



Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Σχολή Μηχανικών

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρονικής, Συστημάτων και Τεχνολογίας Υπολογιστών

Συνεργατική μετακίνηση αντικειμένου μεταξύ ανθρώπου και τετράποδου ρομπότ

Διπλωματική Εργασία
Κωνσταντίνος Πλώτας

Επιβλέπων: Δημήτριος Παπαγεωργίου
Επ. καθηγητής ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ

10 Φεβρουαρίου 2025

Περίληψη

Η συνεργατική μεταφορά αντικειμένων μεταξύ ανθρώπου και τετράποδου ρομπότ αναδεικνύεται ως ένας διαφορετικός τρόπος για την αύξηση της αποτελεσματικότητας και της προσαρμοστικότητας σε διάφορους τύπους εργασιών, ιδιαίτερα σε δυναμικά και απαιτητικά περιβάλλοντα. Τα τετράποδα ρομπότ προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα λόγω του μεγέθους, βάρους και τον τρόπο της κίνησής τους, καθώς μπορούν να πλοηγούνται με σχετική ευκολία σε πολύπλοκα εδάφη.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στη χρήση τετράποδων ρομπότ για τη συνεργατική μεταφορά αντικειμένου, με έμφαση στην ανάπτυξη ισχυρών στρατηγικών ελέγχου που θα διευκολύνουν τη συνεργασία μεταξύ ανθρώπων και ρομπότ. Η έρευνα αυτή χρησιμοποιεί και προτείνει ένα σχήμα ελέγχου στη ρομποτική και στη θεωρία ελέγχου, σε συνδυασμό με ένα καινοτόμο σύστημα ανεπτυγμένο από την ομάδα του ΙΤΕ που λειτουργεί ως αισθητήρας δύναμης και βοηθά στην προσκόλληση του αντικειμένου με το ρομπότ, με σκοπό να αντιμετωπίσει τις προκλήσεις που σχετίζονται με τον συντονισμό και την επικοινωνία ανθρώπων και αυτόνομων ρομποτικών συστημάτων σε συνεργατικές εργασίες.

Το αξιοσημείωτο εύρημα της έρευνας είναι η μαθηματική απόδειξη της ικανότητας του προτεινόμενου σχήματος ελέγχου να προσαρμόζεται δυναμικά στις απαιτήσεις των κινήσεων που παρουσιάζονται κατά την διάρκεια της μεταφοράς, με βασικό κριτήριο την αποφυγή αποκόλλησης του αντικειμένου από την αρπάγη. Εφόσον η ορθότητα της προτεινόμενης μεθόδου επιβεβαιώνεται μέσω μαθηματικής απόδειξης, εξασφαλίζοντας έτσι τη θεωρητική εγκυρότητα του ελέγχου, διατυπώνεται και μια ενότητα στην οποία περιγράφονται και παρουσιάζονται εκτενώς τα πειράματα και τα αποτελέσματα που διεξήχθησαν. Τα πειράματα αυτά επιβεβαιώνουν και αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου σχήματος εξασφαλίζοντας με αυτό τον τρόπο και την πρακτική εγκυρότητα του σχήματος ελέγχου αλλά και την ορθότητα της απόδειξης αυτής.

Abstract

Collaborative object transfer between humans and quadruped robots emerges as an alternative approach to enhancing efficiency and adaptability across various tasks, particularly in dynamic and demanding environments. Quadruped robots offer significant advantages due to their size, weight, and mode of movement, allowing them to navigate complex terrains with relative ease, making them ideal for collaborative object transfer tasks.

This thesis focuses on the use of quadruped robots for collaborative object transport, emphasizing the development of robust control strategies to facilitate cooperation between humans and robots. This research employs and proposes a control framework in robotics and control theory, combined with an innovative system developed by the FORTH team that serves as a force sensor and aids in attaching an object to the robot. The goal is to address challenges related to coordination and communication between humans and autonomous robotic systems in collaborative tasks.

A notable finding of this research is the mathematical proof of the proposed control scheme's ability to dynamically adapt to the motion demands during object transfer, with the primary criterion being the prevention of object detachment from the gripper. With the theoretical validity of the control method confirmed through mathematical proof, the thesis proceeds to present a detailed section describing and showcasing the experiments and results conducted. These experiments verify and demonstrate the effectiveness of the proposed control scheme, thus ensuring both its practical validity and the correctness of the theoretical proof.

Λέξεις Κλειδιά

Φυσική αλληλεπίδραση ανθρώπου-ρομπότ, συνεργασία ανθρώπου-ρομπότ, τετράποδα ρομπότ, μεταφορά αντικειμένων, έλεγχος κίνησης, έλεγχος ενδοτικότητας, εκτίμηση δύναμης, δυναμικά περιβάλλοντα, ρομποτική θεωρία ελέγχου, τεχνητό δυναμικό πεδίο, αυτόνομα συστήματα.

Στους δασκάλους και καθηγητές μου, των οποίων οι γνώσεις και η καθοδήγηση υπήρξαν καθοριστικές για την προσωπική και ακαδημαϊκή μου εξέλιξη.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη προς τον επιδίδοντα καθηγητή μου, Δημήτριο Παπαγεωργίου, ο οποίος υπήρξε πολύτιμος σύμβουλος σε κάθε στάδιο της πορείας αυτής. Η διαθεσιμότητά του καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας και η αστείρευτη υποστήριξή του μέσα από πλήθος συζητήσεων και ανταλλαγής γνώσεων υπήρξαν ανεκτίμητες.

Ευχαριστώ επίσης την ερευνητική ομάδα του Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας (ΙΤΕ), και πιο συγκεκριμένα το Εργαστήριο Υπολογιστικής Όρασης και Ρομποτικής, για την παροχή των εγκαταστάσεων και του απαραίτητου εξοπλισμού που επέτρεψαν την επιτυχή διεξαγωγή των πειραμάτων μου. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στους συνεργάτες μου, Μάνο Παπαδάκη και Δρόσο Δροσάκη, των οποίων η βοήθεια στην προετοιμασία και τη διεξαγωγή των πειραμάτων ήταν καθοριστική. Οι ουσιαστικές μας συνομιλίες, καθώς και η αφοσίωσή τους, συνέβαλαν στη διαμόρφωση των αποτελεσμάτων αυτής της έρευνας.

Τέλος, εκφράζω την ευγνωμοσύνη μου προς την οικογένειά μου και τους φίλους μου, που με στήριξαν συναισθηματικά και συνέβαλαν στη διατήρηση της ψυχικής και σωματικής μου ισορροπίας σε όλη αυτήν τη διαδρομή. Ιδιαίτερη μνεία αξίζει στους καθηγητές μουσικής μου, των οποίων η πειθαρχία και η καθοδήγηση με δίδαξαν την αξία της αφοσίωσης, της επαναλαμβανόμενης προσπάθειας και της δημιουργικότητας.

Συμβολισμοί

Σύμβολο	Περιγραφή
a	Βαθμωτό μέγεθος στο $\mathbb{R}$
$\mathbf{a}, \mathbf{A}$ (σε bold)	Διάνυσμα ($\mathbb{R}^n$) ή πίνακας ($\mathbb{R}^{n \times m}$)
$\mathcal{A}$	Σύνολο, χώρος, ή υποχώρος
$\hat{\mathbf{a}}$	Αντισυμμετρικός πίνακας ($\mathbb{R}^{n \times n}$) από στοιχεία του $\mathbf{a}$
$\text{diag}(\mathbf{a})$	Διαγώνιος πίνακας με το διάνυσμα $\mathbf{a}$
$\text{diag}(a_i), i = 1, \dots, n$	Διαγώνιος πίνακας με διαγώνια στοιχεία a_i
$\mathbf{A}^\dagger$	Ψευδο-αντίστροφος του πίνακα $\mathbf{A}$
$\det(\mathbf{A})$ ή $ \mathbf{A} $	Ορίζουσα του πίνακα $\mathbf{A}$
$\dot{a}, \ddot{a}$	Πρώτη και δεύτερη παράγωγος του a
$\dot{\mathbf{A}}, \ddot{\mathbf{A}}$	Πρώτη και δεύτερη παράγωγος του πίνακα $\mathbf{A}$
$\frac{\partial a}{\partial b}$	Μερική παράγωγος του a ως προς b
$\underline{a}, \bar{a}$	Κατώτερο και ανώτερο όριο του a
$ a $	Απόλυτη τιμή του a
$\ \mathbf{a}\ _2$	Ευκλείδεια νόρμα - (μέτρο) του διανύσματος $\mathbf{a}$
$\min(\mathbf{a}), \max(\mathbf{a})$	Ελάχιστη και Μέγιστη τιμή των στοιχείων του $\mathbf{a}$
$\mathbf{I}_n$	Μοναδιαίος πίνακας μεγέθους $n \times n$
$\mathbf{0}_n, \mathbf{0}_{n \times m}$	Μηδενικό διάνυσμα $n \times 1$ και πίνακας $n \times m$
$\mathbb{R}^+, \mathbb{R}_{\geq 0}$	Σύνολο θετικών και μη αρνητικών πραγματικών αριθμών
$\text{Rot}(\mathbf{a}, \theta)$	Πίνακας στροφής με γωνία θ γύρω από τον άξονα $\mathbf{a}$
$L \in \mathbb{R}_{\geq 0}$	Συνάρτηση Lyapunov και ενέργειας
$\mathbf{q}(t) \in \mathbb{R}^n$	Διάνυσμα θέσης στο χώρο των αρθρώσεων
$\mathbf{p}(t) \in \mathbb{R}^r$	Διάνυσμα θέσης στο χώρο εργασίας

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	iii
Abstract	v
Λέξεις Κλειδιά	vi
Ευχαριστίες	vii
Συμβολισμοί	viii
1 Εισαγωγή	1
1.1 Γενική Ιστορία των Ρομπότ	2
1.2 Τετράποδα ρομπότ	3
1.2.1 Εισαγωγή στα τετράποδα ρομπότ	3
1.2.2 Ιστορικές Εξελίξεις των ρομπότ με δυνατότητα βάδισης	5
1.3 Τα υπέρ και τα κατά των ρομπότ με δυνατότητα βάδισης	12
1.3.1 Πλεονεκτήματα	12
1.3.2 Μειονεκτήματα	14
1.4 Πρακτικές εφαρμογές για ρομπότ με δυνατότητα βάδισης	16
1.5 Περιληπτική Ανασκόπηση της Φυσικής Αλληλεπίδρασης Ανθρώπου - Ρομπότ (pHRI)	18
1.5.1 Η προοπτική της pHRI	19
1.6 Εννοιολογική Προσέγγιση του Προβλήματος και η Λύση του συνοπτικά	20
1.7 Η Συνεισφορά της Διπλωματικής στην Επιστήμη	21
1.8 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας	22
2 Εκτίμηση Δύναμης Αλληλεπίδρασης	23
2.1 Εκτίμηση δυνάμεων μέσω των ροπών στις αρθρώσεις	23
2.1.1 Μαθηματικό Υπόβαθρο	23
2.1.2 Περιγραφή προβλήματος σύζευξης δυνάμεων και διατύπωση επίλυσης	25
2.1.3 Η Ιακωβιανή κινηματικής αλυσίδας	26
2.2 Πείραμα χρήσης των εκτιμήσεων των ροπών στις αρθρώσεις	28
2.2.1 Διεξαγωγή και Αποτελέσματα των Πειραμάτων	29
2.2.2 Συμπεράσματα και προτάσεις	31
2.3 Εκτίμηση δυνάμεων αλληλεπίδρασης με χρήση εξωτερικού αισθητήρα δύναμης (Τρόπος 2)	32
2.3.1 Τρόπος Λειτουργίας της MIGHTY	32
2.3.2 Χρήση του MIGHTY για Εκτίμηση Δυνάμεων Αλληλεπίδρασης πάνω στο Ρομπότ	32
3 Έλεγχος Κίνησης και Ενδοτηκότητας του Ρομπότ	36
3.1 Έλεγχος ενδοτικότητας στα ρομπότ	38

3.2	Προσομοίωση ελέγχου κίνησης και ενδοτικότητας σε τετράποδο ρομπότ και αποτελέσματα	40
3.2.1	Συμπεράσματα	43
4	Προτεινόμενο σχήμα ελέγχου	47
4.1	Προτεινόμενος Ελεγκτής	48
4.2	Πειράματα και Αποτελέσματα	52
5	Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα	56
5.1	Μελλοντική Έρευνα	57
5.2	Συνολική Αξιολόγηση	58
A'	Εύρεση Ιακωβιανής τετράποδου ρομπότ με την χρήση των παραμέτρων Denavit–Hartenberg	59
B'	Κινηματικός Έλεγχος Ρομπότ	63
B'.1	Δυναμικό Μοντέλο του Ρομπότ	63
B'.1.1	Έλεγχος στο επίπεδο των ροπών	64
B'.1.2	Έλεγχος στο επίπεδο των ταχυτήτων	65
B'.1.3	Προσομοίωση του προβλήματος Trajectory Tracking στον χώρο εργασίας σε τετράποδο ρομπότ στο επίπεδο των ταχυτήτων	66
	Βιβλιογραφία	69

Λίστα Σχημάτων

1.1	Το Unimate ρομπότ [41]	2
1.2	Το ρομπότ Versatran [4]	3
1.3	Πολύγωνο ισορροπίας σε τετράποδο ρομπότ εν κινήσει [44]	4
1.4	Επίπεδο σχέδιο του μηχανισμού του Chebyshev [20]	6
1.5	Το μηχανικό άλογο κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον Rygg, 1893	6
1.6	Το τετράποδο φορτηγό [49]	7
1.7	Σκίτσο της κατασκευής Phony Pony [20]	8
1.8	Τα αναφερόμενα ρομπότ ASV , PV-II και ODEX-I αντίστοιχα [49]	9
1.9	Το ρομπότ Spot Mini [47]	10
1.10	Το ρομπότ ANYmal [5]	11
1.11	Τα αναφερόμενα ρομπότ της Unitree Robotics [40, 6]	11
1.12	Τετράποδοι βηματισμοί: (a) κάτοψη ενός ρομπότ, (b) γράφημα ακολουθίας ποδιών, (c) έως (h) ακολουθίες [20]	12
1.13	Πλεονεκτήματα των ρομπότ με πόδια έναντι των τροχοφόρων ρομπότ [38]	14
1.14	Το εξεταζόμενο πρόβλημα συνεργασίας ανθρώπου-ρομπότ και η διάταξη.	20
2.1	Πειραματική διάταξη 1 ^{ης} προσέγγισης : Το ρομπότ Go1 συνδεδεμένο με ένα καλώδιο ethernet	25
2.2	Σύνδεση Πλαισίων σε μια ανοιχτή κινηματική αλυσίδα [42]	27
2.3	Σύνδεση Πλαισίων σε μια κλειστά κινηματική αλυσίδα [42]	28

2.4	Οι δυνάμεις και ροπές που λαμβάνει το ΚΜ του ρομπότ σε πλήρη στασιμότητα, χωρίς αντιστάθμιση βαρύτητας και χωρίς εφαρμογή χαμηλοπερατού φίλτρου. . .	30
2.5	Οι δυνάμεις και ροπές που λαμβάνει το ΚΜ του ρομπότ σε πλήρη στασιμότητα, με αντιστάθμιση βαρύτητας και με εφαρμογή χαμηλοπερατού φίλτρου $f_c = 20Hz$. . .	30
2.6	Οι δυνάμεις και ροπές που λαμβάνει το ΚΜ του ρομπότ σε κίνηση, με αντιστάθμιση βαρύτητας και με εφαρμογή χαμηλοπερατού φίλτρου $f_c = 20Hz$	31
2.7	Η δομή του MIGHTY	33
2.8	Η μπροστά και πίσω όψη του αισθητήρα MIGHTY	33
2.9	Η πλακέτα αισθητήρων του MIGHTY.	33
2.10	Η διαδικασία της βαθμονόμησης των παραμέτρων a_i και b_i	34
2.11	Μεταφορά δυνάμεων από κάθε θάλαμο αισθητήρων στο κεντρικό πλαίσιο $\{S\}$.	35
3.1	Παράδειγμα Ενδοτικότητας : Αντίσταση στην κίνηση ανάλογα με την ενδοτικότητα του συστήματος (Πηγή: [18]).	37
3.2	Η εμπέδηση στο μιγαδικό επίπεδο (Πηγή: [18]).	37
3.3	Σχήμα μπλοκ ελέγχου ενδοτικότητας (admittance) με νόμο ελέγχου επιθυμητής τροχιάς.	39
3.4	Το ρομπότ Unitree A1 στο εικονικό περιβάλλον RViz	41
3.5	Πρόβλημα Προσέγγισης στόχου με διαφορετικά κέρδη : Θέση ως προς τον χρόνο	41
3.6	Πρόβλημα Προσέγγισης στόχου με διαφορετικά κέρδη : Ταχύτητα ως προς τον χρόνο	42
3.7	Κάτοψη κίνησης του ρομπότ στο πρόβλημα προσέγγισης στόχου	42
3.8	Γραφική παράσταση Θέσης και Δύναμης ως προς τον χρόνο	44
3.9	Σύγκριση της κάτοψης με και χωρίς ελατήριο	45
4.1	Το ρομπότ Go1 με τον αισθητήρα MIGHTY	47
4.2	Η τεχνητή συνάρτηση δυναμικού φράγματος και η παράγωγός της.	50
4.3	Λογική πίσω από την (4.13).	51
4.4	Κίνηση του αντικειμένου σε τόξο γύρω από το ρομπότ.	53
4.5	Η κλίση του Τεχνητού Δυναμικού Φράγματος (ΤΔΦ) και οι αντίστοιχες τιμές των $f_i, i = 1, \dots, 4$ και f_m στο πείραμα που αφορά την περιστροφή του αντικειμένου.	54
4.6	Πείραμα που αφορά τη μετακίνηση του αντικειμένου.	54
4.7	Πείραμα που αφορά τη μετακίνηση.	55
A'.1	Τα πλαίσια συντεταγμένων των τετράποδων της Unitree [39]	59
A'.2	Οπτικοποίηση των πλαισίων αναφοράς πάνω στο ρομπότ Go1	60
A'.3	Πλάισια αναφοράς για τις DH παραμέτρους.	61
B'.1	Γραφική παράσταση της γενικευμένης θέσης ως προς τον χρόνο	68
B'.2	Κάτοψη της τροχιάς	68

Λίστα Πινάκων

3.1	Αναλογίες μεταξύ μηχανικών και ηλεκτρικών συστημάτων (πηγή: [18]).	38
A'.1	Πίνακας Denavit-Hartenberg	61

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Καθώς η τεχνολογία συνεχίζει και αναπτύσσεται, η ενσωμάτωση των ρομπότ σε διάφορες πτυχές της ανθρώπινης ζωής γίνεται ολοένα και πιο διαδεδομένη. Τα ρομπότ δεν περιορίζονται πλέον στον χώρο της βιομηχανίας αλλά εγκαθίστανται σε σπίτια, νοσοκομεία και δημόσιους χώρους, εκτελώντας εργασίες που κυμαίνονται από μονότονες και επαναλαμβανόμενες μέχρι εξαιρετικά περίπλοκες. Μία από τις πιο συναρπαστικές εξελίξεις στον τομέα αυτό, είναι η δυνατότητα των ρομπότ να συνεργάζονται με ανθρώπους, συνδυάζοντας τις ανθρώπινες γνωστικές ικανότητες με τη ρομποτική ακρίβεια και δύναμη. Αυτή η συλλογική προσέγγιση έχει τη δυνατότητα να φέρει επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο εκτελούμε εργασίες, ιδιαίτερα εκείνες που περιλαμβάνουν φυσική αλληλεπίδραση με το περιβάλλον. Ο τομέας συνεργασίας ανθρώπου-ρομπότ είναι ένας ταχέως αναπτυσσόμενος τομέας έρευνας και ανάπτυξης, που καθοδηγείται από την επιθυμία να δημιουργηθούν μηχανές που μπορούν να βοηθήσουν, να αυξήσουν, ακόμη και να ενισχύσουν τις ανθρώπινες ικανότητες. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά ρομπότ, τα οποία συχνά λειτουργούν ανεξάρτητα και μεμονωμένα, τα συνεργατικά ρομπότ έχουν σχεδιαστεί για να εργάζονται δίπλα σε ανθρώπους, μοιράζοντας εργασίες και ευθύνες με τρόπο αποτελεσματικό και ασφαλές. Αυτό βέβαια απαιτεί μια θεμελιώδη αλλαγή στον τρόπο με τον οποίο προγραμματίζονται και ελέγχονται τα ρομπότ, μεταδίδοντας από άκαμπτες, προκαθορισμένες ενέργειες σε πιο προσαρμοστικές συμπεριφορές με επίγνωση του περιβάλλοντος.

Μία από τις βασικές προκλήσεις στην ανάπτυξη συνεργατικών ρομπότ είναι να τους δοθεί η δυνατότητα να κατανοήσουν και να προβλέψουν τις ανθρώπινες προθέσεις. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε εργασίες που περιλαμβάνουν φυσική αλληλεπίδραση, όπως η μετακίνηση και ο χειρισμός αντικειμένων, όπου ο ακριδής συντονισμός μεταξύ ρομπότ και ανθρώπου είναι απαραίτητος. Το ρομπότ πρέπει να είναι σε θέση να ερμηνεύει τις πράξεις του ανθρώπου, να αξιολογεί την κατάσταση και να αποφασίζει για την καταλληλότερη απάντηση, πράττοντάς τη σε πραγματικό χρόνο. Η επίτευξη αυτού του επιπέδου συντονισμού απαιτεί προηγμένα συστήματα ελέγχου που μπορούν να ενσωματώσουν δεδομένα από μια ποικιλία αισθητήρων και να τα χρησιμοποιήσουν για να καθοδηγήσουν τις ενέργειες του ρομπότ.

Η διπλωματική αυτή εστιάζει στον σχεδιασμό και την εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος ελέγχου, με στόχο να επιτρέψει σε ένα κινούμενο ρομπότ να συνεργάζεται αποτελεσματικά με έναν ανθρώπινο συνεργάτη στο έργο της μετακίνησης ογκωδών αντικειμένων. Το σύστημα ελέγχου βασίζεται στις εντολές κίνησης του ίδιου του ρομπότ και σε εξωτερικό αισθητήριο δύναμης, ώστε να παρέχονται οι απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με την αλληλεπίδραση μεταξύ του ρομπότ και του ανθρώπου. Με την επεξεργασία των δεδομένων από τους αισθητήρες και το κατάλληλο σύστημα ελέγχου, το ρομπότ μπορεί να προσαρμόζει τις ενέργειές του συμπληρώνοντας τις προσπάθειες του ανθρώπου, κάνοντας το έργο ευκολότερο και πιο αποτελεσματικό.

