

Σχεδίαση και Υλοποίηση ενός Μίνι-Ρομποτικού Συστήματος

Κωνσταντίνος Παπαντωνίου - Χατζηγιώσης

Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπων: Κώστας Βλάχος

Ιωάννινα, Ιούλιος, 2025



**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧ. Η/Υ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ**

**DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE &
ENGINEERING**

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή της διπλωματικής μου, τον κ. Κώστα Βλάχο για τις γνώσεις και την καθοδήγηση που μου παρείχε. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και όλους τους δικούς μου ανθρώπους για την στήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

22/06/2025

Κωνσταντίνος Παπαντωνίου - Χατζηγιώσης

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εξετάζει την ανάπτυξη καινοτόμων ρομποτικών συστημάτων που κινούνται αποκλειστικά μέσω δονήσεων, αξιοποιώντας φυγόκεντρες δυνάμεις που παράγονται από ασύγχρονα περιστρεφόμενες μάζες. Η συγκεκριμένη προσέγγιση προσφέρει πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών μεθόδων κίνησης, μειώνοντας την ανάγκη για πολύπλοκα μηχανικά συστήματα και επιτρέποντας τη λειτουργία σε περιβάλλοντα όπου οι κλασικές μέθοδοι κίνησης δεν είναι εφικτές, μειώνοντας παράλληλα το κόστος κατασκευής και κατανάλωσης του συστήματος.

Η εργασία περιλαμβάνει τον σχεδιασμό, την υλοποίηση και τον πειραματικό έλεγχο ενός ρομπότ που χρησιμοποιεί δύο ηλεκτρικούς κινητήρες για τη δημιουργία κίνησης με δόνηση. Ο έλεγχος του συστήματος γίνεται μέσω του μικροελεγκτή ESP32, ο οποίος επιτρέπει ακριβή διαχείριση των κινητήρων και ενσωμάτωση αισθητήρων για δυναμική προσαρμογή της τροχιάς. Παράλληλα, αναπτύσσεται ένα μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος και επαληθεύεται μέσω προσομοιώσεων και πειραμάτων.

Τα αποτελέσματα της έρευνας αναδεικνύουν τη δυνατότητα χρήσης δόνησης για ής κίνησης σε εφαρμογές όπως η μικρορομποτική, οι βιοϊατρικές τεχνολογίες και η εξερεύνηση δυναμικών περιβαλλόντων. Η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να αποτελέσει τη βάση για νέες καινοτόμες ρομποτικές πλατφόρμες με αυξημένη αποδοτικότητα, ακρίβεια σε κλίμακα μικρομέτρων-νανομέτρων και προσαρμοστικότητα. Αυτή η προσέγγιση παρέχει μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση στη συμβατική ρομποτική κινητικότητα, διευρύνοντας τις δυνατότητες για ρομποτικές εφαρμογές σε προηγμένους τεχνολογικούς τομείς.

Λέξεις Κλειδιά: Ρομποτική, κίνησης με δονήσεις, φυγόκεντρες δυνάμεις, μικρορομποτική, ESP32, προσομοίωση, αισθητήρες ανατροφοδότησης

Abstract

The present diploma thesis examines the development of unique robotic systems that use exclusively vibration-based motion, leveraging centrifugal forces generated by rotating eccentric masses of electric motors. This approach offers advantages over conventional locomotion methods, reducing the need for complex mechanical systems and allowing operation in environments where classical locomotion methods aren't possible, while reducing the system construction and consumption costs.

The present work includes designing, implementing, and experimental testing a robot that uses two electric DC motors to generate vibratory motion. The system is controlled by an ESP32 microcontroller, which allows precise control of the motors. Additionally, magnetic sensors are incorporated for closed-loop control of the system to optimize movement accuracy. The research includes mathematical modeling of the system's dynamics, numerical simulations, and experimental validation of the robot's performance.

The research results highlight the potential of using vibratory motion in applications such as micro-robotics, biomedical technologies, and the exploration of dynamic environments. The proposed method can form the basis for new innovative robotic platforms with increased efficiency, accuracy at the micro-nano scale, and adaptability. This approach provides a promising alternative to conventional robotic mobility, expanding the possibilities for robotic applications in advanced technological fields.

Keywords: Robotics, vibration-based motion, centrifugal forces, micro-robotics, ESP32, simulation, close-loop control

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	II
Περίληψη.....	III
Abstract	IV
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση και Υπόβαθρο	3
2.1 Εισαγωγή	3
2.2 Ιστορική Αναδρομή στην Χρήση Δονήσεων για Κίνηση Ρομπότ.....	3
2.2.1 Πρώτες εφαρμογές.....	3
2.2.2 Θεωρητικά μοντέλα	5
2.3 Πλεονεκτήματα και Προοπτικές της Κίνησης μέσω Δονήσεων	6
2.3.1 Πλεονεκτήματα Μηχανισμού	6
2.3.2 Προοπτικές και Εφαρμογές της Τεχνολογίας	7
2.4 Συμπεράσματα Κεφαλαίου	8
Κεφάλαιο 3. Θεωρητικό Υπόβαθρο	10
3.1 Εισαγωγή	10
3.2 Μαθηματική Μοντελοποίηση του Κινητήρα.....	10
3.2.1 Ηλεκτρικό Κύκλωμα Κινητήρα	10
3.2.2 Ροπή και Δυναμική του Κινητήρα	12
3.2.3 Προσομοίωση Μοντέλου Κινητήρα	14
3.2.4 Ανάλυση Γραφημάτων Κινητήρα.....	15
3.3 Δυναμική Πλατφόρμας	20
3.3.1 Μοντελοποίηση πλατφόρμας.....	20
3.3.2 Προσομοίωση και Ανάλυση Δυνάμεων Πλατφόρμας.....	23
3.4 Δυναμική Ρομπότ.....	27
3.4.1 Μοντελοποίηση Δυνάμεων Συστήματος	27
3.4.2 Εξισώσεις Κίνησης Συστήματος.....	29
3.4.3 Προσομοίωση και Ανάλυση Κίνησης Ρομποτικού Συστήματος.....	32
Κεφάλαιο 4. Σχεδίαση και Κατασκευή του Ρομπότ.....	47
4.1 ESP32-WROOM-32E: Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας και Ελέγχου	47
4.2 Driver: DC Motor 21 Click.....	48

4.3	DC κινητήρες	51
4.4	Μπαταρία: LiPo (Lithium Polymer)	53
4.5	Αισθητήρας Hall	54
4.6	Συνδεσμολογία τελικού κυκλώματος:	55
4.6.1	Επεξήγηση Συνδέσεων	56
4.7	Τεχνική PWM	57
4.8	Σύγκριση Bluetooth και Wi-Fi για την Ελαχιστοποίηση Καθυστέρησης	58
4.8.1	Bluetooth.....	58
4.8.2	Wi-Fi (UDP)	59
4.9	Τελική Συναρμολόγηση του Ρομπότ	59
4.9.1	CAD Σχεδίαση Πλατφόρμας	59
4.9.2	Συναρμολόγηση και Καλωδίωση.....	61
4.9.3	Τελική Μορφή του Ρομπότ.....	61
Κεφάλαιο 5.	Έλεγχος Κίνησης με Μηχανή Καταστάσεων	64
5.1	Εισαγωγή	64
5.2	Έλεγχος Κίνησης των Κινητήρων με Κλειστό Σύστημα.....	64
5.2.1	Εξισώσεις Τάσης και περιστροφικής Ταχύτητας	64
5.2.2	Κλειστός Βρόχος Ελέγχου με τυχαίες παραμέτρους PID	66
5.2.3	Κλειστός Βρόχος Ελέγχου με PI με μαθηματικές σταθερές.....	73
5.3	Πειραματική Επαλήθευση Κινηματικής Συμπεριφοράς.....	78
5.4	Υλοποίηση Μηχανής Καταστάσεων και Δύο Προσεγγίσεις Κίνησης	80
5.4.1	Μικροσκοπική Κίνηση	82
5.4.2	Μακροσκοπική Κίνηση	85
	Συνολική Αξιολόγηση Νέας Μεθόδου	91
5.5	Συμπέρασμα.....	91
Κεφάλαιο 6.	Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία	93
6.1	Συμπεράσματα	93
6.2	Μελλοντική Εργασία	94
	Βιβλιογραφία.....	98

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα: 2-1 Πιεζοηλεκτρικός Κινητήρας ¹	4
Εικόνα 2-2: Αναλυτικό Σχέδιο του Επενεργητή ²	4
Εικόνα 2-3: Συνιστάμενες Δυνάμεις που Ασκούνται στην Πλατφόρμα από του Επενεργητές ³	5
Εικόνα 2-4 MICRON Έρευνα ⁴	7
Εικόνα 3-1: Κύκλωμα dc κινητήρα	11
Εικόνα 3-2: Δυναμική Κινητήρα	13
Εικόνα 3-3: Γωνία με Χρόνο από Πειραματικές Σταθερές	17
Εικόνα 3-4: Γωνιακή Ταχύτητα με Χρόνο από Σταθερές Έρευνας.....	18
Εικόνα 3-5: Γωνιακή Ταχύτητα με Χρόνο από Πειραματικές Σταθερές.....	18
Εικόνα 3-6: Φυγόκεντρος Δύναμη Οριζόντιο Άξονα από Σταθερές Έρευνας	19
Εικόνα 3-7: Φυγόκεντρος Δύναμη Οριζόντιο Άξονα από Πειραματικές Σταθερές	19
Εικόνα 3-8: Φυγόκεντρος Δύναμη Κάθετο Άξονα από Σταθερές της Έρευνας	20
Εικόνα 3-9: Φυγόκεντρος Δύναμη Κάθετο Άξονα από Πειραματικές Σταθερές	20
Εικόνα 3-10: Μοντέλο ενός Βαθμού Ελευθερίας.....	21
Εικόνα 3-11: (α) Συνολικές δυνάμεις που ασκούνται στην πλατφόρμα, (β) Τριβή Coulomb και συνολική τριβή πλατφόρμας (1).....	24
Εικόνα 3-12: (α) Συνολικές δυνάμεις που ασκούνται στην πλατφόρμα, (β) Τριβή Coulomb και συνολική τριβή πλατφόρμας (2).....	24
Εικόνα 3-13: (α) Μετατόπιση, (β) ταχύτητα και (γ) επιτάχυνση της πλατφόρμας εξαιτίας των δυνάμεων από σχήμα 7. (1)	25
Εικόνα 3-14: (α) Μετατόπιση, (β) ταχύτητα και (γ) επιτάχυνση της πλατφόρμας εξαιτίας των δυνάμεων από σχήμα 7. (2)	25
Εικόνα 3-15: Κάτοψη microrobot: αριστερά γραμμική, δεξιά περιστροφική	27
Εικόνα 3-16: Ασύγχρονη περιστροφή κινητήρων	28
Εικόνα 3-17: Ασύγχρονη συχνότητα κινητήρων	29
Εικόνα 3-18: Μετατόπιση Γραμμικής Κίνησης Ρομπότ (1)	32
Εικόνα 3-19: Μετατόπιση Γραμμικής Κίνησης Ρομπότ (2)	32
Εικόνα 3-20: Ταχύτητα Γραμμικής Κίνησης Ρομπότ (1)	33
Εικόνα 3-21: Ταχύτητα Γραμμικής Κίνησης Ρομπότ (2)	33
Εικόνα 3-22: Επιτάχυνση Γραμμικής Κίνησης Ρομπότ (1)	33
Εικόνα 3-23: Επιτάχυνση Γραμμικής Κίνησης Ρομπότ (2)	34
Εικόνα 3-24: Γωνιακή Περιστροφή του Ρομπότ (1)	34
Εικόνα 3-25: Γωνιακή Περιστροφή του Ρομπότ (2)	35
Εικόνα 3-26: Οριζόντια (μπλε) και Κατακόρυφη (κόκκινη) Δύναμη του Ρομπότ (1)	35
Εικόνα 3-27: Οριζόντια (μπλε) και Κατακόρυφη (κόκκινη) Δύναμη του Ρομπότ (2)	35
Εικόνα 3-28: Ροπή Δυνάμεων (1).....	36
Εικόνα 3-29: Ροπή Δυνάμεων (2).....	36
Εικόνα 3-30: Ροπές Ασύγχρονης Κίνησης, (μπλε) οριζόντιων δυνάμεων, (κόκκινο) κάθετων δυνάμεων (1)	37
Εικόνα 3-31 Ροπές Ασύγχρονης Κίνησης, (μπλε) οριζόντιων δυνάμεων, (κόκκινο) κάθετων δυνάμεων (2)	37
Εικόνα 3-32: Δυνάμεις Ασύγχρονης Κίνησης, (μπλε) οριζόντιων δυνάμεων, (κόκκινο) κάθετων δυνάμεων (1)	37
Εικόνα 3-33: Δυνάμεις Ασύγχρονης Κίνησης, (μπλε) οριζόντιων δυνάμεων, (κόκκινο) κάθετων δυνάμεων (2)	38
Εικόνα 3-34: Μετατόπιση Ασύγχρονης Κίνησης (1),(α).....	38
Εικόνα 3-35: Μετατόπιση Ασύγχρονης Κίνησης (2),(α).....	39

Εικόνα 3-36: Μετατόπιση Ασύγχρονης Κίνησης στον άξονα Y (1), (α).....	39
Εικόνα 3-37: Μετατόπιση Ασύγχρονης Κίνησης στον άξονα Y (2), (α).....	39
Εικόνα 3-38: Ταχύτητα Ασύγχρονης Κίνησης (1)	40
Εικόνα 3-39 Ταχύτητα Ασύγχρονης Κίνησης (2).....	40
Εικόνα 3-40: Επιτάχυνση Ασύγχρονης Κίνησης (1)	40
Εικόνα 3-41: Επιτάχυνση Ασύγχρονης Κίνησης (2)	41
Εικόνα 3-42: Γωνιακή Περιστροφή του Ρομπότ Ασύγχρονης Κίνησης (1),(α)	41
Εικόνα 3-43: Γωνιακή Περιστροφή του Ρομπότ Ασύγχρονης Κίνησης (2),(α)	41
Εικόνα 3-44: Μετατόπιση Ασύγχρονης Κίνησης (1)(β).....	42
Εικόνα 3-45: Μετατόπιση Ασύγχρονης Κίνησης (2)(β).....	42
Εικόνα 3-46: Μετατόπιση Ασύγχρονης Κίνησης στον άξονα Y (1)(β).....	43
Εικόνα 3-47: Μετατόπιση Ασύγχρονης Κίνησης στον άξονα Y (2)(β).....	43
Εικόνα 3-48: Γωνιακή Περιστροφή του Ρομπότ Ασύγχρονης Κίνησης (1)(β)	43
Εικόνα 3-49 Γωνιακή Περιστροφή του Ρομπότ Ασύγχρονης Κίνησης (2)(β)	44
Εικόνα 3-50: Μετατόπιση Ασύγχρονης Κίνησης (1)(γ)	44
Εικόνα 3-51: Μετατόπιση Ασύγχρονης Κίνησης (2)(γ)	45
Εικόνα 3-52: Μετατόπιση Ασύγχρονης Κίνησης στον άξονα Y (1) (γ)	45
Εικόνα 3-53: Μετατόπιση Ασύγχρονης Κίνησης στον άξονα Y (2)(γ)	45
Εικόνα 3-54: Γωνιακή Περιστροφή του Ρομπότ Ασύγχρονης Κίνησης (1)(γ)	46
Εικόνα 3-55: Γωνιακή Περιστροφή του Ρομπότ Ασύγχρονης Κίνησης (2)(γ)	46
Εικόνα 4-1: ESP32-WROOM-32E.....	48
Εικόνα 4-2: DC Motor 21 Click	49
Εικόνα 4-3: Κύκλωμα H-Bridge.....	49
Εικόνα 4-4: DC Κινητήρας Δόνησης	52
Εικόνα 4-5: Μπαταρία Λιθίου - 3.7v 550mAh.....	53
Εικόνα: 4-6 Hall Sensor	55
Εικόνα 4-7: Τελικό Κύκλωμα	56
Εικόνα 4-8: Αναπαράσταση τριών σημάτων PWM	58
Εικόνα 4-9: CAD σχεδίαση πλατφόρμας, αριστερά το κάτω μέρος δεξιά το επάνω, τέλος ο συνδυασμός ..	60
Εικόνα 4-10: Πλήρης συναρμολογημένη μορφή του ρομπότ	62
Εικόνα 4-11: Ρομπότ με την προσθήκη 6 βαριδιών συμμετρικά στο μπροστινό και στο πίσω μέρος	63
Εικόνα 5-1: PID Ελεγκτής.....	67
Εικόνα 5-2: PID Ελεγκτής με Παραμέτρους από SA	69
Εικόνα 5-3: Σφάλμα Ελεγκτή.....	70
Εικόνα 5-4: PID Ελεγκτής για Φυσικό Μοντέλο	70
Εικόνα 5-5: PID Ελεγκτής Προσομοίωσης με Παραμέτρους Φυσικού Μοντέλου	71
Εικόνα 5-6: Απόκριση Συστήματος με Ενημέρωση PID ανά 8ms στα 600rad/s επιθυμητή ταχύτητα.	72
Εικόνα 5-7: PI Ελεγκτής.....	73
Εικόνα 5-8: PI Ελεγκτής με Παραμέτρους από SA	75
Εικόνα 5-9: Σφάλμα Ελεγκτή.....	75
Εικόνα 5-10: PI Ελεγκτής για Φυσικό Μοντέλο	76
Εικόνα 5-11: Απόκριση του τελικού PI ελεγκτή με χρονικό διάστημα ενημέρωσης 8ms στα 600rad/s επιθυμητή ταχύτητα.....	78
Εικόνα 5-12: Κάτοψη Ρομπότ, Μπλε σημείο για μπροστά Κίτρινο για πίσω πλευρά	79
Εικόνα 5-13: Μηχανή Καταστάσεων Αυτόνομης Κίνησης.....	81
Εικόνα 5-14: Κίνηση σε Ευθεία προς τον Στόχο- Απόσταση 3 mm, Χρόνος 15 sec	83
Εικόνα 5-15: Κίνηση σε Ευθεία προς τον Στόχο X μεγαλύτερη ακρίβεια, Απόσταση 600 μm, Χρόνος 15 sec	83
Εικόνα 5-16: Στόχος Εκτός Ευθείας προς Δεξιά - Απόσταση 5 mm, Χρόνος 9 sec	84
Εικόνα 5-17: Στόχος Εκτός Ευθείας – Αριστερά	84
Εικόνα 5-18: Φυσικό μοντέλο του ρομπότ στην μικροσκοπική κίνηση.....	85
Εικόνα 5-19: Μακροσκοπική Κίνηση σε Ευθεία προς τον Στόχο- Απόσταση 7 cm, Χρόνος 70 sec.....	86

Εικόνα 5-20: Στόχος Εκτός Ευθείας προς Δεξιά - Απόσταση 8 cm, Χρόνος 90 sec.....	87
Εικόνα 5-21: Στόχος Εκτός Ευθείας προς Αριστερά - Απόσταση 7 cm, Χρόνος 40 sec.....	87
Εικόνα 5-22: Στόχος Εκτός Ευθείας Ακραίο Σημείο - Απόσταση 8cm προς τα αριστερά του κέντρου	88
Εικόνα 5-23: Βασικές κινήσεις που συζητήθηκαν και προηγούμενος με μέθοδο προσανατολισμού	90
Εικόνα 5-24: Στόχος σε ακραίο σημείου του πλάνου - Απόσταση 10 cm Χρόνος 80 sec	90
Εικόνα 5-25: Τελική θέση του ρομπότ με τον ανανεωμένο αλγόριθμο	91

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1: Πίνακας Συγκριτικών Σταθερών Κινητήρα	16
Πίνακας 4.1: Λειτουργία H-Bridge	50
Πίνακας 4.2: Κύριες διαστάσεις πλατφόρμας	60
Πίνακας 5.1: Αντιστοιχισμένες Τιμές PWM	65
Πίνακας 5.2: Συντελεστές Πολυωνυμικού Μοντέλου	66
Πίνακας 5.3: Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης SA.....	68
Πίνακας 5.4: Αλγόριθμος Μηχανής Καταστάσεων.....	81

Κεφάλαιο 1.

Εισαγωγή

Η ρομποτική αποτελεί έναν από τους ταχύτερα αναπτυσσόμενους επιστημονικούς και τεχνολογικούς κλάδους, με εφαρμογές που εκτείνονται από τη βιομηχανία και την ιατρική μέχρι την εξερεύνηση του διαστήματος και του μικρόκοσμου. Τα τελευταία χρόνια, υπάρχει έντονο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη καινοτόμων μεθόδων κίνησης ρομπότ με μη παραδοσιακές τεχνικές όπως οι τροχοί και οι αρθρώσεις, η οποίες έχουν υψηλό κόστος κατασκευής και κατανάλωσης ενέργειας. Μια τέτοια προσέγγιση, που παρουσιάζει ιδιαίτερο ερευνητικό και πρακτικό ενδιαφέρον, είναι η χρήση δονήσεων για τον έλεγχο και την κίνηση ρομποτικών μηχανισμών.

Αυτή η διπλωματική εργασία, επικεντρώνεται στον σχεδιασμό και την κατασκευή ενός μίνι-ρομπότ το οποίο κινείται αποκλειστικά μέσω φυγόκεντρων δυνάμεων που παράγονται από τα έκκεντρα δύο ηλεκτρικών dc κινητήρων. Αυτή η αρχή λειτουργίας διαφοροποιείται από τις συμβατικές μεθόδους κίνησης, καθώς δεν βασίζεται σε άμεση επαφή με το έδαφος μέσω τροχών ή αρθρώσεων, αλλά αξιοποιεί την ασύγχρονη περιστροφή μαζών που δημιουργεί παλμούς δύναμης και προκαλεί τη μετατόπιση του ρομπότ.

Η χρήση δονήσεων για την κίνηση μικρορομπότ δεν είναι μια εντελώς νέα ιδέα. Συναντάται σε μικρορομπότ που κινούνται σε κλίμακα μικρομέτρων, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται για ιατρικές ή βιολογικές εφαρμογές. Στην εργασία αυτή, γίνεται προσπάθεια να κατασκευαστεί τέτοιος μηχανισμός σε μεγαλύτερα μεγέθη και με ακρίβεια κίνησης στην κλίμακα των μικρομέτρων και αποτελεί ένα ιδιαίτερο ερευνητικό πεδίο. Η συγκεκριμένη προσέγγιση ρομποτικού μηχανισμού είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιβάλλοντα όπου οι κλασικές μέθοδοι κίνησης δεν είναι εφικτές, όπως σε απομονωμένους χώρους όπου απαιτείται μινιμαλιστικός σχεδιασμός και εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας ή σε περιβάλλοντα με πολύ χαμηλές ή υψηλές τριβές.

Για την επίτευξη αυτής της μορφής κίνησης, χρησιμοποιείται ένας μικροελεγκτής ESP32, ο οποίος επιλέχθηκε λόγω του χαμηλού κόστους, της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και των πολλαπλών δυνατοτήτων συνδεσιμότητας. Ο ESP32 επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο της ταχύτητας των κινητήρων, κάτι που είναι κρίσιμο για τη δημιουργία κατευθυνόμενης κίνησης. Επιπλέον, με τη χρήση αισθητήρων επιτρέπεται η υλοποίηση ενός συστήματος ελέγχου (closed-loop control), ώστε το ρομπότ να επιτυγχάνει ακρίβεια κίνησης και να διατηρεί την επιθυμητή τροχιά για αυτόνομη κίνηση.

Η εργασία περιλαμβάνει την μαθηματική μοντελοποίηση της κίνησης του ρομπότ και του συστήματος, την υλοποίηση του ρομποτικού συστήματος και τέλος το πειραματικό έλεγχο του πραγματικού μοντέλου. Αρχικά, αναπτύσσεται το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει την συμπεριφορά του κινητήρα, της κίνησης της πλατφόρμας με έναν βαθμό ελευθερίας και του τελικού μοντέλου του ρομπότ με δύο βαθμούς ελευθερίας υπό την

επίδραση των φυγόκεντρων δυνάμεων. Στη συνέχεια πραγματοποιείται προσομοίωση της κίνησης μέσω αριθμητικών μεθόδων επίλυσης διαφορικών εξισώσεων του συστήματος. Ακολούθως παρουσιάζεται η αναλυτική διαδικασία κατασκευής του ρομπότ, η υλοποίηση του ηλεκτρονικού κυκλώματος και η ανάπτυξη του λογισμικού για τον σχεδιασμό τροχιάς και τον έλεγχο του ρομπότ. Τέλος, πραγματοποιούνται πειράματα για την αξιολόγηση της ακρίβειας και της αποδοτικότητας της προτεινόμενης κίνησης και η σύγκριση μεταξύ της προσομοίωσης και του πραγματικού μοντέλου.

Η ανάπτυξη ρομποτικών συστημάτων που κινούνται με μη παραδοσιακές μεθόδους μπορεί να οδηγήσει σε νέες τεχνολογίες με στόχο την ακρίβεια και την αποδοτικότητα του συστήματος. Τα ευρήματα της παρούσας εργασίας μπορούν να έχουν εφαρμογές σε ένα ευρύ φάσμα τομέων, από την μικρορομποτική και τις βιοϊατρικές εφαρμογές μέχρι και τη ρομποτική εξερεύνηση δυναμικών και χαοτικών περιβαλλόντων.

Κεφάλαιο 2.

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση και Υπόβαθρο

2.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζεται το θεωρητικό και ιστορικό υπόβαθρο της μεθόδου κίνησης ρομπότ μέσω δονήσεων. Εξετάζονται σχετικές έρευνες, υπάρχουσες τεχνολογίες και εφαρμογές, καθώς και οι προκλήσεις και τα πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης.

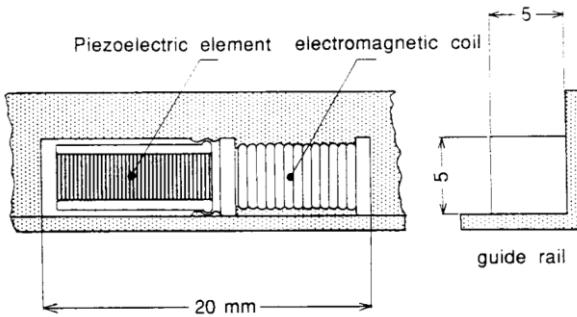
2.2 Ιστορική Αναδρομή στην Χρήση Δονήσεων για Κίνηση Ρομπότ

Η αξιοποίηση των δονήσεων ως μέσου κίνησης στα ρομποτικά συστήματα αποτελεί ένα πεδίο έρευνας με αυξανόμενο ενδιαφέρον. Από τις πρώτες εφαρμογές μέχρι τις σύγχρονες εξελίξεις, η χρήση δονήσεων προσφέρει μοναδικές δυνατότητες στην κίνηση των ρομπότ, ιδιαίτερα σε μικροκλίμακα. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα εξετάσουμε την ιστορική πορεία της χρήσης δονήσεων για την κίνηση ρομπότ, αναλύοντας τις πρώτες εφαρμογές, τα θεωρητικά μοντέλα, καθώς και τις πρόσφατες εξελίξεις και εφαρμογές. Οι αναφορές σε σχετικές έρευνες και επιστημονικά συγγράμματα θα υποστηρίζουν την ανάλυσή μας.

2.2.1 Πρώτες εφαρμογές

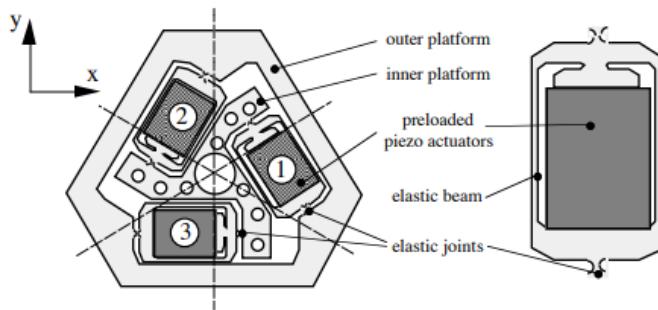
Η ιδέα της χρήσης δονήσεων για την κίνηση ρομποτικών συστημάτων εμφανίστηκε στα τέλη του 20ού αιώνα. Οι πρώτες εφαρμογές επικεντρώθηκαν σε μικρορομπότ που μπορούσαν να κινηθούν σε περιορισμένα ή δύσβατα περιβάλλοντα, όπου οι παραδοσιακές μέθοδοι κίνησης δεν ήταν πρακτικές. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η ανάπτυξη μικρορομπότ που χρησιμοποιούν πιεζοηλεκτρικούς ενεργοποιητές για την παραγωγή δονήσεων, επιτρέποντας την κίνησή τους σε μικροκλίμακα.

Ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα είναι η ανάπτυξη ενός μικρορομπότ ενεργοποιητών¹. Αυτός ο ενεργοποιητής χρησιμοποιεί πιεζοηλεκτρική συσκευή σε συνδυασμό με ηλεκτρομαγνητικό σφιγκτήρα για την επίτευξη γραμμικής κίνησης. Η πιεζοηλεκτρική συσκευή προκαλεί μικροδονήσεις, ενώ ο ηλεκτρομαγνητικός σφιγκτήρας ελέγχει την κίνηση, επιτρέποντας ακριβή και αθόρυβη λειτουργία.



Εικόνα: 2-1 Πιεζοηλεκτρικός Κινητήρας¹

Το μοντέλο αυτό με τη χρήση δύο κινητήρων παρουσίασε ένα πρόβλημα στην ακρίβεια της κίνησης σε πολύ μικρή κλίμακα. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, προέκυψε μια καινούρια υλοποίηση χρησιμοποιώντας τρεις 1-DOF κινητήρες για τον σχεδιασμό ρομπότ κίνησης με τρεις βαθμούς ελευθερίας. Η νέα προσέγγιση, που παρουσιάζεται², βασίζεται στη δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ των κινητήρων και της πλατφόρμας του ρομπότ. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα επιτυγχάνει μεγαλύτερη ακρίβεια κίνησης και ελεγχόμενη μετατόπιση, επιτρέποντας καλύτερη προσαρμογή σε μικροκλίμακα.

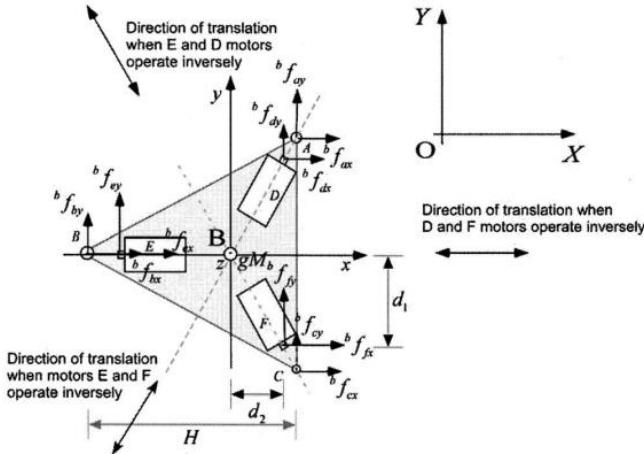


Εικόνα 2-2: Αναλυτικό Σχέδιο του Επενεργητή²

Παρόλο που οι πιεζοηλεκτρικοί κινητήρες προσφέρουν εξαιρετικά υψηλή ακρίβεια στην κίνηση μικρορομπότ, η εφαρμογή τους σε πρακτικά συστήματα συνοδεύεται από σημαντικές προκλήσεις. Η λειτουργία τους απαιτεί πολύπλοκη και υψηλής τάσης τροφοδοσία, γεγονός που αυξάνει τον σχεδιαστικό φόρτο και το κόστος υλοποίησης. Επιπλέον, η δυναμική συμπεριφορά τους είναι μη γραμμική, γεγονός που δυσχεραίνει τη δημιουργία ακριβών μαθηματικών μοντέλων για την πρόβλεψη της κίνησης του ρομπότ.

Για να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα, ερευνήθηκαν εναλλακτικοί τρόποι πρόωσης και διαφορετικά μοντέλα κινητήρων. Μία από τις πιο ενδιαφέρουσες προσεγγίσεις είναι η χρήση κινητήρων συνεχούς ρεύματος (DC motors) σε συνδυασμό με εκκεντρικές μάζες,

οι οποίες εκμεταλλεύονται τη φυγόκεντρο δύναμη για την πρόκληση δονήσεων και την προώθηση του ρομπότ. Αυτή η μέθοδος προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς οι DC κινητήρες είναι απλούστεροι στη χρήση, ευκολότεροι στον έλεγχο και δεν απαιτούν εξειδικευμένα κυκλώματα τροφοδοσίας υψηλής τάσης.³



Εικόνα 2-3: Συνιστάμενες Δυνάμεις που Ασκούνται στην Πλατφόρμα από τον Επενεργητές³

2.2.2 θεωρητικά μοντέλα

Τα πρώτα θεωρητικά μοντέλα για την κατανόηση της κίνησης μέσω δονήσεων βασίστηκαν στη μελέτη των δυναμικών συστημάτων και της μηχανικής των δονήσεων. Οι ερευνητές ανέλυσαν πώς η εφαρμογή περιοδικών δυνάμεων μπορούσε να προκαλέσει κίνηση σε ένα σώμα, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η συχνότητα, το πλάτος και η φάση των δονήσεων. Αυτά τα μοντέλα βοήθησαν στην κατανόηση των μηχανισμών που επιτρέπουν την κίνηση μέσω δονήσεων και στην ανάπτυξη πιο αποδοτικών ρομποτικών συστημάτων.

Για παράδειγμα, η χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών για την παραγωγή δονήσεων έχει μελετηθεί εκτενώς. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά έχουν την ικανότητα να μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική δόνηση και αντίστροφα, καθιστώντας τα ιδανικά για εφαρμογές σε μικρορομπότ.

Μια παρόμοια λειτουργία παρουσιάζουν οι κινητήρες δόνησης που περιστρέφουν ένα έκκεντρο. Η περιστροφή αυτή προκαλεί μια φυγόκεντρο δύναμη παλινδρομικά. Ελέγχοντας την δύναμη αυτή, μπορούμε να ελέγξουμε την κίνηση του ρομπότ και να προβλέψουμε την συμπεριφορά του.

2.3 Πλεονεκτήματα και Προοπτικές της Κίνησης μέσω Δονήσεων

Η κίνηση μέσω δονήσεων αποτελεί μια καινοτόμο προσέγγιση που διαφοροποιείται από τους παραδοσιακούς μηχανισμούς κίνησης, όπως κίνηση με ρόδες, υδραυλικοί μηχανισμοί. Σε αυτή τη μέθοδο, η κίνηση επιτυγχάνεται μέσω της εφαρμογής δονήσεων υψηλής συχνότητας, οι οποίες μετατρέπονται σε προωθητική ή περιστροφική δύναμη. Η προσέγγιση αυτή παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για εφαρμογές μικροκλίμακα ή σε περιβάλλοντα με περιορισμούς όπου οι συμβατικοί μηχανισμοί αποτυγχάνουν να παρέχουν την επιθυμητή απόδοση.

2.3.1 Πλεονεκτήματα Μηχανισμού

- **Μειωμένη Πολυπλοκότητα:**

Τα ρομπότ που χρησιμοποιούν δονήσεις συνήθως απαιτούν λιγότερα κινούμενα μέρη, καθώς δεν χρειάζεται ένα σύνθετο σύστημα μετάδοσης κίνησης. Αυτό οδηγεί σε:

- **Ελαχιστοποίηση**

Λιγότερα μηχανικά μέρη σημαίνουν χαμηλότερη πιθανότητα βλάβης του ρομποτικού μηχανισμού στο στάδιο κατασκευής και λειτουργίας. Επιπλέον έχει μικρότερη ανάγκη για τακτική συντήρηση.

- **Μείωση**

Η απλούστερη κατασκευή συνεπάγεται με μειωμένα έξοδα παραγωγής και συντήρησης.

- **Ενσωμάτωση**

σε

Μικροσκοπικές

Συσκευές:

Σε εφαρμογές όπου οι διαστάσεις παίζουν κρίτιμο ρόλο, όπως οι ιατρικές διαγνώσεις ή η ανάλυση συστήματος σε μικρόμετρα – νανόμετρα, οι συμβατικοί τρόποι κίνησης μπορεί να είναι απαγορευτικοί λόγο του μεγέθους τους. Αντίθετα:

- **Πιεζοηλεκτρικοί και Μικροηλεκτρομηχανικοί Κινητήρες:** Αυτοί οι κινητήρες που παράγουν δονήσεις μπορούν να ενσωματωθούν εύκολα σε νανορομπότ, σχεδιάζοντας τους σαν ένα συνολικό κύκλωμα.

- **Χαμηλή Κατανάλωση Ενέργειας:** Σε μικρή κλίμακα, η παραγωγή δονήσεων είναι πιο αποδοτική από πλευράς ενεργειακής κατανάλωσης, καθώς οι επιδράσεις της αδράνειας και της τριβής ελέγχονται καλύτερα.

- **Λειτουργία**

σε

Ανώμαλες

Επιφάνειες:

Τα ρομπότ με την χρήση δονήσεων για την κίνηση μπορούν να προσαρμοστούν εύκολα σε επιφάνειες που παρουσιάζουν δυσκολίες για τις παραδοσιακές τροχαίες.

- **Εξερεύνηση Αντίξοων Χώρων:** Σε περιβάλλοντα όπου οι ομαλές επιφάνειες είναι σπάνιες, η μεταφορά δονήσεων μπορεί να επιτρέψει την κίνηση και την πρόσβαση σε δύσβατα σημεία.

- **Αντίσταση σε Τραυματισμούς:** Η απλότητα της δομής συνήθως οδηγεί σε μικρότερη πιθανότητας μηχανικών βλαβών σε ακανόνιστα εδάφη.

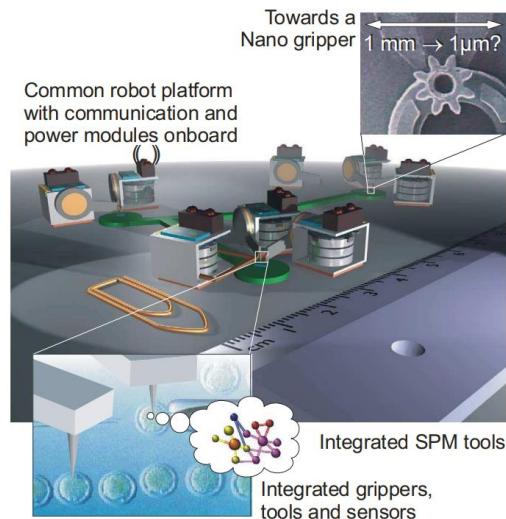
2.3.2 Προοπτικές και Εφαρμογές της Τεχνολογίας

- **Βιοϊατρικές Εφαρμογές**
Η χρήση μηχανισμών δόνησης στη ρομποτική για βιοϊατρικές εφαρμογές έχει ανοίξει νέους ορίζοντες στην ανάπτυξη εξειδικευμένων μικρορομπότ που επιτρέπουν υψηλής ακρίβειας επεμβάσεις στο ανθρώπινο σώμα. Τα μικρορομπότ που βασίζονται στη κίνηση με δονήσεις έχουν τη δυνατότητα να κινούνται σε υγρά περιβάλλοντα, όπως το αίμα και τα σωματικά υγρά, καθώς και να εκτελούν λειτουργίες που απαιτούν μεγάλη λεπτομέρεια, όπως ο χειρισμός κυττάρων, η στόχευση παθογόνων και η στοχευμένη χορήγηση φαρμάκων.

Μηχανισμός Κίνησης με Δονήσεις και Μικρορομποτική

Τα μικρορομπότ που χρησιμοποιούν τεχνικές δόνησης για την κίνηση τους αξιοποιούν μηχανισμούς, οι οποίοι παράγουν μικροδονήσεις σε υψηλές συχνότητες, δημιουργώντας κίνηση. Σε κλίμακα μικρομέτρων και νανομέτρων, η τριβή και η αδράνεια διαδραματίζουν διαφορετικό ρόλο απ' ό,τι σε μακροσκοπικά συστήματα, καθιστώντας την κίνηση πιο αποτελεσματική από τους παραδοσιακούς μηχανισμούς.

Ένα από τα πρωτοποριακά μικρορομπότ που έχει αναπτυχθεί για τέτοιες εφαρμογές είναι το **MICRON⁴**, το οποίο χρησιμοποιεί ένα σύστημα ακριβούς ελέγχου κίνησης βασισμένο σε δονήσεις για την επεξεργασία βιολογικών κυττάρων. Το MICRON μπορεί να χειρίστει μικροσκοπικά βιολογικά δείγματα, να μετρήσει με ακρίβεια τις ιδιότητές τους και να τα επηρεάσει μέσω μηχανικών δυνάμεων.



Εικόνα 2-4 MICRON Έρευνα⁴

Εφαρμογές του MICRON και Άλλων Μικρορομπότ

1. Χειρισμός Κυττάρων και Μικροσωματιδιών

Τα μικρορομπότ που κινούνται με την χρήση δονήσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την τοποθέτηση, διαχωρισμό και ανάλυση κυττάρων, κάτι που έχει τεράστιες εφαρμογές στη βιοτεχνολογία και στη μελέτη ασθενών.

2. Μικροσκοπική Μέτρηση και Ανάλυση Κυττάρων

Οι δονητικοί μηχανισμοί επιτρέπουν στην μέτρηση κυτταρικών ιδιοτήτων με την χρήση μικροσκοπίων. Με αυτό τον τρόπο επιτρέπει την άμεση ανταπόκριση του ρομπότ με την συμπεριφορά των κυττάρων. Με τέτοιες τεχνολογίες μπορούν να εξετάσουν τις μηχανικές ιδιότητες καρκινικών κυττάρων και να τα διαχωρίσουν από τα υγιή κύτταρα.

3. Στοχευμένη Χορήγηση Φαρμάκων

Τα μικρορομπότ με τέτοια κίνηση μπορούν να μεταφέρουν και να απελευθερώνουν φαρμακευτικές ουσίες απευθείας σε στοχευμένα σημεία μέσα στο σώμα, μειώνοντας τις παρενέργειες και αυξάνοντας την αποτελεσματικότητα της θεραπείας.

2.4 Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Το παρόν κεφάλαιο ανέλυσε διεξοδικά το ιστορικό και θεωρητικό υπόβαθρο της ρομποτικής κίνησης μέσω δονήσεων, μια προσέγγιση που συνδυάζει τη φυσική των ταλαντώσεων με καινοτόμες τεχνολογικές εφαρμογές. Ξεκινώντας από τις πρώτες πειραματικές προσπάθειες με πιεζοηλεκτρικούς ενεργοποιητές, μέχρι την υιοθέτηση κινητήρων συνεχούς ρεύματος με εκκεντρικές μάζες, καταγράφηκε η πορεία εξέλιξης της συγκεκριμένης μεθόδου, με έμφαση στη μετάβαση από θεωρητικά μοντέλα σε πρακτικά, λειτουργικά συστήματα.

