odom* εξελίσσεται συνεχώς και ομαλά στον χρόνο, χωρίς διακριτά άλματα, ωστόσο υπόκειται σε μη φραγμένη συσσώρευση σφάλματος (drift). Το χαρακτηριστικό αυτό καθιστά το *odom* κατάλληλο για τοπικό έλεγχο και πλοήγηση μικρής χρονικής κλίμακας, αλλά ακατάλληλο ως μακροπρόθεσμη αναφορά.

Το πλαίσιο *map* είναι επίσης παγκοσμίως σταθερό, με άξονα *Z* στραμμένο προς τα άνω. Σε αντίθεση με το *odom*, η στάση του ρομπότ ως προς το *map* δεν παρουσιάζει σημαντικό συσσωρευτικό σφάλμα, καθώς προκύπτει από διαδικασίες εντοπισμού ή SLAM που διορθώνουν το drift μέσω αισθητηριακών παρατηρήσεων. Ωστόσο, η εκτίμηση αυτή δεν είναι απαραίτητα συνεχής και μπορεί να μεταβάλλεται με διακριτά άλματα όταν εισέρχεται νέα πληροφορία (π.χ. επανατοποθέτηση ή loop closure).

Η δενδρική τοπολογία που προτείνεται από το REP-105 οργανώνει τα πλαίσια ως εξής:

$$\text{map} \rightarrow \text{odom} \rightarrow \text{base_link}$$

Το πλαίσιο `map` αποτελεί γονέα του `odom`, και το `odom` γονέα του `base_link`. Η διάκριση αυτή επιτρέπει τον σαφή διαχωρισμό μεταξύ τοπικής, συνεχούς οδομετρίας και παγκόσμιας, διορθωμένης εκτίμησης θέσης. Στο πλαίσιο αυτό, ένα σύστημα οδομετρίας ή φίλτρο κατάστασης είναι υπεύθυνο για τον μετασχηματισμό `odom` $\rightarrow$ `base_link`, ενώ μία μονάδα εντοπισμού (π.χ. AMCL ή SLAM) υπολογίζει έμμεσα τον μετασχηματισμό `map` $\rightarrow$ `odom`.

3.9 Προχωρημένα μοντέλα κόμβων

Πέραν της αναπαράστασης της δομής και των πλαισίων αναφοράς, ένα ρομποτικό σύστημα απαιτεί ελεγχόμενο μοντέλο εκτέλεσης των κόμβων του. Η διαχείριση της αρχικοποίησης, ενεργοποίησης και τερματισμού των υποσυστημάτων καθίσταται κρίσιμη σε σύνθετες αρχιτεκτονικές. Στο πλαίσιο αυτό, το ROS 2 εισάγει προχωρημένα μοντέλα κόμβων που επιτρέπουν ρητή διαχείριση του κύκλου ζωής και της εκτέλεσής τους.

3.9.1 Κόμβοι κύκλου ζωής (*Lifecycle Nodes*)

Η βασική εκτέλεση ενός κόμβου ακολουθεί ένα απλό μοντέλο διεργασίας, στο οποίο ο κόμβος είτε εκτελείται είτε τερματίζεται. Σε σύνθετα ρομποτικά συστήματα, ωστόσο, απαιτείται ελεγχόμενη και προβλέψιμη διαχείριση της κατάστασης των κόμβων, ιδίως όταν αυτοί αλληλεπιδρούν με υλικό ή κρίσιμες υπολογιστικές διεργασίες. Για τον σκοπό αυτό, το ROS 2 εισάγει την έννοια των διαχειριζόμενων κόμβων (*Managed Nodes*), γνωστών ως *Lifecycle Nodes*.

Ένας Lifecycle Node ενσωματώνει εσωτερική μηχανή καταστάσεων (state machine), η οποία ορίζει προκαθορισμένες καταστάσεις και επιτρεπτές μεταβάσεις μεταξύ αυτών. Οι καταστάσεις διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- **Πρωτεύουσες καταστάσεις (Primary States):** `unconfigured`, `inactive`, `active`, `finalized`.
- **Καταστάσεις μετάβασης (Transition States):** `configuring`, `activating`, `deactivating`, `cleaningup`, `shuttingdown`.

Οι μεταβάσεις ενεργοποιούνται μέσω συγκεκριμένων εντολών (`configure`, `activate`, `deactivate`, `cleanup`, `shutdown`), οι οποίες οδηγούν τον κόμβο από μία πρωτεύουσα κατάσταση σε άλλη μέσω ενδιάμεσης μεταβατικής κατάστασης.

Η κύρια λειτουργικότητα ενός Lifecycle Node εκτελείται αποκλειστικά στην κατάσταση `active`. Στις υπόλοιπες καταστάσεις, ο κόμβος προετοιμάζει ή αποδεσμεύει πόρους. Ενδεικτικά:

- Κατά τη μετάβαση `configure`, πραγματοποιείται αρχικοποίηση πόρων, όπως δημιουργία publishers, φόρτωση παραμέτρων ή αρχικοποίηση οδηγών συσκευών.

- Κατά τη μετάβαση *activate*, ενεργοποιείται η λειτουργική συμπεριφορά του κόμβου (π.χ. έναρξη δημοσίευσης δεδομένων).
- Κατά τη μετάβαση *deactivate*, η λειτουργία παύει χωρίς αποδέσμευση πόρων.
- Κατά τη μετάβαση *cleanup*, οι πόροι απελευθερώνονται.

Η διάκριση αυτή επιτρέπει ελεγχόμενη εκκίνηση και τερματισμό υποσυστημάτων, κάτι ιδιαίτερα σημαντικό σε εφαρμογές όπου η αρχικοποίηση υλικού απαιτεί χρόνο ή όπου η αποτυχία ενός κόμβου δεν πρέπει να οδηγήσει σε μη ελεγχόμενη συμπεριφορά.

Σε επίπεδο υλοποίησης, η κλάση *LifecycleNode* επεκτείνει τη βασική κλάση κόμβου, προσθέτοντας μηχανισμό καταστάσεων και ειδικούς τύπους *publishers* (*LifecyclePublisher*). Οι *publishers* αυτοί ενεργοποιούνται ρητά μόνο όταν ο κόμβος βρίσκεται στην κατάσταση *active*, εξασφαλίζοντας ότι δεν παράγονται δεδομένα σε μη επιτρεπτές φάσεις λειτουργίας.

Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιείται εκτενώς σε σύνθετα συστήματα, όπως το Nav2, όπου πολλαπλοί κόμβοι (π.χ. *planner*, *controller*, *costmaps*) συντονίζονται μέσω κεντρικού διαχειριστή κύκλου ζωής. Με τον τρόπο αυτό, το σύστημα μεταβαίνει συντονισμένα από κατάσταση αρχικοποίησης σε πλήρη λειτουργία, μειώνοντας τον κίνδυνο ασυνεπειών.

Η εισαγωγή των *Lifecycle Nodes* μετασχηματίζει το μοντέλο εκτέλεσης του ROS 2 από απλό μοντέλο διεργασιών σε ελεγχόμενο μηχανισμό διαχείρισης κατάστασης, κατάλληλο για μεγάλης κλίμακας και βιομηχανικές εφαρμογές.

3.9.2 Συνθέσιμοι κόμβοι (Composable Nodes)

Η έννοια των κόμβων κύκλου ζωής αφορά την εσωτερική διαχείριση κατάστασης ενός κόμβου και τον ελεγχόμενο τρόπο με τον οποίο αυτός μεταβαίνει μεταξύ φάσεων λειτουργίας. Ωστόσο, πέραν της εσωτερικής συμπεριφοράς κάθε κόμβου, κρίσιμη παράμετρος στον σχεδιασμό ενός ρομποτικού συστήματος αποτελεί και η διάταξη εκτέλεσης των κόμβων στο επίπεδο διεργασιών. Το ROS 2 παρέχει μηχανισμούς που επιτρέπουν την ευέλικτη σύνθεση πολλαπλών κόμβων εντός της ίδιας διεργασίας ή την απομονωμένη εκτέλεσή τους σε ξεχωριστές διεργασίες. Η δυνατότητα αυτή υλοποιείται μέσω των συνθέσιμων κόμβων (*Composable Nodes*).

Η βασική ιδέα της σύνθεσης (*composition*) συνίσταται στον διαχωρισμό της λογικής υλοποίησης ενός κόμβου από την απόφαση διάταξης διεργασιών. Ένας συνθέσιμος κόμβος υλοποιείται ως κλάση, συνήθως υποκλάση της *relepp::Node*, και μεταγλωττίζεται σε κοινόχρηστη βιβλιοθήκη (*shared library*) αντί για αυτόνομο εκτελέσιμο. Η φόρτωσή του πραγματοποιείται δυναμικά από μία διεργασία-υποδοχέα, η οποία ονομάζεται *component container*.

Η αρχιτεκτονική αυτή επιτρέπει η διάταξη των διεργασιών να αποτελεί απόφαση κατά την ανάπτυξη (*deploy-time decision*) και όχι κατά τη συγγραφή του κώδικα. Έτσι, ο ίδιος κόμβος μπορεί:

- να εκτελείται σε ξεχωριστή διεργασία, εξασφαλίζοντας απομόνωση σφαλμάτων και ευκολότερο αποσφαλματωτικό έλεγχο,

- ή να εκτελείται μαζί με άλλους κόμβους στην ίδια διεργασία, μειώνοντας το επικοινωνιακό κόστος και επιτρέποντας βελτιστοποιήσεις, όπως η ενδοδιεργασιακή επικοινωνία (*intra-process communication*).

Η δυναμική φόρτωση επιτυγχάνεται μέσω μηχανισμού καταχώρισης (registration) της κλάσης ως *component*, ώστε να μπορεί να ανακαλυφθεί από το σύστημα κατά τη φόρτωση της βιβλιοθήκης. Η εκτέλεση πραγματοποιείται σε ειδικούς υποδοχείς (*component containers*), οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιούν διαφορετικούς τύπους executors (π.χ. μονονηματικό ή πολυνηματικό).

Η προσέγγιση αυτή ενισχύει:

- **Επαναχρησιμοποίηση κώδικα**, καθώς ο ίδιος κόμβος μπορεί να ενσωματωθεί σε διαφορετικές συνθέσεις.
- **Αποδοτικότητα**, μέσω μείωσης καθυστερήσεων και αντιγραφών δεδομένων.
- **Ευελιξία ανάπτυξης**, καθώς η τελική αρχιτεκτονική διεργασιών μπορεί να μεταβάλλεται χωρίς τροποποίηση του πηγαίου κώδικα.

Ωστόσο, η εκτέλεση πολλαπλών κόμβων στην ίδια διεργασία συνεπάγεται κοινό χώρο μνήμης και απώλεια απομόνωσης σφαλμάτων· η αστοχία ενός component μπορεί να επηρεάσει ολόκληρη τη διεργασία. Συνεπώς, η επιλογή μεταξύ απομονωμένης και συνθετικής εκτέλεσης αποτελεί αρχιτεκτονική απόφαση με συμβιβασμούς μεταξύ απόδοσης και ανθεκτικότητας.

3.10 Οπτικοποίηση και προσομοίωση

Η λειτουργία ενός ρομποτικού συστήματος δεν περιορίζεται στην εσωτερική ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ κόμβων, αλλά απαιτεί και εργαλεία παρατήρησης, ανάλυσης και επικύρωσης της συμπεριφοράς του. Τα δεδομένα που δημοσιεύονται σε topics (π.χ. αισθητηριακές μετρήσεις, οδομετρία, μετασχηματισμοί, χάρτες) μπορούν να αξιοποιηθούν από εξειδικευμένα εργαλεία οπτικοποίησης και προσομοίωσης.

Η οπτικοποίηση αποτελεί φυσική προέκταση του γράφου επικοινωνίας: τα εργαλεία αυτά λειτουργούν ως απλοί συνδρομητές (subscribers), οι οποίοι αναπαριστούν γραφικά την κατάσταση του συστήματος σε πραγματικό χρόνο, χωρίς να επηρεάζουν τη λειτουργία των υπολοίπων κόμβων.

3.10.1 RViz2

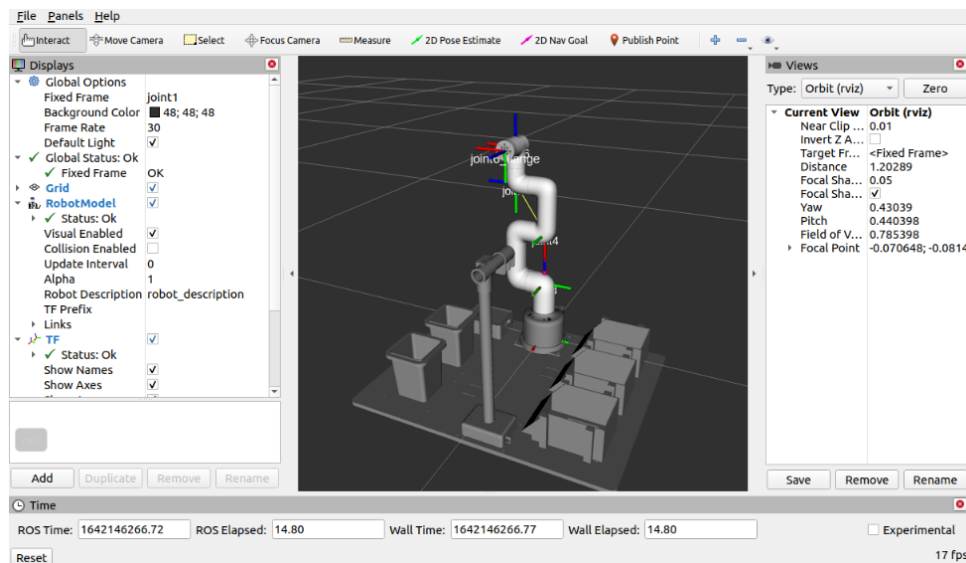
Το RViz2 αποτελεί το βασικό εργαλείο τρισδιάστατης οπτικοποίησης του οικοσυστήματος ROS 2. Λειτουργεί ως γενικός συνδρομητής (subscriber) του γράφου επικοινωνίας και αναπαριστά γραφικά τα δεδομένα που δημοσιεύονται από τους κόμβους του συστήματος, χωρίς να επηρεάζει τη λειτουργία τους.

Η αρχιτεκτονική του βασίζεται στην έννοια των *Displays*, δηλαδή επιμέρους μονάδων οπτικοποίησης που συνδέονται με συγκεκριμένους τύπους μηνυμάτων. Κάθε display εγγράφεται σε ένα topic και μετατρέπει τα εισερχόμενα δεδομένα σε γραφική αναπαράσταση στο τρισδιάστατο περιβάλλον. Ενδεικτικά, υποστηρίζονται τύποι μηνυμάτων όπως:

- `sensor_msgs/msg/LaserScan` για απεικόνιση σαρώσεων λέιζερ,
- `nav_msgs/msg/OccupancyGrid` για προβολή χαρτών,
- `nav_msgs/msg/Path` για απεικόνιση τροχιών,
- `nav_msgs/msg/Odometry` για παρακολούθηση εκτίμησης θέσης,
- `visualization_msgs/msg/Marker` για αυθαίρετες γεωμετρικές αναπαραστάσεις.

Η οπτικοποίηση βασίζεται στο σύστημα μετασχηματισμών TF. Όλα τα δεδομένα μετατρέπονται σε κοινό *Fixed Frame*, ο οποίος ορίζει το παγκόσμιο σύστημα αναφοράς της σκηνής. Η ορθή επιλογή του σταθερού πλαισίου (π.χ. `map` ή `odom`) είναι κρίσιμη για συνεπή απεικόνιση, καθώς το RViz2 δεν αναυπολογίζει μετασχηματισμούς για ήδη απεικονισμένα δεδομένα όταν το πλαίσιο αλλάζει.

Στην περίπτωση οπτικοποίησης ρομποτικού μοντέλου, το display `RobotModel` ανακτά το URDF μέσω της παραμέτρου `robot_description`, ενώ η τοποθέτηση των επιμέρους links στον χώρο πραγματοποιείται βάσει των μετασχηματισμών που μεταδίδονται στο TF, συνήθως μέσω του `robot_state_publisher`. Παράλληλα, το display TF επιτρέπει την απεικόνιση της δενδρικής ιεραρχίας πλαισίων αναφοράς, καθιστώντας ορατά τα τοπικά συστήματα συντεταγμένων κάθε link.



Εικόνα 3.6: Οπτικοποίηση ρομποτικού μοντέλου στο RViz2.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6, η γεωμετρική δομή και το δέντρο μετασχηματισμών συνυπάρχουν στο ίδιο περιβάλλον, επιτρέποντας την άμεση επαλήθευση της κινηματικής συνέπειας μεταξύ του στατικού μοντέλου (URDF) και της δυναμικής κατάστασης του συστήματος.

Το RViz2 υποστηρίζει πολλαπλές προβολές κάμερας και δυνατότητα αποθήκευσης διαμορφώσεων (*configurations*), οι οποίες περιλαμβάνουν το σύνολο των ενεργών displays, τις ιδιότητές τους και τη γεωμετρία προβολής. Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει την προσαρμογή του περιβάλλοντος οπτικοποίησης σε διαφορετικές φάσεις ανάπτυξης ή αποσφαλμάτωσης.

Συνολικά, το RViz2 αποτελεί κρίσιμο εργαλείο αποσφαλμάτωσης, ανάλυσης και επικύρωσης της λειτουργίας ενός ρομποτικού συστήματος, προσφέροντας άμεση και συνεπή χωρική αναπαράσταση των

δεδομένων που παράγονται από τους κόμβους.

3.10.2 Gazebo

Το Gazebo αποτελεί προηγμένο προσομοιωτή ρομποτικών συστημάτων, σχεδιασμένο για έρευνα, ανάπτυξη και δοκιμή αλγορίθμων σε ελεγχόμενο εικονικό περιβάλλον. Σε αντίθεση με το RViz2, το οποίο περιορίζεται στην οπτικοποίηση δεδομένων που δημοσιεύονται στον γράφο ROS 2, το Gazebo υλοποιεί πλήρη φυσική αλληλεπίδραση μεταξύ σωμάτων, επιτρέποντας την αξιολόγηση κινηματικών και δυναμικών συμπεριφορών πριν από την εφαρμογή τους σε πραγματικό υλικό.

Η αρχιτεκτονική του οργανώνεται σε διακριτά αλλά συνεργαζόμενα υποσυστήματα:

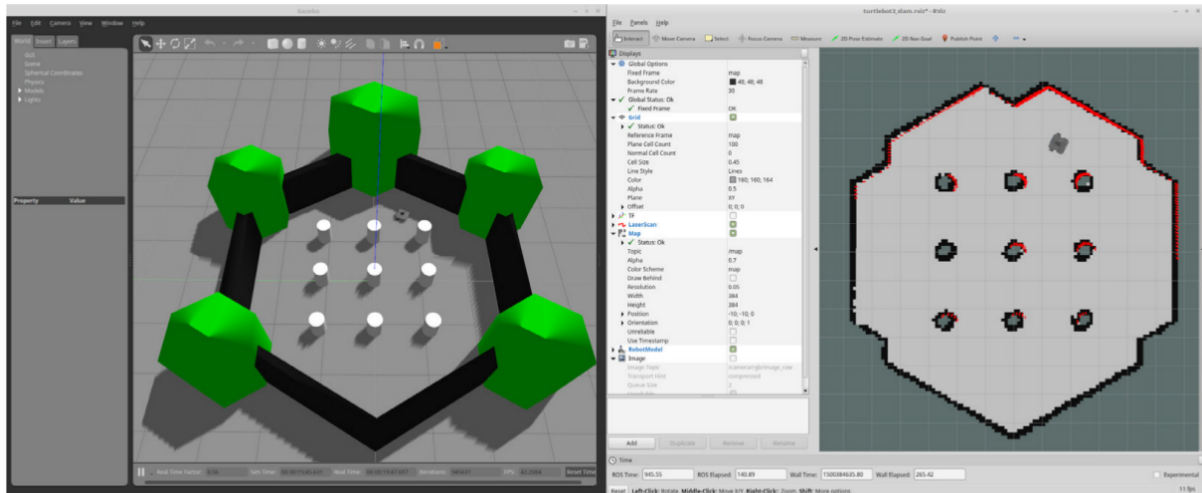
- **Physics:** Προσομοίωση δυναμικής στερεών σωμάτων μέσω εναλλάξιμων μηχανών φυσικής.
- **Rendering:** Τρισδιάστατη απόδοση της σκηνής και των μοντέλων.
- **Sensors:** Εκτεταμένο σύνολο μοντέλων αισθητήρων (LiDAR, κάμερες, IMU) με δυνατότητα προσθήκης θορύβου και ρεαλιστικής συμπεριφοράς.
- **Transport:** Ασύγχρονος μηχανισμός ανταλλαγής μηνυμάτων (Gazebo Transport) για επικοινωνία μεταξύ των εσωτερικών οντοτήτων.

Η ενσωμάτωση του Gazebo σε σύστημα ROS 2 μπορεί να επιτευχθεί με πολλαπλούς τρόπους:

- Εκκίνηση του προσομοιωτή μέσω αρχείων launch, σύμφωνα με τη γενική αρχιτεκτονική εκκίνησης του συστήματος.
- Διασύνδεση μέσω του `ros_gz_bridge`, ο οποίος μεταφράζει μηνύματα μεταξύ Gazebo Transport και ROS 2, επιτρέποντας τη διαφανή ανταλλαγή topics και services.
- Δυναμική εισαγωγή (spawn) μοντέλων σε χρόνο εκτέλεσης μέσω κόμβων ROS 2.

Με τον τρόπο αυτό, το ίδιο λογισμικό ελέγχου και επεξεργασίας μπορεί να λειτουργεί τόσο σε προσομοίωση όσο και σε πραγματική πλατφόρμα, διατηρώντας κοινή αρχιτεκτονική επικοινωνίας. Επιπλέον, σε περιβάλλοντα όπου χρησιμοποιείται σύνθεση κόμβων (composition), το Gazebo και οι σχετικοί κόμβοι διασύνδεσης μπορούν να εκτελούνται στον ίδιο container, αξιοποιώντας ενδοδιεργασιακή επικοινωνία για μείωση καθυστέρησης και υπολογιστικού κόστους. Εναλλακτικά, μπορούν να εκτελούνται σε ανεξάρτητες διεργασίες, προσφέροντας μεγαλύτερη απομόνωση σφαλμάτων.

Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζεται σύγκριση περιβάλλοντος προσομοίωσης και της αντίστοιχης αναπαράστασης στο RViz2. Τα εικονικά δεδομένα αισθητήρων παράγονται στο Gazebo, μεταδίδονται στο ROS 2 και επεξεργάζονται από κόμβους του συστήματος, οδηγώντας στη δημιουργία χωρικής αναπαράστασης (Occupancy Grid). Η σύγκριση αυτή αναδεικνύει την πλήρη ροή πληροφορίας από το επίπεδο φυσικής προσομοίωσης έως το επίπεδο οπτικοποίησης.



Εικόνα 3.7: Σύγκριση περιβάλλοντος προσομοίωσης (αριστερά) και παραγόμενης χαρτογραφικής αναπαράστασης στο RViz2 (δεξιά).

Συνολικά, το Gazebo λειτουργεί ως κρίσιμο στάδιο επικύρωσης μεταξύ θεωρητικού σχεδιασμού και πραγματικής υλοποίησης, επιτρέποντας ελεγχόμενη αξιολόγηση της συμπεριφοράς του ρομπότ σε ρεαλιστικά σενάρια χωρίς κίνδυνο για το φυσικό σύστημα.

3.11 Πακέτα ανώτερου επιπέδου

Η περιγραφή του μηχανισμού επικοινωνίας, του συστήματος μετασχηματισμών και του μοντέλου ρομπότ καθορίζει το θεμέλιο της αρχιτεκτονικής ενός συστήματος ROS 2. Ωστόσο, η επίτευξη αυτόνομης πλοήγησης δεν προκύπτει μόνο από τη σωστή διασύνδεση κόμβων και πλαισίων αναφοράς, αλλά από τη χρήση εξειδικευμένων πακέτων που υλοποιούν εκτίμηση θέσης, χαρτογράφηση και σχεδιασμό κίνησης.

Το οικοσύστημα του ROS 2 παρέχει ώριμα και ευρέως χρησιμοποιούμενα πακέτα, τα οποία αποτελούν τη βάση για την υλοποίηση συστημάτων αυτόνομης πλοήγησης, τόσο σε περιβάλλον προσομοίωσης (π.χ. Gazebo) όσο και σε πραγματικές ρομποτικές πλατφόρμες. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά πακέτα εντοπισμού θέσης και χαρτογράφησης που χρησιμοποιούνται σε μία τυπική αρχιτεκτονική κινητού ρομπότ.

3.11.1 Πακέτο Εντοπισμού Θέσης (Localization)

Η εκτίμηση της θέσης και του προσανατολισμού ενός κινητού ρομπότ σε πραγματικό χρόνο αποτελεί θεμελιώδες υποσύστημα κάθε αρχιτεκτονικής πλοήγησης. Στο ROS 2, η σύντηξη αισθητηριακών δεδομένων και η παραγωγή συνεπούς εκτίμησης κατάστασης υλοποιείται μέσω του πακέτου `robot_localization`.

Το `robot_localization` παρέχει κόμβους εκτίμησης κατάστασης βασισμένους σε μη γραμμικά φίλτρα τύπου Extended Kalman Filter (EKF) και Unscented Kalman Filter (UKF). Οι κόμβοι `ekf_localization_node` και `ukf_localization_node` διατηρούν εσωτερικά μία 15-διάστατη αναπαράσταση της κατάστασης του οχήματος, η οποία περιλαμβάνει θέση και προσανατολισμό στον χώρο, γραμμικές και γωνιακές ταχύτητες, καθώς και γραμμικές επιταχύνσεις. Η πρόβλεψη της κατάστασης πραγματοποιείται μέσω μοντέλου κίνησης, ενώ η διόρθωση βασίζεται στις διαθέσιμες μετρήσεις αισθητήρων.

Κεντρικό χαρακτηριστικό του πακέτου είναι η ευέλικτη σύντηξη πολλαπλών πηγών πληροφορίας. Υποστηρίζονται διαφορετικοί τύποι μηνυμάτων, όπως Odometry, Imu, PoseWithCovarianceStamped και TwistWithCovarianceStamped, ενώ για κάθε αισθητήρα μπορεί να οριστεί επιλεκτικά ποια μεγέθη θα ενσωματωθούν στην εκτίμηση. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την ταυτόχρονη αξιοποίηση οδομετρίας τροχών, αδρανειακών μετρήσεων και άλλων εκτιμήσεων θέσης, χωρίς περιορισμό ως προς τον αριθμό εισόδων.

Η λειτουργία του πακέτου εναρμονίζεται με τις συμβάσεις πλαισίων αναφοράς του REP-105. Η εκτιμώμενη θέση εκφράζεται σε παγκόσμιο πλαίσιο (map ή odom), ενώ οι ταχύτητες εκφράζονται στο πλαίσιο σώματος (base_link). Ανάλογα με τη ρύθμιση της παραμέτρου world_frame, ο κόμβος δημοσιεύει είτε τον μετασχηματισμό odom $\rightarrow$ base_link είτε τον μετασχηματισμό map $\rightarrow$ odom, ενσωματώνοντας την εκτίμηση κατάστασης στη συνολική δενδρική δομή του συστήματος TF.

Επιπλέον, υποστηρίζεται λειτουργία δύο διαστάσεων (two_d_mode), κατάλληλη για ρομπότ που κινούνται σε επίπεδο περιβάλλον. Στην περίπτωση αυτή, οι μεταβλητές ύψους και κλίσης μηδενίζονται, διατηρώντας σταθερή τη συνδιακύμανση των μη χρησιμοποιούμενων βαθμών ελευθερίας και απλοποιώντας το μοντέλο εκτίμησης.

Συνολικά, το robot_localization λειτουργεί ως γενικός μηχανισμός παραγωγής συνεπούς εκτίμησης κατάστασης στο ROS 2, γεφυρώνοντας τις μετρήσεις χαμηλού επιπέδου με το παγκόσμιο γεωμετρικό μοντέλο του ρομπότ και παρέχοντας τη χωρική πληροφορία που απαιτείται από τα υποσυστήματα χαρτογράφησης και πλοήγησης.

3.11.2 Πακέτα Χαρτογράφησης (SLAM)

Στο οικοσύστημα ROS 2, η υλοποίηση αλγορίθμων SLAM πραγματοποιείται μέσω εξειδικευμένων πακέτων λογισμικού που ενσωματώνουν τεχνικές εκτίμησης θέσης, αντιστοίχισης σαρώσεων και βελτιστοποίησης γράφου. Τα πακέτα αυτά διασυνδέονται άμεσα με το σύστημα μετασχηματισμών (TF), αξιοποιούν δεδομένα οδομετρίας και αισθητήρων (συνήθως 2D LiDAR) και δημοσιεύουν τόσο την εκτίμηση θέσης όσο και τον παραγόμενο χάρτη.

Μεταξύ των γνωστών υλοποιήσεων 2D SLAM περιλαμβάνονται τα gmapping, cartographer και slam_toolbox. Το gmapping βασίζεται σε φίλτρο σωματιδίων (Rao–Blackwellized Particle Filter) και υπήρξε ευρέως διαδεδομένο σε συστήματα ROS 1. Το cartographer υλοποιεί γραφηματική προσέγγιση με τοπική και καθολική βελτιστοποίηση, υποστηρίζοντας τόσο 2D όσο και 3D χαρτογράφηση. Οι σύγχρονες υλοποιήσεις στο ROS 2 τείνουν να βασίζονται σε τεχνικές pose-graph SLAM, όπου το πρόβλημα διατυπώνεται ως μη γραμμική βελτιστοποίηση γράφου στάσεων.

Το slam_toolbox αποτελεί την κύρια και επίσημα υποστηριζόμενη υλοποίηση 2D SLAM στο ROS 2 και έχει επιλεγεί ως ο προεπιλεγμένος SLAM vendor της πλατφόρμας. Αποτελεί εξέλιξη της βιβλιοθήκης OpenKarto, ενσωματώνοντας σημαντικές βελτιώσεις απόδοσης και σύγχρονες τεχνικές βελτιστοποίησης μέσω επιλυτή βασισμένου στο Google Ceres. Η αρχιτεκτονική του βασίζεται σε τέσσερα κύρια υποσυστήματα:

- (i) αντιστοίχιση σαρώσεων (scan matching),

- (ii) ανίχνευση επαναεπισκέψεων (loop closure),
- (iii) δημιουργία και ενημέρωση γράφου στάσεων (pose graph),
- (iv) μη γραμμική βελτιστοποίηση του γράφου.

Κάθε νέα σάρωση LiDAR συσχετίζεται με εκτιμώμενη στάση του ρομπότ και εισάγεται ως κόμβος στον γράφο, ενώ οι περιορισμοί που προκύπτουν από την οδομετρία και την αντιστοίχιση σαρώσεων προστίθενται ως ακμές. Η ανίχνευση βρόχων επιτρέπει τη διόρθωση του συσσωρευτικού σφάλματος και τη διατήρηση παγκόσμιας συνέπειας του χάρτη.

Το `slam_toolbox` υποστηρίζει τρεις βασικούς τρόπους λειτουργίας:

- **Synchronous mapping**, όπου διατηρείται προσωρινή μνήμη μετρήσεων πριν την εισαγωγή τους στο πρόβλημα SLAM. Η λειτουργία αυτή είναι κατάλληλη όταν προτεραιότητα αποτελεί η ποιότητα του παραγόμενου χάρτη ή η offline επεξεργασία.
- **Asynchronous mapping**, όπου κάθε νέα μέτρηση επεξεργάζεται μόνο αφού ολοκληρωθεί η προηγούμενη. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η καθυστέρηση του συστήματος σε πραγματικό χρόνο, ακόμη και σε περιπτώσεις σύνθετων βελτιστοποιήσεων λόγω loop closure.
- **Pure localization mode**, κατά το οποίο χρησιμοποιείται προϋπάρχων γράφος στάσεων για εκτίμηση θέσης χωρίς μόνιμη τροποποίηση του χάρτη.

Στη λειτουργία pure localization, νέες μετρήσεις εισάγονται προσωρινά στον γράφο μέσω κυλιόμενου παραθύρου (rolling buffer) και αφαιρούνται μετά από καθορισμένο χρονικό διάστημα, επιτρέποντας προσαρμογή σε δυναμικές μεταβολές χωρίς μόνιμη αλλοίωση του αρχικού χάρτη. Η προσέγγιση αυτή περιγράφεται ως *elastic pose-graph deformation*.

Επιπλέον, το πακέτο υποστηρίζει αποθήκευση και επαναφόρτωση πλήρους γράφου στάσεων (serialization / deserialization), επιτρέποντας *multi-session SLAM* και συνεχιζόμενη ή τμηματική χαρτογράφηση (life-long mapping). Σε αντίθεση με προσεγγίσεις που αποθηκεύουν μόνο υποχάρτες (submaps), το `slam_toolbox` διατηρεί ολόκληρη τη δομή του γράφου, επιτρέποντας μεταγενέστερη βελτιστοποίηση, συγχώνευση χαρτών και χειροκίνητη επεξεργασία κόμβων.

Από αρχιτεκτονική άποψη, το `slam_toolbox` λαμβάνει ως είσοδο σαρώσεις `sensor_msgs/LaserScan` και τον μετασχηματισμό `odom → base_link`, και δημοσιεύει:

- χάρτη τύπου `nav_msgs/OccupancyGrid`,
- εκτίμηση στάσης του ρομπότ,
- μετασχηματισμό `map → odom`.

Με τον τρόπο αυτό ενσωματώνεται οργανικά στο δέντρο μετασχηματισμών του REP-105 και συνεργάζεται άμεσα με τα πακέτα εντοπισμού και πλοήγησης, αποτελώντας βασικό δομικό στοιχείο της αρχιτεκτονικής αυτόνομης πλοήγησης στο ROS 2.

Κεφάλαιο 4ο: Σύστημα Πλοήγησης (Navigation2)

Το πολυεπίπεδο και συστημικό πρόβλημα της πλοήγησης κινητών ρομπότ αναδεικνύει την ανάγκη για αρχιτεκτονικές λύσεις που υπερβαίνουν τον απλό υπολογισμό μιας διαδρομής. Η απαίτηση λειτουργίας υπό αβεβαιότητα, η δυναμικότητα του περιβάλλοντος και οι περιορισμοί πραγματικού χρόνου καθιστούν αναγκαίο τον σαφή διαχωρισμό μεταξύ στρατηγικού σχεδιασμού, τοπικής προσαρμογής και φυσικής εκτέλεσης κίνησης.

Στο πλαίσιο αυτό, το Navigation2 (Nav2) αποτελεί την αρχιτεκτονική υλοποίηση πλοήγησης του ROS 2, μεταφράζοντας τις παραπάνω αρχές σε οργανωμένη και επεκτάσιμη δομή λογισμικού. Δεν συνιστά απλώς σύνολο αλγορίθμων, αλλά ολοκληρωμένο πλαίσιο ενορχήστρωσης των επιμέρους λειτουργιών πλοήγησης.

Το Nav2 αποτελεί τον επανασχεδιασμένο διάδοχο του Navigation Stack του ROS 1 και αναπτύχθηκε εξ αρχής με γνώμονα τις αρχές αρχιτεκτονικής του ROS 2, αξιοποιώντας μηχανισμούς actions, διαχείριση κύκλου ζωής (lifecycle) και δυναμική φόρτωση αλγορίθμων μέσω συστήματος προσθηκών (plugins).

Σε αντίθεση με μία μονολιθική υλοποίηση, το Nav2 οργανώνει τη λειτουργικότητά του σε διακριτούς εξυπηρετητές (servers), οι οποίοι αναλαμβάνουν τον καθολικό σχεδιασμό διαδρομής, τον τοπικό έλεγχο κίνησης, τη διαχείριση συμπεριφορών ανάκαμψης, την εξομάλυνση διαδρομών και άλλες υποστηρικτικές λειτουργίες. Η ενορχήστρωση πραγματοποιείται μέσω Δέντρων Συμπεριφοράς (Behavior Trees), τα οποία καθορίζουν τη λογική ακολουθία ενεργειών και τη διαχείριση καταστάσεων επιτυχίας ή αποτυχίας.

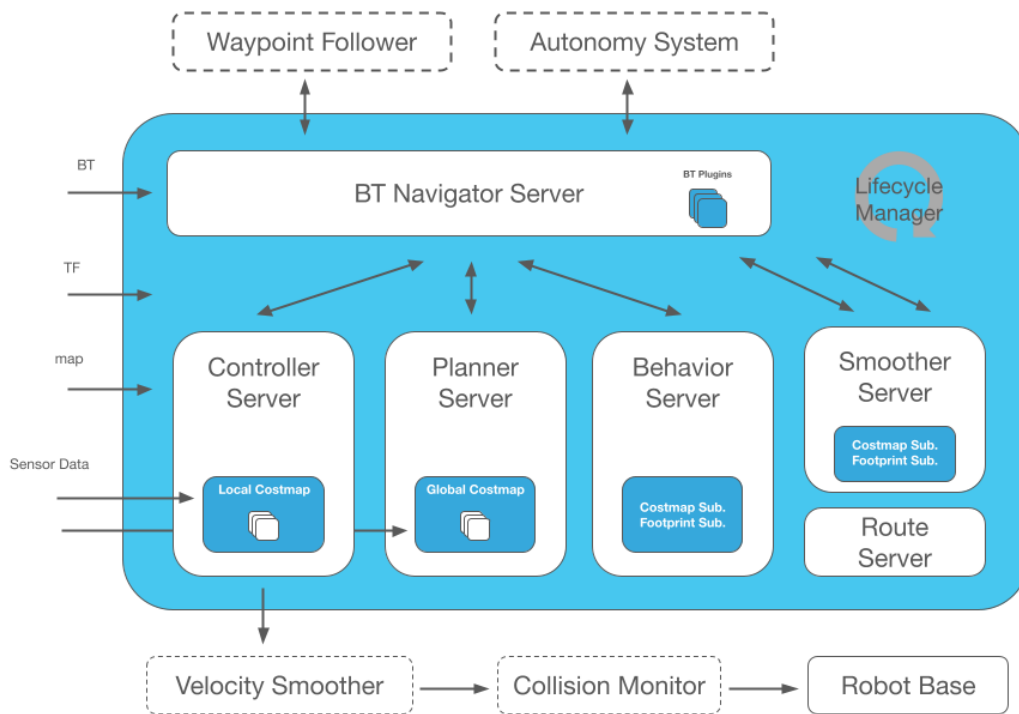
Η διεπαφή υψηλού επιπέδου βασίζεται σε action servers, επιτρέποντας την εκτέλεση μακράς διάρκειας εργασιών πλοήγησης με μηχανισμό ανατροφοδότησης (feedback) και σαφώς ορισμένο αποτέλεσμα (result). Παράλληλα, η χρήση lifecycle κόμβων επιτρέπει ελεγχόμενη εκκίνηση, ενεργοποίηση και τερματισμό των επιμέρους υποσυστημάτων, ενισχύοντας τη σταθερότητα και προβλεψιμότητα του συνολικού συστήματος.

Το Nav2 προϋποθέτει τη διαθεσιμότητα κατάλληλων μετασχηματισμών TF σύμφωνα με το πρότυπο REP-105, καθώς και πηγών δεδομένων αισθητήρων και εντοπισμού θέσης. Δεν υλοποιεί το ίδιο μηχανισμούς εντοπισμού ή SLAM, αλλά λειτουργεί πάνω σε εκτιμήσεις θέσης και περιβαλλοντικές αναπαραστάσεις που παρέχονται από άλλα υποσυστήματα, διατηρώντας σαφή διαχωρισμό μεταξύ εκτίμησης κατάστασης και λήψης αποφάσεων πλοήγησης.