Η σημασία αυτής της έρευνας έγκειται στις πιθανές εφαρμογές της σε ένα ευρύ φάσμα πεδίων. Σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, για παράδειγμα, τα συνεργατικά ρομπότ μπορούν να βοηθήσουν τους εργαζόμενους στη μεταφορά υλικών, μειώνοντας τον κίνδυνο τραυματισμού και αυ-

ξάνοντας την παραγωγικότητα. Στον τομέα της υγείας, τα ρομπότ μπορούν να βοηθήσουν τους φροντιστές, να μετακινούν ασθενείς ή να χειρίζονται ογκώδη ιατρικό εξοπλισμό. Οι αρχές που αναπτύχθηκαν σε αυτή τη διατριβή μπορούν επίσης να εφαρμοστούν σε άλλες μορφές αλληλεπίδρασης ανθρώπου-ρομπότ, συμβάλλοντας στον ευρύτερο στόχο της δημιουργίας συνεργατικών ρομπότ, μιας και είναι πραγματικά ενσωματωμένα στην καθημερινή ανθρώπινη ζωή.

1.1 Γενική Ιστορία των Ρομπότ

Η αρχική εποχή της βιομηχανικής ρομποτικής, από το 1950 έως το 1967, εισήγαγε προγραμματιζόμενες μηχανές περιορισμένης ικανότητας που χρησιμοποιούν εξοπλισμό χαμηλής τεχνολογίας χωρίς προηγμένες δυνατότητες ελέγχου και εξωτερική επικοινωνία. Αυτά τα πρώτα ρομπότ εκτελούσαν κατά κύριο λόγο στοιχειώδεις εργασίες όπως χειρισμό υλικών και εργασίες φόρτωσης-εκφόρτωσης. Η ιστορία της βιομηχανικής ρομποτικής εντοπίζεται συνήθως στη δεκαετία του 1950, με σημαντικές εξελίξεις να προηγούνται αυτής της περιόδου. Η δημιουργία του «Programmable Article Transfer» από τον George Devol το 1954 έθεσε τα θεμέλια για την ανάπτυξη του Unimate, που αναγνωρίστηκε ως το πρώτο αληθινό βιομηχανικό ρομπότ στην ιστορία.



Σχήμα 1.1: Το Unimate ρομπότ [41]

Οι Devol και Joseph Engelberger ίδρυσαν την Unimation το 1954 για την κατασκευή ρομπότ για βιομηχανικές εφαρμογές, όπως εργοστάσια αυτοκινήτων για συγκόλληση σημειακών και χειρισμό τεμαχίων [4]. Αρκετές εταιρείες κατασκευής ρομπότ εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου λόγω του αυξανόμενου ενδιαφέροντος της αυτοκινητοβιομηχανίας για την αυτοματοποίηση. Οι αξιοσημείωτες εξελίξεις περιλαμβάνουν την ανάπτυξη του Versatran, ενός κυλινδρικού ρομπότ, και τη συμφωνία αδειοδότησης μεταξύ της Unimation και της Kawasaki Heavy Industries Ltd., η οποία συνέβαλε στην ταχεία ανάπτυξη και υιοθέτηση βιομηχανικών ρομπότ στην ιαπωνική και την ασιατική αγορά.

Η ιδέα των ρομπότ να συνεργάζονται με ανθρώπους δεν κάτι νέο, ωστόσο έχει αποκτήσει νέα σημασία με την εξέλιξη της τεχνολογίας. Τα πρώτα ρομπότ, που αναπτύχθηκαν στα μέσα του 20ου αιώνα, σχεδιάστηκαν κυρίως για αυτοματισμούς στην κατασκευή. Αυτά τα μηχανήματα ήταν ισχυρά και ακριδή, αλλά λειτουργούσαν απομονωμένα από τον άνθρωπο, εκτελώντας επαναλαμβανόμενες εργασίες σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα. Η εστίαση εκείνη την εποχή ήταν στην αποτελεσματικότητα και την παραγωγικότητα, με ελάχιστη προσοχή στην αλληλεπίδραση ανθρώπου-ρομπότ. Αργότερα, οι ερευνητές άρχισαν να διερευνούν τη δυνατότητα ύπαρξης ρομπότ που θα μπορούσε να αλληλεπιδράσει με τους ανθρώπους με πιο ουσιαστικούς τρόπους. Η εισαγωγή αισθητήρων και πιο εξελιγμένων συστημάτων ελέγχου επέτρεψε στα ρομπότ να αντιλαμβάνονται και να ανταποκρίνονται στο περιβάλλον τους, θέτοντας τις βάσεις για τη συνε-



Σχήμα 1.2: Το ρομπότ Versatran [4]

γασία ανθρώπου-ρομπότ. Την δεκαετία του 1980 και του 1990 συνέβη η ανάπτυξη των πρώτων συνεργατικών ρομπότ, ή αλλιώς «cobots», τα οποία σχεδιάστηκαν για να λειτουργούν μαζί με τους ανθρώπους σε εργασίες που απαιτούσαν επιδεξιότητα και ακρίβεια. Τα πρώτα cobots χρησιμοποιήθηκαν κυρίως στην κατασκευή, όπου μπορούσαν να βοηθήσουν τους εργαζόμενους σε εργασίες που ήταν πολύ δύσκολες ή επικίνδυνες για τους ανθρώπους να τις εκτελέσουν μόνοι τους.

Η ιδέα της συνεργασίας ανθρώπου-ρομπότ απέκτησε περαιτέρω ώθηση τον 21ο αιώνα, καθώς η μηχανική μάθηση κατέστησε δυνατή την ανάπτυξη ρομπότ που θα μπορούσαν να μάθουν και να προσαρμοστούν στους ανθρώπινους συνεργάτες τους. Αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη πιο εξελιγμένων cobot που θα μπορούσαν να λειτουργήσουν σε ένα ευρύτερο φάσμα περιβαλλόντων, από εργοστάσια και αποθήκες έως νοσοκομεία και σπίτια. Αυτά τα ρομπότ σχεδιάστηκαν όχι μόνο για να βοηθούν τους ανθρώπους με σωματικές εργασίες αλλά και να αλληλεπιδρούν μαζί τους με πιο διαισθητικούς και φυσικούς τρόπους, χρησιμοποιώντας χειρονομίες, ομιλία και άλλες μορφές επικοινωνίας.

1.2 Τετράποδα ρομπότ

Τα ρομπότ με πόδια κατέχουν μια μοναδική θέση στον τομέα της ρομποτικής, πιθανότατα λόγω της ομοιότητάς τους με τα ζωντανά πλάσματα. Η δομή τους, που αντικατοπτρίζει αυτή των ζώων, προκαλεί συχνά μια αίσθηση οικειότητας. Όταν παρατηρούμε αυτά τα ρομπότ σε κίνηση, μπορεί να βιώσουμε μια συγκεκριμένη ενσυναίσθηση, καθώς υποσυνείδητα μας υπενθυμίζουν τα αντίστοιχα της πραγματικής ζωής. Αυτή η σύνδεση είναι εμφανής στις αντιδράσεις των ανθρώπων σε βίντεο με ρομπότ με πόδια που σπρώχνονται ή υποβάλλονται σε διάφορες δοκιμές με τα σχόλια να επικρίνουν με χιούμορ τη «σκληρή» μεταχείριση των ρομπότ αυτών. Τέτοιες αντιδράσεις υποδηλώνουν μια κοινή συναισθηματική απόκριση που συνήθως δεν προκύπτει με άλλα ρομποτικά πειράματα, όπως δοκιμές σύγκρουσης αυτόνομων οχημάτων.

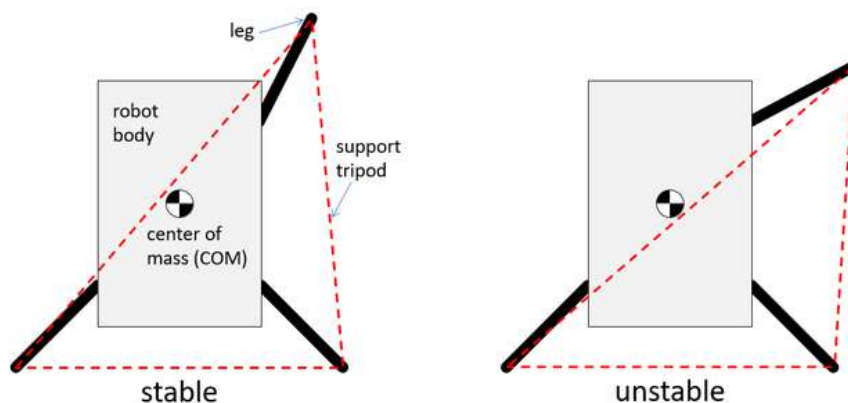
1.2.1 Εισαγωγή στα τετράποδα ρομποτ

Τα τετράποδα ρομπότ είναι ένα υποσύνολο των ρομπότ με πόδια και έχουν συγκεντρώσει σημαντική προσοχή στη ρομποτική λόγω της ικανότητάς τους να μιμούνται την κίνηση των τετράποδων ζώων. Η θεμελιώδης ιδέα πίσω από τα τετράποδα ρομπότ είναι να αναπαράγουν τα μοτίβα βάδισης ζώων όπως οι σκύλοι, οι γάτες ή τα άλογα, κάτι που επιτρέπει σε αυτές τις μηχανές να διασχίζουν αποτελεσματικά εδάφη, εύρους από επίπεδα έως και ανώμαλα. Αυτός ο τύπος μετακίνησης έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμος σε εφαρμογές όπου η ευελιξία, η σταθερότητα και η προσαρμοστικότητα είναι ζωτικής σημασίας, όπως στην αποκατάσταση από καταστροφές, τη στρατιωτική αναγνώριση και την εξερεύνηση εξωγήινων εδαφών.

Η ενότητα του κεφαλαίου αυτού είναι αφιερωμένη στη δημιουργία μηχανικών συστημάτων που κινούνται χρησιμοποιώντας εξαρτήματα που μοιάζουν με πόδια και γενικότερα σε ρομπότ που μιμούνται το περπάτημα. Ανάλογα με το πόσα πόδια έχει το κάθε ρομπότ, μπορούμε να τα κατηγοριοποιήσουμε στα : **Δίποδα**, όπως ο άνθρωπος ή τα πουλιά, τα **τετράποδα**, όπως τα θηλαστικά και τα ερπετά, τα **εξάποδα**, όπως τα έντομα, και τα **οκτάποδα**, όπως οι αράχνες και τα χταπόδια. Αν και ασυνήθιστο, ρομπότ που να έχουν ένα, τρία, πέντε ή περισσότερα πόδια - όπως το ReCUS [24], το υβριδικό ρομπότ Hilton, το OSU Triped (Berns, 2005)[12] ή το Nonaped (Zykov et al., 2004) [32], δεν είναι πρωτόγνωρα.

Το κομμάτι της διπλωματικής αυτής εστιάζει πιο συγκεκριμένα στην ανάπτυξη των τετράποδων ρομπότ. Ο λόγος επιλογής ερεύνας πάνω σε τετράποδα έχει γίνει για ποικίλους λόγους. Τα τετράποδα ρομπότ προσφέρουν έναν μοναδικό συνδυασμό σταθερότητας, ευελιξίας και προσαρμοστικότητας που τα διαφοροποιεί από τα δίποδα και πολυπόδα ρομπότ. Η διάταξη με τα τέσσερα πόδια παρέχει εγγενώς υψηλότερο επίπεδο σταθερότητας λόγω της κατανομής του βάρους και της ισορροπίας.

Για να δοθεί και μια βάση ως προς το τι θεωρείται **ισορροπία ενός ρομπότ**, θα χρειαστεί ο βασικός ορισμός της στατικής ισορροπίας ο οποίος βασίζεται στην μέθοδο προβολής του Κέντρου Μάζας (KM^1 ή **Center of Mass (KM)**) ενός αντικειμένου και αναφέρει πως ένα όχημα ή ρομπότ είναι στατικά ισορροπημένο εάν η προβολή του KM βρίσκεται εντός του πολυγώνου υποστήριξης, το οποίο ορίζεται ως το κυρτό πολύγωνο που σχηματίζεται από την σύνδεση των σημείων επαφής των ποδιών με το έδαφος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.3.



Σχήμα 1.3: Πολύγωνο ισορροπίας σε τετράποδο ρομπότ εν κινήσει [44]

Έτσι, ένα τρίποδο ρομπότ, αν και μπορεί να δημιουργήσει ένα τρίγωνο ως το "πολύγωνο υποστήριξης" του, όταν χρειαστεί η μετακίνησή του με βάδιση, θα έχει το πολύ δύο πόδια στο έδαφος την φορά, στερούμενο από την στήριξη που του παρείχε το κέντρο βάρους του με αποτέλεσμα να χρειαστούν επιπλέον παράμετροι ισορροπίας. Άλλοι λόγοι επιλογής ανάπτυξης και έρευνας πάνω στα τετράποδα αναγράφονται περιληπτικά παρακάτω :

- Στην περίπτωση των ρομπότ με δύο πόδια όπως τα ανθρωποειδή ρομπότ, απαιτούν σύνθετους αλγόριθμους και αισθητήρες για να διατηρήσουν την ισορροπία και να αποφύγουν τις πτώσεις, ενώ τα τετράποδα ρομπότ έχουν χαμηλότερο κέντρο βάρους και μπορούν να διατηρούν τρία σημεία επαφής με το έδαφος ταυτόχρονα, επιτρέποντάς τους να διασχίζουν ανώμαλες επιφάνειες με σχετική ευκολία. Αυτό τα καθιστά ιδιαίτερα αποτελεσματικά σε εξωτερικά περιβάλλοντα, όπου το έδαφος μπορεί να είναι απρόβλεπτο ή επικίνδυνο, όπως σε αποστολές έρευνας και διάσωσης, σε αγροτικές εφαρμογές ή σε πλανητική εξερεύνηση.

¹για το υπόλοιπο της εργασίας αυτής θα αναφερόμαστε στην λέξη Κέντρο Μάζας ως KM

- Τα τετράποδα ρομπότ μπορούν να επιτύχουν μια ισορροπία μεταξύ της πολυπλοκότητας και της ευελιξίας κίνησης εφόσον το μέγεθός τους τα καθιστά ικανά να κινούνται ακόμα και σε στενούς χώρους. Τα δίποδα ρομπότ προσπαθούν να μιμηθούν την ανθρώπινη κίνηση, η οποία μπορεί να είναι εξαιρετικά περίπλοκη και ενεργοβόρα, τα τετράποδα μπορούν να υιοθετήσουν διάφορα πρότυπα βάρδισης όπως το βάδισμα και το τροχάδην ανάλογα με την ταχύτητα και το έδαφος, βελτιστοποιώντας τόσο την ενεργειακή απόδοση όσο και την κινητικότητα.
- Σε σύγκριση με τα πολυπόδα ρομπότ, όπως τα εξάποδα ή τα οκταπόδα, τα τετράποδα προσφέρουν απλούστερο μηχανικό σχεδιασμό με λιγότερα πόδια και αρθρώσεις, μειώνοντας το συνολικό βάρος και τις πιθανές βλάβες, ενώ ταυτόχρονα παρέχουν επαρκή σταθερότητα και προσαρμοστικότητα για μια ευρεία γκάμα εργασιών.
- Τα τετράποδα ρομπότ συνήθως διαθέτουν καλύτερες ικανότητες μεταφοράς φορτίου σε σύγκριση με τα δίποδα. Η κατανομή του βάρους στα τέσσερα πόδια τους επιτρέπει να μεταφέρουν βαρύτερα φορτία χωρίς να διακυβεύεται η ισορροπία ή η κινητικότητά τους. Αυτή η δυνατότητα είναι κρίσιμη σε εφαρμογές όπου τα ρομπότ απαιτείται να μεταφέρουν αντικείμενα όπως εξοπλισμό, προμήθειες ή ακόμη και τραυματισμένα άτομα σε δύσβατα εδάφη.
- Ο σχεδιασμός των τετράποδων ρομπότ μπορεί να βελτιστοποιηθεί για συγκεκριμένες εργασίες, με τη δυνατότητα ενσωμάτωσης προηγμένων αισθητήρων, καμερών και εργαλείων χειρισμού, ενισχύοντας περαιτέρω τη λειτουργικότητά τους σε σύνθετα περιβάλλοντα

Συνοψίζοντας, η επιλογή του σχεδιασμού με τέσσερα πόδια για ρομπότ καθοδηγείται από έναν συνδυασμό σταθερότητας, ευελιξίας και αποτελεσματικότητας που μπορεί να μην προσφέρουν τα άλλα ρομπότ με πόδια. Εστιάζοντας σε αυτές τις πτυχές, τα τετράποδα ρομπότ αποδεικνύουν την υπεροχή τους σε σενάρια που απαιτούν ανθεκτικές και ευέλικτες λύσεις, δικαιολογώντας έτσι την επιλογή τους για τον σκοπό της διπλωματικής αυτής έναντι άλλων μη-τετράποδων ρομπότ με πόδια.

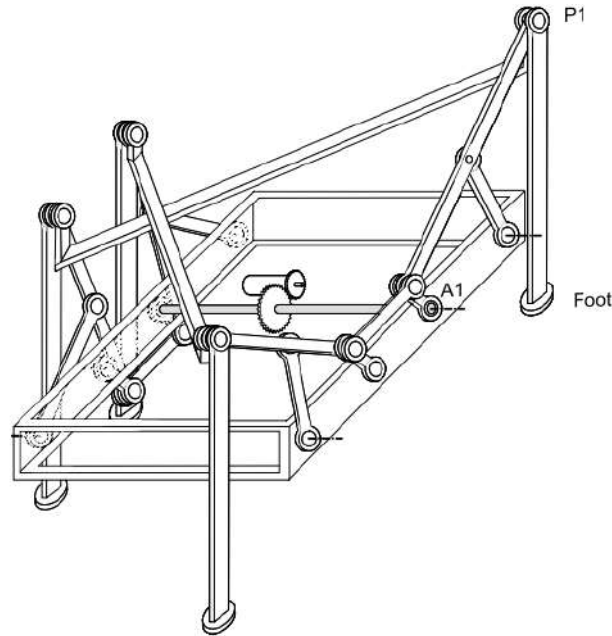
1.2.2 Ιστορικές Εξελίξεις των ρομπότ με δυνατότητα βάρδισης

Η τεχνολογία κίνησης-βάρδισης (walking locomotion) ξεκίνησε με την ανάπτυξη απλών μηχανισμών βαδίσματος που ήταν αρκετά παρόμοιοι με τα παιχνίδια και μπορούσαν να κινηθούν μόνο υπό ευνοϊκές συνθήκες, δηλαδή σε οποιοδήποτε επίπεδο έδαφος. Αργότερα, οι επιστήμονες παρατήρησαν και κατέγραψαν τα μοτίβα βάρδισης ορισμένων ειδών για να κατανοήσουν τη φυσική κίνηση. Στη συνέχεια διατυπώθηκαν και μελετήθηκαν τα είδη βάρδισης χρησιμοποιώντας μαθηματικά μοντέλα σε μια προσπάθεια βελτίωσης των μηχανισμών βάρδισης (Gaiting). Οι μετρήσεις σταθερότητας και οι αλγόριθμοι δημιουργίας βάρδισης (Gait Design Algorithms) δημιουργήθηκαν με βάση ιδανικών περιπτώσεων, οδηγώντας σε προόδους σε αυτήν την τεχνολογία. Βέβαια, η ενότητα αυτή εστιάζει αποκλειστικά στα ορόσημα που σχετίζονται με μηχανισμούς και αλγόριθμους, παραλείποντας άλλα σημαντικά ορόσημα, όπως φωτογραφικές αναφορές για την κίνηση (Muybridge, 1957) [30] και συγκριτικές μελέτες στη ζωολογία και τη βιολογία [48, 3, 28].

Μηχανισμοί Βάρδισης

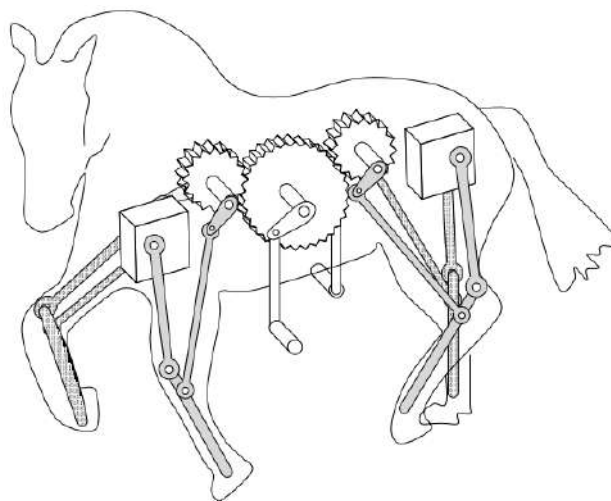
Ο Chebyshev δημιούργησε τον πρώτο μηχανισμό βάρδισης περίπου το 1870. Κατασκευάστηκε πάνω σε ένα σύστημα που είχε δημιουργήσει περίπου πριν είκοσι χρόνια. Αποτελούνταν από μια συσκευή τεσσάρων ράβδων, παρόμοια με αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 1.4 με τον μηχανισμό βάρδισης να είναι διατεταγμένος σε δύο ζεύγη (ετερόπλευρα, μη γειτονικά πόδια). Ως αποτέλεσμα, ένα διαγώνιο βάδισμα - το οποίο εναλλάσσει τις φάσεις στάσης και αιώρησης κάθε ζεύγους

ποδιών - μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτελέσει την κίνηση που ονομάζεται trotting (τριποδι-τό²). Η κίνηση αυτή βέβαια στερείται οποιουδήποτε είδους μηχανισμού προσαρμογής εδάφους ή ανεξάρτητης κίνησης του ποδιού που θα της επέτρεπε να στηρίζεται. Μια τέτοια κατασκευή μπορεί να περπατήσει (δυναμικά) μόνο σε τέλειο επίπεδο έδαφος. Έτσι, το τελευταίο τέταρτο του 20ου αιώνα, ο μηχανισμός Chebyshev ήταν μέρος δύο γνωστών μηχανών: του MELWALK (1985) και του Dante (1993) [25, 7].



Σχήμα 1.4: Επίπεδο σχέδιο του μηχανισμού του Chebyshev [20]

Ένας αριθμός εκπληκτικών κινούμενων αντικειμένων που στην πραγματικότητα δεν είναι μηχανισμοί βάδισης δημιουργήθηκαν προ του μηχανισμού του Chebyshev, για λόγους διασκέδασης όπως η μηχανική πάπια του Vaucanson (1738) και το Μηχανικό Άλογο, το οποίο κατατέθηκε στο Γραφείο Διπλωμάτων Ευρεσιτεχνίας των ΗΠΑ το 1893 από τον L. A. Rygg. που θεωρείται ως σημείο καμπής στην εξέλιξη των μηχανών βάδισης (βλ. Σχήμα 1.5). Το μηχανήμα κινούνταν



Σχήμα 1.5: Το μηχανικό άλογο κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον Rygg, 1893 [20]

από τα πεντάλ του αναβάτη, τα οποία κινούσαν τα πόδια του αλόγου μέσω της χρήσης μανιέ-

²εναλλαγή μεταξύ της φάσης στήριξης (stance) και μεταφοράς (swing).