Η χρήση των δονήσεων ως μέσο πρόωσης αναδεικνύεται ως μια αποτελεσματική και ευέλικτη λύση, ιδίως σε περιβάλλοντα μικροκλίμακας, όπου οι παραδοσιακές τεχνολογίες συχνά αποτυγχάνουν. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνουν τη μειωμένη πολυπλοκότητα της κατασκευής, τη μικρότερη ανάγκη για συντήρηση, και τη δυνατότητα ενσωμάτωσης σε εξαιρετικά μικρές συσκευές, καθιστώντας την ιδανική για εφαρμογές όπως η μικροχειρουργική, τα ιατρικά ρομπότ ή η εξερεύνηση δύσβατων περιοχών.

Παρά τα σημαντικά οφέλη, η τεχνολογία δεν στερείται προκλήσεων. Οι δυσκολίες στην ακριβή μοντελοποίηση της δυναμικής συμπεριφοράς, οι απαιτήσεις σε τροφοδοσία (ειδικά στην περίπτωση των πιεζοηλεκτρικών υλικών), καθώς και η ανάγκη για εξειδικευμένο έλεγχο, καθιστούν απαραίτητη την περαιτέρω ερευνητική προσπάθεια στον τομέα.

Συνοψίζοντας, η κίνηση μέσω δονήσεων συνιστά μια πολλά υποσχόμενη κατεύθυνση στη ρομποτική, προσφέροντας ένα ευρύ φάσμα δυνατοτήτων σε ποικίλες εφαρμογές. Το κεφάλαιο αυτό έθεσε τις βάσεις για την εμβάθυνση στις επόμενες ενότητες της εργασίας, όπου θα μελετηθούν σε μεγαλύτερο βάθος η δυναμική του ρομπότ, η σχεδίαση του συστήματος και ο έλεγχος της κίνησής του.

Κεφάλαιο 3.

Θεωρητικό Υπόβαθρο

3.1 Εισαγωγή

Η κίνηση του ρομπότ που βασίζεται σε δονήσεις προκύπτει από τη συνδυασμένη δράση των κινητήρων δόνησης και της μηχανικής αλληλεπίδρασης με το έδαφος. Στο παρόν κεφάλαιο, αναλύονται οι φυσικές αρχές που διέπουν τη λειτουργία του συστήματος, η μαθηματική μοντελοποίηση των κινητήρων, η δυναμική της πλατφόρμας και η συνολική κίνηση του ρομπότ. Επιπλέον από το μαθηματικό μοντέλο υλοποιείται ρεαλιστική προσομοίωση της συμπεριφοράς του ρομποτικού μηχανισμού για την αναπαράσταση της κίνησης των κομματιών του συστήματος και την σύγκριση στο τέλος με τα πειραματικά αποτελέσματα.

3.2 Μαθηματική Μοντελοποίηση του Κινητήρα

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί η μαθηματική μοντελοποίηση του κινητήρα δόνησης που χρησιμοποιήθηκε. Επιπλέον θα υλοποιηθεί μια προσομοίωση όπου θα συγκριθούν τα αποτελέσματα του κινητήρα μεταξύ θεωρητικών μοντέλων από βιβλιογραφία και από πειραματικών μοντέλων για την εύρεση της πραγματικής συμπεριφοράς του κινητήρα που θα χρησιμοποιήσουμε στο τελικό ρομπότ.

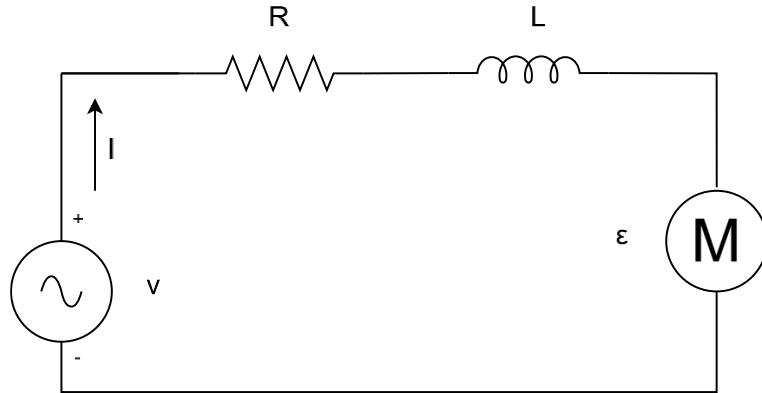
3.2.1 Ηλεκτρικό Κύκλωμα Κινητήρα

Ο DC Κινητήρας Δόνησης

Ο κινητήρας αποτελεί έναν ειδικό τύπου ηλεκτρικού κινητήρα, στον οποίο η κίνηση προκύπτει από τις δονήσεις που δημιουργώνταις μέσω της περιστροφής εκκεντρικής μάζας. Οι κινητήρες αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως μικρορομπότ, κινητά τηλέφωνα και συστήματα απτικής ανάδρασης.

Η βασική ηλεκτρική περιγραφή του κινητήρα μπορεί να προσεγγιστεί μέσω ενός απλού κυκλώματος που περιλαμβάνει αντίσταση (R), αυτεπαγωγή (L) και ηλεκτροκινητήρια δύναμη (EMF).

Ηλεκτρικό Μοντέλο του Κινητήρα



Εικόνα 3-1: Κύκλωμα dc κινητήρα

Από τον νόμο του kirchhoff μπορεί βγαίνει η διαφορική εξίσωση που περιγράφει την ροή του ρεύματος I :

$$V = \varepsilon + IR + L \frac{dI}{dt} \quad 3.1$$

όπου:

- V είναι η εφαρμοζόμενη τάση,
- ε η ηλεκτρεγερτική δύναμη (EMF),
- I το ρεύμα,
- R η ηλεκτρική αντίσταση του κυκλώματος,
- L η αυτεπαγωγή του κυκλώματος.
- M τα άκρα του κινητήρα.

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη ε ορίζεται από τον νόμο του Faraday και σχετίζεται με την γωνιακή ταχύτητα ω^5 :

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_b}{dt} = -NAB \frac{d}{dt} \cos(\omega t) = NAB\omega \sin(\omega t) \quad 3.2$$

Με K_ε την ηλεκτρική σταθερά κινητήρα που εξαρτάται από τα φυσικά χαρακτηριστικά του πηνίου και του μαγνητικού πεδίου έχουμε την εξίσωση.

$$\varepsilon = K_\varepsilon \omega \quad 3.3$$

3.2.2 Ροπή και Δυναμική του Κινητήρα

Η ροπή της δύναμης που προκαλείται από το μαγνητικό πεδίο του πηνίου του κινητήρα⁵:

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B} \quad 3.4$$

$$\vec{\mu} = NI\vec{A} \quad 3.5$$

Από την εξίσωση της μαγνητικής διπολικής ροπής παίρνουμε την ροπή εξαρτώμενη από το ρεύμα:

$$\tau = NAB \sin(\omega t)I = K_t I \quad 3.6$$

Η ροπή είναι ανάλογη του ρεύματος που διαπερνάει τον κινητήρα ενώ η ηλεκτρεγερτική κίνηση είναι ανάλογη της μεταβολής της γωνίας στον χρόνο⁶.

Επιπλέον η ηλεκτρική σταθερά του κινητήρα⁶ $K_\varepsilon = K_t$, επομένως η εξίσωση του Kirchhoff μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$V = K_t \omega + iR + L \frac{di}{dt} \quad 3.7$$

Αν βραχυκυκλώσουμε τις τάσεις των κινητήρων και θεωρήσουμε το πηνίο αμελητέο τότε έχουμε την ελάχιστη ροπή του συστήματος, η οποία είναι η ροπή που πρέπει να ξεπεράσουμε για να περιστραφεί ο κινητήρας και παίρνει την μορφή⁸:

$$0 = K_t \omega + iR = K_t \omega + \frac{\tau}{K_t} R \quad 3.8$$

Το οποίο γράφεται ως:

$$\tau_{fr} = b\omega = \frac{-K_t^2}{R}\omega \quad 3.9$$

όπου το b είναι η σταθερά απορρόφησης (μηχανικής αντίστασης) που συνδέεται με το K_t και το R . Αυτή η εξίσωση δείχνει τη σχέση μεταξύ της γωνιακής ταχύτητας και της αντίστασης του κινητήρα, καθώς και την εξάρτηση της ροπής από την ταχύτητα. Οι σταθερές προκύπτουν από τις εξής εξισώσεις⁷:

$$K_T = \frac{1}{\omega_{ss}} (V_s - Ri_{ss}) \quad 3.10$$

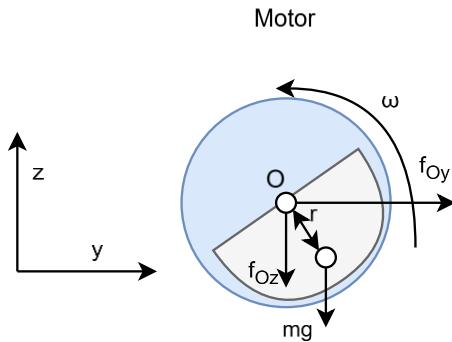
$$b = \frac{1}{\omega_{ss}} (i_{ss}K_T - c sgn\omega_{ss}) \quad 3.11$$

Όπου ω_{ss} γωνιακή ταχύτητα, i_{ss} το ρεύμα του κινητήρα και i_s το ρεύμα για την εκκίνηση του κινητήρα. Επιπλέον η ροπή αδράνειας υπολογίζεται από τον τύπο:

$$J = \frac{1}{2}mr^2$$

3.12

Φυγόκεντρη και Κεντρομόλος Δύναμη



Εικόνα 3-2: Δυναμική Κινητήρα

Από τον 2^o νόμο του Νεύτωνα η συνολική ροπή ενός συστήματος είναι ίση της ροπής αδράνειας επι την μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας στον χρόνο, δηλαδή⁹:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = \sum_i r_i x f_i = \sum_i \tau_i \quad 3.13$$

Η ροπή που επενεργεί στο σύστημα μπορεί να χωριστεί σε διάφορες συνιστώσες, όπως η ροπή φορτίου τ_{load} , η ροπή τριβής τ_{fr} και η ροπή που παράγεται από το κινητήρα:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = K_t i - b \frac{d\theta}{dt} - mg r \sin(\theta) - c \text{sign}\left(\frac{d\theta}{dt}\right) \quad 3.14$$

Όπου c⁶:

$$c = i_s K_t \quad 3.15$$

Αναφορικά με το σύμβολο c , αυτό αντιπροσωπεύει τον συντελεστή τριβής Coulomb (ή Coulomb friction coefficient). Είναι μια σταθερά που εκφράζει την ένταση της τριβής Coulomb ανάλογα με τις ιδιότητες των υλικών και τη γεωμετρία του κινητήρα και των εξαρτημάτων του. Συνήθως, το c καθορίζεται πειραματικά και εκφράζει την αντίσταση που προκύπτει από την τριβή κατά τη διάρκεια της κίνησης του κινητήρα. Απομονώνοντας την γωνιακή επιτάχυνση καθώς είναι το αποτέλεσμα που ψάχνουμε για τον έλεγχο του κινητήρα οπότε και τον ρομπότ, παίρνουμε την εξίσωση:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{K_t i}{J} - \frac{b}{J} \frac{d\theta}{dt} - \frac{mg r \sin(\theta)}{J} - \frac{c \text{sign}\left(\frac{d\theta}{dt}\right)}{J} \quad 3.16$$

Τέλος η μεταβολή του ρεύματος εξαρτώμενη από την τάση του κυκλώματος

$$\frac{di}{dt} = \frac{V}{L} - \frac{K_t \omega}{L} - \frac{iR}{L} \quad 3.17$$

Από τις εξισώσεις αυτές καταλήγουμε πως ελέγχοντας την τάση του κινητήρα, ελέγχουμε άμεσα και το ρεύμα, το οποίο μεταβάλει την ροπή του συστήματος επομένως και την μεταβολή της γωνίας και της γωνιακής ταχύτητας.

Από (5) και (6) και παίρνοντας την αυτεπαγωγή ως αμελητέα και μηδενίζοντας την μεταβολή ηλεκτρικού ρεύματος καθώς μιλάμε για DC κινητήρες, καταλήγουμε στην εξίσωση:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{K_t V}{JR} - \frac{bR + K_t^2}{JR} \frac{d\theta}{dt} - \frac{mgrsin(\theta)}{J} - \frac{csign\left(\frac{d\theta}{dt}\right)}{J} \quad 3.18$$

Εξαιτίας της γωνιακής περιστροφής του κινητήρα παράγεται μια δύναμη η κεντρομόλος που έχει κατεύθυνση προς το κέντρο του κινητήρα. Εξαιτίας του 3^o Νόμου του Νεύτωνα κάθε δύναμη έχει και μια ακριβώς αντίθετη με ίδιο μέτρο και αντίθετη κατεύθυνση, επομένως από το κέντρο του κινητήρα προς τα έξω παράγεται μια δύναμη αντίθετη της κεντρομόλου, η δύναμη αυτή ονομάζεται φυγόκεντρος δύναμη και είναι οι συνιστώσες f_{Oz} , f_{Oy} στον άξονα y,z.

Στον άξονα y:

$$\vec{f}_{Oy} = m\vec{a}_t \Rightarrow \vec{f}_{Oy} = m \frac{\vec{u}^2}{r} \Rightarrow f_{Oy} = m\omega^2 r sin\theta \quad 3.19$$

Στον άξονα z με τον ίδιο τρόπο βγαίνει:

$$f_{Oz} = -mg - m\omega^2 r cos\theta \quad 3.20$$

3.2.3 Προσομοίωση Μοντέλου Κινητήρα

Για την προσομοίωση του μοντέλου θα πρέπει να επιλύσουμε τις διαφορικές εξισώσεις που βρέθηκαν. Καθώς οι εξισώσεις έχουν πολλαπλές μεταβλητές καθώς και μη γραμμικές μεταβλητές θα επιλυθούν με την χρήση επαναληπτικών σχημάτων. Η μέθοδος που επιλέγουμε είναι η 4^{ης} τάξης Runge-Kutta καθώς με την μέθοδο αυτή αποφεύγουμε την λύση των παραγώγων της εξίσωσης¹¹. Η προσομοίωση υλοποιήθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού C++ ώστε να εκμεταλλευθεί η ταχύτητες που προσφέρει για περίπλοκους και πολλούς υπολογισμούς που απαιτεί για την μεγαλύτερη ακρίβεια του συστήματος.

Η εξίσωση 3.20 είναι 2^η τάξης ως προς θ, για αυτό τον λόγο θα χρειαστεί να την αναλύσουμε σε σύστημα δύο εξισώσεων.

$$\begin{cases} \theta = y_1 \\ \frac{d\theta}{dt} = y_2 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \frac{dy_1}{dt} = y_2 \\ \frac{dy_2}{dt} = \frac{K_t V}{JR} - \frac{bR + K_t^2}{JR} y_2 - \frac{mgrsin(y_1)}{J} - \frac{csign(y_2)}{J} \end{cases} \quad 3.21$$

Τα $y_1(0)$, $y_2(0)$, $y_2'(0)$ έχουν μηδενική τιμή καθώς ο κινητήρας εκείνη την στιγμή είναι ακίνητος επομένως και το ρεύμα, η γωνία και η γωνιακή ταχύτητα θα είναι μηδέν και h είναι το βήμα. Άρα :

$$f(t, y_1, y_2) = y_2 \quad 3.22$$

$$g(t, y_1, y_2) = \frac{K_t V}{JR} - \frac{bR + K_t^2}{JR} y_2 - \frac{m g r \sin(y_1)}{J} - \frac{c \operatorname{sign}(y_2)}{J} \quad 3.23$$

Τα βήματα υπολογίζονται ως εξής:

$$k_1 = h f(t_n, y_{1n}, y_{2n}) = h y_{2n} = h \omega \quad 3.24$$

$$l_1 = h g(t_n, y_{1n}, y_{2n}) = h \left(\frac{K_t i}{J} - \frac{b}{J} y_2 - \frac{m g r \sin(y_{1n})}{J} - \frac{c \operatorname{sign}(y_{2n})}{J} \right) \quad 3.25$$

Ομοίως για τα υπόλοιπα k, l αντικαθιστούμε κάθε φορά.

$$k_2 = h f \left(t_n + \frac{h}{2}, y_{1n} + \frac{k_1}{2}, y_{2n} + \frac{l_1}{2} \right), l_2 = h g \left(t_n + \frac{h}{2}, y_{1n} + \frac{k_1}{2}, y_{2n} + \frac{l_1}{2} \right) \quad 3.26$$

$$k_3 = h f \left(t_n + \frac{h}{2}, y_{1n} + \frac{k_2}{2}, y_{2n} + \frac{l_2}{2} \right), l_3 = h g \left(t_n + \frac{h}{2}, y_{1n} + \frac{k_2}{2}, y_{2n} + \frac{l_2}{2} \right) \quad 3.27$$

$$k_4 = h f(t_n + h, y_{1n} + k_3, y_{2n} + l_3), l_4 = h g(t_n + h, y_{1n} + k_3, y_{2n} + l_3) \quad 3.28$$

Έπομένως το επαναληπτικό σχήμα που αποκτάει οι εξισώσεις είναι της μορφής:

$$y_{1n+1} = y_{1n} + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad 3.29$$

$$y_{2n+1} = y_{2n} + \frac{1}{6} (l_1 + 2l_2 + 2l_3 + l_4) \quad 3.30$$

$\mu\varepsilon$,

$$\theta_{n+1} = \theta_n + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad 3.31$$

$$\omega_{n+1} = \omega_n + \frac{1}{6} (l_1 + 2l_2 + 2l_3 + l_4) \quad 3.32$$

3.2.4 Ανάλυση Γραφημάτων Κινητήρα

Η ανάλυση των γραφημάτων προσομοίωσης έχει ως στόχο να αποδώσει την κατανόηση της δυναμικής του κινητήρα και τη σχέση των παραμέτρων του με την κίνηση και την απόδοση του συστήματος. Μέσω των γραφημάτων, παρακολουθούμε τη χρονική εξέλιξη των βασικών φυσικών παραμέτρων, όπως η γωνία, η γωνιακή ταχύτητα, η δύναμη και η ροπή του κινητήρα. Τα γραφήματα αυτά παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για τη σταθερότητα του συστήματος, τη συμπειριφορά του κινητήρα κατά τη διάρκεια της επιτάχυνσης και της ακινητοποίησης, καθώς και τη συμβολή των διαφορετικών παραμέτρων στην απόδοση. Πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ δύο διαφορετικών προσεγγίσεων

προσομοίωσης:

(α) μιας προσομοίωσης που βασίζεται αποκλειστικά στις κινηματικές και δυναμικές σταθερές που αναφέρονται στη σχετική έρευνα⁷, και
(β) μιας δεύτερης προσομοίωσης που βασίζεται στα ίδια θεωρητικά μοντέλα, αλλά οι τιμές των σταθερών προσδιορίστηκαν πειραματικά, χρησιμοποιώντας τον πραγματικό κινητήρα που ενσωματώθηκε στο φυσικό ρομπότ της παρούσας εργασίας. Η σύγκριση αυτή αποσκοπεί στην αξιολόγηση της ακρίβειας του μοντέλου με θεωρητικά δεδομένα έναντι του μοντέλου με πραγματικά χαρακτηριστικά λειτουργίας.

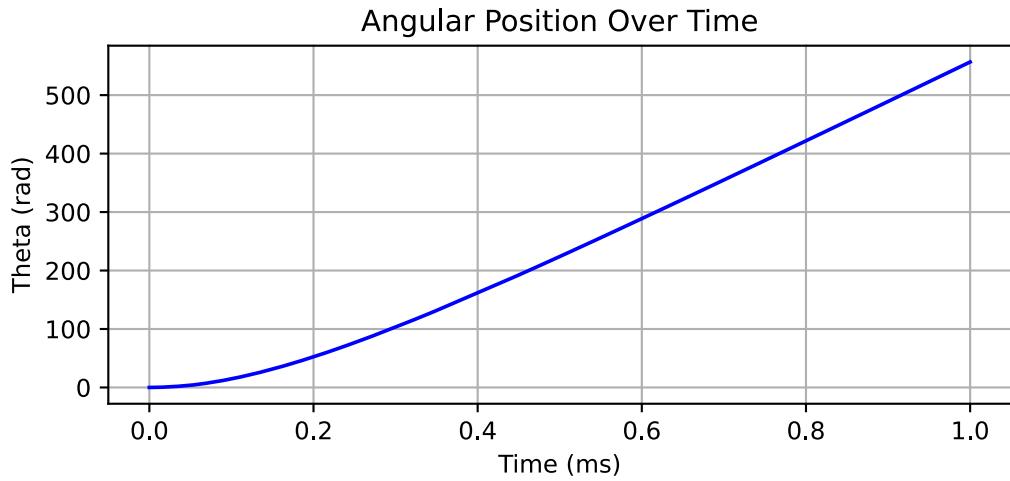
Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκριτικά οι βασικές σταθερές που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της δυναμικής του κινητήρα, όπως προκύπτουν:

Πίνακας 3.1: Πίνακας Συγκριτικών Σταθερών Κινητήρα

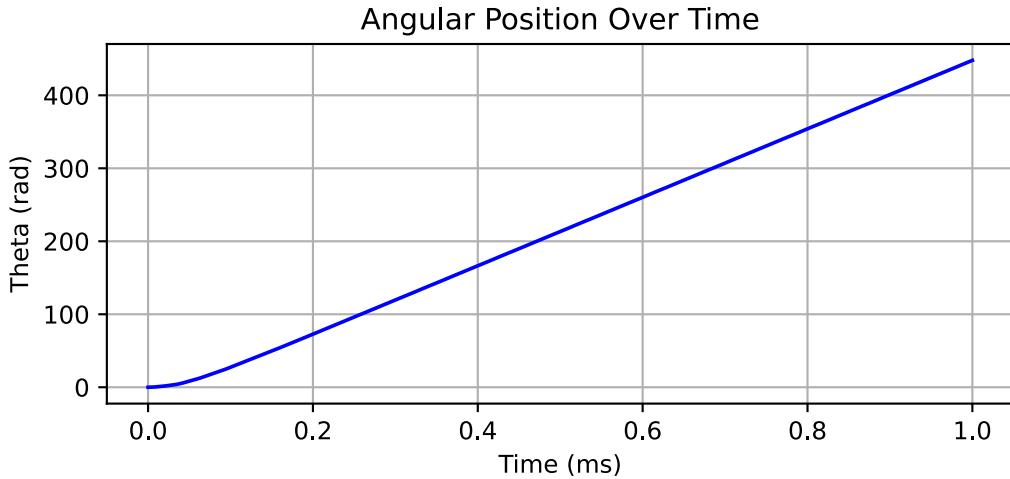
Σταθερά	Περιγραφή	Τιμή από έρευνα	Πειραματική τιμή
V [volt]	Τάση	0.65	0.65
R [Ω]	Αντίσταση περιέλιξης	10.7	10.71
	κινητήρα		
K _t [Nm/A]	Σταθερά ροπής	3.64×10^{-4}	8.373×10^{-4}
c [Nm]	Τριβή Coulomb	1.34×10^{-5}	1.17222×10^{-5}
b [Ns/m]	Ιξώδης τριβής	2.94×10^{-9}	2.61675×10^{-8}
J [kgm ²]	Ροπή αδράνειας	2.67×10^{-9}	3.4375×10^{-9}
r [mm]	Ακτίνα έκκεντρου	1.77	2.5
m [g]	Μάζα έκκεντρου	0.21	1.1
I _s [A]	Ρεύμα λειτουργίας	—	0.05
I _{ss} [A]	Ρεύμα εκκίνησης	—	0.014
ω_{ss} [rpm]			11000

1. Ανάλυση Γωνιακής Θέσης με χρόνο.

Η γωνιακή θέση Θ αυξάνεται σταδιακά και ομαλά με τον χρόνο, κάτι που μας δείχνει πως ο κινητήρας επιταχύνεται. Τα πρώτα 0.4 ms η αύξηση είναι μη γραμμική καθώς η γωνιακή επιτάχυνση είναι μη σταθερή. Μετά από αυτό το χρονικό ορόσημο, η γραμμή είναι περίπου ευθύγραμμη, γεγονός που υποδηλώνει ότι η γωνιακή ταχύτητα είναι σταθερή οπότε η γωνία αυξάνεται γραμμικά.



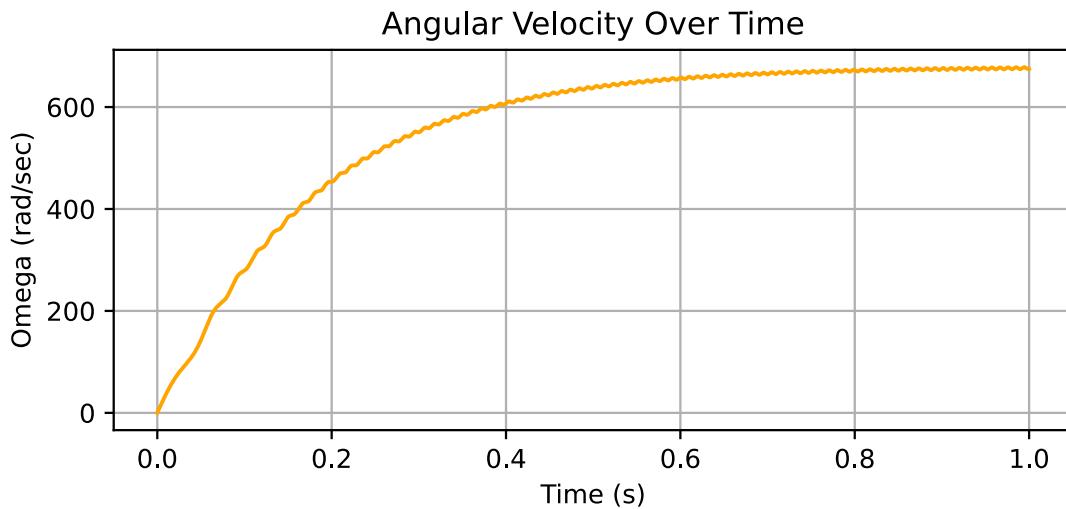
Εικόνα 3.2: Γωνία με Χρόνο από Σταθερές Έρευνας



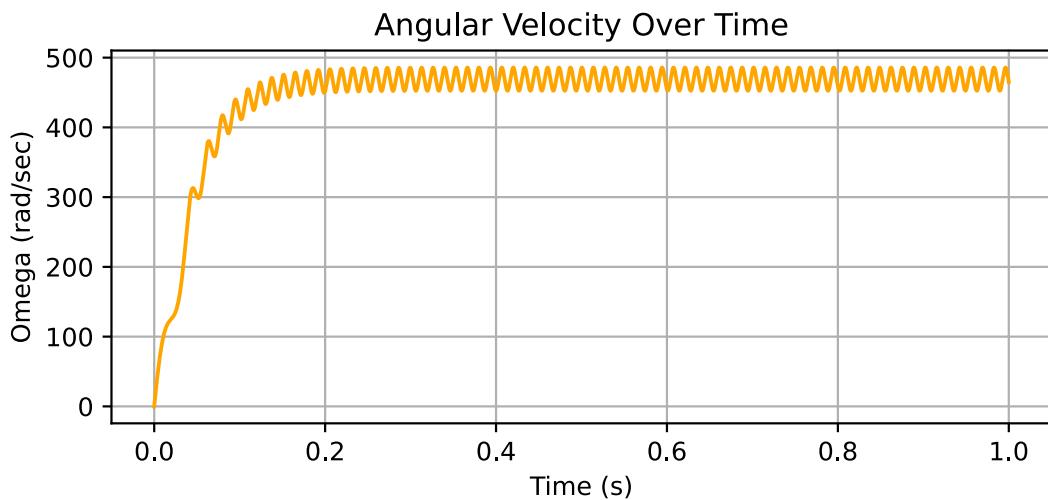
Εικόνα 3-3: Γωνία με Χρόνο από Πειραματικές Σταθερές

2. Ανάλυση Γωνιακής ταχύτητας με χρόνο.

Η γωνιακή ταχύτητα ω αυξάνεται από το μηδέν σχεδόν λογαριθμικά. Παρουσιάζει χαρακτηριστική καμπύλη με ραγδαία αύξηση τα πρώτα 0.4 ms, η οποία δείχνει ότι ο κινητήρας αρχικά επιταχύνει με ραγδαίο ρυθμό. Μετά τα πρώτα 0.4 ms η γωνιακή ταχύτητα αποκτά μια σταθερή ταχύτητα φτάνοντας την μέγιστη τιμή της. Επιπλέον η γωνιακή ταχύτητα αποκτά μια ημιτονοειδής συμπεριφορά το οποίο οφείλεται στον όρο του ημιτόνου στην διαφορική εξίσωση. Τέλος παρατηρούμε πως ο κινητήρας που χρησιμοποιήθηκε στο ρομπότ μέσο της προσομοίωσης παρουσιάζει μεγαλύτερο παλινδρομικό σήμα και μεγαλύτερη φασαρία, αλλά αποκτά μια παρόμοια συμπεριφορά και επίσης την μέγιστη σταθερή του ταχύτητα σε μικρότερο χρόνο.



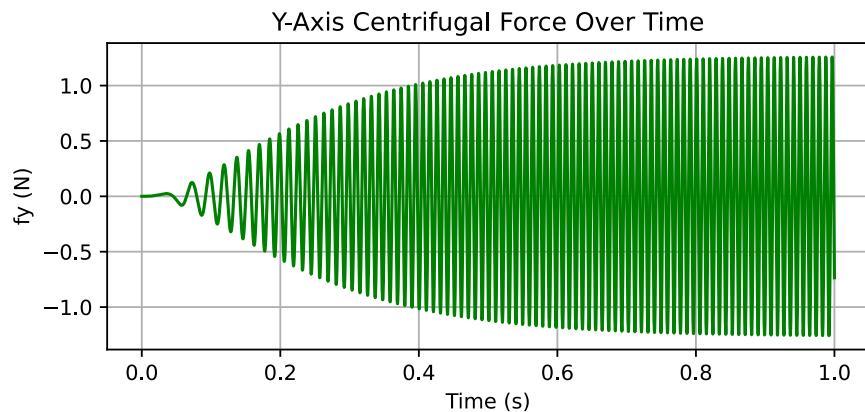
Εικόνα 3-4: Γωνιακή Ταχύτητα με Χρόνο από Σταθερές Έρευνας



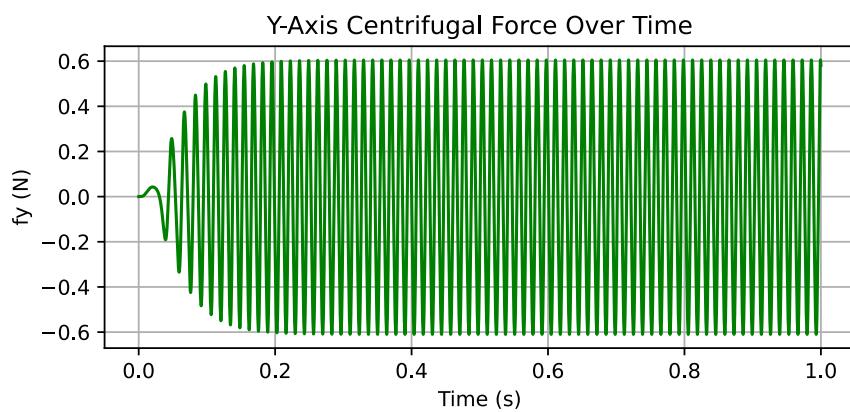
Εικόνα 3-5: Γωνιακή Ταχύτητα με Χρόνο από Πειραματικές Σταθερές

3. Γραφήματα Φυγοκεντρικής Δύναμης Οριζόντιου Άξονα

Η δύναμη στον οριζόντιο άξονα f_{Oy} μεταβάλλεται περιοδικά, με ταλαντώσεις που περιγράφονται από την ημιτονοειδείς συνάρτηση και συμφωνεί με την εξίσωση $f_{Oy} = m\omega^2 r \sin\theta$. Επιπλέον παρατηρείται πως όσο αυξάνεται η γωνιακή ταχύτητα, τόσο αυξάνεται το πλάτος της δύναμης και η πυκνότητά της.



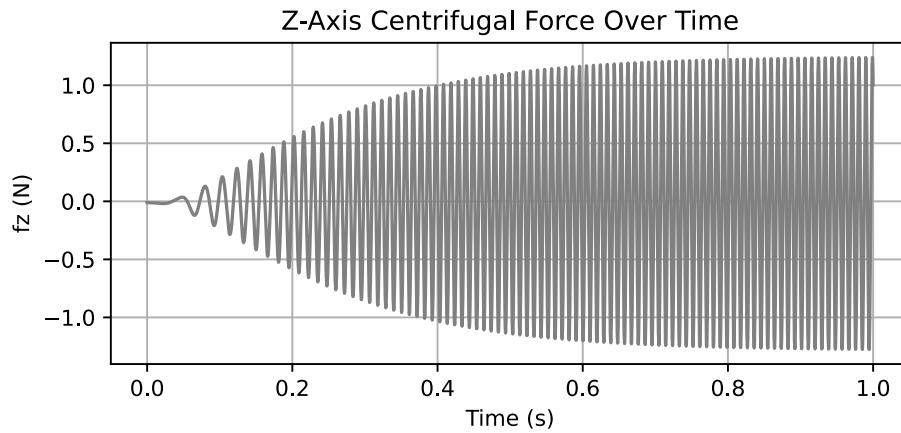
Εικόνα 3-6: Φυγόκεντρος Δύναμη Οριζόντιο Άξονα από Σταθερές Ερευνας



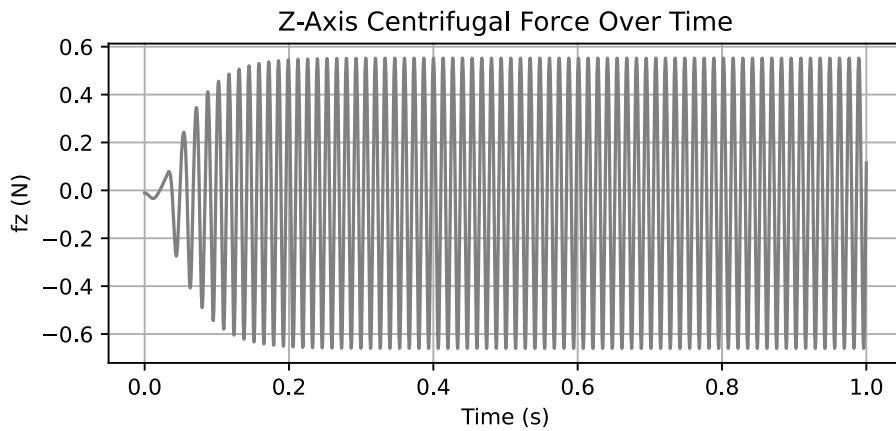
Εικόνα 3-7: Φυγόκεντρος Δύναμη Οριζόντιο Άξονα από Πειραματικές Σταθερές

Γραφήματα	Φυγοκεντρικής	Δύναμης	Κάθετο	Άξονα
-----------	---------------	---------	--------	-------

Η δύναμη στον οριζόντιο άξονα f_{Oz} μεταβάλλεται περιοδικά, με ταλαντώσεις που περιγράφονται από την συνημιτονοειδείς συνάρτηση και συμφωνεί με την εξίσωση 3.23. Επιπλέον παρατηρείται πως όσο αυξάνεται η γωνιακή ταχύτητα, τόσο αυξάνεται το πλάτος της δύναμης και η πυκνότητά της.



Εικόνα 3-8: Φυγόκεντρος Δύναμη Κάθετο Αξονα από Σταθερές της Έρευνας



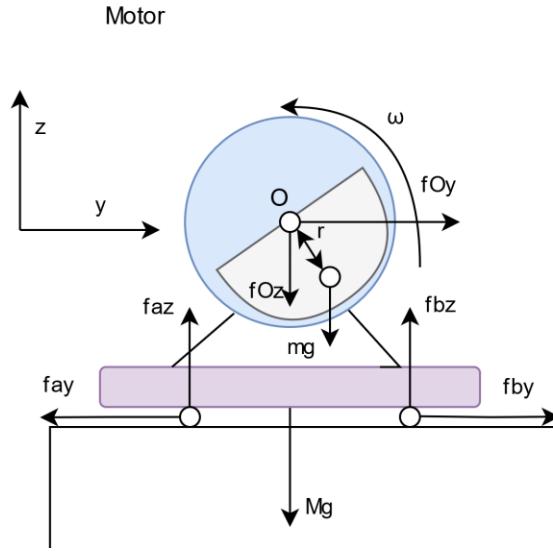
Εικόνα 3-9: Φυγόκεντρος Δύναμη Κάθετο Αξονα από Πειραματικές Σταθερές

3.3 Δυναμική Πλατφόρμας

Σε αυτή την ενότητα αναλύεται η κινηματική και η δυναμική της πλατφόρμας στις δύο διαστάσεις με την χρήση ενός ηλεκτρικού κινητήρα. Η πλατφόρμα επηρεάζεται από εξωτερικές δυνάμεις όπως η βαρύτητα, η αντίδραση από το δάπεδο και η τριβή. Επιπλέον, η λειτουργία του κινητήρα παράγει φυγόκεντρες και άλλες αδρανειακές δυνάμεις που επηρεάζουν την κίνησή της.

3.3.1 Μοντελοποίηση πλατφόρμας

Σε αυτό το τμήμα γίνεται η μαθηματική περιγραφή της πλατφόρμας ως ενός συστήματος υπό την επίδραση εξωτερικών και εσωτερικών δυνάμεων.



Εικόνα 3-10: Μοντέλο ενός Βαθμού Ελευθερίας

Δυνάμεις που Επηρεάζουν την Πλατφόρμα

Σε μια πιο γενική μορφή του συστήματος, υπάρχουν τέσσερεις βασικές δυνάμεις επηρεάζουν την συμπεριφορά της πλατφόρμας:

- **Συνολικό Βάρος της Πλατφόρμας:** Η συνολική δύναμη της βαρύτητας είναι:

$$W = Mg \quad 3.33$$

Όπου M είναι η συνολική μάζα της πλατφόρμας (μαζί με τον κινητήρα) και g η επιτάχυνση της βαρύτητας στην Γη.

- **Αντίδραση από το Δάπεδο:** Σύμφωνα με τον 3^ο Νόμο του Νεύτωνα, το δάπεδο ασκεί δύναμη αντίδρασης ίση και αντίθετη με το βάρος, στο δικό μας σύστημα καθώς υπάρχει και κατακόρυφη κίνηση εξαρτώμενη από την φάση του έκκεντρου του κινητήρα, και με οποιαδήποτε άλλη κάθετη δύναμη ασκείται στην πλατφόρμα:

$$N = Mg - f_{Oz} \quad 3.34$$

- **Δύναμη από τον Κινητήρα:** Καθώς το έκκεντρο του κινητήρα περιστρέφεται, δημιουργείται φυγόκεντρη δύναμη που τείνει να απομακρύνει τα μέρη της πλατφόρμας από τον άξονα περιστροφής:

$$\vec{f} = m\vec{a}_t \quad 3.35$$

- **Τριβή της Πλατφόρμας με το Δάπεδο:** Η πλατφόρμα υπόκειται σε τριβή τόσο στο σημείο επαφής της με το δάπεδο όσο και λόγω εσωτερικών μηχανισμών. Η γενική μορφή της δύναμης της τριβής έχει τη μορφή:

$$F_{fr} = N\mu \quad 3.36$$

Αναλυτική Μορφή Δυνάμεων του Συστήματος:

Σύμφωνα με τον 2^o Νόμο του Νεύτωνα, η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται σε ένα σώμα ισούται με τον ρυθμό μεταβολής της ορμής του σώματος, δηλαδή με την επιτάχυνση του σώματος επι της μάζας του¹¹, επομένως:

Για τον οριζόντιο άξονα (y) :

$$M \frac{d^2y}{dt^2} = f_{oy} - f_{fr} = m\omega^2 r \sin \theta - f_{fr} \quad 3.37$$

Για τον κατακόρυφο άξονα (z):

$$0 = f_{az} + f_{bz} - (Mg - f_{oz}) \quad 3.38$$

Στη πλατφόρμα ασκούνται διάφορες δυνάμεις, οι οποίες καθορίζουν την κίνησή της. Το συνολικό βάρος του δαπέδου εξισορροπείται από την δύναμη αντίδρασης του δαπέδου σύμφωνα με τον 3^o νόμο του Νεύτωνα.⁸ Επιπλέον, η δύναμη τριβής αντιστέκεται στην κίνησης και μπορεί να περιγραφεί μέσω της τριβής Coulomb:

$$f_{fr} = \begin{cases} f_c sgn\left(\frac{dy}{dt}\right), & y \neq 0 \\ f_{oy}, & \|f_{oy}\| < f_c, \frac{dy}{dt} = 0, \frac{d^2y}{dt^2} = 0 \\ f_c sgn(f_{oy}), & \|f_{oy}\| > f_c, \frac{dy}{dt} = 0, \frac{d^2y}{dt^2} \neq 0 \end{cases} \quad 3.39$$

Όπου $sgn(dy/dt)$ είναι η συνάρτηση πρόσημου της ταχύτητας, που καθορίζει την κατεύθυνση της τριβής:

$$sgn\left(\frac{dy}{dt}\right) = \begin{cases} +1, & \frac{dy}{dt} > 0 \\ 0, & \frac{dy}{dt} = 0 \\ -1, & \frac{dy}{dt} < 0 \end{cases} \quad 3.40$$

Τέλος οι εξισώσεις κίνησης παράγονται από την σχέση 3.35 και καταλήγουμε στην συνολική εξίσωση κίνησης της πλατφόρμας:

$$a = \frac{f_{oy} - f_{fr}}{M} \quad 3.41$$

Με την επιτάχυνση μπορεί να βρεθεί και η ταχύτητα της πλατφόρμας και η μετατόπισης της από της βασικές εξισώσεις κίνησης:

$$v_{n+1} = v_n + a_n dt \quad 3.42$$

$$x_{n+1} = x_n + v_n dt + \frac{1}{2} a_n dt^2 \quad 3.43$$

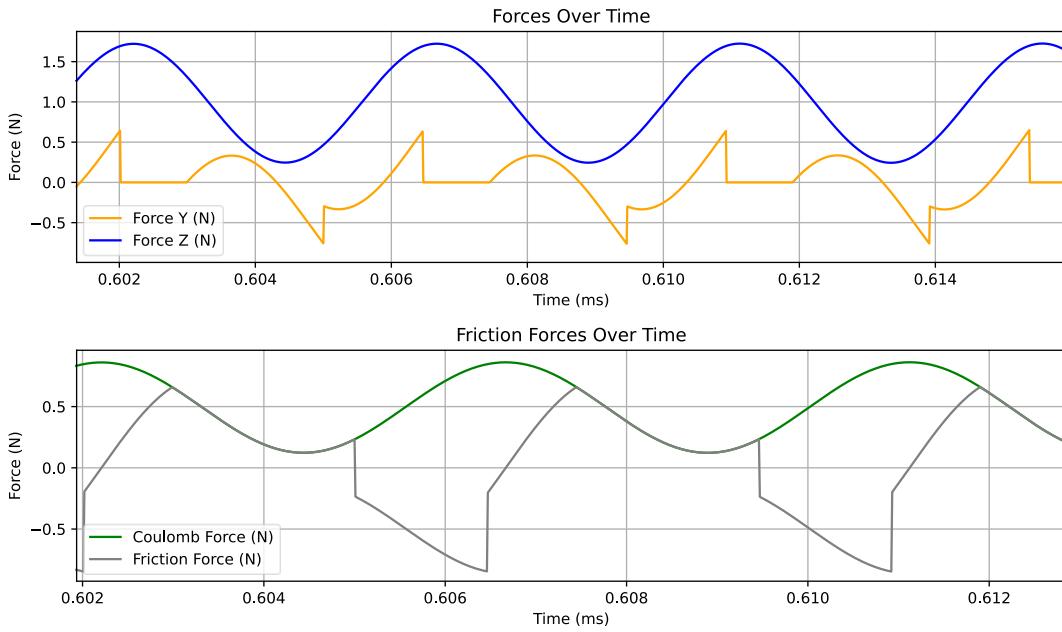
3.3.2 Προσομοίωση και Ανάλυση Δυνάμεων Πλατφόρμας

Η προσομοίωση και η ανάλυση των γραφημάτων προσομοίωσης έχει ως στόχο να αποδώσει την κατανόηση της δυναμικής της πλατφόρμας με την χρήση ενός κινητήρα, για την κίνηση σε δύο διαστάσεις, και τη σχέση των παραμέτρων του με την κίνηση και την απόδοση του συστήματος. Μέσω των γραφημάτων, παρακολουθούμε τη απόδοση των παραμέτρων για τις ελάχιστες και μέγιστες πιθανές τιμές του κινητήρα, καθώς και διάφορες άλλες παραμέτρους που μπορούμε να παρέχουμε. Συγκρίνουμε πάλι δύο προσομοιώσεις, μια με τις σταθερές από την έρευνα⁷ (1) και μια με τον κινητήρα του ρομπότ (2). Από τα διαγράμματα φαίνονται οι παρόμοιες συμπεριφορές τις πλατφόρμας σε σχέση με τους δύο κινητήρες.