4.1 Αρχιτεκτονική του Navigation2 και ενορχήστρωση συμπεριφοράς

Η αρχιτεκτονική του Navigation2 βασίζεται σε αρθρωτή οργάνωση διακριτών εξυπηρετητών (servers), οι οποίοι συνεργάζονται μέσω διεπαφών actions και services για την υλοποίηση της πλοήγησης. Κάθε εξυπηρετητής αναλαμβάνει συγκεκριμένη κατηγορία λειτουργιών, ενώ η συνολική λογική εκτέλεσης οργανώνεται κεντρικά από τον Πλοηγτή Δέντρου Συμπεριφοράς (Behavior Tree Navigator).

Η συνολική δομή του συστήματος αποτυπώνεται στο Σχήμα 4.1.



Εικόνα 4.1: Αρχιτεκτονική του Navigation2.

Στο ανώτερο επίπεδο βρίσκεται ο BT Navigator, ο οποίος λαμβάνει αιτήματα πλοήγησης μέσω action διεπαφής (π.χ. NavigateToPose) και ενεργοποιεί την αλληλουχία ενεργειών. Το δέντρο συμπεριφοράς καθορίζει πότε θα κληθεί ο καθολικός σχεδιασμός, πότε θα ενεργοποιηθεί ο τοπικός έλεγχος και πότε θα εκτελεστούν μηχανισμοί ανάκαμψης, παρακολουθώντας διαρκώς την επιτυχία ή αποτυχία των επιμέρους βημάτων.

Σε δομικό επίπεδο, ο *Planner Server* είναι υπεύθυνος για τον υπολογισμό καθολικής διαδρομής αξιοποιώντας τον καθολικό χάρτη κόστους (global costmap). Ο *Controller Server* μετατρέπει τη διαδρομή αυτή σε εντολές ταχύτητας σε πραγματικό χρόνο, βασιζόμενος σε τοπική αναπαράσταση περιβάλλοντος (local costmap). Ο *Behavior Server* φιλοξενεί συμπεριφορές ανάκαμψης ή ειδικές ενέργειες που ενεργοποιούνται σε περιπτώσεις αποτυχίας ή ειδικών συνθηκών. Ο *Smoother Server* δύναται να βελτιώσει τη γεωμετρία μιας διαδρομής πριν αυτή ακολουθηθεί, ενώ ο *Route Server* υποστηρίζει σχεδιασμό βασισμένο σε γράφο πλοήγησης.

Η παραγωγή εντολών κίνησης ακολουθεί τη γενική ροή:

Goal → Planning → Control → cmd_vel.

Οι εντολές ταχύτητας μπορούν επιπλέον να διέρχονται από επίπεδα εξομάλυνσης (velocity smoothing) και παρακολούθησης σύγκρουσης (collision monitoring), πριν καταλήξουν στη ρομποτική βάση. Η ύπαρξη ανεξάρτητου μηχανισμού παρακολούθησης σύγκρουσης ενισχύει την ασφάλεια, καθώς επιτρέπει την επιβολή περιορισμών ταχύτητας ή άμεσης παύσης κίνησης ανεξάρτητα από τον αλγοριθμικό έλεγχο.

Η επιλογή Δέντρων Συμπεριφοράς ως μηχανισμού υψηλού επιπέδου ελέγχου επιτρέπει σαφή διαχωρισμό μεταξύ λογικής εφαρμογής και αλγοριθμικών μονάδων. Σε αντίθεση με μία κλασική Πεπερασμένη Μη-

χανή Καταστάσεων, όπου η αύξηση καταστάσεων και μεταβάσεων οδηγεί σε εκθετική πολυπλοκότητα, τα Δέντρα Συμπεριφοράς οργανώνουν τις ενέργειες ιεραρχικά και υποστηρίζουν επαναχρησιμοποίηση κόμβων και σύνθεση υποδέντρων. Έτσι, η στρατηγική πλοήγησης παραμένει ευέλικτη και επεκτάσιμη χωρίς τροποποίηση των επιμέρους εξυπηρετητών.

Η λειτουργία της αρχιτεκτονικής προϋποθέτει την ύπαρξη συγκεκριμένων εισόδων από τα υποκείμενα συστήματα. Πρωτίστως απαιτείται δέντρο μετασχηματισμών σύμφωνα με το πρότυπο REP-105, το οποίο περιλαμβάνει τουλάχιστον τους μετασχηματισμούς $\text{map} \rightarrow \text{odom} \rightarrow \text{base_link}$. Ο μετασχηματισμός $\text{map} \rightarrow \text{odom}$ παρέχεται από σύστημα εντοπισμού ή SLAM, ενώ ο $\text{odom} \rightarrow \text{base_link}$ από σύστημα οδομετρίας. Επιπλέον, απαιτούνται ροές δεδομένων αισθητήρων για την ενημέρωση των χαρτών κόστους, ενδεχομένως πηγή στατικού χάρτη, καθώς και ορισμός Δέντρου Συμπεριφοράς σε μορφή XML. Τα αιτήματα πλοήγησης εκφράζονται μέσω action διεπαφής και ενεργοποιούν τη διαδικασία ενορχήστρωσης.

Τέλος, κάθε εξυπηρετητής υλοποιείται ως lifecycle κόμβος, επιτρέποντας διακριτές φάσεις διαμόρφωσης και ενεργοποίησης. Ο Lifecycle Manager επιβλέπει τη συνοχή του συστήματος, εξασφαλίζοντας ότι όλα τα υποσυστήματα βρίσκονται σε συνεπή κατάσταση πριν την εκτέλεση πλοήγησης και επιτρέποντας ελεγχόμενο τερματισμό ή επανεκκίνηση σε περίπτωση σφάλματος.

Συνολικά, η αρχιτεκτονική του Navigation2 συγκροτεί ένα πολυεπίπεδο σύστημα πλοήγησης, στο οποίο ο στρατηγικός σχεδιασμός, ο τοπικός έλεγχος και οι μηχανισμοί ασφάλειας διατηρούν λειτουργική ανεξαρτησία, ενώ συντονίζονται μέσω ενιαίας λογικής ελέγχου βασισμένης σε Δέντρα Συμπεριφοράς.

4.2 Υβριδικό σχήμα σχεδιασμού πλοήγησης

Η πλοήγηση κινητών ρομπότ σε πραγματικά περιβάλλοντα δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ενιαίο πρόβλημα σχεδιασμού. Η ύπαρξη αβεβαιότητας, δυναμικών εμποδίων και περιορισμών κινηματικής καθιστά αναγκαίο τον διαχωρισμό μεταξύ στρατηγικού και τοπικού επιπέδου λήψης αποφάσεων. Το Navigation2 υιοθετεί ένα υβριδικό σχήμα σχεδιασμού, στο οποίο ο καθολικός σχεδιασμός διαδρομής διαχωρίζεται από τον τοπικό έλεγχο κίνησης.

Ο καθολικός σχεδιασμός (global planning) υπολογίζει μία διαδρομή από την τρέχουσα θέση προς τον στόχο, λαμβάνοντας υπόψη τον συνολικό χάρτη του περιβάλλοντος. Η διαδρομή αυτή δεν αποτελεί άμεση εντολή ελέγχου, αλλά γεωμετρική αναπαράσταση της επιθυμητής πορείας σε μακροσκοπική κλίμακα. Ο σχεδιασμός αυτός πραγματοποιείται σε χαμηλότερη συχνότητα και εστιάζει στη βελτιστοποίηση κριτηρίων όπως το μήκος διαδρομής, η κινηματική εφικτότητα ή η αποφυγή υψηλού κόστους περιοχών.

Αντιθέτως, ο τοπικός έλεγχος (local control) λειτουργεί σε υψηλή συχνότητα και μετατρέπει τη διαδρομή σε στιγμιαίες εντολές ταχύτητας. Στο επίπεδο αυτό λαμβάνονται υπόψη δυναμικές μεταβολές του περιβάλλοντος, πρόσφατα δεδομένα αισθητήρων και περιορισμοί δυναμικής του ρομπότ. Ο ελεγκτής δεν αναζητά εκ νέου παγκόσμια βέλτιστη διαδρομή, αλλά επιδιώκει την ασφαλή και ομαλή παρακολούθηση της ήδη υπολογισμένης πορείας.

Ο διαχωρισμός αυτός μειώνει την υπολογιστική πολυπλοκότητα, επιτρέπει διαφορετικές χρονικές κλίμακες λειτουργίας και ενισχύει την ανθεκτικότητα του συστήματος. Σε περίπτωση απόκλισης ή τοπικής

αποτυχίας, το Δέντρο Συμπεριφοράς μπορεί να ενεργοποιήσει εκ νέου τον καθολικό σχεδιασμό ή να καλέσει συμπεριφορές ανάκαμψης, χωρίς να απαιτείται ανασχεδιασμός ολόκληρης της αρχιτεκτονικής.

Η προσέγγιση αυτή αντανακλά την ευρύτερη τάση στα σύγχρονα συστήματα πλοήγησης, όπου η λήψη αποφάσεων οργανώνεται ιεραρχικά: στρατηγικό επίπεδο (πού να πάω), τακτικό επίπεδο (ποια διαδρομή να ακολουθήσω) και επιχειρησιακό επίπεδο (ποιες εντολές να στείλω στους ενεργοποιητές). Το Navigation2 ενσωματώνει ρητά αυτόν τον διαχωρισμό μέσω ανεξάρτητων εξυπηρετητών και σαφώς ορισμένων διεπαφών.

Στο επόμενο τμήμα αναλύεται η αναπαράσταση του περιβάλλοντος μέσω χαρτών κόστους, η οποία αποτελεί τον κοινό πληροφοριακό χώρο πάνω στον οποίο λειτουργούν τόσο ο καθολικός σχεδιασμός όσο και ο τοπικός έλεγχος.

4.3 Αναπαράσταση περιβάλλοντος και χάρτες κόστους

Η πλοήγηση ενός κινητού ρομπότ προϋποθέτει την ύπαρξη ενιαίας αναπαράστασης του περιβάλλοντος, πάνω στην οποία θα βασιστούν τόσο ο καθολικός σχεδιασμός διαδρομής όσο και ο τοπικός έλεγχος κίνησης. Στο Navigation2, ο ρόλος αυτός επιτελείται από τους χάρτες κόστους (costmaps), οι οποίοι αποτελούν διακριτοποιημένη διδιάστατη αναπαράσταση του χώρου, όπου κάθε κελί αντιστοιχεί σε αριθμητική τιμή κόστους.

Σε αντίθεση με έναν απλό χάρτη κατάληψης (occupancy grid), ο οποίος δηλώνει δυαδικά εάν μία περιοχή είναι ελεύθερη ή κατειλημμένη, ο χάρτης κόστους εκφράζει βαθμιαία την επιθυμητότητα διέλευσης από κάθε θέση. Η κλίμακα κόστους λαμβάνει τιμές σε πεπερασμένο εύρος (τυπικά 0–255), επιτρέποντας τη διάκριση μεταξύ ελεύθερου χώρου, άγνωστων περιοχών, θανατηφόρων εμποδίων (lethal obstacles) και περιοχών αυξημένου κινδύνου.

Η έννοια του κόστους επιτρέπει την υλοποίηση cost-aware πλοήγησης. Ο καθολικός σχεδιασμός δεν αναζητά απλώς τη γεωμετρικά συντομότερη διαδρομή, αλλά ελαχιστοποιεί συνάρτηση κόστους που λαμβάνει υπόψη την εγγύτητα σε εμπόδια ή περιοχές υψηλού κινδύνου. Αντίστοιχα, ο τοπικός ελεγκτής αξιοποιεί την τοπική αναπαράσταση κόστους για την αποφυγή δυναμικών εμποδίων και την παραγωγή ασφαλών εντολών ταχύτητας.

Κρίσιμο στοιχείο της αναπαράστασης αποτελεί η διαδικασία διόγκωσης (inflation). Γύρω από κάθε εμπόδιο ορίζεται ζώνη αυξημένου κόστους, της οποίας η τιμή μειώνεται βαθμιαία όσο αυξάνεται η απόσταση από το εμπόδιο. Με τον τρόπο αυτό, το ρομπότ δεν κινείται οριακά δίπλα σε εμπόδια, αλλά διατηρεί περιθώριο ασφαλείας ανάλογο με το μέγεθος και το αποτύπωμά του (robot footprint). Η προσέγγιση αυτή ισοδυναμεί με μετασχηματισμό του ελεύθερου χώρου σε χώρο διαμορφωμένο ως προς τη γεωμετρία του ρομπότ (configuration space).

Το Navigation2 διατηρεί διακριτούς καθολικούς και τοπικούς χάρτες κόστους. Ο καθολικός χάρτης καλύπτει μεγαλύτερη χωρική έκταση και χρησιμοποιείται από τον Planner Server για τον υπολογισμό συνολικής διαδρομής. Ο τοπικός χάρτης λειτουργεί συνήθως ως κινούμενο παράθυρο (rolling window) γύρω από το ρομπότ και ενημερώνεται σε υψηλή συχνότητα με δεδομένα αισθητήρων, εξυπηρετώντας τον Controller Server.

Η υιοθέτηση χαρτών κόστους ως ενιαίας αναπαράστασης επιτρέπει την αποσύνδεση των αλγορίθμων πλοήγησης από τις επιμέρους πηγές αισθητηριακών δεδομένων. Οι planners και controllers δεν αλληλεπιδρούν άμεσα με αισθητήρες, αλλά με μία ενοποιημένη μαθηματική αναπαράσταση του περιβάλλοντος, ενισχύοντας την αρθρωτότητα και επεκτασιμότητα του συστήματος.

4.3.1 Αρχιτεκτονική πολυεπίπεδων χαρτών (Layered Costmap)

Η αναπαράσταση περιβάλλοντος στο Navigation2 δεν περιορίζεται σε έναν ενιαίο στατικό πίνακα κόστους, αλλά υλοποιείται μέσω πολυεπίπεδης αρχιτεκτονικής (layered costmap). Κάθε χάρτης κόστους συγκροτείται από σύνολο επιμέρους επιπέδων (layers), τα οποία συνεισφέρουν πληροφορία από διαφορετικές πηγές ή με διαφορετική σημασιολογία. Η τελική τιμή κόστους κάθε κελιού προκύπτει από τον συνδυασμό των επιπέδων αυτών.

Το *Static Layer* ενσωματώνει πληροφορία από προκαθορισμένο στατικό χάρτη, ο οποίος συνήθως παράγεται από διαδικασία SLAM ή παρέχεται ως εκ των προτέρων γνωστό περιβάλλον. Το επίπεδο αυτό καθορίζει τα μόνιμα εμπόδια και τη βασική γεωμετρία του χώρου.

Τα *Obstacle Layers* ενημερώνονται δυναμικά με δεδομένα αισθητήρων (π.χ. LiDAR, βάθος, RADAR) και σηματοδοτούν περιοχές που καταλαμβάνονται από εμπόδια σε πραγματικό χρόνο. Σε πιο σύνθετες υλοποιήσεις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τρισδιάστατες δομές (voxel layers), επιτρέποντας αποτύπωση ύψους και καλύτερη διαχείριση ανυψωμένων ή χαμηλών εμποδίων.

Το *Inflation Layer* εφαρμόζει χωρική διόγκωση γύρω από τα εμπόδια, μετατρέποντας τη δυαδική πληροφορία κατάληψης σε βαθμιαία πεδίο κόστους. Η τιμή κόστους μειώνεται εκθετικά ως προς την απόσταση από το εμπόδιο, διασφαλίζοντας περιθώριο ασφαλείας ανάλογο με το αποτύπωμα του ρομπότ.

Επιπλέον, το σύστημα υποστηρίζει *Costmap Filters*, τα οποία επιτρέπουν την επιβολή χωρικά εξαρτώμενων περιορισμών στη συμπεριφορά πλοήγησης. Παραδείγματα περιλαμβάνουν ζώνες απαγόρευσης διέλευσης (keep-out zones), περιοχές περιορισμένης ταχύτητας ή προτιμώμενες λωρίδες κίνησης. Τα φίλτρα αυτά εφαρμόζονται πάνω στη βασική αναπαράσταση κόστους, τροποποιώντας τη συμπεριφορά του ρομπότ χωρίς αλλαγή των αλγορίθμων σχεδιασμού.

Η πολυεπίπεδη αυτή προσέγγιση επιτρέπει την ενοποίηση ετερογενών πηγών πληροφορίας σε ενιαίο μαθηματικό πεδίο, το οποίο χρησιμοποιείται από planners και controllers. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται διαχωρισμός μεταξύ αντίληψης και λήψης αποφάσεων, καθώς οι αλγόριθμοι πλοήγησης λειτουργούν αποκλειστικά πάνω στον ενοποιημένο χάρτη κόστους, ανεξάρτητα από την προέλευση των δεδομένων.

4.4 Καθολικός σχεδιασμός διαδρομής

Ο καθολικός σχεδιασμός διαδρομής (global planning) αποτελεί το στρατηγικό επίπεδο της πλοήγησης και έχει ως αντικείμενο τον υπολογισμό μίας διαδρομής από την τρέχουσα θέση του ρομπότ προς τον επιθυμητό στόχο. Ο σχεδιασμός πραγματοποιείται πάνω στον καθολικό χάρτη κόστους και στοχεύει στην ελαχιστοποίηση συνάρτησης κόστους, η οποία λαμβάνει υπόψη γεωμετρικά και σημασιολογικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος.

Σε αντίθεση με τον τοπικό έλεγχο, ο οποίος λειτουργεί σε υψηλή συχνότητα και λαμβάνει υπόψη δυναμικά εμπόδια, ο καθολικός σχεδιασμός επικεντρώνεται στη μακροσκοπική δομή του χώρου. Η συχνότητα επανυπολογισμού είναι χαμηλότερη και ενεργοποιείται συνήθως όταν αλλάξει ο στόχος, όταν ανιχνευθεί σημαντική απόκλιση ή όταν αποτύχει η παρακολούθηση της διαδρομής.

Οι περισσότεροι καθολικοί σχεδιαστές που υποστηρίζονται στο Navigation2 βασίζονται σε μεθόδους αναζήτησης γράφου (search-based planning). Το περιβάλλον αναπαρίσταται ως διακριτό πλέγμα και εφαρμόζονται αλγόριθμοι όπως Dijkstra ή A*, οι οποίοι επεκτείνουν κόμβους βάσει ευρετικής συνάρτησης (heuristic) και συσσωρευμένου κόστους. Η χρήση ευρετικών επιτρέπει επιτάχυνση της αναζήτησης, διατηρώντας παράλληλα ιδιότητες βέλτιστης ή σχεδόν βέλτιστης λύσης.

Η ύπαρξη βαθμιαίων τιμών κόστους στον χάρτη επιτρέπει cost-aware σχεδιασμό. Ο αλγόριθμος δεν αποφεύγει μόνο τα θανατηφόρα εμπόδια, αλλά λαμβάνει υπόψη και περιοχές αυξημένου κόστους, όπως ζώνες κοντά σε εμπόδια ή περιοχές με περιορισμούς. Έτσι, η τελική διαδρομή αποτελεί αποτέλεσμα βελτιστοποίησης σε πεδίο κόστους και όχι απλώς γεωμετρικής συντομίας.

4.4.1 Ολονομικοί και κινηματικά εφικτοί σχεδιαστές

Οι καθολικοί σχεδιαστές μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο βασικές κατηγορίες, ανάλογα με το αν λαμβάνουν ρητά υπόψη τους κινηματικούς περιορισμούς του ρομπότ.

Οι ολονομικοί σχεδιαστές (holonomic planners) θεωρούν ότι το ρομπότ μπορεί να κινηθεί ισοδύναμα προς όλες τις κατευθύνσεις στο επίπεδο. Η αναζήτηση πραγματοποιείται συνήθως σε διδιάστατο πλέγμα θέσεων χωρίς ρητή αναπαράσταση προσανατολισμού. Η προσέγγιση αυτή είναι επαρκής για ρομπότ με ολισθητική κίνηση (π.χ. holonomic βάσεις), αλλά μπορεί να οδηγήσει σε διαδρομές που δεν είναι άμεσα υλοποιήσιμες από μη-ολονομικά συστήματα.

Αντιθέτως, οι κινηματικά εφικτοί σχεδιαστές (kinematically feasible planners) ενσωματώνουν περιορισμούς προσανατολισμού και καμπυλότητας στον χώρο αναζήτησης. Παραδείγματα αποτελούν οι παραλλαγές του Hybrid-A* και οι μέθοδοι State Lattice, στις οποίες ο χώρος καταστάσεων επεκτείνεται ώστε να περιλαμβάνει τόσο θέση όσο και προσανατολισμό. Με τον τρόπο αυτό, η παραγόμενη διαδρομή είναι συμβατή με τους μη-ολονομικούς περιορισμούς συστημάτων τύπου differential-drive ή Ackermann.

Η ενσωμάτωση κινηματικών περιορισμών αυξάνει τη διαστατικότητα του χώρου αναζήτησης και κατ'επέκταση την υπολογιστική πολυπλοκότητα. Ωστόσο, οδηγεί σε διαδρομές που απαιτούν μικρότερη τροποποίηση από τον τοπικό ελεγκτή και μειώνουν την ανάγκη για απότομες αλλαγές κατεύθυνσης ή περιστροφές επί τόπου.

Η επιλογή μεταξύ των δύο κατηγοριών εξαρτάται από τον τύπο του ρομπότ, το περιβάλλον λειτουργίας και τις απαιτήσεις ακρίβειας. Το Navigation2 υποστηρίζει και τις δύο προσεγγίσεις μέσω μηχανισμού προσθηκών, επιτρέποντας την προσαρμογή του συστήματος στις εκάστοτε επιχειρησιακές ανάγκες.

4.5 Τοπικός έλεγχος τροχιάς και παρακολούθηση διαδρομής

Ο τοπικός έλεγχος τροχιάς αποτελεί το επιχειρησιακό επίπεδο της πλοήγησης και είναι υπεύθυνος για τη μετάβαση από γεωμετρική διαδρομή σε πραγματικές εντολές ταχύτητας (`cmd_vel`). Ο Controller Server λειτουργεί ως action server και ενεργοποιείται από τον BT Navigator προκειμένου να παρακολουθήσει τη διαδρομή που υπολογίστηκε από τον Planner Server.

Η λειτουργία του ελεγκτή πραγματοποιείται σε υψηλή συχνότητα και εντάσσεται σε κλειστό βρόχο ελέγχου. Σε κάθε χρονικό βήμα, λαμβάνεται η τρέχουσα εκτίμηση θέσης, η επιθυμητή διαδρομή και η τοπική αναπαράσταση κόστους, και υπολογίζονται στιγμιαίες εντολές ταχύτητας. Σε αντίθεση με τον καθολικό σχεδιασμό, ο τοπικός έλεγχος λαμβάνει υπόψη δυναμικά εμπόδια και περιορισμούς δυναμικής, προσαρμόζοντας συνεχώς την κίνηση του ρομπότ.

Το Navigation2 υποστηρίζει πολλαπλές φιλοσοφίες τοπικού ελέγχου μέσω μηχανισμού προσθηκών (plugins), οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν σε αντιδραστικές, προβλεπτικές και γεωμετρικές/ελεγκτικές προσεγγίσεις.

4.5.1 Αντιδραστικές μέθοδοι

Οι αντιδραστικές μέθοδοι βασίζονται σε δειγματοληψία υποψήφιων εντολών ταχύτητας στον χώρο ελέγχου και στην αξιολόγησή τους βάσει κριτηρίων κόστους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο Dynamic Window Based (DWB) controller, ο οποίος παράγει σύνολο δυνατών τροχιών λαμβάνοντας υπόψη τα όρια ταχύτητας και επιτάχυνσης του ρομπότ.

Κάθε υποψήφια τροχιά αξιολογείται μέσω συναρτήσεων κόστους (critics), οι οποίες λαμβάνουν υπόψη παράγοντες όπως η απόσταση από εμπόδια, η απόκλιση από τη διαδρομή και η πρόοδος προς τον στόχο. Η τελική εντολή επιλέγεται ως εκείνη με το χαμηλότερο συνολικό κόστος.

Οι μέθοδοι αυτές χαρακτηρίζονται από υπολογιστική αποδοτικότητα και άμεση αντίδραση σε δυναμικές μεταβολές. Ωστόσο, λόγω της τοπικής φύσης της αναζήτησης, ενδέχεται να παγιδευτούν σε τοπικά ελάχιστα ή να απαιτήσουν ενεργοποίηση συμπεριφορών ανάκαμψης.

4.5.2 Προβλεπτικές μέθοδοι

Οι προβλεπτικές μέθοδοι βασίζονται στη φιλοσοφία του Model Predictive Control (MPC), όπου η βέλτιστη ακολουθία ελέγχου υπολογίζεται μέσω προσομοίωσης μελλοντικών τροχιών σε πεπερασμένο χρονικό ορίζοντα. Στο Navigation2 υλοποιείται ο MPPI (Model Predictive Path Integral) controller, ο οποίος βασίζεται σε στοχαστική δειγματοληψία και θεωρία information-theoretic optimal control.

Η μέθοδος MPPI δεν απαιτεί γραμμικοποίηση του μοντέλου ούτε υπολογισμό παραγώγων. Σε κάθε κύκλο ελέγχου παράγεται πλήθος υποψήφιων ακολουθιών ελέγχου μέσω προσθήκης στοχαστικού θορύβου στην τρέχουσα λύση. Οι τροχιές αξιολογούνται βάσει συνάρτησης κόστους, η οποία μπορεί να ενσωματώνει πληροφορία από τον χάρτη κόστους, την απόσταση από τη διαδρομή και δυναμικούς περιορισμούς. Η νέα εντολή προκύπτει ως σταθμισμένος μέσος όρος των υποψήφιων λύσεων με εκθετική στάθμιση ως προς το κόστος.

Σε σύγκριση με καθαρά αντιδραστικές μεθόδους, οι προβλεπτικές προσεγγίσεις προσφέρουν καλύτερη αξιοποίηση του χρονικού ορίζοντα και ομαλότερη συμπεριφορά, με αντάλλαγμα αυξημένες υπολογιστικές απαιτήσεις.

4.5.3 Γεωμετρικές και ελεγκτικές προσεγγίσεις

Οι γεωμετρικές μέθοδοι βασίζονται σε απευθείας γεωμετρική σχέση μεταξύ της τρέχουσας θέσης και ενός σημείου αναφοράς επί της διαδρομής. Κλασικό παράδειγμα αποτελεί ο αλγόριθμος Pure Pursuit, ο οποίος επιλέγει σημείο-στόχο σε προκαθορισμένη απόσταση και υπολογίζει καμπυλότητα που οδηγεί προς αυτό.

Στο Navigation2 υλοποιείται ο Regulated Pure Pursuit (RPP), ο οποίος επεκτείνει τη βασική μέθοδο με μηχανισμούς ρύθμισης ταχύτητας βάσει καμπυλότητας και εγγύτητας σε εμπόδια. Η προσέγγιση αυτή συνδυάζει γεωμετρική απλότητα με στοιχειώδη προσαρμογή σε δυναμικές συνθήκες, επιτυγχάνοντας ομαλή και σταθερή παρακολούθηση διαδρομής.

Οι γεωμετρικές μέθοδοι είναι υπολογιστικά ελαφριές και κατάλληλες για συστήματα περιορισμένων πόρων, αν και η διαχείριση σύνθετων δυναμικών σεναρίων εξαρτάται από τον βαθμό εμπλουτισμού τους με πρόσθετους ρυθμιστικούς μηχανισμούς.

4.6 Ασφάλεια κίνησης και μηχανισμοί ανάκαμψης

Η ασφαλής λειτουργία ενός αυτόνομου ρομπότ σε πραγματικό περιβάλλον απαιτεί μηχανισμούς επιτήρησης οι οποίοι λειτουργούν ανεξάρτητα από τον βασικό αλγοριθμικό έλεγχο πλοήγησης. Παρότι ο καθολικός σχεδιασμός και ο τοπικός ελεγκτής αποσκοπούν στην αποφυγή εμποδίων μέσω costmaps και πρόβλεψης τροχιών, απαιτείται επιπλέον επίπεδο άμεσης αντίδρασης σε περιπτώσεις αιφνίδιας εμφάνισης εμποδίων ή ταχείας προσέγγισης δυναμικών αντικειμένων.

Στο Navigation2 ο ρόλος αυτός υλοποιείται από τον κόμβο *Collision Monitor*, ο οποίος παρεμβάλλεται στη ροή των εντολών ταχύτητας και επιτηρεί τα δεδομένα αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο. Σε αντίθεση με τον controller, ο οποίος βασίζεται σε costmaps και σχεδιασμό τροχιάς, ο Collision Monitor μπορεί να παρακάμψει την αναπαράσταση περιβάλλοντος και να αντιδρά απευθείας σε ακατέργαστα δεδομένα αισθητήρων, μειώνοντας τη λανθάνουσα καθυστέρηση αντίδρασης.

Η λειτουργία του βασίζεται στον ορισμό ζωνών ασφαλείας (polygons) γύρω από το ρομπότ, εκφρασμένων στο σύστημα αναφοράς της βάσης. Οι ζώνες μπορούν να έχουν μορφή:

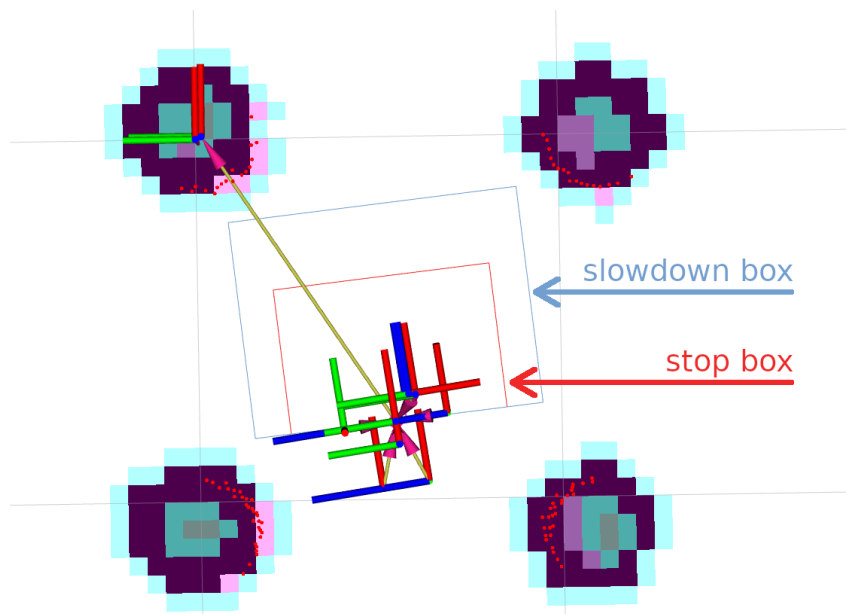
- αυθαίρετου πολυγώνου,
- κύκλου,
- δυναμικού footprint,
- *VelocityPolygon*, όπου η γεωμετρία της ζώνης εξαρτάται από την τρέχουσα ταχύτητα.

Όταν αισθητηριακά σημεία (LaserScan, PointCloud, Range ή Costmap δεδομένα) εντοπίζονται εντός μίας ζώνης και υπερβούν κατώφλι πλήθους (`min_points`), ενεργοποιείται αντίστοιχο μοντέλο ασφάλειας. Υποστηρίζονται τα ακόλουθα:

- **Stop model:** Άμεση δημοσίευση μηδενικής ταχύτητας.
- **Slowdown model:** Μείωση μέγιστης ταχύτητας μέσω `slowdown_ratio`.
- **Limit model:** Επιβολή ανώτατων ορίων γραμμικής και γωνιακής ταχύτητας.
- **Approach model:** Πρόβλεψη χρόνου έως σύγκρουση και προσαρμογή ταχύτητας ώστε να διατηρείται ελάχιστος χρόνος ασφαλείας.

Όταν ενεργοποιούνται ταυτόχρονα πολλαπλές ζώνες, εφαρμόζεται η αυστηρότερη συμπεριφορά (π.χ. stop υπερισχύει slowdown).

Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται παράδειγμα δύο ζωνών: μία ζώνη επιβράδυνσης (slowdown box) και μία ζώνη άμεσης παύσης (stop box).



Εικόνα 4.2: Ζώνες ασφαλείας Collision Monitor. Η εξωτερική περιοχή επιβραδύνει την κίνηση (slowdown), ενώ η εσωτερική επιβάλλει πλήρη παύση (stop).

Η παρέμβαση πραγματοποιείται στη ροή:

`cmd_vel_in` → Collision Monitor → `cmd_vel_out`

διασφαλίζοντας ότι ακόμη και αν ο ελεγκτής παράγει επιθετικές εντολές, αυτές μπορούν να τροποποιηθούν ή να ακυρωθούν πριν φτάσουν στη ρομποτική βάση.

Ιδιαίτερη σημασία έχει ο μηχανισμός `source_timeout`. Εάν δεν ληφθούν νέα δεδομένα από αισθητήρα εντός καθορισμένου χρονικού διαστήματος, το σύστημα επιβάλλει παύση κίνησης. Η επιλογή αυτή ενισχύει τη λειτουργική ασφάλεια σε περιπτώσεις απώλειας αισθητηριακής πληροφορίας.

Η δυνατότητα δυναμικής ενεργοποίησης/απενεργοποίησης ζωνών, καθώς και η χρήση VelocityPolygon, επιτρέπει προσαρμογή του περιθωρίου ασφαλείας ανάλογα με την ταχύτητα ή τη λειτουργική κατάσταση του ρομπότ. Για παράδειγμα, σε υψηλότερες ταχύτητες μπορεί να χρησιμοποιείται μεγαλύτερη ζώνη ασφαλείας.

Ο Collision Monitor δεν αποτελεί πιστοποιημένο σύστημα ασφαλείας πραγματικού χρόνου, καθώς λειτουργεί σε επίπεδο CPU και όχι σε hardware safety controller. Ωστόσο, υλοποιεί παρόμοια λογική επιτήρησης και αποτελεί κρίσιμο συμπληρωματικό επίπεδο προστασίας σε βαριά ή υψηλής ταχύτητας ρομποτικά συστήματα.

Παράλληλα με την άμεση επιτήρηση σύγκρουσης, το Navigation2 ενσωματώνει μηχανισμούς ανάκαμψης (recovery behaviors), οι οποίοι ενεργοποιούνται μέσω του Δέντρου Συμπεριφοράς όταν αποτύχει ο σχεδιασμός ή όταν ο controller δεν μπορεί να προχωρήσει. Τυπικές συμπεριφορές περιλαμβάνουν καθαρισμό costmap, περιστροφή επί τόπου ή οπισθοχώρηση.

Ο συνδυασμός προληπτικής επιτήρησης (Collision Monitor) και ιεραρχικά ελεγχόμενων συμπεριφορών ανάκαμψης προσδίδει στο σύστημα υψηλό επίπεδο λειτουργικής ανθεκτικότητας σε δυναμικά και αβέβαια περιβάλλοντα.

4.7 Εξομάλυνση διαδρομής

Οι διαδρομές που προκύπτουν από search-based αλγορίθμους σε διακριτό πλέγμα ενδέχεται να εμφανίζουν απότομες αλλαγές κατεύθυνσης ή «οδοντωτή» γεωμετρία. Η εξομάλυνση διαδρομής (path smoothing) στοχεύει στη βελτίωση της καμπυλότητας και της συνέχειας της τροχιάς πριν αυτή παραδοθεί στον τοπικό ελεγκτή.

Η διαδικασία αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως μεταγενέστερο στάδιο βελτιστοποίησης, το οποίο ελαχιστοποιεί κριτήρια όπως καμπυλότητα, απότομες στροφές ή εγγύτητα σε εμπόδια. Η εξομάλυνση μειώνει το φορτίο του τοπικού ελεγκτή, επιτρέποντας ομαλότερη παραγωγή εντολών ταχύτητας και περιορίζοντας την ανάγκη για επιθετικές διορθώσεις.

Η ύπαρξη διακριτού Smoother Server επιτρέπει ανεξάρτητη επιλογή μεθόδου εξομάλυνσης και ευελιξία συνδυασμού διαφορετικών planners και smoothers, ενισχύοντας την αρθρωτότητα της αρχιτεκτονικής.

4.8 Υποδομή εκτέλεσης και διαχείριση κύκλου ζωής

Κάθε βασικός εξυπηρετητής του Navigation2 υλοποιείται ως lifecycle κόμβος. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει διακριτές φάσεις διαμόρφωσης, ενεργοποίησης και τερματισμού, ενισχύοντας την προβλεψιμότητα και τη σταθερότητα του συστήματος.

Κατά τη φάση διαμόρφωσης, φορτώνονται παράμετροι, δημιουργούνται διεπαφές και δεσμεύονται πόροι. Κατά την ενεργοποίηση, οι διεπαφές καθίστανται λειτουργικές και το υποσύστημα εισέρχεται σε κανονική λειτουργία. Ο Lifecycle Manager επιβλέπει τη συνολική κατάσταση των κόμβων και μπορεί να ενεργοποιήσει ελεγχόμενο τερματισμό ή επανεκκίνηση σε περίπτωση σφάλματος.

Η διαχείριση κύκλου ζωής συμβάλλει στην αξιοπιστία του συστήματος, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα όπου η συνεχής λειτουργία και η ανθεκτικότητα σε σφάλματα αποτελούν κρίσιμες απαιτήσεις.

4.9 Περιορισμοί και λειτουργικές απαιτήσεις

Παρά την ευελιξία και την αρθρωτή σχεδιάσή του, το Navigation2 παρουσιάζει ορισμένους λειτουργικούς περιορισμούς. Πρωτίστως, η ορθή λειτουργία του εξαρτάται από αξιόπιστη εκτίμηση θέσης και συνεπή δέντρο μετασχηματισμών. Σφάλματα εντοπισμού ή ασυνέπειες στα TF ενδέχεται να οδηγήσουν σε αστοχία σχεδιασμού ή ελέγχου.

Επιπλέον, οι προβλεπτικές μέθοδοι ελέγχου και οι σύνθετοι planners συνεπάγονται αυξημένες υπολογιστικές απαιτήσεις. Η επιλογή παραμέτρων (π.χ. βάρη critics, ακτίνες inflation, χρονικοί ορίζοντες πρόβλεψης) επηρεάζει καθοριστικά τη συμπεριφορά του συστήματος και ενδέχεται να απαιτεί εκτενή πειραματική ρύθμιση.

Σε πυκνά δυναμικά περιβάλλοντα, οι αντιδραστικές μέθοδοι μπορεί να παγιδευτούν σε τοπικά ελάχιστα, ενώ ακόμη και προβλεπτικές προσεγγίσεις ενδέχεται να απαιτήσουν ενεργοποίηση μηχανισμών ανάκαμψης. Η συμπεριφορά του συστήματος εξαρτάται επομένως όχι μόνο από τους επιμέρους αλγορίθμους, αλλά και από τη συνολική παραμετροποίηση και ποιότητα αισθητηριακής πληροφορίας.

Οι περιορισμοί αυτοί αναδεικνύουν τη σημασία της ολιστικής θεώρησης της πλοήγησης ως συστήματος, όπου η εκτίμηση κατάστασης, η αναπαράσταση περιβάλλοντος και ο έλεγχος λειτουργούν αλληλένδετα.