λας και συνδέσμων. Υποστηρίζεται ιστορικά πως αυτό ήταν το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για ένα σύστημα ποδιών, παρόλο που δεν είναι σίγουρο αν κατασκευάστηκε πραγματικά. Αυτά είναι δύο από τα αμέτρητα εντυπωσιακά παραδείγματα της γοητείας των ανθρώπων με τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του πραγματικού κόσμου.

Αρκετά χρόνια αργότερα, τη 1940, μηχανικοί και ερευνητές βρήκαν νέες χρήσεις για τα ρομπότ με ικανότητα βάδισης. Οι πιθανότητες και οι ιδέες που παρουσιάζονται από την ιδέα βάδισης των ρομπότ τράβηξαν την προσοχή στρατιωτικών και ειδικών περί διαστήματος, οι οποίοι πρότειναν πολλές ενδιαφέρουσες χρήσεις της τεχνολογίας ως όπλα μαζικής καταστροφής και πλανητικής εξερεύνησης, πρωτίστως από το Ηνωμένο Βασίλειο και στην συνέχεια από τις ΗΠΑ.

Πιο συγκεκριμένα, στο Ηνωμένο Βασίλειο το 1940, έγινε μια σημαντική προσπάθεια να κατασκευαστεί ένα όχημα με πόδια που θα μπορούσε να κινείται αυτόνομα και να προσαρμόζεται σε διαφορετικούς τύπους εδάφους. Για εξαιρετικά ογκώδη οχήματα που ζυγίζουν έως και χίλιους τόνους, ο A.C. Hutchinson πίστευε ότι η βάδιση θα ήταν πιο αποτελεσματικό μέσο πρόωσης/ώθησης από τροχούς ή ράγες. Ο Hutchinson και ο F.S. Smith συνεργάστηκαν για τη δημιουργία συστημάτων με πόδια που μπορούσαν να διαχωρίσουν κάθετες και οριζόντιες κινήσεις, χρησιμοποιώντας μόνο δύο υδραυλικούς ενεργοποιητές για την οδήγηση του μηχανήματος. Στο τέλος, κατάφεραν να κατασκευάσουν ένα τετράποδο, ύψους 60 εκατοστών, με οκτώ αρθρώσεις που μπορούσαν να χειριστούν μέσω καλωδίων. Η κατασκευή αυτή φέρεται να αξιολογήθηκε για χρήση σε τεθωρακισμένα αυτοκίνητα, αλλά το Βρετανικό Υπουργείο Πολέμου δεν ενδιαφερόταν για τέτοιες εξελίξεις καθώς το Ηνωμένο Βασίλειο είχε εμπλακεί στον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο εκείνη την εποχή και συνεπώς η ανάπτυξη των μηχανών τέθηκε σε αναμονή (Todd, 1985)[46]. Ιστορικά, υποστηρίζεται πως αυτό ήταν το πρώτο τετραπλό ρομπότ που σχεδιάστηκε με χαρακτηριστικά προσαρμογής εδάφους.

Με χρηματοδότηση από τον αμερικανικό στρατό και τη NASA, σημαντική θεωρητική έρευνα διεξήχθη στις ΗΠΑ κατά τη διάρκεια των επόμενων 20 ετών. Η έρευνα αυτή οδήγησε στην ανάπτυξη του GE Walking Truck, ενός τετράποδου μήκους 3 μέτρων και βάρους 1400 κιλών όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.6. Ο αγώνας του χειριστή να συντονίσει και τις 12 υδραυλικές αρθρώσεις χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα τα πόδια και τα χέρια του ήταν ακρετα κουραστικός καθώς δεν μπορούσε να συντονιστεί και να ελέγξει το σύστημα για πάνω από 5 λεπτά. Αυτό ενέπνευσε περαιτέρω έρευνα και οδήγησε στη συνεργασία μεταξύ του R.McGhee από το Πανεπιστήμιο της Νότιας Καλιφόρνια και του R.Tomovic του Πανεπιστημίου του Βελιγραδίου στη θεωρία ελέγχου συστημάτων πεπερασμένων καταστάσεων (Finite-State Control)

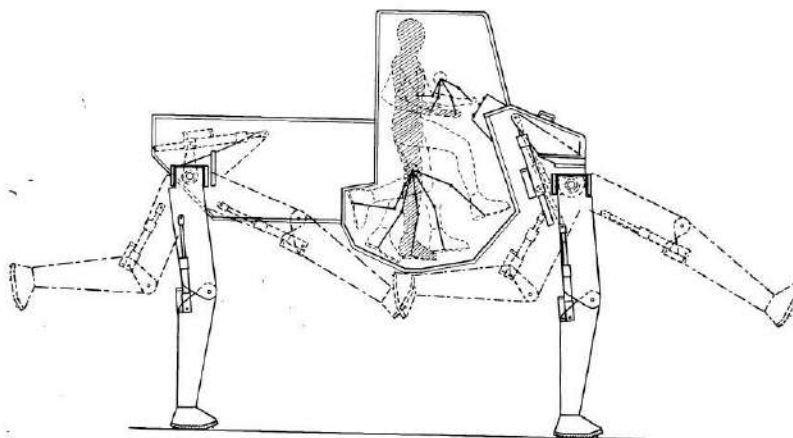
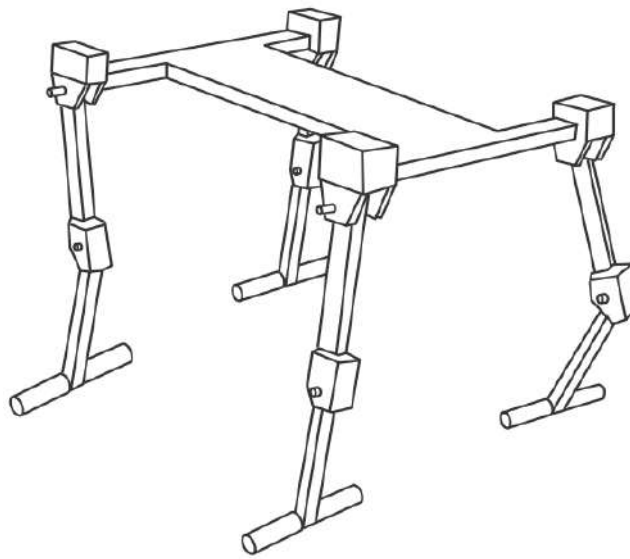


Figure 28 Quadruped Master Control and Operator Position

Σχήμα 1.6: Το τετράποδο φορτηγό [49]

Από το 1966 έως το 1969, η εταιρεία Bucyrus-Erie εργάστηκε για την κατασκευή του Big Muskie, το μεγαλύτερο μηχάνημα με πόδια που κατασκευάστηκε ποτέ. Ήταν ένα συρματόσχοινο 13500 τόνων σχεδιασμένο να λειτουργεί σε υπαίθρια ορυχεία. Το μηχάνημα είχε τέσσερα υδραυλικά κινούμενα πόδια που περιστρέφονταν γύρω από έναν σταθερό άξονα, επιτρέποντάς του να κινείται προς τα εμπρός ενώ το σώμα του μηχανήματος παρέμενε στο έδαφος. Όταν και τα τέσσερα πόδια ακουμπούσαν το έδαφος, το μηχάνημα μπορούσε να σηκωθεί και να κινηθεί προς τα εμπρός σε μια νέα θέση. Τα πόδια λειτουργούσαν σαν τροχός μιας ακτίνας και το μηχάνημα ήταν ικανό να φτάσει ταχύτητες $270(m/h)$.

Ο McGhee πραγματοποίησε περισσότερη έρευνα το 1966 και, σε συνεργασία με τον A. Frank, κατασκεύασαν το Phony Pony, ένα τετράποδο μεσαίου μεγέθους ($50kg$) (βλ. Σχήμα 1.7). Βασισμένο σε ένα σχέδιο δύο βαθμών ελευθερίας, κάθε σκέλος περιελάμβανε περιστροφικούς συνδέσμους που τροφοδοτούνταν από ηλεκτρικούς κινητήρες. Μια ανεστραμμένη κατασκευή σε



Σχήμα 1.7: Σκίτσο της κατασκευής Phony Pony [20]

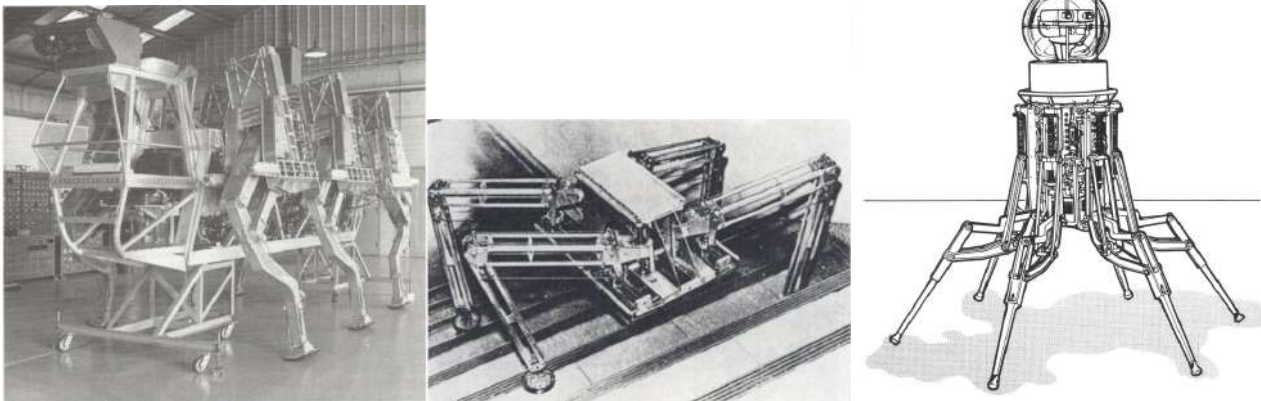
Σχήμα T που πρόσφερε σταθερότητα στο μετωπικό επίπεδο χρησίμευσε ως πρότυπο για τα πόδια. Σε κάθε άρθρωση εγκαταστάθηκαν πολυάριθμοι αισθητήρες για να προσδιορίσουν εάν ήταν κλειδωμένο, ή εάν είναι κινούμενο προς τα εμπρός ή πίσω. Επιπλέον, ανέπτυξαν μια μηχανή κατάστασης με έξι συγχρονισμένες καταστάσεις που χρησιμοποιούν αυτές τις τρεις διακριτές καταστάσεις και την λογική που βασίζεται σε flip-flop. Ανάλογα την επιλεγμένη κατάσταση, το ρομπότ ήταν δυνατό να εκτελέσει ακόμη και διαγώνιο trotting και μπουσουλήμα. Το Phony Pony ήταν ένα σημαντικό επίτευγμα που ενέπνευσε τον McGhee, να αναπτύξει νέες μηχανές. Δύο από αυτές είναι το εξάποδο OSU και το Adaptive Suspension Vehicle (ASV) τα οποία αργότερα έγιναν τα ίδια σημαντικά επιτεύγματα στην ιστορία των ρομπότ με δυνατότητα βάδισης.

Επειδή οι εξελίξεις στον χώρο της ρομποτικής πάνω στο κομμάτι αυτό ήταν αρκετές, ορίστε μια σύνοψη για τις υπόλοιπες χρονικές στιγμές :

- 1977 : Το εξάποδο OSU, το πρώτο ρομπότ περπατήματος που ελεγχόταν από υπολογιστή. Τα πόδια του βασιζόνταν σε τύπους ποδιών εντόμων με τρεις περιστροφικούς συνδέσμους που κινούνταν από ηλεκτρικούς κινητήρες. Το 1986, ο McGhee και ο Waldron κατασκεύασαν και δοκίμασαν το εξάποδο ASV, πιθανώς το μεγαλύτερο μηχάνημα βαδίσματος προσαρμοσμένο στο έδαφος που κατασκευάστηκε ποτέ.
- 1980 : το Pre-ambulate Vehicle (PV-II), που αναγνωρίστηκε ως σημαντικό βήμα στην ανάπτυξη ρομπότ με πόδια, αναπτύχθηκε από τον καθηγητή Hirose στο Ινστιτούτο Τεχνολο-

γίας του Τόκιο (TIT) στην Ιαπωνία.

- 1983: Η Odetics Incorporated κυκλοφόρησε το ODEX I, το πρώτο ρομπότ περπατήματος στο εμπόριο. Το πρώτο τετράποδο ικανό να περπατά με πλήρη δυναμική σταθερότητα αναπτύχθηκε από τον M.Raibert το 1986 στο Τεχνολογικό Ινστιτούτο της Μασαχουσέτης (MIT).



Σχήμα 1.8: Τα αναφερόμενα ρομπότ ASV , PV-II και ODEX-I αντίστοιχα [49]

Τα ρομπότ με πόδια πρέπει να περπατούν δυναμικά για να φτάσουν σε υψηλές ταχύτητες. Αν και αυτό είναι ένα κρίσιμο στοιχείο για την επίτευξη κινητικότητας, οι περισσότερες εργασίες που πρέπει να εκτελεί ένα ρομπότ με πόδια, όπως η επαφή με αντικείμενα, η συλλογή μετρήσεων κλπ., απαιτούν το ρομπότ να παραμένει ακίνητο ή να περπατά με πολύ αργό ρυθμό, καθιστώντας απαραίτητη τη χρήση σταθερού-στατικού βηματισμού (static-stable gait).

Από τις αρχές της δεκαετίας του 1990 σημειώθηκε μια σημαντική αύξηση στην παγκόσμια παραγωγή ρομπότ με δυνατότητα περπατήματος. Ο Berns(2005) σημειώνει ότι μια συλλογή με περισσότερα από 200 διαφορετικά ρομπότ έχουν ήδη δημιουργηθεί [12] με τα τετράποδα ρομπότ να αποτελούν περίπου το 20 τοις εκατό αυτών. Αυτό δείχνει ότι έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος προς την ανάπτυξη των ρομπότ με δυνατότητα βάδισης και αποδεικνύεται με την τρομερή παραγωγή τους μέχρι και σήμερα.

Οι νέες εξελίξεις στα τετράποδα ρομπότ

Η ιστορία της ρομποτικής με δυνατότητα βάδισης αποδεικνύει την αδιάκοπη πρόοδο στον τομέα των ρομπότ με πόδια, ξεκινώντας από τα πρωτοποριακά επιτεύγματα του 20ού αιώνα και φτάνοντας στις σύγχρονες καινοτομίες. Από το εξάποδο OSU του 1977, που παρουσίασε τη δυνατότητα υπολογιστικού ελέγχου, μέχρι τα τετράποδα ρομπότ που εξελίχθηκαν με εντυπωσιακή ταχύτητα, η ανάπτυξη αυτών των μηχανών έχει σημειώσει θεαματικά βήματα.

Στη σύγχρονη εποχή, η πρόοδος συνεχίζεται με τη δημιουργία νέων και εξελιγμένων τετράποδων ρομπότ που συνδυάζουν προηγμένες τεχνολογίες και καινοτόμες σχεδιαστικές λύσεις. Το Spot Mini της Boston Dynamics, το ANYmal της ANYbotics και τα Go1/Go2/A1 της Unitree Robotics αντιπροσωπεύουν τις πρόσφατες εξελίξεις σε αυτόν τον τομέα. Αυτά τα ρομπότ ενσωματώνουν χαρακτηριστικά που τους επιτρέπουν να εκτελούν σύνθετες εργασίες σε δύσβατα περιβάλλοντα με υψηλή ευελιξία και απόδοση.

Το Spot Mini, που παρουσιάστηκε το 2016, αποτελεί εξέλιξη του Spot της Boston Dynamics με βελτιωμένη φορητότητα και ευελιξία. Το ANYmal της ANYbotics, από την άλλη πλευρά,

αναπτύχθηκε από το ETH Zürich και είναι σχεδιασμένο για εφαρμογές σε απαιτητικά περιβάλλοντα, όπως βιομηχανικές εγκαταστάσεις και περιοχές έρευνας. Η Unitree Robotics εισήγαγε τη δική της σειρά τετράποδων ρομπότ με τα Go1, Go2 και A1, προσφέροντας προηγμένα χαρακτηριστικά σε χαμηλή τιμή, επισημαίνοντας τη συνεχόμενη εξέλιξη και διαφοροποίηση στο πεδίο της ρομποτικής.

Ακολουθεί μια ανασκόπηση αυτών των σύγχρονων τετράποδων ρομπότ, επιτυγχάνοντας επίπεδα κινητικότητας και λειτουργικότητας που επηρεάζουν σημαντικά τις εφαρμογές τους σε διάφορους τομείς.

- **Spot Mini (Boston Dynamics)**

Το Spot Mini είναι ένα από τα πιο γνωστά τετράποδα ρομπότ που αναπτύχθηκαν από την Boston Dynamics. Το Spot Mini παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 2016 και είναι μια μικρότερη, πιο ελαφριά έκδοση του αρχικού Spot. Το ρομπότ αυτό έχει σχεδιαστεί για να είναι ευέλικτο και ικανό να πραγματοποιεί διάφορες εργασίες, όπως η μεταφορά αντικειμένων και η παρακολούθηση περιβαλλόντων. Εξοπλισμένο με τέσσερα πόδια, το Spot Mini είναι ικανό να διασχίζει ανώμαλα εδάφη και να εκτελεί λειτουργίες σε στενούς χώρους. Το ρομπότ αυτό ενσωματώνει προηγμένα συστήματα αισθητήρων και τεχνολογίες ελέγχου που επιτρέπουν την αποδοτική πλοήγηση και την ακριβή εκτέλεση εργασιών. Το Spot Mini έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές, από την επιθεώρηση εγκαταστάσεων έως την υποστήριξη σε αποστολές έρευνας και διάσωσης. Ρομπότ με πόδια της ίδιας εταιρίας όπως το BigDog (2004), RiSe (2006) κα. είναι παραδείγματα εξέλιξης πάνω στον τομέα των πολύποδων ρομπότ.



Σχήμα 1.9: Το ρομπότ Spot Mini [47]

- **ANYmal (ANYbotics - ETH Zürich)**

Το ANYmal είναι ένα τετράποδο ρομπότ που αναπτύχθηκε από την ANYbotics, μια startup εταιρία που συνδέεται με το ETH Zürich. Το ANYmal παρουσιάστηκε το 2016 και είναι σχεδιασμένο να ενσωματώνει καινοτόμες τεχνολογίες για αυτονομία και ευελιξία. Το ρομπότ αυτό έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί σε δύσβατα και απαιτητικά περιβάλλοντα, όπως βιομηχανικές εγκαταστάσεις και πεδία ερευνών. Η ANYbotics επικεντρώνεται στην ανάπτυξη ρομπότ που μπορούν να λειτουργούν αυτόνομα και να εκτελούν σύνθετες εργασίες, όπως η επιθεώρηση και η ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Το ANYmal ενσωματώνει προηγμένα συστήματα ελέγχου και αισθητήρες επιτρέποντας τον εντοπισμό τυχών τοξικών αερίων, καταγραφή θερμικών μετρήσεων και πολλές ακόμη διεργασίες που εξασφαλίζουν ένα ασφαλές περιβάλλον για τους εργάτες της βιομηχανίας.

- **Go1/Go2/A1 (Unitree Robotics)**

Η Unitree Robotics είναι μια κινεζική εταιρεία που έχει αναπτύξει μια σειρά από τετράποδα ρομπότ, περιλαμβάνοντας τα μοντέλα Go1, Go2 και A1. Το Go1 παρουσιάστηκε το 2020 και αποτέλεσε το πρώτο προϊόν της εταιρείας στην κατηγορία των τετράποδων ρομπότ. Το Go2, το οποίο είναι η επόμενη γενιά, παρουσιάστηκε το 2021 και ενσωματώνει βελτιώσεις στον σχεδιασμό και τις δυνατότητες. Το A1, το οποίο κυκλοφόρησε το 2022, είναι το πιο προηγμένο

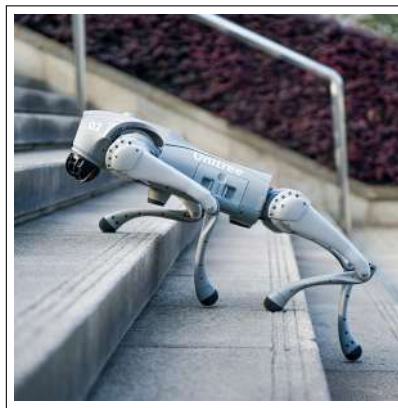


Σχήμα 1.10: Το ρομπότ ANYmal [5]

μοντέλο της σειράς και επικεντρώνεται στην προσφορά υψηλών επιδόσεων σε δύσβατα εδάφη και στην υποστήριξη πολύπλοκων εφαρμογών. Τα ρομπότ της Unitree Robotics είναι γνωστά για την προσιτή τιμή τους και την ικανότητά τους να παρέχουν προηγμένες δυνατότητες σε μια ευρεία γκάμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων των βιομηχανικών επιθεωρήσεων και των εφαρμογών έρευνας και διάσωσης.



(a) Το ρομπότ Go1



(b) Το ρομπότ Go2



(c) Το ρομπότ A1

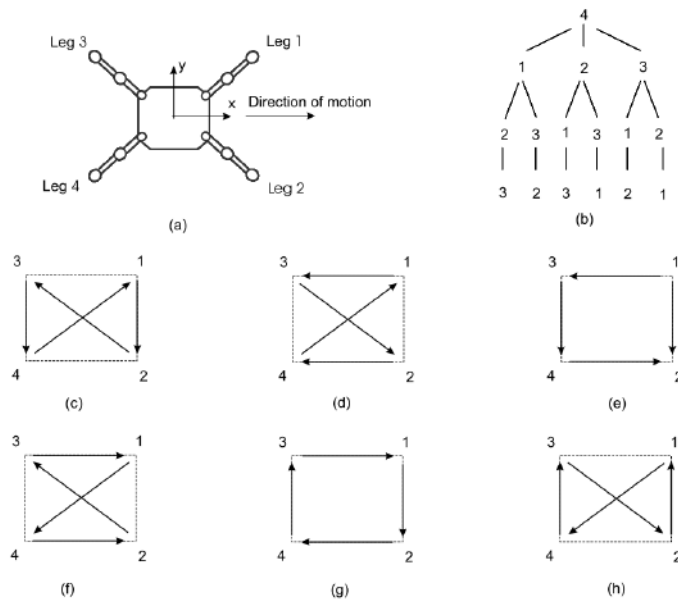
Σχήμα 1.11: Τα αναφερόμενα ρομπότ της Unitree Robotics [40, 6]

Σχεδιασμός Τροχιάς Βάδισης (Gait Design)

Μόλις αναπτυχθεί ένας μηχανισμός βάδισης, απαιτείται μια συντονισμένη ακολουθία κινήσεων ποδιών και σώματος, γνωστή ως «gait». Η μελέτη της βάδισης εστιάζει στη δημιουργία σταθερών βηματισμών για ρομπότ, ξεκινώντας από τα τετράποδα και επεκτεινόμενη σε πολύποδους μηχανισμούς.