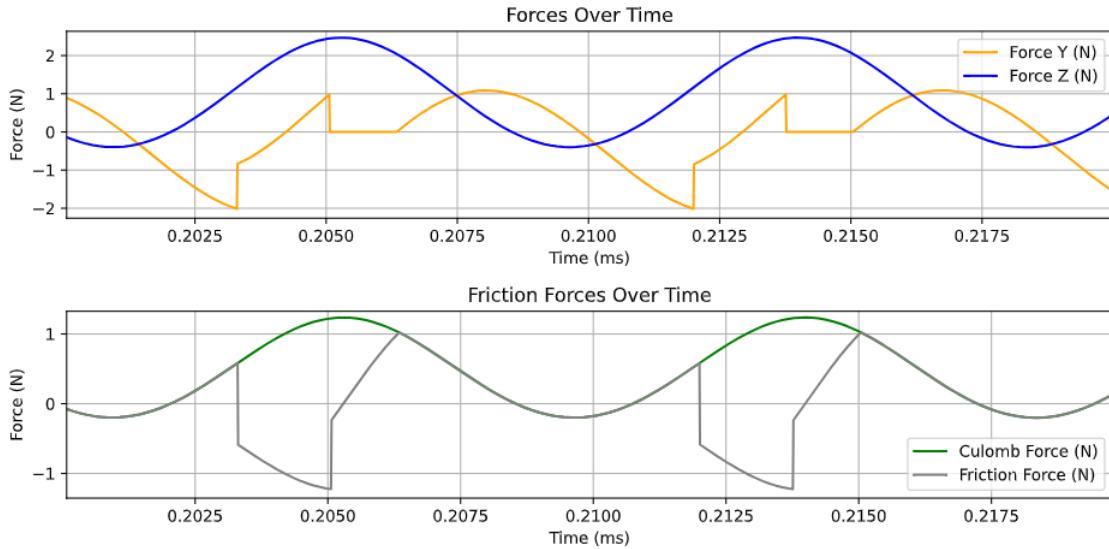
1. Δυνάμεις

Πλατφόρμας

Παρακάτω παρουσιάζονται οι συνολικές δυνάμεις που ασκούνται στην πλατφόρμα από τον κινητήρα στις δύο διαστάσεις. Παρατηρείται αρχικά η διαφορά μεταξύ την δύναμη στον άξονα Y (οριζόντιο) και στον άξονα Z (κατακόρυφο) καθώς στον οριζόντιο βοηθάει ή αντιστέκεται μόνο το βάρος το οποίο είναι ένας σταθερός αριθμός. Στον οριζόντιο άξονα συμβάλει και η τριβή του δαπέδου με την πλατφόρμα η οποία έχει κάθε φορά αντίθετη κατεύθυνση με την κίνηση της πλατφόρμας. Για αυτόν το λόγο σε κάποια σημεία το πλάτος της δύναμης είναι σχεδόν διπλάσιο της δύναμης στον κατακόρυφο άξονα, ενώ σε άλλες φάσεις είναι μικρότερο. Στο δεύτερο διάγραμμα απομονώνονται οι τριβές της πλατφόρμας για την ανάλυση η οποίες είναι η τριβή coulomb με συντελεστή τριβής δαπέδου 0.5 και η συνολική τριβή του συστήματος από την εξίσωση 3.42.



Εικόνα 3-11: (α) Συνολικές δυνάμεις που ασκούνται στην πλατφόρμα, (β) Τριβή Coulomb και συνολική τριβή πλατφόρμας (1).



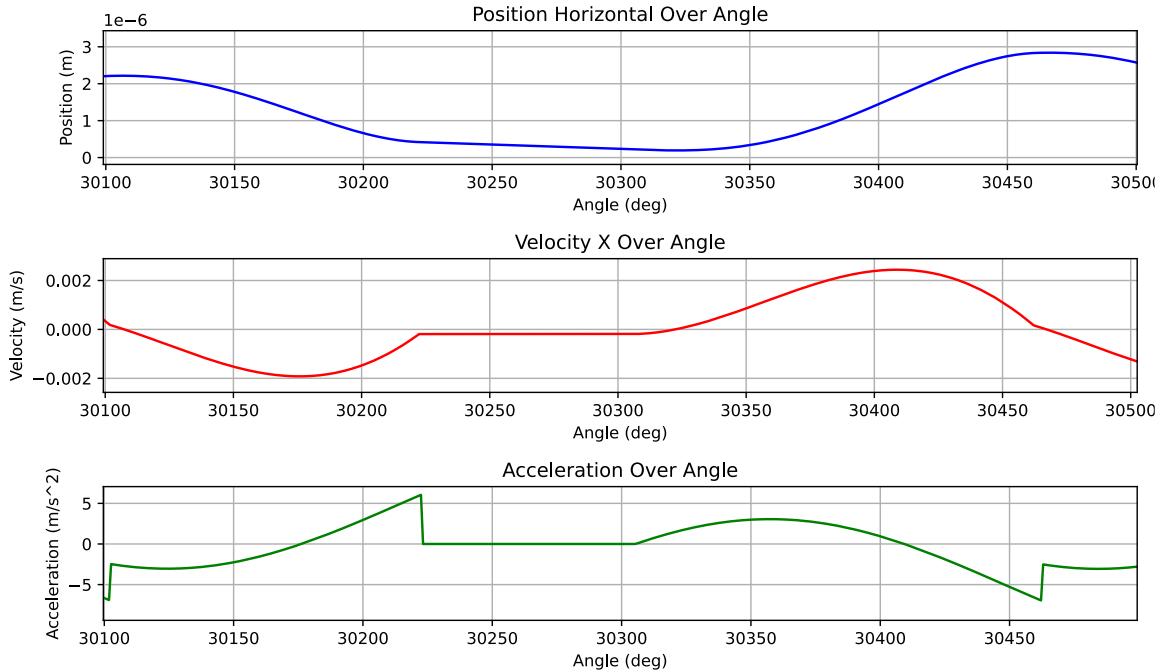
Εικόνα 3-12: (α) Συνολικές δυνάμεις που ασκούνται στην πλατφόρμα, (β) Τριβή Coulomb και συνολική τριβή πλατφόρμας (2).

2. Κίνηση

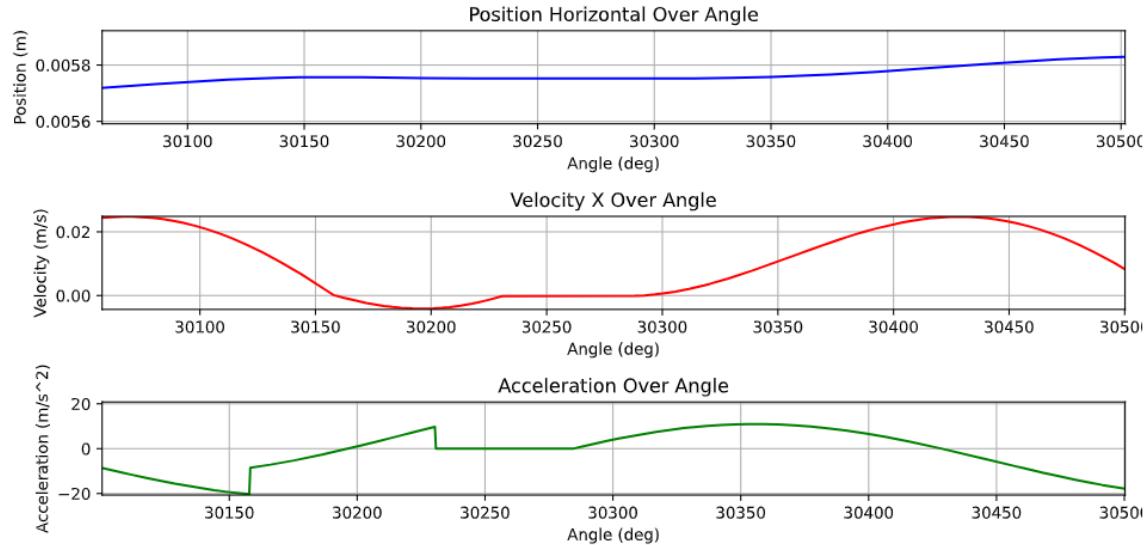
Πλατφόρμας

Παρακάτω παρουσιάζεται μια αναλυτική ερμηνεία των τριών διαγραμμάτων (Θέση/Γωνία, Ταχύτητα/Γωνία, Επιτάχυνση/Γωνία) και της σχέσης τους με τη φάση περιστροφής του κινητήρα. Στο συγκεκριμένο σενάριο, ο οριζόντιος άξονας

αναπαριστά τη γωνία του κινητήρα (σε μοίρες), ενώ οι κατακόρυφοι άξονες δείχνουν τη θέση (m), την ταχύτητα (m/s) και την επιτάχυνση (m/s²) της πλατφόρμας αντίστοιχα. Ο κινητήρας περιστρέφεται με τάση 1 (volt) και ταχύτητα ~720 (rad/sec) και η μάζα της πλατφόρμας στην προσομοίωση είναι 100gr.



Εικόνα 3-13: (α) Μετατόπιση, (β) ταχύτητα και (γ) επιτάχυνση της πλατφόρμας εξατίας των δυνάμεων από σχήμα 7. (1)



Εικόνα 3-14: (α) Μετατόπιση, (β) ταχύτητα και (γ) επιτάχυνση της πλατφόρμας εξατίας των δυνάμεων από σχήμα 7. (2)

Θέση X συναρτήσει της Γωνίας (α)

Στο πάνω διάγραμμα η καμπύλη κυμαίνεται γύρω από μια κεντρική τιμή, παρουσιάζονται μικρές ταλαντώσεις στη θέση.

Παρά τις ταλαντώσεις, παρατηρείται μια γενική τάση μετατόπισης προς τα εμπρός. Αυτό υποδηλώνει ότι, κατά μέσο όρο, η πλατφόρμα μετατοπίζεται προς μία κατεύθυνση αντί να παραμένει εντελώς στατική ή να κινείται τυχαία. Η πλατφόρμα με τον έναν κινητήρα με μεγάλη μάζα μετατοπίζεται κατά ένα μικρόμετρο σε μία περιστροφή του έκκεντρου του κινητήρα.

Ταχύτητα X συναρτήσει της Γωνίας (β)

Στο μεσαίο διάγραμμα, η ταχύτητα παρουσιάζει εναλλαγές πρόσημου (θετική και αρνητική), γεγονός που δείχνει ότι η πλατφόρμα άλλοτε κινείται προς τα εμπρός και άλλοτε επιβραδύνεται ή οπισθοχωρεί.

Η ακριβής φάση του έκκεντρου του κινητήρα καθορίζει πότε η ταχύτητα γίνεται θετική ή αρνητική. Όταν η εκκεντρική μάζα του κινητήρα βρίσκεται σε θέση που «σπρώχνει» την πλατφόρμα προς τα εμπρός, βλέπουμε θετική ταχύτητα. Αντίθετα, σε άλλη φάση της περιστροφής, η πλατφόρμα μπορεί να επιβραδύνεται ή να κινείται ελαφρώς προς τα πίσω.

Επιτάχυνση συναρτήσει της Γωνίας (γ)

Στο κάτω διάγραμμα, η επιτάχυνση είναι επίσης ταλαντωτική. Όταν η επιτάχυνση είναι θετική, η πλατφόρμα ωθείται εμπρός, όταν είναι αρνητική, είτε τείνει να κινηθεί προς την αντίθετη κατεύθυνση είτε επιβραδύνεται.

Οι κορυφές τις καμπύλης αντιστοιχούν σε κρίσιμα σημεία της περιστροφής του κινητήρα, όπου η φυγόκεντρη δύναμη και η τριβή αλληλοεπιδρούν με τέτοιον τρόπο ώστε να αλλάζουν επιτάχυνση.

Ερμηνεία της Τελικής Συμπεριφοράς

Η πλατφόρμα δεν κινείται γραμμικά αλλά ταλαντώνεται γύρω από μία μέση θέση, με περιόδους επιτάχυνσης και επιβράδυνσης.

Η καθαρή μετατόπιση προς τα εμπρός οφείλεται στο γεγονός ότι οι φάσεις όπου η δύναμη είναι αρκετή για να υπερνικήσει την τριβή και να δώσει ώθηση προς τα εμπρός έχουν αθροιστικά μεγαλύτερο αποτέλεσμα σε σχέση με τις φάσεις όπου η πλατφόρμα κινείται προς τα πίσω ή μένει σχεδόν σταθερή.

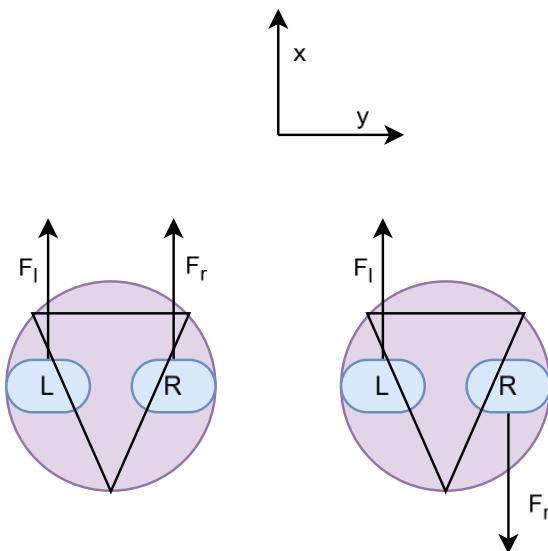
Το φαινόμενο αυτό είναι τυπικό σε κινήσεις με δονήσεις, μια φάση της κυκλικής κίνησης αυξάνει την ταχύτητα της πλατφόρμας, σε άλλη φάση της κίνησης είναι αρνητική και σε μια φάση οι δυνάμεις που προκαλεί το έκκεντρο δεν προκαλούν κάποια κίνηση και η πλατφόρμα παραμένει σταθερή. Τελικά ο συνδυασμός οδηγεί σε συνολική μετατόπιση σε μία διεύθυνση.

3.4 Δυναμική Ρομπότ

Η παρούσα ενότητα παρέχει μία εις βάθος μελέτη της κινηματικής και δυναμικής ενός μικρο-ρομπότ με δύο εκκεντρικούς κινητήρες, σχεδιασμένου να παράγει 2-DOF κίνηση (γραμμική και περιστροφική) μέσω ελέγχου γωνιακής ταχύτητας

3.4.1 Μοντελοποίηση Δυνάμεων Συστήματος

Σε αυτό το τμήμα θα γίνει η μαθηματική μοντελοποίηση του τελικού ρομποτικού συστήματος.



Εικόνα 3-15: Κάτοψη microrobot: αριστερά γραμμική, δεξιά περιστροφική

Το ρομπότ μοντελοποιείται ως ομογενής δίσκος μάζας M , και διαμέτρου l . Θα έχει δύο dc κινητήρες δόνησης με έκκεντρα σώματα m και ακτίνες r , σε απόσταση d από το κέντρο του δίσκου. Για να πραγματοποιήσουμε κίνηση 2-βαθμών ελευθερίας, δηλαδή να μπορεί να κινηθεί και γραμμικά στους άξονες αλλά και περιστροφικά. Αυτό πραγματοποιείται με τον έλεγχο της γωνιακής ταχύτητας των έκκεντρων καθώς είναι η αιτία που προκαλείται η φυγόκεντρος δύναμη.

Το ρομποτικό σύστημα περνάει από τις πιθανές καταστάσεις.

1. Στάσιμο: Όταν η γωνιακές ταχύτητες δεν είναι αρκετές ώστε το σώμα να ξεπεράσει την τριβή και να μετακινηθεί.

2. Ολίσθηση: Όταν οι γωνιακές ταχύτητες είναι μεγαλύτερες από την ελάχιστη δυνατή γωνιακή ταχύτητα $\omega_{\text{threshold}}$ ώστε το σώμα να ξεπεράσει την τριβή και να κινηθεί είτε γραμμικά είτε περιστροφικά.
3. Ανατροπή: Όταν οι γωνιακές ταχύτητες υπερβαίνουν ένα όριο, ωπ̄ το σώμα χάνει την σταθερότητα του και ανατρέπεται.

Φυγόκεντρες Δυνάμεις

Οι εκκεντρικές μάζες παράγουν αδρανειακές φυγοκεντρικές δυνάμεις από 3.22, 3.23.

$$f_i = m\omega_i^2 r \begin{pmatrix} \sin(\theta_i) \\ -\cos(\theta_i) \end{pmatrix}, i \in \{L, R\} \quad 3.44$$

3.4.1.1 Σύγχρονη Κίνηση

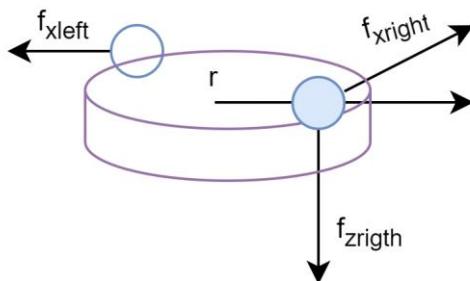
Σύγχρονη κίνηση έχουμε όταν οι φάσεις των γωνιακών ταχυτήτων είναι ίσες, τότε το σώμα εκτελεί καθαρά γραμμική ή περιστροφική: $\omega_{\text{left}} = \omega_{\text{right}} = \omega$ και $\theta_{\text{left}} = \theta_{\text{right}} = \theta$ η συνολική δύναμη που δημιουργείται στον άξονα X και Z από τους κινητήρες θα είναι το άθροισμα των φυγόκεντρων δυνάμεων για τον άξονα X (42) και το άθροισμα των φυγόκεντρων δυνάμεων με την συνεισφορά των μαζών των έκκεντρων για τον άξονα Z:

$$F_x(t) = 2m\omega^2 r \sin(\theta) \quad 3.45$$

$$F_z(t) = -2mg - 2m\omega^2 r \cos(\theta) \quad 3.46$$

3.4.1.2 Ασύγχρονη Κίνηση

Ασύγχρονη κίνηση ονομάζεται η κίνηση που εκτελεί το σώμα όταν οι φάσεις των γωνιακών ταχυτήτων των έκκεντρων είναι διαφορετικές.



Εικόνα 3-16: Ασύγχρονη περιστροφή κινητήρων

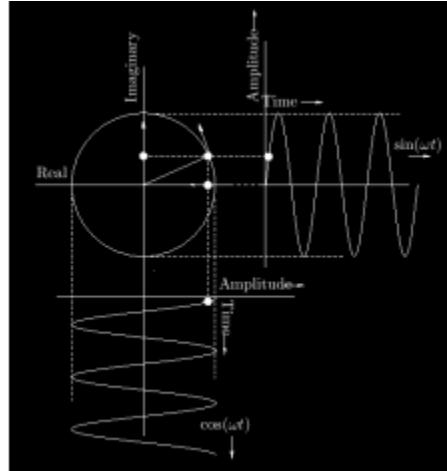
Η οριζόντια δύναμη $F_x(t)$ είναι κάθετη στην ακτίνα του κύκλου που περιγράφει το σώμα και μεταβάλλεται με το ημίτονο, καθώς το ημίτονο περιγράφει την αλλαγή της γωνίας στην κυκλική κίνηση ως προς την οριζόντια διάσταση. Η κατακόρυφη δύναμη $F_z(t)$, είναι κάθετη στην επιφάνεια του κύκλου επομένως περιγράφεται από την τριγωνομετρική συνάρτηση του συνημίτονου.⁴

Οι δυνάμεις που θα προκαλούν οι κινητήρες:

$$F_x(t) = -m\omega_{right}^2 r \sin(\theta_{right}) + m\omega_{left}^2 r \sin(\theta_{left}) \quad 3.47$$

Επιπλέον καθώς $\cos(-x) = \cos(x)$ η εξίσωση της συνολικής δύναμης στον άξονα Z:

$$F_z(t) = -2mg - m\omega_{right}^2 r \cos(\theta_{right}) - m\omega_{left}^2 r \cos(\theta_{left}) \quad 3.48$$



Εικόνα 3-17: Ασύγχρονη συχνότητα κινητήρων

Οι ροπές υπολογίζονται πολλαπλασιάζοντας τη δύναμη με την απόσταση από το κέντρο περιστροφής. Η ροπή στον άξονα X προκύπτει από την κατακόρυφη συνιστώσα της δύναμης, η οποία είναι προσκείμενη στην γωνία περιστροφής, επομένως υπολογίζεται με βάση το συνημίτονο. Η ροπή στον άξονα Z προκύπτει από την οριζόντια συνιστώσα δύναμης, που είναι κάθετη στην ακτίνα περιστροφής, για αυτό υπολογίζεται βάση το ημίτονο. Οι ροπές που θα προκαλούν οι κινητήρες:

$$\begin{aligned} M_x(t) &= F_x(t)d \\ M_x(t) &= -dm\omega_{right}^2 r \cos(\theta_{right}) + dm\omega_{left}^2 r \cos(\theta_{left}) \end{aligned} \quad 3.49$$

$$\begin{aligned} M_z(t) &= F_z(t)d \\ M_z(t) &= -dm\omega_{right}^2 r \sin(\theta_{right}) - dm\omega_{left}^2 r \sin(\theta_{left}) \end{aligned} \quad 3.50$$

3.4.2 Εξισώσεις Κίνησης Συστήματος

Για την σταθεροποίηση της πλατφόρμας με το έδαφος αλλά και την ελαχιστοποίηση των τριβών, επιλέχθηκαν τρία σημεία επαφής της πλατφόρμας με το έδαφος για να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα ανατροπής του ρομπότ. Τα σημεία βρίσκονται στις 30° , 150° και 270° γωνιακές θέσεις του δίσκου και απέχουν απόσταση ίση με την ακτίνα του δίσκου. Η κατανομή των κανονικών δυνάμεων στα σημεία επαφής που ασκούνται από το

βάρος και την συνολική φυγόκεντρο δύναμη των κινητήρων στον άξονα Z βγαίνει από τους τύπους:

$$N_A = \frac{Mg - f_{oz}}{3} + \frac{M_X \cdot r \cdot \cos(\theta_A)}{3 \cdot r} \quad 3.51$$

$$N_B = \frac{Mg - f_{oz}}{3} + \frac{M_X \cdot r \cdot \cos(\theta_B)}{3 \cdot r} \quad 3.52$$

$$N_C = \frac{Mg - f_{oz}}{3} + \frac{M_X \cdot r \cdot \cos(\theta_C)}{3 \cdot r} \quad 3.53$$

Υπολογισμός Γωνιακής και Γραμμικής επιτάχυνσης της πλατφόρμας:

Από τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα γνωρίζουμε πως η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται σε ένα σώμα, ισούται με τον ρυθμό μεταβολής της ορμής του σώματος⁴ και από 3.40, 3.41:

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = F_x(t) - \sum_i f_{fr,i} \cos(\varphi_i), \quad i=\{a, b, c, d, e\} \quad 3.54$$

$$M \frac{d^2y}{dt^2} = - \sum_i f_{fr,i} \sin(\varphi_i), \quad i=\{a, b, c, d, e\} \quad 3.55$$

Με $f_{fr,i}$ η τριβή Coulomb σε κάθε σημείο επαφής 3.43 για την κατεύθυνση των δυνάμεων. Αυτό μπορεί να μας δώσεις τις γραμμικές επιταχύνσεις στους άξονες x-y:

$$a_x = \frac{F_x(t) - f_{fr,A} \cdot \cos(\theta_A) - f_{fr,B} \cdot \cos(\theta_B) - f_{fr,C} \cdot \cos(\theta_C)}{M} \quad 3.56$$

$$a_y = \frac{-f_{fr,A} \cdot \sin(\theta_A) - f_{fr,B} \cdot \sin(\theta_B) - f_{fr,C} \cdot \sin(\theta_C)}{M} \quad 3.57$$

Με τον υπολογισμό των γραμμικών επιταχύνσεων υπολογίζονται οι γραμμικές ταχύτητες στους άξονες x-y:

$$v_{n+1}^x = v_n^x + a_n^x t \quad 3.58$$

$$v_{n+1}^y = v_n^y + a_n^y t \quad 3.59$$

Με τον υπολογισμό της ‘τοπικής’ ταχύτητας που ασκείται σε κάθε άξονα μπορούμε να υπολογίσουμε την γενική ταχύτητα του ρομπότ στου άξονες X-Y της επιφάνειας.

$$v_{n+1}^X = v_n^x * \cos(\theta_n) - v_n^y * \sin(\theta_n) \quad 3.60$$

$$v_{n+1}^Y = v_n^x * \sin(\theta_n) + v_n^y * \cos(\theta_n) \quad 3.61$$

Υπολογισμός της θέσης του κινητήρα:

$$x_{n+1} = x_n + v_n^X dt - \frac{1}{2} a_n^x dt^2 \quad 3.62$$

$$y_{n+1} = y_n + v_n^y dt - \frac{1}{2} a_n^y dt^2 \quad 3.63$$

Από τον θεμελιώδη Νόμος της κίνησης βγαίνει με τον ίδιο τρόπο για την περιστροφική κίνηση:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = \sum_i r_i x f_i = \sum_i \tau_i \quad 3.64$$

$$a = \frac{M_z(t) - r_A \cdot f_{fr,A} \cdot \sin(\theta_A) - r_B \cdot f_{fr,B} \cdot \sin(\theta_B) - r_C \cdot f_{fr,C} \cdot \sin(\theta_C)}{I} \quad 3.65$$

Όπου r_i η απόσταση των σημείων επαφής από τον κέντρο του ομόκεντρου κύκλου και $\dot{\alpha}_i$ η ροπή αδράνειας της πλατφόρμας, που εκφράζεται από τη ροπή αδράνειας ενός κυλίνδρου που περιστρέφεται γύρω από το κέντρο βάρους του και δίνεται από τον τύπο⁴:

$$I = \frac{1}{2} Mr^2 \quad 3.66$$

Επομένως, η γωνιακή ταχύτητα δίνεται από τον τύπο:

$$\omega_{n+1} = \omega_n + a_n \cdot dt \quad 3.67$$

Μέσο της γωνιακής ταχύτητας και της γωνιακής επιτάχυνσης καταλήγουμε στην γωνιακή μετατόπιση της πλατφόρμας για συγκεκριμένο χρόνο:

$$\theta_{n+1} = \theta_n + \omega_n \cdot dt + \frac{1}{2} a_n \cdot dt^2 \quad 3.68$$

Τέλος για τον υπολογισμό των τριβών στα σημεία επαφής είναι απαραίτητος ο υπολογισμός τις ταχύτητας στο κάθε σημείο επαφής και τις δύναμης που ασκείται στο σημείο αυτό καθώς η τριβή είναι πάντα αντίθετη στην κατεύθυνση κίνησης του σώματος⁴.

$$v_{n+1}^{Ax} = v_n^x - \omega_n r \sin(\theta_A), \quad v_{n+1}^{Ay} = v_n^y + \omega_n r \cos(\theta_A) \quad 3.69$$

$$v_A = v_n^{Ax} \cos(\theta_A) + v_n^{Ay} \sin(\theta_A) \quad 3.70$$

$$v_{n+1}^{Bx} = v_n^x - \omega_n r \sin(\theta_B), \quad v_{n+1}^{By} = v_n^y + \omega_n r \cos(\theta_B) \quad 3.71$$

$$v_B = v_n^{Bx} \cos(\theta_B) + v_n^{By} \sin(\theta_B) \quad 3.72$$

$$v_{n+1}^{Cx} = v_n^x - \omega_n r \sin(\theta_C), \quad v_{n+1}^{Cy} = v_n^y + \omega_n r \cos(\theta_C) \quad 3.73$$

$$v_C = v_n^{Cx} \cos(\theta_C) + v_n^{Cy} \sin(\theta_C) \quad 3.74$$

Επομένως με την χρήση της εξίσωσης 3.41 μπορεί να βρεθεί η τριβή σε κάθε σημείο επαφής.

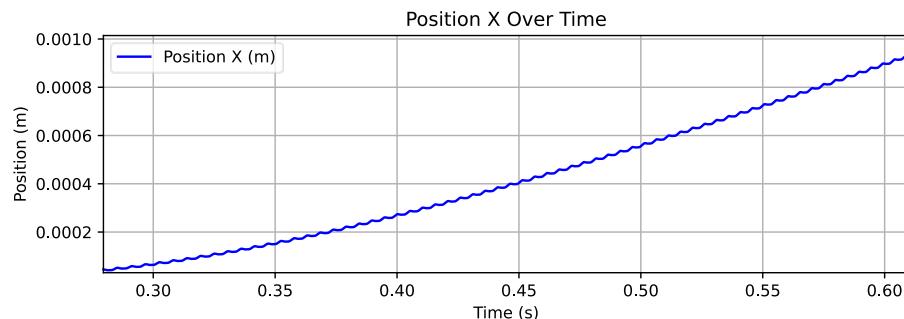
3.4.3 Προσομοίωση και Ανάλυση Κίνησης Ρομποτικού Συστήματος

Σε αυτή την υποενότητα θα παρουσιάσουμε λεπτομερή ανάλυση της κίνησης του τελικού ρομποτικού συστήματος, όπως προέκυψε από την διενέργεια τριών κατηγοριών προσομοιώσεων: (α) καθαρά γραμμική κίνηση, (β) καθαρά περιστροφική κίνηση και (γ) ασύγχρονη (μικτή) κίνηση. Ξεκινώντας με τη σύγκριση της συμπεριφοράς του συστήματος υπό την ταυτόχρονη ενεργοποίηση δύο επενεργητών σε σχέση με τις προσομοιώσεις ενός κινητήρα, θα περάσουμε στη σχολαστική μελέτη των μετρήσεων θέσης, ταχύτητας, επιτάχυνσης, καθώς και των παραγόμενων δυνάμεων και ροπών σε κάθε περίπτωση.

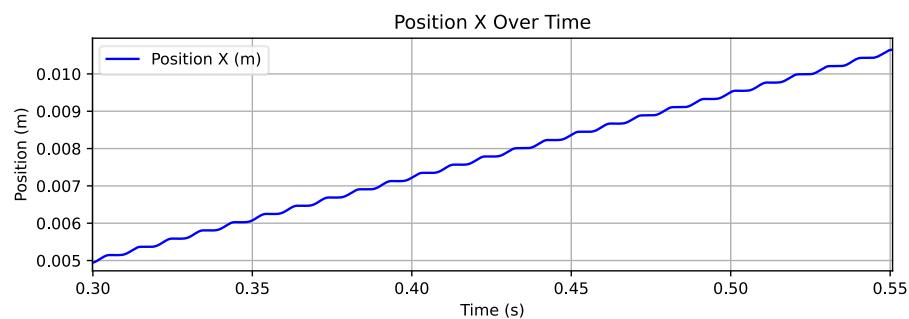
Καθαρά γραμμική Κίνηση

Στη «καθαρά γραμμική» περίπτωση, όταν δηλαδή έχουμε δύο κινητήρες σε αντίθετη φάση (π.χ. $\pm 720 \text{ rad/s}$), η ροπή του σώματος μηδενίζεται και όλη η ενέργεια μετατρέπεται σε διαμήκη ταλάντωση:

- **Θέση:** Η γραμμική άνοδος της μετατόπισης είναι σχεδόν ευθύγραμμη με τις μεγάλες ταχύτητες των έκκεντρων, υποδεικνύοντας ότι η συνισταμένη δύναμη δρα προς μία κατεύθυνση χωρίς απότομες διακυμάνσεις. Παρατηρείται πως μέσα σε 30 χιλιοστά του δευτερολέπτου το σώμα μετακινείται κατά 1 χιλιοστό.

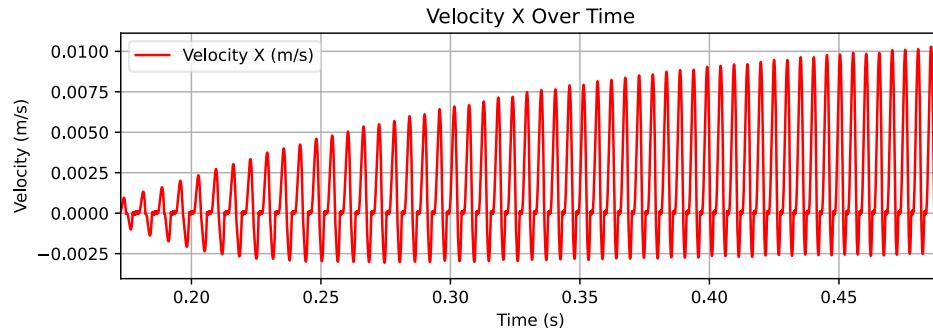


Εικόνα 3-18: Μετατόπιση Γραμμικής Κίνησης Ρομπότ (1)

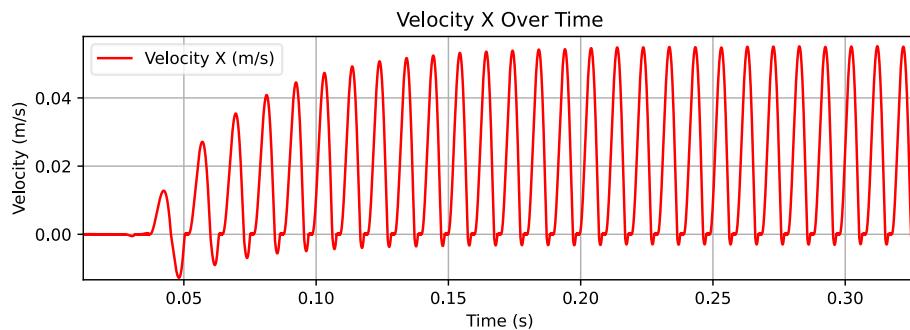


Εικόνα 3-19: Μετατόπιση Γραμμικής Κίνησης Ρομπότ (2)

- **Ταχύτητα:** Η ταχύτητα του του σώματος ακολουθεί ημιτονοειδή μορφή, με πλάτος που αυξάνεται στην αρχή και σταθεροποιείται στο $\pm 0.01 \text{ m/s}$ αντικατοπτρίζοντας την συμπεριφορά των έκκεντρων και τις φάσεις κινήσεως τους.

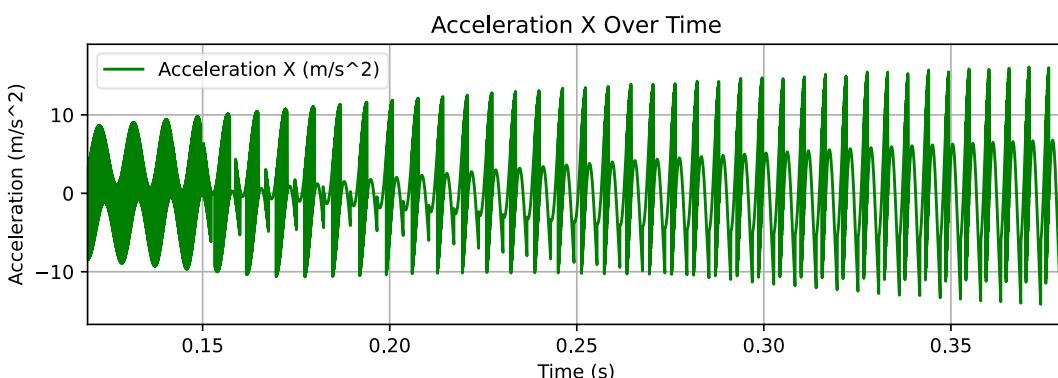


Εικόνα 3-20: Ταχύτητα Γραμμικής Κίνησης Ρομπότ (1)

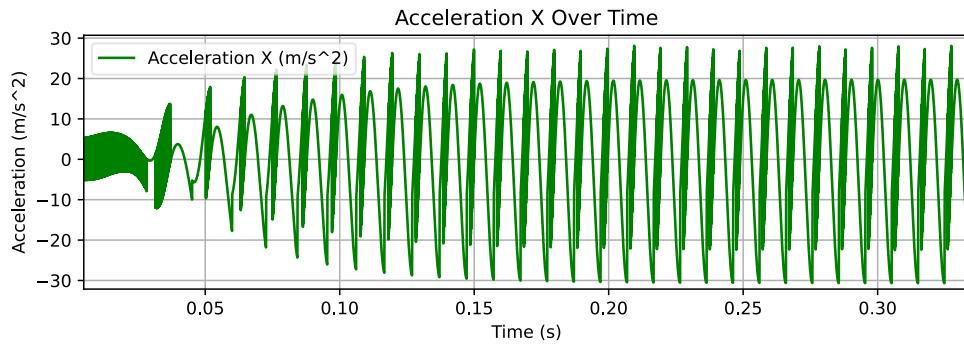


Εικόνα 3-21: Ταχύτητα Γραμμικής Κίνησης Ρομπότ (2)

- **Επιτάχυνση:** Η επιτάχυνση παρουσιάζει υψηλές κορυφές ($\sim \pm 25 \text{ m/s}^2$) που αντιστοιχούν στο σημεία κορυφής της ταχύτητας, επιβεβαιώνοντας σχεδόν καθαρή αρμονική κίνηση.



Εικόνα 3-22: Επιτάχυνση Γραμμικής Κίνησης Ρομπότ (1)



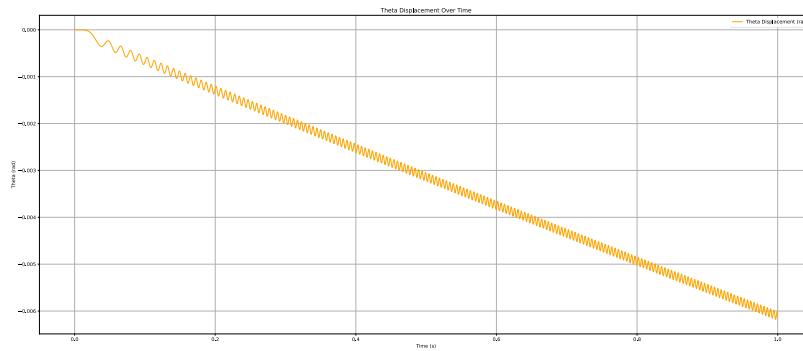
Εικόνα 3-23: Επιτάχυνση Γραμμικής Κίνησης Ρομπότ (2)

- **Συμπέρασμα:** Εδώ καταδεικνύεται η ικανότητα του ρομπότ να παράγει γραμμική μετακίνηση με ελάχιστα πλάνα εκτροπών σε άλλους βαθμούς ελευθερίας, ιδανικό για εφαρμογές ακρίβειας σε ευθύγραμμες γραμμές.

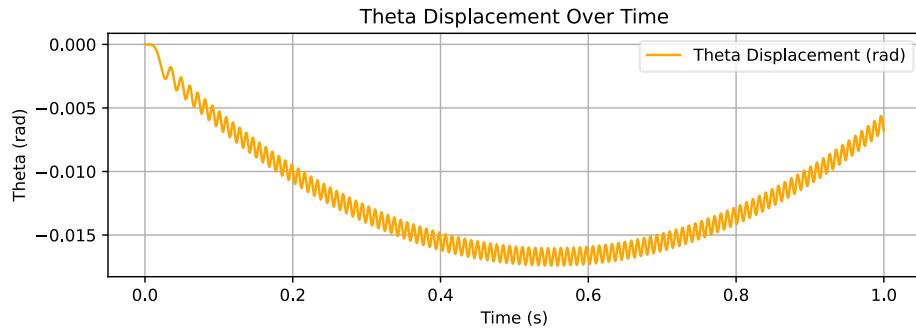
Καθαρά Περιστροφική Κίνηση

Στην «καθαρά περιστροφική» περίπτωση (η ίδια φάση, 720 rad/s και 720 rad/s), η διαμήκηση συνιστώσα μηδενίζεται και αποκτούμε αμιγή γωνιακή ταλάντωση:

- **Γωνιακή Εκτροπή (θ):** Η καμπύλη $\theta(t)$ παρουσιάζει σταθερή άνξηση με ημιτονοειδή μορφή σήματος Παρουσιάζει ομοιοσταλτική απόκριση το οποίο οφείλεται στην συμπεριφορά των έκκεντρων και στην κίνηση του σώματος σε φάσεις.