4.10 Σύνοψη

Το Navigation2 συνιστά ένα πλήρες και αρθρωτό πλαίσιο πλοήγησης, στο οποίο ο καθολικός σχεδιασμός, ο τοπικός έλεγχος, οι μηχανισμοί ασφάλειας και οι συμπεριφορές ανάκαμψης οργανώνονται μέσω ενιαίας λογικής ελέγχου βασισμένης σε Δέντρα Συμπεριφοράς. Η αρχιτεκτονική του διαχωρίζει σαφώς τις επιμέρους λειτουργίες, επιτρέποντας επεκτασιμότητα, αντικατάσταση αλγορίθμων και παραμετροποίηση χωρίς τροποποίηση της συνολικής δομής.

Η αναπαράσταση του περιβάλλοντος μέσω πολυεπίπεδων χαρτών κόστους αποτελεί τον κοινό πληροφοριακό χώρο στον οποίο βασίζονται τόσο ο καθολικός σχεδιασμός όσο και ο τοπικός ελεγκτής. Παράλληλα, ο Collision Monitor και οι μηχανισμοί ανάκαμψης προσθέτουν επίπεδα λειτουργικής ανθεκτικότητας και άμεσης αντίδρασης, ενισχύοντας την ασφάλεια σε δυναμικά περιβάλλοντα.

Η λειτουργία του Navigation2 προϋποθέτει τη διαθεσιμότητα αξιόπιστης εκτίμησης θέσης και μετασχηματισμών σύμφωνα με το πρότυπο REP-105, δηλαδή την παροχή των μετασχηματισμών:

$$\text{map} \rightarrow \text{odom} \rightarrow \text{base_link}.$$

Η παγκόσμια τοποθέτηση (μέσω SLAM ή localization) παρέχει τον μετασχηματισμό $\text{map} \rightarrow \text{odom}$, ενώ το σύστημα οδομετρίας παρέχει τον μετασχηματισμό $\text{odom} \rightarrow \text{base_link}$. Με τον τρόπο αυτό, το σύστημα πλοήγησης ενσωματώνεται λειτουργικά με τα υποσυστήματα χαρτογράφησης και εκτίμησης κατάστασης.

Συνολικά, το Navigation2 δεν αποτελεί απλώς έναν αλγόριθμο πλοήγησης, αλλά ένα πολυεπίπεδο σύστημα ενορχήστρωσης αντιληπτικών, σχεδιαστικών και ελεγκτικών διεργασιών, το οποίο μετατρέπει υψηλού επιπέδου στόχους σε ασφαλείς και δυναμικά εφικτές εντολές κίνησης.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται η υλική υλοποίηση της ρομποτικής πλατφόρμας, πάνω στην οποία εφαρμόζεται η ανωτέρω αρχιτεκτονική. Αναλύονται τα υποσυστήματα αισθητήρων, ενεργοποιητών και επεξεργασίας, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο αυτά διασυνδέονται με το λογισμικό πλοήγησης.

Κεφάλαιο 5ο: Σχεδιασμός και υλισμικό

Η απόδοση και η αξιοπιστία ενός κινητού ρομποτικού συστήματος δεν καθορίζονται αποκλειστικά από τους αλγορίθμους ελέγχου και πλοήγησης, αλλά εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον σχεδιασμό του υλισμικού και τις επιλογές που αυτός συνεπάγεται. Σε αντίθεση με στατικά ή καθαρά προσομοιωμένα συστήματα, ένα κινητό ρομπότ καλείται να λειτουργήσει σε πραγματικές συνθήκες, όπου περιορισμοί όπως η διαθέσιμη υπολογιστική ισχύς, η κατανάλωση ενέργειας, η ακρίβεια των αισθητήρων και η μηχανική σταθερότητα επηρεάζουν άμεσα τη συμπεριφορά και τις συνολικές δυνατότητές του.

Στο πλαίσιο αυτό, οι επιλογές υλισμικού καθορίζουν τα ανώτατα όρια των επιδόσεων του συστήματος και το εύρος των λειτουργιών που είναι δυνατόν να υλοποιηθούν με αξιοπιστία, όπως η ταυτόχρονη χαρτογράφηση και εντοπισμός (SLAM) και η αυτόνομη πλοήγηση, οι οποίες προϋποθέτουν επαρκή υπολογιστική ισχύ και αξιόπιστη αισθητηριακή αντίληψη.

Η διαδικασία σχεδιασμού και επιλογής του υλισμικού είναι σύνθετη, χρονοβόρα και συχνά κοστοβόρα, καθώς υπερβαίνει την απλή επιλογή μεμονωμένων εξαρτημάτων. Περιλαμβάνει τη διερεύνηση και αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων, τη διαθεσιμότητα κατάλληλων βιβλιοθηκών και οδηγών λογισμικού, καθώς και τη διασφάλιση της συμβατότητας τόσο σε επίπεδο υλικού όσο και σε επίπεδο λογισμικού μεταξύ των επιμέρους υποσυστημάτων. Η επίτευξη ενός λειτουργικού και σταθερού συστήματος προϋποθέτει, συνεπώς, μία επαναληπτική διαδικασία σχεδιασμού και δοκιμών, με στόχο τη βέλτιστη ισορροπία μεταξύ κόστους, πολυπλοκότητας και απόδοσης.

5.1 Αρχιτεκτονική και στοιχειώδη εξαρτήματα

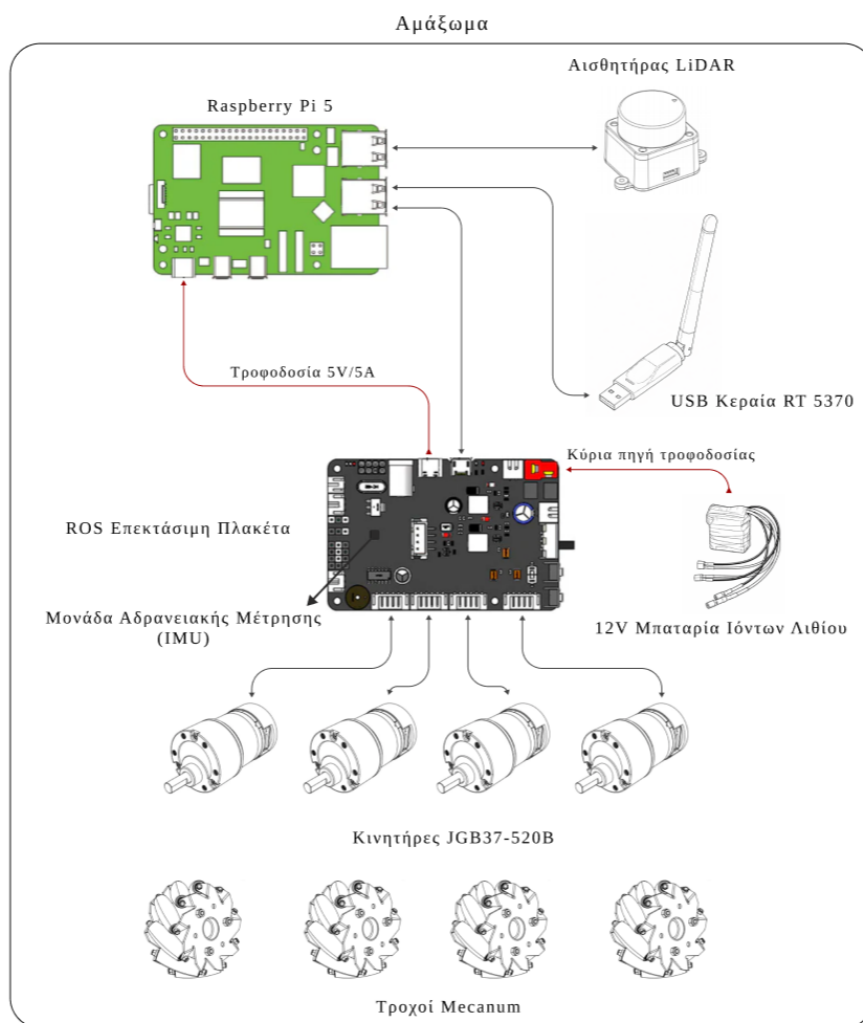
Η συνολική αρχιτεκτονική του προτεινόμενου ρομποτικού συστήματος ακολουθεί μία αρθρωτή (modular) προσέγγιση, όπου τα επιμέρους υποσυστήματα - αισθητήρες, ενεργοποιητές, μονάδα ελέγχου κίνησης, υπολογιστική μονάδα και σύστημα τροφοδοσίας - λειτουργούν ως διακριτές αλλά αλληλοσυνδεόμενες οντότητες. Η επιλογή αυτή διευκολύνει την κατανόηση, τη συντήρηση και τη μελλοντική επέκταση του συστήματος, καθώς επιτρέπει την αντικατάσταση ή αναβάθμιση μεμονωμένων στοιχείων χωρίς την ανάγκη εκτεταμένου ανασχεδιασμού της συνολικής πλατφόρμας.

Κεντρικό ρόλο στον σχεδιασμό του υλισμικού διαδραμάτισαν οι απαιτήσεις του ανώτερου λογισμικού επιπέδου, το οποίο βασίζεται στο ROS 2 ως μεσολογισμικό. Επομένως, η επιλογή των επιμέρους εξαρτημάτων πραγματοποιήθηκε με βασικά κριτήρια τη συμβατότητα με το αντίστοιχο λογισμικό πλαίσιο, τη διαθεσιμότητα ώριμων οδηγών ή βιβλιοθηκών, καθώς και τις περιορισμένες απαιτήσεις σε υπολογιστικούς και ενεργειακούς πόρους, με στόχο τη δημιουργία μίας σταθερής και επεκτάσιμης βάσης για την υλοποίηση των λειτουργιών υψηλού επιπέδου του συστήματος.

Η διάρθρωση του υλισμικού οργανώνεται γύρω από μία κεντρική υπολογιστική μονάδα, υπεύθυνη για την εκτέλεση λειτουργιών υψηλού επιπέδου, όπως η επεξεργασία αισθητηριακών δεδομένων, η χαρτογράφηση, ο εντοπισμός και ο σχεδιασμός κίνησης. Παράλληλα, χρησιμοποιείται ανεξάρτητη μονάδα ελέγχου κίνησης, η οποία αναλαμβάνει την άμεση οδήγηση των ενεργοποιητών και τη συλλογή δεδομένων χαμηλού επιπέδου, όπως η οδομετρία και οι μετρήσεις από αδρανειακούς αισθητήρες. Ο διαχωρισμός αυτός επιτρέπει την αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος σε πραγματικό χρόνο, ακόμη και υπό

αυξημένο υπολογιστικό φορτίο στην κεντρική μονάδα.

Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται η συνολική δομή του υλισμικού του ρομποτικού συστήματος και οι βασικές ροές δεδομένων και τροφοδοσίας μεταξύ των επιμέρους υποσυστημάτων. Η υπολογιστική μονάδα υψηλού επιπέδου (Raspberry Pi 5) λαμβάνει δεδομένα από τον αισθητήρα LiDAR και επικοινωνεί με τη μονάδα ελέγχου κίνησης για την ανταλλαγή πληροφοριών κατάστασης και εντολών κίνησης. Παράλληλα, η επεκτάσιμη πλακέτα ελέγχου αναλαμβάνει την οδήγηση των κινητήρων, τη συλλογή δεδομένων από τη μονάδα αδρανειακής μέτρησης (IMU) και τη διαχείριση της τροφοδοσίας του συστήματος, η οποία παρέχεται από κεντρική μπαταρία ιόντων λιθίου και διανέμεται ελεγχόμενα προς τα επιμέρους υποσυστήματα. Για τη βελτίωση της ποιότητας της ασύρματης επικοινωνίας χρησιμοποιείται εξωτερικός προσαρμογέας WiFi μέσω θύρας USB, χωρίς να επηρεάζεται η βασική λειτουργική αρχιτεκτονική του συστήματος.



Εικόνα 5.1: Συνοπτική αρχιτεκτονική υλισμικού του ρομποτικού συστήματος και διασύνδεση των βασικών υποσυστημάτων.

Η παρουσίαση των υποσυστημάτων που ακολουθεί υιοθετεί μία ιεραρχική προσέγγιση, ξεκινώντας από τα χαμηλότερου επιπέδου μηχανικά, ηλεκτρονικά και αισθητηριακά υποσυστήματα και προχωρώντας προς τα ανώτερα επίπεδα λειτουργικότητας. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται σαφής η σύνδεση μεταξύ των θεμελιωδών επιλογών υλισμικού και των δυνατοτήτων που αυτές παρέχουν στο ανώτερο λογισμικό επίπεδο, το οποίο αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο.

5.2 Ενεργοποιητές και τροχοί

Η επιλογή και η ολοκληρωμένη διαμόρφωση του συστήματος ενεργοποίησης και τροχών αποτελεί καθοριστικό στάδιο στον σχεδιασμό ενός κινητού ρομποτικού συστήματος, καθώς επηρεάζει άμεσα την κινηματική συμπεριφορά και τις δυναμικές δυνατότητες του ρομπότ.

Ο συνδυασμός κατάλληλων ενεργοποιητών και τροχών προκύπτει από μία ενιαία σχεδιαστική απόφαση και όχι από την ανεξάρτητη επιλογή επιμέρους στοιχείων. Οι χαρακτηριστικές παράμετροι των ηλεκτρικών κινητήρων, όπως η ροπή, η ταχύτητα περιστροφής και η δυνατότητα ακριβούς ανάδρασης θέσης μέσω κωδικοποιητών, οφείλουν να βρίσκονται σε ισορροπία με τη γεωμετρία και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των τροχών, ώστε το σύστημα να μπορεί να υλοποιήσει με ακρίβεια τις επιθυμητές κινήσεις.

Στο παρόν ρομποτικό σύστημα, ο σχεδιασμός του κινηματικού συστήματος στοχεύει στην υποστήριξη πολυκατευθυντικής μετακίνησης σε επίπεδα εσωτερικά περιβάλλοντα, με έμφαση στη χαμηλή ταχύτητα, τον ακριβή έλεγχο και τη σταθερή συμπεριφορά κατά την εκτέλεση αλγορίθμων εντοπισμού και πλοήγησης. Για τον λόγο αυτό, η ανάλυση που ακολουθεί διαχωρίζεται σε δύο βασικά μέρη: αρχικά παρουσιάζονται οι επιλεγμένοι κινητήρες και τα βασικά χαρακτηριστικά τους, ενώ στη συνέχεια αναλύεται το σύστημα πολυκατευθυντικών τροχών και η συμβολή του στη συνολική κινηματική του ρομπότ.

5.2.1 Κινητήρες

Για την κίνηση του ρομποτικού συστήματος επιλέχθηκαν τέσσερις ηλεκτρικοί κινητήρες συνεχούς ρεύματος τύπου DC brushed, με ενσωματωμένο κιβώτιο μείωσης και κωδικοποιητή θέσης, μοντέλου *JGB37-520B*. Η επιλογή των συγκεκριμένων κινητήρων στηρίχθηκε κυρίως στην ενσωμάτωση κωδικοποιητών θέσης, οι οποίοι επιτρέπουν την υλοποίηση κλειστών βρόχων ελέγχου και την αξιόπιστη εκτίμηση της κίνησης του ρομπότ, καθώς και στην ύπαρξη ενσωματωμένου κιβωτίου μείωσης, το οποίο ευνοεί την παραγωγή επαρκούς ροπής και τον ακριβή έλεγχο της κίνησης σε χαμηλές ταχύτητες.

Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται η γενική όψη του επιλεγμένου κινητήρα.

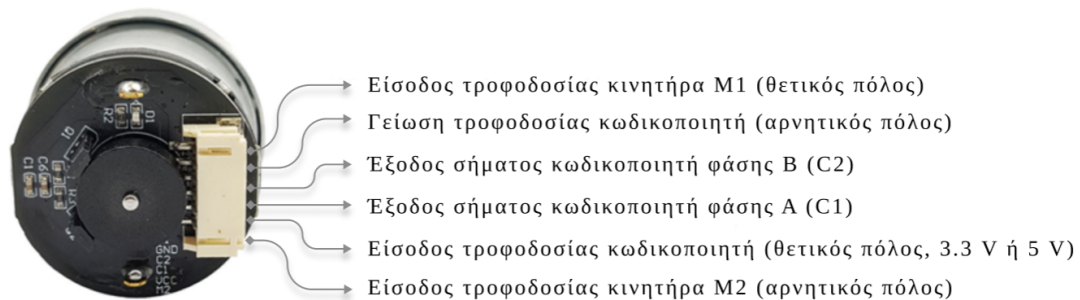


Εικόνα 5.2: Κινητήρας DC JGB37-520B με ενσωματωμένο κωδικοποιητή.

Στην επιλεγμένη διαμόρφωση, οι κινητήρες λειτουργούν σε ονομαστική τάση 12 V και αποδίδουν ταχύτητα εξόδου περίπου 37 rpm χωρίς φορτίο και περίπου 28 rpm σε ονομαστικό φορτίο. Οι τιμές αυτές προκύπτουν από τον ενσωματωμένο μηχανισμό μετάδοσης κίνησης, ο οποίος υλοποιείται μέσω κιβωτίου μείωσης λόγου 270:1. Το χαρακτηριστικό αυτό οδηγεί σε χαμηλές γραμμικές ταχύτητες και αυξημένο έλεγχο της κίνησης, στοιχεία ιδιαίτερα σημαντικά για εφαρμογές χαρτογράφησης και αυτόνομης πλοήγησης σε εσωτερικά περιβάλλοντα.

Ως συνέπεια της χαμηλής ταχύτητας εξόδου που προκύπτει από τον επιλεγμένο λόγο μετάδοσης, οι κινητήρες αποδίδουν αυξημένη ροπή εξόδου περίπου $8 \text{ kg}\cdot\text{cm}$ ($\approx 0.78 \text{ N}\cdot\text{m}$) σε ονομαστικό φορτίο. Η διαθέσιμη ροπή συμβάλλει στην ομαλή επιτάχυνση, στην κάλυψη των απωλειών λόγω τριβών κύλισης και στη διατήρηση σταθερής κίνησης, χωρίς υπερφόρτωση του κινητήρα ή του κιβωτίου μετάδοσης.

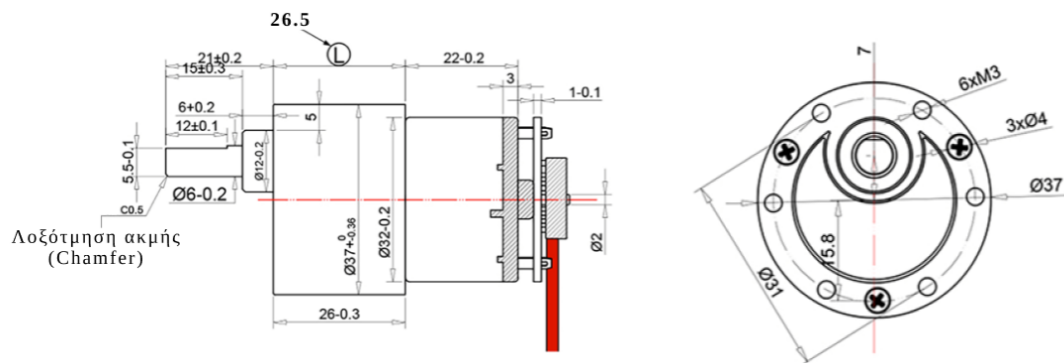
Κάθε κινητήρας ενσωματώνει μαγνητικό κωδικοποιητή αυξητικού τύπου (incremental), βασισμένο σε αισθητήρες Hall, με δύο φάσεις (AB), ο οποίος παρέχει τετραγωνικό σήμα και βασική ανάλυση 11 παλμών ανά περιστροφή του κινητήρα. Λαμβάνοντας υπόψη τον λόγο μείωσης, η ανάλυση στην έξοδο του κιβωτίου ανέρχεται σε περίπου 2970 παλμούς ανά πλήρη περιστροφή του άξονα εξόδου, επιτρέποντας την ακριβή εκτίμηση της γωνιακής μετατόπισης και της ταχύτητας. Το διάγραμμα καλωδίωσης και τα σήματα του κωδικοποιητή παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.3.



Εικόνα 5.3: Διάγραμμα καλωδίωσης και σήματα κωδικοποιητή AB φάσης του κινητήρα.

Η μετάβαση από τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των κινητήρων στη φυσική υλοποίηση του συστήματος κίνησης καθιστά αναγκαία την εξέταση των μηχανικών τους διαστάσεων και της γεωμετρίας του άξονα εξόδου. Η μηχανική κατασκευή των κινητήρων περιλαμβάνει άξονα εξόδου διαμέτρου 6 mm με επίπεδη επιφάνεια σύσφιξης, η οποία εξασφαλίζει αυξημένη μηχανική σταθερότητα κατά τη μετάδοση ροπής και περιορίζει την πιθανότητα ολίσθησης υπό φορτίο, αποτελώντας ταυτόχρονα κρίσιμη παράμετρο συμβατότητας με τα εξαρτήματα του συστήματος κίνησης.

Οι βασικές μηχανικές διαστάσεις και η γεωμετρία του άξονα εξόδου παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.4.



Εικόνα 5.4: Μηχανικές διαστάσεις και γεωμετρία άξονα εξόδου του κινητήρα.

Το μήκος του κιβωτίου μείωσης, το οποίο συμβολίζεται ως L , μεταβάλλεται ανάλογα με τον επιλεγμένο λόγο μετάδοσης. Για τη διαμόρφωση που χρησιμοποιείται στο παρόν σύστημα (270:1), το αντίστοιχο μήκος ανέρχεται σε 26.5 mm, συμβάλλοντας στον περιορισμό του συνολικού μήκους της μονάδας κίνησης και διευκολύνοντας τη διάταξη των επιμέρους υποσυστημάτων στο πλαίσιο του ρομπότ.

Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των κινητήρων συνοψίζονται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά κινητήρα JGB37-520

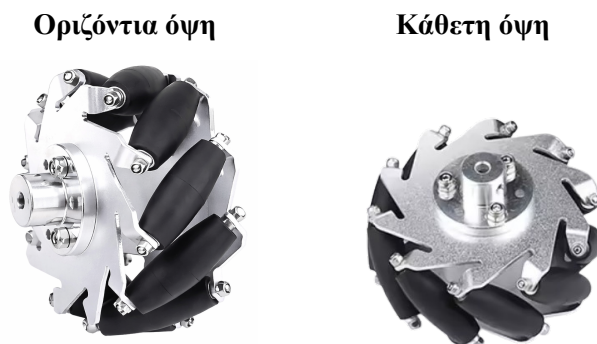
Χαρακτηριστικό	Τιμή
Τύπος κινητήρα	DC Brushed με ενσωματωμένο κωδικοποιητή
Ονομαστική τάση	12 V
Λόγος μείωσης	270:1
Ταχύτητα χωρίς φορτίο	37 rpm
Ταχύτητα ονομαστικού φορτίου	28 rpm
Ονομαστική ροπή	8 kg·cm
Ρεύμα ονομαστικού φορτίου	0.65 A
Ρεύμα εμπλοκής (stall)	2.4 A
Ισχύς	7.8 W
Διάμετρος άξονα	6 mm
Κωδικοποιητής	Incremental AB, 11 PPR
Βάρος	164 g

Με βάση τα παραπάνω, οι επιλεγμένοι κινητήρες καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό τις απαιτήσεις ως προς τη διάμετρο, τη μηχανική αντοχή και την κινηματική συμπεριφορά των τροχών του συστήματος. Παράλληλα, τα δεδομένα των κωδικοποιητών αξιοποιούνται στο συγκεκριμένο σύστημα για τον υπολογισμό της οδομετρίας και τη βελτίωση της ακρίβειας της εκτίμησης της κίνησης και της θέσης του ρομπότ, αποτελώντας βασική είσοδο για τη λειτουργία των αλγορίθμων εντοπισμού και πλοήγησης στο ανώτερο επίπεδο ελέγχου. Η τελική απόδοση του συστήματος κίνησης δεν εξαρτάται από τους κινητήρες μεμονωμένα, αλλά από τον συνδυασμό τους με κατάλληλο τύπο τροχών, ικανό να αξιοποιήσει αποτελεσματικά τη διαθέσιμη ροπή και τον ακριβή έλεγχο που αυτοί προσφέρουν.

5.2.2 Πολυκατευθυντικοί τροχοί

Σε άμεση συνάρτηση με τα χαρακτηριστικά των επιλεγμένων κινητήρων, η επιλογή του συστήματος τροχών διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη συνολική κινηματική συμπεριφορά, την ευελιξία και την ακρίβεια ελέγχου της ρομποτικής πλατφόρμας. Οι τροχοί αποτελούν το τελικό μηχανικό στάδιο μέσω του οποίου η διαθέσιμη ροπή και ταχύτητα των κινητήρων μετατρέπονται σε ελεγχόμενη μετακίνηση στο επίπεδο. Στη παρούσα ρομποτική πλατφόρμα επιλέχθηκαν πολυκατευθυντικοί τροχοί τύπου *Mecanum*, κατασκευασμένοι από κράμα αλουμινίου, με διάμετρο 75 χιλιοστών (mm).

Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η γενική όψη των επιλεγμένων τροχών Mecanum.

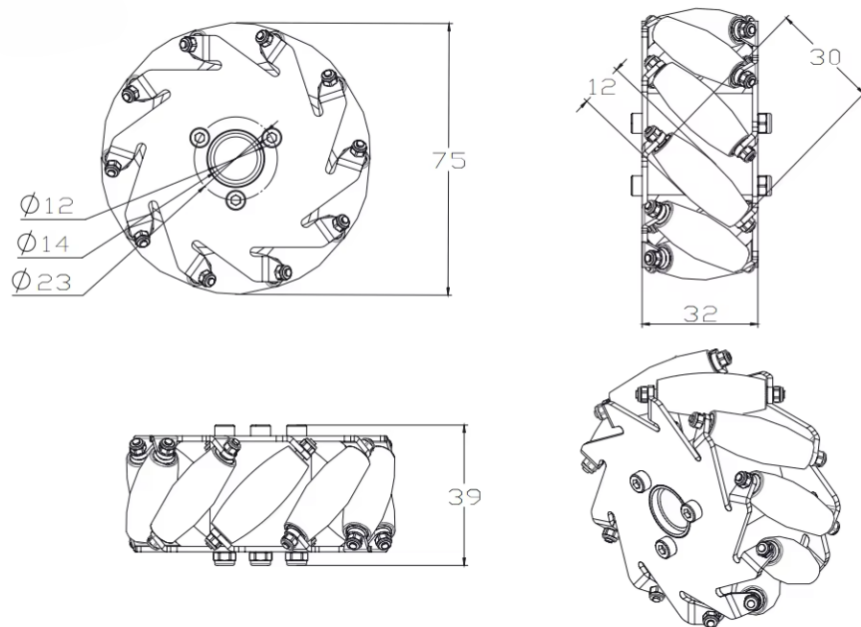


Εικόνα 5.5: Πολυκατευθυντικοί τροχοί Mecanum διαμέτρου 75 mm.

Οι συγκεκριμένοι τροχοί Mecanum διατίθενται σε ποικιλία διαμέτρων, τόσο μικρότερων όσο και μεγαλύτερων από 75 mm. Η επιλεγμένη διάμετρος αποτελεί μία ενδιάμεση επιλογή, η οποία εξισορροπεί τη γραμμική ταχύτητα, τη μηχανική αντοχή και τη δυνατότητα ακριβούς ελέγχου, χωρίς να απαιτείται υπερβολική αύξηση των στροφών των κινητήρων. Η κατασκευή από κράμα αλουμινίου με επιφανειακή κατεργασία αμμοβολής προσδίδει αυξημένη ανθεκτικότητα σε σύγκριση με αντίστοιχες πλαστικές υλοποιήσεις, ενώ ταυτόχρονα διατηρεί το βάρος σε αποδεκτά επίπεδα για κινητή εφαρμογή.

Παράλληλα, διαθέτουν διάμετρο προσαρμογής άξονα 6 mm, γεγονός που εξασφαλίζει άμεση μηχανική συμβατότητα με τους κινητήρες του συστήματος. Η επιλογή αυτή επιτρέπει την απευθείας σύζευξη τους χωρίς την ανάγκη πρόσθετων μηχανικών προσαρμογών ή συζευκτών (couplers), περιορίζοντας τις ανοχές, τις απώλειες μετάδοσης και την πολυπλοκότητα της μηχανικής διάταξης.

Στο Σχήμα 5.6 απεικονίζεται η γεωμετρική διαμόρφωση του τροχού.



Εικόνα 5.6: Μηχανικές διαστάσεις και βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά τροχού Mecanum (μονάδες σε χιλιοστά).

Με βάση τη διάμετρο των τροχών (75 mm) και την ταχύτητα εξόδου των επιλεγμένων κινητήρων σε ονομαστικό φορτίο (περίπου 28 rpm), η μέγιστη θεωρητική γραμμική ταχύτητα της πλατφόρμας υπολογίζεται ως:

$$v_{\max} = \frac{2\pi r \cdot n}{60}$$

όπου r η ακτίνα του τροχού και n οι στροφές εξόδου του κινητήρα. Για τις συγκεκριμένες τιμές προκύπτει μέγιστη ταχύτητα περίπου 0.105 m/s (10.5 cm/s). Η τιμή αυτή κρίνεται κατάλληλη για εφαρμογές χαρτογράφησης και αυτόνομης πλοήγησης, καθώς επιτρέπει την αξιόπιστη συλλογή αισθητηριακών δεδομένων και τη βελτίωση της ακρίβειας εκτίμησης της κίνησης και της θέσης του ρομπότ.

Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των τροχών Mecanum που χρησιμοποιήθηκαν στο ρομποτικό σύστημα.

Πίνακας 5.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά τροχών Mecanum

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Διάμετρος τροχού	75 mm
Πλάτος τροχού	32 mm
Αριθμός περιφερειακών κυλίνδρων	10
Υλικό σώματος	Κράμα αλουμινίου
Υλικό κυλίνδρων	Ελαστικό
Βάρος (σετ 4 τροχών)	≈ 0.45 kg
Μέγιστο φορτίο (σετ 4 τροχών)	15 kg
Διάμετρος άξονα προσαρμογής	6 mm
Μέγιστη θεωρητική γραμμική ταχύτητα	≈ 0.105 m/s

Συνοψίζοντας, η επιλογή των τροχών Mecanum κρίνεται κατάλληλη για τις απαιτήσεις της εξεταζόμενης ρομποτικής πλατφόρμας, καθώς επιτρέπει την αποτελεσματική αξιοποίηση των χαρακτηριστικών των κινητήρων και υποστηρίζει τη συνολική κινηματική συμπεριφορά του συστήματος. Ως αναμενόμενο τίμημα της αυξημένης ευελιξίας και των δυνατοτήτων ελιγμών, η χρήση τροχών Mecanum συνοδεύεται από αυξημένες απαιτήσεις σε επίπεδο συγχρονισμού και ρύθμισης του ελέγχου, καθώς και από μεγαλύτερη εξάρτηση της απόδοσης από το φορτίο και το είδος του εδάφους. Ωστόσο, για τη συγκεκριμένη εφαρμογή οι περιορισμοί αυτοί θεωρούνται αποδεκτοί, ενώ σε περιπτώσεις διαφορετικών απαιτήσεων η πλατφόρμα μπορεί να προσαρμοστεί με τη χρήση συμβατικών τροχών χωρίς ουσιαστική μεταβολή της βασικής αρχιτεκτονικής.

Ωστόσο, η αποτελεσματική συνεργασία του συστήματος κινητήρων και τροχών προϋποθέτει την ύπαρξη αξιόπιστου ελέγχου χαμηλού επιπέδου, ικανού να διαχειρίζεται με ακρίβεια τον συγχρονισμό, τη ρύθμιση της ταχύτητας και την ανάδραση από τους κωδικοποιητές. Για τον λόγο αυτό, η υλοποίηση του συστήματος κίνησης υποστηρίζεται από ανεξάρτητη μονάδα ελέγχου κίνησης, η οποία αναλαμβάνει τη χρονικά προβλέψιμη οδήγηση των κινητήρων και τη συλλογή των απαραίτητων δεδομένων κατάστασης για το ανώτερο επίπεδο ελέγχου.

5.3 Μονάδα ελέγχου κίνησης

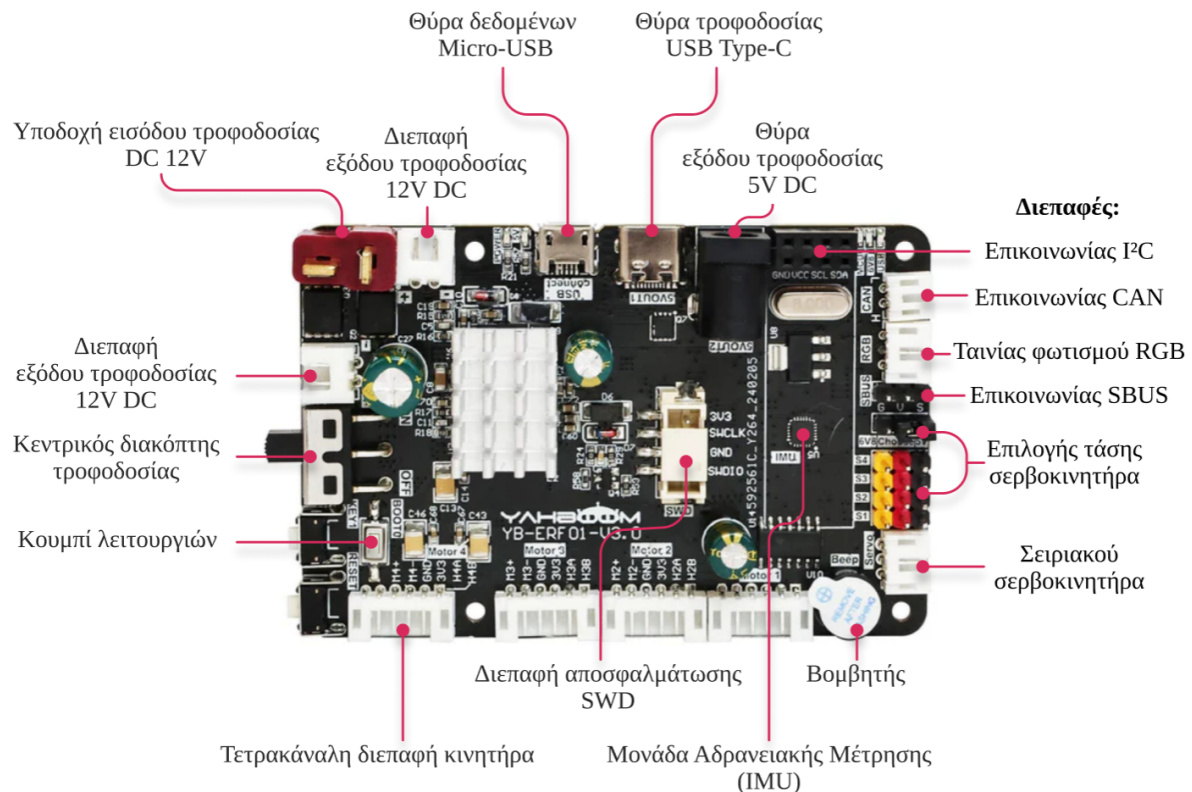
Στην υπό μελέτη υλοποίηση, η μονάδα ελέγχου κίνησης υλοποιείται μέσω της επεκτάσιμης πλακέτας *ROS Robot Control Board V3.0*, η οποία δεν λειτουργεί μόνο ως οδηγός κινητήρων αλλά και ως ολοκληρωμένη πλατφόρμα ανάπτυξης, ενσωματώνοντας ποικίλες διεπαφές και υποσυστήματα χαμηλού επιπέδου.

Σε επίπεδο υλισμικού, η πλακέτα υποστηρίζει συνοπτικά:

- Τέσσερα κανάλια οδήγησης κινητήρων με ανάδραση από κωδικοποιητές θέσης και ταχύτητας
- Υποστήριξη σερβοκινητήρων μέσω σημάτων PWM, καθώς και σειριακών σερβοκινητήρων
- Ενσωματωμένη μονάδα αδρανειακής μέτρησης εννέα αξόνων (IMU)

- Διαθέσιμες διεπαφές επικοινωνίας, όπως CAN, USB σειριακή επικοινωνία και SBUS
- Πολλαπλές εξόδους τροφοδοσίας για την υποστήριξη περιφερειακών συσκευών
- Υποστήριξη του πρωτοκόλλου τροφοδοσίας *Raspberry Pi 5*
- Ενσωματωμένα κυκλώματα προστασίας έναντι υπερέντασης, αντίστροφης πολικότητας και βραχυκυκλώματος

Στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζεται η μονάδα ελέγχου κίνησης μαζί με τις προαναφερθείσες διεπαφές.



Εικόνα 5.7: Ανάδειξη των βασικών διεπαφών της επεκτάσιμης πλακέτας [96].

Παρά το εύρος των δυνατοτήτων της πλακέτας, στην παρούσα υλοποίηση αξιοποιούνται επιλεκτικά οι λειτουργίες που σχετίζονται άμεσα με την κίνηση και την εκτίμηση κατάστασης. Συγκεκριμένα, η μονάδα ελέγχου χρησιμοποιείται για:

- Τον έλεγχο των κινητήρων και την ανάγνωση των κωδικοποιητών, με στόχο την αξιόπιστη εκτίμηση της οδομετρίας
- Τη συλλογή δεδομένων από τη μονάδα IMU για την εκτίμηση του προσανατολισμού
- Την υλοποίηση σταθερού και χρονικά προβλέψιμου ελέγχου χαμηλών ταχυτήτων, κατάλληλου για εφαρμογές SLAM και αυτόνομης πλοήγησης

Η πλακέτα ελέγχου βασίζεται στον μικροελεγκτή *STM32F103RCT6*, ο οποίος αποτελεί τον κεντρικό ελεγκτή όλων των λειτουργιών χαμηλού επιπέδου. Ο συγκεκριμένος μικροελεγκτής ακολουθεί αρχιτεκτονική *ARM Cortex-M3* και χρονίζεται στα 72 MHz, προσφέροντας επαρκή υπολογιστική ισχύ για εφαρμογές ελέγχου πραγματικού χρόνου.

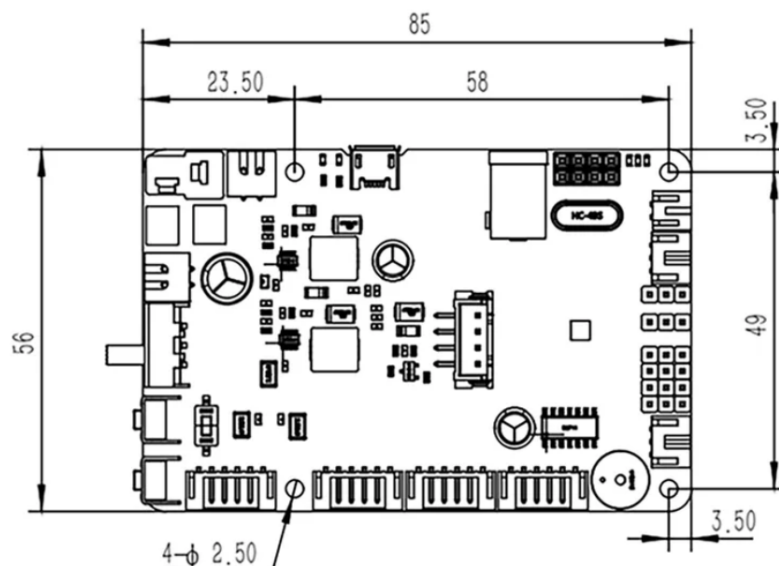
Η αρχιτεκτονική του μικροελεγκτή περιλαμβάνει πληθώρα ψηφιακών εισόδων/εξόδων (GPIO), χρονομετρητές (timers) και περιφερειακές μονάδες όπως μετατροπείς αναλογικού σε ψηφιακό σήμα (ADC), οι οποίες είναι απαραίτητες για την υλοποίηση ακριβούς και επαναλήψιμου ελέγχου κίνησης. Η χρήση μικροελεγκτή επιτρέπει την εκτέλεση χρονικά προβλέψιμων ελέγχων, απαραίτητων για εφαρμογές αξιόπιστης οδομετρίας και σταθερής κίνησης.

Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται συνοπτικά βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή [97].

Πίνακας 5.3: Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή STM32F103RCT6

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Αρχιτεκτονική πυρήνα	ARM Cortex-M3 (32-bit)
Μέγιστη συχνότητα	72 MHz
Απόδοση	1.25 DMIPS/MHz
Ενσωματωμένη Flash	256 KB
SRAM	48 KB
Χρονομετρητές	έως 11 (συμπ. motor control timers)
PWM κινητήρων	2 προχωρημένοι 16-bit timers
Υποστήριξη encoders	Quadrature μέσω timers
ADC	3 × 12-bit (έως 21 κανάλια)
DAC	2 × 12-bit
Διεπαφές επικοινωνίας	CAN, USB FS, USART, SPI, I ² C
Τάση λειτουργίας	2.0-3.6 V
Συσκευασία	LQFP64

Οι μηχανικές διαστάσεις της πλακέτας παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.8. Το αποτύπωμα της πλακέτας είναι συγκρίσιμο με εκείνο τυπικών μονάδων υπολογισμού μικρού μεγέθους, γεγονός που διευκολύνει τη συμπαγή διάταξη των επιμέρους υποσυστημάτων και επιτρέπει την κατακόρυφη στοίβαξη πλακετών εντός του σασί.



Εικόνα 5.8: Μηχανικές διαστάσεις της μονάδας ελέγχου κίνησης (μονάδες σε χιλιοστά) [96].

Με τον τρόπο αυτό, η μονάδα ελέγχου κίνησης λειτουργεί ως αξιόπιστο ενδιάμεσο επίπεδο μεταξύ της ανώτερης υπολογιστικής μονάδας και της μηχανικής υλοποίησης του συστήματος κίνησης, αναλαμβάνοντας τον χρονικά προβλέψιμο έλεγχο και τη συλλογή κρίσιμων δεδομένων κατάστασης.

Η επιλογή της συγκεκριμένης πλακέτας υποστηρίζεται επιπλέον από τη διαθεσιμότητα οργανωμένης τεκμηρίωσης και εκπαιδευτικού υλικού, το οποίο καλύπτει τόσο τη βασική χρήση του υλισμικού όσο και την ενσωμάτωσή του σε περιβάλλον ROS. Η ύπαρξη επίσημων βιβλιοθηκών, παραδειγμάτων και οδηγιών εγκατάστασης μειώνει τον χρόνο ανάπτυξης και αποσφαλμάτωσης και ενισχύει την επαναληψιμότητα της υλοποίησης, στοιχείο ιδιαίτερα σημαντικό σε ακαδημαϊκά έργα.

Στις επόμενες υποενότητες αναλύονται αναλυτικά τα επιμέρους υποσυστήματα της πλακέτας που αξιοποιούνται.

5.3.1 Υποσύστημα οδήγησης κινητήρων

Στην παρούσα πλακέτα χρησιμοποιείται ο οδηγός κινητήρων *AM2857 One Channel H-Bridge Power Driver IC*, ο οποίος αποτελεί ολοκληρωμένη λύση οδήγησης ενός καναλιού κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Το ολοκληρωμένο κύκλωμα ενσωματώνει τρανζίστορ ισχύος τύπου N-channel και P-channel MOSFET, διατεταγμένα σε τοπολογία H-bridge, επιτρέποντας την αμφίδρομη οδήγηση του κινητήρα μέσω ελεγχόμενης αντιστροφής της πολικότητας στα άκρα του.

Ο έλεγχος της λειτουργίας του οδηγού πραγματοποιείται μέσω δύο ψηφιακών εισόδων ελέγχου (*IN_A*, *IN_B*), οι οποίες οδηγούνται απευθείας από τον μικροελεγκτή της πλακέτας. Ο συνδυασμός των σημάτων αυτών καθορίζει τις βασικές καταστάσεις λειτουργίας του κινητήρα, όπως εμπρόσθια κίνηση, οπισθοπορεία, πέδηση και ελεύθερη κύλιση, ενώ η ρύθμιση της ταχύτητας επιτυγχάνεται μέσω διαμόρφωσης πλάτους παλμών (PWM). Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική επιτρέπει ντετερμινιστικό έλεγχο χαμηλού επιπέδου με πλήρη χρονική προβλεψιμότητα, χωρίς την ανάγκη σύνθετων πρωτοκόλλων επικοινωνίας.

Το ολοκληρωμένο κύκλωμα υποστηρίζει ευρύ εύρος τάσης τροφοδοσίας από 3.6 V έως 30 V και παρέχει μέγιστο συνεχές ρεύμα εξόδου έως 4.0 A, με δυνατότητα στιγμιαίας αιχμής έως 6.5 A. Τα χαρακτηριστικά αυτά καλύπτουν με επαρκές περιθώριο τις απαιτήσεις των επιλεγμένων κινητήρων, των οποίων το ρεύμα εμπλοκής παραμένει χαμηλότερο από τα όρια συνεχούς λειτουργίας του οδηγού, εξασφαλίζοντας ασφαλή εκκίνηση και σταθερή λειτουργία χωρίς ανεπιθύμητη ενεργοποίηση μηχανισμών προστασίας.

Στον Πίνακα 5.4 παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του οδηγού κινητήρων [98].

Πίνακας 5.4: Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του οδηγού κινητήρων AM2857

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Τύπος	Μονόκαναλος οδηγός κινητήρα DC τύπου H-bridge
Μέγιστο συνεχές ρεύμα	έως 4.0 A
Ρεύμα αιχμής	έως 6.5 A
Τάση τροφοδοσίας	3.6-30 V
Μέγιστη συχνότητα PWM	30 kHz
$R_{ds(on)}$ (τυπικό)	90-100 mΩ
Προστασία υπέρτασης	Αυτόματη επαναφορά (OCP)
Προστασία υπερθέρμανσης	Θερμική απενεργοποίηση (TSD)
Καταστάσεις λειτουργίας	Εμπρόσθια, Οπίσθια, Πέδηση, Ελεύθερη κύλιση
Συσκευασία	SOP-8

Για την προστασία του συστήματος, ο οδηγός κινητήρων AM2857 ενσωματώνει μηχανισμούς υπερέ-

ντασης και θερμικής προστασίας με δυνατότητα αυτόματης ανάκαμψης. Σε περίπτωση υπέρβασης των επιτρεπτών ορίων ρεύματος ή θερμοκρασίας, το ολοκληρωμένο κύκλωμα μεταβαίνει προσωρινά σε κατάσταση προστασίας, αποτρέποντας τη μόνιμη βλάβη τόσο του ίδιου του οδηγού όσο και των συνδεδεμένων υποσυστημάτων ισχύος.

Η ύπαρξη των ενσωματωμένων μηχανισμών προστασίας, σε συνδυασμό με τη συμβατότητα των ορίων ρεύματος του οδηγού με τις απαιτήσεις των επιλεγμένων κινητήρων, καθιστά το υποσύστημα οδήγησης κατάλληλο για εφαρμογές χαμηλών ταχυτήτων με αυξημένες απαιτήσεις ακρίβειας και αξιοπιστίας. Με τον τρόπο αυτό, το υποσύστημα οδήγησης κινητήρων εντάσσεται ομαλά στη συνολική αρχιτεκτονική χαμηλού επιπέδου, συμπληρώνοντας λειτουργικά τη μονάδα ελέγχου κίνησης.

5.3.2 Μονάδα αδρανειακής μέτρησης (IMU)

Η μονάδα αδρανειακής μέτρησης της πλακέτας ελέγχου κίνησης υλοποιείται μέσω του αισθητήρα *ICM-20948*, ο οποίος αποτελεί ολοκληρωμένη μονάδα εννέα βαθμών ελευθερίας (9-DOF) και χρησιμοποιείται για την καταγραφή της δυναμικής κατάστασης της ρομποτικής πλατφόρμας.

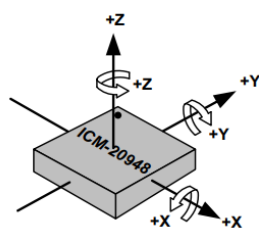
Ο *ICM-20948* υλοποιείται ως πολυ-τσιπ μονάδα (Multi-Chip Module – MCM), στην οποία ενσωματώνονται:

- MEMS γυροσκόπιο τριών αξόνων,
- MEMS επιταχυνσιόμετρο τριών αξόνων,
- μαγνητόμετρο τριών αξόνων τύπου Hall-effect (AK09916),
- εσωτερική μονάδα ψηφιακής επεξεργασίας κίνησης (Digital Motion Processor – DMP).

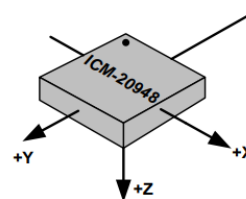
Ιδιαίτερης σημασίας για την ορθή αξιοποίηση των μετρήσεων είναι ο προσανατολισμός των αξόνων ευαισθησίας της μονάδας IMU. Ο αισθητήρας παράγει όλες τις μετρήσεις ως προς το εγγενές τοπικό του σύστημα συντεταγμένων, το οποίο καθορίζεται από τον κατασκευαστή και εξαρτάται άμεσα από τον τρόπο τοποθέτησής του επάνω στην πλακέτα.

Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζεται ο προσανατολισμός των αξόνων ευαισθησίας για το επιταχυνσιόμετρο και το γυροσκόπιο, καθώς και η πολικότητα περιστροφής σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού. Παράλληλα, απεικονίζεται ο αντίστοιχος προσανατολισμός των αξόνων του μαγνητόμετρου AK09916.

Επιταχυνσιόμετρο & Γυροσκόπιο



Μαγνητόμετρο (AK09916)



Εικόνα 5.9: Σύστημα συντεταγμένων και προσανατολισμός αξόνων της αδρανειακής μονάδας.

Η σαφής γνώση και τεκμηρίωση του συστήματος συντεταγμένων του αισθητήρα είναι κρίσιμη για την ορθή ερμηνεία των δεδομένων, ιδίως όταν αυτά συνδυάζονται με μετρήσεις από άλλα υποσυστήματα κίνησης. Τυχόν ασυμφωνία στον προσανατολισμό των αξόνων μπορεί να οδηγήσει σε συστηματικά σφάλματα εκτίμησης προσανατολισμού και κατάστασης, επηρεάζοντας άμεσα τη συνολική ακρίβεια του συστήματος.

Ως προς την επικοινωνία, ο αισθητήρας υποστηρίζει σειριακή διασύνδεση μέσω διαύλων I^2C και SPI , λειτουργώντας ως υποτελής συσκευή. Επιπλέον, ενσωματώνει εσωτερικό αποθηκευτικό buffer τύπου FIFO, χωρητικότητας έως 512 bytes, επιτρέποντας την ανάγνωση δεδομένων σε πακέτα και τη μείωση του φόρτου επικοινωνίας προς τον μικροελεγκτή.

Η ύπαρξη της εσωτερικής μονάδας *Digital Motion Processor* (DMP) επιτρέπει την εκτέλεση βασικών λειτουργιών επεξεργασίας κίνησης σε επίπεδο αισθητήρα, όπως συγχώνευση μετρήσεων και χρονικό συγχρονισμό. Παρότι στο παρόν σύστημα η συγχώνευση αισθητήρων υλοποιείται σε ανώτερο λογισμικό επίπεδο, η διαθεσιμότητα του DMP προσφέρει εναλλακτική αρχιτεκτονική χαμηλής κατανάλωσης και μελλοντικές δυνατότητες επέκτασης.

Στον Πίνακα 5.5 παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της μονάδας IMU.

Πίνακας 5.5: Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της μονάδας IMU ICM-20948

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Εύρος επιταχυνσίόμετρου	± 2 έως $\pm 16\ g$
Εύρος γυροσκοπίου	± 250 έως $\pm 2000\ ^\circ/s$
Μαγνητικό εύρος	$\pm 4900\ \mu T$
Ανάλυση ADC	16-bit
Διεπαφή επικοινωνίας	I^2C / SPI
Τάση λειτουργίας (VDD)	1.71–3.6 V
Τάση ψηφιακής διεπαφής (VDDIO)	1.71–1.95 V
Αντοχή σε μηχανικά σοκ	έως 20 000 g
Συσκευασία	QFN $3 \times 3 \times 1\ mm$

Στο παρόν σύστημα, η μονάδα IMU αξιοποιείται ως συμπληρωματική πηγή πληροφορίας για την εκτίμηση της δυναμικής κατάστασης της πλατφόρμας, ενισχύοντας την αξιοπιστία της εκτίμησης προσανατολισμού και κίνησης. Με τον τρόπο αυτό, η μονάδα αδρανειακής μέτρησης εντάσσεται οργανικά στη συνολική αρχιτεκτονική χαμηλού επιπέδου, συμπληρώνοντας λειτουργικά τα δεδομένα οδομετρίας χωρίς να υποκαθιστά τον βασικό ρόλο των κωδικοποιητών.

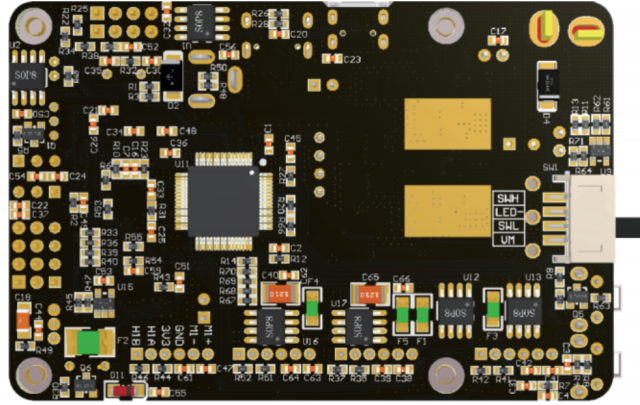
5.3.3 Διεπαφή Εξωτερικού Διακόπτη Τροφοδοσίας

Ιδιαίτερο πλεονέκτημα της πλακέτας αποτελεί η υποστήριξη σύνδεσης εξωτερικού διακόπτη τροφοδοσίας τύπου self-locking (latching), ο οποίος λειτουργεί σε παράλληλη διάταξη με τον ενσωματωμένο διακόπτη. Ο ρόλος του εξωτερικού διακόπτη δεν είναι η άμεση απομόνωση της γραμμής ισχύος, αλλά η παροχή σήματος ενεργοποίησης προς το κύκλωμα ελέγχου της πλακέτας, επιτρέποντας ελεγχόμενη και ασφαλή διαχείριση της τροφοδοσίας.

Η υλοποίηση της διεπαφής εξωτερικού διακόπτη ενσωματώνεται απευθείας στην πλακέτα ελέγχου, η οποία είναι διπλής όψης και φέρει ηλεκτρονικά εξαρτήματα και στην κάτω πλευρά της. Στην περιοχή

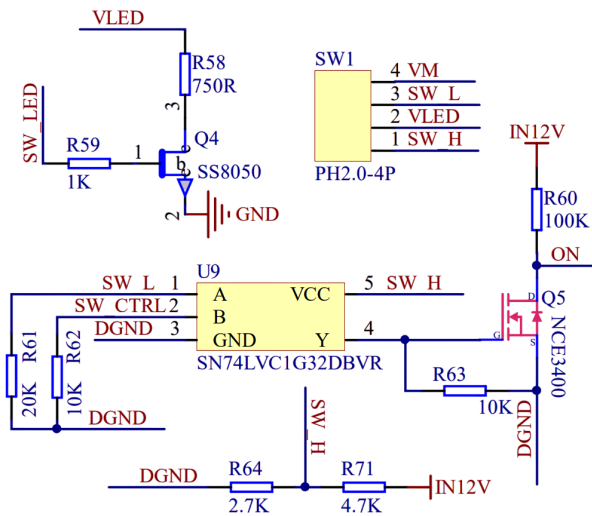
κάτω από τον ενσωματωμένο διακόπτη τροφοδοσίας βρίσκεται η υποδοχή σύνδεσης του εξωτερικού διακόπτη, η οποία υλοποιείται μέσω βύσματος τύπου PH2.0 τεσσάρων ακροδεκτών (4P). Οι ακροδέκτες της διεπαφής αντιστοιχούν στη γραμμή τάσης VM, στην είσοδο σήματος διακόπτη SW_L, στην τροφοδοσία φωτεινής ένδειξης VLED και στη γραμμή SW_H.

Η φυσική θέση και ο προσανατολισμός της υποδοχής διακρίνονται στο Σχήμα 5.10.



Εικόνα 5.10: Κάτω όψη της πλακέτας, όπου διακρίνεται η διεπαφή σύνδεσης εξωτερικού διακόπτη [96].

Για την κατανόηση και τη σωστή αξιοποίηση της διεπαφής εξωτερικού διακόπτη είναι απαραίτητη η μελέτη του αντίστοιχου σχηματικού διαγράμματος της πλακέτας, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.11.



Εικόνα 5.11: Σχηματικό διάγραμμα διεπαφής εξωτερικού διακόπτη τροφοδοσίας [96].

Όπως προκύπτει από το σχηματικό διάγραμμα, μόνο η γραμμή SW_L προορίζεται για άμεση σύνδεση με τον εξωτερικό μηχανικό διακόπτη, ενώ η γραμμή SW_H αποτελεί εσωτερικό κόμβο αναφοράς λογικής και δεν προορίζεται για εξωτερική χρήση.

Το σήμα SW_L αξιολογείται από το κύκλωμα λογικού ελέγχου της πλακέτας σε συνδυασμό με εσωτερικό σήμα ελέγχου (SW_CTRL), το οποίο μπορεί να προέρχεται από τον μικροελεγκτή. Ο συνδυασμός των σημάτων υλοποιείται μέσω πύλης OR, επιτρέποντας την ενεργοποίηση του συστήματος είτε μέσω του εξωτερικού διακόπτη είτε μέσω λογισμικού. Το απαιτούμενο επίπεδο λογικής τάσης παράγεται από διαιρέτη τάσης στη γραμμή εισόδου IN12V, δημιουργώντας τη γραμμή SW_H, η οποία χρησιμοποιείται ως τάση αναφοράς της λογικής βαθμίδας.

Η έξοδος του λογικού κυκλώματος οδηγεί την πύλη MOSFET τύπου N-channel, ο οποίος ελέγχει τη γραμμή ON του συστήματος. Η συγκεκριμένη υλοποίηση είναι ενεργή σε χαμηλό επίπεδο τάσης (active-low), όπου η αγωγή του MOSFET συνδέει τη γραμμή ON με τη γείωση, σηματοδοτώντας την ενεργοποίηση της τροφοδοσίας. Όταν το MOSFET δεν άγει, η γραμμή ON διατηρείται σε υψηλό δυναμικό μέσω αντίστασης έλξης.

Η φωτεινή ένδειξη κατάστασης του εξωτερικού διακόπτη υλοποιείται μέσω ανεξάρτητου κυκλώματος οδήγησης LED, βασισμένου σε διπολικό τρανζίστορ τύπου NPN. Με τον τρόπο αυτό, η ενεργοποίηση της φωτεινής ένδειξης εξαρτάται από τη λογική κατάσταση που αναγνωρίζει το σύστημα ως ενεργή και όχι άμεσα από τη μηχανική θέση του διακόπτη.

Για την πρακτική υλοποίηση της διεπαφής εξωτερικού διακόπτη χρησιμοποιήθηκε συμβατό βύσμα τύπου JST PH, βήματος 2.0 mm, τεσσάρων ακροδεκτών (4P), επιφανειακής τοποθέτησης (SMT) και οριζόντιας διάταξης (right-angle), σύμφωνα με τη διεπαφή που προβλέπεται από τον σχεδιασμό της πλακέτας.

Η καλωδίωση υλοποιήθηκε μέσω καλωδίου τύπου Wire JST PH 4-Pin με θηλυκό ακροδέκτη (female header), πλήρως συμβατού με την υποδοχή της πλακέτας.

Επιπλέον, επιλέχθηκε εξωτερικός διακόπτης τύπου rocker τεχνολογίας SPST (ON–OFF) με ενσωματωμένη φωτεινή ένδειξη LED, ο οποίος είναι ονομαστικά κατάλληλος για τάση έως 12 V και ρεύμα έως 16 A, τιμές σημαντικά υψηλότερες από τις απαιτήσεις της παρούσας εφαρμογής. Η επιλογή αυτή παρέχει αυξημένο περιθώριο ασφάλειας και εξασφαλίζει αξιόπιστη λειτουργία του διακόπτη σε μακροχρόνια χρήση.

Στην Εικόνα 5.12 παρατηρείται η εμπρόσθια όψη του διακόπτη, όπου διακρίνεται η φωτεινή ένδειξη LED, καθώς και η οπίσθια όψη, στην οποία φαίνονται οι ακροδέκτες σύνδεσης.



Εικόνα 5.12: Εξωτερικός διακόπτης τύπου rocker SPST με ενσωματωμένη φωτεινή ένδειξη LED [99].

Η αντιστοίχιση των ακροδεκτών της πλακέτας με τα pin του διακόπτη πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη λειτουργική λογική του κυκλώματος και παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.6.

Πίνακα 5.6: Αντιστοίχιση ακροδεκτών εξωτερικού διακόπτη rocker με τη διεπαφή της πλακέτας.

Ακροδέκτης διακόπτη	Περιγραφή	Σύνδεση πλακέτας
A (Common)	Κοινός ακροδέκτης διακόπτη	VM (SW1 Pin 4)
+ (Switched)	Έξοδος διακόπτη σε κατάσταση ON	SW_L (SW1 Pin 3)
GND (LED–)	Γείωση ενσωματωμένου LED	LED– (SW1 Pin 2)
–	–	SW_H (δεν συνδέεται)

Οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν με χρήση κολλητηριού που ενσωματώνει βοηθητικά στηρίγματα (helping hands), διευκολύνοντας την ακριβή και ασφαλή τοποθέτηση των αγωγών.

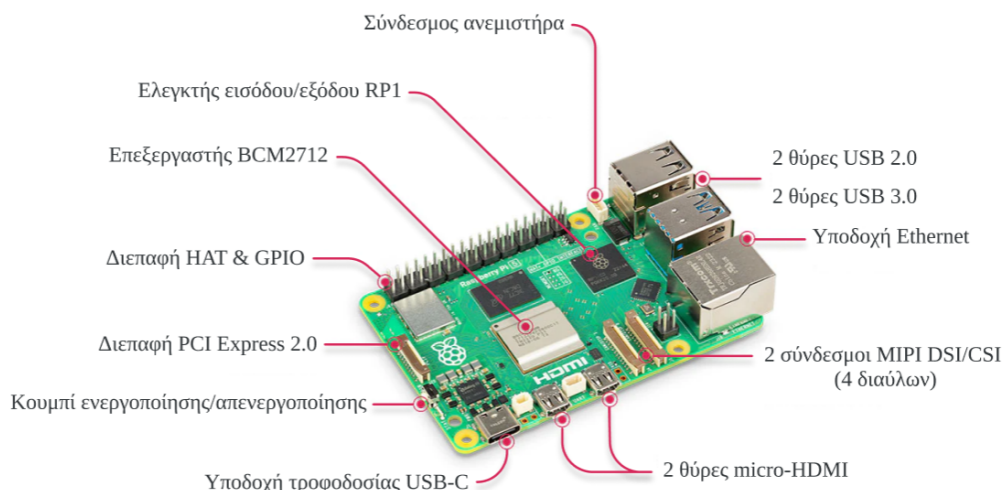
Συνολικά, η διεπαφή εξωτερικού διακόπτη επιτρέπει ευέλικτο και αξιόπιστο έλεγχο της τροφοδοσίας τόσο από τον χρήστη όσο και από το λογισμικό, χωρίς άμεση εμπλοκή του εξωτερικού διακόπτη στη διακοπή της γραμμής ισχύος, ενισχύοντας την ασφάλεια και τη λειτουργική ευελιξία του συστήματος.

5.4 Υπολογιστική μονάδα υψηλού επιπέδου

Η ανώτερη υπολογιστική μονάδα του ρομποτικού συστήματος υλοποιείται με χρήση της πλακέτας *Raspberry Pi 5*, η οποία αναλαμβάνει την εκτέλεση των αλγορίθμων υψηλού επιπέδου, τη διαχείριση της επικοινωνίας μεταξύ των υποσυστημάτων και τη συνολική εποπτεία της λειτουργίας του συστήματος. Η επιλογή της συγκεκριμένης πλακέτας βασίζεται στον συνδυασμό αυξημένης υπολογιστικής ισχύος, υποστήριξης σύγχρονων διεπαφών υψηλής ταχύτητας και εκτεταμένης συμβατότητας με το οικοσύστημα λογισμικού που χρησιμοποιείται στο παρόν έργο.

Το Raspberry Pi 5 βασίζεται στον επεξεργαστή *Broadcom BCM2712*, ο οποίος ενσωματώνει τέσσερις πυρήνες αρχιτεκτονικής *ARM Cortex-A76* 64-bit με μέγιστη συχνότητα λειτουργίας 2.4 GHz. Σε σύγκριση με προηγούμενες γενιές, η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική προσφέρει σημαντικά βελτιωμένη απόδοση ανά κύκλο ρολογιού, επιτρέποντας την αποδοτική εκτέλεση απαιτητικών διεργασιών επεξεργασίας δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Η πλακέτα συνοδεύεται από μνήμη τύπου LPDDR4X, με διαθέσιμες διαμορφώσεις, εκ των οποίων στην παρούσα υλοποίηση επιλέχθηκε η έκδοση με μνήμη RAM 8 GB, η οποία προσφέρει επαρκές περιθώριο για την ταυτόχρονη εκτέλεση πολλαπλών διεργασιών υψηλού επιπέδου χωρίς να επιβαρύνει αδικαιολόγητα την κατανάλωση ισχύος και το κόστος του συστήματος.

Στο Σχήμα 5.13 παρουσιάζεται η διάταξη των βασικών διεπαφών της πλακέτας Raspberry Pi 5.

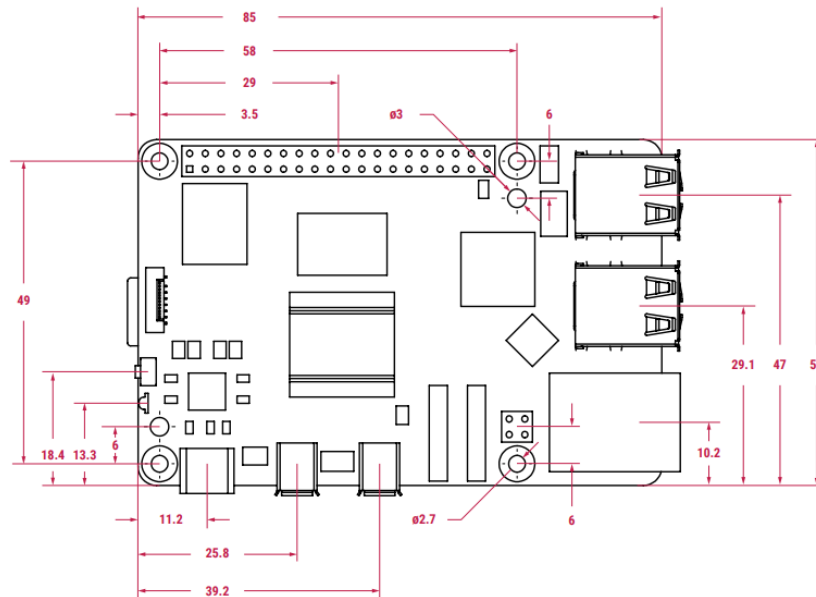


Εικόνα 5.13: Βασικές διεπαφές και συνδέσεις της πλακέτας Raspberry Pi 5 [100].

Ιδιαίτερης σημασίας για τη συνολική αρχιτεκτονική του συστήματος είναι η υποστήριξη σύγχρονων διεπαφών εισόδου/εξόδου. Το Raspberry Pi 5 διαθέτει δύο θύρες USB 3.0 και δύο θύρες USB 2.0, καθώς και ενσωματωμένη διεπαφή Gigabit Ethernet, επιτρέποντας τη σύνδεση αισθητήρων, περιφερειακών και συσκευών αποθήκευσης με υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων. Επιπλέον, η παρουσία διεπαφής

PCI Express 2.0 x1 μέσω ειδικού συνδέσμου επιτρέπει την απευθείας σύνδεση επεκτάσεων υψηλής ταχύτητας, χωρίς τη μεσολάβηση εξωτερικών μετατροπέων.

Οι μηχανικές διαστάσεις της πλακέτας και τα σημεία στήριξης παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.14. Το τυποποιημένο αποτύπωμα και η διάταξη των οπών στερέωσης επιτρέπουν την ασφαλή ενσωμάτωση της υπολογιστικής μονάδας στο εσωτερικό του αμαξώματος και τη συμβατότητα με επίσημα παρελκόμενα και υποστηρικτικά υποσυστήματα που τοποθετούνται απευθείας επάνω στην πλακέτα.



Εικόνα 5.14: Μηχανικές διαστάσεις και σημεία στήριξης της πλακέτας Raspberry Pi 5 (μονάδα σε χιλιοστά) [100].

Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της υπολογιστικής μονάδας συνοψίζονται στον Πίνακα 5.7. Τα χαρακτηριστικά αυτά αποτυπώνουν τις δυνατότητες της πλακέτας ως κεντρικού υπολογιστικού κόμβου, ικανού να υποστηρίξει ταυτόχρονα απαιτητικές διεργασίες επεξεργασίας δεδομένων και επικοινωνίας.

Πίνακας 5.7: Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της υπολογιστικής μονάδας Raspberry Pi 5

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Επεξεργαστής	Broadcom BCM2712
Πυρήνες CPU	4 × ARM Cortex-A76 (64-bit)
Μέγιστη συχνότητα	έως 2.4 GHz
Μνήμη RAM	LPDDR4X (8 GB)
GPU	VideoCore VII
Διεπαφή οθόνης	2 × micro-HDMI (έως 4K@60Hz)
Θύρες USB	2 × USB 3.0, 2 × USB 2.0
Δικτύωση	Gigabit Ethernet
Ασύρματη επικοινωνία	Wi-Fi 802.11ac, Bluetooth 5.0
Διεπαφή επέκτασης	PCI Express 2.0 x1
GPIO	40-pin header (HAT compatible)
Τροφοδοσία	USB-C, 5.1 V / έως 5 A

Η απαίτηση τροφοδοσίας έως 5 A καθιστά αναγκαία τη χρήση αξιόπιστου συστήματος παροχής ισχύος, ικανού να υποστηρίξει τη λειτουργία της πλακέτας υπό συνθήκες αυξημένου φόρτου. Παράλληλα, η αυξημένη υπολογιστική ισχύς του επεξεργαστή συνεπάγεται αυξημένες θερμικές απαιτήσεις, οι οποίες

δεν μπορούν να καλυφθούν επαρκώς χωρίς κατάλληλη θερμική διαχείριση. Επιπλέον, οι ανάγκες αποθήκευσης δεδομένων και η απαίτηση για υψηλούς ρυθμούς πρόσβασης καθιστούν σκόπιμη τη χρήση ταχύτερων αποθηκευτικών μέσων σε σχέση με τις συμβατικές λύσεις κάρτας SD.

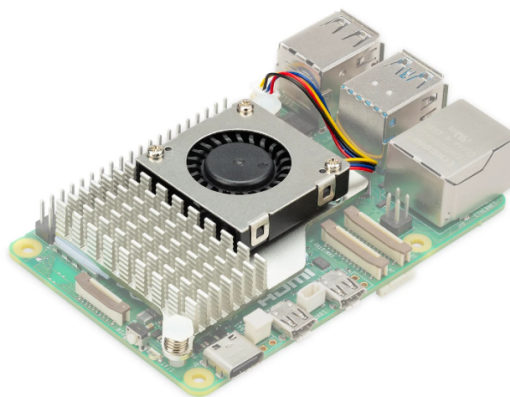
Για τους λόγους αυτούς, η υπολογιστική μονάδα υποστηρίζεται από πρόσθετα υποσυστήματα που αφορούν τη θερμική διαχείριση και την αποθήκευση δεδομένων, τα οποία ενσωματώνονται απευθείας επάνω στην πλακέτα και αναλύονται στις επόμενες υποενότητες.

5.4.1 Υποσύστημα θερμικής διαχείρισης

Η αυξημένη υπολογιστική ισχύς του Raspberry Pi 5, σε συνδυασμό με τη δυνατότητα λειτουργίας του επεξεργαστή σε συχνότητες έως 2.4 GHz, συνεπάγεται αυξημένες θερμικές απαιτήσεις κατά τη λειτουργία υπό συνεχή ή υψηλό φόρτο. Η παθητική απαγωγή θερμότητας δεν επαρκεί για τη διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας λειτουργίας, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενα θερμικού περιορισμού της απόδοσης (thermal throttling). Για τον λόγο αυτό, στο παρόν σύστημα επιλέχθηκε η χρήση ενεργού συστήματος ψύξης.

Το υποσύστημα θερμικής διαχείρισης υλοποιείται με χρήση της επίσημης ενεργής ψύκτρας *Raspberry Pi Active Cooler*, η οποία έχει σχεδιαστεί ειδικά για τη σειρά Raspberry Pi 5. Η ψύκτρα συνδυάζει μεταλλικό σώμα απαγωγής θερμότητας με ενσωματωμένο ανεμιστήρα, επιτρέποντας την αποδοτική μεταφορά θερμότητας από την επιφάνεια του επεξεργαστή προς το περιβάλλον.

Στο Σχήμα 5.15 παρουσιάζεται η τοποθέτηση της ενεργής ψύκτρας επάνω στην πλακέτα Raspberry Pi 5. Η μηχανική στήριξη πραγματοποιείται απευθείας στα προβλεπόμενα σημεία της πλακέτας, χωρίς την ανάγκη πρόσθετων προσαρμογών, διατηρώντας τη συνολική διάταξη συμπαγή και μηχανικά σταθερή.



Εικόνα 5.15: Τοποθέτηση της ενεργής ψύκτρας Raspberry Pi Active Cooler επάνω στην πλακέτα Raspberry Pi 5 [101].

Η τροφοδοσία και ο έλεγχος του ανεμιστήρα πραγματοποιούνται μέσω ειδικού συνδέσμου επάνω στην πλακέτα, επιτρέποντας τη δυναμική ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής ανάλογα με τη θερμοκρασία λειτουργίας. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται ισορροπία μεταξύ αποτελεσματικής ψύξης και περιορισμού του παραγόμενου θορύβου και της κατανάλωσης ισχύος.

Στον Πίνακα 5.8 παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της ενεργής ψύκτρας.

Πίνακας 5.8: Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της ενεργής ψύκτρας Raspberry Pi Active Cooler

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Τύπος ψύξης	Ενεργή (ψύκτρα + ανεμιστήρας)
Συμβατότητα	Raspberry Pi 5
Υλικό ψύκτρας	Αλουμίνιο
Έλεγχος ανεμιστήρα	PWM μέσω πλακέτας
Τροφοδοσία	Από την πλακέτα Raspberry Pi 5
Μηχανική στήριξη	Άμεση, χωρίς πρόσθετα εξαρτήματα

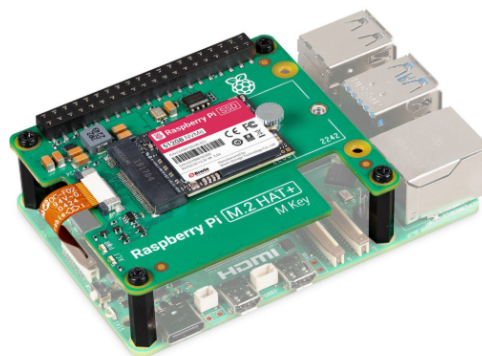
Η χρήση ενεργής ψύκτρας επιτρέπει τη διατήρηση της θερμοκρασίας του επεξεργαστή εντός ασφαλών ορίων ακόμη και κατά τη συνεχή λειτουργία υπό αυξημένο φόρτο, αποτρέποντας τη μείωση της απόδοσης λόγω θερμικού περιορισμού. Με τον τρόπο αυτό, το υποσύστημα θερμικής διαχείρισης συμβάλλει καθοριστικά στη σταθερή και προβλέψιμη λειτουργία της υπολογιστικής μονάδας, χωρίς να αυξάνει σημαντικά τον όγκο ή την πολυπλοκότητα του συνολικού συστήματος.

5.4.2 Υποσύστημα αποθήκευσης δεδομένων

Η αποθήκευση δεδομένων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη συνολική απόδοση και αξιοπιστία της υπολογιστικής μονάδας, ιδίως σε εφαρμογές που απαιτούν συχνή πρόσβαση σε αρχεία συστήματος, καταγραφή δεδομένων και φόρτωση λογισμικού κατά την εκκίνηση. Η χρήση συμβατικών καρτών SD παρουσιάζει περιορισμούς ως προς την ταχύτητα πρόσβασης και τη μακροχρόνια αντοχή σε επαναλαμβανόμενους κύκλους εγγραφής, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη σταθερότητα του συστήματος.

Για τον λόγο αυτό, στο παρόν σύστημα επιλέχθηκε η χρήση αποθηκευτικού μέσου τύπου SSD μέσω της επίσημης πλακέτας επέκτασης *Raspberry Pi M.2 HAT+*, η οποία επιτρέπει την απευθείας σύνδεση μονάδων αποθήκευσης τύπου NVMe στη διεπαφή *PCI Express 2.0 x1* του Raspberry Pi 5. Η συγκεκριμένη υλοποίηση αξιοποιεί πλήρως τις δυνατότητες της πλακέτας, παρέχοντας αυξημένους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων και βελτιωμένη αξιοπιστία σε σύγκριση με λύσεις αποθήκευσης βασισμένες σε κάρτες SD.

Στο Σχήμα 5.16 παρουσιάζεται η τοποθέτηση της πλακέτας M.2 HAT+ επάνω στο Raspberry Pi 5, καθώς και η μηχανική ενσωμάτωση της μονάδας SSD. Η σύνδεση πραγματοποιείται απευθείας μέσω του ειδικού συνδέσμου PCIe, χωρίς την παρεμβολή εξωτερικών καλωδίων, διατηρώντας τη διάταξη συμπαγή και μηχανικά σταθερή.



Εικόνα 5.16: Τοποθέτηση της πλακέτας Raspberry Pi M.2 HAT+ και μονάδας SSD επάνω στο Raspberry Pi 5 [102].

Στην παρούσα υλοποίηση χρησιμοποιείται μονάδα αποθήκευσης τύπου NVMe SSD χωρητικότητας 256 GB, η οποία προσφέρει επαρκή χώρο για το λειτουργικό σύστημα, τα πακέτα λογισμικού και την αποθήκευση δεδομένων κατά τη λειτουργία του ρομπότ. Η επιλογή SSD εξασφαλίζει σημαντικά βελτιωμένους χρόνους εκκίνησης και αυξημένη ανθεκτικότητα σε συνεχείς κύκλους εγγραφής, σε σύγκριση με εναλλακτικές λύσεις αποθήκευσης.

Στον Πίνακα 5.9 παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του υποσυστήματος αποθήκευσης.