Η πρώτη σημαντική συνεισφορά προήλθε από τον M. Hildebrand (1965), ο οποίος περιέγραψε και αξιολόγησε βηματισμούς τετράποδων ζώων. Η δουλειά του, αν και αρχικά αμφισβητή λόγω έλλειψης επιστημονικής βάσης, έθεσε τα θεμέλια για τις εξισώσεις βάδισης. Ο McGhee στη συνέχεια ενσωμάτωσε τις φάσεις βάδισης και τη μαθηματική περιγραφή των παραμέτρων αυτών και παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.12. Οι McGhee και Bessopon προχώρησαν περαιτέρω, παρουσιάζοντας τον «συνεχή βηματισμό» (continuous gait), γνωστό και ως "wave gait", που προσφέρει τη μεγαλύτερη σταθερότητα για τα τετράποδα. Ωστόσο, έπρεπε να γίνουν τροποποιήσεις για να λειτουργούν σε ανώμαλο έδαφος. Ο Orin (1982)[33] εξέτασε τους εξάποδους βηματισμούς με βάση τη γωνία του σώματος σε σχέση με την κατεύθυνση της κίνησης, ενώ οι Zhang και Song (1990)[50] ανέπτυξαν τον τετράποδο "crab-wave gait" βηματισμό που επέτρεψε κίνηση προς οποιαδήποτε κατεύθυνση.

Η κίνηση σε ανώμαλο έδαφος απαιτεί τροποποιημένους αλγόριθμους βάδισης. Μία προσέγγιση ήταν η χρήση αισθητήρων για την προσαρμογή των παραμέτρων βάδισης, ενώ άλλες βασίζονται σε προκαθορισμένα μοτίβα. Οι ασυνεχείς βηματισμοί (discontinuous gaits) προσφέρουν



Σχήμα 1.12: Τετράποδοι βηματισμοί: (a) κάτοψη ενός ρομπότ, (b) γράφημα ακολουθίας ποδιών, (c) έως (h) ακολουθίες [20]

αυξημένη ευστάθεια και ταχύτητα, ιδιαίτερα σε δύσκολα εδάφη.

Ένα από τα κύρια προβλήματα για τετράποδα ρομπότ είναι το trajectory tracking, δηλαδή η παρακολούθηση της τροχιάς. Τα τετράποδα δυσκολεύονται να προσαρμοστούν σε συνεχείς βηματισμούς κατά την αλλαγή κατεύθυνσης, σε αντίθεση με τα εξάποδα που μπορούν να διατηρούν σταθερή πορεία με μισό duty factor.

Αυτοί οι περιορισμοί οδήγησαν στην ανάπτυξη μη περιοδικών ή ελεύθερων βηματισμών (free gaits), που επιτρέπουν προσαρμογές σε πραγματικό χρόνο. Παρόλο που οι πρώτες προσεγγίσεις αυτών των βηματισμών είχαν περιορισμένη επιτυχία, προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα στην ευελιξία κίνησης.

1.3 Τα υπέρ και τα κατά των ρομπότ με δυνατότητα βάδισης

1.3.1 Πλεονεκτήματα

Πέρα από τον στόχο του σχεδιασμού μηχανών για την αναπαραγωγή της φυσικής κίνησης, ορισμένοι ερευνητές αναγνώρισαν τα πιθανά οφέλη των ρομπότ με πόδια σε σύγκριση με τα συνηθισμένα τροχοφόρα οχήματα. Τα πλεονεκτήματα περιγράφονται ελαφρώς παρακάτω.

Κινητικότητα

Λόγω της εγγενούς πανκατευθυντικής φύσης τους, τα ρομπότ με πόδια είναι πιο κινητά από τα τροχοφόρα. Δηλαδή, απλώς προσαρμόζοντας τα πατήματά του, ένα ρομπότ με πόδια μπορεί να αλλάξει κατεύθυνση χωρίς να βασίζεται στον προσανατολισμό του κύριου άξονα του σώματος του. Αντίθετα, ένα ρομπότ με τροχούς θα πρέπει να κάνει κάποιους ελιγμούς για να αλλάξει την πορεία του. Παρομοίως, ένα ρομπότ με πόδια μπορεί να αλλάξει την προέκταση του ποδιού του για να κινηθεί και να προσανατολίσει το σώμα του ενώ διατηρεί τα υπόλοιπα πόδια του σταθερά. Αν και εις βάρος της αυξανόμενης πολυπλοκότητας του συστήματος, είναι αξιοσημείωτο ότι ένα ρομπότ με τροχούς και κατευθυντικούς κινητήρες μπορεί να αυξήσει σημαντικά την κατευθυντικότητά του. Άλλα ρομπότ έχουν μοναδικούς τροχούς που τους επιτρέπουν να κινούνται προς

οποιαδήποτε κατεύθυνση, όπως ο τροχός Ponator[23]. Ωστόσο, αυτοί οι τροχοί περιορίζονται από συγκεκριμένου τύπου επιφανειών.

Διαχείριση εμποδίων

Ένας ρομποτικός μηχανισμός με πόδια μπορεί να υπερβεί εμπόδια που βρίσκονται σε χαμηλότερο επίπεδο από το μέγιστο ύψος εδάφους, απλώς πατώντας πάνω τους. Από την άλλη πλευρά, ένα ρομπότ με τροχούς μπορεί να υπερβεί μόνο εμπόδια με ύψος έως το μισό της ακτίνας του τροχού του (McKerrow, 1991)[27]. Οι ερπύστριες λειτουργούν ως εικονικός τροχός με ακτίνα ίση με το μισό μήκος της ερπύστριας, επιτρέποντας έτσι σε ένα όχημα με ερπύστριες να υπερβαίνει υψηλότερα εμπόδια, αλλά με τη χρήση έντονων κινήσεων του σώματος.

Προσαρμοστική Κίνηση με Ενεργή Ανάρτηση

Ένας ρομποτικός μηχανισμός με πόδια προσφέρει ενσωματωμένη ενεργή ανάρτηση προσαρμόζοντας το μήκος των ποδιών του στις ανωμαλίες του εδάφους. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να καλύψει οποιοδήποτε είδος εδάφους διατηρώντας το σώμα του επίπεδο (body level). Ως εκ τούτου, τα συστήματα με πόδια προσφέρουν ομαλή και άνετη κίνηση, σε αντίθεση με το σώμα ενός ρομπότ με τροχούς που παραμένει πάντα παράλληλο με το έδαφος.

Ενεργειακή Απόδοση

Ο Hutchinson πρότεινε το 1940 ότι η αποδοτικότητα πολύ βαρέων οχημάτων με πόδια θα μπορούσε να είναι καλύτερη από εκείνη των οχημάτων με τροχούς. Αργότερα, ο Bekker (1960)[11] απέδειξε μέσω πειραμάτων ότι ο Hutchinson είχε δίκιο, επιβεβαιώνοντας πως τα συστήματα με πόδια είναι πιο αποδοτικά από τα συστήματα με τροχούς ή ερπύστριες υπό πολύ ανώμαλες συνθήκες εδάφους.

Φυσικό (Μη-συνεχές) Έδαφος

Τα οχήματα με τροχούς χρειάζονται ακριβές, συνεχόμενα ασφαλιστρομενές επιφάνειες για να κινηθούν αποτελεσματικά. Αντίθετα, τα συστήματα με πόδια δεν απαιτούν κάποια τέτοιου είδους προετοιμασία και μπορούν να κινούνται σε αμμώδη, λασπώδη, σκληρά και μαλακά εδάφη με παρόμοια αποδοτικότητα. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα των συστημάτων με πόδια είναι ότι δεν χρειάζονται απαραίτητα συνεχές έδαφος για να κινηθούν.

Ολίσθηση και Μπλέξιμο

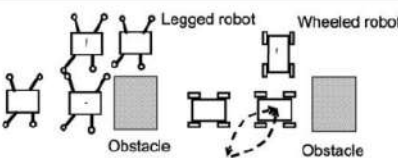
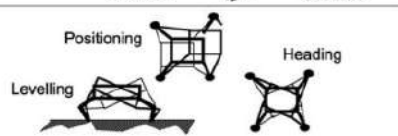
Οι τροχοί τείνουν να βυθίζονται σε μαλακό έδαφος, καθιστώντας δύσκολη την κίνησή τους. Ωστόσο, όταν ένα πόδι τοποθετείται κάθετα στο έδαφος, συμπιέζει το μαλακό έδαφος στην ίδια κατεύθυνση χωρίς να το διαταράσσει. Η ανύψωση του ποδιού γίνεται κάθετα, χωρίς να επηρεάζεται το έδαφος. Όταν το σώμα προωθείται, τα πόδια περιστρέφονται γύρω από τις αρθρώσεις τους, οπότε δεν έρχονται σε επαφή με το έδαφος και δεν προκαλούν προβλήματα εμπλοκής. Το ίδιο ισχύει και για την αποφυγή ολίσθησης του οχήματος κατά την προώθηση προς τα εμπρός ή προς τα πίσω.

Περιβαλλοντική Ζημιά

Τα οχήματα με τροχούς διαγράφουν συνεχείς διαδρομές κατά μήκος του εδάφους, ενώ τα οχήματα με πόδια χρησιμοποιούν διακριτά σημεία επαφής με τη γη για την κίνησή τους. Ως εκ τούτου, τα ρομπότ με πόδια προκαλούν λιγότερη περιβαλλοντική βλάβη επειδή έρχονται σε λιγότερη επαφή με το έδαφος από τα τροχοφόρα οχήματα.

Μέση Ταχύτητα

Σε προετοιμασμένες επιφάνειες, τα παραδοσιακά οχήματα μπορούν να ταξιδέψουν με υψηλές ταχύτητες. Ωστόσο, η μέση ταχύτητα του οχήματος είναι αρκετά πιο χαμηλή σε ανώμαλο έδαφος. Τα συστήματα με πόδια, όπως για παράδειγμα τα θηλαστικά, είναι μπορούν να προσαρμοστούν αρκετά καλά στις ανωμαλίες του εδάφους και μπορούν να διατηρήσουν παρόμοιες μέσες ταχύτητες σε ένα ευρύ φάσμα τύπων εδάφους, με την έρευνα του Bekker να επικυρώνει το γεγονός αυτό.

Mobility	
	
Obstacle surmounting	
Active suspension	
Natural terrain (non-continuous terrain)	
Slippage and jamming	
Environmental damage	
Average speed	

Σχήμα 1.13: Πλεονεκτήματα των ρομπότ με πόδια έναντι των τροχοφόρων ρομπότ [38]

1.3.2 Μειονεκτήματα

Φυσικά, τα μηχανήματα με πόδια δεν αποτελούν την καθολική λύση για την κίνηση· έχουν επίσης προβλήματα και μειονεκτήματα που τα έχουν αποτρέψει από το να χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία και τις υπηρεσίες. Το πρώτο πρόβλημα είναι η πολυπλοκότητά τους. Τα οχήματα με πόδια είναι πιο περίπλοκα από τα οχήματα με τροχούς, όχι μόνο από άποψη μηχανής, αλλά και από άποψη ηλεκτρονικών και ελέγχου. Ένα άλλο πρόβλημα με τα ρομπότ με πόδια είναι η ταχύτητά τους. Τα στατικά σταθερά ρομπότ με πόδια είναι εγγενώς πολύ αργά μηχανήματα. Τα δυναμικά σταθερά ρομπότ βρίσκονται ακόμη στα πρώτα στάδια ανάπτυξης και δεν φαίνεται να κινούνται τόσο γρήγορα όσο τα ρομπότ με τροχούς. Το συνολικό κόστος είναι ένας άλλος σημαντικός παράγοντας. Τα μειονεκτήματα αυτά αναλύονται περαιτέρω παρακάτω.

Μηχανισμός

Ένας τροχός είναι ένας εξαιρετικά απλός μηχανισμός, αποτελούμενος από έναν δίσκο με έναν περιστροφικό σύνδεσμο. Αντίθετα, ένα πόδι αποτελείται από πολλούς συνδέσμους και αρθρώ-

σεις (περιστροφικές ή πρισματικές), γεγονός που το καθιστά σαφώς πιο πολύπλοκο από έναν απλό τροχό. Ένας τροχός χρειάζεται μόνο έναν ενεργοποιητή για την κίνηση και έναν άλλο για την κατεύθυνση. Το πιο απλό στατικά σταθερό όχημα με τροχούς είναι το τρίκυκλο, το οποίο χρησιμοποιεί έναν τροχό για την κίνηση και την κατεύθυνση (με δύο ενεργοποιητές) και δύο παθητικούς τροχούς. Άλλες διατάξεις με τροχούς, όπως το διαφορικό σύστημα ή το σύγχρονο αυτοεξισορροπούμενο δίτροχο όχημα (Tirmant et al. 2002)[45], απαιτούν επίσης μόνο λίγους ενεργοποιητές. Τα πιο πολύπλοκα συστήματα με τροχούς διαθέτουν τέσσερις τροχούς με ανεξάρτητη κίνηση και ενεργοποιητές κατεύθυνσης – συνολικά οκτώ. Από την άλλη πλευρά, ένα πόδι χρειάζεται τουλάχιστον τρεις βαθμούς ελευθερίας, που σημαίνει ότι απαιτούνται τρεις ενεργοποιητές για την κίνηση και την κατεύθυνση. Για ένα στατικά σταθερό ρομπότ απαιτούνται τουλάχιστον τέσσερα πόδια, πράγμα που σημαίνει ότι ένας ρομποτικός μηχανισμός με πόδια χρειάζεται τουλάχιστον 12 ενεργοποιητές. Επομένως, το ηλεκτρομηχανικό σύστημα ενός ρομποτικού μηχανισμού με πόδια είναι πιο περίπλοκο σε σύγκριση με αυτό ενός οχήματος με τροχούς.

Ηλεκτρονικό Σύστημα

Κάθε ενεργοποιητής σε ένα ρομπότ απαιτεί έναν αντίστοιχο οδηγό ισχύος, πράγμα που σημαίνει ότι τα ρομπότ με πόδια χρειάζονται περισσότερα ηλεκτρονικά συστήματα από τα ρομπότ με τροχούς. Επιπλέον, ο έλεγχος των αρθρώσεων ενός ρομπότ με πόδια απαιτεί αισθητήρες, οδηγώντας σε μεγαλύτερο αριθμό αισθητήρων σε σύγκριση με τα παραδοσιακά οχήματα, καθώς και σε άλλα προβλήματα. Σε αντίθεση με τους τροχούς, που βρίσκονται συνεχώς σε επαφή με το έδαφος, τα πόδια εναλλάσσονται μεταξύ των φάσεων στήριξης και αιώρησης, απαιτώντας αισθητήρες για να ανιχνεύουν πότε το πόδι βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος. Η προσθήκη ενός αισθητήρα αφής ή ενός παρόμοιου τύπου αισθητήρα για το κάθε πόδι αυξάνει τον συνολικό αριθμό των αισθητήρων και ηλεκτρονικών που απαιτούνται για την επεξεργασία των δεδομένων των αισθητήρων. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των ρομπότ με πόδια είναι πιο πολύπλοκοι από εκείνους που χρησιμοποιούνται για τη μετακίνηση ρομπότ με τροχούς αν και δεν επιφέρουν σημαντικό υπολογιστικό βάρος, καθώς οι απαιτήσεις υπολογιστικής ισχύος για τα ρομπότ με πόδια δεν είναι ιδιαίτερα διαφορετικές από αυτές των ρομπότ με τροχούς και οι υπολογιστές που χρησιμοποιούνται και για τους δύο τύπους είναι αρκετά παρόμοιοι.

Αλγόριθμοι Ελέγχου

Το μόνο που χρειάζεται για τον οδηγό ή το τιμόνι ενός τροχοφόρου ρομπότ είναι ένα σήμα από τον ελεγκτή. Συνήθως, αυτή η τάση είναι ανάλογη με την απαραίτητη γωνία διεύθυνσης ή ταχύτητα. Ωστόσο, για να καταφέρει ένα τετράποδο ρομπότ σταθερή κίνηση, πρέπει να συντονίζει ταυτόχρονα τη δράση και των δώδεκα αρθρώσεων και των αισθητήρων του ποδιού του, κάνοντας τους αλγόριθμους ελέγχου ρομπότ με πόδια πιο περίπλοκους από αυτούς των τροχοφόρων ρομπότ.

Εφικτή ταχύτητα

Έχουμε ήδη αναφέρει ότι ένα ρομπότ με πόδια μπορεί να επιτύχει μεγαλύτερες ταχύτητες από ένα ρομπότ με τροχούς σε εξαιρετικά ανώμαλο έδαφος. Ωστόσο, σε προετοιμασμένες επιφάνειες όπως δρόμοι, οδοί και δάπεδα εργοστασίων, τα οχήματα με τροχούς είναι σαφώς ταχύτερα. Για παράδειγμα, ταχύτατα ζώα όπως τα άλογα μπορούν να φτάσουν ταχύτητες από 60 έως 80 χλμ/ώρα, ενώ τα οχήματα με τροχούς μπορούν να φτάσουν αγωνιστικές ταχύτητες έως και 350 χλμ/ώρα. Τα ρομπότ με πόδια δεν μπορούν να ανταγωνιστούν αυτά τα ζώα και τα οχήματα και δεν αναμένεται ότι θα μπορέσουν να το κάνουν στο μέλλον.

Κόστος

Το συνολικό κόστος ενός συστήματος αυξάνεται όσο αυξάνεται η πολυπλοκότητά του και περιλαμβάνει στοιχεία όπως αισθητήρες, ηλεκτρονικά, μηχανική δομή και άλλα. Ένα ρομπότ με πόδια είναι επομένως πιο ακριβό από ένα ρομπότ με τροχούς.

Συμπερασματικά, δεν αναμένεται ότι οι ρομποτικές κατασκευές με πόδια θα αντικαταστήσουν πλήρως τα παραδοσιακά οχήματα σε καλά προετοιμασμένες επιφάνειες. Η χρήση τους είναι πιο κατάλληλη σε καταστάσεις όπου προσφέρουν σαφή πλεονεκτήματα σε σχέση με τα παραδοσιακά οχήματα, όπως σε φυσικά τοπία, ανώμαλες επιφάνειες, εξειδικευμένες γεωμετρικές δομές και σκάλες. Διάφορες πιθανές εφαρμογές για ρομπότ με πόδια θα περιγράφουν στην παρακάτω επόμενη ενότητα, αναδεικνύοντας πλεονεκτήματά τους.

1.4 Πρακτικές εφαρμογές για ρομπότ με δυνατότητα βάδισης

Οι πιθανές εφαρμογές των ρομπότ βάδισης καθορίζονται από το πόσο καλά μπορεί να εκτελεστεί μια δεδομένη εργασία σε σύγκριση με τα τροχοφόρα οχήματα. Επομένως, υπάρχουν ορισμένα πλεονεκτήματα από την ανάπτυξη ρομπότ με πόδια πάνω σε παραδοσιακές εφαρμογές των οχημάτων, όπως στρατιωτικές επιχειρήσεις, δασοκομικές και γεωργικές εργασίες, κατασκευαστικές δραστηριότητες, υποδρύχια και διαστημική εξερεύνηση, επιθεώρηση δύσκολων ή επικίνδυνων σεναρίων και πολιτικά έργα. Ωστόσο, τα ρομπότ με πόδια είναι επίσης μια ιδανική πειραματική πλατφόρμα για τη δοκιμή μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης (AI) και την έρευνα της συμπεριφοράς πραγματικών ζώων. Τελευταία αλλά εξίσου σημαντική εφαρμογή, είναι οι ανθρωπιστικές προσπάθειες όπως η εξουδετέρωση βομβών και η εκκαθάριση ναρκών. Παρακάτω περιγράφονται οι εφαρμογές αυτές με ελάχιστα παραπάνω λεπτομέρια.

Στρατιωτικές Απαιτήσεις

Τα ρομπότ που απαιτούνται για στρατιωτικές μεταφορικές επιχειρήσεις πρέπει να είναι εξαιρετικά αποτελεσματικά σε ένα ευρύ φάσμα επιφανειών/εδάφους όπως ανώμαλων, πλακόστρωτων, λασπωμένων, επικλινών και αμμωδών. Εμπόδια όπως χαντάκια και αντιαρματικά εμπόδια χρειάζεται να είναι σίγουρα ευκολοδιαβατά. Επομένως τα ρομπότ με πόδια είναι αυτά που μπορούν θεωρητικά να περπατούν σε τέτοιου είδους εδάφη και εμπόδια, όπως έχει προαναφερθεί. Στην πραγματικότητα, έχουν ήδη γίνει προσπάθειες για την κατασκευή ρομπότ με πόδια με την υποστήριξη στρατιωτικών οργάνωσεων. Το ASV, το οποίο χρηματοδοτείται εξ ολοκλήρου από την Υπηρεσία Προηγμένων Ερευνητικών Προγραμμάτων της Άμυνας (DARPA), το Iron Mule Train, το οποίο χρηματοδοτείται από τον Στρατό των ΗΠΑ, και το πρωτότυπο που δημιουργήθηκε από τον Hutchinson και υποστηρίζεται από το Βρετανικό Υπουργείο Πολέμου είναι μερικά από τα χαρακτηριστικά παραδείγματα.

Επιθεώρηση Πυρηνικών Σταθμών

Η λειτουργία και η επιθεώρηση εγκαταστάσεων πυρηνικής ενέργειας είναι μια άλλη πιθανή εφαρμογή για τα ρομπότ βάδισης. Τα ρομπότ αυτά μπορούν εύκολα να πλοηγηθούν σε περιοχές πυρηνικών εγκαταστάσεων που δεν είναι κατάλληλες για τροχοφόρα ρομπότ, όπως περιοχές με σωλήνες στο πάτωμα, σκάλες κ.λπ. Η Odetics Inc., όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, δημιούργησε μια βιομηχανική έκδοση του ρομπότ με πόδια, το ODEX I, ειδικά για χρήση σε αυτήν τη ρύθμιση (Byrd and DeVries, 1990)[15]. Μάλιστα για την διερεύνηση πιθανών εφαρμογών αυτών των οχημάτων σε πυρηνικά περιβάλλοντα, μια ισπανική επιχείρηση κατασκεύασε το τετράποδο ρομπότ RIMHO το 1990. Τέλος, μια άλλη προσπάθεια δημιουργίας ενός ρομπότ με έξι πόδια για χρήση σε πυρηνικά περιβάλλοντα στην Ευρώπη είναι το ρομπότ Sherpa (Γαλλική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας) (Berns, 2005)[12].