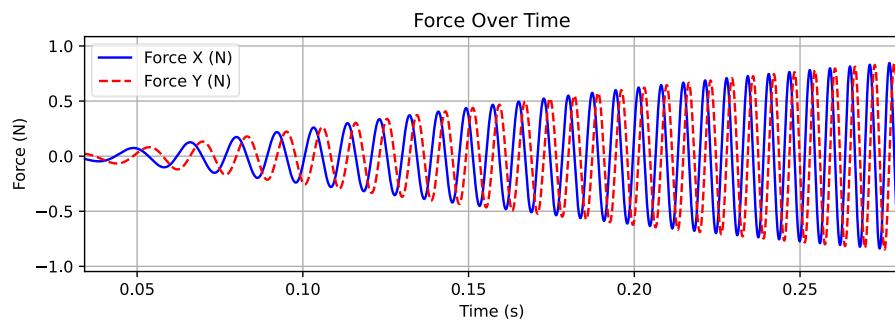


Εικόνα 3-24: Γωνιακή Περιστροφή του Ρομπότ (1)

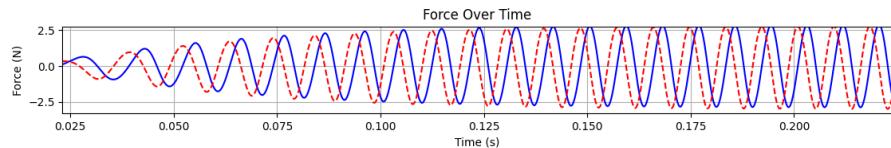


Εικόνα 3-25: Γωνιακή Περιστροφή του Ρομπότ (2)

- **Δύναμη Συστήματος:** Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι δύο συνιστάμενες δυνάμεις που ασκούνται από τα έκκεντρα των επενεργητών. Παρατηρείται η παρόμοια φάση των σημάτων και το τελικό πλάτος μετά την σταθεροποίηση στο 1 Newton.

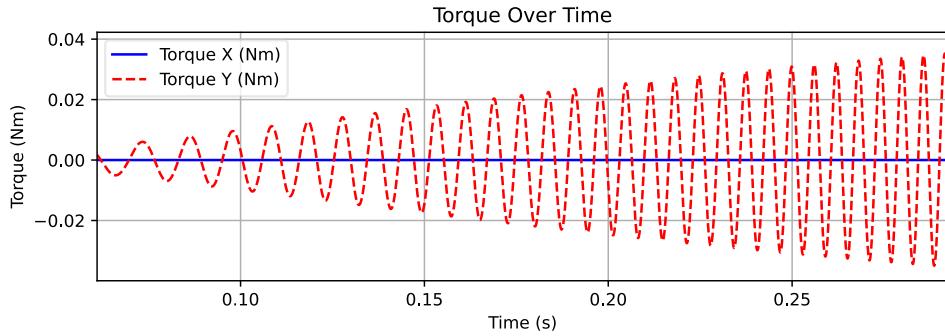


Εικόνα 3-26: Οριζόντια (μπλε) και Κατακόρυφη (κόκκινη) Δύναμη του Ρομπότ (1)

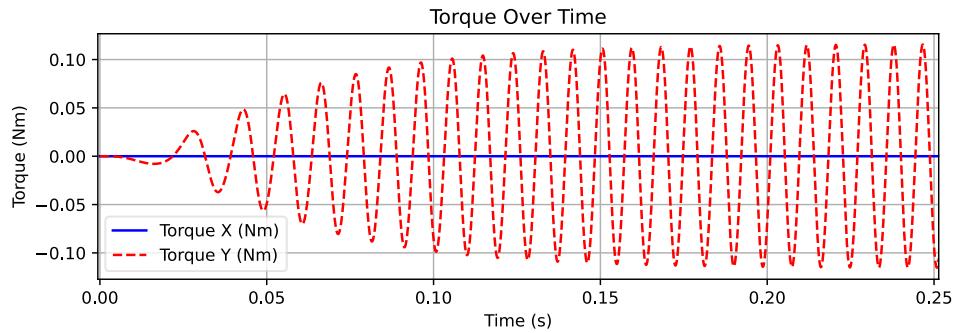


Εικόνα 3-27: Οριζόντια (μπλε) και Κατακόρυφη (κόκκινη) Δύναμη του Ρομπότ (2)

- **Ροπή Δυνάμεων:** Η ροπή των οριζόντιων δυνάμεων (κόκκινο) παρουσιάζει σταθερό αρμονικό πλάτος, συμβατή με την υπολογιζόμενη ροπή καθώς η ροπή που ασκούν τα δύο έκκεντρα στο άξονα περιστροφής Z είναι σε συμφωνία. Αντίθετα η ροπές που δημιουργούν οι κάθετες δυνάμεις των κινητήρων είναι ίσες και αντίθετες με αποτέλεσμα η συνολική ροπή για την ανατροπή του σώματος είναι μηδενική (μπλέ).



Εικόνα 3-28: Ροπή Δυνάμεων (1)



Εικόνα 3-29: Ροπή Δυνάμεων (2)

Συμπέρασμα: Η περιστροφική διέγερση προσφέρει ακριβή έλεγχο γωνιακής κίνησης της ρομοτικής πλατφόρμας, κρίσιμη για εφαρμογές μικροτοποθέτησης και ακρίβειας.

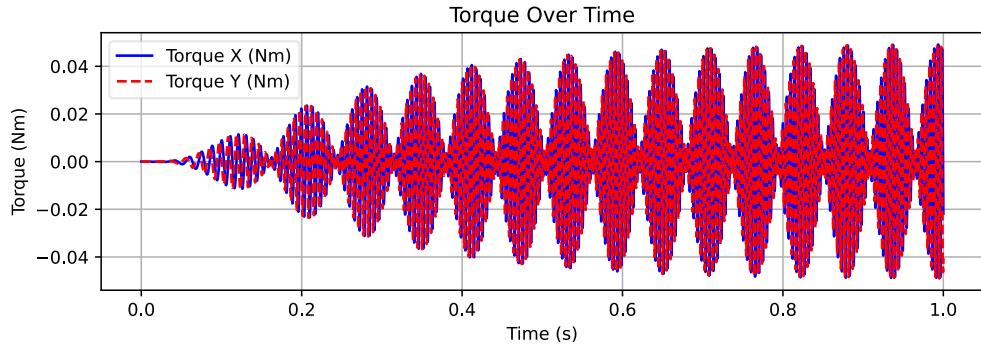
Ασύγχρονη Κινηση

Στο σενάριο αυτό όπου οι κινητήρες τροφοδοτούνται με διαφορετικά πλάτη/φάσεις, συνδιάζονταις τα χαρακτηριστικά γραμμικής και περιστροφικής ταλαντωσης πραγματοποιώντας με αυτίον τον τρόπο καμπυλόμορφες τροχές.). Ένα γνώρισμα που παρουσιάζεται στις τρεις περιπτώσεις που θα αναλυθούν είναι η εμφάνιση του φαινομένου, όπου η υπέρθεση δύο ημιτονοειδών συνιστώσων με κοντινές συχνότητες παράγει φασματική διαμόρφωση πλάτους. Το ρομπότ πλέον μπορεί να εκτελέσει κίνηση δύο βαθμών ελευθερίας και κινείται και στον άξονα y.

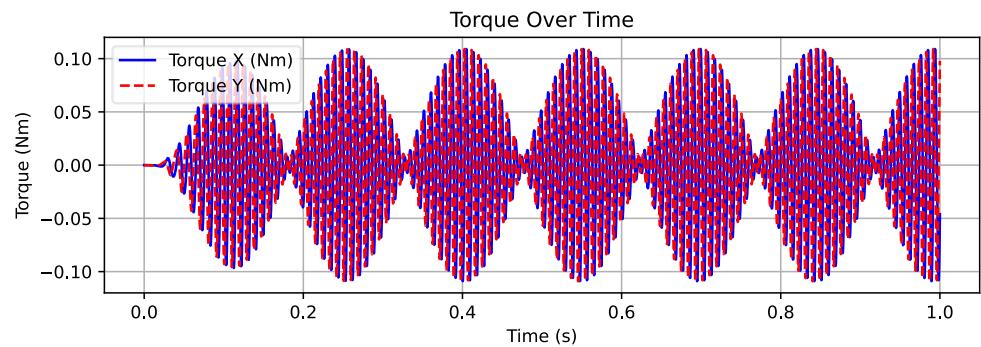
Μικρή διαφορά ταχύτητας με έμφαση στην γραμμική κίνηση: κινητήρες σε 720 rad/s και 680 rad/s με αντίθετη φορά (λόγος ~1,05 και διαφορά 40 rad/s, 0.15Hz)

- **Ροπή (Torque Over Time):** Δύο σταθερές αρμονικές, μια σε θετική και μία σε αρνητική συχνότητα, εμφανίζουν υπερβάλλουσα διαμόρφωση με ρυθμό beat ίσο

περίπου την διαφορά των στροβιλισμών 110rad/s, (0.05 Hz). Το πλάτος της ροπής κυμαίνεται στα $\pm 0,01$ Nm, με περιοδικές κορυφές όμοιες σε κάθε κύκλο.

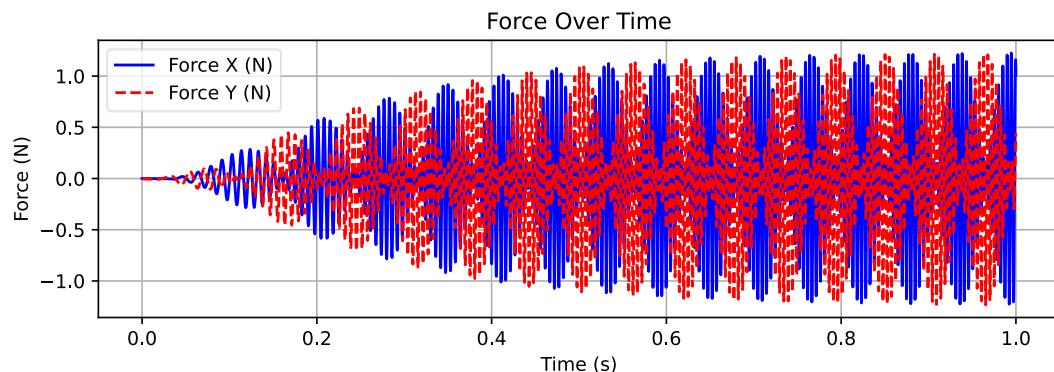


Εικόνα 3-30: Ροπές Ασύγχρονης Κίνησης, (μπλε) οριζόντιων δυνάμεων, (κόκκινο) κάθετων δυνάμεων (1)

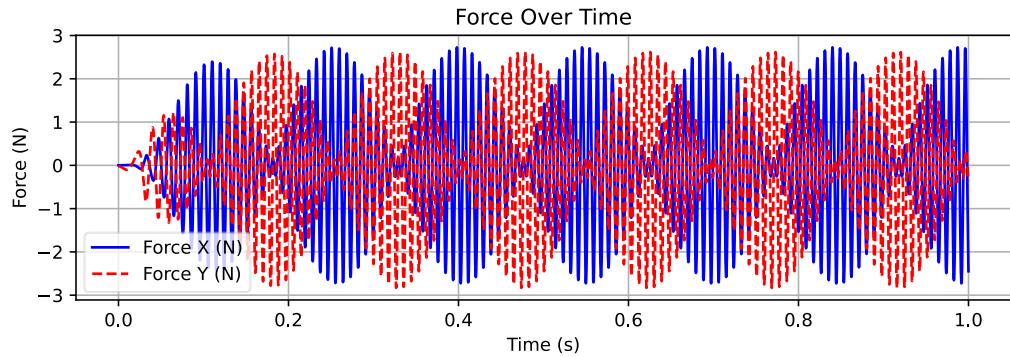


Εικόνα 3-31 Ροπές Ασύγχρονης Κίνησης, (μπλε) οριζόντιων δυνάμεων, (κόκκινο) κάθετων δυνάμεων (2)

- Δύναμη (Force Over Time):** Παρόμοια διαμορφωμένο σήμα, με πλάτος ± 1 N και ± 3 N. Οι κορυφώσεις στη υπερβάλλουσα διαμόρφωση ακολουθούν την ροπή αλλά η κάθε δύναμη έχεις αντίθετη κατεύθυνση με την άλλη.

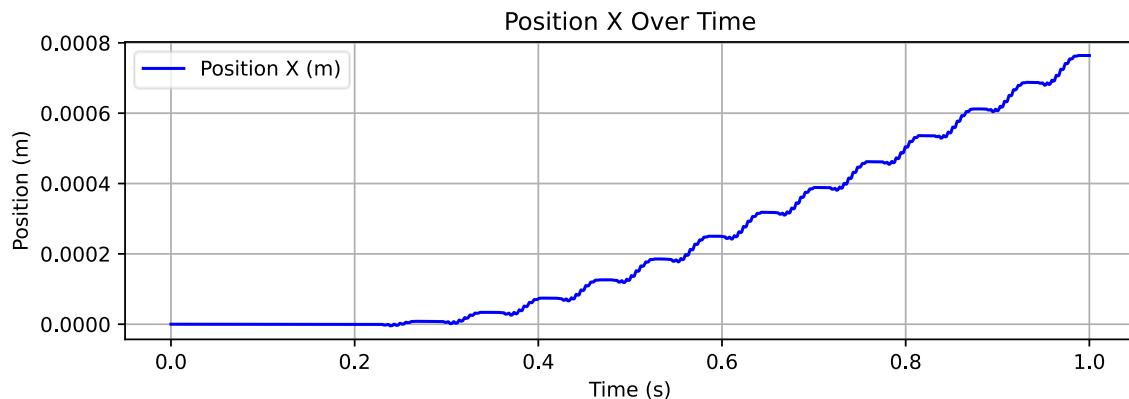


Εικόνα 3-32: Δυνάμεις Ασύγχρονης Κίνησης, (μπλε) οριζόντιων δυνάμεων, (κόκκινο) κάθετων δυνάμεων (1)

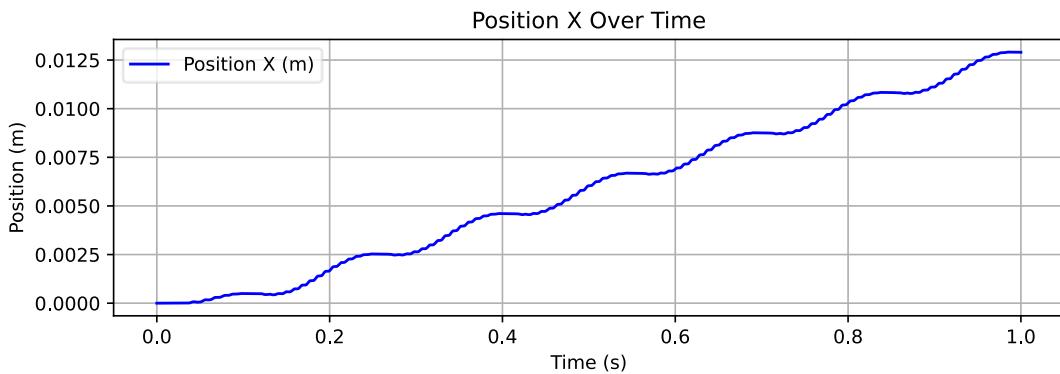


Εικόνα 3-33: Αυνάμεις Ασύγχρονης Κίνησης, (μπλε) οριζόντιων δυνάμεων, (κόκκινο) κάθετων δυνάμεων (2)

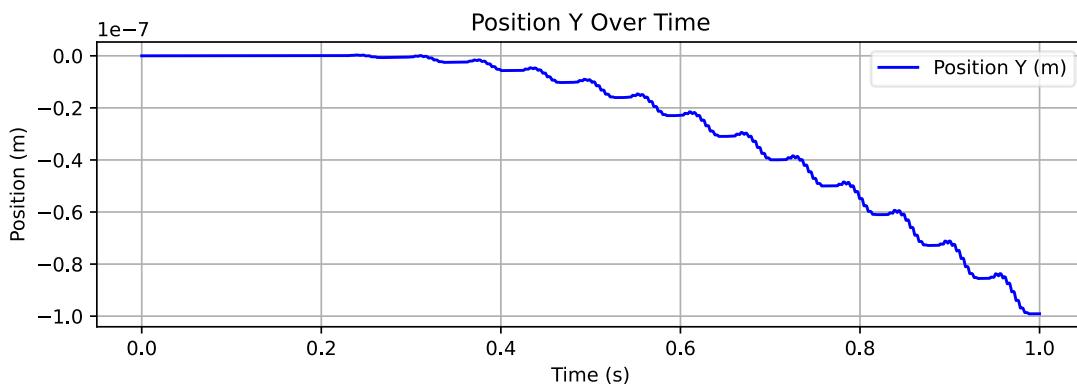
Μετατόπιση (Position Over Time): Η θέση μετατοποίζεται αργά προς τον θετικό άξονα παρουσιάζοντας 'drift' στο μέσο όρο κάθε παλμό του κύκλου. Κάθε κορυφή στο πλάτος της διαμόρφωσης συνοδεύεται από ελαφρά αύξηση της μέσης τιμής x, αποτέλεσμα της μη-μηδενικής ολοκλήρωσης της ταχύτητας σε κάθε παλμό. Σημειώνεται σημαντική πτώση στην συνολική μετατόπιση του ρομπότ παρά την χαμηλή διαφορά ταχύτητας. Επιπλέον αφού το ρομπότ κινέιται ασύγχρονα, διαγράφει κίνηση και στον άξονα Y. Καθώς το ρομπότ εκτελεί και περιστροφή ταυτόχρονα, αρχίζει να κινείται και στον κάθετο άξονα (Y) για μερικά μικρόμετρα, το οποίο είναι αναμενόμενο καθώς διαφορά των ταχυτήτων είναι μικρή, ενώ ο μέσος όρος τους μεγάλος οπότε είναι πιο κοντά στην γραμμική κίνηση στον άξονα X:



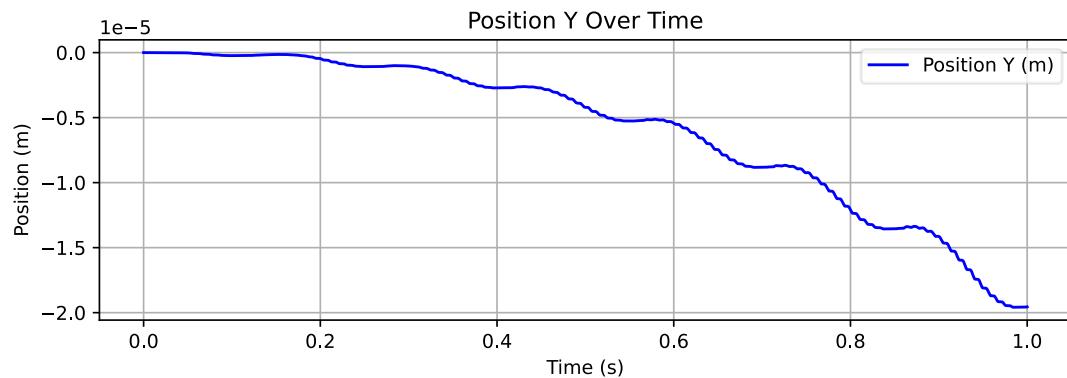
Εικόνα 3-34: Μετατόπιση Ασύγχρονης Κίνησης (1),(a)



Εικόνα 3-35: Μετατόπιση Ασύγχρονης Κίνησης (2), (α)

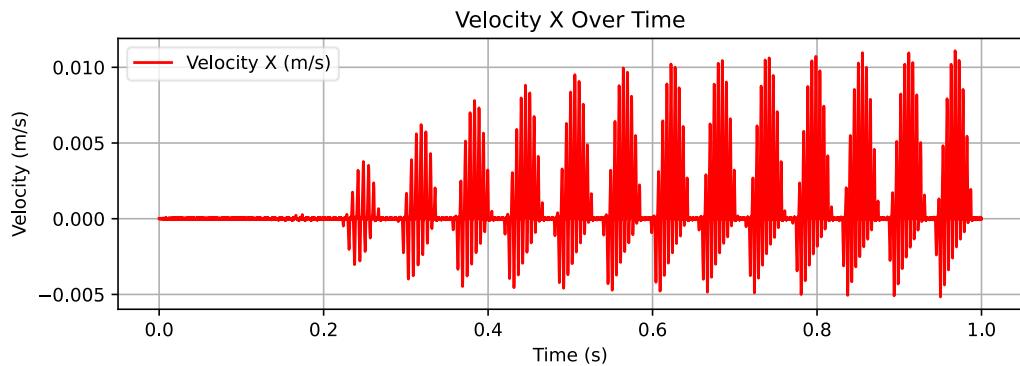


Εικόνα 3-36: Μετατόπιση Ασύγχρονης Κίνησης στον άξονα Y (1), (α)

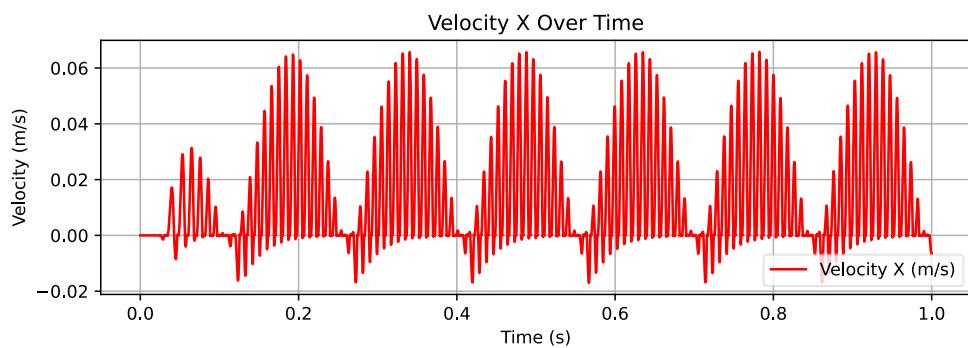


Εικόνα 3-37: Μετατόπιση Ασύγχρονης Κίνησης στον άξονα Y (2), (α)

- **Ταχύτητα (Velocity X Over Time):** Το σήμα της ταχύτητας παρουσιάζει παρόμοιο φαινόμενο με παλμούς πλάτους έως 0.01 m/s. Ο ρυθμός των κορυφών ακολουθεί τη διαφορά των στροβιλισμών.

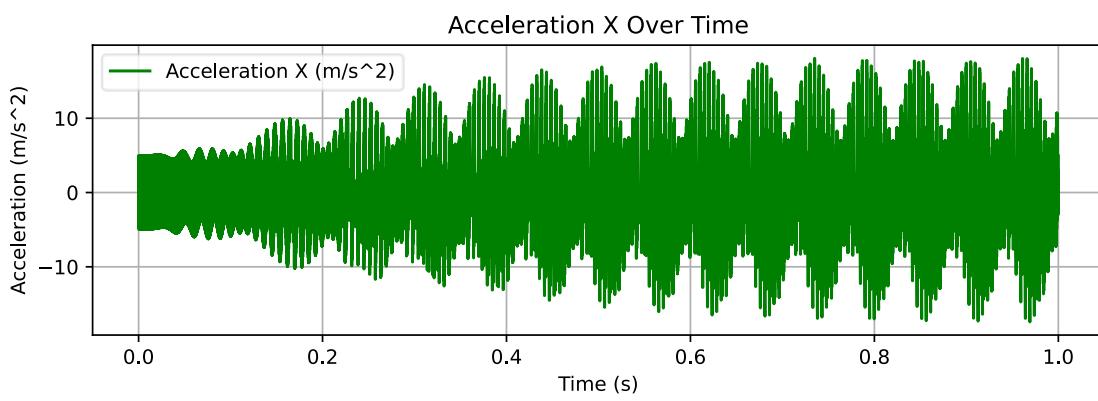


Εικόνα 3-38: Ταχύτητα Ασύγχρονης Κίνησης (1)

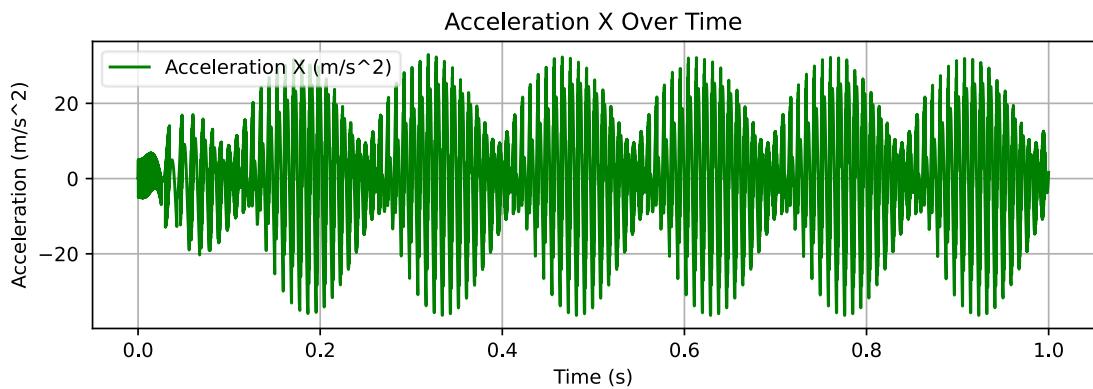


Εικόνα 3-39 Ταχύτητα Ασύγχρονης Κίνησης (2)

- **Επιτάχυνση (Acceleration Over Time):** Η επιτάχυνση, αντίστοιχα με την ταχύτητα παρουσιάζει παρόμοιο φαινόμενο, με πλάτος περίπου $\pm 15 \text{ m/s}^2$, με spikes στα σημεία κορυφής κάθε ημιπεριόδου, δείγμα γρήγορων μεταβάσεων φάσης στις συνιστώσες.

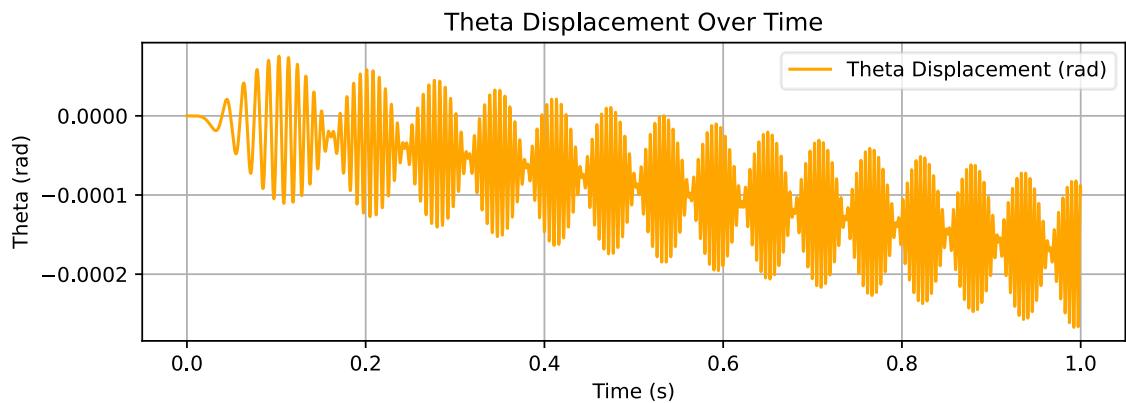


Εικόνα 3-40: Επιτάχυνση Ασύγχρονης Κίνησης (1)

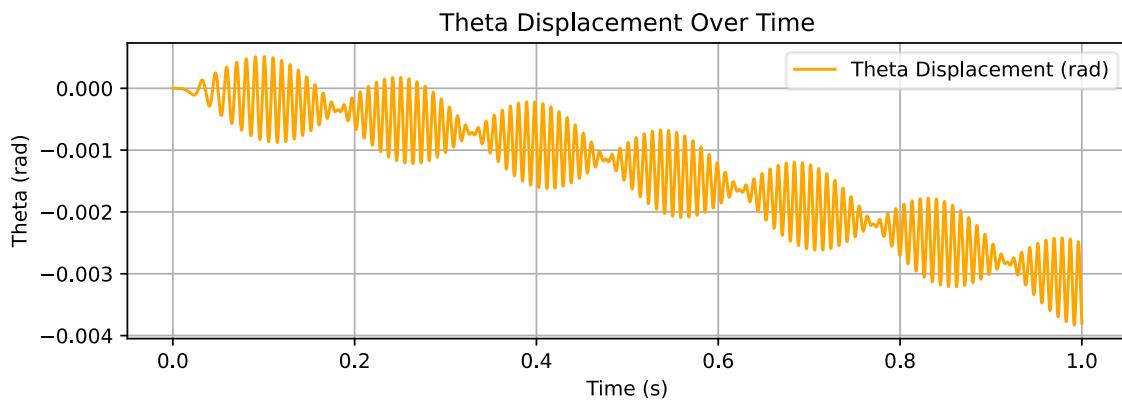


Εικόνα 3-41: Επιτάχυνση Ασύγχρονης Κίνησης (2)

- **Γωνιακή Περιστροφή:** Παρατηρούμε γωνιακή εκτροπή σε μεριφή παλμόν διαμόρφωσης παρόμοια με αυτή τον τριβών σε όλο το χρονικό διάστημα με μεγάλο φαινόμενο ‘drift’. Επιπλέον παρατηρείται σημαντική μείωση στην συνολική γωνιακή μετατόπιση.



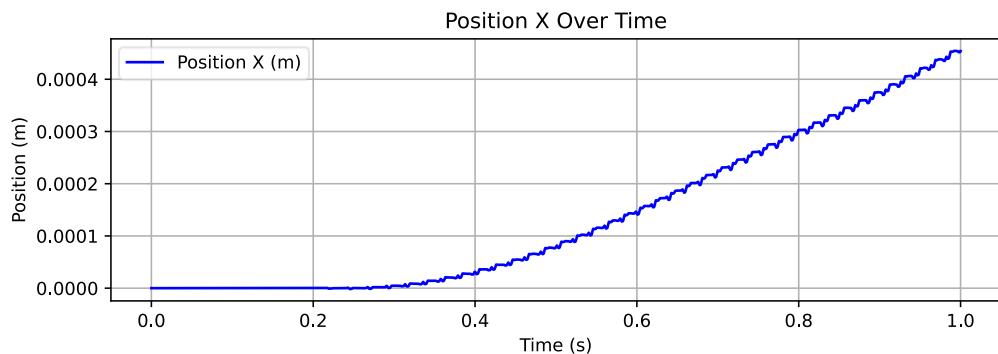
Εικόνα 3-42: Γωνιακή Περιστροφή του Ρομπότ Ασύγχρονης Κίνησης (1),(a)



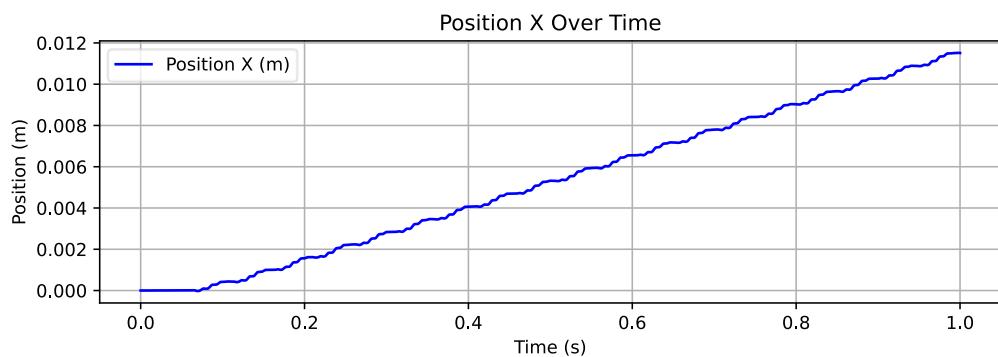
Εικόνα 3-43: Γωνιακή Περιστροφή του Ρομπότ Ασύγχρονης Κίνησης (2),(a)

Μεγάλη διαφορά ταχύτητας με έμφαση στην γραμμική κίνηση: κινητήρες σε 720 rad/s και 600 rad/s με αντίθετη φορά, (λόγος ~1,2 και διαφορά 120 rad/s, 0.05 Hz).

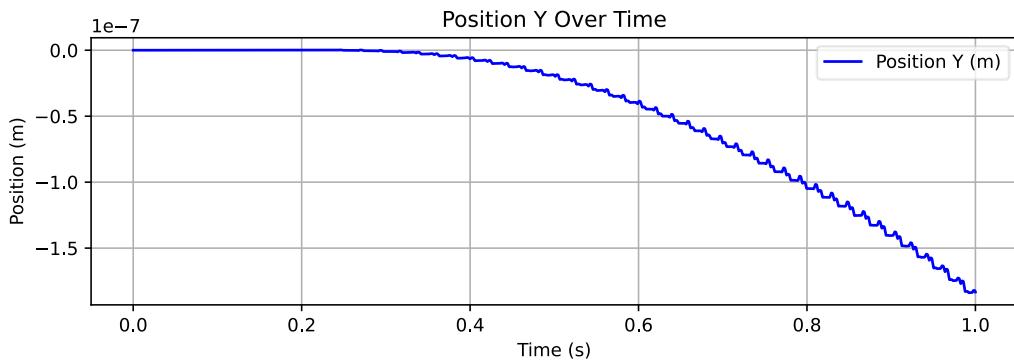
- **Μετατόπιση (Position Over Time):** Η γραμμική μετατόπιση ακολουθεί πάλι γραμμική τάση (~0.0003 m στο τέλος), αλλά με ελαφρώς μεγαλύτερη κλήση και σε σχέση με την περίπτωση μικρής διαφοράς, λόγω μεγαλύτερης μη-μηδενικής μέσης συνιστώσας δυνάμεων. Επίσης παρουσιάζει μικρότερη εξάρτηση σε παλμούς και εμφανίζει λιγότερο θορυβό. Εδώ παρατηρείται πως καθώς μεγαλώνει η διαφορά των ταχυτήτων και μειώνεται η μέση ταχύτητα των δύο κινητήρων, αυξάνεται η περιστροφή του ρομπότ και μειώνεται η γραμμική κίνηση, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο και την κίνη στον άξονα Y:



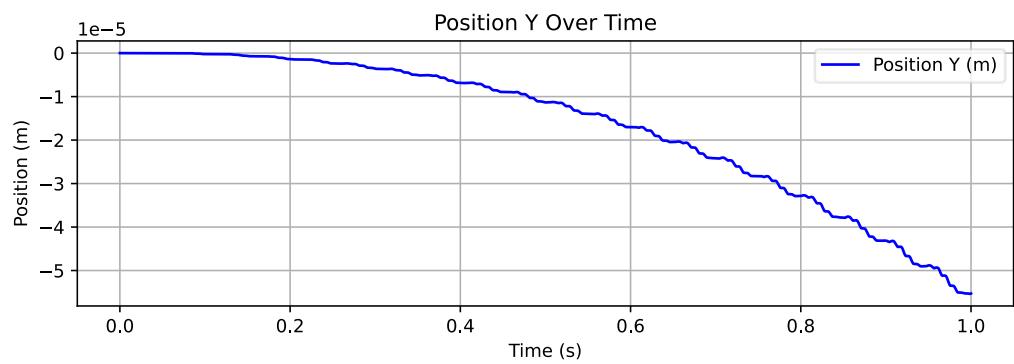
Εικόνα 3-44: Μετατόπιση Ασύγχρονης Κίνησης (1)(β)



Εικόνα 3-45: Μετατόπιση Ασύγχρονης Κίνησης (2)(β)

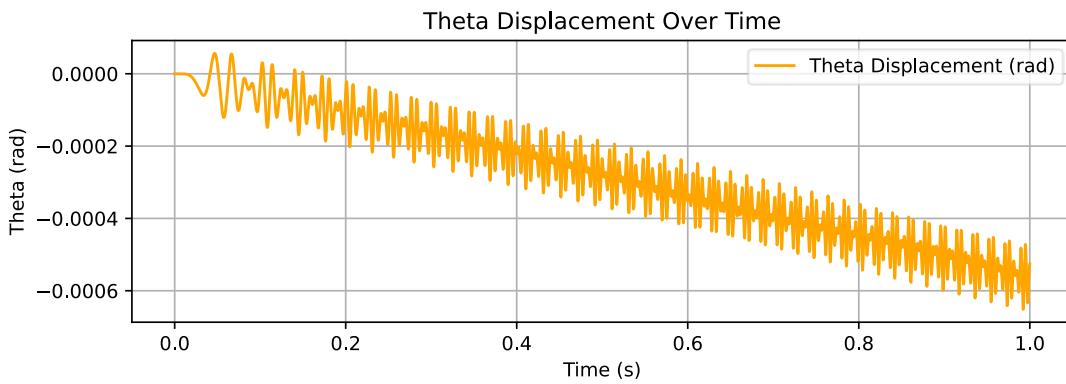


Εικόνα 3-46: Μετατόπιση Ασύγχρονης Κίνησης στον άξονα Y (1)(β)

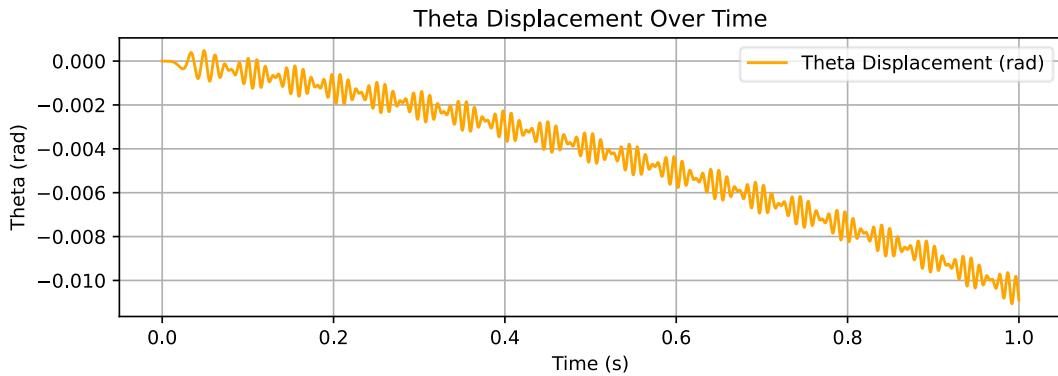


Εικόνα 3-47: Μετατόπιση Ασύγχρονης Κίνησης στον άξονα Y (2)(β)

- Γωνιακή Περιστροφή:** Παρατηρούμε πως αυξήθηκε η συνολική περιστροφική μετατόπιση και παράλληλα μειώθηκε η ημιτονοειδης συμπεριφορά του σήματος. Παρουσιάζοντας χαμηλότερους πλάτη σε κάθε παλμό.



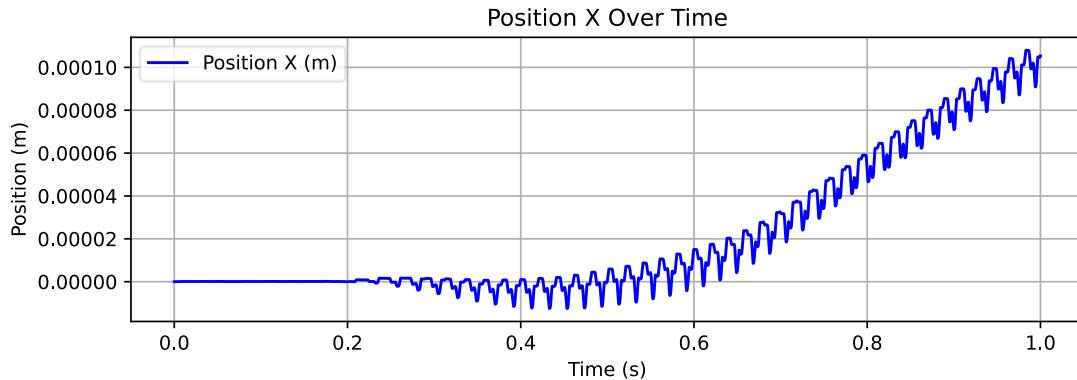
Εικόνα 3-48: Γωνιακή Περιστροφή του Ρομπότ Ασύγχρονης Κίνησης (1)(β)



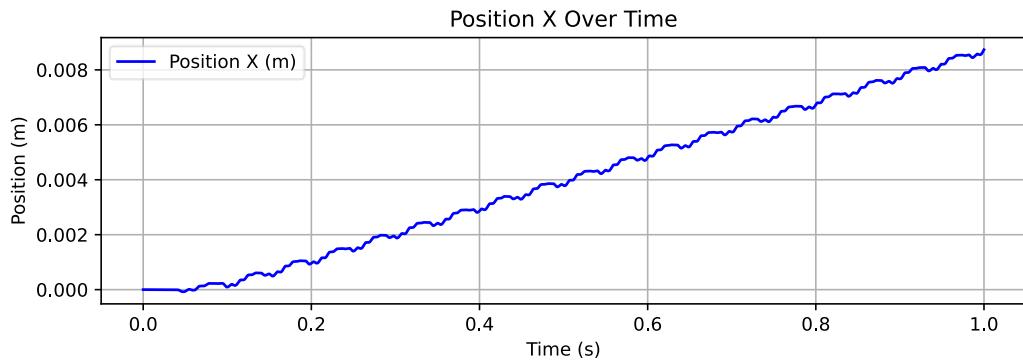
Εικόνα 3-49 Γωνιακή Περιστροφή του Ρομπότ Ασύγχρονης Κίνησης (2)(β)

Έμφαση στην περιστροφική κίνηση: κινητήρες σε 720 rad/s και 600 rad/s με ίδια φορά, (λόγος ~1,32 και διαφορά 120 rad/s, 0.05 Hz).

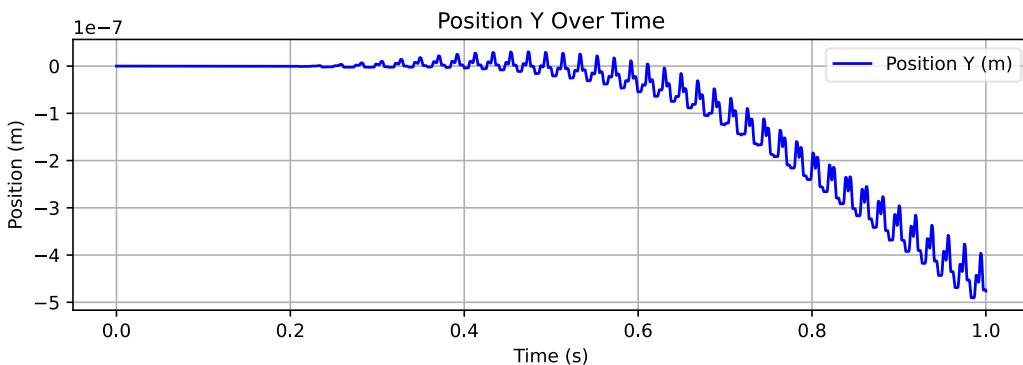
- **Μετατόπιση (Position Over Time):** Η γραμμική μετατόπιση ακολουθεί μεγαλύτερη μη γραμμική τάση όσο αυξάνεται η διαφορά μεταξύ των ταχυτήτων των έκκεντρων και αισθητή μείωση στην συνολική μετατόπιση του συστήματος (~0.0001 m στο τέλος), λόγω μεγαλύτερης μη-μηδενικής μέσης συνιστώσας δυνάμεων. Επίσης παρουσιάζει μεγαλύτερη εξάρτηση σε παλμούς εμφανίζει μεγαλύτερο θορυβό και από την γωνιακή μετατόπιση έχοντας αναστραφή η σχέσεις ροπών και δυνάμεων.