Πίνακας 5.9: Βασικά χαρακτηριστικά υποσυστήματος αποθήκευσης

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Δίαυλος επικοινωνίας	PCI Express 2.0 x1
Μέγιστος ρυθμός μεταφοράς	500 MB/s
Τύπος αποθήκευσης	NVMe SSD
Χωρητικότητα	256 GB
Μορφή SSD	M.2 2230
Πρότυπο διεπαφής	NVMe 1.4
Τυχαία ανάγνωση (4 kB)	40k IOPS
Τυχαία εγγραφή (4 kB)	70k IOPS

Η χρήση αποθήκευσης τύπου SSD μέσω της διεπαφής PCIe επιτρέπει τη σταθερή και προβλέψιμη πρόσβαση στα δεδομένα, μειώνοντας τους χρόνους αναμονής και ενισχύοντας τη συνολική απόκριση του συστήματος. Με τον τρόπο αυτό, το υποσύστημα αποθήκευσης συμπληρώνει λειτουργικά την υπολογιστική μονάδα, διατηρώντας ταυτόχρονα τη συμπαγή και αρθρωτή αρχιτεκτονική του ρομποτικού συστήματος.

5.5 Αισθητήρας αποτύπωσης περιβάλλοντος (LiDAR)

5.5.1 Ρόλος και αρχή λειτουργίας

Η αποτύπωση του περιβάλλοντος στο παρόν ρομποτικό σύστημα υλοποιείται μέσω αισθητήρα τύπου 2D LiDAR, ο οποίος αποτελεί τον κύριο αισθητήρα αντίληψης του χώρου. Η συσκευή χρησιμοποιείται για την καταγραφή της γεωμετρίας του περιβάλλοντος σε οριζόντιο επίπεδο, παρέχοντας δεδομένα απόστασης και γωνιακής θέσης απαραίτητα για τη χαρτογράφηση και την εκτίμηση της θέσης του ρομπότ.

Στο παρόν σύστημα επιλέχθηκε το LiDAR *LD19*, το οποίο βασίζεται σε τεχνολογία μέτρησης απόστασης τύπου *Time-of-Flight* (TOF). Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει τον υπολογισμό της απόστασης μέσω μέτρησης του χρόνου που μεσολαβεί μεταξύ της εκπομπής παλμού υπέρυθρου λέιζερ και της επιστροφής του μετά από ανάκλαση σε αντικείμενο στόχο. Συνδυάζοντας τη μετρούμενη απόσταση με την αντίστοιχη γωνιακή πληροφορία, η συσκευή παράγει σύνολα σημείων σε πολικές συντεταγμένες κατά την περιστροφική σάρωση 360°.

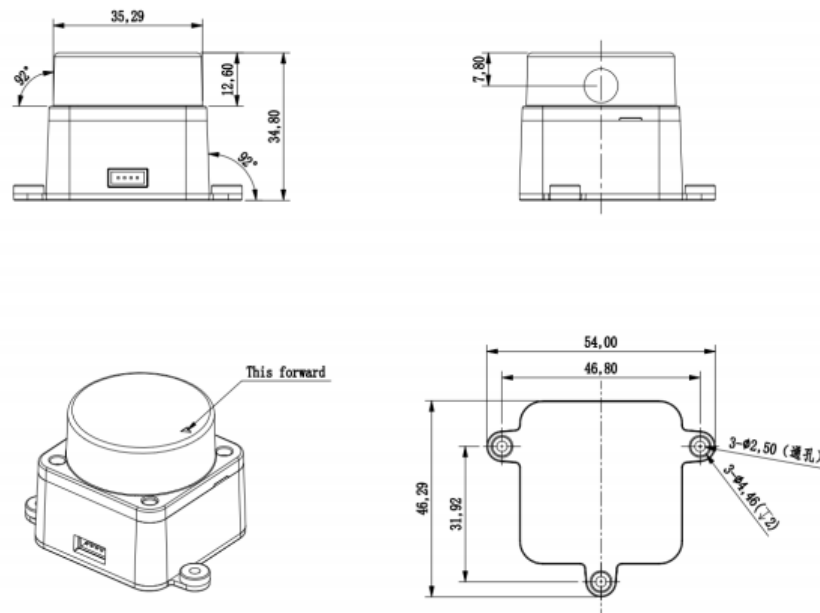
5.5.2 Μηχανική ενσωμάτωση

Στο Σχήμα 5.17 παρουσιάζεται η γενική μορφή της συσκευής. Η συμπαγής γεωμετρία της επιτρέπει την τοποθέτησή της στο επάνω τμήμα του ρομποτικού αμαξώματος χωρίς να εισάγονται σημαντικοί μηχανικοί περιορισμοί στη διάταξη των υποσυστημάτων.



Εικόνα 5.17: Γενική όψη του αισθητήρα LiDAR LD19.

Οι μηχανικές διαστάσεις και τα σημεία στερέωσης είναι καθοριστικής σημασίας για τη σωστή τοποθέτηση και την αξιόπιστη λειτουργία του αισθητήρα. Στο Σχήμα 5.18 παρουσιάζονται οι βασικές διαστάσεις της συσκευής, καθώς και η γεωμετρία της βάσης στήριξης.



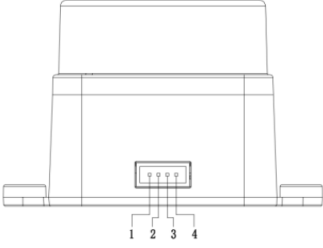
Εικόνα 5.18: Μηχανικές διαστάσεις και σημεία στερέωσης του αισθητήρα LiDAR LD19 (μονάδες σε χιλιοστά).

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στη διατήρηση ελεύθερου οπτικού πεδίου στο παράθυρο εκπομπής και λήψης του λέιζερ. Οποιαδήποτε μηχανική κάλυψη ή σκίαση του οπτικού παραθύρου μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την ποιότητα των μετρήσεων και να εισαγάγει συστηματικά σφάλματα στην αποτύπωση του περιβάλλοντος.

5.5.3 Ηλεκτρική διεπαφή και λειτουργία

Η επικοινωνία με την υπολογιστική μονάδα πραγματοποιείται μέσω ασύγχρονης σειριακής διεπαφής τύπου UART, μονής κατεύθυνσης. Τα δεδομένα μέτρησης εκπέμπονται συνεχώς χωρίς να απαιτείται αποστολή εντολών εκκίνησης ή συγχρονισμού από το εξωτερικό σύστημα, γεγονός που απλοποιεί την αρχιτεκτονική επικοινωνίας.

Στο Σχήμα 5.19 παρουσιάζεται η υποδοχή σύνδεσης και η αντιστοίχιση των ακροδεκτών τροφοδοσίας και επικοινωνίας. Η διεπαφή υλοποιείται μέσω τυποποιημένου συνδέσμου τύπου ZH1.5T-4P.



port number	signal name	type	description	minimum	typical	maximum
1	Tx	output	LiDAR data output	0V	3.3V	3.5V
2	PWM	input	motor control	0V	-	3.3V
3	GND	power supply	negative	-	0V	-
4	P5V	power supply	positive	4.5V	5V	5.5V

Εικόνα 5.19: Διεπαφή σύνδεσης και ορισμός ακροδεκτών του αισθητήρα LD19.

Η συσκευή διαθέτει ενσωματωμένο κινητήρα συνεχούς περιστροφής, ο οποίος μπορεί να λειτουργεί είτε με εσωτερικό έλεγχο ταχύτητας είτε με εξωτερικό έλεγχο μέσω σήματος PWM. Στην παρούσα υλοποίηση δεν χρησιμοποιείται εξωτερικός έλεγχος PWM, με αποτέλεσμα η σάρωση να πραγματοποιείται στη προκαθορισμένη συχνότητα των 10 Hz, τιμή που κρίνεται επαρκής για εφαρμογές εσωτερικής χαρτογράφησης και πλοήγησης.

5.5.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά

Στον Πίνακα 5.10 συνοψίζονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα.

Πίνακας 5.10: Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα LiDAR LD19

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Αρχή λειτουργίας	TOF
Γωνιακό εύρος σάρωσης	360°
Ρυθμός σάρωσης	10 Hz
Συχνότητα δειγματοληψίας	4500 Hz
Γωνιακή ανάλυση	$\leq 1^\circ$
Εύρος μέτρησης	0.02-12 m
Ακρίβεια μέτρησης	$\pm 10-20$ mm
Διεπαφή επικοινωνίας	UART @ 230400 bps
Τάση τροφοδοσίας	5 V
Κατανάλωση ισχύος	~ 0.9 W
Μηχανικές διαστάσεις	$38.59 \times 38.59 \times 34$ mm
Βάρος	42 g

Η συχνότητα δειγματοληψίας των 4500 Hz αντιστοιχεί σε περίπου 450 μετρήσεις ανά πλήρη περιστροφή του αισθητήρα, δεδομένου ρυθμού σάρωσης 10 Hz. Η πυκνότητα αυτή σημείων εξασφαλίζει επαρκή γωνιακή ανάλυση για εφαρμογές εσωτερικής χαρτογράφησης και πλοήγησης.

5.5.5 Σύστημα συντεταγμένων και περιορισμοί

Η συσκευή χρησιμοποιεί αριστερόστροφο σύστημα συντεταγμένων, με τον εμπρόσθιο άξονα να ορίζεται ως μηδενική κατεύθυνση και τη γωνία σάρωσης να αυξάνεται κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Η γνώση του εγγενούς συστήματος αναφοράς είναι κρίσιμη για τη σωστή ερμηνεία των δεδομένων και την ορθή ενσωμάτωσή τους στο λογισμικό σύστημα, όπου εφαρμόζονται οι απαραίτητοι μετασχηματισμοί ώστε τα δεδομένα να ευθυγραμμίζονται με το σύστημα συντεταγμένων του ρομπότ.

Συνολικά, το LiDAR LD19 προσφέρει έναν αποδοτικό συνδυασμό ακρίβειας, ρυθμού σάρωσης και απλότητας διασύνδεσης, καθιστώντας το κατάλληλη επιλογή για εφαρμογές εσωτερικής χαρτογράφησης και πλοήγησης σε ρομποτικές πλατφόρμες μικρής και μεσαίας κλίμακας.

5.6 Ασύρματη επικοινωνία - USB Wi-Fi προσαρμογέας

Για την υποστήριξη ασύρματης επικοινωνίας του ρομποτικού συστήματος χρησιμοποιείται εξωτερικός USB ασύρματος προσαρμογέας Wi-Fi με εξωτερική, περιστρεφόμενη κεραία, ο οποίος συνδέεται σε θύρα USB του κεντρικού υπολογιστικού κόμβου. Η χρήση εξωτερικού προσαρμογέα επιτρέπει την ευέλικτη ενσωμάτωση ασύρματης δικτύωσης χωρίς τροποποίηση της βασικής αρχιτεκτονικής του συστήματος, ενώ παράλληλα παρέχει τη δυνατότητα αντικατάστασης ή αναβάθμισης της συσκευής εφόσον απαιτηθεί.

Ο χρησιμοποιούμενος προσαρμογέας βασίζεται στο chipset Ralink RT5370 και υποστηρίζει τα πρότυπα ασύρματης δικτύωσης IEEE 802.11b/g/n, λειτουργώντας στη ζώνη συχνοτήτων των 2.4 GHz. Η επικοινωνία με το σύστημα πραγματοποιείται μέσω διασύνδεσης USB 2.0, παρέχοντας μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων έως 150 Mbit/s, τιμή επαρκή για τις ανάγκες τηλεχειρισμού, απομακρυσμένης πρόσβασης και ανταλλαγής δεδομένων με το λογισμικό υψηλού επιπέδου.



Εικόνα 5.20: Εξωτερικός USB ασύρματος προσαρμογέας Wi-Fi με εξωτερική κεραία.

Στον Πίνακα 5.11 συνοψίζονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του USB ασύρματου προσαρμογέα που χρησιμοποιήθηκε στο παρόν σύστημα.

Πίνακας 5.11: Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά USB ασύρματου προσαρμογέα Wi-Fi

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Τύπος συσκευής	USB ασύρματος προσαρμογέας Wi-Fi
Chipset	Ralink RT5370
Υποστηριζόμενα πρότυπα	IEEE 802.11b/g/n
Διεπαφή	USB 2.0
Ζώνη συχνοτήτων	2.412 – 2.4835 GHz
Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης	έως 150 Mbps
Τύπος κεραίας	Εξωτερική κεραία
Μηχανισμοί ασφάλειας	WEP 64/128, WPA, WPA2, 802.1X
Υποστηριζόμενα λειτουργικά συστήματα	Linux, Windows

Η επιλογή του συγκεκριμένου USB ασύρματου προσαρμογέα πραγματοποιήθηκε με κριτήρια το χαμηλό κόστος, τη διαθεσιμότητα στην αγορά και τη συμβατότητα με λειτουργικά συστήματα Linux. Επιπλέον, η υποστήριξη των βασικών προτύπων ασύρματης δικτύωσης κρίνεται επαρκής για τις λειτουργικές απαιτήσεις του ρομποτικού συστήματος, χωρίς να εισάγει περιττή πολυπλοκότητα στον σχεδιασμό.

5.7 Τροφοδοσία

Η τροφοδοσία του ρομποτικού συστήματος αποτελεί κρίσιμο υποσύστημα, καθώς επηρεάζει άμεσα τόσο την ενεργειακή αυτονομία όσο και την ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία όλων των ηλεκτρονικών και ηλεκτρομηχανικών μερών. Στο παρόν σύστημα επιλέχθηκε η υλοποίηση αυτοσχέδιας συστοιχίας μπαταριών, προσαρμοσμένης στις χωρικές και ενεργειακές απαιτήσεις του ρομπότ, αντί της χρήσης έτοιμου εμπορικού πακέτου.

Η επιλογή αυτή επέτρεψε την αποδοτικότερη εκμετάλλευση του διαθέσιμου χώρου στο εσωτερικό του αμαξώματος, καθώς και τον πλήρη έλεγχο βασικών χαρακτηριστικών της συστοιχίας, όπως η ονομαστική τάση, η συνολική χωρητικότητα και τα όρια ασφαλούς φόρτισης και εκφόρτισης.

5.7.1 Διάταξη και επιλογή στοιχείων

Η συστοιχία υλοποιήθηκε σε διάταξη **3S**, δηλαδή με τρία κελία ονομαστικής τάσης **3.7 V** συνδεδεμένα σε σειρά, παρέχοντας ονομαστική τάση περίπου **11.1 V** και μέγιστη τάση πλήρους φόρτισης **12.6 V**. Η επιλογή της διάταξης 3S πραγματοποιήθηκε σκόπιμα, με στόχο τη διατήρηση περιορισμένου όγκου και βάρους, καθώς και τη συμβατότητα με τα υπόλοιπα υποσυστήματα ισχύος του ρομπότ.

Ως επιμέρους στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν επαναφορτιζόμενες μπαταρίες **ιόντων λιθίου (Li-ion)** τύπου **Li-Mn (IMR)**, μεγέθους **26650** και ονομαστικής χωρητικότητας **5500 mAh** η καθεμία. Ο συγκεκριμένος τύπος χημείας επιλέχθηκε λόγω της αυξημένης θερμικής σταθερότητας και της δυνατότητας παροχής υψηλών ρευμάτων εκφόρτισης, χαρακτηριστικά που είναι ιδιαίτερα σημαντικά σε κινητά ρομποτικά συστήματα με δυναμικά φορτία.

Στο Σχήμα 5.21 παρουσιάζονται τα επιμέρους στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της συστοιχίας.



Εικόνα 5.21: Στοιχεία ιόντων λιθίου τύπου IMR 26650 που χρησιμοποιήθηκαν στη συστοιχία.

5.7.2 Συνολική χωρητικότητα και αποθηκευμένη ενέργεια

Λόγω της σύνδεσης των στοιχείων σε σειρά, η συνολική χωρητικότητα της συστοιχίας παραμένει ίση με τη χωρητικότητα ενός μεμονωμένου στοιχείου, δηλαδή **5.5 Ah**, ενώ η τάση αυξάνεται στο επίπεδο των **11.1 V**.

Η συνολική αποθηκευμένη ενέργεια της συστοιχίας υπολογίζεται ως:

$$E = V_{\text{nom}} \cdot C = 11.1 \text{ V} \cdot 5.5 \text{ Ah} \approx 61 \text{ Wh}$$

Η τιμή αυτή καθορίζει άμεσα την ενεργειακή αυτονομία του ρομπότ και επιτρέπει την ταυτόχρονη τροφοδότηση των κινητήρων, της υπολογιστικής μονάδας και των αισθητήρων για εκτεταμένο χρονικό διάστημα λειτουργίας.

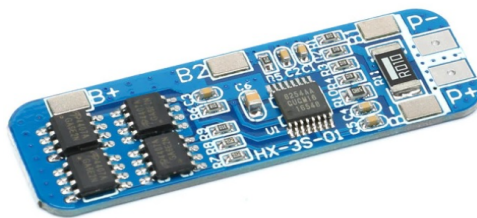
5.7.3 Κύκλωμα διαχείρισης και προστασίας (BMS)

Για την ασφαλή λειτουργία της συστοιχίας χρησιμοποιήθηκε κύκλωμα διαχείρισης μπαταρίας (Battery Management System - BMS) τύπου **3S 10A**. Το BMS προστατεύει τα στοιχεία από υπερφόρτιση, υπερεκφόρτιση και υπερένταση, ενώ παράλληλα επιβλέπει την εξισορρόπηση των τάσεων μεταξύ των επιμέρους κελιών.

Το μέγιστο επιτρεπτό συνεχές ρεύμα εκφόρτισης περιορίζεται στα 10 A. Η μέγιστη θεωρητική ηλεκτρική ισχύς που μπορεί να παρασχεθεί από τη συστοιχία υπολογίζεται ως:

$$P_{\text{max}} = V_{\text{nom}} \cdot I_{\text{max}} = 11.1 \text{ V} \cdot 10 \text{ A} \approx 111 \text{ W}$$

Η ισχύς αυτή επαρκεί για την τροφοδότηση όλων των υποσυστημάτων του ρομπότ, λαμβάνοντας υπόψη και τις στιγμιαίες αιχμές ρεύματος κατά την εκκίνηση των κινητήρων. Στο Σχήμα 5.22 παρουσιάζεται το κύκλωμα BMS που χρησιμοποιήθηκε.



Εικόνα 5.22: Κύκλωμα διαχείρισης και προστασίας μπαταρίας (BMS) τύπου 3S.

5.7.4 Συναρμολόγηση και μόνωση

Η ηλεκτρική σύνδεση των στοιχείων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ασύρματης ηλεκτροπόντας, ώστε να αποφευχθεί η θερμική καταπόνηση των κελιών που θα μπορούσε να προκύψει από συμβατική συγκόλληση με καλάνι. Η μέθοδος αυτή εξασφαλίζει αξιόπιστες μηχανικές και ηλεκτρικές συνδέσεις, κατάλληλες για εφαρμογές με αυξημένες απαιτήσεις ρεύματος.

Πάνω από τις κολλήσεις και τα ευαίσθητα σημεία εφαρμόστηκε ταινία Kapton, η οποία προσφέρει υψηλή ηλεκτρική μόνωση και αυξημένη αντοχή σε θερμοκρασία. Επιπλέον, ολόκληρη η συστοιχία καλύφθηκε με μονωτική ταινία, παρέχοντας προστασία από μηχανικές καταπονήσεις και αποτρέποντας τυχαία βραχυκυκλώματα.

Η τελική μορφή της συστοιχίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.23.



Εικόνα 5.23: Ολοκληρωμένη συστοιχία μπαταριών μετά τη συναρμολόγηση και μόνωση.

5.7.5 Φόρτιση και παρακολούθηση

Η φόρτιση της συστοιχίας πραγματοποιείται με τη χρήση ειδικού φορτιστή για μπαταρίες ιόντων λιθίου, κατάλληλου για διάταξη 3S, ο οποίος παρέχει τάση εξόδου 12.6 V και μέγιστο ρεύμα φόρτισης 2 A. Ο φορτιστής συνδέεται στην έξοδο φόρτισης του BMS μέσω βύσματος τύπου jack barrel (5.5×2.1 mm) και διαθέτει ενσωματωμένη οπτική ένδειξη κατάστασης φόρτισης.

Για τη συνεχή παρακολούθηση της κατάστασης της συστοιχίας χρησιμοποιήθηκε ενσωματωμένο ψηφιακό βολτόμετρο LED μικρών διαστάσεων, το οποίο εμφανίζει την τρέχουσα τάση σε πραγματικό χρόνο. Η διάταξη αυτή επιτρέπει τον άμεσο έλεγχο της κατάστασης φόρτισης κατά τη λειτουργία του ρομπότ και συμβάλλει στην αποφυγή υπερβολικής εκφόρτισης των στοιχείων. Το βολτόμετρο που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.24.



Εικόνα 5.24: Ενσωματωμένο ψηφιακό βολτόμετρο LED για την παρακολούθηση της τάσης της συστοιχίας.

Η ύπαρξη οπτικής ένδειξης τάσης συμβάλλει ουσιαστικά στην ασφαλή και ελεγχόμενη λειτουργία του ρομποτικού συστήματος, καθώς επιτρέπει την άμεση εκτίμηση της κατάστασης φόρτισης τόσο κατά τη διαδικασία φόρτισης όσο και κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας του ρομπότ. Με τον τρόπο αυτό, καθίσταται δυνατός ο έγκαιρος εντοπισμός χαμηλών επιπέδων τάσης, αποτρέποντας ανεπιθύμητες συνθήκες υπερεκφόρτισης και ενισχύοντας τη συνολική αξιοπιστία και διάρκεια ζωής της συστοιχίας μπαταριών.

5.8 Αμάξωμα

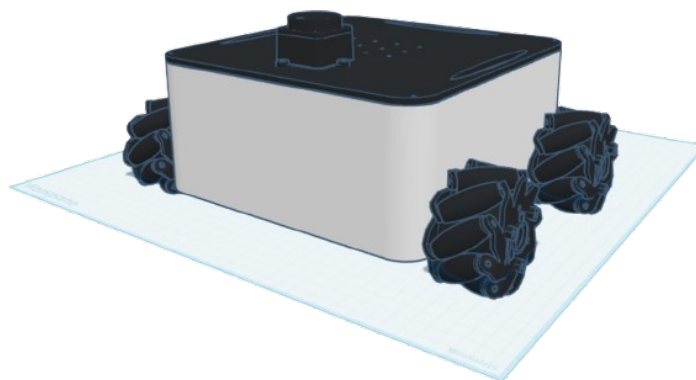
Το αμάξωμα του ρομποτικού συστήματος αποτελεί το βασικό μηχανικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο ενσωματώνονται και ευθυγραμμίζονται όλα τα επιμέρους υποσυστήματα, όπως οι κινητήρες, οι πλακέτες ελέγχου, οι αισθητήρες και το σύστημα τροφοδοσίας. Πέρα από τον δομικό του ρόλο, το αμάξωμα επηρεάζει άμεσα την εργονομία του συστήματος, την ψύξη των ηλεκτρονικών, την προσβασιμότητα στις διεπαφές, καθώς και τη δυνατότητα μελλοντικών επεκτάσεων ή τροποποιήσεων.

Η σχεδίαση του αμαξώματος δεν πραγματοποιήθηκε εξαρχής ως τελική λύση, αλλά προέκυψε σταδιακά μέσα από διαδοχικά στάδια πειραματισμού και αξιολόγησης. Στην αρχική πορεία της ανάπτυξης χρησιμοποιήθηκαν απλές εμπορικές πλατφόρμες και πρόχειρες βάσεις στήριξης, με κύριο στόχο την κατανόηση της συνολικής λειτουργίας του ρομποτικού συστήματος και την επιβεβαίωση της ορθής συνεργασίας των υποσυστημάτων. Οι λύσεις αυτές, αν και λειτουργικές, παρουσίαζαν περιορισμούς ως προς τη μηχανική σταθερότητα, τη διάταξη των καλωδιώσεων και την οργανωμένη τοποθέτηση των ηλεκτρονικών.

Καθώς το σύστημα εξελισσόταν, κρίθηκε απαραίτητη η μετάβαση σε προσαρμοσμένο μηχανικό σχεδιασμό, ο οποίος θα κάλυπτε τις αυξημένες απαιτήσεις ολοκλήρωσης και θα παρείχε μεγαλύτερο έλεγχο στη γεωμετρία και τη διάταξη των εξαρτημάτων. Για τον σκοπό αυτό επιλέχθηκε η σχεδίαση του αμαξώματος σε περιβάλλον τρισδιάστατης μοντελοποίησης Tinkercad, το οποίο, παρά την απλότητά του, προσέφερε επαρκή ευελιξία για τον σχεδιασμό προσαρμοσμένων εξαρτημάτων και τη γρήγορη επαναληπτική βελτίωση της γεωμετρίας.

Η υλοποίηση του αμαξώματος πραγματοποιήθηκε μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης, διαδικασία που επέτρεψε την ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων και την αξιολόγηση διαφορετικών σχεδιαστικών και κατασκευαστικών παραμέτρων. Κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης πραγματοποιήθηκε εκτεταμένος πειραματισμός τόσο ως προς τις ρυθμίσεις εκτύπωσης όσο και ως προς την επιλογή υλικών, με αρχικές δοκιμές σε υλικό ASA και τελική μετάβαση σε PETG-HF, ώστε να επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ μηχανικής αντοχής, ευκολίας εκτύπωσης και διαστατικής σταθερότητας.

Στο Σχήμα 5.25 παρουσιάζεται η συνολική μορφή του αμαξώματος του ρομποτικού συστήματος



Εικόνα 5.25: Συνολική όψη του αμαξώματος στο περιβάλλον σχεδίασης.

Στις επόμενες υποενότητες αναλύονται αναλυτικά τα επιμέρους δομικά στοιχεία του αμαξώματος και τα κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά.

5.8.1 Κύριο δομικό μέρος

Το κύριο δομικό μέρος του αμαξώματος αποτελεί το βασικό μηχανικό στοιχείο του ρομποτικού συστήματος και λειτουργεί ως φορέας στήριξης όλων των κρίσιμων υποσυστημάτων. Πάνω σε αυτό εδράζονται οι κινητήρες κίνησης, οι ηλεκτρονικές πλακέτες ελέγχου, το σύστημα τροφοδοσίας και τα επιμέρους στοιχεία διασύνδεσης, ενώ παράλληλα καθορίζει τη συνολική γεωμετρία, την δομική συμπεριφορά και τη μηχανική σταθερότητα του ρομπότ. Ο σχεδιασμός του κύριου δομικού μέρους επηρεάζει άμεσα την κατανομή μάζας, την ευστάθεια κατά την κίνηση, καθώς και την εργονομία και τη συντηρησιμότητα του συστήματος.

Το κύριο δομικό μέρος σχεδιάστηκε με κάτοψη διαστάσεων $22\text{ cm} \times 22\text{ cm}$, με στρογγυλεμένες γωνίες, επιλογή που συμβάλλει στη μείωση συγκεντρώσεων μηχανικών τάσεων και στη βελτίωση της συνολικής αντοχής της κατασκευής. Το συνολικό ύψος του κύριου δομικού μέρους ανέρχεται στα 100 mm , με τη βάση και τα πλευρικά τοιχώματα να έχουν πάχος 5 mm , διαστάσεις που επιλέχθηκαν ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής μηχανική ακαμψία χωρίς σημαντική αύξηση του βάρους.

Στο εσωτερικό του κύριου δομικού μέρους έχουν ενσωματωθεί τέσσερις κυλινδρικές θήκες για την τοποθέτηση των κινητήρων, οι οποίες αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της γεωμετρίας και όχι πρόσθετα εξαρτήματα. Η στερέωση των κινητήρων πραγματοποιείται μέσω βιδών τύπου M3, εξασφαλίζοντας αξιόπιστη μηχανική σύζευξη και ακριβή ευθυγράμμιση. Η ενσωμάτωση των βάσεων των κινητήρων στο ίδιο το δομικό στοιχείο μειώνει τον αριθμό των επιμέρους εξαρτημάτων και αυξάνει τη συνολική αντοχή της κατασκευής.

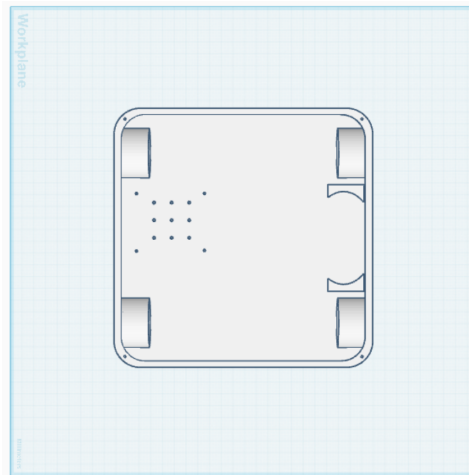
Η τοποθέτηση των ηλεκτρονικών πλακετών πραγματοποιείται μέσω κατακόρυφης στοίβαξης, με το κύριο δομικό μέρος να φέρει τα αντίστοιχα σημεία στήριξης και αποστάτες. Η διάταξη αυτή επιτρέπει την οργανωμένη εγκατάσταση πολλαπλών πλακετών σε περιορισμένο όγκο, ενώ παράλληλα διευκολύνει τη συνδεσμολογία και τη συντήρηση του συστήματος. Στην περιοχή των πλακετών έχουν προβλεφθεί οπές εξαερισμού, ώστε να διευκολύνεται η φυσική ροή αέρα και να αποφεύγεται η συσσώρευση θερμότητας κατά τη λειτουργία.

Επιπλέον, στο κύριο δομικό μέρος έχουν σχεδιαστεί ανοίγματα για την πρόσβαση σε βασικές διεπαφές και στοιχεία χειρισμού, όπως θύρες επικοινωνίας, διακόπτης ενεργοποίησης, υποδοχή φόρτισης της μπαταρίας και ένδειξη τάσης. Η πρόβλεψη των ανοιγμάτων αυτών από το στάδιο της σχεδίασης επιτρέπει την άμεση πρόσβαση στα υποσυστήματα χωρίς την ανάγκη αποσυναρμολόγησης του αμαξώματος, βελτιώνοντας την εργονομία και τη συντηρησιμότητα του ρομπότ.

Για την ενσωμάτωση του συστήματος τροφοδοσίας έχει προβλεφθεί αποσπώμενη βάση μπαταρίας, η οποία τοποθετείται στο εσωτερικό του κύριου δομικού μέρους. Η γεωμετρία της βάσης και τα αντίστοιχα ανοίγματα του αμαξώματος σχεδιάστηκαν με γνώμονα το εξωτερικό σχήμα και τις διαστάσεις της χρησιμοποιούμενης μπαταρίας, ώστε να εξασφαλίζεται σταθερή μηχανική στήριξη χωρίς την ανάγκη πρόσθετων στοιχείων συγκράτησης.

Η βάση της μπαταρίας στερεώνεται στο κύριο δομικό μέρος μέσω βιδωτής σύνδεσης, επιτρέποντας την εύκολη αποσυναρμολόγηση και αντικατάσταση του συστήματος τροφοδοσίας. Η αποσπώμενη αυτή διάταξη ενισχύει τη συντηρησιμότητα του ρομποτικού συστήματος και επιτρέπει μελλοντικές τροποποιήσεις

ή αναβάθμιση της μπαταρίας χωρίς επανασχεδίαση του βασικού δομικού στοιχείου.



Εικόνα 5.26: Κύριο δομικό μέρος του αμαξώματος στο περιβάλλον Tinkercad

Κατά την αρχική φάση της ανάπτυξης επιχειρήθηκε η κατασκευή του κύριου δομικού μέρους με χρήση νήματος Ακρυλονιτριλίου Στυρολίου Ακρυλικού (Acrylonitrile Styrene Acrylate - ASA), το οποίο θεωρείται κατάλληλο για ρομποτικές εφαρμογές λόγω της αυξημένης αντοχής του σε θερμικές και περιβαλλοντικές καταπονήσεις. Ωστόσο, εξαιτίας των μεγάλων διαστάσεων του εξαρτήματος και του σχετικά μεγάλου ύψους εκτύπωσης, παρατηρήθηκαν έντονα φαινόμενα θερμικής στρέβλωσης (warping), με χαρακτηριστική ανύψωση των γωνιών, ακόμη και με τη χρήση brim και τεχνικών βελτίωσης της πρόσφυσης στο υπόστρωμα. Τα φαινόμενα αυτά κατέστησαν τη χρήση του ASA μη πρακτική για την παρούσα γεωμετρία.

Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε τελικά η χρήση νήματος από Πολυαιθυλένιο Τερεφθαλικής Γλυκόλης, Υψηλής Ροής (Polyethylene Terephthalate Glycol High Flow - PETG-HF), το οποίο αποτελεί βελτιωμένη παραλλαγή του κλασικού PETG. Σε σύγκριση με το συμβατικό PETG, το PETG-HF παρουσιάζει αυξημένη εκτυπωσιμότητα, μειωμένη τάση για δημιουργία ινών και συσσωματώσεων, καθώς και βελτιωμένη συμπεριφορά σε υψηλότερες ταχύτητες εκτύπωσης, διατηρώντας παράλληλα ικανοποιητική μηχανική αντοχή και διαστατική σταθερότητα. Επιπλέον, εμφανίζει αυξημένη ανθεκτικότητα σε σύγκριση με το Πολυγαλακτικό Οξύ (Polylactic Acid - PLA), καθώς και αυξημένη αντοχή σε υγρασία, υπερύδρα ακτινοβολία και θερμικές καταπονήσεις, χαρακτηριστικά που το καθιστούν ιδιαίτερα κατάλληλο για ρομποτικές εφαρμογές.

Πριν την εκτύπωση, το νήμα PETG-HF υποβλήθηκε σε διαδικασία ξήρανσης σε θερμοκρασία 65 °C για χρονική διάρκεια 8 ωρών, σύμφωνα με τις συστάσεις του κατασκευαστή, με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας εκτύπωσης και την αποφυγή φαινομένων που σχετίζονται με την απορρόφηση υγρασίας. Επιπλέον, για τη βελτίωση της πρόσφυσης της πρώτης στρώσης στην επιφάνεια εκτύπωσης χρησιμοποιήθηκε συγκολλητικό μέσο εκτύπωσης, συμβάλλοντας στη σταθερότητα της διαδικασίας, ιδίως λόγω των μεγάλων διαστάσεων του εξαρτήματος.

Για την εσωτερική πλήρωση του κύριου δομικού μέρους επιλέχθηκε το πρότυπο πλήρωσης Gyroid. Η συγκεκριμένη μορφή πλήρωσης παρουσιάζει ισотροπική μηχανική συμπεριφορά, προσφέροντας παρόμοια αντοχή σε διαφορετικές διευθύνσεις φόρτισης, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό για δομικά εξαρτήματα μεγάλων διαστάσεων. Επιπλέον, η γεωμετρία του Gyroid δεν περιλαμβάνει συνεχόμενα σημεία τομής

στην ίδια στρώση εκτύπωσης, μειώνοντας την πιθανότητα αστοχιών κατά τη διαδικασία εκτύπωσης και συμβάλλοντας στη βελτιωμένη συνοχή του τελικού εξαρτήματος.

Κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση διακρίνονται δύο βασικές περιπτώσεις εκτύπωσης χωρίς άμεση στήριξη: η γεφύρωση (bridging), κατά την οποία το υλικό ενώνει δύο σημεία εκτυπώνοντας στον αέρα, και οι προεξοχές (overhangs), δηλαδή περιοχές της γεωμετρίας με μεγάλη κλίση ή οριζόντια ανάπτυξη ως προς την κατακόρυφο. Στην παρούσα κατασκευή, οι πλευρικές οπές και τα οριζόντια ανοίγματα του κύριου δομικού μέρους δημιουργούν εκτεταμένες προεξοχές, οι οποίες δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν αξιόπιστα μέσω γεφύρωσης, καθιστώντας απαραίτητη τη χρήση υποστηρίξεων κατά την εκτύπωση.

Οι τελικές παράμετροι τρισδιάστατης εκτύπωσης και οι επιλεγμένες ταχύτητες εκτύπωσης παρουσιάζονται αναλυτικά στους αντίστοιχους πίνακες της ενότητας.

Πίνακας 5.12: Βασικές παράμετροι τρισδιάστατης εκτύπωσης κύριου δομικού μέρους

Παράμετρος	Τιμή
Ύψος στρώσης (Layer height)	0.16 mm (Optimal)
Τύπος υλικού	PETG-HF
Ποσοστό πλήρωσης (Infill)	15%
Τύπος πλήρωσης	Gyroid
Αριθμός περιμετρικών τοιχωμάτων	3
Γεννήτρια τοιχωμάτων	Arachne
Σειρά εκτύπωσης τοιχωμάτων	Εσωτερικό / Εξωτερικό
Αποφυγή διασταύρωσης τοιχωμάτων	Ενεργοποιημένη
Θερμοκρασία ακροφυσίου (Nozzle) - αρχική στρώση	230 °C
Θερμοκρασία ακροφυσίου (Nozzle) - λοιπές στρώσεις	240 °C
Θερμοκρασία θερμαινόμενης κλίνης (Bed)	70 °C
Χρήση υποστηρίξεων (Supports)	Ναι
Τύπος υποστηρίξεων	Δενδρικές (Tree)
Αφαίρεση μικρών προεξοχών	Ενεργοποιημένη
Γείσο (Brim)	Εξωτερικό, 5 mm
Αρχική ταχύτητα εκτύπωσης (Initial layer)	20 mm/s
Ταχύτητα εξωτερικών τοιχωμάτων (Outer Wall)	100 mm/s
Ταχύτητα εσωτερικών τοιχωμάτων (Inner Wall)	150 mm/s
Ταχύτητα αραιής πλήρωσης (Sparse infill)	250 mm/s
Ταχύτητα συμπαγούς πλήρωσης (Internal solid infill)	220 mm/s

Οι παραπάνω παράμετροι επιλέχθηκαν έπειτα από πειραματική αξιολόγηση, με στόχο την επίτευξη ισορροπίας μεταξύ ποιότητας επιφάνειας, ακρίβειας γεωμετρίας και χρόνου κατασκευής για ένα δομικό εξάρτημα μεγάλων διαστάσεων.

5.8.2 Άνω κάλυμμα

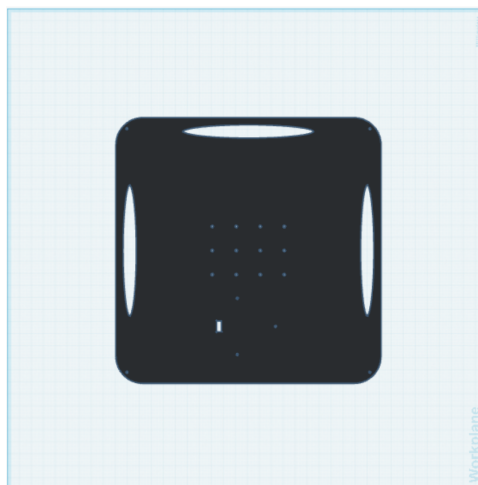
Το άνω κάλυμμα του αμαξώματος αποτελεί το προστατευτικό και λειτουργικό στοιχείο που ολοκληρώνει τη μηχανική δομή του ρομποτικού συστήματος. Ο ρόλος του είναι διττός, καθώς αφενός προστατεύει

τα εσωτερικά ηλεκτρονικά υποσυστήματα από μηχανικές καταπονήσεις, σκόνη και τυχαία επαφή, και αφετέρου λειτουργεί ως φορέας στήριξης επιμέρους αισθητήρων και στοιχείων αντίληψης του περιβάλλοντος.

Το άνω κάλυμμα σχεδιάστηκε ώστε να προσαρμόζεται πλήρως στη γεωμετρία του κύριου δομικού μέρους, ακολουθώντας το ίδιο περίγραμμα με στρογγυλεμένες γωνίες. Το πάχος του καλύμματος είναι 4 mm, τιμή που επιλέχθηκε ως συμβιβασμός μεταξύ μηχανικής στιβαρότητας και περιορισμού του συνολικού βάρους. Η στερέωσή του στο κύριο δομικό μέρος πραγματοποιείται μέσω τεσσάρων σημείων βίδωσης με βίδες τύπου M2.5, επιτρέποντας την εύκολη αφαίρεση και επανατοποθέτησή του για λόγους συντήρησης ή τροποποίησης του συστήματος.