Εξερεύνηση ξηράς, υποδρύχιας περιοχής και πλανητών

Η ικανότητα προσαρμογής των ρομπότ με πόδια πάνω σε διάφορα εδάφη τα καθιστά τέλεια για χερσαίες, υποδρύχιας, ακόμη και πλανητικές εξερευνήσεις. Αρκετά ρομπότ έχουν ήδη αναπτυχθεί και δοκιμαστεί ειδικά για αυτούς τους σκοπούς. Σε αυτά περιλαμβάνονται το ρομπότ AMBLER, το οποίο δημιουργήθηκε από το Πανεπιστήμιο Carnegie-Mellon με χρηματοδότηση από τη NASA και χρησίμευσε ως πειραματική βάση δοκιμών για την ανάπτυξη της τεχνολογίας που απαιτείται για μια υποθετική αποστολή στον Άρη (Bares και Whittaker, 1989, 1993)[8, 9], το Dante II, το οποίο δημιουργήθηκε από την ίδια ερευνητική ομάδα και χρηματοδοτήθηκε από τον ίδιο οργανισμό, και το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή επιθεωρήσεων μέσα στον κρατήρα του ηφαιστείου Mount Spur στην Αλάσκα (Bares και Wettergreen, 1999)[7] και το ρομπότ Aquarobot, το οποίο κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Ρομποτικής του Ερευνητικού Ινστιτούτου του λιμένα στην Ιαπωνία και χρησιμοποιείται για υποδρύχια τοπογραφία θαλάσσιων τοιχωμάτων (Akizono et al., 1989)[2]. Αξίζει να σημειωθεί ότι περισσότερο από το ήμισυ της επικράτειας του κόσμου δεν μπορεί να διερευνηθεί με παραδοσιακά οχήματα (Bihari, 1989)[13], γεγονός που καθιστά αναγκαία τη χρήση τέτοιου είδους ρομπότ.

Δασικές και Αγροτικές Εργασίες

Στο δάσος, όπου απαιτείται η μεταφορά μηχανημάτων τα ρομπότ που περπατούν μπορεί να είναι αρκετά χρήσιμα. Συνήθως, τα δάση είναι γεμάτα με λόφους και διάφορες κλίσεις εδάδους, επομένως η ικανότητα ενός ρομπότ με πόδια να κρατά το σώμα του σε σταθερό επίπεδο το βοηθά στο να βρίσκεται στον χώρο αυτο εφόσον τα περισσότερα τροχοφόρα ρομπότ είναι επιρρεπή να κυλιούνται σε αυτό το είδος εδάφους επειδή δεν έχουν αυτή την ικανότητα.

Βοήθεια σε άτομα με ειδικές ανάγκες

Αναπηρικά "καροτσάκια" με πόδια αντί για ρόδες θα βελτίωναν τη ζωή των ατόμων με αναπηρία. Παρά τη ευρεία υποστήριξη του κοινού για την άρση των εμποδίων για τα άτομα με αναπηρία, το ανώμαλο τοπίο των αγροτικών περιοχών και των κτιρίων με σκάλες παρουσιάζουν σημαντικές προκλήσεις. Τα άτομα με ειδικές ανάγκες θα μπορούσαν να μετακινηθούν πάνω από αυτά τα εμπόδια από ρομπότ με πόδια. Ωστόσο, θέματα συζήτησης όπως η διασφάλιση της ασφάλειας του χρήστη, το κόστος και η συντήρησή της ίδιας της κατασκευής, είναι προβληματισμοί που θα προκύψουν κατά την συζήτηση ερευνητών και πολιτικών.

Υποστήριξη πάνω σε τεχνικές AI

Τα ρομπότ χειριστικότητας (robot-manipulators) αποτέλεσαν αντικείμενο εκτεταμένων δοκιμών τεχνητής νοημοσύνης (AI) πριν από μερικά χρόνια, αλλά τα κινητά ρομπότ έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην πρόοδο αυτών των μεθόδων. Σύμφωνα με ορισμένους ειδικούς, η κινητικότητα παράγει μια είδους νοημοσύνη (Moravec, 1988)[29]. Η κινητικότητα μας δίνει τη δυνατότητα να παίρνουμε αποφάσεις και να μαθαίνουμε. Τα κύρια προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα ρομπότ με πόδια, είναι η δημιουργία gait. Ως εκ τούτου, τα ρομπότ με πόδια έχουν χρησιμοποιηθεί από πολλούς ερευνητές τεχνητής νοημοσύνης για να δοκιμάσουν τις υποθέσεις και τις τεχνικές τους.

Μελέτη έμβιων πλασμάτων

Ζωολόγοι και βιολόγοι έχουν κάνει πολλή έρευνα για να μάθουν περισσότερα για τις βιολογικές πτυχές του περπατήματος τα τελευταία 20 χρόνια. Σύμφωνα με ορισμένες μελέτες, ο καθορισμός μιας σειράς σταθερών κινήσεων απαιτεί μόνο μερικά βασικά κριτήρια (Cruse, 1998)[17]. Επιπλέον, έχουν δημιουργηθεί μερικά ρομπότ, όπως το Tarry (Frik et al., 1999)[19] και το TUM (Pfeiffer and Weidemann, 1991)[36], των οποίων τα πόδια μοιάζουν με τη δομή των ποδιών Phasmatodea.

Επιπλέον, υπάρχουν μερικά ρομπότ που προσπαθούν να μιμηθούν εξαφανισμένα πλάσματα και αυτο είναι πλέον αρκετά σημαντικό τόσο για ψυχαγωγικούς όσο και για εκπαιδευτικούς σκοπούς. Μερικά παραδείγματα είναι το νέο dino-ρομπότ που ονομάστηκε Butch, το οποίο μοιάζει με protoceratops (Butch, 2005)[14] και το ρομπότ που κατασκευάστηκε στο έργο PALAIOMATION, που χρηματοδοτήθηκε από το ECC το 1994, το οποίο αναπαρήγαγε τις κινήσεις ενός ιγκουανόδοντα, βέβαια σε μικρότερη κλίμακα.

Ανθρωπιστική Εκκαθάριση Ναρκών

Ο εντοπισμός και η εκκαθάριση ναρκών αποτελούν μείζονες παγκόσμιες ανησυχίες. Ακόμη και στην απίθανη περίπτωση επανατοποθέτησης ναρκών ξηράς στο μέλλον, η αποναρκοθέτηση θα απαιτήσει αρκετές ακόμη δεκαετίες λόγω του τεράστιου όγκου ναρκών που έχουν τοποθετηθεί τα τελευταία 20 χρόνια. Μόνο με τη χρήση σύγχρονης τεχνολογίας, όπως βελτιωμένοι αισθητήρες, αποτελεσματικοί χειριστές και κινητά ρομπότ, μπορεί να επιτευχθεί επαρκής ρυθμός εκκαθάρισης ναρκών. Τα τελευταία δέκα περίπου χρόνια, έχει γίνει έρευνα και ανάπτυξη της ιδέας της χρήσης μηχανικών ποδιών για την αποναρκοθέτηση ανθρωπιστικής βοήθειας. με ορισμένα πρωτότυπα να έχουν ήδη υποβληθεί σε δοκιμές. Ένα από τα πρώτα ρομπότ με δυνατότητα βάδισης που σχεδιάστηκαν για καθήκοντα αποναρκοθέτησης ήταν το TITAN VIII, που δημιουργήθηκε στο TIT (Hirose and Kato, 1998)[21]. Δύο ακόμη παραδείγματα ρομπότ που δοκιμάστηκαν για ανθρωπιστικές δραστηριότητες αποναρκοθέτησης είναι το AMRU-2, ένα ηλεκτρο-πνευματικό εξάποδο που παράγεται από το Ελεύθερο Πανεπιστήμιο των Βρυξελλών και τη Βασιλική Στρατιωτική Ακαδημία του Βελγίου (Baudoin et al., 1999)[10] και το RIMHO2, που αναπτύχθηκε στο IAI-CSIC. Πιθανώς το πρώτο ρομπότ με πόδια που σχεδιάστηκε με γνώμονα τις δραστηριότητες αποναρκοθέτησης ήταν το COMET-1. Μια ιαπωνική συνεργασία δημιούργησε το ρομπότ με έξι πόδια, το οποίο έχει πολλούς αισθητήρες και συστήματα εντοπισμού ενσωματωμένα σε αυτό (Nonami et al., 2000)[31].

1.5 Περιληπτική Ανασκόπηση της Φυσικής Αλληλεπίδρασης Ανθρώπου - Ρομπότ (pHRI)

Η φυσική αλληλεπίδραση ανθρώπου-ρομπότ (pHRI:physical Human-Robot-Interaction) αποτελεί ένα πεδίο που γνώρισε ραγδαία ανάπτυξη από τα μέσα του 20ου αιώνα μέχρι σήμερα. Όπως έχει προαναφερθεί στην Ενότητα 1.1, παρόλο που τα πρώτα ρομπότ σχεδιάστηκαν για απομόνωση από τον άνθρωπο, η εξέλιξη των αναγκών στη βιομηχανία και την καθημερινότητα οδήγησε στην ανάπτυξη μεθόδων και αλγορίθμων που επιτρέπουν τη συνεργασία ρομπότ και ανθρώπων, όχι μόνο σε επίπεδο απομακρυσμένου ελέγχου, αλλά και σε επίπεδο φυσικής αλληλεπίδρασης [22].

Η pHRI περιλαμβάνει την άμεση φυσική επαφή του ανθρώπου με το ρομπότ, αλλά και την έμμεση επαφή μέσω αντικειμένων, όπως στη συνεργατική μεταφορά φορτίων (co-manipulation). Η πλούσια έρευνα στον τομέα αυτόν έχει επικεντρωθεί στην κατανόηση της δυναμικής της φυσικής αλληλεπίδρασης, στην εξασφάλιση της ασφάλειας του ανθρώπου, αλλά και στην αύξηση της αποδοτικότητας της συνεργασίας. Η φυσική αλληλεπίδραση, δεν είναι μόνο ένα μέσο βελτίωσης της αποτελεσματικότητας της εργασίας, αλλά επίσης βασικό στοιχείο για την ενίσχυση της ανθρώπινης-ρομποτικής συνεργασίας, ανοίγοντας νέους ορίζοντες για μελλοντικές εφαρμογές [1]. Η πρωτοποριακή εισαγωγή του ελέγχου εμπέδησης από τον Hogan την δεκαετία του 1980 αποτελεί σημείο καμπής, προσφέροντας έναν μηχανισμό προσαρμογής (adaptation) της νοητής αντίστασης ενός ρομπότ κατά την αλληλεπίδρασή του με το περιβάλλον [22]. Αυτό το μοντέλο ενσωμάτωσε την έννοια της συμμόρφωσης (compliance), επιτρέποντας στα ρομπότ να προσαρμόζονται τη δυναμική τους συμπεριφορά όταν έρχονται σε επαφή με ανθρώπους, μειώνοντας τις πιθανότητες τραυματισμού.

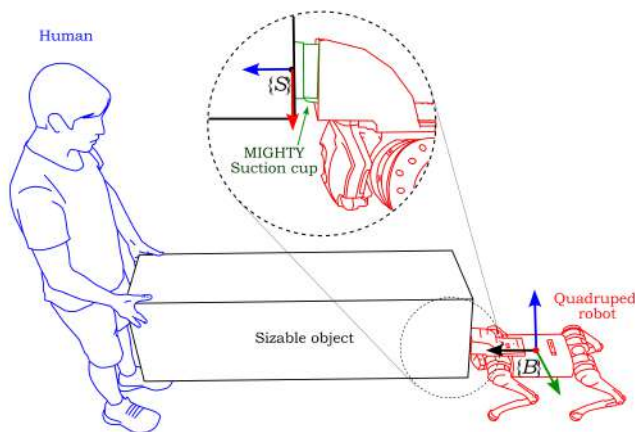
Από τη δεκαετία του 1990 και μετά, η έρευνα αυτού το τομέα της ρομποτικής εστίασε στις προκλήσεις της ασφαλούς αλληλεπίδρασης και της δυναμικής προσαρμογής της συμπεριφοράς του ρομπότ σε πραγματικό χρόνο [1], το οποίο απαιτούσε ακριβείς μηχανισμούς ανίχνευσης δυνάμεων και εφαρμογής κατάλληλων νόμων ελέγχου, με στόχο να επιτρέψει στα ρομπότ να αλληλεπιδρούν με ανθρώπους χωρίς να προκαλούν επικίνδυνες συνθήκες. Αυτή η πρόοδος δημιούργησε νέες κατηγορίες ρομποτικών συστημάτων που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε πιο καθημερινά περιβάλλοντα, όπως οικιακή φροντίδα, αποκατάσταση και βοήθεια ηλικιωμένων [1].

1.5.1 Η προοπτική της pHRI

Η σύγχρονη έρευνα στην pHRI έχει επεκταθεί σε πολλούς τομείς, από τη βιομηχανία και την υγειονομική περίθαλψη μέχρι και την καθημερινή ζωή. Ένα από τα πλέον μελετημένα πεδία είναι η συνεργατική μεταφορά αντικειμένων, όπου ο άνθρωπος και το ρομπότ μοιράζονται τη μεταφορά ενός αντικειμένου. Ρομποτικοί βραχίονες, κινητά ρομπότ και ρομπότ με δυνατότητα βάδισης βρίσκουν εφαρμογή σε αυτό το πεδίο, ενώ οι πρόσφατες εξελίξεις στα τετράποδα και δίποδα ρομπότ ανοίγουν νέες δυνατότητες για χρήση τους σε ανώμαλα ή αδόμητα εδάφη. Με τη συνεχή πρόοδο στους τομείς της αίσθησης δυνάμεων και της ανάλυσης ανθρώπινων προθέσεων, ο τομέας αυτός αναμένεται να διαδραματίσει κομβικό ρόλο στην ανάπτυξη ρομπότ συνεργασίας.

1.6 Εννοιολογική Προσέγγιση του Προβλήματος και η Λύση του συνοπτικά

Στην εργασία αυτή εστιάζουμε στην συνεργατική μεταφορά αντικειμένου άγνωστου βάρους και μεγάλου όγκου μεταξύ ανθρώπου και κινηματικά ελεγχόμενου τετράποδου ρομπότ. Θεωρούμε πως το αντικείμενο δεν είναι παραμορφώσιμο και επομένως θεωρείται ως άκαμπτο σώμα (rigid body). **Το πρόβλημα που τίθεται**, είναι η συνεργατική μεταφορά αντικειμένου μεταξύ του ανθρώπου και του εν λόγω τετράποδου ρομπότ όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.14.



Σχήμα 1.14: Το εξεταζόμενο πρόβλημα συνεργασίας ανθρώπου-ρομπότ και η διάταξη.

Για να πετύχουμε τον παραπάνω σκοπό, προτείνεται σχήμα υποχωρητικού ελέγχου το οποίο θα λαμβάνει υπόψιν τις προθέσεις του ανθρώπου μέσω των δυνάμεων που θα ασκεί ο άνθρωπος προς το ρομπότ. Για την μέτρηση των δυνάμεων και για την συγκράτηση του αντικειμένου από την μεριά του ρομπότ, προτείνεται ένας καινοτόμος αισθητήρας δύναμης (ο οποίος αναπτύχθηκε απο την ερευνητική ομάδα του ΙΤΕ και ονομάζεται MIGHTY ³ [34]) και τοποθετείται πάνω στην πλάτη του ρομπότ. Ο αισθητήρας αυτός διαδραματίζει διπλό ρόλο: αφενός συγκρατεί το αντικείμενο κατάλληλα μέσω αντλίας κενού αέρος και αφετέρου μετρά τις κατευθυντήριες δυνάμεις που ασκούνται από τον άνθρωπο. Οι δυνάμεις αυτές που λαμβάνονται από τον αισθητήρα, χρησιμοποιούνται για την διαμόρφωση της κίνησης του ρομπότ. Η κίνηση ή αλλιώς ”συμπεριφορά” του ρομπότ στον χώρο, παράγεται βάση ενός δυναμικού μοντέλου υποχωρητικότητας ενώ ταυτόχρονα γίνεται η προσπάθεια ελαχιστοποίησης της μεταφερόμενης ενέργειας, με χρήση δυναμικών παραμέτρων πάνω στο μοντέλο αυτό. Για τη διασφάλιση της επιτυχούς συνεργατικής μεταφοράς χωρίς την αποκόλληση του αντικειμένου από την μεριά του ρομπότ, εφαρμόζεται ένα επιπλέον σήμα εισόδου στο δυναμικό μοντέλο, βασισμένο πάνω σε ένα τεχνητό φραγμένο δυναμικό πεδίο.

Εν συνόψει, στόχος είναι η συνεργατική μεταφορά ενός αντικειμένου μεταξύ του ανθρώπου και του τετράποδου ρομπότ το οποίο κατά την διάρκεια της συνεργασίας θα :

1. **Διασφαλίζει** την ασφαλή συγκράτηση του αντικειμένου
2. **Ελαχιστοποιεί** τη μεταφερόμενη ενέργεια (μείωση φυσικού φόρτου)
3. **Εναρμονίζεται** με την πρόθεση του ανθρώπου (μείωση νοητικού φόρτου)

³Όταν αναφερόμαστε στον καινοτόμο αισθητήρα, σύστημα ή αρπάγη εννοούμε την συσκευή MIGHTY

1.7 Η Συνεισφορά της Διπλωματικής στην Επιστήμη

Η παρούσα διπλωματική εργασία συμβάλλει στους τομείς της ρομποτικής, της συνεργατικής αλληλεπίδρασης ανθρώπου-ρομπότ, και της θεωρίας ελέγχου για τετράποδα ρομπότ. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε αυτήν την έρευνα προσφέρουν τόσο θεωρητικές όσο και πρακτικές προόδους που μπορούν να βελτιώσουν την εφαρμογή των συνεργατικών ρομπότ σε διάφορους τομείς όπως οι διασώσεις και η βιομηχανική αυτοματοποίηση.

Η έρευνα αυτή εισάγει μια νέα προσέγγιση στο πρόβλημα της συνεργατικής μεταφοράς αντικειμένων μεταξύ ανθρώπου και ρομπότ, αξιοποιώντας ένα τετράποδο ρομπότ εξοπλισμένο με μια αρπάγη κενού αέρος, η οποία λειτουργεί τόσο ως μηχανισμός συγκράτησης όσο και ως αισθητήρας δύναμης/ροπή. Μέσω της ανάπτυξης ενός συστήματος ελέγχου ενδοτικότητας, με μεταβαλλόμενη απόσβεση και ενσωμάτωση τεχνητού δυναμικού πεδίου, βελτιώνεται η αποδοτικότητα και η ασφάλεια της αλληλεπίδρασης μεταξύ ανθρώπου και ρομπότ. Η παρούσα εργασία επικυρώνεται με εκτεταμένα πειράματα, αποδεικνύοντας τόσο μαθηματικά (θεωρητικά), όσο και πρακτικά την αυξημένη σταθερότητα και τη μειωμένη επιδάρυνση για τον ανθρώπινο συνεργάτη. Η έρευνα αυτή θα μπορούσε να αποτελέσει ένα βήμα για το μέλλον της συνεργατικής ρομποτικής, προσθέτοντας ένα θεμέλιο λίθο για περαιτέρω πρόοδο πάνω σε μελλοντικές έρευνες που αφορούν τη συνεργατική ρομποτική.

Η συνεισφορά της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι:

- Προτείνεται μια νέα μέθοδος για τη συνεργατική μεταφορά αντικειμένων ανθρώπου και τετράποδου ρομπότ, αξιοποιώντας τις δυνατότητες του αισθητήρα MIGHTY.
- Το σύστημα ελέγχου είναι μαθηματικά αποδεδειγμένο ως παθητικό και μπορεί να εγγυηθεί ότι το αντικείμενο δεν θα αποκολληθεί από την αρπάγη κενού αέρος στον συνεχή χρόνο για δυνάμεις πεπερασμένης ενέργειας.
- Το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου προσαρμόζεται δυναμικά βάσει των δυνάμεων που εφαρμόζει ο ανθρώπινος χειριστής, οδηγώντας σε σημαντική μείωση της γνωστικής και σωματικής προσπάθειας, βελτιώνοντας έτσι τη συνολική εμπειρία του χρήστη κατά τη διάρκεια της συνεργατικής μεταφοράς.

Στο πλαίσιο εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας έγινε και η συγγραφή του [37], η οποία έχει γίνει αποδεκτή στο συνέδριο IEEE-International Conference on Robotics and Automation (IEEE-ICRA 2025).

1.8 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία διαρθρώνεται σε πέντε κεφάλαια, το καθένα με μια σαφή θεματολογία που εστιάζει στην εξέλιξη της συνεργατικής αλληλεπίδρασης μεταξύ ανθρώπου και τετράποδων ρομπότ.

Αρχικά, το **εισαγωγικό κεφάλαιο** παρέχει μια συνολική επισκόπηση του αντικειμένου, ενισχύοντας τη σημασία των τετράποδων ρομπότ για την υποστήριξη της ανθρώπινης δράσης σε δυναμικά περιβάλλοντα. Με ιστορική αναδρομή, αναδεικνύεται η πρόοδος και οι προκλήσεις στον τομέα της φυσικής αλληλεπίδρασης ανθρώπου-ρομπότ (pHRI) (Ενότητα 1.5), καθώς και οι ειδικές εφαρμογές που επωφελούνται από τη συνεργασία σε απαιτητικά πεδία (1.1 έως 1.3). Η επόμενη ενότητα από αυτές εμβαθύνει στα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς των ρομπότ με δυνατότητα βάδισης (1.4) και καταλήγει με μια εννοιολογική προσέγγιση του προβλήματος και τη συμβολή της παρούσας έρευνας στον κλάδο (1.6 και 1.7).

Ακολουθεί μια διεξοδική ανάλυση των τεχνικών **εκτίμησης της δύναμης αλληλεπίδρασης μεταξύ ρομπότ και αντικειμένου**, ένα κεφάλαιο που εξετάζει τις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά τη συνεργασία ανθρώπου-ρομπότ. Εδώ αναλύονται οι μαθηματικές τεχνικές υπολογισμού, με χρήση ροπών στις αρθρώσεις αλλά και εξωτερικού αισθητήρα, δηλαδή την αρπάγη MIGHTY[34], που εξασφαλίζει ακριβή δεδομένα για τις ανάγκες ρύθμισης των ελεγκτών (2.1 έως 2.3). Η ενότητα αυτή αποτελεί το υπόβαθρο για τη θεωρητική και πρακτική ανάλυση του ελέγχου κίνησης. Με το κεφάλαιο αυτό ολοκληρώνεται το πρώτο μέρος του προβλήματος που είναι η μεταφορά δυνάμεων και ο τρόπος προσκόλλησης του αντικειμένου στο ρομπότ.