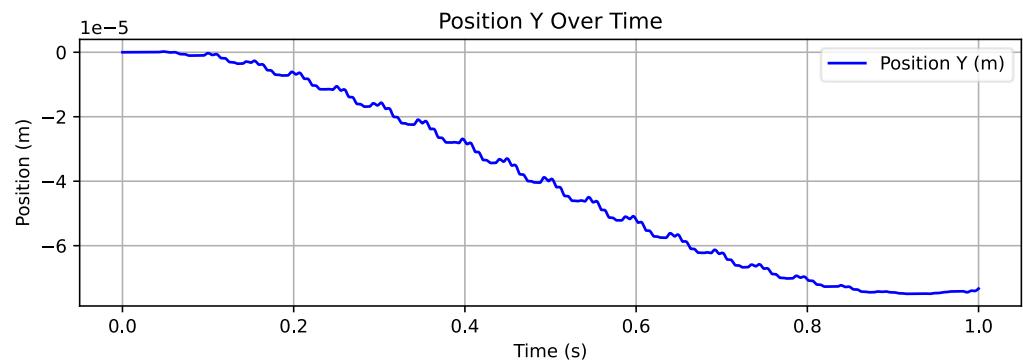
Εικόνα 3-50: Μετατόπιση Ασύγχρονης Κίνησης (1)(γ)



Εικόνα 3-51: Μετατόπιση Ασύγχρονης Κίνησης (2)(γ)

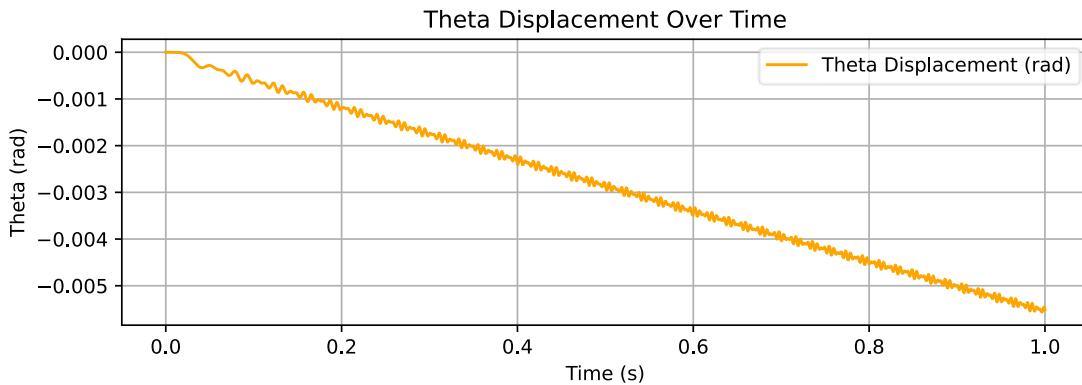


Εικόνα 3-52: Μετατόπιση Ασύγχρονης Κίνησης στον άξονα Y (1) (γ)

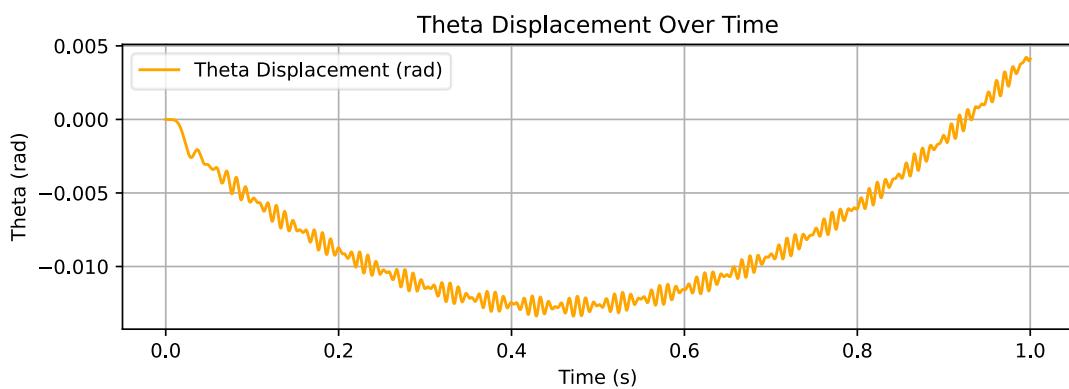


Εικόνα 3-53: Μετατόπιση Ασύγχρονης Κίνησης στον άξονα Y (2)(γ)

Γωνιακή Περιστροφή: Παρατηρούμε πως αυξήθηκε η συνολική περιστροφική μετατόπιση και παράλληλα μειώθηκε αισθητά η ημιτονοειδης και θορυβόδης συμπεριφορά του σήματος. Παρουσιάζοντας χαμηλότερους πλάτη σε κάθε παλμό σε σχέση με τις μικρότερες αποκλίσεις ταχυτήτων αλλά και σε σχέση με την μετατόπιση του συστήματος.



Εικόνα 3-54: Γωνιακή Περιστροφή του Ρομπότ Ασύγχρονης Κίνησης (1)(γ)



Εικόνα 3-55: Γωνιακή Περιστροφή του Ρομπότ Ασύγχρονης Κίνησης (2)(γ)

Συμπεράσματα

Η προσομοίωση αναδεικνύει τη μοναδικότητα της κίνησης με τον τρόπο που αναλύσαμε ως μέσου ελέγχου ρομποτικής κίνησης. Οι συγχρονισμένες καταστάσεις οδηγούν σε καθαρές μορφές μεταφοράς (γραμμική ή περιστροφική), ενώ η ασύγχρονη διέγερση παράγει πιο ευέλικτες αλλά και πιο απρόβλεπτες κινήσεις, οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν για σύνθετους ελιγμούς και μικρο-κινήσεις.

Κεφάλαιο 4.

Σχεδίαση και Κατασκευή του Ρομπότ

Η υλοποίηση του μικρο-ρομπότ βασίζεται στη σχεδίαση ενός κυκλώματος που επιτρέπει τον έλεγχο των κινητήρων ως προς την κατεύθυνση και την ταχύτητά τους. Ακολουθούν αναλυτικά τα κύρια υλικά και η λειτουργία του καθενός στο κύκλωμα:

4.1 ESP32-WROOM-32E: Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας και Ελέγχου

Ο ESP32-WROOM-32E αποτελεί τον βασικό μικροελεγκτή του ρομπότ και επιλέχθηκε για την παρούσα εργασία λόγω των υψηλών επιδόσεων, της χαμηλής κατανάλωσης και της μεγάλης ευελιξίας που προσφέρει. Πρόκειται για ένα πανίσχυρο chip της Espressif Systems, σχεδιασμένο για εφαρμογές Internet of Things (IoT), αυτοματισμούς και ρομποτική, προσφέροντας χαρακτηριστικά που ανταποκρίνονται ιδανικά στις απαιτήσεις ενός μικρορομπότ που κινείται με δονήσεις.

Ο ESP32-WROOM-32E βασίζεται σε έναν διπύρηνο επεξεργαστή Tensilica Xtensa LX6, με ταχύτητα ρολογιού έως 240 MHz, επιτρέποντας την παράλληλη εκτέλεση διεργασιών, όπως ο έλεγχος κινητήρων, η επεξεργασία αισθητήρων και η ασύρματη επικοινωνία, χωρίς καθυστερήσεις. Διαθέτει 512 KB SRAM και 4MB flash μνήμης, ικανοποιώντας πλήρως τις ανάγκες της εφαρμογής.

Λειτουργικά Χαρακτηριστικά:

- Ενσωματωμένο Wi-Fi 802.11 b/g/n και Bluetooth v4.2 (Classic και BLE), προσφέροντας δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου και τηλεμετρίας.
- Υποστήριξη πολλαπλών GPIOs, με δυνατότητα επιλογής μεταξύ ψηφιακών, αναλογικών, PWM, SPI, I2C, UART, που εξασφαλίζουν πλήρη συνδεσιμότητα με τους κινητήρες, αισθητήρες και άλλα περιφερειακά.
- Παραγωγή PWM σημάτων, κρίσιμο για την ακριβή ρύθμιση της ταχύτητας των εκκεντρικών κινητήρων, μέσω της ρύθμισης του πλάτους παλμών.

Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά:

- Τάση λειτουργίας: 3.0V – 3.3V, με συμβατότητα σε εισόδους 3.3V logic level.
- Τάση λειτουργίας μέχρι και 5V με σύνδεση από εξωτερική τροφοδοσία από τις USB ή BAT θήρες.

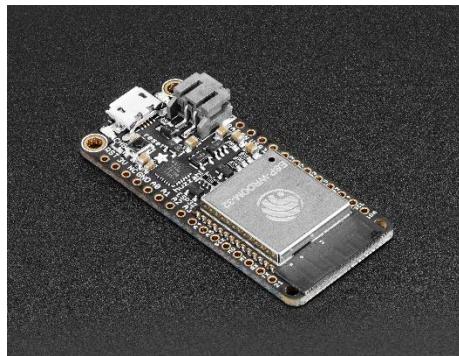
- Παροχή ρεύματος περίπου 500mA αλλά τα μισά καταλώνονται από τον ίδιο τον ESP32 ειδικότερα αμα χρησιμοποιείται η λειτουργία Wifi.
- 40mA στο HIGH, 28mA στο LOW για κάθε pin.

Πλαίσιο Ανάπτυξης – Framework

Για την ανάπτυξη του λογισμικού χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού C++, μέσω του Arduino framework αλλά και του PlatformIO, τα οποία παρέχουν απλότητα στον σχεδιασμό και τη διαχείριση των low-level λειτουργιών του μικροελεγκτή. Το περιβάλλον Arduino υποστηρίζεται πλήρως από το ESP32 και προσφέρει πλούσια βιβλιοθήκη εργαλείων για την υλοποίηση αλγορίθμων ελέγχου (όπως PID), επικοινωνίας και αυτοματισμών.

Η επιλογή του ESP32-WROOM-32E αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματική, καθώς επιτρέπει την υλοποίηση πλήρους κλειστού βρόχου ελέγχου (closed-loop), με άμεση επεξεργασία σημάτων ανάδρασης από τους αισθητήρες ταχύτητας και παραγωγή PWM παλμών σε πραγματικό χρόνο, κάτι που είναι κρίσιμο για τη σταθερή και ελεγχόμενη κίνηση του ρομπότ.

Επιπλέον, η χρήση του Wi-Fi για real-time ασύρματο debugging και καταγραφή δεδομένων (π.χ. RPM κινητήρων, τάσεις, αλγορίθμική απόκριση) έδωσε τη δυνατότητα για επαναληπτική βελτιστοποίηση και εξοικονόμηση χρόνου κατά τον πειραματισμό και την ανάπτυξη.



Eικόνα 4-1: ESP32-WROOM-32E

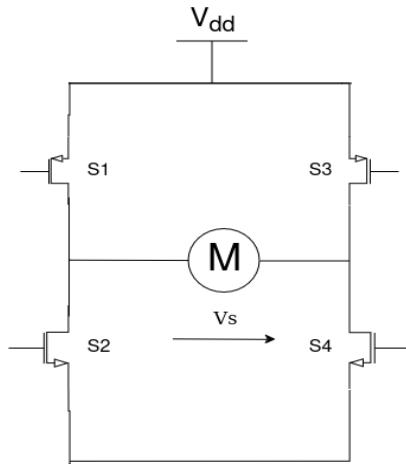
4.2 Driver: DC Motor 21 Click

Για τον έλεγχο των κινητήρων απαιτείται μεγαλύτερο ρεύμα από αυτό που μπορεί να παρέχει το ESP32. Ο DC Motor 21 Click λειτουργεί ως ενισχυτής ρεύματος και είναι απαραίτητος για την τροφοδοσία των κινητήρων. Ο βασικός του ρόλος είναι να επιτρέψει τη ροή μεγάλου ρεύματος προς τους DC επενεργητές, ελεγχόμενου από τα μικρής ισχύος σήματα του ESP32.



Eikόνα 4-2: DC Motor 21 Click

O driver είναι ένα κύκλωμα H-Bridge που αποτελείται από τέσσερα τρανζίστορ και διόδους. Το H-Bridge επιτρέπει την αλλαγή ροής ρεύματος, παρέχοντας έτσι την αλλαγή κατεύθυνσης περιστροφής του κινητήρα. Όταν τα κατάλληλα τρανζίστορ ενεργοποιηθούν, ο κινητήρας περιστρέφεται από την μία ή την άλλη κατεύθυνση.



Eikόνα 4-3: Κύκλωμα H-Bridge

S1	S2	S3	S4	Λειτουργία
1	0	0	1	Δεξιόστροφη κίνηση
0	1	1	0	Αριστερόστροφη κίνηση
0	0	0	0	
1	0	0	0	
0	1	0	0	Αδράνια κινητήρα
0	0	1	0	
0	0	0	1	
1	1	X	X	Βραχυκύκλωση κινητήρα
X	X	1	1	
1	0	1	0	Φρενάρισμα κινητήρα
0	1	0	1	

Πίνακας 4.1: Λειτουργία H-Bridge

Η λειτουργία του H-Bridge συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα:

- **Δεξιόστροφη Κίνηση:** Για να περιστρέφει ο κινητήρας προς τα δεξιά ενεργοποιούμε τους διακόπτες S1, S4, ενώ αφήνουμε τους S2 και S3 απενεργοποιημένους. Το ρεύμα ρέει από τον θετικό πόλο (μέσω του S1), περνάει από τον κινητήρα και επιστρέφει στον αρνητικό πόλο μέσω του S4. Αναγκάζοντας τον κινητήρα να περιστρέφει δεξιόστροφα.
- **Αριστερόστροφη Κίνηση:** Για την αλλαγή κατεύθυνσης του κινητήρα απενεργοποιούμε τους διακόπτες S1, S4 και ενεργοποιούμε τους S2 και S3. Με αυτό τον τρόπο, το ρεύμα διαρρέει τον κινητήρα με την αντίθετη κατεύθυνση, προκαλώντας αριστερόστροφη κίνηση.
- **Αδράνεια:** Όταν όλοι οι διακόπτες είναι απενεργοποιημένοι ή μόνο ένας διακόπτης είναι ενεργοποιημένος, το ρεύμα δεν ρέει τον κινητήρα, οπότε παραμένει αδρανείς.
- **Βραχυκύκλωση Κινητήρα:** Σε αυτή την περίπτωση, οι διακόπτες της αριστερής ή της δεξιάς πλευράς ενεργοποιούνται

ταυτόχρονα. Αυτό προκαλεί βραχυκύκλωση του κινητήρα, Δηλαδή το πηνίο του κινητήρα συνδέεται σε κλειστό κύκλωμα με ελάχιστη αντίσταση, προκαλώντας την ταχεία επιβράδυνση του. Είναι χρήσιμο μόνο για την περίπτωση άμεσου φρεναρίσματος σε υψηλές ταχύτητες του κινητήρα.

- **Φρενάρισμα Κινητήρα:** Το φρενάρισμα του κινητήρα επιτυγχάνεται όταν ενεργοποιούμε τον S1,S3 ή αντίστοιχα S2,S4. Αυτοί οι συνδυασμοί προκαλούν την ταχεία διακοπή της κίνησης του κινητήρα μέσω μιας διαφορετικής ροής ρεύματος που δημιουργεί αντιστάσεις. Το αποτέλεσμα είναι η σταθεροποίηση του κινητήρα στην τρέχουσα θέση του, χωρίς να του επιτρέπεται να περιστρέφεται προς καμία κατεύθυνση.

Επιπλέον ο οδηγός χρησιμοποιείται σαν ενισχυτής ρεύματος. Οι κινητήρες μαζί με την χρήση αισθητήρων απαιτούν περισσότερο ρεύμα από αυτό που μπορεί να προσφέρει ο μικροελεγκτής, για αυτό τον λόγο ο driver αναλαμβάνει να τροφοδοτήσει τους κινητήρες με το απαιτούμενο ρεύμα, αποφεύγοντας την υπερφόρτωση του ESP32 καθώς και τον κίνδυνο που έχει η αντιηλεκτροκινητηκή δύναμη του κινητήρα, δηλαδή η ηλεκτροκινητική δύναμη που εκδηλώνεται ως τάση που αντιτίθεται στην αλλαγή του ρεύματος που την προκάλεσε και επιστρέφει πίσω στην πηγή.

Οι οδηγοί ακόμα, υποστηρίζουν σήματα PWM. Δέχονται τέτοια σήματα από τον ESP32 και τα μετατρέπουν σε σταθερό ρεύμα που οδηγεί τους κινητήρες, κάνοντας δυνατή τη μεταβολή ταχύτητας μέσω λογισμικού.

Οι οδηγοί έχουν παρόμοια με τον ESP32 GIPO θήρες για την έξοδο με τους κινητήρες και λειτουργούν με τάση 3.3 ή 5V και μέγιστο ρεύμα που μπορούν να δώσουν είναι 500mA.

4.3 DC κινητήρες

Οι κινητήρες είναι μικροί DC brushed motors με προσαρτημένο έκκεντρο βάρος (eccentric mass). Αντί να περιστρέφουν ρόδες, το εκκεντρικό τους προκαλεί δόνηση στην πλατφόρμα, οδηγώντας σε μικρο-μετακινήσεις λόγω της μεταβολής της αδράνειας.

Χαρακτηριστικά:

- **Τάση λειτουργίας:** ~1.5V
- **Στροφές χωρίς φορτίο:** ~11,000 RPM
- **Ενσωματωμένο εκκεντρικό βάρος για παραγωγή φυγοκεντρικής δύναμης:** 2.5mm
- **Κατανάλωση ρεύματος:** έως 140 mA σε stall
- **Μέση κατανάλωση ρεύματος:** ~ 50mA
- **Ελάχιστη κατανάλωση για την εκκίνηση περιστροφής:** ~10mA
- **Αντίσταση:** 10.71Ω
- **Έλεγχος μέσω PWM:** Η ταχύτητα περιστροφής, οπότε και η ένταση της δόνησης μέσω φυγοκεντρικών δυνάμεων, μπορεί να ρυθμιστεί με ακρίβεια.

Συνδέσεις:

- Συνδέονται απευθείας στις εξόδους των οδηγών (M+ και M-).
- Η εναλλαγή πολικότητας ελέγχει την κατεύθυνση της δόνησης.
- Η συχνότητα PWM επηρεάζει την ένταση της δόνησης και συνεπώς την ταχύτητα μετακίνησης του ρομπότ.



Eικόνα 4-4: DC Κινητήρας Δόνησης

4.4 Μπαταρία: LiPo (Lithium Polymer)

Η τροφοδοσία του ρομπότ γίνεται μέσω μιας επαναφορτιζόμενης μπαταρίας LiPo, η οποία προσφέρει τάση 3.7V και χωρητικότητα 550mAh. Πρόκειται για μία ιδανική επιλογή για την παρούσα κατασκευή, καθώς εξισορροπεί επαρκώς την ενεργειακή απόδοση, τον όγκο και το βάρος, που είναι κρίσιμα για ένα ρομπότ μικρών διαστάσεων.

Η τάση των 3.7V είναι εντός του ασφαλούς ορίου λειτουργίας του ESP32, ενώ παρέχει και αρκετό ρεύμα για την οδήγηση των κινητήρων μέσω των οδηγών, χωρίς να απαιτείται πρόσθετος μετατροπέας. Η χωρητικότητα της μπαταρίας επιτρέπει την ασύρματη λειτουργία του ρομπότ για περίπου 1 ώρα, γεγονός που καθιστά εφικτή την πραγματοποίηση πειραμάτων χωρίς συνεχή εξωτερική τροφοδοσία.

Επιπλέον, οι μπαταρίες LiPo παρέχουν υψηλή πυκνότητα ενέργειας και σταθερή εκφόρτιση, κάτι που συμβάλλει στην σταθερότητα λειτουργίας του κυκλώματος, ειδικά όταν εκτελούνται αλγόριθμοι ελέγχου σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 4-5: Μπαταρία Λιθίου - 3.7v 550mAh

4.5 Αισθητήρας Hall

Ο αισθητήρας Hall χρησιμοποιήθηκε ως βασικό εργαλείο για τη μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής των κινητήρων. Πρόκειται για ένα εξάρτημα που ανιχνεύει την παρουσία μαγνητικού πεδίου και παράγει έναν παλμό κάθε φορά που ο μαγνήτης περνά από το αισθητήριο στοιχείο.

Λόγω της έλλειψης διαθέσιμων encoders για τους μικρούς κινητήρες που χρησιμοποιήθηκαν, ήταν απαραίτητο να βρεθεί μια εναλλακτική λύση. Έτσι, στερεώθηκαν μικροί μαγνήτες στα εκκεντρικά βάρη των κινητήρων, ώστε κατά την περιστροφή να παράγονται παλμοί στους αισθητήρες Hall. Μετρώντας τους παλμούς ανά μονάδα χρόνου, ήταν δυνατός ο υπολογισμός της γωνιακής ταχύτητας.

Αρχικά, δοκιμάστηκαν και άλλες μέθοδοι, όπως:

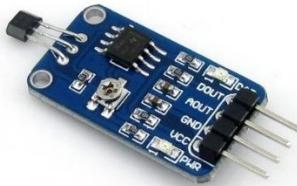
- Μαθηματική εκτίμηση της ταχύτητας μέσω εξισώσεων βασισμένων σε τάση και φορτίο
- Ανάγνωση της Back EMF (αντιηλεκτροκινητικής δύναμης) του κινητήρα, η οποία είναι θεωρητικά ανάλογη της ταχύτητας

Αν και οι παραπάνω μέθοδοι απέδωσαν εν μέρει σε πειραματικό επίπεδο, παρουσίασαν σοβαρούς περιορισμούς:

- Αδυναμία σε ασύρματες συνθήκες, όπου η ακρίβεια εξαρτάται από την ποιότητα του σήματος και των παρεμβολών
- Έλλειψη πραγματικού χρονισμού για άμεση ανταπόκριση
- Δυσκολία στην ένταξη σε PID - PI αλγορίθμους ελέγχου και σε λειτουργία πραγματικού χρόνου

Η τελική επιλογή των Hall αισθητήρων προσέφερε έναν αξιόπιστο και πρακτικό τρόπο μέτρησης της ταχύτητας, με χαμηλό κόστος και εύκολη ενσωμάτωση στον κώδικα και στο hardware. Η προσθήκη αυτής της ανάδρασης ήταν καθοριστική για την υλοποίηση

κλειστού βρόχου ελέγχου, επιτρέποντας την σταθεροποίηση της ταχύτητας και την βελτιστοποίηση της απόκρισης του ρομπότ σε πραγματικές συνθήκες.

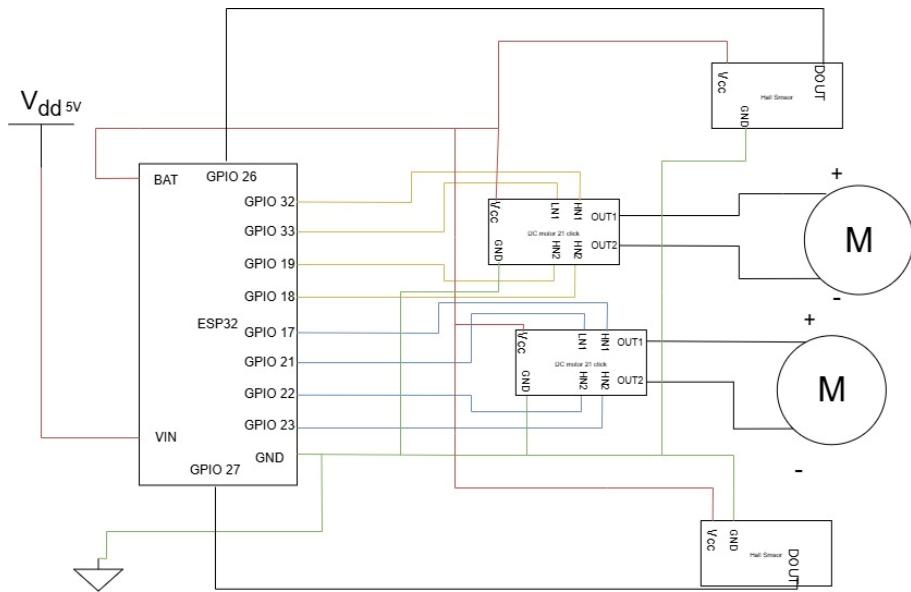


Eikόνα: 4-6 Hall Sensor

4.6 Συνδεσμολογία τελικού κυκλώματος:

Η συνδεσμολογία του κυκλώματος έχει ως στόχο να επιτρέπει την ακριβή και δυναμική ρύθμιση της κίνησης του μικρο-ρομπότ με δυνατότητα ανατροφοδότησης. Το κύκλωμα αποτελείται από:

- Έναν μικροελεγκτή ESP32
- Δύο κυκλώματα οδήγησης κινητήρων (DC Motor 21 Click)
- Δύο DC κινητήρες με έκκεντρα βάρη
- Δύο αισθητήρες Hall
- Μια επαναφορτιζόμενη LiPo μπαταρία



Εικόνα 4-7: Τελικό Κύκλωμα

4.6.1 Επεξήγηση Συνδέσεων

- **ESP32 → Driver (x2):**
Κάθε driver συνδέεται με 4 pins του ESP32 για την παροχή των σημάτων ελέγχου (HN–LN). Αυτά τα σήματα αποτελούνται από παλμιούς PWM για έλεγχο ταχύτητας και λογικά επίπεδα για έλεγχο κατεύθυνσης (σύμφωνα με τις ρυθμίσεις H-Bridge).
- **Driver → Κινητήρας (x2):**
Κάθε DC Motor 21 Click οδηγεί έναν κινητήρα, με σύνδεση δύο καλωδίων στους ακροδέκτες εξόδου OUT1 και OUT2. Η πολικότητα αυτών καθορίζει τη φορά περιστροφής. Επιπλέον μοιράζονται κοινή τροφοδοσία με τα άλλα εξαρτήματα από την μπαταρία.
- **ESP32 → Hall Sensors (x2):**
Κάθε αισθητήρας Hall είναι συνδεδεμένος με ένα pin εισόδου του ESP32 για την ανάγνωση των παλμών. Επιπλέον, μοιράζονται κοινή τροφοδοσία και γειώσεις.
- **Μπαταρία → Όλο το κύκλωμα:**
Η μπαταρία 3.7V τροφοδοτεί το κύκλωμα είτε απευθείας είτε μέσω ρυθμιστή τάσης για ασφαλή τροφοδοσία του ESP32 και των υπολοίπων εξαρτημάτων. Η επιλογή της έγινε λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος, τη διάρκεια λειτουργίας και τη σταθερότητα τάσης.
- **Γειώσεις (GND):**
Όλα τα υποσυστήματα συνδέονται σε κοινή γείωση, ώστε να διασφαλιστεί ορθός κοινός αναφοράς σημάτων και αποφυγή παρεμβολών.

4.7 Τεχνική PWM

Το Pulse Width Modulation (PWM) αποτελεί μία τεχνική διαμόρφωσης σήματος που χρησιμοποιείται ευρέως στον έλεγχο ισχύος, στην οδήγηση ηλεκτροκινητήρων, στη μετατροπή σήματος καθώς και στην επικοινωνία σημάτων. Ουσιαστικά, επιτρέπει την αναπαράσταση ενός αναλογικού σήματος μέσω ψηφιακής διακοπής, διατηρώντας τα πλεονεκτήματα της αποδοτικής διαχείρισης ενέργειας και του εύκολου ελέγχου από μικροελεγκτές.

Η βασική αρχή της λειτουργίας PWM βασίζεται στην μεταβολή της διάρκειας ενεργοποίησης ενός περιοδικού ψηφιακού παλμού, με σταθερή συχνότητα. Το ποσοστό του χρόνου που το σήμα είναι “HIGH”, δηλαδή ενεργοποιημένο να περνάει ρεύμα, σε σχέση με την περίοδο ονομάζεται duty cycle. Εφαρμόζοντας μια PWM κυματομορφη στην τροφοδοσία ενός φορτίου, καταφέρνουμε να ελέγξουμε το ποσοστό ισχύος που πέφτει πάνω στο φορτίο. Για την περίπτωσή μας το φορτίο είναι οι κινητήρες, όπου αυτό συνεπάγεται έλεγχος της ταχύτητας των στροφών των κινητήρων.

$$D(\%) = 100 \cdot \frac{T_{ON}}{T} \quad 4.1$$

Όπου:

- T είναι η περίοδος του παλμού.
- T_{ON} είναι ο χρόνος ενεργοποίησης.
- D το duty cycle.

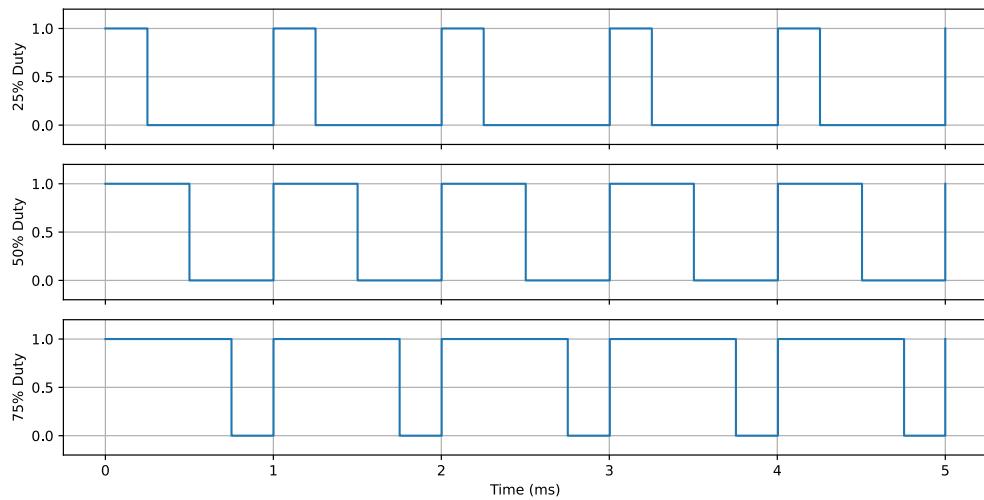
Η μέση μεταφερόμενη ισχύς του σήματος καθορίζεται από το μέσο όρο της κυματομορφης.

$$V_{avg} = D \cdot V_{max} \quad 4.2$$

Στην παρακάτω γραφική απεικόνιση φαίνονται PWM κυματομορφές για duty cycles 25%, 50% και 75%

Η συγχότητα του σήματος παραμένει σταθερή στον χρόνο και για τις τρεις περιπτώσεις. Το μόνο που αλλάζει κάθε φορά, είναι η ενεργή διάρκεια (HIGH) του σήματος, μεταβάλλοντας έτσι την ενεργειακή επίδραση στο φορτίο.

PWM Signals with Varying Duty Cycles



Εικόνα 4-8: Αναπαράσταση τριών σημάτων PWM

Η τεχνική PWM αποτελεί θεμελιώδη τρόπο ελέγχου ψηφιακών σημάτων ισχύος. Η κατανόησή της στον χρονικό αλλα και στο φασματικό πεδίο είναι κρίσιμη για τον ακριβή ελεγχο κινητήρων και την υλοποίηση αυτόνομου ρομποτικού μηχανισμού.

4.8 Σύγκριση Bluetooth και Wi-Fi για την Ελαχιστοποίηση Καθυστέρησης

Η ασύρματη επικοινωνία ανάμεσα στον υπολογιστή (ή μικροελεγκτή-διαχειριστή) και το ρομπότ είναι κρίσιμη για την αποτελεσματική λειτουργία ενός κλειστού βρόχου ελέγχου. Κατά την φάση της υλοποίησης, δοκιμάστηκαν δύο εναλλακτικά πρωτόκολλα επικοινωνίας και συγκρίθηκαν για την εύρεση του καλύτερου αποτελέσματος:

4.8.1 Bluetooth

To Bluetooth Classic (ή BLE) προσφέρει:

- **Πλεονεκτήματα:**
 - Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας
 - Εύκολη σύζευξη με φορητούς υπολογιστές
 - Εύκολη χρήση μέσω απλών εφαρμογών(putty)
 - Απλό πρωτόκολλο
- **Μειονεκτήματα:**
 - Χαμηλό bitrate (~1 Mbps BLE)

- Υψηλότερο latency για real-time επικοινωνία (συνήθως ~20ms)
- Μειωμένη αξιοπιστία σε πολυπλοκότερες εφαρμογές κλειστού ελέγχου

4.8.2 Wi-Fi (UDP)

Το ESP32 προσφέρει επικοινωνία Wi-Fi μέσω πρωτοκόλλων UDP. Επιλέχθηκε το UDP για τις δοκιμές λόγω:

- **Πλεονεκτήματα:**
 - Υψηλό bitrate (μέχρι 54 Mbps, θεωρητικά)
 - Ελάχιστο latency (~5ms σε ίδιες συνθήκες)
 - Υποστήριξη real-time ανανέωσης τιμών ελέγχου (π.χ. θέση, ταχύτητα)
- **Μειονεκτήματα:**
 - Ελαφρώς αυξημένη κατανάλωση ισχύος σε σύγκριση με BLE
 - Απαιτεί χειροκίνητη διαχείριση αποσυνδέσεων και ασφαλείας
 - Απαιτεί εγκαθίδρυση επικοινωνίας μέσω προγραμματισμού για επικοινωνία με udp.

Τελική Επιλογή: Wi-Fi (UDP)

Για λόγους ταχύτερης ανανέωσης σήματος, μεγαλύτερης σταθερότητας και βελτιστοποίησης του κλειστού βρόχου ελέγχου, επιλέχθηκε η Wi-Fi επικοινωνία μέσω UDP sockets. Αυτό επιτρέπει την επικοινωνία σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, γεγονός ιδιαίτερα κρίσιμο για τη σταθερή ρύθμιση της τροχιάς του ρομπότ.

4.9 Τελική Συναρμολόγηση του Ρομπότ

Σε αυτήν την υποενότητα παρουσιάζεται η πλήρης συναρμολόγηση του ρομπότ με το υλικό και την συνδεσμολογία που αναλύθηκαν στην ενότητα 4. Δίνεται έμφαση στην υλική δομή, την κατανομή των εξαρτημάτων και τη λειτουργική οργάνωση του συστήματος. Το τελικό πρότυπο συνδυάζει ηλεκτρονικά και μηχανολογικά μέρη με τρόπο που εξασφαλίζει την σταθερότητα, την επεκτασιμότητα και την συμμετρία για την ακρίβεια και την απόδοση του συστήματος.

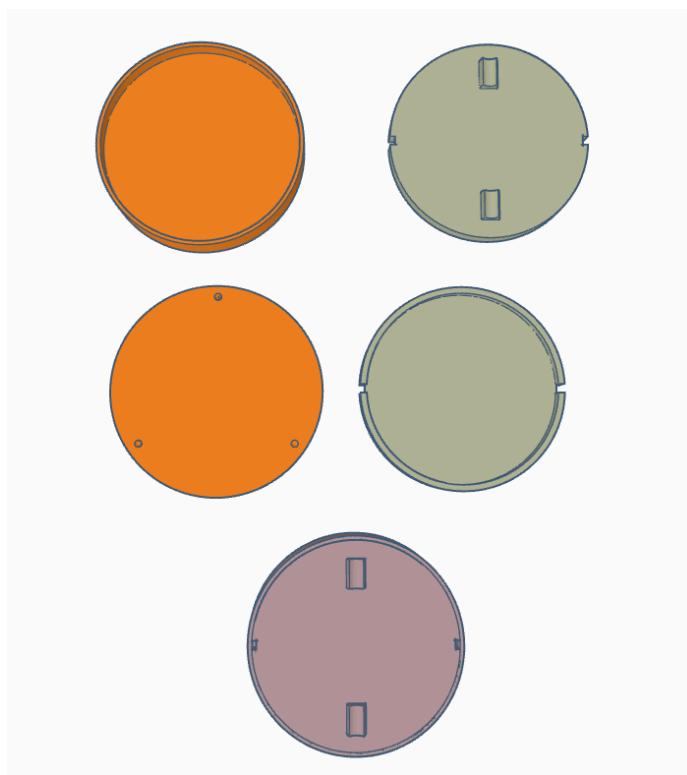
4.9.1 CAD Σχεδίαση Πλατφόρμας

Η βάση του ρομπότ σχεδιάστηκε στο ανοιχτό λογισμικό TinkerCAD, για να εξασφαλιστεί η συμμετρική κατανομή μάζας και η σταθερότητα του συστήματος. Η πλατφόρμα συνδυάστηκε σε δύο μέρη, το επάνω μέρος και την βάση για να είναι σε μορφή ‘κουτιού’ ώστε να μπορούν να σταθεροποιούνται τα στηρίγματα του ρομπότ και να εξασφαλίσουμε πως δεν θα μεταβάλλεται η θέση τους εξαετίας των δονήσεων.

Παράμετρος	Άνω Τμήμα	Κάτω Τμήμα
Διάμετρος κύκλου	82mm	84.2mm
Ύψος	12mm	14mm
Πάχος βάσης	2mm	2mm
Βίδες σύνδεσης	M3	-
Οπές σημείων επαφής	-	5mm

Πίνακας 4.2: Κύριες διαστάσεις πλατφόρμας

Παρακάτω παρουσιάζονται τα CAD σχέδια της πλατφόρμας με τις οπές για τα σημεία επαφής με το έδαφος και τα σημεία υποδοχής των κινητήρων.



Εικόνα 4-9: CAD σχεδίαση πλατφόρμας, αριστερά το κάτω μέρος δεξιά το επάνω, τέλος ο συνδυασμός

Το σχέδιο της πλατφόρμας υλοποιήθηκε με τον 3D εκτυπωτή ‘Creality cr-10s pro’, τύπου FDM (Fused Deposition Modeling) για την ακρίβεια των μοντέλων. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν PLA για να κρατηθεί το κόστος και το συνολικό βάρος χαμηλό.

4.9.2 Συναρμολόγηση και Καλωδίωση

Η διαδικασία συναρμολόγησης έγινε σε δύο στάδια:

1. Ηλεκτρική Σύνδεση:

- Τοποθέτηση ηλεκτρονικών υλικών στις διάτρητες πλακέτες και συγκόλλησή τους με καλάι.
- Σύνδεση καλωδίων με βάση το κύκλωμα της εικόνας [4.7] και συγκόλλησή τους με καλάι.
- Σύνδεση κινητήρων με τους οδηγούς μέσω καλωδίων και συγκόλληση με αυτούς.

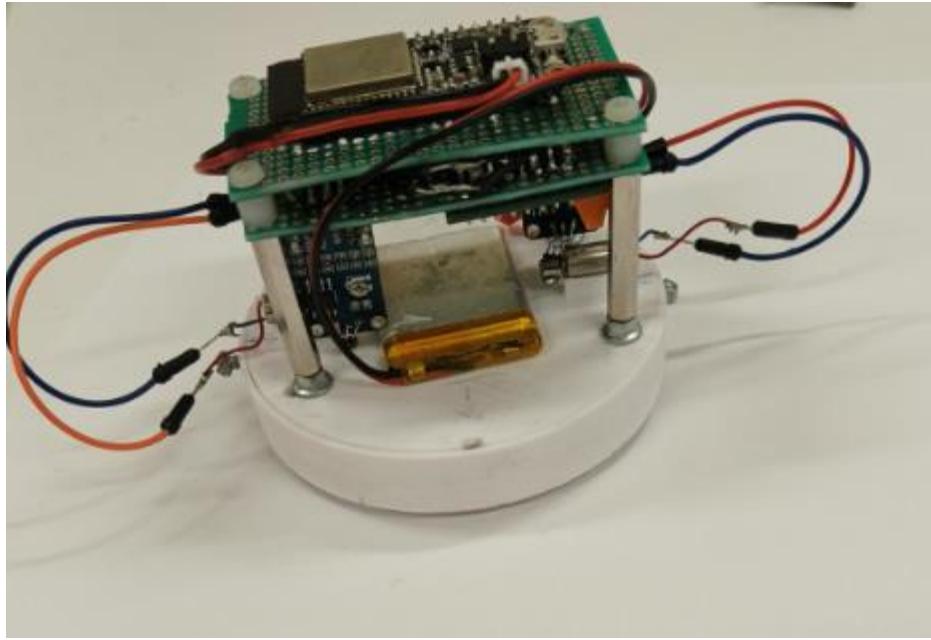
2. Μηχανική Συναρμολόγηση

- Στήριξη των δύων πλακετών με μικρούς αποστάτες, αρσενικό – θηλυκό, ύψους 6mm και διάμετρο 5mm και βίδες M3.
- Στήριξη της άνω βάσης με τις πλακέτες με αποστάτες 30mm και διάμετρο 5mm και παξιμάδια για την σταθερότητα του συστήματος.
- Κόλληση με ισχυρή κόλλα ατσαλένιες σφαίρες 5mm στις οπές της κάτω βάσης και τους κινητήρες στις θέσης της πάνω βάσης.
- Κόλληση της μπαταρίας στο κέντρο του πάνω μέρους της πλατφόρμας για εξασφάλιση χαμηλού κέντρου βάρους.
- Ένωση των δύο κομματιών της πλατφόρμας σταθεροποιώντας το με δύο βίδες για την επιθυμητή συμμετρία.

4.9.3 Τελική Μορφή του Ρομπότ

Η συναρμολόγηση αυτή είχε στόχο στην μεγαλύτερη δυνατή συμμετρία που μπορούσε να επιτευχθεί με ελαφρά ασύμμετρα υλικά και το χαμηλό συνολικό κόστος κατασκευής. Επιπλέον το βάρος του συνολικού ρομποτικού συστήματος έχει μεγάλη επίδραση στην τελική κίνηση του ρομπότ καθώς για χαμηλό βάρος η πλατφόρμα κάνεις χαοτικές κινήσεις ενώ για υψηλό βάρος η δονητικές δυνάμεις των κινητήρων δεν είναι αρκετές για να ξεπεράσουν το βάρος της πλατφόρμας με αποτέλεσμα να μην μετακινηθεί.