Στην άνω επιφάνεια του καλύμματος έχουν προβλεφθεί οπές στήριξης για την τοποθέτηση του αισθητήρα LiDAR, καθώς και ειδικό άνοιγμα για τη διέλευση της καλωδίωσής του. Η θέση του αισθητήρα επιλέχθηκε ώστε να εξασφαλίζεται ανεμπόδιστο οπτικό πεδίο σάρωσης, ενώ η γεωμετρία των ανοιγμάτων επιτρέπει την ασφαλή στήριξη χωρίς την ανάγκη πρόσθετων μηχανικών εξαρτημάτων. Επιπλέον, στο κάλυμμα έχουν ενσωματωθεί οπές εξαερισμού, οι οποίες συμβάλλουν στη φυσική απαγωγή θερμότητας από το εσωτερικό του αμαξώματος.

Για την κατασκευή του άνω καλύμματος επιλέχθηκε θερμοπλαστικό πολυμερές ASA-CF (Acrylonitrile Styrene Acrylate με ενίσχυση ινών άνθρακα), το οποίο συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του συμβατικού ASA με αυξημένη μηχανική ακαμψία και βελτιωμένη διαστατική σταθερότητα. Η ενίσχυση με ίνες άνθρακα μειώνει σημαντικά τα φαινόμενα θερμικής στρέβλωσης κατά την εκτύπωση, καθιστώντας το υλικό κατάλληλο για εξαρτήματα με σχετικά μεγάλες επιφάνειες και αυξημένες απαιτήσεις ακρίβειας. Παράλληλα, το ASA-CF παρουσιάζει υψηλή αντοχή σε υπεριώδη ακτινοβολία, υγρασία και θερμικές καταπονήσεις, χαρακτηριστικά που το καθιστούν κατάλληλο για εξωτερικά ή εκτεθειμένα δομικά στοιχεία ρομποτικών συστημάτων.



Εικόνα 5.27: Άνω κάλυμμα του δομικού μέρους στο περιβάλλον Tinkercad.

Πριν την τρισδιάστατη εκτύπωση, το νήμα ASA-CF υποβλήθηκε σε διαδικασία ξήρανσης, σύμφωνα με τις προτεινόμενες ρυθμίσεις του κατασκευαστή, με στόχο την απομάκρυνση υγρασίας και τη βελτίωση της ποιότητας εκτύπωσης. Για τη διασφάλιση επαρκούς πρόσφυσης της πρώτης στρώσης στην επιφάνεια εκτύπωσης χρησιμοποιήθηκε συγκολλητικό μέσο, όπως προτείνεται για υλικά ASA-βάσης, συμβάλλοντας στη σταθερότητα της διαδικασίας και στην αποφυγή αποκόλλησης κατά την εκτύπωση.

Πίνακας 5.13: Βασικές παράμετροι τρισδιάστατης εκτύπωσης άνω καλύμματος

Παράμετρος	Τιμή
Ύψος στρώσης (Layer height)	0.12 mm (Fine)
Τύπος υλικού	ASA-CF
Ποσοστό πλήρωσης (Infill)	15%
Τύπος πλήρωσης	Gyroid
Αριθμός περιμετρικών τοιχωμάτων	3
Γεννήτρια τοιχωμάτων	Arachne
Σειρά εκτύπωσης τοιχωμάτων	Εσωτερικό / Εξωτερικό
Αποφυγή διασταύρωσης τοιχωμάτων	Ενεργοποιημένη
Θερμοκρασία ακροφυσίου (Nozzle) - αρχική στρώση	275 °C
Θερμοκρασία ακροφυσίου (Nozzle) - λοιπές στρώσεις	275 °C
Θερμοκρασία θερμαινόμενης κλίνης (Bed)	100 °C
Γείσο (Brim)	Εξωτερικό, 5 mm
Αρχική ταχύτητα εκτύπωσης (Initial layer)	50 mm/s
Ταχύτητα εξωτερικών τοιχωμάτων (Outer Wall)	60 mm/s
Ταχύτητα εσωτερικών τοιχωμάτων (Inner Wall)	120 mm/s
Ταχύτητα αραιής πλήρωσης (Sparse infill)	200 mm/s
Ταχύτητα συμπαγούς πλήρωσης (Internal solid infill)	200 mm/s

Οι τελικές παράμετροι τρισδιάστατης εκτύπωσης του άνω καλύμματος επιλέχθηκαν με στόχο τη βελτιστοποίηση της επιφανειακής ποιότητας, της γεωμετρικής ακρίβειας και της δομικής ακεραιότητας του εξαρτήματος, εξασφαλίζοντας την αξιόπιστη στήριξη του αισθητήρα και τη μακροχρόνια αντοχή του καλύμματος κατά τη λειτουργία του ρομποτικού συστήματος.

5.9 Διασύνδεση και επικοινωνία υποσυστημάτων

Η διασύνδεση των υποσυστημάτων του ρομποτικού συστήματος υλοποιείται μέσω συνδυασμού μηχανικών συνδέσεων, καλωδιώσεων ισχύος και γραμμών επικοινωνίας, με στόχο τη λειτουργική ολοκλήρωση του συστήματος και τον σαφή διαχωρισμό των επιπέδων ελέγχου. Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος συνδέονται μηχανικά με τους τροχούς μέσω του άξονα εξόδου (*shaft*), ο οποίος ασφαλίζεται με βίδες σύσφιξης στο κέντρο κάθε τροχού, εξασφαλίζοντας αξονική ευθυγράμμιση κατά τη λειτουργία.

Η ηλεκτρική σύνδεση των κινητήρων και των ενσωματωμένων κωδικοποιητών θέσης με την πλακέτα ελέγχου κίνησης πραγματοποιείται μέσω των εργοστασιακών καλωδίων που συνοδεύουν τους κινητήρες. Καθώς τα καλώδια αυτά διαθέτουν σύνδεσμο μόνο στο ένα άκρο, πραγματοποιήθηκε δημιουργία ενδιάμεσης καλωδίωσης προσαρμογής, η οποία υλοποιήθηκε μέσω χειροκίνητης αντιστοίχισης των αγωγών μεταξύ δύο αντίστοιχων θηλυκών συνδέσμων, σύμφωνα με τη διάταξη γραμμών ισχύος και σημάτων κωδικοποιητή.

Σε επίπεδο εσωτερικής επικοινωνίας της πλακέτας ελέγχου κίνησης, η μονάδα αδρανειακής μέτρησης (IMU) επικοινωνεί με τον μικροελεγκτή STM32 μέσω του σειριακού διαύλου *SPI*. Παράλληλα, η πλακέτα ελέγχου κίνησης τροφοδοτεί την υπολογιστική μονάδα Raspberry Pi 5 μέσω θύρας USB Type-C,

παρέχοντας την απαιτούμενη τάση λειτουργίας. Η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των δύο μονάδων πραγματοποιείται μέσω ενσύρματης σύνδεσης USB, με χρήση θύρας Micro-USB στην πλακέτα ελέγχου και θύρας USB Type-A στο Raspberry Pi.

Ο αισθητήρας LiDAR LD19 συνδέεται απευθείας με την υπολογιστική μονάδα μέσω καλωδίωσης USB. Σε επίπεδο πρωτοκόλλου, η επικοινωνία βασίζεται σε ασύγχρονη σειριακή μετάδοση δεδομένων (UART), με μονόδρομη αποστολή μετρήσεων από τον αισθητήρα προς την υπολογιστική μονάδα. Η σύνδεση USB υλοποιείται μέσω ενδιάμεσου μετατροπέα USB-to-UART, ο οποίος επιτρέπει την αναγνώριση του αισθητήρα ως σειριακή συσκευή από το λειτουργικό σύστημα. Στην παρούσα υλοποίηση δεν χρησιμοποιείται εξωτερικός έλεγχος PWM για τον κινητήρα περιστροφής του αισθητήρα, με αποτέλεσμα η σάρωση να πραγματοποιείται στην προκαθορισμένη συχνότητα λειτουργίας, όπως ορίζεται από τον κατασκευαστή.

Η διαμόρφωση του υλικού και των διεπαφών επικοινωνίας επηρεάζει άμεσα τη δομή και τη λειτουργία του λογισμικού του συστήματος, καθώς καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο τα δεδομένα συλλέγονται, μεταφέρονται και καθίστανται διαθέσιμα για επεξεργασία. Οι επιλογές σε επίπεδο διασύνδεσης ορίζουν τα χρονικά χαρακτηριστικά, τη μορφή και τη ροή της πληροφορίας, πάνω στα οποία βασίζεται η υλοποίηση του λογισμικού ελέγχου και επεξεργασίας δεδομένων στο ανώτερο επίπεδο.

Κεφάλαιο 6ο: Μεσολογισμικό και λογισμικό

6.1 Λογική δομή

Η λογισμική αρχιτεκτονική του ρομποτικού συστήματος βασίζεται στο ROS 2 και ακολουθεί αρθρωτή (modular) δομή, όπου κάθε λειτουργικό υποσύστημα υλοποιείται ως ανεξάρτητο πακέτο.

Για λόγους οργάνωσης και διακριτοποίησης του συστήματος, τα πακέτα που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας φέρουν το πρόθεμα `enra_`. Η ονοματοδοσία αυτή χρησιμοποιείται αποκλειστικά για λόγους δομικής σαφήνειας στο workspace και δεν επηρεάζει τη λειτουργική αρχιτεκτονική του συστήματος.

Τα πακέτα οργανώνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- **Ιδιοπαραγόμενα πακέτα** (custom packages)
- **Πακέτα τρίτων κατασκευαστών** (third-party packages)

Η διάκριση αυτή επιτρέπει σαφή διαχωρισμό μεταξύ του γενικού πλαισίου πλοήγησης και των στοιχείων που σχετίζονται με τη συγκεκριμένη υλική πλατφόρμα.

6.1.1 Λειτουργικό σύστημα και περιβάλλον ανάπτυξης

Το σύστημα εκτελείται σε περιβάλλον Ubuntu Linux με ROS 2 Jazzy. Η επιλογή της συγκεκριμένης διανομής εξασφαλίζει σταθερότητα και συμβατότητα με τα πακέτα `slam_toolbox`, `robot_localization` και `Navigation2`.

Η ανάπτυξη πραγματοποιήθηκε σε workspace τύπου `colcon`, με τυπική δομή φακέλων (`src`, `launch`, `config`, `rviz`). Οι διαδικασίες εγκατάστασης και ρύθμισης των πακέτων βασίζονται στην επίσημη τεκμηρίωση του ROS 2 και των αντίστοιχων έργων ανοιχτού κώδικα.

6.1.2 Επισκόπηση πακέτων λογισμικού

Το λογισμικό του συστήματος αποτελείται από τα ακόλουθα βασικά υποσυστήματα:

Αισθητήρες

- `ldrobot-lidar-ros2`: οδηγός αισθητήρα LD19 LiDAR
- `yahboomcar_bringup`: οδηγός STM32, IMU και κινητήρων

Εκτίμηση κατάστασης

- `yahboomcar_base_node`: υπολογισμός οδομετρίας (`/odom_raw`)
- `imu_filter_madgwick`: φιλτράρισμα προσανατολισμού IMU
- `robot_localization`: συγχώνευση δεδομένων μέσω EKF

Χαρτογράφηση

- `slam_toolbox`: online asynchronous SLAM και παραγωγή χάρτη

Πλοήγηση

- Navigation2 framework (planner, controller, costmaps, behavior tree)

Περιγραφή ρομπότ

- `envva_description`: URDF μοντέλο και δέντρο μετασχηματισμών

6.1.3 Ροή δεδομένων και αλληλεπίδραση κόμβων

Η συνολική ροή δεδομένων ακολουθεί ιεραρχική δομή:

1. Ο αισθητήρας LiDAR δημοσιεύει δεδομένα στο `/ldlidar_node/scan`.
2. Ο οδηγός κινητήρων δημοσιεύει `/vel_raw` και `/imu/data_raw`.
3. Το `base_node` υπολογίζει και δημοσιεύει `/odom_raw`.
4. Το `robot_localization` συγχωνεύει οδομετρία και IMU και παράγει το τελικό `/odom`.
5. Το `slam_toolbox` αξιοποιεί `/scan` και `/odom` για παραγωγή του `/map`.
6. Το Navigation2 χρησιμοποιεί `/map` και `/odom` για σχεδιασμό διαδρομής και έλεγχο κίνησης.

Η τελική εντολή ταχύτητας παράγεται από το Nav2 και, μέσω μηχανισμών εξομάλυνσης και ελέγχου σύγκρουσης, οδηγείται στον κόμβο ελέγχου κινητήρων.

Η αρχιτεκτονική συνοψίζεται στη λογική ακολουθία:

Sensing → State Estimation → Mapping → Planning → Control

Η πλήρης διασύνδεση των κόμβων απεικονίζεται σε διάγραμμα `rqt_graph`.

6.2 Αρχιτεκτονική και ροή δεδομένων αισθητήρα LiDAR

Η ροή δεδομένων του αισθητήρα *LDLiDAR LD19* στο περιβάλλον *ROS 2* ακολουθεί μια σαφώς πολυ-επίπεδη αρχιτεκτονική, η οποία διαχωρίζει αυστηρά τις ευθύνες μεταξύ επικοινωνίας υλικού, ανάλυσης πρωτοκόλλου, γεωμετρικής επεξεργασίας και ενοποίησης στο middleware. Η σχεδιαστική αυτή επιλογή αποσκοπεί στη δημιουργία ελέγξιμης, επεκτάσιμης και διαγνώσιμης ροής δεδομένων, στοιχείο ιδιαίτερα κρίσιμο για εφαρμογές χαρτογράφησης και πλοήγησης.

6.2.1 Χαμηλό επίπεδο: Επικοινωνία υλικού και ανάγνωση δεδομένων

Στο χαμηλότερο επίπεδο, ο οδηγός του αισθητήρα περιορίζεται στη διαχείριση της σειριακής επικοινωνίας και στην αξιόπιστη ανάγνωση ακατέργαστων δεδομένων. Η υλοποίηση βασίζεται σε μη μπλοκαριστική ανάγνωση σε ανεξάρτητο thread, σε συνδυασμό με μηχανισμούς *I/O multiplexing*, διασφαλίζοντας σταθερή ροή δεδομένων χωρίς δέσμευση υπολογιστικών πόρων. Στο επίπεδο αυτό, τα δεδομένα αντιμετωπίζονται αποκλειστικά ως συνεχής ροή bytes, χωρίς πρόωρη ερμηνεία του περιεχομένου τους.

6.2.2 Μεσαίο επίπεδο: Ανάλυση πρωτοκόλλου και ανακατασκευή μετρήσεων

Στο μεσαίο επίπεδο πραγματοποιείται η ανάλυση του πρωτοκόλλου επικοινωνίας του αισθητήρα και η μετατροπή των ακατέργαστων δεδομένων σε δομημένες φυσικές μετρήσεις. Ο οδηγός εφαρμόζει εσωτερικούς μηχανισμούς ελέγχου ακεραιότητας και συγχρονισμού της ροής δεδομένων, απορρίπτοντας αλλοιωμένα ή ελλιπή πακέτα πριν αυτά προωθηθούν στα επόμενα στάδια επεξεργασίας.

Η γωνιακή πληροφορία των μετρήσεων δεν παρέχεται πλήρως από το υλικό, αλλά ανακατασκευάζεται μέσω γραμμικής παρεμβολής, καθώς κάθε πακέτο δεδομένων περιέχει μόνο αρχική και τελική γωνία. Παράλληλα, αποδίδεται χρονική σήμανση σε κάθε σημείο, επιτρέποντας τη χρονο-χωρική συσχέτιση των μετρήσεων με δεδομένα οδομετρίας ή αδρανειακών αισθητήρων. Οι μηχανισμοί αυτοί υλοποιούνται εσωτερικά στον πηγαίο κώδικα του οδηγού και αξιοποιούνται ως μέρος της υπάρχουσας υλοποίησης, χωρίς να αποτελούν αντικείμενο ανάπτυξης στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

6.2.3 Υψηλό επίπεδο: Φιλτράρισμα και σύνθεση πλήρους σάρωσης

Στο υψηλό επίπεδο εφαρμόζονται φίλτρα ποιότητας με στόχο την απομάκρυνση θορύβου και μη αξιόπιστων μετρήσεων, χωρίς αλλοίωση της δομικής πληροφορίας του περιβάλλοντος. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η σύνθεση πλήρους σάρωσης 360° μέσω ανίχνευσης ασυνέχειας στη γωνιακή ακολουθία (*wrap-around*), επιτρέποντας τον σαφή διαχωρισμό των δεδομένων που ανήκουν στο ίδιο χρονικό πλαίσιο περιστροφής. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη για τη συνεπή παραγωγή δεδομένων κατάλληλων για δημοσίευση.

6.2.4 Ενοποίηση στο ROS 2 και δημοσίευση δεδομένων

Η ενοποίηση του αισθητήρα στο οικοσύστημα του *ROS 2* πραγματοποιείται μέσω *composable node* με υποστήριξη κύκλου ζωής (*lifecycle*). Κατά τη φάση *on_configure()*, ανακτώνται οι παράμετροι λειτουργίας και δημιουργείται ο publisher του μηνύματος *sensor_msgs/LaserScan*. Η μετατροπή των

δεδομένων περιλαμβάνει binning, επιλογή της ελάχιστης απόστασης ανά γωνιακή ακτίνα (z-buffer), μετατροπή μονάδων και προαιρετική γωνιακή αποκοπή (*angle cropping*).

Το τελικό μήνυμα σάρωσης δημοσιεύεται στο topic `/ldlidar_node/scan`. Αν και είναι δυνατή η ανακατεύθυνση προς ένα καθολικό topic `/scan` μέσω remapping στο αρχείο εκκίνησης, στην παρούσα υλοποίηση επιλέχθηκε η διατήρηση του namespaced topic.

Η επιλογή αυτή αποσκοπεί στη σαφή οριοθέτηση της ροής δεδομένων του αισθητήρα και στη διατήρηση συνέπειας με τη δομή composable nodes που χρησιμοποιείται στο σύστημα. Τα ανώτερα υποσυστήματα χαρτογράφησης και πλοήγησης παραμετροποιούνται ώστε να καταναλώνουν απευθείας το συγκεκριμένο topic, εξασφαλίζοντας ρητή και διαφανή διασύνδεση μεταξύ αισθητήρα και αλγοριθμικών επιπέδων.

6.2.5 Προσαρμοσμένα αρχεία εκκίνησης

Η εκκίνηση του οδηγού LiDAR πραγματοποιείται μέσω προσαρμοσμένων (*custom*) αρχείων launch, τα οποία έχουν σχεδιαστεί με κύριο στόχο την απομόνωση της λειτουργίας του αισθητήρα από την υπόλοιπη στοίβα λογισμικού του ρομποτικού συστήματος. Τα αρχεία αυτά περιορίζονται αποκλειστικά στην αρχικοποίηση του οδηγού και στη δημοσίευση των δεδομένων σάρωσης, χωρίς την εκκίνηση επιπλέον κόμβων ανώτερου επιπέδου. Με τον τρόπο αυτό, καθίσταται δυνατός ο ανεξάρτητος έλεγχος και η αξιολόγηση της ροής δεδομένων του αισθητήρα.

6.2.6 Παραμετροποίηση και έλεγχος γωνιακής περιοχής σάρωσης

Η λειτουργία του οδηγού LiDAR υποστηρίζει παραμετροποίηση βασικών χαρακτηριστικών της παραγόμενης σάρωσης μέσω αρχείων ρυθμίσεων. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, ενεργοποιήθηκε η γωνιακή αποκοπή (*angle cropping*) με σκοπό τον αποκλεισμό μετρήσεων που επηρεάζονται από τη φυσική διάταξη του ρομπότ.

Συγκεκριμένα, λόγω της τοποθέτησης κεραίας στο πίσω-δεξί τμήμα του ρομπότ, παρατηρήθηκε υποβάθμιση της ποιότητας των μετρήσεων σε συγκεκριμένο γωνιακό εύρος. Για τον λόγο αυτό, η παραγόμενη σάρωση περιορίστηκε στο εμπρόσθιο ημικύκλιο του αισθητήρα, με ρύθμιση των παραμέτρων `angle_crop_min` και `angle_crop_max` στις τιμές 90° και 270° αντίστοιχα, σύμφωνα με τον συμβατικό ορισμό γωνιών του ROS. Οι συγκεκριμένες τιμές προέκυψαν πειραματικά και ενδέχεται να προσαρμοστούν ελαφρώς ανάλογα με τη μηχανική διάταξη του ρομπότ. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την απομάκρυνση μη αξιόπιστων μετρήσεων χωρίς τροποποίηση του πηγαίου κώδικα του οδηγού, διατηρώντας επαρκή γωνιακή κάλυψη για εφαρμογές χαρτογράφησης και πλοήγησης.

6.3 Περιγραφή και κατάσταση του ρομπότ

Η παρούσα ενότητα τεκμηριώνει τις σχεδιαστικές επιλογές που υιοθετήθηκαν στο μοντέλο περιγραφής του ρομπότ, με έμφαση στις αριθμητικές τιμές θέσης και προσανατολισμού των επιμέρους τμημάτων και αισθητήρων. Η ανάλυση βασίζεται στη φυσική κατασκευή του ρομπότ και σε πειραματική επαλήθευση αισθητηριακών δεδομένων, χωρίς επανάληψη της θεωρητικής περιγραφής του μοντέλου.

6.3.1 Γεωμετρικά μοντέλα και επεξεργασία πλεγμάτων

Τα γεωμετρικά μοντέλα του ρομπότ σχεδιάστηκαν σε περιβάλλον CAD και εξήχθησαν σε μορφή αρχείων STL. Λόγω περιορισμών του εργαλείου σχεδίασης, τα αρχεία πλέγματος δεν ήταν αρχικά κεντραρισμένα σε κοινό σύστημα αναφοράς ούτε παρουσίαζαν συνεπή προσανατολισμό αξόνων. Για τον λόγο αυτό, εφαρμόστηκε προεπεξεργασία μέσω του λογισμικού MeshLab, ώστε όλα τα πλέγματα να κεντραριστούν και να ευθυγραμμιστούν ως προς τον άξονα z .

Η διαδικασία αυτή επέτρεψε τη χρήση φυσικών τιμών θέσης στο μοντέλο περιγραφής και περιόρισε την ανάγκη για πρόσθετες διορθώσεις προσανατολισμού. Σε επιμέρους περιπτώσεις, ωστόσο, κρίθηκε απαραίτητη η εφαρμογή περιστροφής απευθείας στο μοντέλο, προκειμένου να διασφαλιστεί η πλήρης συμφωνία με τη φυσική τοποθέτηση των εξαρτημάτων πάνω στο σασί.

6.3.2 Ορισμός πλαισίων αναφοράς βάσης

Το πλαίσιο `base_footprint` ορίστηκε ως προβολή του ρομπότ στο επίπεδο του εδάφους. Η κατακόρυφη μετατόπιση κατά τον άξονα z υπολογίστηκε με βάση τη γεωμετρία των τροχών και τη φυσική κατασκευή του σασί. Συγκεκριμένα, το ύψος προέκυψε από τη διαφορά μεταξύ της ακτίνας των τροχών ($75 \text{ mm} / 2$) και της μετρούμενης απόστασης μεταξύ της βάσης του σασί και του κέντρου περιστροφής των τροχών, ώστε το `base_footprint` να αντιστοιχεί στο πραγματικό επίπεδο επαφής με το έδαφος.

Το πλαίσιο `base_link` αναπαριστά το κύριο σώμα του ρομπότ και τοποθετήθηκε με βάση τη γεωμετρία του σασί, ώστε να λειτουργεί ως κεντρικό πλαίσιο αναφοράς για τη σύνδεση των υπολοίπων εξαρτημάτων και αισθητήρων. Η διάκριση μεταξύ των πλαισίων `base_footprint` και `base_link` επιτρέπει τη συνεπή χρήση του μοντέλου τόσο σε διαδικασίες πλοήγησης όσο και σε αλγόριθμους συγχώνευσης δεδομένων.

6.3.3 Τοποθέτηση αισθητήρα LiDAR

Η θέση του αισθητήρα LiDAR στο μοντέλο περιγραφής καθορίστηκε σύμφωνα με τη φυσική του τοποθέτηση πάνω στο ρομπότ και με βάση τις προδιαγραφές του πακέτου οδηγού. Για τον λόγο αυτό, υιοθετήθηκε διαχωρισμός μεταξύ του γεωμετρικού πλαισίου και του πλαισίου μετρήσεων, γεγονός που επιτρέπει την απευθείας αντιστοίχιση των δεδομένων σάρωσης στο αντίστοιχο πλαίσιο αναφοράς χωρίς την ανάγκη πρόσθετων μετασχηματισμών.

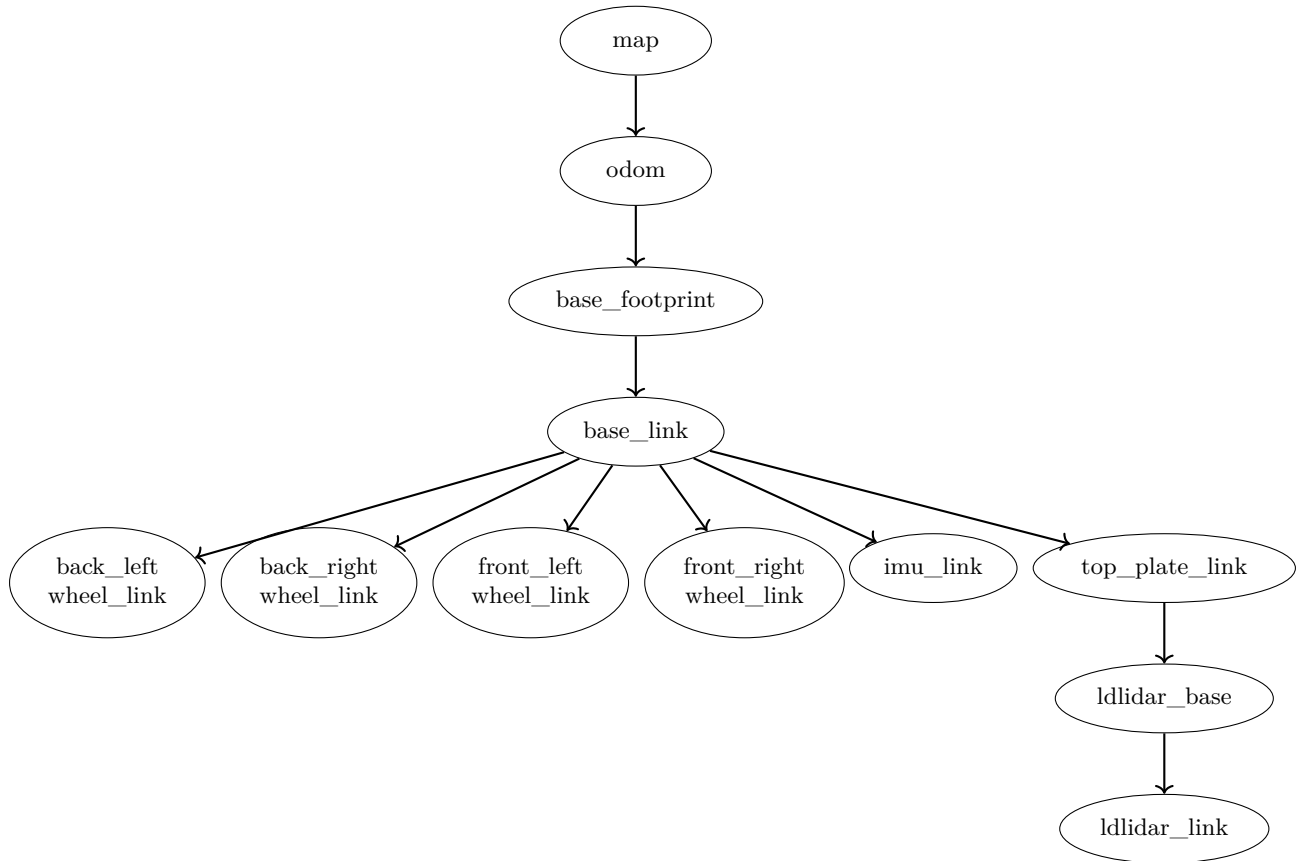
6.3.4 Τοποθέτηση και προσανατολισμός μονάδας IMU

Η θέση και ο προσανατολισμός της μονάδας IMU δεν υιοθετήθηκαν απευθείας από την τεκμηρίωση του κατασκευαστή, αλλά καθορίστηκαν βάσει πειραματικών μετρήσεων. Συγκεκριμένα, αναλύθηκαν τα ακατέργαστα δεδομένα επιτάχυνσης σε ακίνητη κατάσταση, καθώς και τα φιλτραρισμένα δεδομένα προσανατολισμού, ώστε να επιβεβαιωθεί η σωστή αντιστοίχιση των αξόνων με τη φυσική στάση του ρομπότ.

Η τελική διόρθωση εφαρμόστηκε στο μοντέλο περιγραφής, ώστε οι αλγόριθμοι φιλτραρίσματος και εκτίμησης κατάστασης να λειτουργούν ανεξάρτητα από ειδικές προσαρμογές ή διορθωτικές παρεμβάσεις σε ανώτερα επίπεδα λογισμικού.

6.3.5 Δέντρο μετασχηματισμών (TF)

Η συνολική συνέπεια του μοντέλου περιγραφής επαληθεύτηκε μέσω του δέντρου μετασχηματισμών (*TF tree*) που προκύπτει από το μοντέλο περιγραφής του ρομπότ και δημοσιεύεται από τον κόμβο δημοσίευσης κατάστασης. Το συγκεκριμένο TF tree αποτυπώνει τη στατική γεωμετρική και αισθητηριακή δομή του ρομπότ, με ρίζα το πλαίσιο `base_footprint`.



Εικόνα 6.1: TF tree του ρομποτικού συστήματος

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.3.5, η ιεραρχία των πλαισίων αναφοράς που ορίζεται από το μοντέλο περιγραφής είναι συνεπής και δεν παρουσιάζει κυκλικές ή ασυνεπείς συνδέσεις. Η δομή αυτή αποτυπώνει αποκλειστικά τη στατική σχέση μεταξύ του σώματος του ρομπότ και των αισθητήρων και αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία θα προστεθούν, σε επόμενα στάδια, οι δυναμικοί μετασχηματισμοί που σχετίζονται με την οδομετρία και τη χαρτογράφηση.

6.4 Παραγωγή οδομετρίας

Η εκτίμηση της κίνησης του ρομπότ βασίζεται σε πολυεπίπεδη επεξεργασία αισθητηριακών δεδομένων. Η διαδικασία ξεκινά από τις μετρήσεις των κωδικοποιητών κινητήρων και των αδρανειακών αισθητήρων και καταλήγει στη συγχωνευμένη εκτίμηση θέσης και προσανατολισμού στο τοπικό σύστημα αναφοράς. Η οδομετρία παράγεται σε τρία διαδοχικά στάδια: (α) εκτίμηση ταχυτήτων από τους τροχούς, (β) επεξεργασία προσανατολισμού μέσω IMU και (γ) συγχώνευση μέσω φίλτρου EKF.

6.4.1 Δεδομένα από κωδικοποιητές κινητήρων

Οι τέσσερις τροχοί τύπου Mecanum διαθέτουν ενσωματωμένους κωδικοποιητές, οι οποίοι μετρώνται από τον μικροελεγκτή STM32 της πλακέτας ελέγχου. Οι παλμοί των κωδικοποιητών μετατρέπονται σε γωνιακές ταχύτητες τροχών και, μέσω του κινηματικού μοντέλου Mecanum, υπολογίζονται οι γραμμικές και γωνιακές ταχύτητες του σώματος του ρομπότ (v_x, v_y, ω) . Το χαμηλό επίπεδο ελέγχου εκτελεί τον υπολογισμό αυτό και αποστέλλει τις ταχύτητες στο υπολογιστικό σύστημα μέσω σειριακής επικοινωνίας. Ο κόμβος οδηγός δημοσιεύει τις μετρήσεις στο topic `/vel_raw`.

Ο κόμβος `base_node_X3` λαμβάνει τις ταχύτητες και πραγματοποιεί χρονική ολοκλήρωση, παράγοντας το topic `/odom_raw`. Η ενημέρωση της θέσης και του προσανατολισμού πραγματοποιείται σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$x_{k+1} = x_k + (v_x \cos \theta - v_y \sin \theta) \Delta t \quad (33)$$

$$y_{k+1} = y_k + (v_x \sin \theta + v_y \cos \theta) \Delta t \quad (34)$$

$$\theta_{k+1} = \theta_k + \omega \Delta t \quad (35)$$

Η προσέγγιση αυτή αποτελεί μορφή *dead reckoning* και χαρακτηρίζεται από συσσωρευτικό σφάλμα. Στην περίπτωση τροχών Mecanum, η ολίσθηση των κυλινδρικών ρολών μπορεί να προκαλέσει απόκλιση κυρίως στη διεύθυνση εγκάρσιας μετατόπισης και στην εκτίμηση γωνίας, ιδιαίτερα σε επιφάνειες με μειωμένο συντελεστή τριβής.

6.4.2 Ενσωμάτωση IMU και φιλτράρισμα

Η πλακέτα ελέγχου διαθέτει αδρανειακή μονάδα μέτρησης (IMU), η οποία παρέχει δεδομένα επιταχύνσεων και γωνιακών ταχυτήτων. Τα ακατέργαστα δεδομένα δημοσιεύονται στο topic `/imu/data_raw`. Για τη βελτίωση της εκτίμησης προσανατολισμού χρησιμοποιείται ο κόμβος `imu_filter_madgwick`, ο οποίος εφαρμόζει αλγόριθμο εκτίμησης στάσης βασισμένο στη συγχώνευση γυροσκοπίου και επιταχυνσιόμετρου. Το φιλτραρισμένο αποτέλεσμα δημοσιεύεται στο topic `/imu/data`.

Στο παρόν σύστημα αξιοποιείται κυρίως η πληροφορία `yaw` και η γωνιακή ταχύτητα γύρω από τον άξονα z , καθώς η λειτουργία περιορίζεται σε επίπεδο κίνησης (`two_d_mode = true`). Η χρήση του φίλτρου μειώνει τον θόρυβο των μετρήσεων και παρέχει σταθερότερη εκτίμηση προσανατολισμού κατά τις περιστροφικές κινήσεις.

6.4.3 Συγχώνευση δεδομένων μέσω `robot_localization`

Η τελική εκτίμηση κατάστασης πραγματοποιείται από τον κόμβο `ekf_filter_node` του πακέτου `robot_localization`. Το φίλτρο εκτεταμένου Kalman συγχωνεύει τη σχετική οδομετρία από το `/odom_raw` με την εκτίμη-

ση προσανατολισμού και τη γωνιακή ταχύτητα από το `/imu/data`. Το φίλτρο λειτουργεί σε διδιάστατο μοντέλο κίνησης, εστιάζοντας στις μεταβλητές x , y , θ , v_x , v_y και ω .

Η έξοδος του φίλτρου δημοσιεύεται αρχικά στο topic `/odometry/filtered`, το οποίο αποτελεί την προεπιλεγμένη ονομασία του πακέτου `robot_localization`. Στο παρόν σύστημα εφαρμόζεται ανακατεύθυνση (remapping) του topic σε `/odom`, ώστε η τελική εκτίμηση κατάστασης να ακολουθεί τη σύμβαση του πλαισίου `odom` σύμφωνα με το REP-105. Με τον τρόπο αυτό διατηρείται συμβατότητα με τα ανώτερα πακέτα χαρτογράφησης και πλοήγησης.

6.5 Χρήση του Slam_Toolbox

Για την υλοποίηση ταυτόχρονης χαρτογράφησης και εκτίμησης θέσης στην πλατφόρμα EVVA επιλέχθηκε το πακέτο `slam_toolbox` σε λειτουργία *online asynchronous mapping*. Η επιλογή αυτή επιτρέπει λειτουργία σε πραγματικό χρόνο, με ελεγχόμενο υπολογιστικό φορτίο, κατάλληλο για την ενσωματωμένη υπολογιστική μονάδα (Raspberry Pi 5).

Η εκκίνηση του κόμβου πραγματοποιείται μέσω προσαρμοσμένου αρχείου `launch` (`evva_online_async.launch.py`), στο οποίο δημιουργείται `LifecycleNode` για το εκτελέσιμο `async_slam_toolbox_node`. Η χρήση `lifecycle` κόμβου διασφαλίζει ελεγχόμενη μετάβαση στις καταστάσεις `configure` και `activate`, συνεπώς με τη γενικότερη αρχιτεκτονική του συστήματος.

Ενοποίηση με τη ροή δεδομένων LiDAR

Το `slam_toolbox` λαμβάνει ως είσοδο μήνυμα τύπου `sensor_msgs/LaserScan`. Στην παρούσα αρχιτεκτονική, ο οδηγός του αισθητήρα LD LiDAR δημοσιεύει στο topic `/ldlidar_node/scan`, σύμφωνα με τη δομή `composable nodes` που έχει επιλεγεί για το σύστημα.

Αν και είναι δυνατή η ανακατεύθυνση προς καθολικό topic `/scan` μέσω `remapping`, επιλέχθηκε η διατήρηση του `namespaced topic`. Τα ανώτερα υποσυστήματα χαρτογράφησης και πλοήγησης παραμετροποιούνται ώστε να καταναλώνουν απευθείας το `/ldlidar_node/scan`, διατηρώντας σαφή και ρητή ροή δεδομένων μεταξύ αισθητήρα και αλγοριθμικών επιπέδων.

Η συνολική ροή δεδομένων διαμορφώνεται ως:

$$\text{/ldlidar_node/scan} \rightarrow \text{slam_toolbox} \rightarrow \text{/map, /tf (map} \rightarrow \text{odom)}$$

Πλαίσια αναφοράς και ενσωμάτωση στο TF

Η παραμετροποίηση ορίζει:

- `odom_frame`: `odom`
- `map_frame`: `map`

- `base_frame: base_footprint`

Με τον τρόπο αυτό, το `slam_toolbox` δημοσιεύει τον μετασχηματισμό `map → odom`, ενώ το σύστημα οδομετρίας παρέχει τον `odom → base_footprint`. Η δομή αυτή είναι συμβατή με το πρότυπο REP-105 και επιτρέπει άμεση συνεργασία με το Navigation2.

Παραμετροποίηση ανάλυσης και ενημέρωσης χάρτη

Η χωρική ανάλυση του παραγόμενου χάρτη ορίστηκε σε:

$$\text{resolution} = 0.05 \text{ m}$$

δηλαδή 5 cm ανά κελί, τιμή που αποτελεί συμβιβασμό μεταξύ λεπτομέρειας αναπαράστασης και κατανάλωσης μνήμης.

Η ενημέρωση του χάρτη πραγματοποιείται ανά 2 s (`map_update_interval = 2.0`), ενώ ο μετασχηματισμός `map → odom` δημοσιεύεται στα 50 Hz (`transform_publish_period = 0.02`), εξασφαλίζοντας ομαλή λειτουργία των ανώτερων επιπέδων πλοήγησης.

Το εύρος αξιοποίησης του αισθητήρα περιορίστηκε στα `max_laser_range = 12.0 m`, σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του LD LiDAR D300.