Στο τρίτο κεφάλαιο, η προσοχή στρέφεται στον **έλεγχο κίνησης και ενδοτικότητας** των τετράποδων ρομπότ, όπου διερευνώνται οι τρόποι με τους οποίους τα ρομπότ ανταποκρίνονται σε εξωτερικές δυνάμεις, επιτυγχάνοντας ασφαλή και ομαλή συνεργασία με τον άνθρωπο. Η ενδοτικότητα ως έννοια αναλύεται στις αρχικές ενότητες (3.1), ενώ ακολουθούν προσομοιώσεις και πειραματικά αποτελέσματα που τεκμηριώνουν την αποτελεσματικότητα και την λειτουργικότητά της (3.2).

Το τέταρτο κεφάλαιο, εστιάζει στην εφαρμογή του **προτεινόμενου συστήματος ελέγχου** για την ασφαλή και αποτελεσματική συνεργασία. Περιγράφονται αναλυτικά οι παράμετροι και οι αρχές λειτουργίας του ελεγκτή (Ενότητα 4.1), ενώ καταγράφονται τα πειράματα που διεξήχθησαν για την αξιολόγηση της απόδοσής του (Ενότητα 4.2). Με την ολοκλήρωση του κεφαλαίου αυτού η προσέγγιση του προβλήματος που αναλύεται στην Ενότητα 1.6, καθίσταται επιλυμένη.

Η εργασία ολοκληρώνεται με τη **συνοπτική παρουσίαση των συμπερασμάτων** και την εξέταση προοπτικών για μελλοντική έρευνα. Στα τελικά συμπεράσματα (Ενότητα 5.1), αναδεικνύεται η συμβολή των προτεινόμενων μεθόδων στην εμβάθυνση της συνεργατικής αλληλεπίδρασης ανθρώπου-ρομπότ, καθώς και οι νέες εφαρμογές που προτείνεται να διερευνηθούν και στην Ενότητα 5.2, προτείνονται βελτιώσεις στην τεχνολογία αισθητήρων και τον αλγοριθμικό έλεγχο, ώστε τα τετράποδα ρομπότ να ανταποκρίνονται πιο αποδοτικά σε ακραία περιβάλλοντα.

Η συγκεκριμένη διάρθρωση αποσκοπεί να καθοδηγήσει τον αναγνώστη σε μια βαθύτερη κατανόηση της συνολικής μεθοδολογίας και των ερευνητικών διερευνήσεων που ακολουθούν, παρέχοντας σαφήνεια ως προς τη δομή και το περιεχόμενο των επόμενων κεφαλαίων.

Κεφάλαιο 2

Εκτίμηση Δύναμης Αλληλεπίδρασης

Η εκτίμηση της δύναμης αλληλεπίδρασης μεταξύ του ρομπότ και του περιβάλλοντος είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη συστημάτων ελέγχου με ενδοτικότητα στο ρομπότ. Η ενδοτικότητα ή αλλιώς έλεγχος ενδοτικότητας είναι ένας τρόπος να μετακινούμε το ρομπότ και να προσαρμόζει τη συμπεριφορά του όταν ασκούνται εξωτερικές δυνάμεις.

Για να καταστεί το ρομπότ ενδοτικό, απαιτείται ένας **ελεγκτής ενδοτικότητας**, ο οποίος χρησιμοποιεί τις μετρήσεις δυνάμεων για να καθοδηγεί τη συμπεριφορά του ρομπότ κατά την αλληλεπίδρασή του με τον άνθρωπο ή το περιβάλλον. Η ανάγκη για εκτίμηση δύναμης προκύπτει από τον συγκεκριμένο ελεγκτή ενδοτικότητας που αναλύεται λεπτομερώς στο Κεφ.3.

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, έχουν εξεταστεί δύο διαφορετικές προσεγγίσεις για την εκτίμηση της δύναμης αλληλεπίδρασης. Κάθε προσέγγιση έχει ως στόχο την ακριβή ανίχνευση των εξωτερικών δυνάμεων που θα χρησιμοποιηθούν ως σήμα εισόδου στο σύστημα του ελεγκτή ενδοτικότητάς μας. Για την πρώτη προσέγγιση θεωρούμε πως η εκτίμηση γίνεται μέσω εσωτερικών αισθητήρων θέσης και ροπής (Ενότητα 2.1), ενώ για τη δεύτερη χρησιμοποιείται ο πρωτότυπος εξωτερικός αισθητήρας δύναμης, ανεπτυγμένος από την ομάδα του ITE, MIGHTY [34] (Ενότητα 2.3). Από τις δύο προσεγγίσεις που αναφέρονται, η δεύτερη εμφανίζει τα πιο επιθυμητά αποτελέσματα.

2.1 Εκτίμηση δυνάμεων μέσω των ροπών στις αρθρώσεις

Τα τετράποδα ρομπότ, όπως και τα περισσότερα ρομποτικά συστήματα, χρησιμοποιούν διάφορους αισθητήρες για την εκτίμηση της κατάστασης και την αλληλεπίδραση με το περιβάλλον. Η πρώτη μας προσέγγιση αναζητά την εκτίμηση των δυνάμεων που ασκούμε στο ρομπότ με βάση τους εσωτερικούς αισθητήρες που παρέχει το τετράποδο ρομπότ μας και συγκεκριμένα, τους αισθητήρες θέσης και ροπής του. Επομένως, ο τρέχον σκοπός είναι, με βάση την γνώση των μετρήσεων των εκτιμήσεων δύναμης στην κάθε άρθρωση του ρομπότ, να βρεθεί τρόπος να μεταφράσουμε τις δυνάμεις αυτές σε δυνάμεις στον χώρο εργασίας πάνω στο τόρσο του ρομπότ. Για την "μετάφραση" αυτή είναι απαραίτητη η κατανόηση της έννοιας της Ιακωβιανής καθώς και ο τρόπος εύρεσής της. Παρακάτω περιγράφεται το μαθηματικό υπόβαθρο το οποίο είναι απαραίτητο για να διατυπωθεί αναλυτικά η προσέγγιση του προβλήματός μας (Μέρος 2.1.2).

2.1.1 Μαθηματικό Υπόβαθρο

Ο τρόπος απεικόνισης της γενικευμένης δύναμης που ασκείται στο ρομπότ είναι μέσω της χρήσης της Ιακωβιανής μήτρας. Οι έννοιες που χρειάζονται για την κατανόηση της Ιακωβιανής αναγράφονται στην υποενότητα 2.1.3.

Διευκρίνιση

Όταν αναφερόμαστε στις μεταβλητές του χώρου εργασίας, δίνεται προτεραιότητα στα γραμμικά στοιχεία, ακολουθούμενα από τα γωνιακά στοιχεία. Αυτή η προσέγγιση βοηθά στη διατήρηση της σαφήνειας και της συνέπειας στις αναλύσεις. Επομένως η σύμβαση αυτή μας δίνει :

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \\ \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix}$$

Η εύρεση ροπών των αρθρώσεων για μια ανοιχτή αλυσίδα περιγράφεται στον παρακάτω ορισμό:

Ορισμός 2.1.1 (Απεικόνιση δυνάμεων μέσω ροπών των αρθρώσεων). Έστω $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^n$ οι γενικευμένες ροπές των αρθρώσεων και $\mathbf{F} \in \mathbb{R}^6$ η γενικευμένη δύναμη που ασκείται στο άκρο του ρομπότ. Τότε σχέση που τα συνδέει, σύμφωνα με την αρχή διατήρησης του στιγμιαίου έργου είναι:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T \mathbf{F} \quad (2.1)$$

Χρήσιμη εξίσωση

Πολλές φορές, όπως και στην δική μας περίπτωση, είναι επιθυμητή η ανάλυση προβλημάτων στο χώρο εργασίας. Επομένως η αντίστροφη διαδικασία μπορεί να γραφτεί ως εξής :

$$\mathbf{F} = (\mathbf{J}^T)^\dagger \boldsymbol{\tau} \quad (2.2)$$

- Αν η Ιακωβιανή είναι αντιστρέψιμη τότε $\mathbf{J}^\dagger(\mathbf{q}) \equiv \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})$, η εξίσωση (2.2) γράφεται:

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}^{-T} \boldsymbol{\tau} \quad (2.3)$$

- Στην περίπτωση πλεονασματικού ρομπότ ή ρομπότ με λιγότερους βαθμούς ελευθερίας από όσους απαιτούνται, χρησιμοποιείται η έννοια του ψευδοαντίστροφου πίνακα με συνέπεια να χάνεται μέρος της πληροφορίας.

Η δυνατότητα μεταφοράς συστροφών [51] (γενικευμένων ταχυτήτων), $\mathbf{V} \in \mathbb{R}^6$ από ένα πλαίσιο συντεταγμένων σε ένα άλλο γίνεται με βάση τον παρακάτω ορισμό.

Ορισμός 2.1.2 (Μετασχηματισμός συστροφών). Έστω συστροφές $V_b, V_c \in \mathbb{R}^6$ στα πλαίσια $\{B\}$ και $\{C\}$ αντίστοιχα. Τότε η σχέση που τα συνδέει είναι

$$\mathbf{V}_b = \boldsymbol{\Gamma}_{bc} \mathbf{V}_c, \text{ όπου} \quad (2.4)$$

$$\boldsymbol{\Gamma}_{bc} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{bc} & \hat{\mathbf{p}}_{bc} \mathbf{R}_{bc} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{R}_{bc} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$$



Σχήμα 2.1: Πειραματική διάταξη 1^{ης} προσέγγισης : Το ρομπότ Go1 συνδεδεμένο με ένα καλώδιο ethernet

Μεταφορά δυνάμεων

Στο πειραματικό κομμάτι αποδεικνύεται χρήσιμη η γνώση μεταφοράς γενικευμένων δυνάμεων από ένα πλαίσιο αναφοράς σε ένα άλλο καθώς και η σύζευξη συνολικής δύναμης από πολλά πλαίσια σε ένα συγκεκριμένο πλαίσιο.

Έστω γενικευμένες δυνάμεις $F_b, F_c \in \mathbb{R}^6$ στα πλαίσια $\{B\}$ και $\{C\}$ αντίστοιχα. Τότε η σχέση που τα συνδέει είναι

$$\mathbf{F}_b = \mathbf{\Gamma}_f \mathbf{F}_c, \text{ όπου} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{\Gamma}_f = (\mathbf{\Gamma}_{bc})^{-\top} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{bc} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{p}_{bc}^\top \mathbf{R}_{bc} & \mathbf{R}_{bc} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$$

Η χρήση της μετατροπής του διανύσματος θέσης $\mathbf{p}$ στον αντίστοιχο αντισυμμετρικό πίνακα $\hat{\mathbf{p}}$ χρησιμοποιείται για την ιδιότητά του εξωτερικού γινομένου ($\mathbf{a} \times \mathbf{b} = \hat{\mathbf{a}} \cdot \mathbf{b}$). Έτσι στον ορισμό 2.1.2 το εξωτερικό γινόμενο βοηθά στην εξαγωγή της γραμμικής ταχύτητας λόγω περιστροφής ενώ στην εξίσωση μεταφοράς δυνάμεων 2.5 εξάγει την ροπή.

2.1.2 Περιγραφή προβλήματος σύζευξης δυνάμεων και διατύπωση επίλυσης

Θεωρούμε το τετράποδο ρομπότ Go1 που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1 με δυνατότητα μεταφοράς των δεδομένων σε εξωτερικό υπολογιστή γίνεται μέσω καλωδίου ethernet. Θεωρούμε το τετράποδο ρομπότ που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1, το οποίο διαθέτει $n = 3$ αρθρώσεις σε κάθε πόδι. Ορίζουμε ως $q_{i,j} \in \mathbb{R}, i = 1, \dots, 4, j = 1, \dots, n$, τις μεταβλητές θέσης των αρθρώσεων του i -οστού ποδιού που δίνονται από τον εκάστοτε αισθητήρα θέσης του ρομπότ. Έτσι το διάνυσμα των συνολικών μεταβλητών θέσης των αρθρώσεων του ρομπότ μας συμβολίζεται ως $\mathbf{q} \triangleq [q_{1,1} \ q_{1,2} \ \dots \ q_{4,n-1} \ q_{4,n}]^\top \in \mathbb{R}^{4n}$.

Εφόσον το ρομπότ μας έχει $n = 3$ αρθρώσεις σε κάθε πόδι, το διάνυσμα $\mathbf{q}$ γράφεται ως :

$$\mathbf{q} = [\mathbf{q}_1^\top \ \mathbf{q}_2^\top \ \mathbf{q}_3^\top \ \mathbf{q}_4^\top]^\top \in \mathbb{R}^{12}, \text{ με } \mathbf{q}_i \in \mathbb{R}^3, i = 1, \dots, 4.$$

Επιπλέον, ορισμένο όπως και το διάνυσμα $\mathbf{q}$, έστω $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^{12}$ το διάνυσμα των συνολικών **εκτιμήσεων των ροπών** που δίνονται από τον εκάστοτε αισθητήρα της αντίστοιχης άρθρωσης και

είναι ανάλογοι των ρευμάτων που περνούν από τον κάθε κινητήρα, της αντίστοιχης άρθρωσης. Οι εκτιμήσεις αυτές μπορούν να γραφτούν ως :

$$\boldsymbol{\tau} = [\boldsymbol{\tau}_1^\top \boldsymbol{\tau}_2^\top \boldsymbol{\tau}_3^\top \boldsymbol{\tau}_4^\top]^\top \in \mathbb{R}^{12}, \text{ με } \boldsymbol{\tau}_i \in \mathbb{R}^3, i = 1, \dots, 4.$$

Επίσης, ορίζουμε το σύστημα αναφοράς $\{B\}$ να βρίσκεται στο Κέντρο Μάζας (ΚΜ) του ρομπότ, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.14 και το σύστημα αναφοράς $\{i\}$ τοποθετημένο στο άκρο του κάθε ποδιού με την θέση του κάθε ποδιού να περιγράφεται ως το διάνυσμα $\mathbf{p}_i(\mathbf{q}_i) \in \mathbb{R}^3$.

Σκοπός είναι η αντιστοίχιση των ροπών των αρθρώσεων του κάθε ποδιού $\boldsymbol{\tau}_i$ σε γενικευμένη δύναμη $\mathbf{F}_b = [\mathbf{f}_b^\top \boldsymbol{\tau}_b^\top]^\top \in \mathbb{R}^6$, όπου $\mathbf{F}_b$ η γενικευμένη δύναμη εκφρασμένη ως προς το ΚΜ, με $\mathbf{f}_b \in \mathbb{R}^3$ και $\boldsymbol{\tau}_b \in \mathbb{R}^3$ να αντιπροσωπεύουν τη γραμμική δύναμη και τη ροπή στο Κέντρο Μάζας αντίστοιχα. Για την επίτευξη αυτής της αντιστοίχισης, βρίσκουμε αρχικά τις δυνάμεις που ασκούνται στο κάθε άκρο του ρομπότ $\mathbf{f}_i \triangleq [f_{x_i} \ f_{y_i} \ \tau_{z_i}]^\top \in \mathbb{R}^3$ που αντιστοιχούν από τις $\boldsymbol{\tau}_i$. Οι δυνάμεις αυτές είναι εκφρασμένες ως προς το $\{B\}$.

Για την αντιστοίχιση αυτών των δυνάμεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση (2.2). Μάλιστα εφόσον το πρόβλημα που έχουμε ορίσει στην ενότητα 1.5 ενδιαφέρει μόνο την κίνηση και τον προσανατολισμό στο επίπεδο βάδισης του ρομπότ, οι γραμμές τις Ιακωβιανής μειώνονται από 6 σε 3 για κάθε πόδι, έχοντας τις Ιακωβιανές $\mathbf{J}_i \in \mathbb{R}^{3 \times 3}, i = 1, \dots, 4$, ως προς το $\{B\}$, που είναι αντιστρέψιμες για το κάθε πόδι, καταλήγοντας έτσι στην χρήση της σχέσης (2.3), που μπορεί να γραφτεί ως :

$$\mathbf{f}_i = \mathbf{J}_i^{-\top} \boldsymbol{\tau}_i \in \mathbb{R}^3 \quad (2.6)$$

Σημείωση : Η έννοια της Ιακωβιανής αναλύεται στην Υποενότητα 2.1.3 και οι Ιακωβιανές $\mathbf{J}_i$ μπορούν να υπολογιστούν αναλυτικά με την βοήθεια της μεθόδου των Modified DH Parameters που αναγράφεται στο Παράρτημα Α'.

Για την συγχώνευση των δυνάμεων ορίζουμε το διάνυσμα δύναμης $\mathbf{F}_a \triangleq [f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4]^\top \in \mathbb{R}^{12}$ εκφρασμένο ως προς το πλαίσιο $\{B\}$ και μεταφέρουμε τις δυνάμεις αυτές στο ΚΜ με χρήση της εξίσωσης (2.5) που εάν την γενικεύσουμε, έχουμε :

$$\mathbf{F}_b = \mathbf{G}(\mathbf{q})\mathbf{F}_a - \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{ba}\mathbf{W}_g \\ \mathbf{0}_{3 \times 1} \end{bmatrix}, \text{ όπου} \quad (2.7)$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{q}) \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & \mathbf{I}_3 & \mathbf{I}_3 & \mathbf{I}_3 \\ \hat{\mathbf{p}}_1 & \hat{\mathbf{p}}_2 & \hat{\mathbf{p}}_3 & \hat{\mathbf{p}}_4 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 12} \quad (2.8)$$

Για την παραπάνω προσέγγιση θεωρείται πως η μάζα του ρομπότ είναι ομοιόμορφα κατανοημένη. Επομένως η δύναμη της βαρύτητας που ασκείται στο κέντρο μάζας του ρομπότ, με m το βάρος του ρομπότ σε kg και g η επιτάχυνση της βαρύτητας σε m/s^2 , είναι

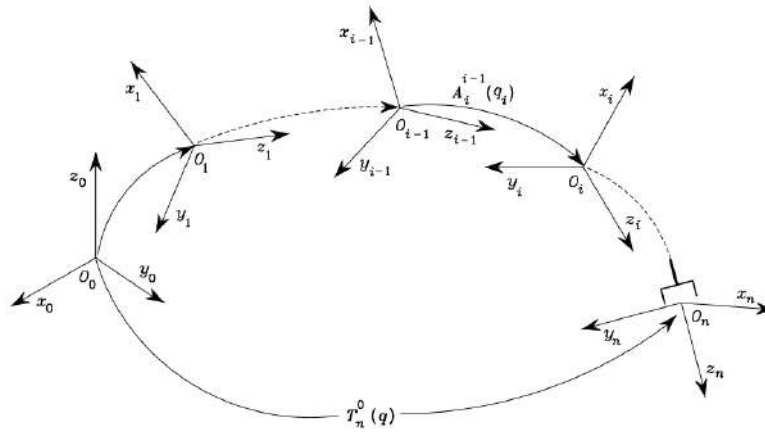
$$\mathbf{W}_g = [\mathbf{0}_{1 \times 2} \ m g]^\top$$

Για την έκφραση της δύναμης αυτής στο πλαίσιο $\{B\}$ και την αντιστάθμισή της πάνω στο αποτέλεσμα $\mathbf{F}_b$, πολλαπλασιάζουμε το $\mathbf{W}_g$ με τον πίνακα $\mathbf{R}_{ab} \in SO(3)$, εφόσον είναι γνωστός ο προσανατολισμός του ρομπότ $\{B\}$ ως προς το αδρανειακό πλαίσιο αναφοράς $\{A\}$.

2.1.3 Η Ιακωβιανή κινηματικής αλυσίδας

Όπως είδαμε στην παραπάνω περιγραφή, στην Εξίσωση (2.6), χρειάζεται η χρήση του πίνακα της Ιακωβιανής. Σε αυτό το κομμάτι θα αναλύσουμε την έννοια της και τη σημαντικότητά της ως εργαλείο. Ως υπόβαθρο για την κατανόηση της έννοιας αυτής, αναγράφεται περιληπτικά η ιδέα της "ανοιχτής" και "κλειστής" αλυσίδας που βοηθά στην γενίκευση της επίλυσης των προβλημάτων με την χρήση της Ιακωβιανής. Η γνώση της Ιακωβιανής οποιουδήποτε ρομπότ είναι

απαραίτητη όταν κατά την επίλυση προβλήματος όταν εμπεριέχονται εντολές ταχυτήτων ή α-κόμη και δυνάμεων. Βασικά προβλήματα επίλυσης στην ρομποτική, όπως προσέγγιση στόχου ή παρακολούθηση τροχιάς σε οποιοδήποτε χώρο εργασίας γίνονται απλούστερα με την γνώση του πίνακα αυτού. Εν γένει όλα τα προβλήματα κίνησης είναι προβλήματα ευθέως ή/και αντί-στροφου κινηματικού, σε κάποιο επίπεδο. Εξ' ορισμού, κύρια λειτουργία της Ιακωβιανής είναι η αντιστοίχιση, ή αλλιώς το "mapping" των ταχυτήτων των αρθρώσεων σε ταχύτητες του άκρου. Η κατανόηση της δομής των ρομπότ ως σύνδεση συνδέσμων ("αλυσίδες") είναι εξαιρετικά σημα-ντική, μιας και η περισσότερη μελέτη πάνω στην ρομποτική απλοποιείται με αυτόν τον τρόπο.



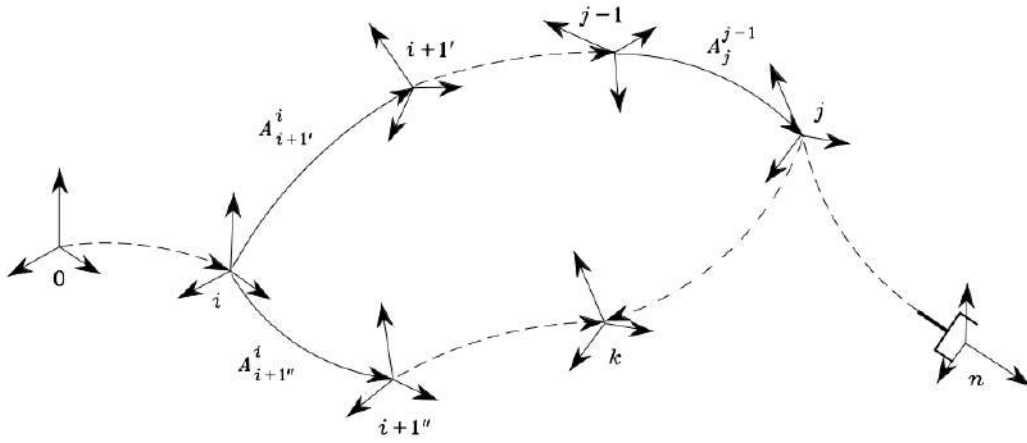
Σχήμα 2.2: Σύνδεση Πλαισίων σε μια ανοιχτή κινηματική αλυσίδα [42]

Σε ένα ρομποτικό σύστημα, ένας **ανοικτός κινηματικός βραχίονας** (βλ. Σχήμα 2.2) απο-τελείται από $n + 1$ συνδέσμους που συνδέονται με n αρθρώσεις, με τον Σύνδεσμο $\{0\}$ να είναι στερεωμένος στη βάση του βραχίονα. Κάθε άρθρωση παρέχει στον βραχίονα ένα μοναδικό βαθ-μό ελευθερίας (DOF), ο οποίος αντιπροσωπεύεται από μια μεταβλητή άρθρωσης. Αυτή η δομή αποτελεί τη βάση μιας ανοικτής κινηματικής αλυσίδας, μια διαμόρφωση που συναντάται συχνά σε ρομποτικούς βραχίονες.