Η εικόνα (4.10) δείχνει το πλήρως συναρμολογημένο ρομπότ, έτοιμο για λειτουργία και πειραματικούς ελέγχους για την ακρίβεια της κίνησης και τον αυτόνομο έλεγχο.



Εικόνα 4-10: Πλήρης συναρμολογημένη μορφή του ρομπότ

Η τελική κατασκευή δίνει δυνατότητα συναρμολόγησης με χαμηλό κόστος δύνοντας δυνατότητα υποστήριξης πολλαπλών πειραμάτων ελέγχου και αξιολόγησης των θεωρητικών μοντέλων κίνησης και προσομοίωσης. Η χρήση CAD εργαλείων και ανεξάρτητων υλικών για το τελικό κύκλωμα, δίνει την δυνατότητα επεκτασιμότητας του κυκλώματος και των δυνατοτήτων του ρομπότ καθώς και την εύκολη συντήρηση η επισκευή πιθανών ελαττωμάτων.

Προβλήματα Κίνησης και Τελικές Βελτιστοποιήσεις

Κατά τη δοκιμή της κίνησης του ρομπότ εντοπίστηκε ένα σημαντικό λειτουργικό πρόβλημα: η κίνηση συνοδευόταν από χαοτική και ασταθή συμπεριφορά, με εμφανή παρουσία μηχανικού θορύβου και τυχαίων ταλαντώσεων. Αυτή η αστάθεια εμπόδιζε τη δυνατότητα ακριβούς ελέγχου της ταχύτητας και της κατεύθυνσης, ιδίως σε χαμηλές τιμές ταχύτηος.

Παρατηρήθηκε ότι, όταν οι κινητήρες λειτουργούσαν σε χαμηλές ταχύτητες, η κίνηση του ρομπότ γινόταν απρόβλεπτη και ασύμμετρη. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι, κάτω από ένα ορισμένο όριο τάσης και ρεύματος, οι κινητήρες δεν παρείχαν επαρκή ροπή ώστε να υπερνικήσουν τις εσωτερικές στατικές τριβές και την αδράνεια των εκκεντρικών μαζών. Ως αποτέλεσμα, το ρομπότ είτε παρέμενε ακίνητο είτε εκτελούσε απότομες και άσκοπες μικρομετακινήσεις.

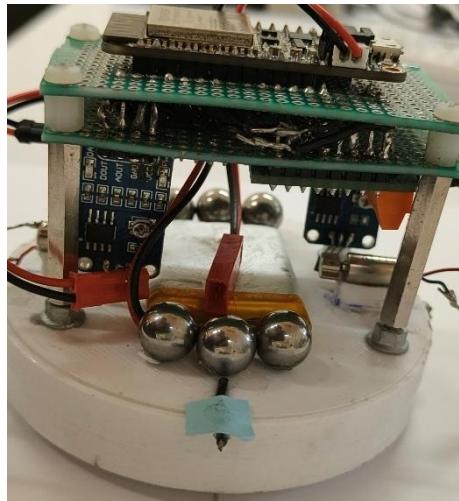
Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, πραγματοποιήθηκε κατασκευαστική επέμβαση στο ρομπότ:

Προστέθηκαν συμμετρικά κατανεμημένα βαρίδια, με σκοπό:

- Την αύξηση της συνολικής μάζας του ρομπότ

- Τη χαμηλότερη τοποθέτηση του κέντρου βάρους, ενισχύοντας τη στατική του σταθερότητα
- Τη μείωση της επίδρασης μικρών δονήσεων στο σώμα του ρομπότ

Η προσθήκη βάρους επέτρεψε στο σύστημα να φιλτράρει τις ανεπιθύμητες ταλαντώσεις και να ανταποκρίνεται πιο γραμμικά σε εντολές κίνησης, ενισχύοντας την ακρίβεια των αλγορίθμων κλειστού βρόγχου και τη σταθερότητα της πορείας.



Εικόνα 4-11: Ρομπότ με την προσθήκη 6 βαριδιών συμμετρικά στο μπροστινό και στο πίσω μέρος

Κεφάλαιο 5.

Έλεγχος Κίνησης με Μηχανή Καταστάσεων

5.1 Εισαγωγή

Η αυτόνομη κίνηση του ρομπότ σε παραδοσιακούς μηχανισμούς κίνησης βασίζεται σε δύο βασικά κομμάτια: τον υπολογισμό της επιθυμητής τροχιάς και την υλοποίηση του κατάλληλου συστήματος ελέγχου ώστε η κίνηση να ακολουθεί όσο το δυνατόν πιο πιστά αυτή την τροχιά. Λόγο της απρόβλεπτης χαοτικής κίνησης εξαιτίας των τριβών και των δονήσεων εισάγουμε μια νέα μεθοδολογία αυτόνομης κίνησης, βασισμένη σε δυναμική αναγνώριση καταστάσεων και στον έλεγχο κλειστού βρόχου με ανατροφοδότηση από αισθητήρες. Αντί για προγραμματισμένη πλοήγηση βάσει εξισώσεων κίνησης, χρησιμοποιείται μία μηχανή καταστάσεων η οποία καθορίζει σε πραγματικό χρόνο την ενέργεια του ρομπότ, με βάση τις τιμές ταχύτητας, προσανατολισμού και θέσης.

Η μέθοδος βασίζεται σε τρείς φάσεις:

- Ακριβής Έλεγχος Ταχύτητας Κινητήρων μέσω Ελέγχων Κλειστών Βρόγχων
- Επιβεβαίωσης Πιθανών Κινήσεων του Ρομπότ Σύμφωνα με το Θεωρητικό Μοντέλο
- Υλοποίηση Μηχανής Καταστάσεων με Διορθωτική Ανατροφοδότηση από Υπολογιστική Όραση

5.2 Έλεγχος Κίνησης των Κινητήρων με Κλειστό Σύστημα

Αρχικά, για να επιτύχουμε αξιόπιστο έλεγχο του συστήματος για την αυτόνομη κίνηση του ρομπότ, απαιτείται ο έλεγχος των δύο κινητήρων να είναι όσο πιο ακριβής γίνεται. Χρησιμοποιούμε το μοντέλο της αντίστροφης κινηματικής για την σχέση της τάσης με την γωνιακή ταχύτητα ώστε στο τελικό μοντέλο να παίρνουμε την απαραίτητη τάση που χρειάζεται για την επιθυμητή κίνηση, καθώς είναι το μόνο πράγμα που ελέγχουμε στο ρομπότ.

5.2.1 Εξισώσεις Τάσης και περιστροφικής Ταχύτητας

Η μελέτη ξεκινά με την βασική εξίσωση συμπεριφοράς του κινητήρα που βρήκαμε στη 3^η ενότητα, στην εξίσωση 3.21, και την αντιστρέφουμε ώστε να μετασχηματίσουμε την εξίσωση:

$$\omega(t) = \mathcal{F}(V(t)) \Rightarrow V(t) = \mathcal{F}^{-1}(\omega(t)) \quad 5.1$$

Η τελική εξίσωση που καταλήγουμε παίρνει την μορφή¹¹:

$$V_s = \frac{(bR+K_t^2)\omega + csign(\omega) + JRu + Rmgsin(\theta)}{K_t} \quad 5.2$$

Όπου u είναι ο όρος που αντικαθιστά τον μη γραμμικό όρο $\dot{\omega}$ και μας δίνει την ανατροφοδότηση του συστήματος για τον έλεγχο της κίνησης.

Αυτή η εξίσωση χρησιμοποιείται ως βάση για τον υπολογισμό της τάσης που απαιτείται ώστε να διατηρηθεί μια συγκεκριμένη γωνιακή ταχύτητα.

Για να μπορέσουν οι ελεγκτές να ελέγχουν αποτελεσματικά τους κινητήρες, είναι απαραίτητο η έξοδος του σήματος αναλογικού σήματος V_s , να μετατραπεί σε μια μορφή που μπορεί να καταλάβει το φυσικό σύστημα. Επιπλέον υπάρχει διαφοροποίηση στην έξοδο του ESP και στην έξοδο των οδηγών καθώς οι οδηγοί ελέγχονται από τον μικροελεγκτή αλλά πάρινον την απαραίτητη τάση από την μπαταρία. Συγκεκριμένα, η έξοδος αυτή εκφράζεται συνήθως ως τάση ελέγχου σε (Volt), αλλά ο μικροελεγκτής που οδηγεί τον κινητήρα χρησιμοποιεί PWM σήμα (με τιμές duty cycle από 0 έως 255) για την πρακτική υλοποίηση της τάσης.

Αυτό σημαίνει ότι χρειάζεται η λειτουργική χαρτογράφηση από την έξοδο του ελεγκτή σε τιμές PWM. Αν και σε ιδανικές συνθήκες θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μια γραμμική σχέση, η συμπεριφορά του κινητήρα εμφανίζει μη γραμμική συμπεριφορά. Για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκε ένα πολυωνυμικό μοντέλο όπου τροφοδοτήθηκε με πειραματικές μετρήσεις, και για διάφορες σταθερές τιμές τάσης καταγράφηκαν οι αντίστοιχες τιμές duty cycle που απαιτούνται ώστε να κινηθεί ο κινητήρα με συνέπεια.

Τα σημεία που προέκυψαν από τις μετρήσεις ήταν:

Τάση (V)	Duty Cycle
1.5	56
1.04	28
0.62	4
0.05	0

Πίνακας 5.1: Αντιστοιχισμένες Τιμές PWM

Με βάση αυτά τα σημεία, χρησιμοποιήθηκε το πολυωνυμικό μοντέλο παλινδρόμησης τρίτου βαθμού ώστε να προκύψει μια εξίσωση της μορφής:

$$duty(V) = aV^3 + bV^2 + cV + d \quad 5.3$$

Με την επίλυση του μοντέλου μέσο μεθόδων γραμμικής άλγεβρας καταλήξαμε στους συντελεστές a, b, c, d :

Συντελεστές	Τιμές
-------------	-------

a	-31.997748
b	105.8
c	-50
d	2.5

Πίνακας 5.2: Συντελεστές Πολυωνυμικού Μοντέλου

5.2.2 Κλειστός Βρόχος Ελέγχου με τυχαίες παραμέτρους PID

Ένας αναλογικός-ολοκληρωτικός-παραγωγικός ελεγκτής (ελεγκτής PID) είναι ένας γενικός μηχανισμός ελέγχου κλειστού βρόχου, όπου χρησιμοποιεί την ανατροφοδότηση του συστήματος και χρησιμοποιείται γενικότερα σε ρομποτικά συστήματα και συστήματα αυτοματισμού. Ένας ελεγκτής τέτοιου τύπου, προσπαθεί να διορθώσει το λάθος μεταξύ της επιθυμητής τιμής του συστήματος και της μετρημένης τιμής την χρονική στιγμή μέσο κάποιων αισθητήρων και έπειτα η έξοδος περνάει μια διαδικασία μετασχηματισμού για να πάρει την μορφή που ελέγχουμε το σύστημα.

Ο υπολογισμός του ελεγκτή PID για την κατάλληλη έξοδο, έχει τρεις βασικού όρους:

- Αναλογικός όρος (Proportional, K_p): Αντιδρά άμεσα στο παρόν σφάλμα μεταξύ επιθυμητής και πραγματικής τιμής. Όσο μεγαλύτερο το σφάλμα τόσο μεγαλύτερη η ενέργεια που θα πραγματοποιήσει για να το διορθώσει καθώς είναι ανάλογο της έξόδου.
- Ολοκληρωτικός όρος (Integral, K_i): Συσσωρεύει το σφάλμα με την πάροδο του χρόνου και προσπαθεί να το μηδενίσει πλήρως, εξαλείφοντας όσο περισσότερο γίνεται την μόνιμη απόκλιση.
- Παραγωγικός όρος (Derivative, K_d): Προβλέπει την εξέλιξη του σφάλματος δρώντας προληπτικά, με βάση τον ρυθμό μεταβολής του σε σχέση με τον χρόνο. Σκοπός του είναι η μείωση των ταλαντώσεων και οι υπερυψώσεις που μπορεί να προκληθούν από του προηγούμενους όρους.

Η συνολική έξοδος του ελεγκτή (σήμα ελέγχου) είναι ένας συνδυασμός αυτών των τριών όρων, σταθμισμένος από τις αντίστοιχες ενισχύσεις. Ο μαθηματικός τύπος που θα τροφοδοτηθεί στην εξίσωση (75) για τον τελικό μετασχηματισμό είναι:

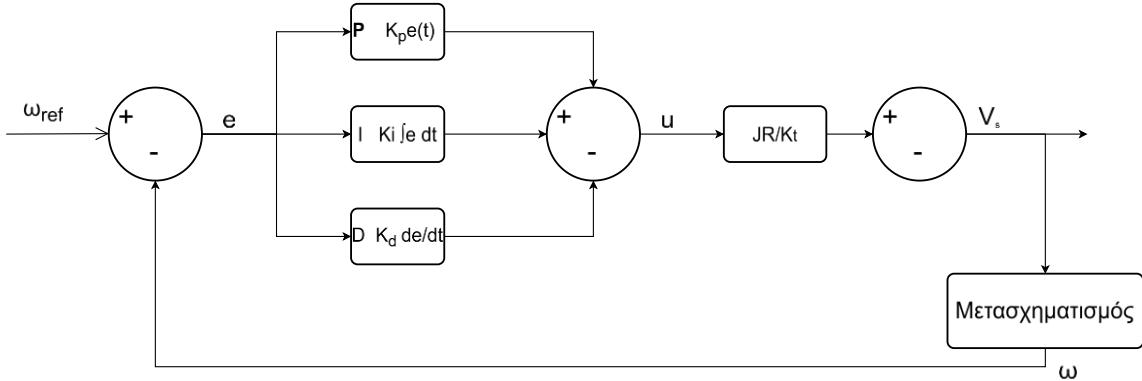
$$e = \omega_{ref} - \omega \quad 5.4$$

$$u = K_p e + K_i \int e dt + K_d \frac{de}{dt} \quad 5.5$$

Ο σωστός συντονισμός των παραμέτρων αυτών είναι κρίσιμος για την ομαλή συμπεριφορά του συστήματος ως προς:

- Την ταχύτητα απόκρισης, δηλαδή πόσο γρήγορα θα φτάσει το σύστημα στην επιθυμητή τιμή,

- Την υπερύψωση (overshoot), δηλαδή εάν και κατά πόσο θα ξεπεράσει το σύστημα την επιθυμητή τιμή,
- Την σταθερότητα και τις ταλαντώσεις, δηλαδή πόσο κοντά θα είναι στην επιθυμητή και πόσο θα αποκλίνει από αυτή



Εικόνα 5-1: PID Ελεγκτής

5.2.2.1 Εύρεση Βέλτιστων Παραμέτρων

Η επιτυχής εφαρμογή ενός PID ελεγκτή εξαρτάται από την κατάλληλη επιλογή παραμέτρων K_p , K_i , K_d . Καθώς με λανθασμένες παραμέτρους του σύστημα βρίσκεται σε κίνδυνο να μην λειτουργήσει σωστά. Για το σύστημα των κινητήρων, η χειροκίνητη ρύθμιση των παραμέτρων ήταν ανεπαρκής. Αντί για εμπειρική προσέγγιση, εφαρμόστηκε μια στοχαστική τεχνική βελτιστοποίησης γνωστή ως Simulated Annealing (SA).

Η στόχευση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης είναι να ελαχιστοποιήσει το σφάλμα απόκρισης του συστήματος, παρέχοντας μια ρύθμιση παραμέτρων που προσφέρει:

- Ταχεία απόκριση συστήματος
- Ελαχιστοποίηση υπερανύψωσης
- Ομαλή συμπεριφορά χωρίς ταλαντώσεις

Το Simulated Annealing είναι ένας αλγόριθμος εμπνευσμένος μέσα από ένα φυσικό φαινόμενο της ανόπτησης μετάλλων. Σε κάθε επανάληψη, δοκιμάζεται ένα σύνολο παραμέτρων, το οποίο γίνεται αποδεκτό αν το σφάλμα του είναι μικρότερο από το προηγούμενο σφάλμα, είτε γίνεται αποδεκτό με βάση κάποια τυχαία πιθανότητα ακόμα και αν είναι μερικές φορές χειρότερο, επιτρέποντας έτσι την έξοδο από τοπικά ελάχιστα.

Παρουσιάζεται με ψευδοκώδικα ο αλγόριθμος που υλοποιήθηκε:

Αλγόριθμος 1: Simulated Annealing με PID Έλεγχο

- 1: Αξιολόγηση Παραμέτρων(N , παράμετροι):
 - 2: Για i από 0 έως N :
 - 3: πραγματική => Μέτρησε πραγματική ταχύτητα κινητήρα
 - 4: τάση => Υπολόγισε την έξοδο του Ελεγκτή(επιθυμητή, πραγματική, παράμετροι)
 - 5: εντολή κίνησης(τάση)
 - 6: συνολικό σφάλμα += σφάλμα(πραγματική, επιθυμητή)
 - 7: επέστρεψε $\sqrt{\text{συνολικό σφάλμα}^2 / N}$

 - 8: Αλγόριθμος Annealing(T):
 - 9: Αρχικοποίηση τιμών: τρέχον = αρχικό, βέλτιστες = αρχικό
 - 10: Για κάθε θερμοκρασία $T > T_{\text{ελάχιστο}}$:
 - 11: νέες παράμετροι => τρέχον * τυχαίο αριθμό(-1.0,1.0)
 - 12: σφάλμα τρέχον => Συνάρτηση Αξιολόγηση Παραμέτρων(N , τρέχον)
 - 13: σφάλμα νέων => Συνάρτηση Αξιολόγηση Παραμέτρων(N , νέες παράμετροι)
 - 14: Εάν σφάλμα νέων < σφάλμα τρέχον ή $e^{\frac{(\text{σφάλμα τρέχων} - \text{σφάλμα νέων})}{T}} > \pi\theta\alpha\nότητα \alpha\pi\delta\omega\chi\j\zeta$:
 - 15: τρέχον => νέες
 - 16: Εάν σφάλμα νέων < σφάλμα βέλτιστων: βέλτιστες => νέες
 - 17: $T = \alpha * T //$ Μείωση θερμοκρασίας
 - 18: Επέστρεψε βέλτιστες
-

Ο αλγόριθμος υλοποιήθηκε πάνω στην προσομοίωση που αναφέρθηκε στην ενότητα [3], για βέλτιστες παραμέτρους, καθώς και σε επόμενη φάση υλοποιήθηκε και απευθείας πάνω στον ESP32.

Παράμετροι του αλγορίθμου SA:

- T (θερμοκρασία) = 10.0

- $T_{\text{ελάχιστο}} = 0.1$
- Συντελεστής Πτώσης Θερμοκρασίας: $\alpha = 0.995$
- Μέγιστος Αριθμός Επαναλήψεων: $N = 1000$
- Επιθυμητή Ταχύτητα: $\omega_{\text{ref}} = 800 \text{ rad/s}$

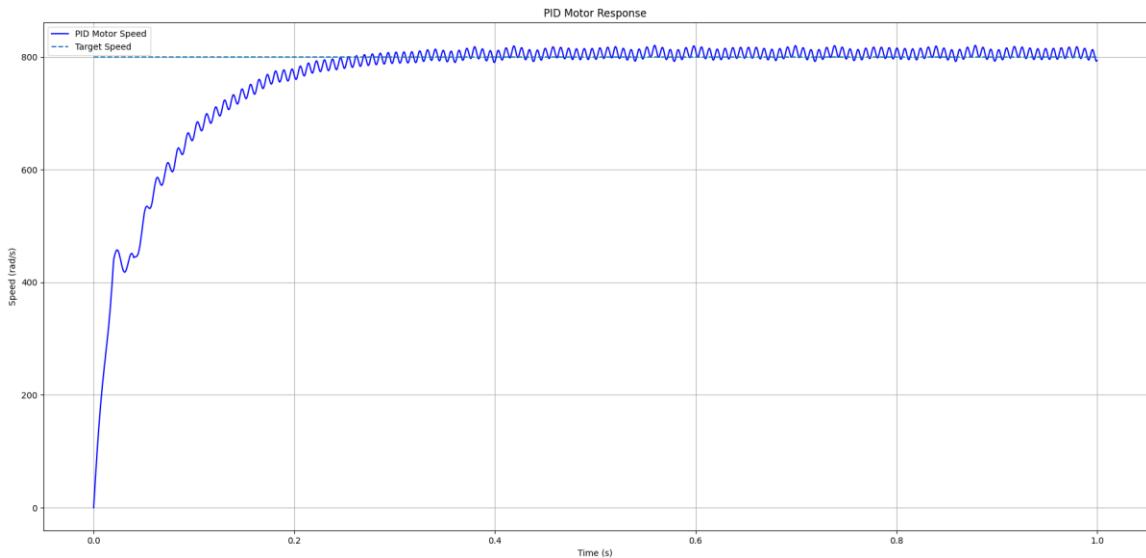
Ο αλγόριθμος έτρεξε αρκετές φορές τόσο για την εκτίμηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων, όσο και για την εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων του συστήματος για τον ελεγκτή.

Η βέλτιστη λύση που προέκυψε ήταν:

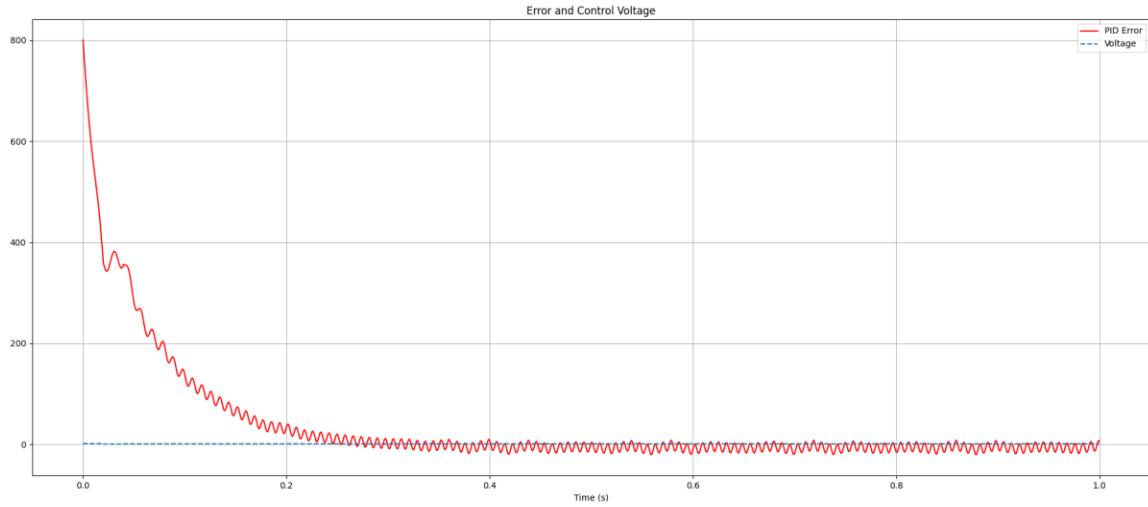
$$K_p = 22.739, K_i = 3.12294, K_d = 0.399358$$

Η απόκριση του συστήματος στην προσομοίωση με τις συγκεκριμένες παραμέτρους έδειξε:

- Settling time: $\sim 0.27 \text{ s}$
- Αμελητέο Overshoot
- Ελάχιστο steady-state error
- Καλή απόσβεση και σταθερότητα



Εικόνα 5-2: PID Ελεγκτής με Παραμέτρους από SA

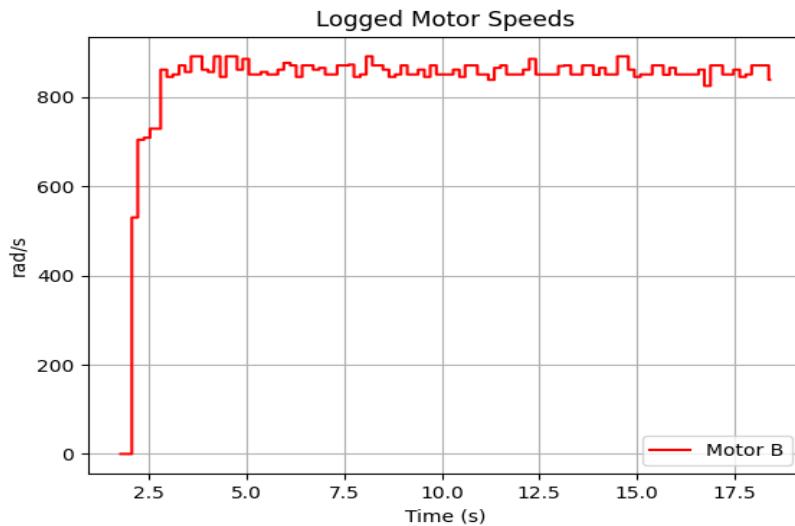


Εικόνα 5-3: Σφάλμα Ελεγκτή

Ο ίδιος αλγόριθμος βελτιστοποίησης με παρόμοιες μεταβλητές έτρεξε και στους φυσικούς κινητήρες μέσω του ESP32, και μετά από αρκετά πειράματα. Καθώς και λίγο χειροκίνητες επεμβάσεις για την αποφυγή τοπικών ελαχίστων καταλήξαμε στις παραμέτρους για τον PID:

$$K_p = 20.9, K_i = 2.36, K_d = 0.25$$

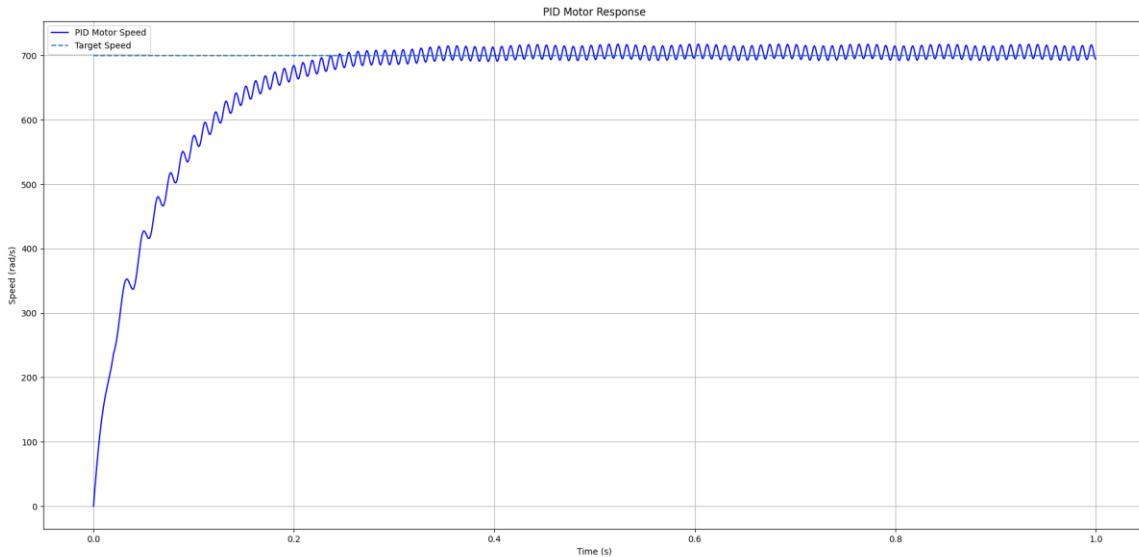
Τα αποτελέσματα των παραμέτρων για τον φυσικό μοντέλο:



Εικόνα 5-4: PID Ελεγκτής για Φυσικό Μοντέλο

Ο μικροελεγκτής είναι λογικό να μας προσφέρει μικρότερη ανάλυση καθώς έχει μειωμένες δυνατότητες από τον υπολογιστή με κανονικό λογισμικό καθώς και τις τιμές τις λαμβάνουμε μέσο UDP σύνδεσης όποτε υπάρχει απώλεια και καθυστέρηση των πακέτων. Παρόλα αυτά παρατηρείται μικρή υπερανύψωση και σχετικά σταθερή συμπεριφορά κοντά στην επιθυμητή ταχύτητα των 800 rad/s.

Τέλος δοκιμάστηκαν και οι παράμετροι του φυσικού μοντέλου στην προσομοίωση και τα αποτελέσματα είχαν αρκετά παρόμοια συμπεριφορά με το φυσικό μοντέλο. Αναμενόμενα τα αποτελέσματα δεν ήταν ίδια ακριβώς καθώς στο φυσικό μοντέλο υπάρχουν και χαοτικές συμπεριφορές που δεν μπορούν να προβλεφθούν με τον ίδιο τρόπο που γίνεται σε μία προσομοίωση.



Εικόνα 5-5: PID Ελεγκτής Προσομοίωσης με Παραμέτρους Φυσικού Μοντέλου

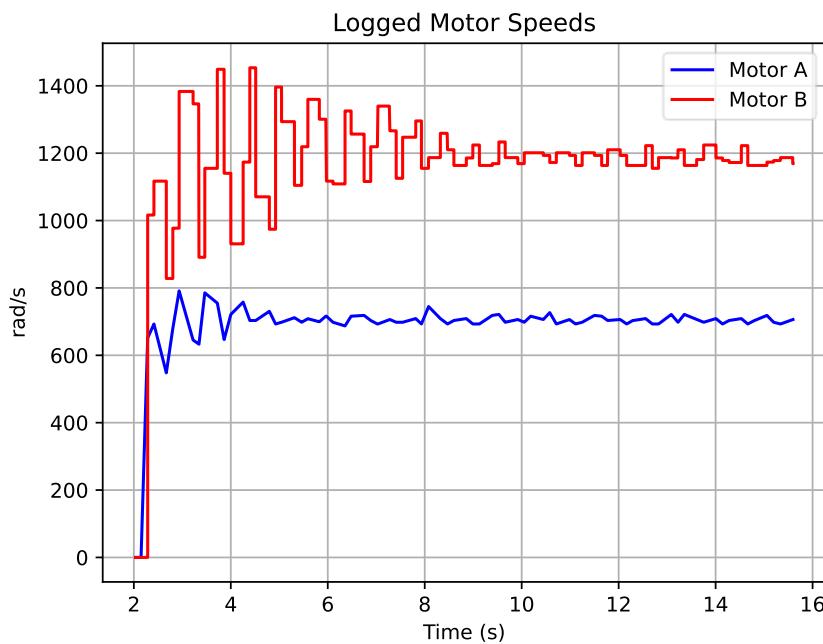
Αξιολόγηση Χρονικής Απόκρισης και Σταθερότητας με Μικρότερο Διάστημα Ελέγχου

Αφού επιτεύχθηκε σταθερή συμπεριφορά του συστήματος με ταχύτερη απόκριση χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους του βελτιστοποιημένου PID, δοκιμάστηκε και μία επιπλέον παραμετρική τροποποίηση, με στόχο τη βελτίωση της ακρίβειας και του ελέγχου αλλά και την μείωση των καθυστερήσεων ελέγχου που εισάγονται από διαφορετικούς παράγοντες του πειράματος. Η μείωση του διαστήματος ενημέρωσης του ελεγκτή στα 8ms για την άμεση απόκριση καθώς και η μείωση ιδανικών ταχυτήτων για την μικροσκοπική κίνηση.

Αρχικά, φάνηκε πως το σύστημα και τον δύο κινητήρων έκανε υπερανύψωση, παρατηρήθηκε αστάθεια και ταλαντώσεις και μετά από μικρή διάρκεια λειτουργίας το σύστημα σταθεροποιήθηκε αλλά σε μεγαλύτερη ταχύτητα από την επιθυμητή. Το φαινόμενο αυτό δεν παρατηρήθηκε με μεγαλύτερο χρονικό διάστημα ενημέρωσης που χρησιμοποιήθηκε στην αρχή 20ms. Η συχνότερη ενημέρωση του PID, αλλά και η

ταυτόχρονη ενημέρωση των δύο κινητήρων ενίσχυσαν την ευαισθησία του συστήματος σε θόρυβο μετρήσεων, καθυστέρηση επικοινωνίας μέσω UDP, και πιθανόν αριθμητικά σφάλματα στον υπολογισμό του παραγώγου όρου.

Παρακάτω παρουσιάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα όπου παρατηρείται η αποσταθεροποίηση του συστήματος:



Εικόνα 5-6: Απόκριση Συστήματος με Ενημέρωση PID ανά 8ms στα 600rad/s επιθυμητή ταχύτητα.

Αυτή η παρατήρηση ανέδειξε ένα σημαντικό συμπέρασμα: Η μείωση του χρονικού διαστήματος δεν οδηγεί πάντα σε καλύτερη απόδοση, και το βέλτιστο διάστημα πρέπει να επιλέγεται με βάση τον συγκεκριμένο αισθητήρα, το σύστημα καθυστέρησης και την αριθμητική ακρίβεια των υπολογισμών. Η ευστάθεια είναι περισσότερο ευαίσθητη σε εξωτερικούς και εσωτερικούς παράγοντες όσο πιο πυκνή γίνεται η δειγματοληψία.

Η ανάγκη για βελτιωμένη συμπεριφορά και μεγαλύτερη ακρίβεια στον έλεγχο του πραγματικού συστήματος κατέστησε σαφές ότι το αρχικό μοντέλο δεν επαρκεί πλήρως για τον προσδιορισμό των ιδανικών παραμέτρων. Για τον λόγο αυτό, στο επόμενο κεφάλαιο (5.2.3) προτείνεται και εφαρμόζεται ένας πιο εξελιγμένος ελεγκτής τύπου PI, ο οποίος βγαίνει από μαθηματικές εξισώσεις του συστήματος και ελαχιστοποιεί το σφάλμα για μικρά χρονικά διαστήματα ενημέρωσης.

5.2.3 Κλειστός Βρόχος Ελέγχου με PI με μαθηματικές σταθερές

Ένας αναλογικός-ολοκληρωτικός ελεγκτής (PI) αποτελεί μια απλούστερη αλλά ευρέως χρησιμοποιούμενη μορφή ελεγκτή κλειστού βρόχου. Ο PI ελεγκτής αξιοποιεί την ανατροφοδότηση του συστήματος ώστε να διορθώνει το σφάλμα μεταξύ της επιθυμητής και της πραγματικής τιμής ενός μεγέθους, όπως η ταχύτητα περιστροφής ενός μοτέρ. Η έξοδος του ελεγκτή υπολογίζεται δυναμικά βάσει του σφάλματος και εφαρμόζεται στο σύστημα ως σήμα ελέγχου.

Η ανάγκη χρήσης ενός PI ελεγκτή προκύπτει από το γεγονός ότι ένας καθαρά αναλογικός ελεγκτής (P) αδυνατεί να εξαλείψει τη μόνιμη απόκλιση (steady-state error) που εμφανίζεται σε πολλά μη ιδανικά συστήματα. Προσθέτοντας τον ολοκληρωτικό όρο, ο ελεγκτής αποκτά τη δυνατότητα να λαμβάνει υπόψη το ιστορικό του σφάλματος και να το εξαλείψει σταδιακά, οδηγώντας σε πιο ακριβή και σταθερό έλεγχο.

Ο υπολογισμός της εξόδου ενός PI ελεγκτή βασίζεται στους παρακάτω δύο όρους:

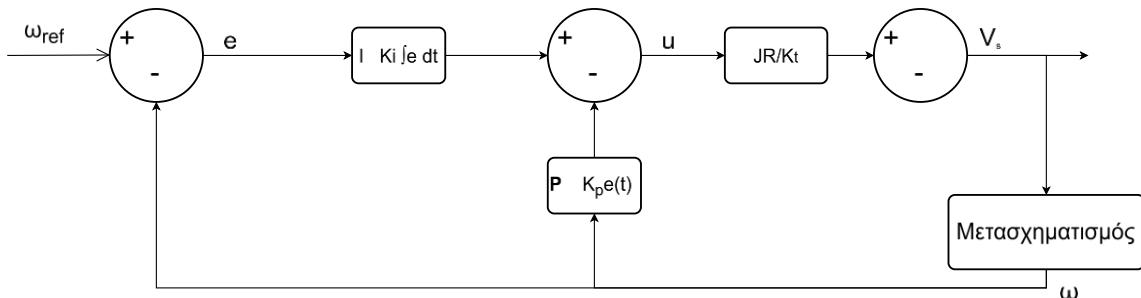
- Αναλογικός όρος (Proportional, K_p): Αντιδρά άμεσα στην επιθυμητή τιμή. Ασκείται σαν αναλογικό φρένο στις μεγάλες τιμές που μπορεί να αποκτήσει ο ολοκληρωτικός όρος.
- Ολοκληρωτικός όρος (Integral, K_i): Συσσωρεύει το σφάλμα με την πάροδο του χρόνου, και συμβάλλει στην εξάλειψη της μόνιμης απόκλισης. Ολοκληρώνοντας το σφάλμα οδηγεί το σύστημα στην επιθυμητή τιμή ακόμα και όταν υπάρχουν σταθερές διαταραχές.

Συγκεκριμένα ο ελεγκτής που εφαρμόστηκε είναι ο ελεγκτής της βιβλιογραφίας¹¹ και δίνεται από την μαθηματική σχέση:

$$e = \omega_{ref} - \omega \quad 5.6$$

$$u = -K_p e + K_i \int e dt \quad 5.7$$

Ο PI ελεγκτής, παρά την απλότητά του, είναι ευρέως διαδεδομένος και χρησιμοποιείται σε συστήματα όπου η ταχύτητα και η ακρίβεια έχουν κρίσιμη σημασία.



Εικόνα 5-7: PI Ελεγκτής

5.2.3.1 Εύρεση Παραμέτρων

Η ρύθμιση των παραμέτρων του PI ελεγκτή έγινε στηριζόμενη στο μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει την δυναμική του συστήματος του κινητήρα. Σύμφωνα με την προσέγγιση που παρουσιάζεται στη σχετική βιβλιογραφία¹¹, το σύστημα προσεγγίζεται ως γραμμικό σύστημα δεύτερης τάξης, γεγονός που επιτρέπει τον καθορισμό των σταθερών ελέγχου K_p και K_i με στόχο τη βελτιστοποίηση της απόκρισης του συστήματος με βάση τον χρόνο αποκατάστασης (settling time).

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση 5.5 και το μοντέλο του κινητήρα 5.2 και υποθέτοντας πως οι διαταραχές είναι αμελητέες ή μεταβάλλονται αργά, η συνδυαστική εξίσωση της δυναμικής του συστήματος καταλήγει στην εξίσωση:

$$\ddot{\omega} + K_p \dot{\omega} + K_i \omega = K_i \omega_{ref} \quad 5.8$$

Η παραπάνω μορφή είναι τυπική για ένα σύστημα δεύτερης τάξης, με μεταφορά στο πεδίο της συχνότητας να οδηγεί στη συνάρτηση μεταφοράς:

$$G(s) = \frac{\Omega(s)}{\Omega_{ref}(s)} = \frac{K_i}{s^2 + K_p s + K_i} \quad 5.9$$

Από αυτή προκύπτει ότι το σφάλμα για μια βηματική είσοδο μηδενίζεται ασυμπτωτικά. Για την αποφυγή ταλαντώσεων, οι πόλοι του συστήματος τοποθετούνται επί του αρνητικού πραγματικού άξονα (υποθέτοντας κρίσιμη απόσβεση, δηλαδή $\zeta = 1$), πράγμα που δίνει τις σχέσεις:

$$K_i = \omega_n^2 = \frac{36}{t_s^2}, K_p = 2\omega_n = \frac{12}{t_s} \quad 5.10$$

όπου ω_n είναι η φυσική συχνότητα του συστήματος και t_s ο επιθυμητός χρόνος αποκατάστασης. Η επιλογή του t_s έγινε με γνώμονα τον περιορισμό της τάσης λειτουργίας (π.χ. $\sim 1.5V$ λόγω περιορισμένης τάσης του κινητήρα).

Για να προσδιοριστεί ο κατάλληλος t_s , αναλύθηκε ο τύπος της τελικής τάσης εξόδου που απαιτείται για την επίτευξη της ταχύτητας στόχου. Ο παρακάτω υπολογιστικός αλγόριθμος βασίστηκε στα πραγματικά φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος:

1. Υπολογισμός στατικής συνιστώσας τάσης λόγω αδράνειας, τριβών και βαρύτητας.

Ορισμός συνάρτησης εξόδου του ελεγκτή με βάση τις παραμέτρους του μοντέλου:

$$V(t) = A + \frac{JR}{K_t} \left(-\frac{12\omega}{t_s} + \frac{12t\omega}{t_s^2} \right) \quad 5.11$$

Όπου A , οι υπόλοιποι όροι της εξίσωσης (75).

2. Επίλυση εξίσωσης $V(t) = V_{max}$ για τον χρόνο t , ώστε να βρεθεί ο ελάχιστος επιτρεπτός χρόνος αποκατάστασης χωρίς υπέρβαση τάσης.