Scan matching και βελτιστοποίηση

Η επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης βασίζεται στον CeresSolver, με γραμμικό επιλυτή `SPARSE_NORMAL` και στρατηγική `LEVENBERG_MARQUARDT`. Ο συνδυασμός αυτός παρέχει αριθμητική σταθερότητα και ικανοποιητική απόδοση σε ενσωματωμένο σύστημα.

Η εισαγωγή νέας σάρωσης στον γράφο εξαρτάται από ελάχιστη μετατόπιση:

- `minimum_travel_distance = 0.05 m`
- `minimum_travel_heading = 0.05 rad`

περιορίζοντας την υπερβολική πυκνότητα κόμβων και συγκρατώντας το υπολογιστικό φορτίο.

Διόρθωση συσσωρευτικού σφάλματος

Η ανίχνευση βρόχων ενεργοποιείται μέσω `do_loop_closing = true`. Οι παράμετροι αναζήτησης (π.χ. `loop_search_maximum_distance = 3.0 m`) επιτρέπουν τη διόρθωση συσσωρευτικού σφάλματος σε εσωτερικούς χώρους μεσαίου μεγέθους.

Η ενεργοποίηση της λειτουργίας `enable_interactive_mode = true` παρέχει δυνατότητα χειροκίνητης επιβεβαίωσης loop closure μέσω RViz, στοιχείο χρήσιμο κατά τη φάση πειραματικής αξιολόγησης.

Λειτουργική συμπεριφορά

Η asynchronous λειτουργία εξασφαλίζει ότι κάθε νέα μέτρηση επεξεργάζεται μόνο μετά την ολοκλήρωση της προηγούμενης, αποτρέποντας συσσώρευση καθυστέρησης σε περιπτώσεις υπολογιστικά απαιτητικής βελτιστοποίησης. Η συμπεριφορά αυτή κρίθηκε κατάλληλη για το υπολογιστικό περιβάλλον της EVVA, διατηρώντας σταθερή ροή επεξεργασίας χωρίς απώλεια σαρώσεων.

Συνολικά, το `slam_toolbox` ενσωματώθηκε οργανικά στη στοίβα λογισμικού, παρέχοντας τον μετασχηματισμό `map → odom` και τον χάρτη περιβάλλοντος που αξιοποιείται από το `Navigation2` για καθολικό και τοπικό σχεδιασμό πλοήγησης.

6.6 Σύστημα Πλοήγησης `Navigation2` (Nav2)

Το σύστημα πλοήγησης του ρομπότ βασίζεται στο πλαίσιο *Navigation2* (Nav2) του ROS 2, το οποίο υλοποιεί αρθρωτή αρχιτεκτονική πλοήγησης με διαχωρισμό σε επιμέρους εξυπηρετητές (servers), μηχανισμό lifecycle και δυναμική φόρτωση αλγορίθμων μέσω plugins. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, το Nav2 χρησιμοποιείται τόσο για σχεδιασμό διαδρομής όσο και για τοπικό έλεγχο κίνησης, με έμφαση στη σταθερότητα και προβλεψιμότητα της συμπεριφοράς σε περιβάλλον εσωτερικού χώρου.

6.6.1 Δομή εκκίνησης και ενοποίηση

Η εκκίνηση του Nav2 πραγματοποιείται μέσω προσαρμοσμένου αρχείου launch (`evva_bringup.launch.py`), το οποίο οργανώνει:

- Τη φόρτωση των παραμέτρων μέσω *RewrittenYaml*,
- Τη διαχείριση namespace και composition,
- Τη δυναμική ενεργοποίηση lifecycle κόμβων μέσω *Lifecycle Manager*.

Η αρχιτεκτονική υποστηρίζει τόσο εκτέλεση σε μεμονωμένους κόμβους όσο και σε container composable nodes, επιτρέποντας μελλοντική επέκταση ή μετάβαση σε διαφορετική υπολογιστική πλατφόρμα.

Η ροή δεδομένων οργανώνεται ως εξής:

SLAM → map → Planner → Controller → Velocity Smoother → Collision Monitor → `cmd_vel`

Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται σαφής ιεραρχική διάταξη μεταξύ σχεδιασμού, ελέγχου και επιπέδου ασφάλειας.

6.6.2 Παγκόσμιος σχεδιασμός διαδρομής

Για τον υπολογισμό της καθολικής διαδρομής επιλέχθηκε ο αλγόριθμος `SmacPlanner2D`, ο οποίος υλοποιεί cost-aware A* αναζήτηση επί του occupancy grid. Η επιλογή αυτή βασίστηκε στα εξής κριτήρια:

- Υποστήριξη άγνωστου χώρου (`allow_unknown=true`),
- Ελεγχόμενος χρόνος σχεδιασμού (`max_planning_time=2s`),
- Ισορροπία μεταξύ ταχύτητας και αποφυγής εμποδίων μέσω `cost_travel_multiplier=2.0`.

Η τελική διαδρομή υφίσταται επιπλέον εξομάλυνση (smoothing) πριν παραδοθεί στον τοπικό ελεγκτή.

6.6.3 Τοπικός έλεγχος κίνησης

Ο τοπικός έλεγχος υλοποιείται μέσω του `DWBLocalPlanner`. Δεδομένου ότι το ρομπότ διαθέτει μηχανισμό κίνησης `mecanum` (ολισθηρή ομοιοκατευθυντική κίνηση), ενεργοποιείται έλεγχος τόσο σε άξονα x όσο και σε άξονα y .

Οι μέγιστες γραμμικές ταχύτητες ορίστηκαν στα 0.08 m/s , ενώ η μέγιστη γωνιακή ταχύτητα στα 0.4 rad/s , τιμές οι οποίες αντανakλούν τα φυσικά όρια των κινητήρων και τη χαμηλή ταχύτητα χαρτογράφησης. Τα όρια επιτάχυνσης ρυθμίστηκαν ώστε να αποφεύγονται απότομες μεταβολές ροπής.

Η αξιολόγηση τροχιών πραγματοποιείται μέσω συνδυασμού critics, με αυξημένο βάρος στη στοίχιση με τη διαδρομή και στον τελικό προσανατολισμό, διατηρώντας ταυτόχρονα έλεγχο απόστασης από εμπόδια μέσω του `ObstacleFootprint critic`.

6.6.4 Costmaps

Το σύστημα χρησιμοποιεί δύο costmaps:

- **Global costmap**, στο frame `map`, για στρατηγικό σχεδιασμό.
- **Local costmap**, στο frame `odom`, με rolling window $3 \times 3 \text{ m}$ για τοπική αποφυγή εμποδίων.

Η ανάλυση ορίστηκε στα 0.05 m ανά κελί. Τα εμπόδια ενημερώνονται από δεδομένα LiDAR μέσω του topic `/ldlidar_node/scan`, το οποίο δηλώνεται ρητά στις παραμέτρους των costmaps ώστε να διασφαλίζεται σαφής και προβλέψιμη ροή δεδομένων.

Το inflation layer ρυθμίστηκε με ακτίνα 0.4 m , δημιουργώντας προοδευτικό δυναμικό πεδίο γύρω από εμπόδια για ομαλότερη τροχιά.

6.6.5 Εξομάλυνση ταχύτητας και επίπεδο ασφάλειας

Μετά τον υπολογισμό της επιθυμητής ταχύτητας από τον controller, τα σήματα διέρχονται από:

1. **Velocity Smoother**, για περιορισμό επιταχύνσεων,
2. **Collision Monitor**, το οποίο λειτουργεί ως ανεξάρτητο επίπεδο ασφάλειας.

Το Collision Monitor χρησιμοποιεί πολυγωνική περιοχή βασισμένη στο footprint του ρομπότ και προβλέπει πιθανή σύγκρουση σε χρονικό ορίζοντα 2 s, επιβάλλοντας περιορισμό ή διακοπή κίνησης εφόσον απαιτείται.

6.6.6 Διαχείριση κύκλου ζωής

Όλοι οι βασικοί κόμβοι του Nav2 λειτουργούν ως lifecycle nodes και ενεργοποιούνται μέσω `nav2_lifecycle_manager`. Η αυτόματη ενεργοποίηση (`autostart=true`) επιτρέπει συνεπή μετάβαση από κατάσταση *unconfigured* σε *active* χωρίς χειροκίνητη παρέμβαση, διασφαλίζοντας καθορισμένη ακολουθία εκκίνησης.

6.6.7 Σχεδιαστική φιλοσοφία παραμετροποίησης

Η παραμετροποίηση του Nav2 στο παρόν σύστημα ακολούθησε τις εξής αρχές:

- Συντηρητικές ταχύτητες για σταθερή χαρτογράφηση.
- Ρητή σύνδεση topics για διαφάνεια στη ροή δεδομένων.
- Διαχωρισμός επιπέδου ελέγχου και επιπέδου ασφάλειας.
- Περιορισμός υπολογιστικής επιβάρυνσης σε πλατφόρμα Raspberry Pi.

Η τελική αρχιτεκτονική προσφέρει ισορροπία μεταξύ ακρίβειας πλοήγησης, σταθερότητας και ασφάλειας, χωρίς υπερβολική υπολογιστική επιβάρυνση.

6.7 Αποσφαλμάτωση

Κατά την ανάπτυξη και ενοποίηση του συστήματος προέκυψαν ζητήματα που σχετίζονταν με ασυμβατότητες μετασχηματισμών, καθυστερήσεις στη ροή δεδομένων, εσφαλμένη παραμετροποίηση κόμβων και αλληλεπιδράσεις μεταξύ των επιμέρους επιπέδων (SLAM, πλοήγηση, έλεγχος κίνησης). Η αντιμετώπιση των δυσκολιών αυτών βασίστηκε σε συστηματική διαδικασία αποσφαλμάτωσης με χρήση εργαλείων του ROS 2.

6.7.1 Έλεγχος τοπολογίας συστήματος

Το εργαλείο `rqt_graph` χρησιμοποιήθηκε για την επαλήθευση της τοπολογίας του συστήματος, επιτρέποντας την οπτική επιβεβαίωση της σύνδεσης μεταξύ publishers και subscribers. Με τον τρόπο αυτό εντοπίστηκαν αστοχίες σε remappings, διπλές δημοσιεύσεις σε topics και μη αναμενόμενες εξαρτήσεις μεταξύ κόμβων.

6.7.2 Ανάλυση ροής δεδομένων

Η καταγραφή δεδομένων μέσω `ros2 bag` επέτρεψε την offline ανάλυση της συμπεριφοράς του συστήματος. Χρησιμοποιήθηκε κυρίως για:

- Έλεγχο χρονικής συνέπειας μεταξύ /odom, /tf και /scan,
- Ανίχνευση καθυστερήσεων ή απώλειας δεδομένων,
- Αναπαραγωγή σεναρίων σφάλματος χωρίς φυσική επανάληψη του πειράματος.

Η δυνατότητα επανάληψης (replay) αποδείχθηκε κρίσιμη για τη σταδιακή ρύθμιση παραμέτρων του Nav2 και του SLAM.

6.7.3 Χρονική και αριθμητική ανάλυση σημάτων

Το εργαλείο `rqt_plot` αξιοποιήθηκε για την απεικόνιση μεταβλητών σε πραγματικό χρόνο, όπως γραμμικές και γωνιακές ταχύτητες, επιτρέποντας τον εντοπισμό ταλαντώσεων, κορεσμού ή απότομων μεταβολών. Η χρήση του συνέβαλε στη ρύθμιση των ορίων επιτάχυνσης και των παραμέτρων εξομάλυνσης ταχύτητας.

6.7.4 Οπτική επαλήθευση γεωμετρικής συνέπειας

Το RViz2 αποτέλεσε βασικό εργαλείο για την επιβεβαίωση:

- Ορθής απεικόνισης του LiDAR,
- Σωστής στοίχισης του occupancy grid,
- Συμβατότητας μεταξύ frames αναφοράς.

Η απεικόνιση των costmaps και της παραγόμενης τροχιάς επέτρεψε τον εντοπισμό ασυνεπειών μεταξύ καθολικού και τοπικού σχεδιασμού.

6.7.5 Έλεγχος μετασχηματισμών

Η δομή του δέντρου μετασχηματισμών ελέγχθηκε μέσω του `tf2_tools` και της απεικόνισης του TF tree. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη μοναδικότητα των μετασχηματισμών `odom → base_link` και `map → odom`, ώστε να αποφευχθούν διπλές δημοσιεύσεις και ασυμβατότητες στο σύστημα εντοπισμού θέσης.

6.7.6 Μεθοδολογική προσέγγιση

Η διαδικασία αποσφαλμάτωσης ακολούθησε επαναληπτική λογική:

1. Απομόνωση υποσυστήματος (π.χ. μόνο LiDAR, μόνο odometry),
2. Επιβεβαίωση ορθής λειτουργίας,
3. Σταδιακή επανένταξη στο πλήρες σύστημα,

4. Επαλήθευση χρονικής και γεωμετρικής συνέπειας.

Η χρήση των παραπάνω εργαλείων επέτρεψε τον εντοπισμό και τη διόρθωση προβλημάτων χωρίς τυχαίες παρεμβάσεις στον κώδικα ή στις παραμέτρους. Η συστηματική αποσφαλμάτωση αποτέλεσε κρίσιμο στάδιο για τη σταθεροποίηση του συστήματος και τη διασφάλιση αναπαραγωγίμης συμπεριφοράς.

Η σταθεροποίηση αυτή αποτέλεσε προϋπόθεση για τη διεξαγωγή αναπαραγώγιμων δοκιμών και για την αξιόπιστη αξιολόγηση της απόδοσης του ρομποτικού συστήματος. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία δοκιμών, τα σενάρια αξιολόγησης και τα ποσοτικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την πειραματική λειτουργία της πλατφόρμας.

Κεφάλαιο 7ο: Δοκιμές και αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειράματα αξιολόγησης της συμπεριφοράς και της απόδοσης του ρομποτικού συστήματος. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε ελεγχόμενο εσωτερικό περιβάλλον και αφορούν τη χαρτογράφηση, την οδομετρία, την πλοήγηση, την ασύρματη επικοινωνία και την ενεργειακή αυτονομία. Στόχος είναι η ποσοτική και ποιοτική αποτίμηση της λειτουργίας του συστήματος και η τεκμηρίωση των επιλογών παραμέτρων που υιοθετήθηκαν.

7.1 Περιβάλλον δοκιμής

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν αποκλειστικά σε εσωτερικό περιβάλλον εργαστηρίου με γνωστή γεωμετρία, σταθερό δάπεδο και μόνιμα δομικά στοιχεία. Όλα τα πειράματα εκτελέστηκαν στο ίδιο είδος εδάφους, χωρίς εναλλαγή επιφανειών, ώστε να αποφεύγεται η επίδραση διαφορών στην πρόσφυση και στην ολίσθηση των τροχών.

Το περιβάλλον περιλάμβανε ευθύγραμμες διαδρομές, γωνίες και περιοχές περιορισμένου πλάτους, επιτρέποντας την αξιολόγηση τόσο της χαρτογράφησης όσο και της πλοήγησης σε ρεαλιστικά σενάρια. Για την οριοθέτηση του χώρου και τη διαμόρφωση ελεγχόμενων διαδρομών χρησιμοποιήθηκαν προσωρινά διαχωριστικά από χαρτόνι.

7.2 Αξιολόγηση χαρτογράφησης

Στην παρούσα ενότητα αξιολογείται η ποιότητα των παραγόμενων χαρτών occupancy grid, με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης παραμέτρων κίνησης και της λειτουργίας του αλγορίθμου SLAM στη γεωμετρική συνέπεια και ακρίβεια της χαρτογράφησης. Η αξιολόγηση βασίστηκε σε συνδυασμό ποιοτικών και ποσοτικών κριτηρίων.

7.2.1 Επίδραση της γραμμικής ταχύτητας

Για τη μελέτη της επίδρασης της γραμμικής ταχύτητας στη διαδικασία χαρτογράφησης πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε εσωτερικό περιβάλλον διαδρόμου, με μήκος περίπου 5 m και μεταβαλλόμενο πλάτος. Το ρομπότ εκτέλεσε το ίδιο μοτίβο κίνησης για τρεις διαφορετικές τιμές ταχύτητας (0.06 m/s, 0.08 m/s και 0.10 m/s). Για κάθε ταχύτητα πραγματοποιήθηκαν δύο επαναλήψεις. Στην παρούσα ανάλυση εξετάζεται αποκλειστικά το πρώτο πέρασμα, ώστε να απομονωθεί η επίδραση της ταχύτητας στη διαδικασία χαρτογράφησης.

Ως ποσοτικός δείκτης ποιότητας χρησιμοποιήθηκε η τυπική απόκλιση των ενδιάμεσων τιμών του occupancy grid (εξαιρουμένων των τιμών 0 και 255), η οποία υπολογίστηκε offline από τα αρχεία .pgm. Ο δείκτης αυτός εκφράζει τη διασπορά των οριακών τιμών μεταξύ ελεύθερου και κατειλημμένου χώρου και συνεπώς τη γεωμετρική καθαρότητα των δομών.

Ο χρόνος χαρτογράφησης παρουσιάζει αντιστρόφως ανάλογη σχέση με την ταχύτητα, προσεγγίζοντας τη θεωρητική σχέση $t = \frac{d}{v}$ για σταθερή διανυόμενη απόσταση. Η συνολική μείωση χρόνου μεταξύ 0.06 m/s και 0.10 m/s ανέρχεται σε περίπου 38.5%.

Πίνακας 7.1: Επίδραση της γραμμικής ταχύτητας στη χαρτογράφηση (πρώτο πέρασμα)

Ταχύτητα [m/s]	Χρόνος [s]	Μέση τυπική απόκλιση	Μεταβολή ποιότητας [%]
0.06	65	17.41	—
0.08	49	18.05	+3.7%
0.10	39	18.58	+6.7%

Η αύξηση της ταχύτητας οδηγεί σε σταδιακή αύξηση της διασποράς των τιμών του occupancy grid. Η μετάβαση από 0.06 m/s σε 0.08 m/s συνοδεύεται από αύξηση περίπου 3.7%, ενώ η συνολική αύξηση μεταξύ 0.06 m/s και 0.10 m/s ανέρχεται σε περίπου 6.7%.

Στο Σχήμα 7.1 απεικονίζεται ο πραγματικός χώρος του πειράματος και δίπλα ο αντίστοιχος παραγόμενος χάρτης για ταχύτητα 0.08 m/s. Παρατηρείται σαφής γεωμετρική αντιστοιχία των δομών και ικανοποιητική καθαρότητα των τοιχωμάτων.



Εικόνα 7.1: Σύγκριση φυσικού χώρου και παραγόμενου χάρτη για ταχύτητα 0.08 m/s.

Παρατηρείται ότι, στο συγκεκριμένο περιβάλλον, η υποβάθμιση της γεωμετρικής καθαρότητας παραμένει περιορισμένη ακόμη και στη μέγιστη δοκιμαζόμενη ταχύτητα. Η ταχύτητα 0.08 m/s επιλέγεται ως βέλτιστος συμβιβασμός μεταξύ ποιότητας και χρόνου εκτέλεσης, καθώς προσφέρει σημαντική επιτάχυνση της διαδικασίας χωρίς ουσιαστική απώλεια γεωμετρικής συνέπειας.

7.2.2 Ακρίβεια χάρτη

Η ακρίβεια του παραγόμενου χάρτη αξιολογήθηκε μέσω μέτρησης σταθερών αποστάσεων στον φυσικό χώρο και σύγκρισης με τις αντίστοιχες μετρήσεις στον χάρτη που δημιουργήθηκε με SLAM και χρησιμοποιήθηκε στο Nav2. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο RViz με το εργαλείο *Measure*, με σημείο αναφοράς το frame `laser_link`.

Εξετάστηκαν δύο χαρακτηριστικές αποστάσεις (1.00 m και 0.25 m), με τέσσερις επαναλήψεις ανά περίπτωση. Από τα δεδομένα υπολογίστηκαν η μέση εκτιμώμενη απόσταση, το απόλυτο σφάλμα και το σχετικό σφάλμα.

Πίνακας 7.2: Ακρίβεια απόστασης χάρτη (SLAM + Nav2)

Πραγμ. απόστ. [m]	Μέση απόστ. [m]	Απόλ. σφάλμα [m]	Σχετ. σφάλμα [%]
1.00	0.9921	0.0079	0.79
0.25	0.2636	0.0136	5.44

Στην περίπτωση της απόστασης 1.00 m, το απόλυτο σφάλμα ανήλθε σε 0.0079 m, με σχετικό σφάλμα 0.79%. Η τιμή αυτή υποδηλώνει υψηλή ακρίβεια αναπαράστασης σε μεσαίες αποστάσεις, επιβεβαιώνοντας την καλή ευθυγράμμιση των δεδομένων LiDAR και την ορθή λειτουργία του αλγορίθμου χαρτογράφησης.

Για μικρότερη απόσταση (0.25 m), το απόλυτο σφάλμα ήταν 0.0136 m, με σχετικό σφάλμα 5.44%. Η αύξηση του σχετικού σφάλματος σε μικρές αποστάσεις είναι αναμενόμενη και αποδίδεται κυρίως στη διακριτοποίηση του χάρτη (map resolution), στη στρογγυλοποίηση συντεταγμένων και στην περιορισμένη ανάλυση των κελιών του occupancy grid.

Συνολικά, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι ο παραγόμενος χάρτης παρουσιάζει πολύ καλή γεωμετρική ακρίβεια σε αποστάσεις της τάξης του ενός μέτρου, ενώ σε μικρότερες κλίμακες η ακρίβεια επηρεάζεται από τη χωρική ανάλυση του πλέγματος.

7.3 Αξιολόγηση οδομετρίας

Η αξιολόγηση της οδομετρίας πραγματοποιήθηκε με βάση τη συγχωνευμένη εκτίμηση θέσης και προσανατολισμού του συστήματος, όπως αυτή δημοσιεύεται στο μήνυμα `/odom`. Η επιλογή αυτή δικαιολογείται από το γεγονός ότι το `/odom` αποτελεί την τελική έξοδο της εκτίμησης κίνησης και χρησιμοποιείται άμεσα από τα ανώτερα επίπεδα χαρτογράφησης και πλοήγησης του ρομποτικού συστήματος.

Όλα τα πειράματα εκτελέστηκαν σε ελεγχόμενο εσωτερικό περιβάλλον και με σταθερή, χαμηλή ταχύτητα κίνησης (0.05 m/s), ώστε να περιοριστούν δυναμικά φαινόμενα όπως ολίσθηση τροχών και απότομες επιταχύνσεις, και να αξιολογηθεί η βασική ακρίβεια της εκτίμησης κίνησης.

7.3.1 Ακρίβεια μετατόπισης θέσης

Η ακρίβεια μετατόπισης θέσης αξιολογήθηκε μέσω ευθύγραμμης και πλευρικής κίνησης του ρομπότ κατά μήκος των αξόνων $+x$, $-x$, $+y$ και $-y$. Σε κάθε περίπτωση, το ρομπότ κινήθηκε σε γνωστή απόσταση ενός μέτρου στον φυσικό χώρο. Για κάθε κατεύθυνση πραγματοποιήθηκαν τρεις επαναλήψεις και η εκτιμώμενη μετατόπιση από το `/odom` συγκρίθηκε με την πραγματική απόσταση, υπολογίζοντας τη μέση τιμή και το αντίστοιχο ποσοστιαίο σφάλμα.

Πίνακας 7.3: Ακρίβεια οδομετρίας συστήματος σε μετατόπιση θέσης

Κατεύθυνση	Πραγμ. απόσταση [m]	Μέση οδομ. απόσταση [m]	Σφάλμα θέσης [m]	Σφάλμα [%]
$+x$	1.0	1.0066	0.0066	0.66
$-x$	1.0	1.0016	0.0016	0.16
$+y$	1.0	1.0730	0.0730	7.30
$-y$	1.0	1.0780	0.0780	7.80

Παρατηρείται ότι η διαμήκης μετατόπιση κατά μήκος του άξονα x παρουσιάζει πολύ μικρό ποσοστιαίο σφάλμα (<1%), γεγονός που υποδηλώνει ικανοποιητική βαθμονόμηση της γεωμετρίας των τροχών και συμμετρική δυναμική απόκριση των κινητήρων κατά την ευθύγραμμη κίνηση. Η απόκλιση παραμένει της τάξης μερικών χιλιοστών ανά μέτρο, ένδειξη σταθερής και επαναλήψιμης συμπεριφοράς της οδομετρικής εκτίμησης στον διαμήκη άξονα.

Αντίθετα, η πλευρική μετατόπιση κατά μήκος του άξονα y εμφανίζει μεγαλύτερο σφάλμα (≈ 7 -8%), το οποίο αποδίδεται στην εγγενή ολίσθηση των τροχών *mecanum* και στη σύνθετη κατανομή δυνάμεων που απαιτείται για την παραγωγή καθαρής εγκάρσιας κίνησης. Η συμπεριφορά αυτή είναι αναμενόμενη σε ολονομικές διατάξεις με κεκλιμένους κυλίνδρους και παραμένει σταθερή και επαναλήψιμη μεταξύ θετικής και αρνητικής κατεύθυνσης, γεγονός που υποδηλώνει συστηματικό και όχι τυχαίο χαρακτήρα του σφάλματος.

7.3.2 Ακρίβεια προσανατολισμού

Η ακρίβεια προσανατολισμού αξιολογήθηκε μέσω ελεγχόμενης περιστροφής του ρομπότ γύρω από τον κατακόρυφο άξονα (z), τόσο στη θετική όσο και στην αρνητική κατεύθυνση. Για κάθε κατεύθυνση πραγματοποιήθηκαν τρεις επαναλήψεις, και το σφάλμα προσανατολισμού υπολογίστηκε ως η διαφορά μεταξύ της επιθυμητής και της εκτιμώμενης γωνιακής μετατόπισης από το `/odom`.

Πίνακας 7.4: Ακρίβεια οδομετρίας συστήματος σε περιστροφή

Κατεύθυνση	Στόχος περιστροφής yaw [rad]	Μέσο σφάλμα yaw [rad]
$+z$		
$-z$		

Η εκτίμηση προσανατολισμού παρουσίασε ομαλή και συνεπή συμπεριφορά, χωρίς απότομες διακυμάνσεις ή μη ρεαλιστικές μεταβολές, καθιστώντας την κατάλληλη για χρήση σε εφαρμογές πλοήγησης.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η συγχωνευμένη εκτίμηση οδομετρίας του συστήματος παρέχει ικανοποιητική ακρίβεια και επαναληψιμότητα σε ελεγχόμενο περιβάλλον, αποτελώντας αξιόπιστη είσοδο για τις διαδικασίες χαρτογράφησης και αυτόνομης πλοήγησης που παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες.

7.4 Αξιολόγηση πλοήγησης

Η απόδοση της πλοήγησης αξιολογήθηκε σε εσωτερικό περιβάλλον με χρήση του Nav2. Πραγματοποιήθηκαν επαναλαμβανόμενες δοκιμές γραμμικής μετατόπισης 1 m και περιστροφής 90° επί τόπου. Καταγράφηκε η τελική θέση από το θέμα /odom και υπολογίστηκε το τελικό σφάλμα ως προς τον επιθυμητό στόχο.

Γραμμική μετατόπιση 1 m

Για στόχο μετατόπισης 1 m κατά τον άξονα x , οι μετρήσεις παρουσίασαν τις ακόλουθες αποκλίσεις:

Πίνακας 7.5: Αποτελέσματα γραμμικής μετατόπισης 1 m

Επανάληψη	Τελικό σφάλμα (m)
1η	0.21
2η	0.24

Το μέσο τελικό σφάλμα υπολογίστηκε σε περίπου $\bar{e} \approx 0.22$ m. Παρατηρήθηκε συστηματική υποπροσέγγιση του στόχου, με το ρομπότ να τερματίζει πριν τη συμπλήρωση του πλήρους μέτρου μετατόπισης. Το αποτέλεσμα αυτό υποδεικνύει ότι ο ελεγκτής πλοήγησης και το κριτήριο τερματισμού (goal checker) επιτρέπουν μεγαλύτερο ανοχή από την επιθυμητή γραμμική ακρίβεια 0.10 m.

Σε δοκιμή οπισθοπορείας σε στενότερο περιβάλλον καταγράφηκε μικρότερο σφάλμα (0.063 m), γεγονός που υποδηλώνει ότι η παρουσία πλευρικών εμποδίων συνεισφέρει σε καλύτερη ευθυγράμμιση και διόρθωση πορείας.

Περιστροφή 90°

Για περιστροφή κατά 90° ($\pi/2$ rad), πραγματοποιήθηκαν τρεις επαναλήψεις.

Πίνακας 7.6: Αποτελέσματα περιστροφής 90°

Επανάληψη	Τελικό yaw (rad)	Σφάλμα (rad)
1η	1.40	0.17
2η	1.38	0.19
3η	1.40	0.17

Το μέσο γωνιακό σφάλμα υπολογίστηκε σε $\bar{\epsilon}_\theta \approx 0.18 \text{ rad}$ ($\approx 10^\circ$). Η απόκλιση εμφανίστηκε επαναλαμβανόμενη και όχι τυχαία, γεγονός που υποδηλώνει συστηματική συμπεριφορά του ελεγκτή ως προς τον τερματισμό της περιστροφής.

Η μετατόπιση κατά την περιστροφή ήταν πρακτικά μηδενική, γεγονός που επιβεβαιώνει ορθή εκτέλεση περιστροφής επί τόπου.

Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι το σύστημα παρουσιάζει καλή επαναληψιμότητα, με σταθερό γραμμικό και γωνιακό σφάλμα. Η γραμμική ακρίβεια σε ανοιχτό χώρο είναι περιορισμένη (22 cm στα 1 m), ενώ η γωνιακή ακρίβεια σταθεροποιείται γύρω στα 0.18 rad.

Η συμπεριφορά αυτή αποδίδεται σε παραμέτρους του τοπικού ελεγκτή (controller server), στα όρια ανοχής του goal checker και στους περιορισμούς ταχύτητας και επιτάχυνσης του συστήματος.

7.5 Αξιολόγηση ασύρματης επικοινωνίας

Η αξιολόγηση της ασύρματης σύνδεσης του ρομποτικού συστήματος πραγματοποιήθηκε μέσω συγκριτικών μετρήσεων της ισχύος σήματος (RSSI) με χρήση της ενσωματωμένης διεπαφής Wi-Fi του Raspberry Pi (wlan0) και ενός εξωτερικού προσαρμογέα USB με κεραία. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο ίδιο σημείο πρόσβασης (φορητός υπολογιστής σε λειτουργία hotspot) και σε τρία διαφορετικά σενάρια:

- Σε μικρή απόσταση από το σημείο πρόσβασης (1 m)
- Σε μεγαλύτερη απόσταση στον ίδιο χώρο
- Σε γειτονικό δωμάτιο με κλειστή πόρτα (παρεμβολή εμποδίου)

Η καταγραφή των τιμών έγινε μέσω του εργαλείου iwconfig, με έμφαση στην ισχύ σήματος (Signal level σε dBm) και στον αριθμό επαναμεταδόσεων (retries).

Πίνακας 7.7: Συγκριτική αξιολόγηση ασύρματης σύνδεσης

Σενάριο	wlan0 (dBm)	USB κεραία (dBm)	Διαφορά (dB)
Κοντά στο router (1 m)	-53	-37	16
Πιο μακριά (ίδιος χώρος)	-49	-41	8
Άλλο δωμάτιο (κλειστή πόρτα)	-64	-49	15

Από τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι η εξωτερική κεραία παρουσιάζει σταθερά υψηλότερη ισχύ λήψης σε όλα τα σενάρια. Η διαφορά μεταξύ των δύο διεπαφών κυμαίνεται από 8 έως 16 dB, με τη μεγαλύτερη απόκλιση να εμφανίζεται σε συνθήκες παρεμβολής (κλειστή πόρτα).

Επιπλέον, στην ενσωματωμένη διεπαφή παρατηρήθηκε αυξημένος αριθμός επαναμεταδόσεων πακέτων σε μεγαλύτερες αποστάσεις, γεγονός που υποδηλώνει μειωμένη αξιοπιστία σύνδεσης. Αντιθέτως, ο εξωτερικός προσαρμογέας με κεραία διατήρησε μηδενικές επαναμεταδόσεις σε όλα τα σενάρια μέτρησης.

Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η χρήση εξωτερικής κεραίας βελτιώνει σημαντικά την αξιοπιστία και τη σταθερότητα της ασύρματης επικοινωνίας, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με εμπόδια, καθιστώντας

την καταλληλότερη επιλογή για απομακρυσμένη διαχείριση και παρακολούθηση του ρομποτικού συστήματος.

7.6 Ενεργειακή αξιολόγηση

Η ενεργειακή αυτονομία του συστήματος αξιολογήθηκε μέσω πειραματικής δοκιμής συνεχούς λειτουργίας υπό συνθήκες μέτριας χρήσης. Το ρομποτικό σύστημα λειτούργησε με ενεργοποιημένους όλους τους βασικούς υπολογιστικούς και αισθητηριακούς υποσυστήματα (Raspberry Pi, LiDAR, ελεγκτή κινητήρων και κινητήρες), εκτελώντας κίνηση χαμηλής έως μέσης ταχύτητας σε εσωτερικό χώρο.

Η διάρκεια λειτουργίας από πλήρη φόρτιση έως το όριο ασφαλούς εκφόρτισης της μπαταρίας ανήλθε σε περίπου 3 ώρες συνεχούς λειτουργίας. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε ρεαλιστικό σενάριο αυτόνομης πλοήγησης και μπορεί να διαφοροποιηθεί σε περιπτώσεις έντονων επιταχύνσεων ή αυξημένου υπολογιστικού φορτίου.

7.7 Περιορισμοί και διορθώσεις

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων παρατηρήθηκαν περιορισμοί που σχετίζονται κυρίως με τη χωρική ανάλυση του occupancy grid, τη συσσώρευση σφάλματος οδομετρίας και την επίδραση της ταχύτητας κίνησης στην ποιότητα χαρτογράφησης. Οι παρατηρήσεις αυτές αξιοποιήθηκαν για τη βελτίωση της συνολικής συμπεριφοράς του συστήματος και την επιλογή κατάλληλων παραμέτρων λειτουργίας.

Κεφάλαιο 8ο: Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης

8.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως αντικείμενο τον σχεδιασμό, την κατασκευή και την υλοποίηση μίας αρθρωτής, πανκατευθυντικής ρομποτικής πλατφόρμας εδάφους, βασισμένης σε Raspberry Pi 5 και ROS 2, με στόχο την αυτόνομη χαρτογράφηση και πλοήγηση σε εσωτερικούς χώρους.

Η ανάπτυξη του συστήματος κάλυψε όλα τα βασικά επίπεδα ενός σύγχρονου κινητού ρομπότ: μηχανικό σχεδιασμό και τρισδιάστατη εκτύπωση του πλαισίου, υλοποίηση συστήματος ισχύος, ενσωμάτωση κινητήρων με ανατροφοδότηση από κωδικοποιητές, διασύνδεση LiDAR αισθητήρα, συγχώνευση αισθητηριακών δεδομένων μέσω φίλτρου EKF και πλήρη αξιοποίηση του οικοσυστήματος ROS 2 για χαρτογράφηση (SLAM Toolbox) και πλοήγηση (Navigation2).

Η πειραματική αξιολόγηση έδειξε ότι η πλατφόρμα μπορεί να παράγει συνεκτικούς χάρτες εσωτερικών χώρων, να εκτελεί αξιόπιστη εντοπισμό θέσης και να ακολουθεί προγραμματισμένες τροχιές με ικανοποιητική ακρίβεια για την κλίμακα και την κατηγορία του συστήματος. Η χρήση mecanum τροχών παρείχε αυξημένη ευελιξία κίνησης, επιβεβαιώνοντας τα θεωρητικά πλεονεκτήματα της πανκατευθυντικής κινηματικής, ενώ παράλληλα ανέδειξε τους περιορισμούς που σχετίζονται με την ολίσθηση και τη συσσώρευση σφαλμάτων οδομετρίας.

Η αρχιτεκτονική ROS 2, σε συνδυασμό με το αποκεντρωμένο μοντέλο επικοινωνίας και τις δυνατότητες QoS του DDS, επέτρεψε τη σαφή οργάνωση του λογισμικού σε κόμβους, topics, services και actions, διασφαλίζοντας επεκτασιμότητα και διαχωρισμό λειτουργιών. Η ενσωμάτωση του Nav2 κατέδειξε τη σημασία της ιεραρχικής αρχιτεκτονικής (planner–controller–behavior layer) και των costmaps ως ενδιάμεσης αναπαράστασης του περιβάλλοντος.

Συνολικά, αποδείχθηκε ότι είναι εφικτή η υλοποίηση ενός πλήρους αυτόνομου ρομποτικού συστήματος χαμηλού κόστους, με σύγχρονες τεχνολογίες ανοιχτού κώδικα, το οποίο μπορεί να αποτελέσει βάση για ερευνητική ή εφαρμοσμένη περαιτέρω ανάπτυξη.

8.2 Προτάσεις βελτίωσης και μελλοντική εργασία

Παρότι το σύστημα επιτυγχάνει τους βασικούς στόχους του, υπάρχουν πολλαπλές δυνατότητες τεχνικής και λειτουργικής αναβάθμισης.

Σε επίπεδο κινηματικής και ελέγχου, θα μπορούσε να διερευνηθεί η εφαρμογή πιο προηγμένων αλγορίθμων ελέγχου ταχύτητας και τροχιάς, καθώς και η συστηματική παραμετροποίηση ελεγκτών όπως ο MPPI για βελτιωμένη απόκριση σε δυναμικά περιβάλλοντα. Παράλληλα, η λεπτομερέστερη μοντελοποίηση της ολίσθησης των mecanum τροχών θα μπορούσε να μειώσει το σφάλμα οδομετρίας.

Σε επίπεδο εντοπισμού, η αξιοποίηση πρόσθετων αισθητήρων (π.χ. κάμερα βάθους) και η εφαρμογή πιο σύνθετων τεχνικών συγχώνευσης δεδομένων ενδέχεται να βελτιώσουν την ακρίβεια και τη σταθερότητα της εκτίμησης κατάστασης, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με περιορισμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

Στο πεδίο της πλοήγησης, η αξιολόγηση εναλλακτικών global planners και local controllers, καθώς και η μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων costmap (inflation, resolution, footprint) στην τελική συμπεριφορά του ρομπότ, αποτελούν πεδία περαιτέρω έρευνας. Επιπλέον, η ενσωμάτωση πλήρους αυτόνομης εξερεύνησης με benchmarking και μετρήσιμα κριτήρια απόδοσης θα μπορούσε να ενισχύσει τη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων.

Τέλος, από μηχανολογικής πλευράς, βελτιστοποιήσεις στο σύστημα ισχύος, στην κατανομή μάζας και στην ακαμψία του πλαισίου θα μπορούσαν να αυξήσουν τη σταθερότητα και την ενεργειακή απόδοση της πλατφόρμας.

Η πλατφόρμα που αναπτύχθηκε αποτελεί ένα λειτουργικό και επεκτάσιμο ερευνητικό υπόβαθρο, πάνω στο οποίο μπορούν να δοκιμαστούν αλγόριθμοι, αρχιτεκτονικές και τεχνικές αυτόνομης πλοήγησης, συμβάλλοντας τόσο στην εκπαιδευτική διαδικασία όσο και στη μελλοντική ερευνητική δραστηριότητα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] T. K. Lien, “Robot,” in *CIRP Encyclopedia of Production Engineering* (The International Academy For Production Engineering, ed.), pp. 1–2, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018.