Για τον υπολογισμό του ευθέως κινηματικού ενός τέτοιου βραχίονα, μπορούμε να αναπτύ-ξουμε μια διαδικασία που εκμεταλλεύεται τα εγγενή χαρακτηριστικά της ανοικτής κινηματικής αλυσίδας. Συγκεκριμένα, επειδή κάθε άρθρωση συνδέει δύο διαδοχικούς συνδέσμους, είναι λο-γικό να περιγράψουμε πρώτα τις κινηματικές σχέσεις μεταξύ αυτών των διαδοχικών συνδέσμων. Μόλις αυτές οι σχέσεις προσδιοριστούν, μπορούμε να τις συνδυάσουμε αναδρομικά για να απο-κτήσουμε μια πλήρη περιγραφή της κινηματικής του βραχίονα.

Σε ρομπότ όπως τα τετράποδα ρομπότ χρειάζεται περαιτέρω προσοχή και ο τρόπος υπολο-γισμού του ευθέως κινηματικού είναι να πάρουμε την κάθε περίπτωση της αλυσίδας ξεχωριστά. Πιο συγκεκριμένα θεωρούμε ως κομβικό σημείο το τόρσο του ρομπότ και από εκεί εξετάζουμε την κινηματική του κάθε ποδιού ξεχωριστά και προσποιούμαστε πως το κάθε πόδι με βάση το τόρσο του ρομπότ είναι ένας βραχίονας 3β.ε.

Ακολουθεί ο ορισμός για την Ιακωβιανή ενός βραχίονα n βαθμών ελευθερίας. Έστω n ο αριθμός των αρθρώσεων και το πλαίσιο $\{e\}$ τοποθετημένο στο άκρο του βραχίονα, τότε :



Σχήμα 2.3: Σύνδεση Πλαισίων σε μια κλειστά κινηματική αλυσίδα [42]

Ορισμός 2.1.3 (Η Ιακωβιανή μήτρα ενός βραχίονα). Η Ιακωβιανή του βραχίονα $J(q) \in \mathbb{R}^{6 \times n}$ ή απλώς J , απεικονίζει τις **ταχύτητες των αρθρώσεων** $\dot{q} \in \mathbb{R}^n$ **στην γενικευμένη ταχύτητα** του άκρου.

Η σχέση που συνδέει τις ταχύτητες των αρθρώσεων ($\dot{q}$) με την **γενικευμένη ταχύτητα** (v) του άκρου είναι :

$$V = J(q)\dot{q}, \text{ όπου} \quad (2.9)$$

$V = [\dot{p}^T \ \omega^T]^T \in \mathbb{R}^6$ με $\dot{p}$, ω τα διανύσματα **γραμμικής** και η **γωνιακής ταχύτητας** αντίστοιχα. Η Ιακωβιανή μήτρα αναλύεται σε 2 υποπίνακες :

$$J(q) \triangleq \begin{bmatrix} J_v(q) \\ J_\omega(q) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times n}, \text{ όπου}$$

$J_v(q) \in \mathbb{R}^{3 \times n}$ και $J_\omega(q) \in \mathbb{R}^{3 \times n}$ οι Ιακωβιανές που αφορούν την **μεταφορική/γραμμική** και **γωνιακή ταχύτητα** αντίστοιχα.

Για τα τετράποδα ρομπότ, που έχουν συνολικά 4 ανοιχτές αλυσίδες με κοινό σημείο έναρξης το τόρσο του ρομπότ, απαιτείται η εύρεση τεσσάρων ιακωβιανών J_i εκφραζόμενες ως προς ένα κοινό σημείο, συνήθως το κέντρο μάζας. Για τον υπολογισμό τους, απαιτούνται οι πίνακες ομογενογούς μετασχηματισμού g_{0i,e_i} και $g_{b,0_i}$ κάθε ποδιού, με τα πλαίσια $\{0_i\}$ και $\{e_i\}$ να βρίσκονται στην κάθε πρώτη άρθρωση και το άκρο του i -οστού ποδιού αντίστοιχα.

2.2 Πείραμα χρήσης των εκτιμήσεων των ροπών στις αρθρώσεις

Το τετράποδο ρομπότ Go1 χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων εκτίμησης δυνάμεων στο κέντρο μάζας, αξιοποιώντας την Ιακωβιανή μήτρα του κάθε ποδιού για τις αντίστοιχες μετρήσεις ροπών. Κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων, το ρομπότ είναι συνδεδεμένο μέσω ethernet με εξωτερικό υπολογιστή για τη λήψη πληροφοριών, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1. Σκοπός του πειράματος είναι η αξιολόγηση της ακρίβειας και αξιοπιστίας της εκτίμησης των δυνάμεων που ασκούνται.

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των δυνάμεων παρουσιάζεται στον Αλγόριθμο 1, όπου γίνεται εκτίμηση ροπών των αρθρώσεων σε κάθε πόδι του ρομπότ και σύνθεση των δεδομένων που αποτελεί το συνολικό διάνυσμα δύναμης στο κέντρο μάζας.

Algorithm 1 Εκτίμηση της δύναμης που ασκείται στο Κέντρο Μάζας του Ρομπότ

```

1: Ανάγνωση του αρχείου URDF για την εξαγωγή του κινηματικού μοντέλου  $f(\cdot)$ 
2: Αρχικοποίηση των κινηματικών αλυσίδων για κάθε πόδι.
3: while το σύστημα είναι σε λειτουργία do
4:   Ανάκτηση τρέχουσας διαμόρφωσης  $\mathbf{q}_i$  και εκτίμησης ροπής της κάθε άρθρωσης  $\tau_i$  και
   γωνιών Euler.
5:   Υπολογισμός ευθέως κινηματικού για κάθε πόδι  $\mathbf{p}_i = f(\mathbf{q}_i)$ 
6:   Υπολογισμός των πινάκων Ιακωβιανής για κάθε πόδι  $\mathbf{J}_i(\mathbf{q}_i)$ 
7:   Υπολογισμός των δυνάμεων  $\mathbf{f}_i$  για κάθε πόδι χρησιμοποιώντας την σχέση (2.6)
8:   Στοίχιση των δυνάμεων σε ένα ενιαίο διάνυσμα δύναμης  $\mathbf{F}_a$ 
9:   Κατασκευή του πίνακα  $\mathbf{G}$ 
10:  Υπολογισμός του διανύσματος δύναμης  $\mathbf{F}_b$ 
11:  Αντιστάθμιση της δύναμης της βαρύτητας στο διάνυσμα  $\mathbf{F}_b$ .
12: end while

```

2.2.1 Διεξαγωγή και Αποτελέσματα των Πειραμάτων

Η διεξαγωγή των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια: (1) Καταγραφή των μετρήσεων σε κατάσταση πλήρους στασιμότητας και (2) Καταγραφή των μετρήσεων κατά τη διάρκεια κίνησης του ρομπότ. Τα πειράματα αυτά επικεντρώθηκαν στην αξιοπιστία των σημάτων εκτίμησης των δυνάμεων και στην αποτελεσματικότητα της αντιστάθμισης βαρύτητας και των φίλτρων θορύβου. Η καταγραφή των μετρήσεων σε όλα τα πειράματα έγινε με συχνότητα δειγματοληψίας τα 500Hz . Σε κάθε μέτρηση το ρομπότ απενεργοποιείται και ενεργοποιείται εκ νέου.

Πείραμα-1: Πλήρης Στασιμότητα

Στο πρώτο πείραμα, το ρομπότ ενεργοποιείται και στέκεται βρισκόμενο σε πλήρη στασιμότητα, χωρίς να υπάρχει καμία κίνηση.

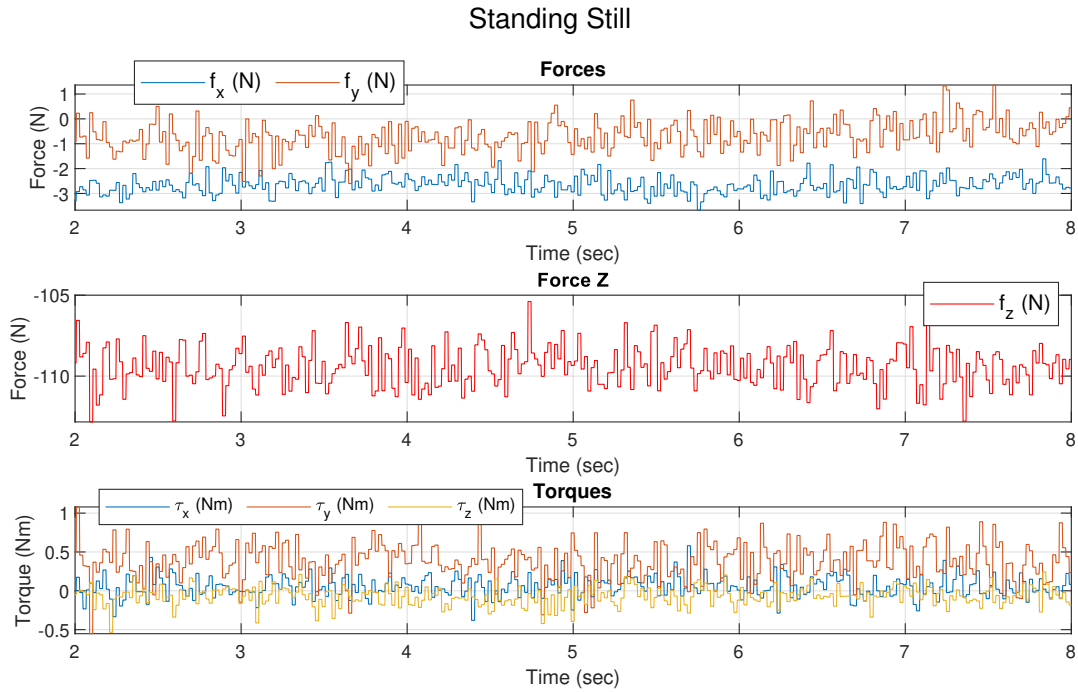
Δοκιμή 1: Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται το σήμα των δυνάμεων που εκτιμήθηκε από τον αλγόριθμο χωρίς την εφαρμογή αντιστάθμισης βαρύτητας και φίλτρου θορύβου. Η μέτρηση αυτή έγινε σε διάρκεια 20 δευτερολέπτων, ωστόσο η κυματομορφή του κάθε σήματος δεν άλλαξε σημαντικά και για λόγο απεικόνισης παρουσιάζονται τυχαία 6 δευτερόλεπτα από την μέτρηση αυτή.

Σχολιασμός: Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4, παρατηρείται υψηλό επίπεδο θορύβου στα σήματα των δυνάμεων και των ροπών. Ο θόρυβος αυτός προέρχεται από τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα του ρομπότ και τα ρεύματα των κινητήρων. Επίσης η αναμενόμενη τιμή f_z ήταν στα $\approx -130\text{N}$, καθώς το βάρος του ρομπότ είναι στα 13kg , ωστόσο η μετρούμενη τιμή βρίσκεται περίπου στα -110N . Αυτό απο επαναλαμβανόμενες μετρήσεις είχε αρκετές μεταβολές πέραν της παραπάνω μετρούμενης τιμής, κάτι το οποίο φανερώνει σημαντικότερα προβλήματα στην ποιότητα των μετρήσεων.

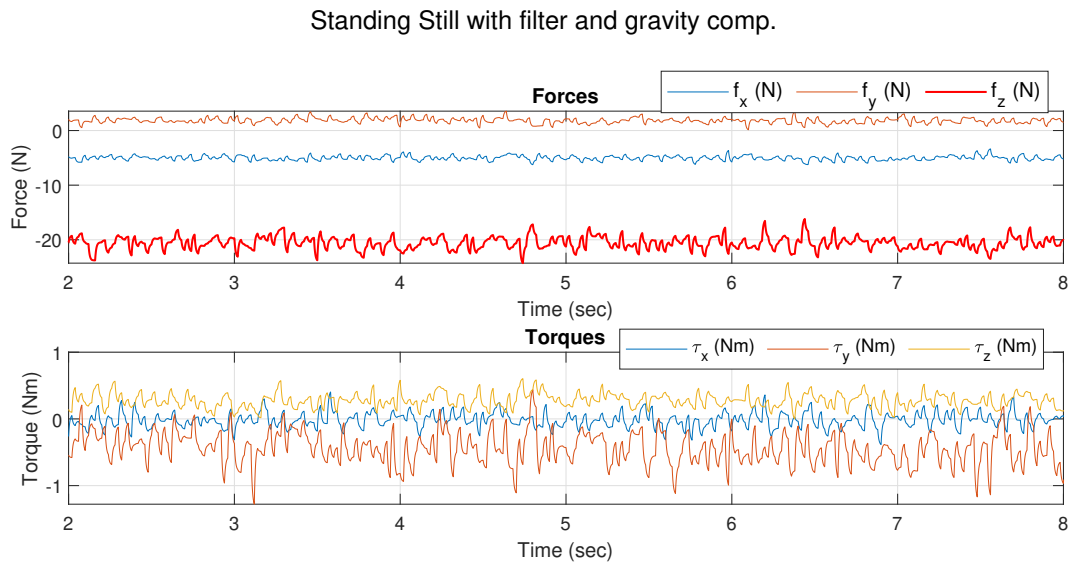
Δοκιμή 2: Για την βελτίωση ποιότητας των σημάτων, δοκιμάστηκαν διάφορα χαμηλοπερατά φίλτρα με συχνότητα αποκοπής f_c στα $10, 16$ και 20Hz . Επιπλέον παρατηρείται μεγάλη μετατόπιση στην μέτρηση f_z λόγω της δύναμης της βαρύτητας.

Προς αποφυγή μεγάλου πλήθους από εικόνες, η μετατόπιση στην μέτρηση f_z ήταν διαφορετική σε κάθε μέτρηση καθιστώντας την αντιστάθμιση της βαρύτητας ένα πιο πολύπλοκο ζήτημα απ' όσο θα έπρεπε να είναι. Στο επόμενο σχήμα φαίνονται τα αποτελέσματα με εφαρμογή χαμηλοπερατού φίλτρου συχνότητας αποκοπής $f_c = 20\text{Hz}$ των φίλτρου και αντιστάθμισης βαρύτητας.

Σχολιασμός: Η εφαρμογή του φίλτρου 20Hz βελτίωσε σημαντικά την ποιότητα του σήματος, μειώνοντας το θόρυβο. Ωστόσο, η αντιστάθμιση της βαρύτητας δεν ήταν αρκετή για να εξαλεί-



Σχήμα 2.4: Οι δυνάμεις και ροπές που λαμβάνει το ΚΜ του ρομπότ σε πλήρη στασιμότητα, χωρίς αντιστάθμιση βαρύτητας και χωρίς εφαρμογή χαμηλοπερατού φίλτρου.

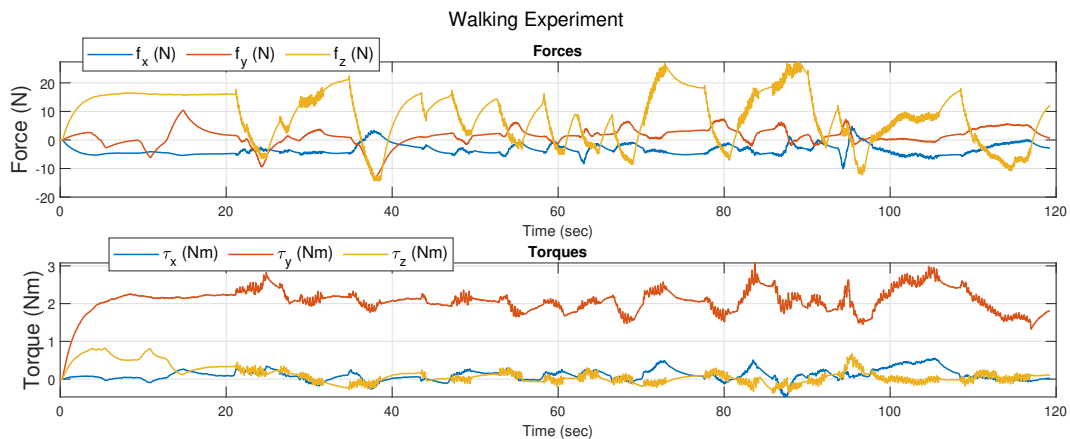


Σχήμα 2.5: Οι δυνάμεις και ροπές που λαμβάνει το ΚΜ του ρομπότ σε πλήρη στασιμότητα, με αντιστάθμιση βαρύτητας και με εφαρμογή χαμηλοπερατού φίλτρου $f_c = 20Hz$.

ψει την μετατόπιση της δύναμης f_z . Αυτό αναδεικνύει πως τυχόν στατικές τριβές στην εκκίνηση αλλάζουν σημαντικά την εκτίμηση. Επίσης παρουσιάζεται η ανάγκη για περαιτέρω βελτιώσεις στο σύστημα αισθητήρων ή τον αλγόριθμο εκτίμησης μιας και φαίνεται πως οι μετρήσεις ήδη, χωρίς καμία ενέργεια από την μεριά του ανθρώπου, καθίστανται μη αξιόπιστες. Από εδώ καταλήγουμε πως το σφάλμα στις μετρήσεις πηγάζει από τις μη μοντελοποιημένες δυναμικές του ρομπότ.

Πείραμα-2: Το ρομπότ εν κινήσει

Στο δεύτερο πείραμα, προστίθεται στη διάταξη ένα ασύρματο το τηλεχειριστήριο με το οποίο μπορούμε να κινούμε το ρομπότ στον χώρο. Επιθυμούμε να γίνει μέτρηση των δυνάμεων που ασκούνται στο ρομπότ ως προς το Κέντρο Μάζας του, όταν το ρομπότ κινείται με αρκετά χαμηλή ταχύτητα, αρκετή ώστε να ξεκινήσει να κινεί τις αρθρώσεις του ρομπότ. Στην δοκιμή αυτή, η κίνηση είναι προς τον άξονα x του ρομπότ και τα δεδομένα που καταγράφηκαν φαίνονται στο Σχήμα 2.6 με διάρκεια μέτρησης στα δύο λεπτά. Στις μετρήσεις αυτές διατηρείται η εφαρμογή χαμηλοπερατού φίλτρου $f_c = 20\text{Hz}$ και η αντιστάθμιση βαρύτητας.



Σχήμα 2.6: Οι δυνάμεις και ροπές που λαμβάνει το ΚΜ του ρομπότ σε κίνηση, με αντιστάθμιση βαρύτητας και με εφαρμογή χαμηλοπερατού φίλτρου $f_c = 20\text{Hz}$.

Σχολιασμός: Η διάρκεια ήταν δύο λεπτά καθώς έγινε η προσπάθεια εύρεσης τυχόν μοτίβου στην κυματομορφή. Κατά την κίνηση του ρομπότ, παρατηρείται έντονος θόρυβος λόγω των επαφών των ποδιών με το έδαφος. Οι αιχμές στις γραφικές παραστάσεις είναι αποτέλεσμα των απότομων αλλαγών στην κίνηση, αλλά και των σφαλμάτων του συστήματος αισθητήρων. Μάλιστα σε μετέπειτα δοκιμές, δεν παρατηρήθηκε κάποιο μοτίβο και οι μετατοπίσεις οποιουδήποτε σήματος άλλαζαν σε κάθε κίνηση του ρομπότ.

2.2.2 Συμπεράσματα και προτάσεις

Συνολικά, τα πειράματα έδειξαν ότι:

- Η εφαρμογή χαμηλοπερατού φίλτρου είναι απαραίτητη για τη μείωση του θορύβου στις μετρήσεις δυνάμεων και ροπών από τους εσωτερικούς αισθητήρες ροπής.
- Η αντιστάθμιση της βαρύτητας βελτίωσε την ακρίβεια των μετρήσεων, αλλά δεν ήταν αρκετή για να εξαλείψει πλήρως την μετατόπιση της δύναμης f_z .
- Κατά την κίνηση του ρομπότ, τα σήματα επηρεάζονται έντονα από τα δυναμικά φορτία και την επαφή με το έδαφος, δημιουργώντας αιχμές και θόρυβο στις μετρήσεις.
- Η ποιότητα του σήματος, παρά τις εφαρμογές των φίλτρων, επηρεάζεται από τον σχεδιασμό του συστήματος αισθητήρων και τις δυναμικές επαφές κατά τη βάδιση, με άλλα λόγια, από μη μοντελοποιημένες δυναμικές του ρομποτικού συστήματος.

Η μέτρηση των δυνάμεων στο κέντρο μάζας του ρομπότ χρησιμοποιώντας αποκλειστικά τους αισθητήρες του ρομπότ δεν ήταν επιτυχής καθώς δεν πέρασε το στάδιο της αξιοπιστίας. Η εκτίμηση δυνάμεων με τον τρόπο αυτό θα μπορούσε να αποτελέσει την γρηγορότερη λύση εκτίμησης

δυνάμεων για το πρόβλημα μας. Ωστόσο, για την καλύτερη ακρίβεια στην εκτίμηση των δυνάμεων, η βελτίωση του αλγορίθμου εκτίμησης και του συστήματος αισθητήρων παρουσιάζει σημαντικές προκλήσεις, καθώς για την αντιστάθμιση του συνολικού θορύβου από το μοντέλο κίνησης του ρομπότ χρειάζεται και η πλήρης γνώση του μοντέλου κίνησης του ρομπότ, ενώ ταυτόχρονα τυχόν τριβές που προκαλούνται στις αρθρώσεις κατά την κίνηση του ρομπότ, αυξάνουν την πολυπλοκότητα μοντελοποίησης του. Η περαιτέρω ανάλυση της δυναμικής κίνησης των ποδιών του ρομπότ, καθώς και η μελέτη νέων τεχνικών φιλτραρίσματος, θα μπορούσε να οδηγήσει σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Ανεξάρτητα από το αν τα αποτελέσματα δεν ήταν όπως αναμενόταν, η αναλυτική διαδικασία εκτίμησης δυνάμεων με χρήση του πίνακα Ιακωβιανής αποτελεί μια βάση που μπορεί να οδηγήσει σε περαιτέρω επιστημονική πρόοδο.