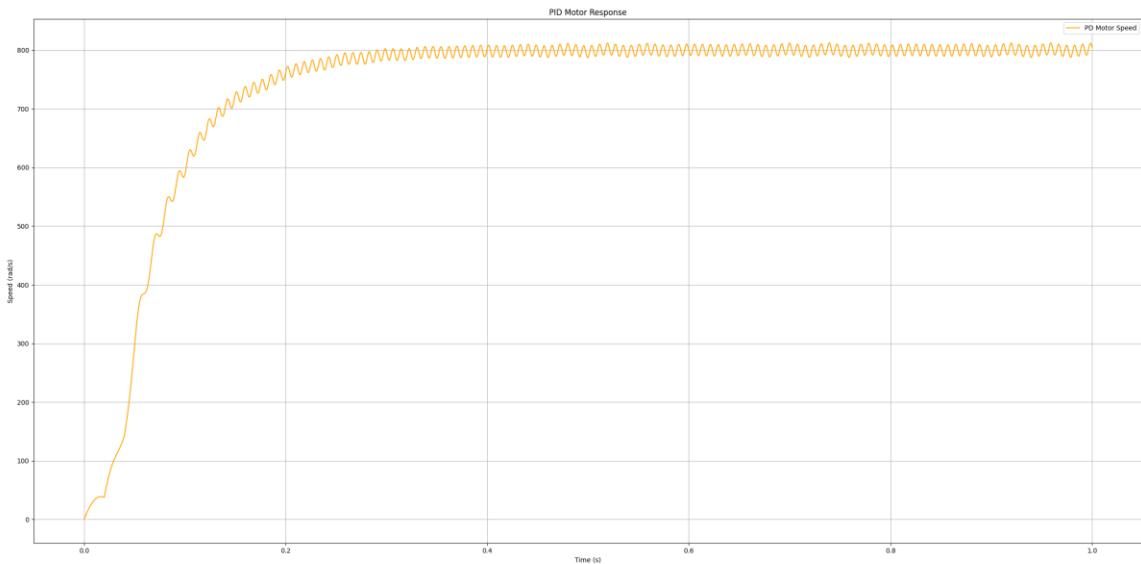
Για την επίλυση του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα python λύνοντας την συμβολική εξίσωση με την χρήση της βιβλιοθήκης sympy, ώστε να βρεθεί η πιο

ρεαλιστική και ακριβής τιμή του t_s . Το t_s που βρέθηκε είναι περίπου 274ms, επομένως οι σταθερές θα έχουν τιμή:

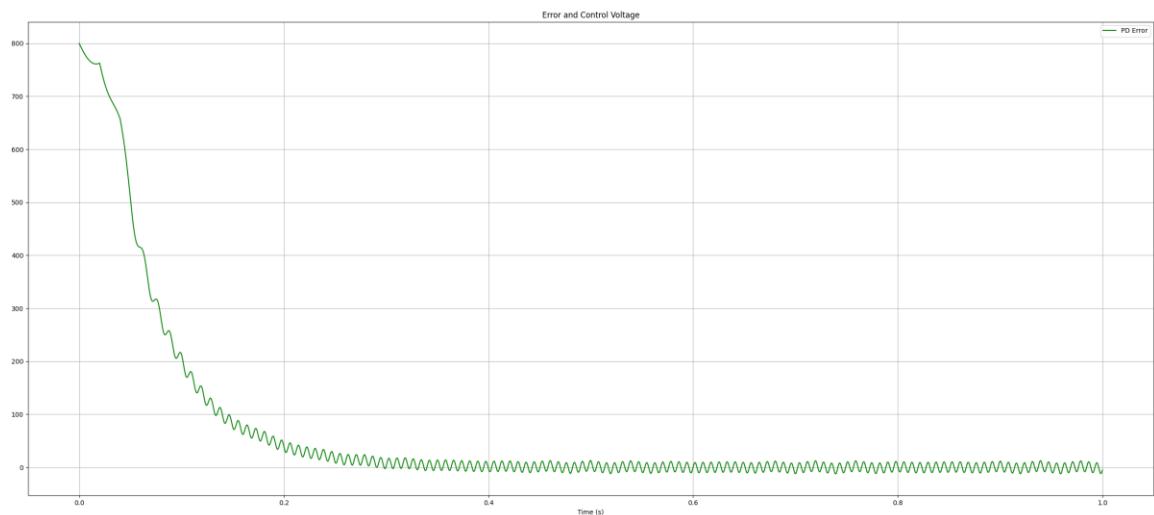
$$K_p = 43.79, K_i = 479.06$$

Η απόκριση του συστήματος στην προσομοίωση με τις συγκεκριμένες παραμέτρους έδειξε:

- Settling time: ~ 0.27 ms
- Αμελητέο Overshoot
- Ελάχιστο steady-state error
- Καλή απόσβεση και σταθερότητα

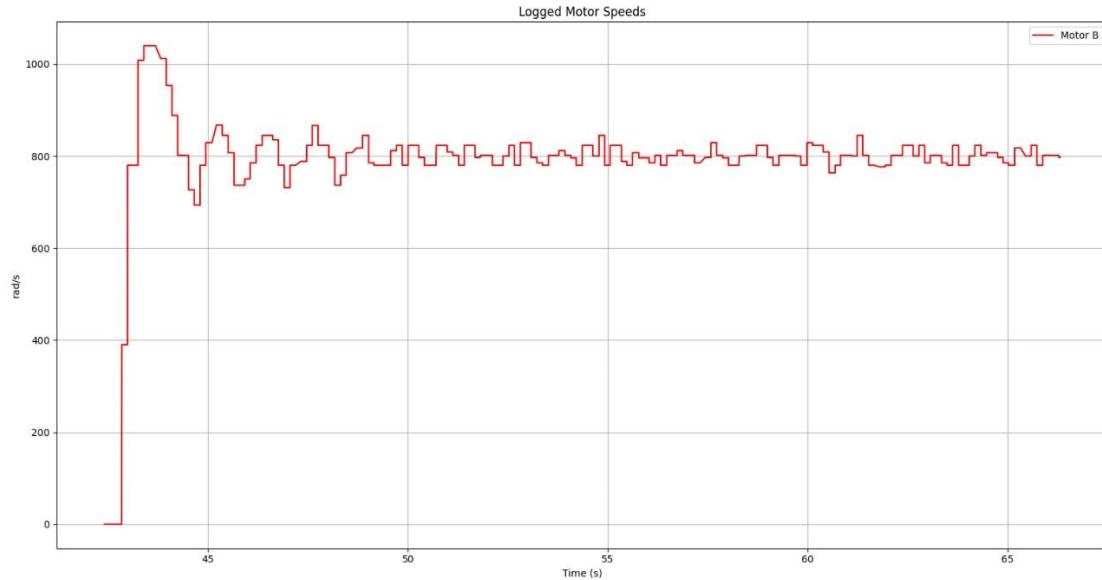


Εικόνα 5-8: PI Ελεγκτής με Παραμέτρους από SA



Εικόνα 5-9: Σφάλμα Ελεγκτή

Ο ελεγκτής με το μοντέλο αυτό, έτρεξε και στο φυσικό μοντέλο των κινητήρων μέσο προγράμματος στον ESP32 και έδωσε τα αποτελέσματα:



Εικόνα 5-10: PI Ελεγκτής για Φυσικό Μοντέλο

Από το πειραματικό διάγραμμα βλέπουμε:

- Μικρό αρχικό overshoot πάνω από την επιθυμητή ταχύτητα ($\sim 800 \text{ rad/s}$).
- Ταχύτητα ταλάντωσης στην αρχή πριν σταθεροποιηθεί (oscillations).
- Στη συνέχεια σταθεροποιείται κοντά στην επιθυμητή ταχύτητα με μικρές διακυμάνσεις.
- Ο χρόνος αποκατάστασης είναι ελαφρώς μεγαλύτερος από αυτόν της προσδομοίωσης.

Οι αποκλίσεις αυτές είναι αναμενόμενες σε ένα βαθμό και οφείλονται σε μη ιδανικούς παράγοντες του κινητήρα όπως:

- Τριβές του κινητήρα (στατικές/δυναμικές)
- Καθυστέρηση λόγω λήψης δειγμάτων των αισθητήρων και καταγραφή αυτών μέσο ασύρματης επικοινωνίας
- Περιορισμοί στην τάση (κόφτης στα 1.5V για την ασφάλεια των κινητήρων)
- Μη γραμμικότητα του κινητήρα και των driver

Συμπερασματική Αξιολόγηση Ελεγκτή PI στο Αρχικό Σύστημα

Παρότι ο σχεδιασμός του PI ελεγκτή βασίστηκε σε θεμελιώδεις αρχές ελέγχου γραμμικών συστημάτων δεύτερης τάξης και επέτυχε την ικανοποιητική ρύθμιση των παραμέτρων K_P και K_I με στόχο τον επιθυμητό χρόνο αποκατάστασης, η εφαρμογή του στο αρχικό σύστημα με μεγάλη καθυστέρηση ενημέρωσης αποκάλυψε σαφείς αποκλίσεις από τη θεωρητική απόκριση. Συγκεκριμένα, ενώ το προσομοιωμένο μοντέλο παρουσίασε ομαλή και μονοτονική απόκριση χωρίς ταλαντώσεις ή υπεραπόκριση, το φυσικό σύστημα εμφάνισε μικρές ταλαντώσεις κατά την εκκίνηση, καθώς και υπεραπόκριση, πριν σταθεροποιηθεί κοντά στην επιθυμητή ταχύτητα.

Η απόκλιση αυτή αποδίδεται σε πολλαπλούς παράγοντες, με κυριότερους την παρουσία μη μοντελοποιημένων μη γραμμικών στοιχείων στο σύστημα, όπως η στατική και δυναμική τριβή, η περιορισμένη τάση λειτουργίας του κινητήρα και η καθυστέρηση από τον αισθητήρα ανάδρασης.

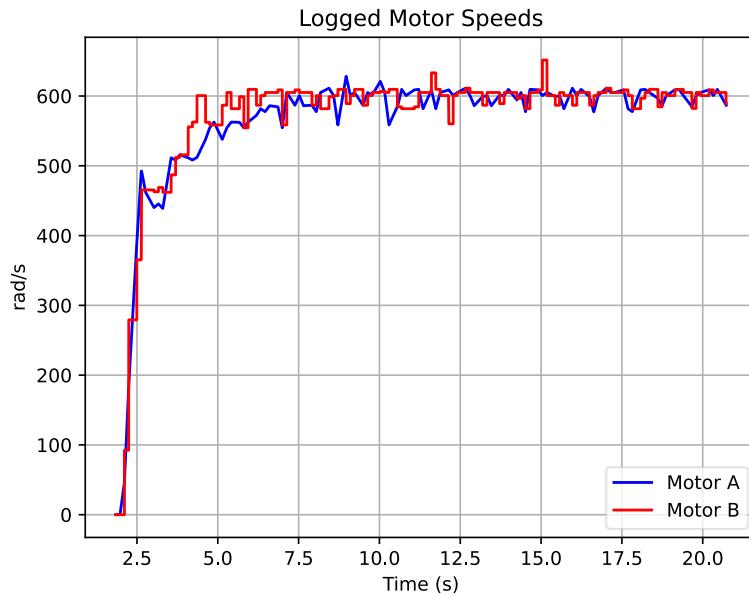
Αξιολόγηση Απόκρισης του PI Ελεγκτή με Χρονικό Βήμα 8ms για το πραγματικό Σύστημα

Έπειτα από την αρχική σύγκριση PI και PID ελεγκτών, πραγματοποιήθηκε επιπλέον αξιολόγηση με μικρότερο χρονικό διάστημα ενημέρωσης των αισθητήρων και του ελεγκτή (8ms), ώστε να αυξηθεί η ακρίβεια του ελέγχου και να μειωθούν οι καθυστερήσεις από τη δειγματοληψία και την επικοινωνία.

Αντίθετα με την αστάθεια που παρατηρήθηκε στον PID ελεγκτή υπό αυτές τις συνθήκες (όπως αναφέρεται στην ενότητα 5.2.2), ο PI ελεγκτής παρουσίασε σημαντικά βελτιωμένη συμπεριφορά. Το σύστημα ανταποκρίθηκε ταχύτερα, με μικρότερο overshoot και σχεδόν μηδενικό steady-state error. Επίσης, η απουσία του παραγωγικού όρου (K_d) αποδείχθηκε ευεργετική σε αυτή τη συχνότητα δειγματοληψίας, καθώς ελαχιστοποιήθηκαν τα αριθμητικά σφάλματα και η επίδραση του θορύβου των αισθητήρων που είχαν οδηγήσει σε ταλαντώσεις με τον PID.

Η ταυτόχρονη ενημέρωση και των δύο κινητήρων ανά 8ms μέσω του ESP32 συνέβαλε στη διατήρηση της συμμετρίας στην κίνηση και στη γενικότερη σταθερότητα του συστήματος. Το τελικό αποτέλεσμα ήταν ένα πιο προβλέψιμο, ήπιο και αξιόπιστο σχήμα ελέγχου, με χαμηλότερες απαιτήσεις σε υπολογιστική ακρίβεια και αυξημένη αντοχή σε καθυστερήσεις επικοινωνίας και μετρητικά σφάλματα.

Κατά συνέπεια, επιλέχθηκε ο PI ελεγκτής ως το τελικό σχήμα ελέγχου για την υλοποίηση του φυσικού συστήματος, καθώς απέδωσε καλύτερα υπό ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας, προσφέροντας την επιθυμητή ισορροπία μεταξύ ταχύτητας, ακρίβειας και ευστάθειας.



Εικόνα 5-11: Απόκριση του τελικού PI ελεγκτή με χρονικό διάστημα ενημέρωσης 8ms στα 600rad/s επιθυμητή ταχύτητα.

5.3 Πειραματική Επαλήθευση Κινηματικής Συμπεριφοράς

Κατά τις δοκιμές της γραμμικής κίνησης, παρατηρήθηκε ελαφρός μια ασύμμετρη απόκριση στο σύστημα γραμμικής μετατόπισης.

Προκλήσεις στη Γραμμική Κίνηση

Συγκεκριμένα, ενώ ο στόχος ήταν η παραγωγή καθαρής μετατόπισης στον άξονα X μέσω σύγχρονης και παρόμοιας ταχύτητας ενεργοποίησης των δύο κινητήρων, στην πράξη παρουσιάστηκε παρέκκλιση της πορείας. Η απόκλιση αυτή μπορεί να αποδοθεί πιθανός στους εξής παράγοντες:

- Μικρές διαφοροποιήσεις στην κατανομή μάζας της κατασκευής και της τοποθέτησης των υλικών.
- Διαφορές στα πραγματικά χαρακτηριστικά των δύο κινητήρων, παρά τις ονομαστικές τους προδιαγραφές, οδηγώντας σε ανομοιόμορφη παραγωγή ροπής ή ταχύτητας.
- Πιθανή ανομοιομορφία στην βαθμονόμηση αισθητήρων ανατροφοδότησης.
- Συνδυαστικό αποτέλεσμα των παραπάνω.

Η απόκλιση διορθώθηκε, με την δυνατότερη ακρίβεια που μπορούσε να αποδοθεί, εισάγοντας αντιστάθμιση στην γωνιακή ταχύτητα των δύο κινητήρων. Συγκεκριμένα, με μία διαφορά περίπου **80-100 rad/s** στις γωνιακές ταχύτητες των κινητήρων, επιτεύχθηκε γραμμική μετακίνηση του ρομπότ εντός αποδεκτών ορίων σφάλματος, σύμφωνα με το προκαθορισμένο θεωρητικό μοντέλο.

Ομαλή Περιστροφική Κίνηση

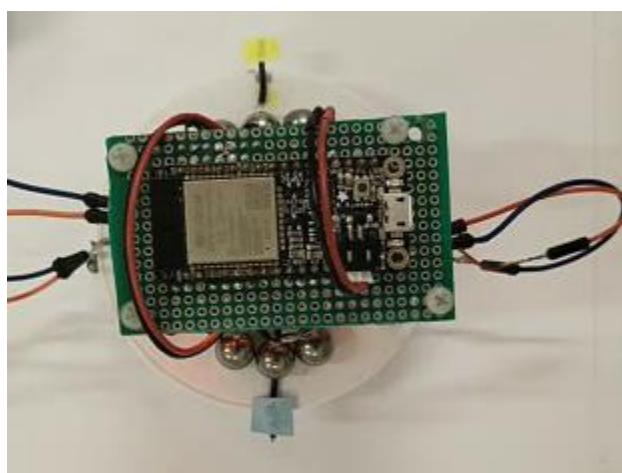
Αντιθέτως κατά την δοκιμή περιστροφικής κίνησης του ρομπότ με άξονα περιστροφής το κέντρο μάζας του, όπου οι κινητήρες λειτουργούν με αντίθετες ταχύτητες, η ασυμμετρία είχε σχεδόν αμελητέο αντίκτυπο. Αυτό εξηγείται από την φύση της περιστροφικής κίνησης, στην οποία η χαμηλότερες τριβές που χρειάζεται να ξεπεράσει το ρομπότ καθώς οι συμμετρικές αποκλίσεις που αλληλοαναρουνται, επιτρέπουν ένα σταθερό κέντρο περιστροφής και πιο ομαλή συμπεριφορά της αναμενόμενης κίνησης.

Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνει την ορθότητα της δυναμικής προσέγγισης με κλειστούς ελέγχους και την ανάγκη της κατασκευής των PI – PID ελέγχων των ταχυτήτων των κινητήρων που αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Καθώς στις εφαρμογές μικροκινηματικής που επιδιώκουμε με την υλοποίηση του ρομπότ, οι αποκλίσεις, ακόμα και σε μικρό επίπεδο, μπορούν να επιφέρουν σημαντικά σφάλματα στην τελική τροχιά.

Σύστημα Οπτικής Παρακολούθησης

Για την ακρίβεια της πειραματικής επαλήθευσης του κινηματικού μοντέλου καθώς και την υλοποίηση αυτόνομης κίνησης του ρομπότ, κρίθηκε απαραίτητη η ανάπτυξη ενός εξωτερικού λογισμικού συστήματος παρακολούθησης της κίνησης της πλατφόρμας. Η καταγραφή και ανάλυση της πραγματικής πορείας του ρομπότ πραγματοποιήθηκε με τη χρήση λογισμικού επεξεργασίας εικόνας με την χρήση του περιβάλλοντος OpenCV σε γλώσσα C++ για την άμεση απόκριση του συστήματος. Η κάμερα παρακολούθησης προήλθε από εξωτερικό κινητό τηλέφωνο, το οποίο λειτούργησε ως στατική κάμερα, σταθεροποιημένη σε κατακόρυφη διάταξη πάνω από την περιοχή δοκιμών, διασφαλίζοντας την ακριβή καταγραφή της τροχιάς.

Το ρομπότ έφερε ειδικό οπτικό χρωματικό δείκτη για την διευκόλυνση της παρακολούθησης και η επεξεργασία των εικόνων επέτρεπε την εξαγωγή των θέσεων σε διακριτές χρονικές στιγμές. Με βάση τα παραπάνω δεδομένα ήταν δυνατή η σύγκριση της θεωρητικής συμπεριφοράς του συστήματος, όπως αυτή προέκυψε από το μαθηματικό μοντέλο και την προσομοίωση του κεφαλαίου 3, με την πραγματική κινηματική πορεία.



Εικόνα 5-12: Κάτοψη Ρομπότ, Μπλε σημείο για μπροστά Κίτρινο για πίσω πλευρά

5.4 Υλοποίηση Μηχανής Καταστάσεων και Δύο Προσεγγίσεις Κίνησης

Μετά την επιτυχή ανάπτυξη του συστήματος παρακολούθησης κίνησης μέσω επεξεργασίας εικόνας, που αναλύθηκε στο κεφάλαιο [5.3], και τον απομακρυσμένο έλεγχο των ταχυτήτων των δύο κινητήρων μέσω σύνδεσης Wi-Fi UDP επικοινωνίας μεταξύ του υπολογιστή μας και του ESP32, έγινε το πρώτο βήμα προς την υλοποίηση αυτόνομου ελέγχου κίνησης του ρομπότ.

Σε αυτό το αρχικό στάδιο, η αυτονομία υλοποιήθηκε με τη χρήση μιας απλής Μηχανής Καταστάσεων (Finite State Machine -FSM) από βιβλιογραφία³. Η FSM σχεδιάστηκε για να καθοδηγεί το ρομπότ προς έναν στόχο, βασιζόμενη σε πραγματικό χρόνο στην τρέχουσα θέση και προσανατολισμό του ρομπότ, όπως αυτοί προκύπτουν από το σύστημα οπτικής παρακολούθησης.

Το ρομπότ φέρει χρωματικούς δείκτες για την αναγνώριση του προσανατολισμού του:

- Μπλε δείκτης στο μπροστινό μέρος κατεύθυνσης.
- Κίτρινος δείκτης στο πίσω μέρος.

Ο στόχος υποδεικνύεται μέσω επιλογής σημείου από τον χρήστη στο πεδίο των δοκιμών. Ο αρχικός αλγόριθμος βασίζεται στη θέση του εμπρόσθιου μέρους (F) σε σχέση με την επιθυμητή θέση στόχου (T) και εφαρμόζει απλές κανόνες κατωφλιού με ανοχή (ε) για την ενεργοποίηση των καταστάσεων FSM.

Επεξήγηση αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος καθοδήγησης που αναπτύχθηκε βασίζεται σε απλούς γεωμετρικούς κανόνες και χρησιμοποιεί ως αναφορά τη θέση ενός προσδιορισμένου μπροστινού σημείου του ρομπότ στο δισδιάστατο επίπεδο εικόνας. Η βασική στρατηγική πλοιήγησης διακρίνεται σε δύο φάσεις: διόρθωσης κατεύθυνσης και γραμμικής κίνησης.

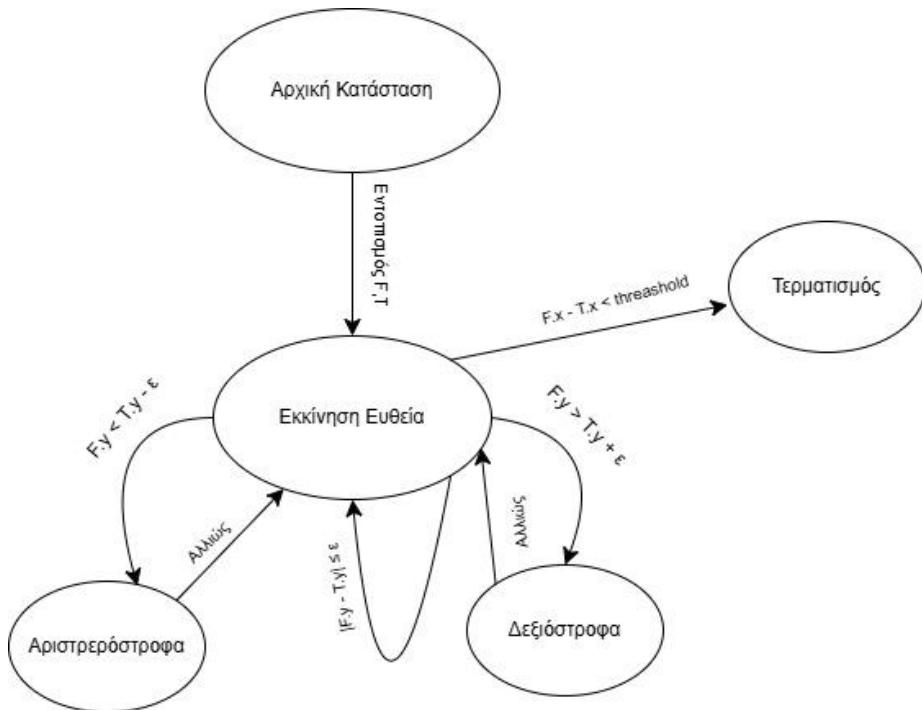
Αρχικά, ορίζεται μία προκαθορισμένη περιοχή (ζώνη αποδοχής) εντός της οποίας το ρομπότ θεωρείται σωστά προσανατολισμένο ως προς τον άξονα κίνησης. Αν το μπροστινό σημείο του ρομπότ βρίσκεται εντός αυτής της περιοχής, το ρομπότ προχωρά ευθύγραμμα προς τα εμπρός.

Σε περίπτωση που το μπροστινό σημείο εντοπίζεται εκτός της ζώνης αποδοχής:

- Εάν βρίσκεται αριστερά αυτής, εφαρμόζεται στροφή προς τα δεξιά με παράλληλη κίνηση προς τα εμπρός, μέχρι το σημείο να επανέλθει εντός της ζώνης.
- Αντίστοιχα, όταν το σημείο βρίσκεται δεξιά, το ρομπότ εκτελεί στροφή προς τα αριστερά με εμπρόσθια κίνηση για διόρθωση πορείας.

Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι η οριζόντια (X) συντεταγμένη του μπροστινού σημείου να ευθυγραμμιστεί με εκείνη του στόχου (εντός ενός μικρού αποδεκτού περιθωρίου σφάλματος), οπότε και το ρομπότ ακινητοποιείται.

Η προσέγγιση αυτή, αν και απλή, είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε περιβάλλοντα όπου απαιτείται γρήγορη διόρθωση πορείας χωρίς τη χρήση σύνθετων μοντέλων δυναμικής ή ακριβούς υπολογισμού προσανατολισμού.



Εικόνα 5-13: Μηχανή Καταστάσεων Αυτόνομης Κίνησης

Η λειτουργία της μηχανής καταστάσεων που υλοποιήθηκε περιγράφεται με τον παρακάτω ψευδοκώδικα:

Πίνακας 5.4: Αλγόριθμος Μηχανής Καταστάσεων

Αλγόριθμος 2: Finite State Machine

- 1: Είσοδοι:
 - 2: $F.y = y$ συντεταγμένη εμπρόσθιου μέρους ρομπότ
 - 3: $T.y = y$ συντεταγμένη στόχου
 - 4: $\epsilon = \text{αποδεκτό όριο σφάλματος κίνησης}$, $\sigma = \text{αποδεκτό σφάλμα σταματημού}$
 - 5: $D = F.x - T.x$
 - 6: Κατάσταση = ‘Αρχική Κατάσταση’
-

-
- 7: Ενώ Εντοπίζεται F,T:
- 8: Κατάσταση = ‘Εκκίνηση Ευθεία’
- 9: Αν $F.y < T.y - \varepsilon$:
- 10: Κατάσταση = ‘Αριστερόστροφη’
- 11: Αλλιώς αν $|F.y - T.y| \leq \varepsilon$:
- 12: Κατάσταση = ‘Εκκίνηση Ευθεία’
- 13: Αλλιώς:
- 14: Κατάσταση = ‘Δεξιόστροφα’
- 15: Αν Κατάσταση == ‘Εκκίνηση Ευθεία’
- 16: Αν Κατάσταση == ‘Αριστερόστροφη’
- 17: Στείλε εντολή: αύξησε ταχύτητά δεξιού κινητήρα, μείωσε του αριστερού
- 18: Αλλιώς αν Κατάσταση == ‘Δεξιόστροφη’
- 19: Στείλε εντολή: αύξησε ταχύτητα αριστερού κινητήρα, μείωσε του δεξιού
- 20: Αν $D < \sigma$:
- 21: Στείλε εντολή: σταμάτα και τους δύο κινητήρες
- 22: Κατάσταση = ‘Τερματισμός’
- 23: Στείλε εντολή: Κίνηση με τις τωρινές ταχύτητες των κινητήρων
- 24: Αν Κατάσταση == ‘Τερματισμός’:
- 25: Διέκοψε τον βρόχο
-

Η παραπάνω FSM προσφέρει ένα πλαίσιο ελέγχου για μια βασική αυτόνομη συμπεριφορά.

5.4.1 Μικροσκοπική Κίνηση

Στην **μικροσκοπική κίνηση**, ο απλός αλγόριθμος της FSM αποδείχθηκε επαρκής για την ακριβή καθοδήγηση του ρομπότ. Αυτό οφείλεται στην περιορισμένη κλίμακα των κινήσεων, όπου οι μικρές αποκλίσεις στον προσανατολισμό δεν επηρεάζουν σημαντικά την ακρίβεια. Επιπλέον καθώς ο έλεγχος μέσο ασύρματης κάμερα με UDP εισήγαγε καθυστέρηση τον εντολών, είναι απαραίτητη η προσθήκη μιας σταθεράς όπου το ρομπότ θα σταματήσει όταν φτάσει σε απόσταση από αυτή, ώστε μέχρι να έρθει η εντολή σταματημού το ρομπότ να σταματήσει στο πραγματικό επιθυμητό σημείο.

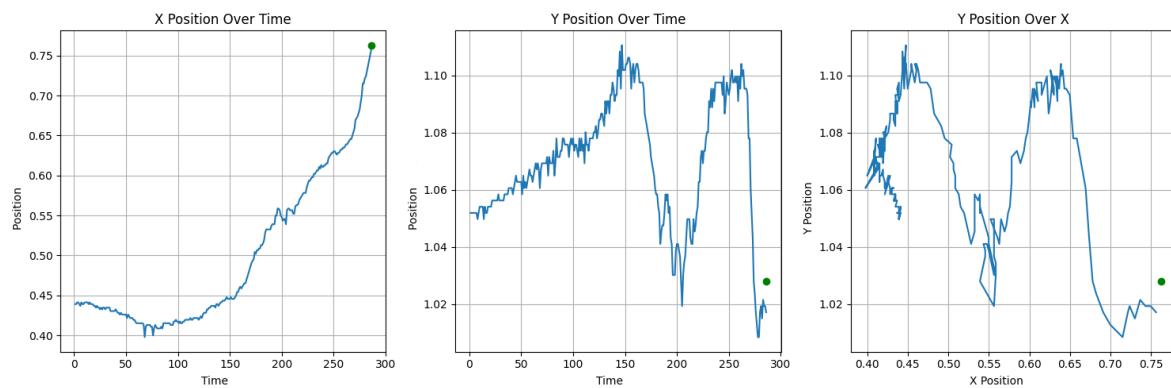
Ανάλυση Κίνησης και Συμπεριφοράς Ρομπότ βάσει Διαγραμμάτων

Η κίνηση του ρομπότ αξιολογήθηκε για διαφορετικές αρχικές σχετικές θέσεις ως προς τον στόχο, και τα αντίστοιχα διαγράμματα καταγραφής πορείας αποκαλύπτουν χαρακτηριστικά πρότυπα συμπεριφοράς:

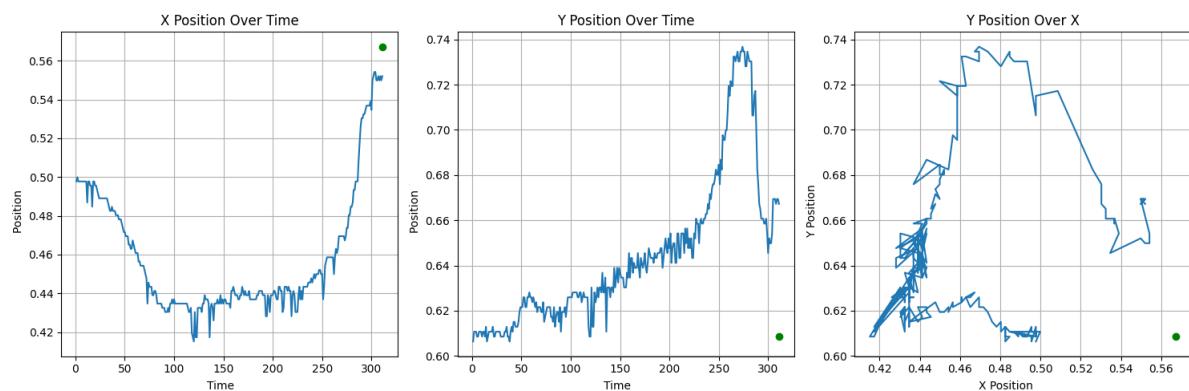
1. Κίνηση σε Ευθεία προς τον Στόχο

Όταν ο στόχος τοποθετείται απευθείας στην ευθεία κατεύθυνσης του ρομπότ, παρατηρείται μία γενικά ευθύγραμμη προσέγγιση, ωστόσο η τροχιά δεν είναι απολύτως γραμμική. Το ρομπότ εκτελεί μια ελαφρά ταλαντευόμενη κίνηση γύρω από τη νοητή ευθεία πορείας. Αυτό το φαινόμενο προκύπτει καθώς το μπροστινό σημείο του ρομπότ εισέρχεται και εξέρχεται οριακά από τη ζώνη αποδοχής, ενεργοποιώντας επαναλαμβανόμενες διορθωτικές στροφές μικρού πλάτους.

Οι αποκλίσεις αυτές είναι εξαιρετικά μικρές —της τάξης των εκατοντάδων μικρομέτρων έως μερικών χιλιοστών— και δεν επηρεάζουν την τελική ακρίβεια. Το ρομπότ κατορθώνει να φτάσει στον στόχο με ακρίβεια της τάξης των δέκατων του χιλιοστού, αποδεικνύοντας την αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου ακόμη και με χαμηλό κόστος αισθητήρων. Όπως είναι η απλή κάμερα κινητού που χρησιμοποιήθηκε.



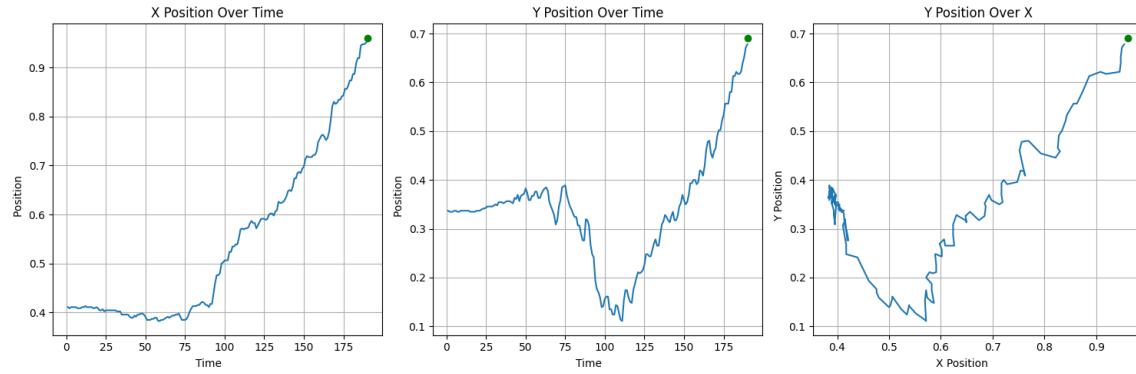
Εικόνα 5-14: Κίνηση σε Ευθεία προς τον Στόχο- Απόσταση 3 mm, Χρόνος 15 sec



Εικόνα 5-15: Κίνηση σε Ευθεία προς τον Στόχο X μεγαλύτερη ακρίβεια, Απόσταση 600 μm, Χρόνος 15 sec

2. Στόχος Εκτός Ευθείας – Δεξιά

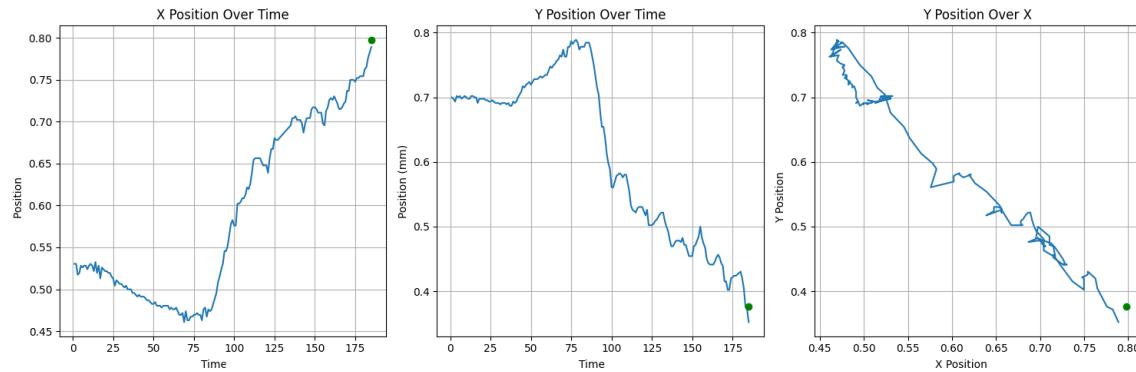
Σε περιπτώσεις όπου ο στόχος βρίσκεται δεξιά της αρχικής κατεύθυνσης, το ρομπότ ξεκινά με στροφή προς τα δεξιά ενώ διατηρεί εμπρόσθια κίνηση. Αρχικά, η πορεία παρουσιάζει μεγαλύτερη απόκλιση, καθώς απαιτείται η έξοδος από την αρχική ευθεία και η ένταξη στη ζώνη ευθυγράμμισης. Μόλις επιτευχθεί η κατάλληλη γωνιακή διόρθωση και το μπροστινό σημείο βρεθεί εντός της καθορισμένης περιοχής, το ρομπότ συνεχίζει με την ίδια ταλαντευόμενη κίνηση προσέγγιση που παρατηρήθηκε και στην περίπτωση της ευθείας.



Εικόνα 5-16: Στόχος Εκτός Ευθείας προς Δεξιά - Απόσταση 5 mm, Χρόνος 9 sec

3. Στόχος Εκτός Ευθείας – Αριστερά

Η συμπεριφορά είναι συμμετρική της προηγούμενης περίπτωσης. Το ρομπότ εκτελεί αρχικά στροφή προς τα αριστερά, με παρόμοιο μοτίβο διόρθωσης πορείας. Και πάλι, η τελική προσέγγιση γίνεται με μικρές ταλαντώσεις και υψηλή ακρίβεια.



Εικόνα 5-17: Στόχος Εκτός Ευθείας – Αριστερά

5.4.1.1 Παράμετροι και Ακρίβεια

- Ανάλυση Κάμερας:** Ένα pixel στην εικόνα της κάμερας αντιστοιχεί σε περίπου 20 μικρόμετρα στην πραγματικότητα.

- **Σταθερά Ευθυγράμμισης (ε):** Η σταθερά ε , που καθορίζει το εύρος της ευθυγραμμισμένης κίνησης, ορίστηκε στα (300 -100) μικρόμετρα. Αυτό σημαίνει ότι αν η απόκλιση από τον στόχο στον άξονα X είναι μικρότερη από 300 μικρόμετρα, το ρομπότ θεωρείται ότι είναι ευθυγραμμισμένο.
- **Ταχύτητες Κινητήρων:** Στη σταθερή κίνηση, οι κινητήρες λειτουργούν με ταχύτητες περίπου $A = 595 \text{ rad/s}$ και $B = 690 \text{ rad/s}$.
- **Διαφορά Φάσης για Στροφή:** Για να επιτευχθεί στροφή, εφαρμόζεται διαφορά φάσης 60 rad/s μεταξύ των κινητήρων. Για παράδειγμα, για στροφή αριστερά, ο κινητήρας A αυξάνει την ταχύτητά του κατά 60 rad/s, ενώ ο κινητήρας B τη μειώνει κατά 60 rad/s.
- **Ακρίβεια:** Με αυτές τις παραμέτρους, το ρομπότ επιτυγχάνει ακρίβεια στην τάξη των εκατοντάδων μικρομέτρων.

Παροδική

Συμπεριφορά

Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τα πρώτα δευτερόλεπτα λειτουργίας, μέχρι οι κινητήρες να επιταχύνουν από την απενεργοποιημένη κατάσταση, το ρομπότ παρουσιάζει μια μικρή κίνηση προς τα πίσω πριν σταθεροποιηθεί. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στην αδράνεια των κινητήρων και πρέπει να ληφθεί υπόψη σε εφαρμογές που απαιτούν απόλυτη ακρίβεια από την αρχή της κίνησης.



Εικόνα 5-18: Φυσικό μοντέλο του ρομπότ στην μικροσκοπική κίνηση

5.4.2 Μακροσκοπική Κίνηση

Για την αξιολόγηση της μακροσκοπικής συμπεριφοράς του ρομπότ, εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος προσέγγισης σημείου-στόχου που περιεγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο με το FSM. Όπου υπολογίζει εάν το εμπρόσθιο σημείο του ρομπότ είναι εντός της αποδεχτής ευθείας για να προχωρήσει ευθύγραμμα, αλλιώς προσθέτει μια διαφορά φάσης στους κινητήρες για να εισάγει την ασύγχρονη κίνησης και να προκαλέσει μια περιστροφή μαζί με την μεταφορική κίνηση.

Ανάλυση Κίνησης και Συμπεριφοράς Ρομπότ βάσει Διαγραμμάτων

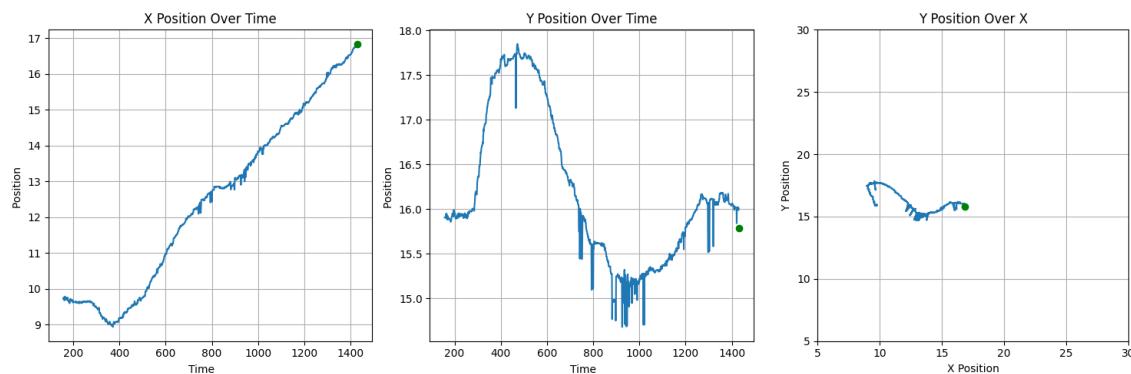
Η κίνηση του ρομπότ αξιολογήθηκε για διαφορετικές αρχικές σχετικές θέσεις ως προς τον στόχο ομοίως με την μικροσκοπική κίνησης και ένας νέος στόχος για ακραίες κατάστασης

και στόχους εκτός του εύρους απλής κίνησης του ρομπότ. Τα αντίστοιχα διαγράμματα καταγραφής πορείας αποκαλύπτουν χαρακτηριστικά πρότυπα συμπεριφοράς:

1. Κίνηση σε Ευθεία προς τον Στόχο

Όταν ο στόχος τοποθετείται απευθείας στην ευθεία κατεύθυνσης του ρομπότ, παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά με την μικροσκοπική κίνηση αλλά σε μεγαλύτερη κλίμακα. Στην αρχή μέχρι να αποκτήσουν μια σταθερότητα οι κινητήρες κάνει μια ελαφρός οπισθοδρομική κίνηση η οποία γρήγορα σταθεροποιείται και αφού αποκτήσει την κατάλληλη κατεύθυνση εκτελεί ευθύγραμμη κίνηση ταλαντεύοντας από τα δύο ακραία σημεία επιθυμητής πορείας.

Στο τέλος το ρομπότ φθάνει στο επιθυμητό σημείο που έχει οριστεί, παρατηρώντας μεγαλύτερη ακρίβεια στον άξονα X καθώς είναι η απόσταση που για να σταματήσει το ρομπότ από τον αλγόριθμο.

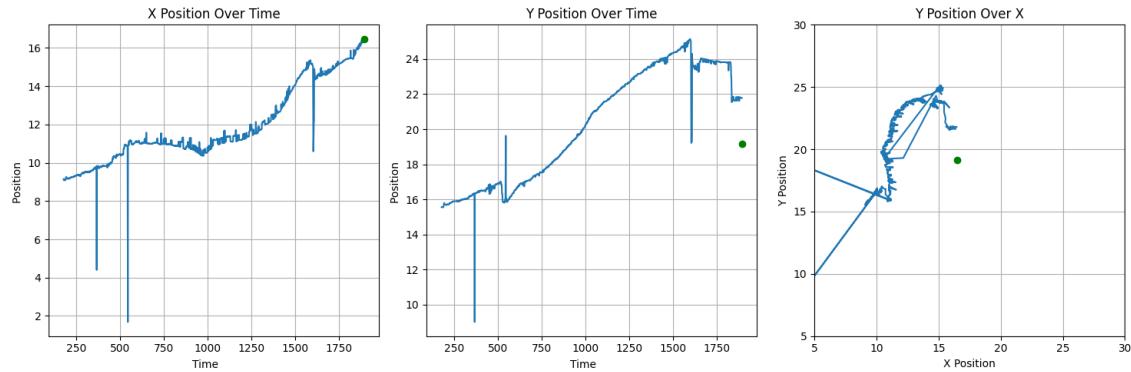


Εικόνα 5-19: Μακροσκοπική Κίνηση σε Ευθεία προς τον Στόχο- Απόσταση 7 cm, Χρόνος 70 sec

Η απότομες διακυμάνσεις που παρατηρούνται στα διαγράμματα οφείλονται στην απότομη αλλαγή του σημείου του ρομπότ καθώς, το σημείο αναγνωρίζεται μέσο χρωματικής ένδειξης από την κάμερα με χρήση επεξεργασίας εικόνας και ο φωτισμός μπορεί να επηρεάσει το αποτέλεσμα για μερικές ελάχιστες στιγμές.