- [2] M. J. Matari c, *The Robotics Primer*. Intelligent Robotics and Autonomous Agents Series, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2007.
- [3] K. Mamak, T. Kokkonen, R. Hakli, and P. M kel , “Robot Kingdom: On the Difficulty of Finding the Definition of Robots,” *International Journal of Social Robotics*, vol. 17, pp. 2743–2753, Nov. 2025.
- [4] M. Fezari, A. Al-Dahoud, and A. El-Dahoud, “Robots evolution: From fiction to reality.” ResearchGate, 2024.
- [5] A. Gasparetto and L. Scalera, “A Brief History of Industrial Robotics in the 20th Century,” *Advances in Historical Studies*, vol. 08, no. 01, p. 26, 2019.
- [6] B. Kuipers, E. A. Feigenbaum, P. E. Hart, and N. J. Nilsson, “Shakey: From Conception to History,” *AI Magazine*, vol. 38, pp. 88–92, Mar. 2017.
- [7] C. Mineo, “Advancements in integrated robotic sensing: A European perspective,” *Open Research Europe*, vol. 4, p. 4, July 2024.
- [8] Y. Liu, X. Wu, Y. Sang, C. Zhao, Y. Wang, B. Shi, and Y. Fan, “Evolution of Surgical Robot Systems Enhanced by Artificial Intelligence: A Review,” *Advanced Intelligent Systems*, vol. 6, p. 2300268, May 2024.
- [9] S. Singh, R. Vaishnav, S. Gautam, and S. Banerjee, “Agricultural Robotics: A Comprehensive Review of Applications, Challenges and Future Prospects,” in *2024 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Machine Learning Applications Theme: Healthcare and Internet of Things (AIMLA)*, (Namakkal, India), pp. 1–8, IEEE, Mar. 2024.
- [10] M. R. Barbosa J nior, R. G. D. Santos, L. D. A. Sales, and L. P. D. Oliveira, “Advancements in Agricultural Ground Robots for Specialty Crops: An Overview of Innovations, Challenges, and Prospects,” *Plants*, vol. 13, p. 3372, Nov. 2024.
- [11] S. Raychaudhuri and A. X. Chang, “Semantic Mapping in Indoor Embodied AI – A Survey on Advances, Challenges, and Future Directions,” Aug. 2025.
- [12] Z. Gu, J. Li, W. Shen, W. Yu, Z. Xie, S. McCrory, X. Cheng, A. Shamsah, R. Griffin, C. K. Liu, A. Kheddar, X. B. Peng, Y. Zhu, G. Shi, Q. Nguyen, G. Cheng, H. Gao, and Y. Zhao, “Humanoid Locomotion and Manipulation: Current Progress and Challenges in Control, Planning, and Learning,” Apr. 2025.
- [13] P. Laiti, “NVIDIA Isaac Lab: Structure, Capabilities and Limitations for Machine Learning,” 2025.
- [14] A. Mazumder, M. Sahed, Z. Tasneem, P. Das, F. Badal, M. Ali, M. Ahamed, S. Abhi, S. Sarker, S. Das, M. Hasan, M. Islam, and M. Islam, “Towards next generation digital twin in robotics: Trends, scopes, challenges, and future,” *Heliyon*, vol. 9, p. e13359, Feb. 2023.
- [15] X. Wang, R. Wei, Z. Chen, H. Pang, H. Li, Y. Yang, Q. Hua, and G. Shen, “Bioinspired Intelligent Soft Robotics: From Multidisciplinary Integration to Next-Generation Intelligence,” *Advanced Science*, vol. 12, p. e06296, Aug. 2025.

- [16] U. Jahn, D. Heß, M. Stampa, A. Sutorma, C. Röhrig, P. Schulz, and C. Wolff, “A Taxonomy for Mobile Robots: Types, Applications, Capabilities, Implementations, Requirements, and Challenges,” *Robotics*, vol. 9, p. 109, Dec. 2020.
- [17] M. Ben-Ari and F. Mondada, *Elements of Robotics*. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- [18] A. Malinowski and H. Yu, “Comparison of Embedded System Design for Industrial Applications,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 7, pp. 244–254, May 2011.
- [19] M. Samiullah, M. Z. Irfan, and A. Rafique, “Microcontrollers: A Comprehensive Overview and Comparative Analysis of Diverse Types,” Sept. 2023.
- [20] I. Katsea-Sarantou, M. Papoutsidakis, and W. Lee, “HIGH VERSATILITY - LOW COST μ CONTROLLER’S COMPARISON GUIDE,” *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, vol. 04, pp. 425–437, 10 2019.
- [21] Embedded Wala, “Microcontroller vs microprocessor.” <https://embeddedwala.com/blogs/embeddedsystem/microcontroller-vs-microprocessor>, 2024. Προσπελάστηκε: 5 Jan. 2026.
- [22] A. Radovici and I. Culic, *Getting Started with Secure Embedded Systems: Developing IoT Systems for Micro:Bit and Raspberry Pi Pico Using Rust and Tock*. Berkeley, CA: Apress, 2022.
- [23] A. Zuiev, V. Krylova, A. Hapon, and S. Honcharov, “Research of microprocessor device and software for remote control of a robotic system,” *Technology audit and production reserves*, vol. 1, pp. 31–37, Jan. 2024.
- [24] C. Cipriani, M. Controzzi, F. Vecchi, and M. C. Carrozza, “Embedded Hardware Architecture Based on Microcontrollers for the Action and Perception of a Transradial Prosthesis,” in *2008 2nd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, (Scottsdale, AZ), pp. 848–853, IEEE, Oct. 2008.
- [25] E. Montanez and A. Mastronardi, “Microcontrollers In Education: Embedded Control – Everywhere And Everyday,” in *2005 Annual Conference Proceedings*, (Portland, Oregon), pp. 10.938.1–10.938.10, ASEE Conferences, June 2005.
- [26] Y. Gao, S. Fallah, Y. Jin, and C. Lekakou, eds., *Towards Autonomous Robotic Systems: 18th Annual Conference, TAROS 2017, Guildford, UK, July 19–21, 2017, Proceedings*, vol. 10454 of *Lecture Notes in Computer Science*. Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [27] M. Fezari, Ali-Al-Dahoud, M. T. Gossa, M. A. Bensaid, and A. Al-Dahoud, “Exploring sbc with kinect and machine learning for indoor mobile robot design and monitoring,” in *2025 12th International Conference on Information Technology (ICIT)*, pp. 272–276, 2025.
- [28] Raspberry Pi Foundation, “Raspberry pi 5 product page.” <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-5/>, 2025. Προσπελάστηκε: 4 Jan. 2026.
- [29] Banana Pi, “Banana pi bpi-m5 single board computer.” https://wiki.banana-pi.org/Banana_Pi_BPI-M5, 2024. Προσπελάστηκε: 4 Jan. 2026.

- [30] Orange Pi, “Orange pi 5 single board computer.” <http://www.orangepi.org/html/hardWare/computerAndMicrocontrollers/details/Orange-Pi-5.html>, 2025. Προσπελάστηκε: 4 Jan. 2026.
- [31] Waveshare Electronics, “Esp32-c6-dev-kit-n8 development board.” <https://www.waveshare.com/wiki/ESP32-C6-DEV-KIT-N8>, 2025. Προσπελάστηκε: 4 Jan. 2026.
- [32] ASUS, “Asus nuc 13 pro mini pc.” <https://www.asus.com/displays-desktops/nucs/nuc-mini-pcs/asus-nuc-13-pro/>, 2025. Προσπελάστηκε: 4 Jan. 2026.
- [33] NEXCOM International Co., Ltd., “Rcb 600 industrial robot controller.” <https://www.nexcom.com/Products/iot-automation-solutions/machine-automation/industrial-robot-controller/industrial-robot-controller-rcb-600>, 2025. Προσπελάστηκε: 4 Jan. 2026.
- [34] E. Ariodito Hermanto, “Comparative analysis of npu-accelerated edge computing platforms for object detection model implementation,” 2025.
- [35] T. Sipola, J. Alatalo, T. Kokkonen, and M. Rantonen, “Artificial Intelligence in the IoT Era: A Review of Edge AI Hardware and Software,” in *2022 31st Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*, (Helsinki, Finland), pp. 320–331, IEEE, Apr. 2022.
- [36] U. Jahn, C. Wolff, and P. Schulz, “Concepts of a Modular System Architecture for Distributed Robotic Systems,” *Computers*, vol. 8, p. 25, Mar. 2019.
- [37] B. Siciliano and O. Khatib, *Springer Handbook of Robotics*. Berlin: Springer, 2008.
- [38] S. Kumari, G. Rathi, P. Attri, and M. Kumar, “Types of Sensors and Their Applications,” *International Journal of Engineering Research and Development*, vol. 10, no. 4, p. 72, 2014.
- [39] S. Kumar, “A Brief Review on Unmanned Combat Aerial Vehicle (U.C.A.V),” *SSRN Electronic Journal*, 2020.
- [40] R. Bischoff and V. Graefe, “HERMES - a versatile personal robotic assistant,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 92, pp. 1759–1779, Nov. 2004.
- [41] A. Attanasio, B. Scaglioni, E. De Momi, P. Fiorini, and P. Valdastri, “Autonomy in Surgical Robotics,” *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, vol. 4, pp. 651–679, May 2021.
- [42] T. B. Sheridan and W. L. Verplank, “Human and Computer Control of Undersea Teleoperators;,” tech. rep., Defense Technical Information Center, Fort Belvoir, VA, July 1978.
- [43] R. Parasuraman, T. Sheridan, and C. Wickens, “A model for types and levels of human interaction with automation,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, vol. 30, pp. 286–297, May 2000.
- [44] M. R. Endsley, “From Here to Autonomy: Lessons Learned From Human–Automation Research,” *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, vol. 59, pp. 5–27, Feb. 2017.

- [45] S. Kim, J. R. Anthis, and S. Sebo, “A Taxonomy of Robot Autonomy for Human-Robot Interaction,” in *Proceedings of the 2024 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, (Boulder CO USA), pp. 381–393, ACM, Mar. 2024.
- [46] W. Li, J. Wu, G. Yang, B. Wang, Q. Zhang, Y. Wu, and J. Tan, “Humanoid robots: Progress, challenges, and future research directions,” *Science China Information Sciences*, vol. 68, pp. 2–3, Nov. 2025.
- [47] J. Johnson, C. Wolmar, E. Andersen, M. Valdez, and A. Odlyzko, “Driverless Vehicles: A Case Study in Applied Artificial Intelligence,” *artificial intelligence*, 2025.
- [48] A. Guerra, F. Parisi, and D. Pi, “Liability for robots I: Legal challenges,” *Journal of Institutional Economics*, pp. 1–13, Nov. 2021.
- [49] P. Corke, W. Jachimeczyk, and R. Pillat, *Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB®*, vol. 147 of *Springer Tracts in Advanced Robotics*. Cham: Springer International Publishing, 2023.
- [50] F. Rubio, F. Valero, and C. Llopis-Albert, “A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 16, p. 1729881419839596, Mar. 2019.
- [51] I. Ullah, D. Adhikari, H. Khan, M. S. Anwar, S. Ahmad, and X. Bai, “Mobile robot localization: Current challenges and future prospective,” *Computer Science Review*, vol. 53, p. 100651, 2024.
- [52] M. He, X. Yue, Y. Zheng, J. Chen, S. Wu, Z. Heng, X. Zhou, and Y. Cai, “State of the art and future trends in obstacle-surmounting unmanned ground vehicle configuration and dynamics,” *Robotica*, vol. 41, pp. 2625–2647, Sept. 2023.
- [53] A. Farella, F. Paciolla, T. Quartarella, and S. Pascuzzi, “Agricultural unmanned ground vehicle (ugv): a brief overview,” in *International Symposium on Farm Machinery and Processes Management in Sustainable Agriculture*, pp. 137–146, Springer, 2024.
- [54] T. Lackner, J. Hermann, C. Kuhn, and D. Palm, “Review of autonomous mobile robots in intralogistics: State-of-the-art, limitations and research gaps,” vol. 130, pp. 930–935.
- [55] Analog Devices Inc., “Finding the right fit for your industrial automation need – agvs or amrs,” 2024. Industry article, Προσπελάστηκε 2024.
- [56] G. Campion, G. Bastin, and B. Dandrea-Novel, “Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots,” *IEEE transactions on robotics and automation*, vol. 12, no. 1, pp. 47–62, 1996.
- [57] L. Tagliavini, G. Colucci, A. Botta, P. Cavallone, L. Baglieri, and G. Quaglia, “Wheeled Mobile Robots: State of the Art Overview and Kinematic Comparison Among Three Omnidirectional Locomotion Strategies,” vol. 106, no. 3, p. 57.
- [58] A. Eren and H. Doğan, “Design and implementation of a cost effective vacuum cleaner robot,” vol. 6, no. 2, pp. 166–177.

- [59] J. Batlle and A. Barjau, "Holonomy in mobile robots," vol. 57, no. 4, pp. 433–440.
- [60] F. Ma, J. Shi, Y. Yang, J. Li, and K. Dai, "ACK-MSCKF: Tightly-Coupled Ackermann Multi-State Constraint Kalman Filter for Autonomous Vehicle Localization," vol. 19, no. 21, p. 4816.
- [61] M. Hijikata, R. Miyagusuku, and K. Ozaki, "Wheel Arrangement of Four Omni Wheel Mobile Robot for Compactness," vol. 12, no. 12, p. 5798.
- [62] M. Jafari, "Get rolling with omni-directional wheels." <https://www.servomagazine.com/magazine/article/get-rolling-with-omni-directional-wheels>, 2019. Προσπελάστηκε: 14 Φεβρουαρίου 2026.
- [63] N. Tlale and M. De Villiers, "Kinematics and Dynamics Modelling of a Mecanum Wheeled Mobile Platform," in *2008 15th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice*, pp. 657–662, IEEE.
- [64] A. Gferrer, "Geometry and kinematics of the Mecanum wheel," vol. 25, no. 9, pp. 784–791.
- [65] S. Soni, T. Mistry, and J. Hanath, "Experimental analysis of mecanum wheel and omni wheel," *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, vol. 1, no. 3, pp. 292–295, 2014.
- [66] M. Haniff, H. M. Saputra, E. A. Zaki Hamidi, C. H. A. Baskoro, and S. A. Pratama, "Design and Control of Swerve Drive Mechanism for Autonomous Mobile Robot," in *2022 16th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA)*, pp. 1–6, IEEE.
- [67] Abhinav, "Using inverse kinematics to become a master swerver," 2023. Προσπελάστηκε: 2026-2-14.
- [68] E. H. Binugroho, A. Setiawan, Y. Sadewa, P. H. Amrulloh, K. Paramasastra, and R. W. Sudibyo, "Position and Orientation Control of Three Wheels Swerve Drive Mobile Robot Platform," in *2021 International Electronics Symposium (IES)*, pp. 669–674, IEEE.
- [69] A. El-Shenawy, "Motion control of holonomic wheeled mobile robot with modular actuation," *None*, 2010.
- [70] U. Kumar and N. Sukavanam, "Dynamic modeling and tracking control of a four wheeled nonholonomic mobile robot," in *Proceedings of 13th National Conference on Mechanics and Machines*, pp. 127–134, 2007.
- [71] B. Joshi, R. Shrestha, and R. Chaudhar, "Modeling, simulation and implementation of brushed dc motor speed control using optical incremental encoder feedback," in *Proceedings of IOE graduate conference*, pp. 497–505, sn, 2014.
- [72] T. Özer, S. Kivrak, and Y. Oğuz, "H bridge dc motor driver design and implementation with using dspic30f4011," *IJERSET Int. J. Innovative Res. Sci. Eng. Technol*, vol. 57, 2017.
- [73] S. Ahmed, A. A. Amin, Z. Wajid, and F. Ahmad, "Reliable speed control of a permanent magnet DC motor using fault-tolerant H-bridge," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 12, p. 1687814020970311, Oct. 2020.

- [74] Øyvind Nydal Dahl, “What is an h-bridge?,” 2018. Προσπελάστηκε: 2026-2-15.
- [75] H. T. Mechatronics, “Arduino dc motor control tutorial - 1298n pwm h-bridge,” n.d. Προσπελάστηκε: 2026-2-15.
- [76] J. Z. Kolter, C. Plagemann, D. T. Jackson, A. Y. Ng, and S. Thrun, “A probabilistic approach to mixed open-loop and closed-loop control, with application to extreme autonomous driving,” in *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (Anchorage, AK), pp. 839–845, IEEE, May 2010.
- [77] G. B. Alleman, “Is there an underlying theory of software project management,” *A critique of the transformational and normative views of project management*, p. 12, 2004.
- [78] C. Myint and N. N. Win, “Position and velocity control for two-wheel differential drive mobile robot,” *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*, vol. 5, no. 9, pp. 2849–2855, 2016.
- [79] S. K. Manoharan, D. Raghavan, R. K. Megalingam, P. Parakat, and S. K. Sudheesh, “Fine Tuning Mobility: PID Driven Velocity Control Optimization for Two Wheel Differential Drive Robot,” in *2024 Parul International Conference on Engineering and Technology (PICET)*, (Vadodara, India), pp. 1–6, IEEE, May 2024.
- [80] J. W. Park, H. X. Nguyen, T. N.-C. Tran, and J. W. Jeon, “A Linear Compensation Method for Improving the Accuracy of an Absolute Multipolar Magnetic Encoder,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 19127–19138, 2021.
- [81] A. Ellin and G. Dolsak, “The design and application of rotary encoders,” *Sensor Review*, vol. 28, pp. 150–158, Mar. 2008.
- [82] S. A. Hamoodi, R. A. Mohammed, and B. M. Salih, “Dc motor speed control using pid controller implementation by simulink and practical,” *International Journal of Electrical Engineering. ISSN*, pp. 0974–2158, 2018.
- [83] M. Kanamori, T. Kurahashi, and M. Noguchi, “Optimization of dynamic anti-windup for non-linear robot systems with actuator saturation,” in *2017 International Automatic Control Conference (CACs)*, pp. 1–6, IEEE.
- [84] J. Hernandez-Barragan, J. D. Rios, A. Y. Alanis, C. Lopez-Franco, J. Gomez-Avila, and N. Arana-Daniel, “Adaptive Single Neuron Anti-Windup PID Controller Based on the Extended Kalman Filter Algorithm,” vol. 9, no. 4, p. 636.
- [85] C. S. Gohiya, S. S. Sadistap, S. A. Akbar, and B. A. Botre, “Design and development of digital PID controller for DC motor drive system using embedded platform for mobile robot,” in *2013 3rd IEEE International Advance Computing Conference (IACC)*, pp. 52–55, IEEE.
- [86] A. A. Housein, G. Xingyu, W. Li, and Y. Huang, “Extended Kalman Filter Sensor Fusion in Practice for Mobile Robot Localization,” vol. 13, no. 2.
- [87] Y. Lu and H. R. Karimi, “Recursive fusion estimation for mobile robot localization under multiple energy harvesting sensors,” vol. 16, no. 1, pp. 20–30.

- [88] H. Zhu and Q. Luo, “Indoor Localization of Mobile Robots Based on the Fusion of an Improved AMCL Algorithm and a Collision Algorithm,” vol. 12, pp. 67199–67208.
- [89] B. Gerkey, “Why ros 2?.” https://design.ros2.org/articles/why_ros2.html, 2014. Προσπελάστηκε: 2026-2-18.
- [90] A. S. Al-Batati, A. Koubaa, and M. Abdelkader, “ROS 2 Key Challenges and Advances: A Survey of ROS 2 Research, Libraries, and Applications,” Oct. 2024.
- [91] S. Macenski, T. Foote, B. Gerkey, C. Lalancette, and W. Woodall, “Robot Operating System 2: Design, Architecture, and Uses In The Wild,” *Science Robotics*, vol. 7, p. eabm6074, May 2022.
- [92] A. Koubaa, ed., *Robot Operating System (ROS): The Complete Reference (Volume 7)*, vol. 1051 of *Studies in Computational Intelligence*. Springer International Publishing.
- [93] S. Paul, D. Lephuoc, and M. Hauswirth, “Performance Evaluation of ROS2-DDS middleware implementations facilitating Cooperative Driving in Autonomous Vehicle,” Dec. 2024.
- [94] A. Koubaa, ed., *Robot Operating System (ROS): The Complete Reference (Volume 5)*, vol. 895 of *Studies in Computational Intelligence*. Cham: Springer International Publishing, 2021.
- [95] Y. Maruyama, S. Kato, and T. Azumi, “Exploring the performance of ROS2,” in *Proceedings of the 13th International Conference on Embedded Software*, (Pittsburgh Pennsylvania), pp. 1–10, ACM, Oct. 2016.
- [96] Yahboom Technology, “Ros robot control board v3.0.” <https://www.yahboom.net/study/ROS-Driver-Board>, 2025. Πρόσβαση στις εικόνες και βασικές πληροφορίες προϊόντος.
- [97] STMicroelectronics, *STM32F103xC, STM32F103xD, STM32F103xE High-Density Performance Line ARM-Based 32-bit MCU*. STMicroelectronics, rev. 12 ed., Nov. 2015.
- [98] AMtek Semiconductors, *AM2857: One Channel H-Bridge Power Driver*. AMtek Semiconductors, v0.7 ed., Sept. 2018.
- [99] Grobotronics, “Rocker switch round with green led,” 2024. Προσπελάστηκε: 2026-01-23.
- [100] Raspberry Pi Ltd, *Raspberry Pi 5: Product Brief*. Raspberry Pi Ltd, Dec. 2025.
- [101] Raspberry Pi Ltd, *Raspberry Pi Active Cooler for Raspberry Pi 5: Product Brief*. Raspberry Pi Ltd, Apr. 2024.
- [102] Raspberry Pi Ltd, *Raspberry Pi SSD Kit: Product Brief*. Raspberry Pi Ltd, Oct. 2024.
- [103] M. M. Rahman, F. Khatun, I. Jahan, R. Devnath, and M. A.-A. Bhuiyan, “Cobotics: The Evolving Roles and Prospects of Next-Generation Collaborative Robots in Industry 5.0,” *Journal of Robotics*, vol. 2024, p. 2918089, Jan. 2024.
- [104] J. A. Adams, J. Scholtz, and A. Sciarretta, “Human–Robot Teaming Challenges for the Military and First Response,” *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, vol. 7, pp. 149–173, July 2024.

- [105] W. Chen, W. Chi, S. Ji, H. Ye, J. Liu, Y. Jia, J. Yu, and J. Cheng, “A survey of autonomous robots and multi-robot navigation: Perception, planning and collaboration,” *Biomimetic Intelligence and Robotics*, vol. 5, p. 100203, June 2025.
- [106] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, and G. Oriolo, *Robotics. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing*, London: Springer London, 2009.
- [107] BYJU’S, “Types of motors and their practical application in real life.”
- [108] D. Hercog, *Communication Protocols: Principles, Methods and Specifications*. Springer International Publishing, 2020.
- [109] E. Peña and M. G. Legaspi, “UART: A Hardware Communication Protocol Understanding Universal Asynchronous Receiver/Transmitter,” *Analog Dialogue*, vol. 54, no. 4, pp. 1–5, 2020.
- [110] A. Subero, *Programming PIC Microcontrollers with XC8: Mastering Classical Embedded Design*. New York, USA: Apress, second edition ed., 2024.
- [111] F. Leens, “An introduction to i²c and spi protocols,” *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 12, no. 1, pp. 8–13, 2009.
- [112] National Instruments, “Controller area network (can) overview,” 2025. [Προσπελάστηκε: 26-Aug-2025].
- [113] NextPCB, “Spi vs. i2c vs. uart: Differences between these communication interfaces,” Nov. 2022. [Προσπελάστηκε: 26-Aug-2025].
- [114] J. Postel, “Transmission control protocol.” RFC 793, Internet Engineering Task Force, Sep 1981.
- [115] J. Postel, “User datagram protocol.” RFC 768, Internet Engineering Task Force, Aug 1980.
- [116] G. Pardo-Castellote, “Omg data-distribution service: architectural overview,” in *Proc. 23rd IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW)*, pp. 200–206, 2003.
- [117] D. Thangavel, X. Ma, A. Valera, H. Tan, and C. K. Tan, “Performance evaluation of MQTT and CoAP via a common middleware,” in *Proc. 2014 IEEE Ninth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP)*, pp. 1–6, 2014.
- [118] “IEEE std 802.11-2020: Wireless lan mac and phy specifications,” Feb 2021. Revision of IEEE Std 802.11-2016.
- [119] N. Mahmood, R. Exel, E. Uhlemann, *et al.*, “Time-sensitive networking for robotics: A review and case for convergence with 5g,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 166489–166512, 2021.
- [120] E. Team, “Dds and mqtt: Basics, challenges and integration benefits.” <https://www.emqx.com/en/blog/navigating-dds-basics-limitations-and-integration-with-mqtt>, Aug. 2024. Προσπελάστηκε: 2025-08-20.
- [121] J. Majumdar, “Kinematics, localization and control of differential drive mobile robot,” *Global Journal of Research In Engineering*, 2014.

- [122] C. De Giorgi, D. De Palma, and G. Parlangeli, “Online Odometry Calibration for Differential Drive Mobile Robots in Low Traction Conditions with Slippage,” vol. 13, no. 1, p. 7.
- [123] J. Hrbacek, T. Ripel, and J. Krejsa, “Ackermann mobile robot chassis with independent rear wheel drives,” in *Proceedings of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2010*, p. 5606853, IEEE.
- [124] D. A. . Robotics, “Zoei – an omnidirectional autonomous mobile robot (amr),” 2024. Προσπελάστηκε: 14 Φεβρουαρίου 2026.
- [125] G. M. Smith, “Measuring RPM, Angle, and Speed Using Digital, Encoder and Counter Sensors.” <https://dewesoft.com/blog/measure-digital-encoder-and-counter-sensors>, Feb. 2023. Προσπελάστηκε: 2025-09-04.
- [126] S. Macenski and I. Jambrecic, “Slam toolbox: Slam for the dynamic world,” *Journal of Open Source Software*, vol. 6, no. 61, p. 2783, 2021.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Επεξεργασία πρωτογενών δεδομένων LiDAR

Στο παρόν παράρτημα παρουσιάζονται βασικές συναρτήσεις του οδηγού συσκευής του αισθητήρα LiDAR, οι οποίες υλοποιούν την ανάλυση του πρωτοκόλλου επικοινωνίας, τη μετατροπή πακέτων σε μετρήσεις σημείων και τη σύνθεση πλήρους περιστροφής 360°.

```
1 // Parse incoming byte stream and detect a valid LiDAR packet
2 bool LiPkg::AnalysisOne(uint8_t byte)
3 {
4     // Packet parsing state machine
5     static enum
6     {
7         HEADER, // Waiting for packet header
8         VER_LEN, // Waiting for version/length byte
9         DATA,   // Receiving packet payload
10    } state = HEADER;
11
12    // Byte counter within the packet
13    static uint16_t count = 0;
14
15    // Temporary buffer for packet assembly
16    static uint8_t tmp[128] = {0};
17
18    // Expected packet size
19    static uint16_t pkg_count = sizeof(LiDARFrameTypeDef);
20
21    switch (state) {
22
23        case HEADER:
24            // Detect packet header byte
25            if (byte == PKG_HEADER) {
26                tmp[count++] = byte;
27                state = VER_LEN;
28            }
29            break;
30
31        case VER_LEN:
32            // Validate version/length field
33            if (byte == PKG_VER_LEN) {
34                tmp[count++] = byte;
35                state = DATA;
36            } else {
37                // Invalid packet, reset state machine
38                state = HEADER;
39                count = 0;
40                return false;
41            }
42            break;
```

```

43
44 case DATA:
45     // Accumulate packet data
46     tmp[count++] = byte;
47
48     // Check if full packet has been received
49     if (count >= pkg_count) {
50
51         // Copy assembled data into packet structure
52         memcpy((uint8_t *)&pkg_, tmp, pkg_count);
53
54         // Compute CRC over packet (excluding CRC byte)
55         uint8_t crc = CalCRC8((uint8_t *)&pkg_, pkg_count - 1);
56
57         // Reset state machine for next packet
58         state = HEADER;
59         count = 0;
60
61         // Validate packet integrity
62         if (crc == pkg_.crc8) {
63             return true; // Valid packet detected
64         } else {
65             return false; // CRC error
66         }
67     }
68     break;
69
70 default:
71     break;
72 }
73
74 return false;
75 }

```

Listing 1: Συνάρτηση AnalysisOne() για ανάλυση πακέτων LiDAR

```

1 // Parse raw byte buffer and convert valid packets into point measurements
2 bool LiPkg::Parse(const uint8_t * data, long len)
3 {
4     for (int i = 0; i < len; i++) {
5
6         // Feed each byte to the packet parser
7         if (AnalysisOne(data[i])) {
8
9             // Communication successfully established
10            is_poweron_comm_normal_ = true;
11
12            // Compute angular difference between packet start and end angles
13            double diff = (pkg_.end_angle / 100 - pkg_.start_angle / 100 + 360) % 360;

```

```

14
15 // Validate packet based on expected angular coverage
16 if (diff <= ((double)pkg_.speed * POINT_PER_PACK /
17     measure_point_frequence_ * 1.5)) {
18
19     // Initialize timestamp on first packet
20     if (0 == last_pkg_timestamp_) {
21         last_pkg_timestamp_ = get_timestamp_();
22         continue;
23     }
24
25     // Timestamp of the current packet
26     uint64_t current_pack_stamp = get_timestamp_();
27
28     // Number of points per packet
29     int pkg_point_number = POINT_PER_PACK;
30
31     // Time interpolation step between consecutive points
32     double pack_stamp_point_step =
33         static_cast<double>(current_pack_stamp - last_pkg_timestamp_) /
34         static_cast<double>(pkg_point_number - 1);
35
36     // Store rotation speed and timestamp metadata
37     speed_ = pkg_.speed; // Degrees per second
38     timestamp_ = pkg_.timestamp; // Milliseconds
39
40     // Compute angular step between consecutive points
41     uint32_t diff =
42         ((uint32_t)pkg_.end_angle + 36000 -
43         (uint32_t)pkg_.start_angle) % 36000;
44
45     float step = diff / (POINT_PER_PACK - 1) / 100.0;
46     float start = (double)pkg_.start_angle / 100.0;
47
48     PointData data;
49
50     // Generate PointData for each measurement in the packet
51     for (int i = 0; i < POINT_PER_PACK; i++) {
52
53         data.distance = pkg_.point[i].distance;
54         data.angle = start + i * step;
55
56         // Normalize angle to [0, 360)
57         if (data.angle >= 360.0) {
58             data.angle -= 360.0;
59         }
60
61         data.intensity = pkg_.point[i].intensity;
62

```

```

63     // Interpolated timestamp for each point
64     data.stamp = static_cast<uint64_t>(
65         last_pkg_timestamp_ + (pack_stamp_point_step * i));
66
67     // Append point to temporary frame buffer
68     frame_tmp_.push_back(
69         PointData(data.angle, data.distance,
70                 data.intensity, data.stamp));
71     }
72
73     // Update timestamp reference
74     last_pkg_timestamp_ = current_pack_stamp;
75     }
76 }
77 }
78
79 return true;
80 }

```

Listing 2: Συνάρτηση Parse() για μετατροπή πακέτων σε σημεία

```

1 // Assemble a full 360-degree LiDAR scan from accumulated point data
2 bool LiPkg::AssemblePacket()
3 {
4     float last_angle = 0;
5     Points2D tmp, data;
6     int count = 0;
7
8     for (auto n : frame_tmp_) {
9
10        // Detect angular wrap-around (end of one full rotation)
11        if ((n.angle < 20.0) && (last_angle > 340.0)) {
12
13            // Validate sufficient number of points for a full scan
14            if ((count * GetSpeed()) > (measure_point_frequence_ * 1.4)) {
15
16                // Discard incomplete or invalid frame
17                if (count >= (int)frame_tmp_.size()) {
18                    frame_tmp_.clear();
19                } else {
20                    frame_tmp_.erase(frame_tmp_.begin(),
21                                    frame_tmp_.begin() + count);
22                }
23                return false;
24            }
25
26            // Extract points corresponding to one full rotation
27            data.insert(data.begin(),
28                      frame_tmp_.begin(),

```

```

29         frame_tmp_.begin() + count);
30
31     // Apply optional filtering
32     if (is_filter_) {
33         Tofbf tofbfLd(speed_, product_type_);
34         tmp = tofbfLd.Filter(data);
35     } else {
36         tmp = data;
37     }
38
39     // Sort points by timestamp
40     std::sort(tmp.begin(), tmp.end(),
41         [](PointData a, PointData b) {
42             return a.stamp < b.stamp;
43         });
44
45     if (tmp.size() > 0) {
46
47         // Skip publishing the very first frame
48         if (first_frame_) {
49             first_frame_ = false;
50         } else {
51             // Store completed scan and mark frame as ready
52             SetLaserScanData(tmp);
53             SetFrameReady();
54         }
55
56         // Remove processed points from buffer
57         if (count >= (int)frame_tmp_.size()) {
58             frame_tmp_.clear();
59         } else {
60             frame_tmp_.erase(frame_tmp_.begin(),
61                             frame_tmp_.begin() + count);
62         }
63         return true;
64     }
65 }
66
67 count++;
68
69 // Safety condition to avoid unbounded buffer growth
70 if ((count * GetSpeed()) > (measure_point_frequence_ * 2)) {
71
72     if (count >= (int)frame_tmp_.size()) {
73         frame_tmp_.clear();
74     } else {
75         frame_tmp_.erase(frame_tmp_.begin(),
76                         frame_tmp_.begin() + count);
77     }

```

```

78     return false;
79 }
80
81     last_angle = n.angle;
82 }
83
84     return false;
85 }

```

Listing 3: Συνάρτηση AssemblePacket() για σύνθεση πλήρους περιστροφής

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Μετατροπή δεδομένων LiDAR σε μήνυμα ROS LaserScan

Το παρόν παράρτημα περιγράφει τη μετατροπή των δεδομένων σάρωσης του αισθητήρα LiDAR σε μήνυμα τύπου LaserScan, σύμφωνα με τα πρότυπα του ROS 2, ώστε να είναι δυνατή η αξιοποίησή τους από αλγορίθμους SLAM και πλοήγησης

```

1 // Publish a LaserScan message from raw LiDAR point data
2 void LdLidarComponent::publishLaserScan(ldlidar::Points2D & src, double lidar_spin_freq)
3 {
4     // Angular limits and angular resolution of the scan
5     float angle_min, angle_max, angle_increment;
6
7     // Duration of a full scan
8     double scan_time;
9
10    // Timestamps for scan timing
11    rclcpp::Time start_scan_time;
12    static rclcpp::Time end_scan_time;
13
14    // Flag used to skip publishing on the first scan
15    static bool first_scan = true;
16
17    // Number of beams in the LaserScan message
18    int beam_size = 0;
19
20    // Use a fixed number of bins if defined,
21    // in order to ensure compatibility with SLAM Toolbox
22    if (_bins > 0) {
23        beam_size = _bins;
24    } else {
25        beam_size = static_cast<int>(src.size());
26    }
27
28    // Timestamp marking the beginning of the scan
29    start_scan_time = this->now();
30

```

```

31 // Compute time difference between consecutive scans
32 scan_time = (start_scan_time.seconds() - end_scan_time.seconds());
33
34 // Skip publishing during the first scan
35 if (first_scan) {
36     first_scan = false;
37     end_scan_time = start_scan_time;
38     return;
39 }
40
41 // Define full 360-degree scan range
42 angle_min = 0.0;
43 angle_max = (2 * M_PI);
44 angle_increment = (angle_max - angle_min) / (float)(beam_size - 1);
45
46 // Proceed only if the LiDAR is rotating
47 if (lidar_spin_freq > 0) {
48
49     // Create LaserScan message
50     std::unique_ptr<sensor_msgs::msg::LaserScan> msg =
51         std::make_unique<sensor_msgs::msg::LaserScan>();
52
53     // Message header
54     msg->header.stamp = start_scan_time;
55     msg->header.frame_id = _frameId;
56
57     // Scan configuration parameters
58     msg->angle_min = angle_min;
59     msg->angle_max = angle_max;
60     msg->angle_increment = angle_increment;
61     msg->range_min = _rangeMin;
62     msg->range_max = _rangeMax;
63
64     // Time between individual laser beams
65     if (beam_size <= 1) {
66         msg->time_increment = 0.0f;
67     } else {
68         msg->time_increment =
69             static_cast<float>(scan_time / (double)(beam_size - 1));
70     }
71
72     // Total scan duration
73     msg->scan_time = scan_time;
74
75     // Initialize all ranges and intensities with NaN
76     msg->ranges.assign(beam_size, std::numeric_limits<float>::quiet_NaN());
77     msg->intensities.assign(beam_size, std::numeric_limits<float>::quiet_NaN());
78
79     // Process each LiDAR point

```

```

80 for (auto point : src) {
81
82     // Convert distance to meters
83     float range = point.distance * _distScale;
84
85     // Received laser intensity
86     float intensity = point.intensity;
87
88     // Angle of the measurement (in degrees)
89     float dir_angle = point.angle;
90
91     // Filter invalid measurements
92     if ((point.distance == 0) && (point.intensity == 0)) {
93         range = std::numeric_limits<float>::quiet_NaN();
94         intensity = std::numeric_limits<float>::quiet_NaN();
95     }
96
97     // Apply angular cropping if enabled
98     if (_enableAngleCrop) {
99         if ((dir_angle >= _angleCropMin) && (dir_angle <= _angleCropMax)) {
100             range = std::numeric_limits<float>::quiet_NaN();
101             intensity = std::numeric_limits<float>::quiet_NaN();
102         }
103     }
104
105     // Convert angle from degrees to radians
106     float angle = ANGLE_TO_RADIAN(dir_angle);
107
108     // Compute corresponding index in the LaserScan array
109     int index =
110         static_cast<int>(ceil((angle - angle_min) / angle_increment));
111
112     // Check index bounds
113     if (index < beam_size) {
114
115         // Handle counterclockwise scan direction
116         if (_counterclockwise) {
117             int index_ccw = beam_size - index - 1;
118
119             // Assign value if empty, otherwise keep the minimum range
120             if (std::isnan(msg->ranges[index_ccw])) {
121                 msg->ranges[index_ccw] = range;
122             } else if (range < msg->ranges[index_ccw]) {
123                 msg->ranges[index_ccw] = range;
124             }
125
126             msg->intensities[index_ccw] = intensity;
127
128         } else {

```

```

129
130     // Normal (clockwise) scan direction
131     if (std::isnan(msg->ranges[index])) {
132         msg->ranges[index] = range;
133     } else if (range < msg->ranges[index]) {
134         msg->ranges[index] = range;
135     }
136
137     msg->intensities[index] = intensity;
138 }
139 }
140 }
141
142 // Publish the LaserScan message
143 _scanPub->publish(std::move(msg));
144
145 // Update end-of-scan timestamp
146 end_scan_time = start_scan_time;
147 }
148 }

```

Listing 4: Συνάρτηση publishLaserScan() του LdLidarComponent

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Εκκίνηση και παραμετροποίηση του κόμβου LiDAR

Στο παρόν παράρτημα παρουσιάζεται το προσαρμοσμένο αρχείο εκκίνησης (launch file) που χρησιμοποιείται για την απομονωμένη λειτουργία του κόμβου LiDAR, καθώς και επιλεγμένα τμήματα του αρχείου παραμετροποίησης που επηρεάζουν άμεσα τη ροή των δεδομένων σάρωσης.

```

1 %          custom launch file

```

Listing 5: Custom launch file για την εκκίνηση του κόμβου LiDAR

```

1 lidar:
2   rot_verse: 'CCW'
3   units: 'M'
4   bins: 455
5   enable_angle_crop: true
6   angle_crop_min: 210.0
7   angle_crop_max: 260.0

```

Listing 6: Επιλεγμένες παράμετροι αρχείου ldlidar.yaml