2. Στόχος Εκτός Ευθείας – Δεξιά

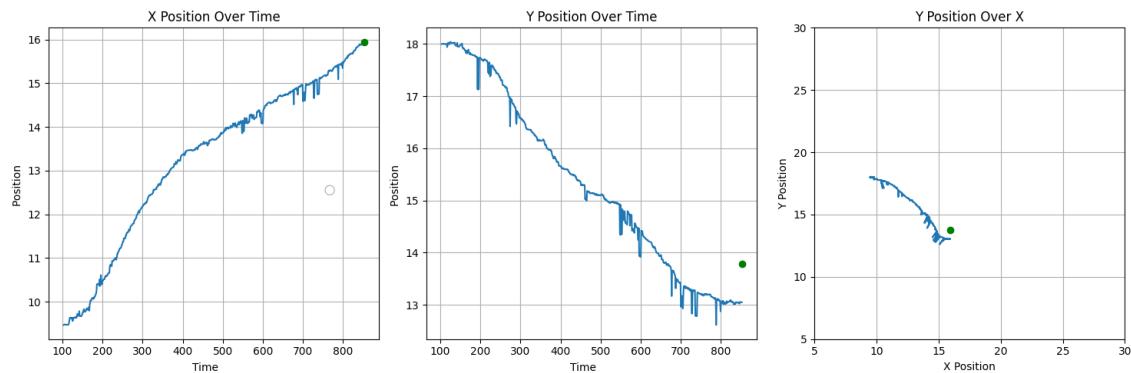
Ομοίως με τις προηγούμενες περιπτώσεις το ρομπότ αρχικά περιστρέφεται σε μεγαλύτερη διάρκεια μέχρι να μπει εντός της επιθυμητής, νοητής ευθείας, όπου μετά εκτελεί μικρές ταλαντώσεις από τα ακραία σημεία μέχρι να φτάσει το επιθυμητό στόχο στον άξονα X. Γι' αυτό τον λόγο παρατηρείται μικρή απόκλιση στον άξονα Y.



Εικόνα 5-20: Στόχος Εκτός Ευθείας προς Δεξιά - Απόσταση 8 cm, Χρόνος 90 sec

3. Στόχος Εκτός Ευθείας – Αριστερά

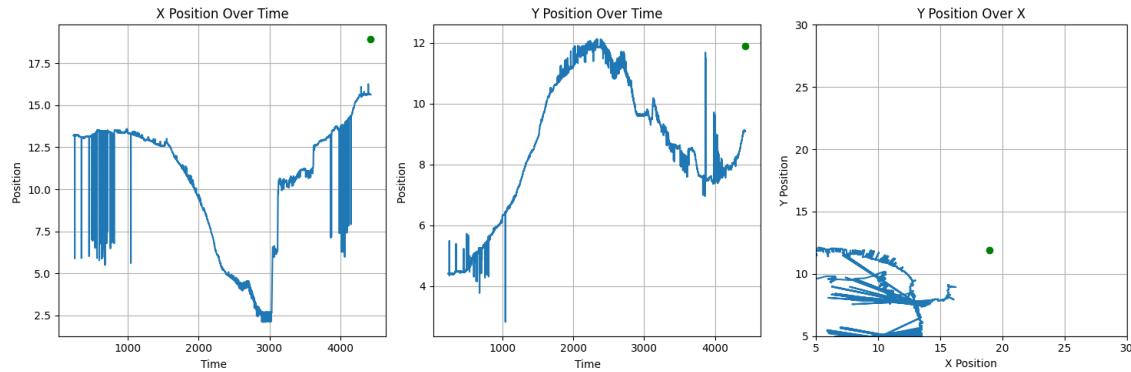
Το ρομπότ εκτελεί την κίνηση προς τα αριστερά με παρόμοια συμπεριφορά της μικροσκοπικής κίνησης και με αντίθετη κατεύθυνση της κίνησης με επιλογή του στόχου στα δεξιά του ρομπότ.



Εικόνα 5-21: Στόχος Εκτός Ευθείας προς Αριστερά - Απόσταση 7 cm, Χρόνος 40 sec

4. Στόχος Εκτός Ευθείας – Ακραίο Σημείο

Σημείο σε μεγάλη απόσταση, εκτός των φυσικών διαστάσεων του. Το ρομπότ άρχισε να περιστρέφεται και να κατευθύνεται προς το επιθυμητό σημείο, αλλά δεν πέρασε ποτέ το σημείο της νοητικής ευθείας με αποτέλεσμα να περιστρέφεται γύρω από τον εαυτό του, χωρίς να μπορεί να σταθεροποιηθεί η να αλλάξει περιστροφή προς τον στόχο. Η κίνηση ήταν φαινομενικά χαοτική και το σύστημα τελικά σταμάτησε καθώς βγήκε εκτός ορίου της ανίχνευσης του ρομπότ από την κάμερα παρά της προσπάθειες διόρθωσης της πορείας του χειροκίνητα.



Εικόνα 5-22: Στόχος Εκτός Ευθείας Ακραίο Σημείο - Απόσταση 8cm προς τα αριστερά του κέντρου

Ανάγκη για Νέο Κριτήριο Σύγκλισης και Ελέγχου Κίνησης

Η παραπάνω συμπεριφορά ανέδειξε ένα θεμελιώδες μειονέκτημα του αρχικού αλγορίθμου: σε περιπτώσεις όπου η γωνία προς το στόχο μεταβάλλεται έντονα ή το ρομπότ ξεκινά από θέση με κακή γεωμετρική σχέση ως προς τον προορισμό (π.χ. με το κέντρο περιστροφής μακριά από τον στόχο), ο αλγόριθμος αποτυγχάνει να συγκλίνει. Το ρομπότ καταλήγει να εκτελεί διαδοχικές περιστροφές ή ακόμα και χαοτική κίνηση, χωρίς να φτάνει ποτέ στο σημείο προορισμού.

Για την επίλυση του προβλήματος, σχεδιάστηκε και εφαρμόστηκε μία βελτιωμένη μέθοδος ελέγχου, η οποία δεν βασίζεται αποκλειστικά στο εμπρόσθιο σημείο του ρομπότ, αλλά λαμβάνει υπόψη και ένα δεύτερο σημείο αναφοράς, τοποθετημένο συμμετρικά στο πίσω μέρος του. Η εισαγωγή αυτού του σημείου επιτρέπει πιο ακριβή εκτίμηση του πραγματικού προσανατολισμού και βοηθά στη σταθερή και συνεπή σύγκλιση προς τον στόχο.

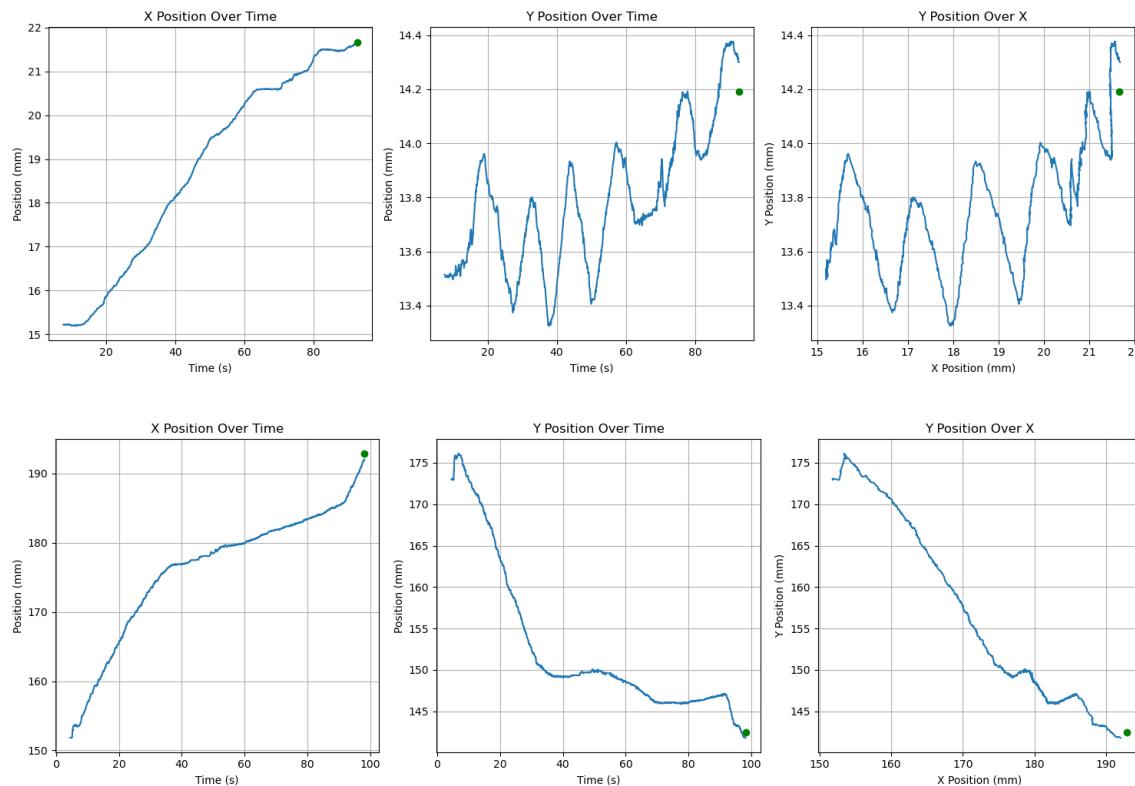
Η νέα συνθήκη τερματισμού της κίνησης βασίζεται πλέον στη συνολική απόσταση και στους δύο άξονες (x , y), και όχι μόνο σε έναν, όπως συνέβαινε στην αρχική προσέγγιση. Η διαδικασία σταματά όταν η απόσταση του εμπρόσθιου σημείου είναι μικρότερη από ένα κατάλληλα επιλεγμένο κατώφλι (threshold), π.χ. 3 mm. Η επιλογή ενός μικρού αλλά μη μηδενικού κατωφλίου (threshold) κρίθηκε απαραίτητη, καθώς η χρήση μηδενικής ανοχής οδηγούσε συχνά σε ατέρμονη κίνηση: το ρομπότ είτε υπερπηδούσε το στόχο λόγω αδράνειας είτε δεν μπορούσε να συγκλίνει επακριβώς εξαιτίας αριθμητικών σφαλμάτων ή περιορισμών της ανάλυσης.

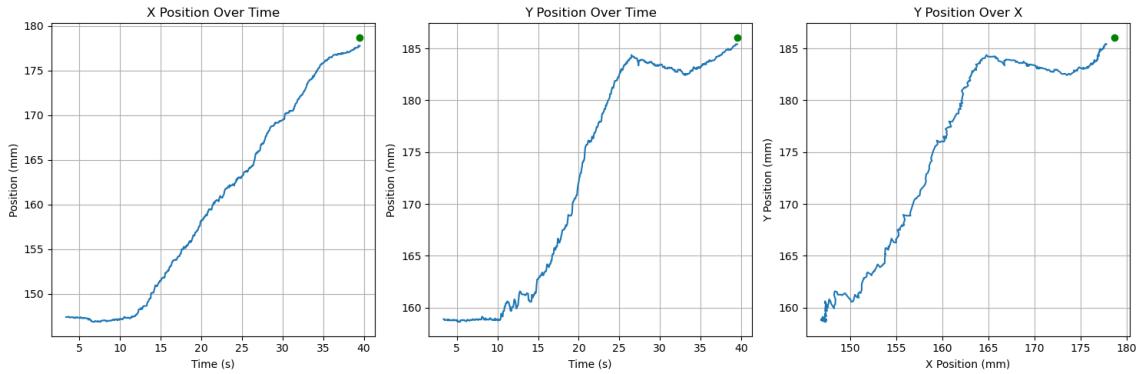
Η λογική απόφασης για το αν θα εκτελεστεί περιστροφή ή μεταφορική κίνηση βασίζεται πλέον στη γωνιακή απόκλιση μεταξύ του άξονα προσανατολισμού του ρομπότ και της ευθείας που οδηγεί στον στόχο. Αν η απόκλιση αυτή βρίσκεται εντός μιας αποδεκτής γωνιακής ανοχής, τότε το ρομπότ μετακινείται ευθύγραμμα με τις προκαθορισμένες ταχύτητες στους κινητήρες. Διαφορετικά, εφαρμόζεται διαφορά φάσης στην κίνηση των κινητήρων, ώστε να πραγματοποιηθεί ήπια γωνιακή διόρθωση ταυτόχρονα με τη μεταφορική κίνηση.

Ανάλυση Κίνησης και Συμπεριφοράς Ρομπότ βάσει Διαγραμμάτων

Στο παρακάτω διάγραμμα, παρουσιάζεται η απόκριση του ρομπότ όταν ο στόχος βρίσκεται σε ευθεία μπροστά του, σε σχετική μικρή απόσταση. Η συνολική συμπεριφορά του συστήματος είναι παρόμοια με εκείνη που είχε καταγραφεί με τον αρχικό αλγόριθμο, παρουσιάζοντας σταθερή μετάβαση και επιτυχή σύγκλιση. Ωστόσο, η νέα μέθοδος επιτυγχάνει ελαφρώς καλύτερη ακρίβεια, με μικρότερες ταλαντώσεις κατά τη φάση της τελικής προσέγγισης στον άξονα X, αλλά μεγαλύτερη ταλαντωτική κίνηση στον Y βάση την μικρή επιτρεπόμενη γωνία μεταφορική κίνηση.

Παρατηρείται πως, ειδικά στον άξονα X, η απόκλιση σταθεροποιείται ελάχιστα πριν το σημείο μηδενικής διαφοράς. Το φαινόμενο αυτό συνδέεται άμεσα με την εισαγωγή του κατωφλίου (threshold) ως συνθήκη τερματισμού της κίνησης. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η χρήση ενός μικρού αλλά μη μηδενικού threshold (π.χ., 3 mm) κρίνεται απαραίτητη για να αποφευχθεί η περίπτωση συνεχών μικροδιορθώσεων ή και αποκλίσεων λόγω κινητικής αδράνειας ή αριθμητικού σφάλματος, διασφαλίζοντας την πρακτική σύγκλιση χωρίς απροσδιόριστη κίνηση.





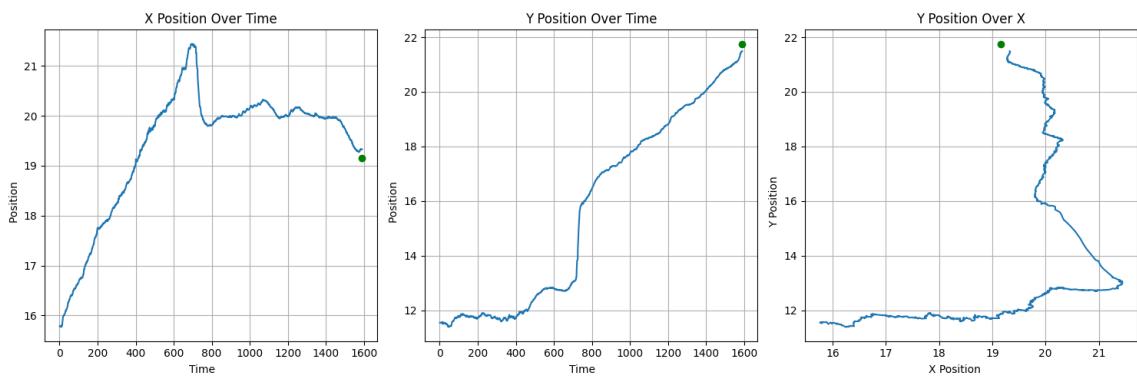
Εικόνα 5-23: Βασικές κινήσεις που συζητήθηκαν και προηγούμενος με μέθοδο προσανατολισμού

Τέταρτης Κίνησης με Νέο Αλγόριθμο Σύγκλισης

Η τέταρτη περίπτωση αποτελεί το πιο απαιτητικό σενάριο, καθώς ο στόχος βρίσκεται σε απομακρυσμένη θέση, η οποία μάλιστα εντοπίζεται εκτός του βασικού σώματος του ρομπότ, αναδεικνύοντας αδυναμίες του αρχικού αλγορίθμου. Στην προηγούμενη υλοποίηση, το ρομπότ αποτύγχανε να συγκλίνει, οδηγούμενο σε κυκλική ή χαοτική κίνηση λόγω λανθασμένου ή μη σταθερού προσδιορισμού της γωνίας προς τον στόχο.

Με την εφαρμογή της νέας μεθόδου που χρησιμοποιεί δύο σημεία αναφοράς (πρόσθιο και οπίσθιο), επιτυγχάνεται σαφέστερη εκτίμηση του προσανατολισμού και της πραγματικής κατεύθυνσης του ρομπότ, αποτρέποντας την εμφάνιση αστάθειας. Το διάγραμμα δείχνει καθαρά την επιτυχή σύγκλιση τόσο σε επίπεδο χρονικής εξέλιξης των θέσεων X και Y, όσο και στο διάγραμμα τροχιάς (Y ως προς X).

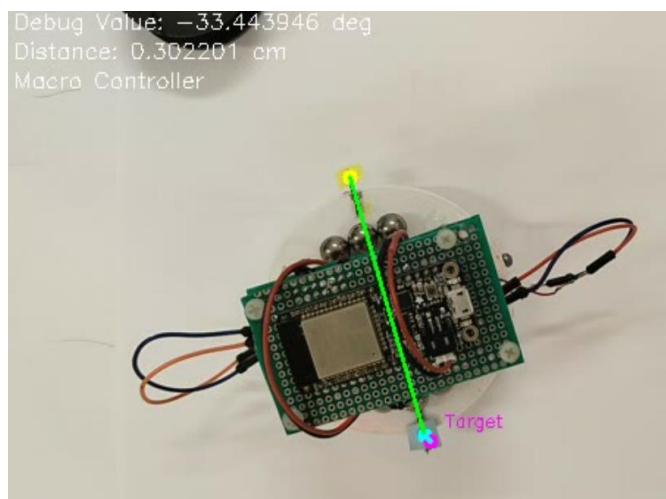
Η κίνηση ξεκινά με έντονη μεταβολή της θέσης στον άξονα X, καθώς το ρομπότ αρχικά ευθυγραμμίζεται και προσανατολίζεται. Στη συνέχεια, παρατηρείται σαφής μεταβατική πορεία προς τον στόχο, με μικρές διορθωτικές κινήσεις στις δύο διαστάσεις. Η τελική σύγκλιση επιτυγχάνεται σταθερά και χωρίς παλινδρομήσεις, καθώς η νέα συνθήκη τερματισμού (βάσει κατωφλίου στις συνιστώσες X και Y) λειτουργεί αποτελεσματικά για την αποφυγή υπερπήδησης του στόχου.



Εικόνα 5-24: Στόχος σε ακραίο σημείον του πλάνου - Απόσταση 10 cm Χρόνος 80 sec

Συνολική Αξιολόγηση Νέας Μεθόδου

Η μετάβαση από τον αρχικό αλγόριθμο σε αυτή τη βελτιωμένη εκδοχή βασισμένη σε δύο σημεία αναφοράς και δυναμική συνθήκη σύγκλισης αποδείχθηκε ουσιώδης για την αξιόπιστη πλοϊγηση του ρομπότ. Στις τρεις πρώτες κινήσεις, η συμπεριφορά παρέμεινε σταθερή, με ελαφρώς βελτιωμένη ακρίβεια και ομαλότερη τελική προσέγγιση. Στην τέταρτη και πιο δύσκολη περίπτωση, όμως, η νέα μέθοδος κατάφερε να επιλύσει τα προβλήματα σταθερότητας και κατεύθυνσης που αντιμετώπιζε ο αρχικός αλγόριθμος, επιτυγχάνοντας επιτυχή σύγκλιση. Συνολικά, η εισαγωγή της νέας στρατηγικής καθιστά το σύστημα πιο ευέλικτο, προσαρμοστικό και ικανό να λειτουργεί ορθά ακόμη και υπό μη ιδανικές ή ακραίες συνθήκες στόχευσης.



Εικόνα 5-25: Τελική θέση του ρομπότ με τον ανανεωμένο αλγόριθμο

5.5 Συμπέρασμα

Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύχθηκε και αξιολογήθηκε το σύστημα ελέγχου κίνησης του ρομπότ, οργανωμένο ως μηχανή καταστάσεων, με στόχο την ευέλικτη διαχείριση μικροσκοπικής και μακροσκοπικής κίνησης μέσω ανεξάρτητων αλγορίθμων.

Αρχικά, υλοποιήθηκε η μικροσκοπική κίνηση μέσω ανατροφοδοτούμενου ελέγχου ταχύτητας των κινητήρων, επιτυγχάνοντας σταθερή συμπεριφορά σε περιβάλλον με περιορισμένες διαταραχές. Έγιναν δοκιμές με διάφορα διαστήματα ελέγχου, οι οποίες ανέδειξαν τη σημασία της σωστής επιλογής συχνότητας ενημέρωσης, ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα υπερανύψωσης ή αστάθειας.

Στη συνέχεια αναπτύχθηκε η μακροσκοπική κίνηση, με στόχο την καθοδηγούμενη πλοϊγηση προς στόχους σε απόσταση. Ο αρχικός αλγόριθμος βασιζόταν σε σημειακή ευθυγράμμιση ως προς τον στόχο, όμως παρουσίασε περιορισμούς σε ακραίες περιπτώσεις, οδηγώντας σε αποτυχία σύγκλισης. Για την αντιμετώπιση αυτών των φαινομένων σχεδιάστηκε βελτιωμένος αλγόριθμος πλοϊγησης, βασισμένος σε δύο σημεία

(πρόσθιο και οπίσθιο), και μια νέα συνθήκη τερματισμού βάσει ολικής απόστασης, η οποία επέτρεψε σταθερότερη και ακριβέστερη σύγκλιση ακόμη και σε δύσκολες γεωμετρικές διατάξεις στόχων.

Συνολικά, το σύστημα ελέγχου που αναπτύχθηκε επέδειξε σημαντική προσαρμοστικότητα και λειτουργική αποτελεσματικότητα, ενοποιώντας τοπικές κινήσεις σε ένα συνεκτικό μοντέλο με κατάλληλη διαχείριση μεταβάσεων. Η αξιοπιστία του συστήματος ενισχύθηκε μέσω της ορθής διαχείρισης γωνιακού προσανατολισμού, της χρήσης δυναμικών συνθηκών τερματισμού και της δυνατότητας ρύθμισης των παραμέτρων σε πειραματικό επίπεδο. Το τελικό αποτέλεσμα αποτελεί μια πλήρως λειτουργική βάση για μελλοντική επέκταση σε πιο σύνθετα περιβάλλοντα πλοήγησης και αυτονομίας.

Κεφάλαιο 6.

Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

6.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία όχι μόνο επιβεβαίωσε επιτυχώς τη δυνατότητα σχεδίασης, κατασκευής και πειραματικής επικύρωσης ενός ρομποτικού συστήματος μικρών διαστάσεων με ικανότητα αυτόνομης πλοϊγής βασιζόμενο σε οικονομικά προσιτά εξαρτήματα, αλλά ανέδειξε επίσης την ισχύ μιας ολιστικής μεθοδολογίας που εκτείνεται από τη θεωρία έως την πρακτική υλοποίηση. Η προσέγγιση αυτή αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματική για την αντιμετώπιση των προκλήσεων του ελέγχου κίνησης σε συστήματα χαμηλού κόστους, προσφέροντας ένα λειτουργικό και αποδοτικό πρωτότυπο.

Η έναρξη της εργασίας με την λεπτομερή μαθηματική μοντέλοποίηση του κινητήρα και της δυναμικής της πλατφόρμας, τόσο για έναν όσο και για δύο βαθμούς ελευθερίας, υπήρξε θεμελιώδους σημασίας. Η ενσωμάτωση τόσο των ηλεκτρικών όσο και των μηχανικών παραμέτρων στο μοντέλο επέτρεψε μια ολοκληρωμένη και ρεαλιστική κατανόηση της συμπεριφοράς του συστήματος. Η σχολαστική σύγκριση των προσδομοιώσεων με τις πραγματικές πειραματικές αποκρίσεις δεν απλώς επικύρωσε τα αναπτυχθέντα μοντέλα, αλλά υπογράμμισε την ακρίβεια της θεωρητικής πρόβλεψης, ένα κρίσιμο στοιχείο που ενισχύει την αξιοπιστία του συνολικού σχεδιασμού και παρέχει μια σταθερή βάση για μελλοντικές βελτιώσεις και επεκτάσεις.

Στον τομέα του hardware, η εργασία προσέφερε μια εξαντλητική ανάλυση των επιλεγμένων εξαρτημάτων. Η αναλυτική περιγραφή του κυκλώματος (που περιλαμβάνει τον μικρο-ελεγκτή και τους οδηγούς), των αισθητήρων Hall, των κινητήρων, της πλατφόρμας και της μπαταρίας παρέχει μια πλήρη εικόνα της υλικής υλοποίησης. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην ανάλυση των πιθανών προβλημάτων συναρμολόγησης και των τεχνικών συνδεσμολογίας, ένα στοιχείο που αντικατοπτρίζει την πρακτική εμπειρία και την προσοχή στη λεπτομέρεια. Αυτή η προσέγγιση, σε συνδυασμό με τον σχεδιασμό CAD και την τεχνική τεκμηρίωση, όχι μόνο αναδεικνύει την πρακτική αξία και την αναπαραγωγιμότητα των αποτελεσμάτων, αλλά υπογραμμίζει επίσης την επεκτασιμότητα του μοντέλου, δείχνοντας πώς μια απλή κατασκευή μπορεί να αποτελέσει τη βάση για πιο σύνθετες εφαρμογές.

Η ανάπτυξη και πειραματική αξιολόγηση του κλειστού βρόχου ελέγχου ταχύτητας με PID και PI ρυθμίσεις υπήρξε ένα κομβικό επίτευγμα. Η επιτυχής εφαρμογή αυτών των κλασικών και αποδεδειγμένα αποτελεσματικών μεθόδων ελέγχου κατέδειξε την εξαιρετική ικανότητα του συστήματος να διατηρεί σταθερές και ακριβείς ταχύτητες. Αυτό το χαρακτηριστικό δεν είναι απλώς θεμελιώδες για την αυτόνομη πλοϊγήση, αλλά είναι επίσης κρίσιμο για την επίτευξη της απαιτούμενης ακρίβειας σε κινήσεις που λαμβάνουν χώρα στην

κλίμακα μερικών χιλιοστών και μικρομέτρων, επιβεβαιώνοντας την ικανότητα του ρομπότ να εκτελεί λεπτές και ελεγχόμενες κινήσεις.

Η υλοποίηση μιας μηχανής καταστάσεων για τον έλεγχο υψηλότερου επιπέδου, η οποία συνδύασε μικροσκοπική και μακροσκοπική πλοϊγηση, αποτέλεσε ένα ακόμα σημαντικό σημείο. Η εργασία ανέδειξε την προσαρμοστικότητα του συστήματος σε διαφορετικές απαιτήσεις πλοϊγησης μέσω της εισαγωγής και αξιολόγησης δύο αλγορίθμων για αυτόνομη πλοϊγηση βασισμένη σε κάμερα και σύστημα παρακολούθησης. Η ιδιαίτερη συμβολή του δεύτερου αλγορίθμου, που ενσωμάτωσε προσανατολισμό δύο σημείων και προσαρμοσμένες συνθήκες τερματισμού, ήταν η επίτευξη σαφώς βελτιωμένης σύγκλισης ακόμη και σε πολύπλοκες γεωμετρικές διατάξεις. Αυτό το αποτέλεσμα υπογραμμίζει την αποτελεσματικότητα και το δυναμικό των εξελιγμένων στρατηγικών ελέγχου στην αντιμετώπιση ρεαλιστικών προκλήσεων πλοϊγησης.

Τέλος, τα επιτευχθέντα επίπεδα ακρίβειας – της τάξης των εκατοντάδων μικρομέτρων σε μικροσκοπική κίνηση και μερικών χιλιοστών σε μακροσκοπική – είναι ιδιαίτερα αξιοσημείωτα, ειδικά λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς των διαθέσιμων μέσων. Αυτή η υψηλή ακρίβεια, σε συνδυασμό με τον υψηλό βαθμό ομοιότητας μεταξύ των θεωρητικών προσομοιώσεων και των πειραματικών αποκρίσεων, καταδεικνύει όχι μόνο την αξιοπιστία και τη στιβαρότητα της προτεινόμενης προσέγγισης, αλλά και την εγκυρότητα των αναπτυχθέντων μοντέλων και του ελεγκτικού συστήματος. Συνολικά, η εργασία παρέχει μια στέρεη και αποδεδειγμένη βάση για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα των μικρο-ρομποτικών συστημάτων με έμφαση στην αυτόνομη πλοϊγηση.

6.2 Μελλοντική Εργασία

Λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που θέτει το υφιστάμενο hardware και εστιάζοντας στις δυνατότητες βελτίωσης μέσω του λογισμικού και της προσθήκης συμπληρωματικών αισθητήρων, οι ακόλουθες κατευθύνσεις προτείνονται για τη μελλοντική επέκταση και αναβάθμιση του ρομποτικού συστήματος:

1. Γενική Βελτίωση Hardware και Εργαλείων Παρακολούθησης

Αν και το πρωταρχικό αποτέλεσε τη βάση της παρούσας εργασίας, η συνολική απόδοση μπορεί να ενισχυθεί με στοχευμένες αναβάθμισεις, ιδιαίτερα στα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση και την επικύρωση της λειτουργίας του ρομπότ.

- Βελτιστοποίηση των εργαλείων παρακολούθησης:** Η χρήση ενός κινητού τηλεφώνου με ψηφιακό ζουμ για τον εντοπισμό θέσης, ειδικά στην μικροσκοπική κλίμακα, εισήγαγε σημαντικά σφάλματα λόγω της χαμηλής ανάλυσης και του θολού πλάνου. Για την ουσιαστική βελτίωση της ακρίβειας των μετρήσεων και την αξιόπιστη επικύρωση των αλγορίθμων πλοϊγησης, απαιτείται η αναβάθμιση σε ένα επαγγελματικό σύστημα οπτικής

παρακολούθησης (motion capture system) ή μια κάμερα βιομηχανικής ποιότητας με οπτικό ζουμ και υψηλή ανάλυση. Αυτό θα παρείχε κρυστάλλινη εικόνα και δυνατότητα υπο-pixel ακρίβειας στον εντοπισμό των χαρακτηριστικών (markers) πάνω στην πλατφόρμα, μειώνοντας δραστικά το σφάλμα θέσης. Αυτή η βελτίωση δεν αφορά το ίδιο το ρομπότ, αλλά τα εργαλεία μέτρησης που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της απόδοσής του, επιτρέποντας μια πιο ακριβή και αναλυτική κατανόηση της συμπεριφοράς του.

- **Πιθανή σμίκρυνση:** Παρά τους δεδομένους περιορισμούς του υπάρχοντος hardware, είναι σημαντικό να διερευνηθούν τρόποι για την περαιτέρω σμίκρυνση του ρομποτικού συστήματος, εφόσον οι μελλοντικές εφαρμογές το απαιτούν. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί μέσω της συμπίεσης των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων (π.χ., με τη χρήση πιο συμπαγών εκδόσεων μικροελεγκτών και οδηγών κινητήρων) ή την ανασχεδίαση της μηχανικής πλατφόρμας ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο όγκος και το βάρος της. Αν και οι DC vibration motors είναι ήδη μικροί, η επιλογή πιο αποδοτικών ή ακόμη μικρότερων εκδόσεων τους, αν είναι διαθέσιμες, θα μπορούσε να συμβάλει σε αυτή την κατεύθυνση. Η σμίκρυνση ανοίγει τον δρόμο για εφαρμογές σε περιορισμένους και δυσπρόσιτους χώρους, όπως μικρο-ιατρικές εφαρμογές ή επιθεώρηση μικρο-δομών.

2. Ανάπτυξη Περίπλοκων Αλγορίθμων Ελέγχου και Πλοήγησης

Αυτή η κατεύθυνση αποτελεί τον πυρήνα της μελλοντικής εργασίας, καθώς το λογισμικό μπορεί να μεταμορφώσει τις δυνατότητες του ρομπότ ανεξάρτητα από τους αρχικούς περιορισμούς του βασικού hardware.

- **Εξελιγμένες στρατηγικές path planning:** Η αυτόνομη πλοήγηση σε σύνθετα ή άγνωστα περιβάλλοντα απαιτεί πέρα από τον απλό έλεγχο ταχύτητας. Αλγόριθμοι όπως ο A* (A-star) μπορούν να υπολογίσουν τη βέλτιστη διαδρομή μεταξύ δύο σημείων σε ένα γνωστό περιβάλλον με εμπόδια, ελαχιστοποιώντας την απόσταση ή τον χρόνο. Για δυναμικά ή μερικώς άγνωστα περιβάλλοντα, αλγόριθμοι όπως ο RRT (Rapidly-exploring Random Tree) ή ο PRM (Probabilistic Roadmaps) μπορούν να δημιουργήσουν αποτελεσματικά διαδρομές, εξερευνώντας το χώρο κατά τρόπο τυχαίο αλλά καθοδηγούμενο. Αυτοί οι αλγόριθμοι επιτρέπουν στο ρομπότ να πλοηγείτε έξυπνα και να αποφεύγει εμπόδια, ενώ ταυτόχρονα επιδιώκει τον στόχο του.
- **Μηχανική Μάθηση για αυτόνομη πλοήγηση:** Η εφαρμογή τεχνικών Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning), και ειδικότερα της Ενισχυτικής Μάθησης (Reinforcement Learning), μπορεί να προσδώσει στο ρομπότ την ικανότητα να μαθαίνει αυτόνομα βέλτιστες στρατηγικές πλοήγησης και αποφυγής εμποδίων μέσα από την εμπειρία. Αντί να προγραμματίζεται ρητά κάθε κανόνας πλοήγησης, το ρομπότ μπορεί να "ανταμείβεται" για επιτυχημένες ενέργειες και να "τιμωρείται" για ανεπιτυχείς, οδηγώντας σε αυτόματη βελτιστοποίηση της συμπεριφοράς του. Αυτό είναι ιδιαίτερα επωφελές για άγνωστα, μεταβαλλόμενα ή πολύπλοκα περιβάλλοντα, όπου οι παραδοσιακοί αλγόριθμοι μπορεί να υστερούν ή να απαιτούν υπερβολικό προγραμματισμό.

- **Αλγόριθμοι συνεργατικής ρομποτικής (Swarm Robotics):** Εάν η μελλοντική εργασία προβλέπει τη χρήση πολλαπλών παρόμοιων ρομπότ (ένα "σμήνος" ή "swarm"), η ανάπτυξη ειδικών αλγορίθμων είναι απαραίτητη. Οι αλγόριθμοι swarm επιτρέπουν σε μια ομάδα απλών ρομπότ να συνεργάζονται για την επίτευξη σύνθετων στόχων που είναι αδύνατοι για ένα μόνο ρομπότ. Παραδείγματα περιλαμβάνουν την συλλογική αναζήτηση και χαρτογράφηση μιας περιοχής, την μεταφορά αντικειμένων ή την δημιουργία δυναμικών σχηματισμών. Η έρευνα σε αυτό τον τομέα θα προσδώσει στο σύστημα μια νέα διάσταση δυνατοτήτων, ειδικά σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας ή σε περιβάλλοντα όπου η αποτυχία ενός μόνο ρομπότ δεν πρέπει να θέτει σε κίνδυνο την αποστολή.

3. Προσθήκη Νέων Αισθητήρων για Αυξημένη Αυτονομία

Η πλήρης αυτονομία του ρομπότ απαιτεί την απεξάρτησή του από εξωτερικά συστήματα παρακολούθησης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την ενσωμάτωση και συγχώνευση δεδομένων από πολλαπλούς ενσωματωμένους αισθητήρες.

- **Ενσωματωμένοι αισθητήρες θέσης/ταχύτητας (Encoders):** Αυτί για την εξωτερική προσθήκη μαγνητών και τη χρήση αισθητήρων Hall, η ενσωμάτωση μικρο-οπτικών ή μαγνητικών encoders απευθείας στους DC vibration motors θα παρείχε άμεση, υψηλής ανάλυσης και ακριβή ανάδραση για τη γωνιακή κίνηση των έκκεντρων. Αυτή η πληροφορία είναι κρίσιμη για την ακριβή οδομετρία (odometry) του ρομπότ, δηλαδή την εκτίμηση της μετατόπισής του με βάση τις κινήσεις των κινητήρων του. Η βελτιωμένη οδομετρία είναι θεμελιώδης για την αυτόνομη πλοϊγηση χωρίς εξωτερική κάμερα.
- **Αδρανειακές Μονάδες Μέτρησης (IMU):** Ένα IMU (Inertial Measurement Unit), το οποίο συνήθως περιλαμβάνει επιταχυνσιόμετρο, γυροσκόπιο και μαγνητόμετρο, αποτελεί βασικό αισθητήρα για την αυτόνομη πλοϊγηση. Παρέχει δεδομένα για την γωνιακή στάση (orientation) και την γωνιακή ταχύτητα του ρομπότ, καθώς και για τις γραμμικές επιταχύνσεις. Αυτές οι πληροφορίες είναι κρίσιμες για την αυτόνομη εκτίμηση της θέσης (pose estimation) και τον προσανατολισμό του ρομπότ σε πραγματικό χρόνο, ακόμη και όταν δεν υπάρχει οπτική παρακολούθηση.
- **Αισθητήρες εγγύτητας/απόστασης:** Η ενσωμάτωση μικρών, χαμηλού κόστους αισθητήρων, όπως υπέρηχοι (sonar) για μεγαλύτερες απόστασεις, υπέρυθροι (IR) για μικρότερες, ή μικροί αισθητήρες λέιζερ (LIDAR-lite), θα επέτρεπε στο ρομπότ να ανιχνεύει αυτόνομα εμπόδια στο άμεσο περιβάλλον του. Αυτό είναι απαραίτητο για την τοπική αποφυγή σύγκρουσης και την ασφαλή πλοϊγηση σε άγνωστους ή δυναμικούς χώρους. Η ποικιλία των αισθητήρων επιτρέπει την κάλυψη διαφορετικών αναγκών απόστασης και ακρίβειας.
- **Εφαρμογές SLAM (Simultaneous Localization and Mapping):** Με τη χρήση των παραπάνω ενσωματωμένων αισθητήρων (ειδικά IMU και αισθητήρων απόστασης), το ρομπότ θα μπορούσε να εφαρμόσει αλγορίθμους SLAM. Το SLAM επιτρέπει στο ρομπότ να ταυτοχρονα κατασκευάζει έναν χάρτη του άγνωστου περιβάλλοντος και να εντοπίζει τη δική του θέση μέσα σε αυτόν τον χάρτη. Αυτό είναι ένα θεμελιώδες βήμα προς την πλήρη αυτονομία σε μη δομημένα περιβάλλοντα και είναι κρίσιμο για

πιθανούς μηχανισμούς swarm, όπου τα ρομπότ πρέπει να έχουν μια κοινή αντίληψη του χώρου για να συνεργαστούν αποτελεσματικά.

- **Συγχώνευση αισθητήρων (Sensor Fusion):** Η ανάπτυξη και βελτιστοποίηση αλγορίθμων συγχώνευσης δεδομένων, όπως φίλτρα Kalman (Kalman Filters) ή φίλτρα σωματιδίων (Particle Filters), είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική αξιοποίηση των πληροφοριών από όλους τους ενσωματωμένους αισθητήρες, οδηγώντας σε μια πιο ακριβή και στιβαρή εκτίμηση της κατάστασης του ρομπότ.

Με αυτές τις προτεινόμενες επεκτάσεις, το ρομποτικό σύστημα θα μπορέσει να εξελιχθεί σε μια πιο ισχυρή, αυτόνομη και επεκτάσιμη πλατφόρμα, ικανή να αντιμετωπίσει ένα ευρύτερο φάσμα ερευνητικών και πρακτικών εφαρμογών, ανεξάρτητα από τους αρχικούς περιορισμούς του υλικού.

Βιβλιογραφία

1. *Ikuta K., Aritomi S., Kabashima T.* «*Tiny Silent Linear Cybernetic Actuator Driven by Piezoelectric Device with Electromagnetic Clamp*», *Micro Electro Mechanical Systems '92 Travemunde (Germany), February 4-7, 1992*
2. *Zesch W., Büchi R., Codourey A., Siegwart R.* «*Inertial Drives for Micro- and Nanorobots: Two Novel Mechanisms*» *Swiss Federal Institute of Technology Zürich ETHZ Institute of Robotics, December 1995*
3. *Vartholomeos P., Vlachos K., Papadopoulos E.*, «*Analysis and Motion Control of a Centrifugal-Force Microrobotic Platform*», *IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATION SCIENCE AND ENGINEERING*
4. *J. Brufau, M. Puig-Vidal, J. López-Sánchez, J. Samitier W. Driesen, J.-M. Breguet* «*MICRON: Small Autonomous Robot for Cell Manipulation Applications* », *International Conference on Robotics and Automation Barcelona, Spain, April 2005*
5. *Serway, Jewett* «Φυσική για επιστήμονες και μηχανικούς, Όγδοη έκδοση» *Εκδόσεις κλειδάριθμος, Δεκέμβριος 2013.*
6. *Austin H., Bill D.* «*Electric Motors and Drivers, 5th* », *August 15th, 2019.*
7. *Iliana S., Kostas V., Evangelos P.* «*Speed Control of Vibration Micro-motors of a Micro-Robotic Platform*», *2013 21st Mediterranean Conference on Control & Automation (MED) Chania, Crete, Greece, June 25-28, 2013*
8. *Kevin L., Nicholas M., Mattheew E.*, «*Embedded Computing and Mechatronics with the PIC32*», *December 2015.*
9. *Paul T., Gene M.*, «*Physics for Scientists and Engineers, Sixth Edition*» *2008 by W. H. Freeman and Company*
10. *S. Anderson* «*Wheel–Rail Interface Handbook*» *Woodhead Publishing, 2009.*
11. Γεώργιος Α., Βασίλειος Δ., «Αριθμητικές μέθοδοι για συνήθεις διαφορικές εξισώσεις 2^η έκδοση», *Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Σεπτέμβριος 2018.*
12. *Tim W.* «*Designing Embedded Systems with PIC Microcontrollers*», *The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford 2010*