2.3 Εκτίμηση δυνάμεων αλληλεπίδρασης με χρήση εξωτερικού αισθητήρα δύναμης (Τρόπος 2)

Για τη διασφάλιση ακριβούς μέτρησης των δυνάμεων που ασκούνται στο ρομπότ, η χρήση ενός αισθητήρα δύναμης παρίσταται ως μια αξιόπιστη λύση για την επίλυση του υπό μελέτη προβλήματος. Επιπλέον, ένας κρίσιμος παράγοντας κατά την ανάπτυξη της λύσης ήταν ο τρόπος συγκράτησης του αντικειμένου από το ρομπότ. Στο πλαίσιο της συνεργασίας με τον ερευνητή Παπαδάκη Μάνο, παραχωρήθηκε η χρήση του συστήματος MIGHTY (σχεδιασμένο από την ερευνητική ομάδα του ΙΤΕ), για την ταυτόχρονη λειτουργία ως αισθητήρας δύναμης και συσκευή αναρρόφησης. Ο MIGHTY δεν αποτελεί έναν απλό αισθητήρα δύναμης, αλλά συνδυάζει την ικανότητα μέτρησης δυνάμεων με τη λειτουργία αρπάγης κενού αέρος, επιτρέποντας την ταυτόχρονη κάλυψη δύο βασικών αναγκών του υπό μελέτη προβλήματος. Η διπλή αυτή λειτουργία το καθιστά πολύτιμο εργαλείο για την επιτυχή ολοκλήρωση της έρευνας.

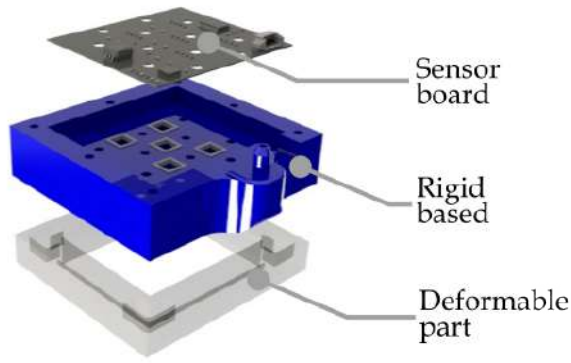
2.3.1 Τρόπος Λειτουργίας της MIGHTY

Το σύστημα MIGHTY είναι μια καινοτόμος αναρροφητική συσκευή που έχει αναπτυχθεί εξ ολοκλήρου από την ερευνητική ομάδα του ΙΤΕ για την ταυτόχρονη εκτίμηση δυνάμεων και την συγκράτηση αντικειμένων, όπως παρουσιάζεται στο [34]. Η συγκεκριμένη διάταξη που χρησιμοποιήθηκε, βρίσκεται σε πιο συμπαγή έκδοση για πειραματικούς σκοπούς και αποτελείται από ένα αναρροφητικό κύπελλο από σιλικόνη πολλαπλής σκληρότητας, το οποίο διαθέτει τέσσερις θαλάμους και πέντε αισθητήρες πίεσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7 και Σχήμα 2.8. Για τον έλεγχο της πίεσης μέσα στο κύπελλο με σκοπό την αναρρόφηση/προσκόλληση, χρησιμοποιείται ο έλεγχος ενεργοποίησης και απενεργοποίησης της αντλίας αναρρόφησης (έλεγχος on/off).

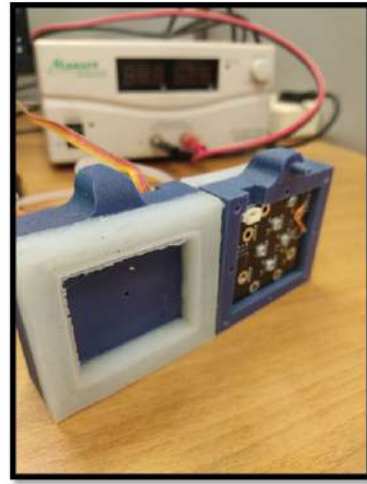
Ο αισθητήρας MIGHTY περιλαμβάνει αισθητήρες πίεσης με μετρήσεις που πραγματοποιούνται σε πραγματικό χρόνο για κάθε θάλαμο του κυπέλλου (βλ. Σχήμα 2.9). Το κύπελλο σιλικόνης έχει επανασχεδιαστεί έτσι ώστε να προσαρμόζεται καλύτερα σε ανώμαλες επιφάνειες, χωρίς την ανάγκη εφαρμογής μεγάλης δύναμης για τη δημιουργία κενού και ασφαλούς προσκόλλησης. Οι αλλαγές αυτές αυξάνουν την ικανότητα του συστήματος να κρατά αντικείμενα με σταθερότητα και ασφάλεια.

2.3.2 Χρήση του MIGHTY για Εκτίμηση Δυνάμεων Αλληλεπίδρασης πάνω στο Ρομπότ

Η εκτίμηση των δυνάμεων που ασκούνται στο ρομπότ μέσω του MIGHTY επιτυγχάνεται με τη χρήση των τεσσάρων θαλάμων του κυπέλλου σιλικόνης. Οι αισθητήρες πίεσης που είναι τοποθετημένοι σε κάθε θάλαμο μετρούν τις τιμές πίεσης σε πραγματικό χρόνο με **ρυθμό δειγματοληψίας στα 10Hz**. Παράλληλα, ένας πέμπτος αισθητήρας καταγράφει την πίεση που επικρατεί

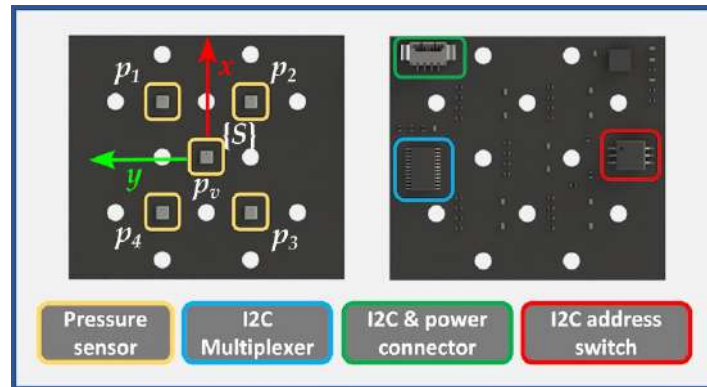


Σχήμα 2.7: Η δομή του MIGHTY



Σχήμα 2.8: Η μπροστά και πίσω όψη του αισθητήρα MIGHTY

στην κεντρική κοιλότητα, η οποία παράγεται από την αντλία κενού. Η πίεση αυτή διατηρείται σταθερή σε καθορισμένη τιμή μέσω ενός on-off ελεγκτή, εξασφαλίζοντας έτσι την πρόσφυση του ρομπότ στην επιφάνεια του αντικειμένου.



Σχήμα 2.9: Η πλακέτα αισθητήρων του MIGHTY.

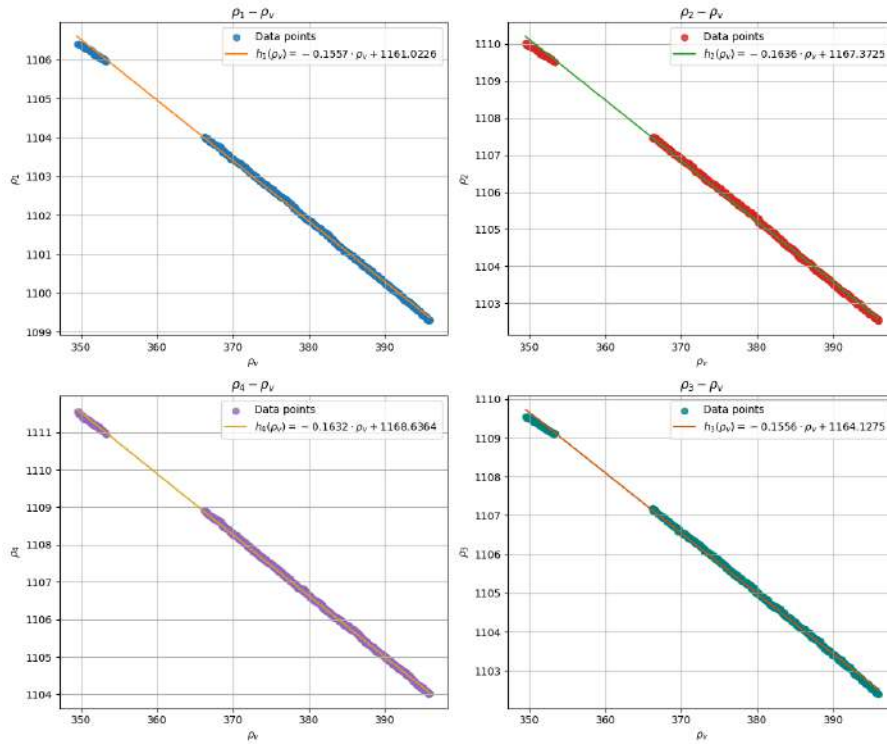
Για την εκτίμηση των δυνάμεων που ασκούνται από τον χρήστη στο σύστημα MIGHTY, χρησιμοποιείται η διαφορά πίεσης μεταξύ των αισθητήρων στους θαλάμους και της πίεσης κενού. Συγκεκριμένα, η δύναμη που ασκείται σε κάθε θάλαμο υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης:

$$f_i = c(\rho_i - h_i(\rho_v)), \quad i = 1, \dots, 4. \quad (2.10)$$

όπου $\rho_i \in \mathbb{R}$ είναι η πίεση που μετρείται από τον αισθητήρα στον i -οστό θάλαμο, και $\rho_v \in \mathbb{R}$ είναι η πίεση κενού στην κεντρική κοιλότητα, όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 2.9. Η συνάρτηση γραμμικής παλινδρόμησης $h_i(\rho_v) = a_i \rho_v + b_i$ χρησιμοποιείται για την αφαίρεση της μεροληψίας στις μετρήσεις, ενώ οι παράμετροι a_i , b_i , και $c \in \mathbb{R}$ ρυθμίζονται βάσει προκαθορισμένων μετρήσεων αναφοράς που αναφέρονται στη διαδικασία που ακολουθεί.

Η διαδικασία βαθμονόμησης των αισθητήρων αποτελείται από δύο μέρη:

1. Αρχικά, χωρίς την εφαρμογή βάρους, οι παράμετροι a_i και b_i υπολογίζονται λαμβάνοντας πολλαπλές μετρήσεις της πίεσης για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα μόλις προσκολληθεί η αρπάγη. Η διαδικασία της βαθμονόμησης των παραμέτρων a_i και b_i χρειάζεται αυστηρά να επαναλαμβάνεται για κάθε καινούρια επαφή με οποιοδήποτε αντικείμενο, καθώς η κατανομή των πιέσεων


 Σχήμα 2.10: Η διαδικασία της βαθμονόμησης των παραμέτρων a_i και b_i

εξαρτάται από το υλικό που προσκολλάται. Πιο συγκεκριμένα, κατά την εκκίνηση της αναρρόφησης λαμβάνονται αρκετές μετρήσεις πίεσης από κάθε θάλαμο για 10 δευτερόλεπτα με κύκλο ελέγχου στα 500 δείγματα ανά δευτερόλεπτο (2ms) και έπειτα με τη μέθοδο των Ελαχίστων Τετραγώνων (Least Squares) βρίσκουμε το κατάλληλο πρωτοβάθμιο πολυώνυμο ή αλλιώς την ευθεία (διαδικασία Γραμμικής Παλινδρόμησης (Linear Regression)) η οποία δίνει τους συντελεστές a_i , b_i για κάθε θάλαμο. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής εμφανίζεται και στο Σχήμα 2.10. Σφάλματα στη διαδικασία αυτή μπορούν να εμφανιστούν κυρίως στην περίπτωση που ασκηθεί οποιαδήποτε εξωτερική δύναμη στον αισθητήρα κατά τη διάρκεια της μέτρησης αυτής. Καθώς η αντλία λειτουργεί με έλεγχο on/off, για τις μετρήσεις όπου η αντλία ενεργοποιείται λαμβάνεται η τελευταία μέτρηση πριν την ενεργοποίησή της (μέθοδος sample and hold).

2. Για την εύρεση της παραμέτρου c , προσαρτάται ένα αντικείμενο γνωστού βάρους, το οποίο διανέμει τη δύναμη ισότιμα σε κάθε αισθητήρα, επιτρέποντας την εκτίμηση του c . Η εκτίμηση αυτή αρκεί να γίνει μια φορά. Πιο συγκεκριμένα για την εκτίμηση του συντελεστή c έγινε προσάρτηση βαριδίου μάζας $m(\text{kg})$ με τον αισθητήρα MIGHTY να "κοιτά" προς τα πάνω. Εφόσον το σύστημα που δημιουργούμε βρίσκεται σε ισορροπία, ο αισθητήρας θα έπρεπε να μετρά μια δύναμη $W_{\text{θεωρητική}} = mg(\text{N})$, όπου g η σταθερά της βαρύτητας σε m/s^2 , ενώ στην πραγματικότητα γίνεται η μέτρηση $W_{\text{πειραματική}}(\text{N})$. Έτσι μπορούμε να προσεγγίσουμε την πραγματική μέτρηση με την χρήση της παρακάτω σχέσης:

$$W_{\text{θεωρητική}} \propto W_{\text{πειραματική}} \Rightarrow W_{\text{θεωρητική}} = c \cdot W_{\text{πειραματική}}$$

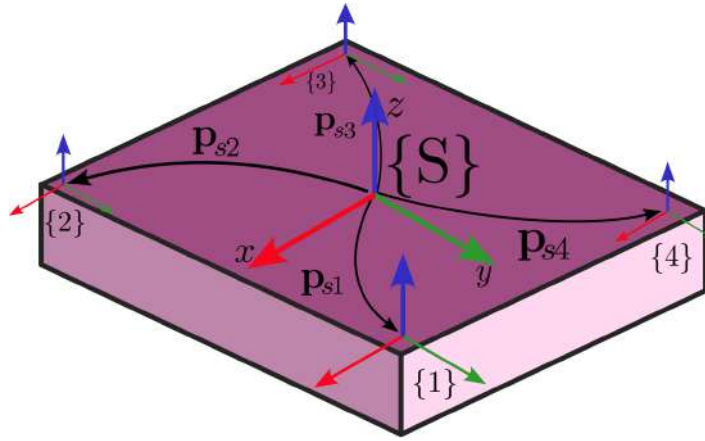
και λύνουμε ως προς τη παράμετρο c . Η ακρίβεια στην τιμή παραμέτρου αυτής έγκειται κυρίως στην ακριδή γνώση και μέτρηση της μάζας.

Παρατήρηση 1. Μια γενική παρατήρηση είναι πως όλες οι ευθείες εμφανίζονται με σχεδόν την ίδια κλίση. Σε αρκετές περιπτώσεις, η ανεύρεση διαφορετικής κλίσης λόγω τυχόν ασκούμενων δυνάμεων υποδείκνυε λανθασμένη βαθμονόμηση, γεγονός που οδηγούσε στην επανάληψη της διαδικασίας.

Με βάση τις εκτιμήσεις των f_i από την εξίσωση (2.10), η συνολική δύναμη $\mathbf{F}_s \in \mathbb{R}^6$ που ασκείται στο ρομπότ σε σχέση με το πλαίσιο αναφοράς του συστήματος $\{S\}$, υπολογίζεται με την βοήθεια της σχέσης (2.5) ως:

$$\mathbf{F}_s = \sum_{i=1}^4 \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 \\ \hat{\mathbf{p}}_{s\ i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ f_i \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^6, \quad (2.11)$$

όπου $\mathbf{I}_3$ ο μοναδιαίος πίνακας 3×3 και $\mathbf{p}_{s\ i} \in \mathbb{R}^3$ είναι η γνωστή θέση κάθε αισθητήρα πίεσης στα πλαίσια $\{i\}$ σε σχέση με το πλαίσιο αναφοράς $\{S\}$, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.11: Μεταφορά δυνάμεων από κάθε θάλαμο αισθητήρων στο κεντρικό πλαίσιο $\{S\}$

Τέλος, η δύναμη $\mathbf{F}_s$ μεταφέρεται από το πλαίσιο $\{S\}$ στο ΚΜ του ρομπότ (πλαίσιο $\{B\}$) κάνοντας ξανά χρήση της εξίσωσης (2.5), έχοντας :

$$\mathbf{F}_b = \mathbf{\Gamma}_{bs} \mathbf{F}_s, \quad (2.12)$$

όπου

$$\mathbf{\Gamma}_{bs} \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{bs} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \hat{\mathbf{p}}_{bs} \mathbf{R}_{bs} & \mathbf{R}_{bs} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}, \quad (2.13)$$

όπου $\mathbf{p}_{bs}$ η γνωστή γραμμική θέση του αισθητήρα σε σχέση με το ΚΜ του ρομπότ. Επιπλέον, σύμφωνα με το Σχήμα 1.14 ο πίνακας στροφής $\mathbf{R}_{bs}$ ταυτίζεται με τον βασικό πίνακα στροφής $\mathbf{R}_{y,90}$. Στο παρόν κεφάλαιο, δεν παρουσιάζονται πειράματα που αφορούν την αξιοπιστία των μετρήσεων του αισθητήρα MIGHTY μας και η λειτουργικότητα του συγκεκριμένου αισθητήρα έχει ήδη επαρκώς αποδειχθεί επιτυχημένη από προηγούμενη βιβλιογραφία [34]. Επομένως, η εκ νέου διεξαγωγή πειραμάτων με τον MIGHTY δεν θεωρείται αναγκαία στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας και τα αποτελέσματα της χρήσης του αισθητήρα αυτού θα παρουσιαστούν στο Κεφάλαιο 4, όπου γίνεται λεπτομερής ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου.

Κεφάλαιο 3

Έλεγχος Κίνησης και Ενδοτηκότητας του Ρομπότ

Βρισκόμαστε πλέον στο στάδιο όπου έχουμε τη δυνατότητα να λάβουμε το σήμα εισόδου δύναμης, το οποίο ασκείται από τον άνθρωπο στο ρομπότ μέσω του αντικειμένου, με τη διαδικασία που περιγράφηκε στην Ενότητα 2.3. Έστω πως έχουμε λάβει την F_b , ο επόμενος στόχος είναι, δεδομένου αυτού του σήματος, να μοντελοποιηθεί η συμπεριφορά του ρομπότ έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι τρεις προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 1.6. Σύμφωνα με το πρόβλημα που παρουσιάζεται προς επίλυση, η δύναμη αυτή που ασκείται μέσω του αντικειμένου χρειάζεται να μεταφραστεί σε οδηγίες κίνησης του ρομπότ στον χώρο. Η επίτευξη αυτού πραγματοποιείται μέσω της εφαρμογής ενός συστήματος υποχωρητικού ελέγχου, γνωστού ως "έλεγχος ενδοτικότητας."

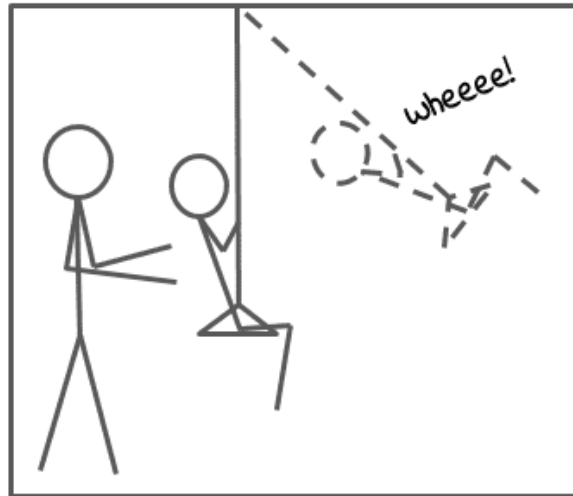
Το παρόν κεφάλαιο πραγματεύεται την ανάλυση της έννοιας του ελέγχου ενδοτικότητας και τη σημασία του στον έλεγχο κίνησης των ρομπότ. Αρχικά, θα παρουσιαστούν οι βασικές αρχές και η θεωρητική θεμελίωση του δυναμικού μοντέλου ενός ρομπότ, καθώς και οι κλασικές προσεγγίσεις στον έλεγχο κίνησης, που αναλύεται στο Παράρτημα Β'. Στη συνέχεια, μέσω εικονικών πειραμάτων, θα αξιολογηθεί η απόδοση του μοντέλου αυτού, με στόχο την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του ρομπότ κατά την αλληλεπίδραση με εξωτερικές δυνάμεις και διαταραχές.

Η ασφάλεια κατά τη διάρκεια της αλληλεπίδρασης ανθρώπου-ρομπότ παραμένει ένα από τα πιο κρίσιμα ζητήματα, ιδιαίτερα καθώς τα ρομπότ μοιράζονται τον ίδιο χώρο εργασίας με τους ανθρώπους. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1, τα πρώτα βιομηχανικά ρομπότ σχεδιάστηκαν για να λειτουργούν απομονωμένα από τους ανθρώπους, αποφεύγοντας τυχαίες επαφές, οι οποίες θεωρούνταν το ιδανικό σενάριο ασφάλειας. Τα ρομπότ αυτά ακολουθούσαν προκαθορισμένες διαδρομές, χωρίς ουσιαστική προσαρμογή στο περιβάλλον τους, βασιζόμενα σε ελέγχους κινηματικής και ροπής. Ωστόσο, οι παραδοσιακές μέθοδοι, αν και αποτελεσματικές σε σταθερά και προβλέψιμα περιβάλλοντα, περιορίζουν σημαντικά την προσαρμοστικότητα των ρομπότ σε περιβάλλοντα όπου υπάρχει ανθρώπινη παρουσία ή όπου απαιτείται αλληλεπίδραση με το περιβάλλον.

Ένα από τα κύρια ζητήματα που προκύπτουν από αυτήν τη δυναμική αλληλεπίδραση είναι η αποφυγή συγκρούσεων. Στην ιδανική περίπτωση, τα ρομπότ θα μπορούσαν να κινούνται χωρίς να έρχονται σε επαφή με ανθρώπους ή εμπόδια. Ωστόσο, η πραγματοποίηση αυτής της ιδέας περιορίζεται από τις ικανότητες των αισθητήρων και τους αλγόριθμους αναγνώρισης των ρομπότ. Σε περίπτωση σύγκρουσης, η ασφάλεια τόσο του ρομπότ όσο και του ανθρώπου εξαρτάται από τις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την πρόσκρουση, οι οποίες επηρεάζονται άμεσα από την ενδοτικότητα (admittance) και την εμπέδηση (impedance) του συστήματος.

Η μηχανική εμπέδηση αναφέρεται στην αντίστασης ενός συστήματος στην κίνηση όταν ασκείται μια εξωτερική δύναμη, ενώ η ενδοτικότητα είναι το αντίστροφο μέγεθος, εκφράζοντας την ευαισθησία του συστήματος στην παραγόμενη ταχύτητα για μια δεδομένη δύναμη. Μπορού-

με να φανταστούμε ένα παράδειγμα όπως το σπρώξιμο μιας κούνιας (Σχήμα 3.1): Η κούνια με υψηλή ενδοτικότητα απαιτεί μικρή δύναμη για να φτάσει σε μεγάλη ταχύτητα, ενώ η κούνια με χαμηλή ενδοτικότητα απαιτεί μεγαλύτερη δύναμη για την επίτευξη της ίδιας ταχύτητας.



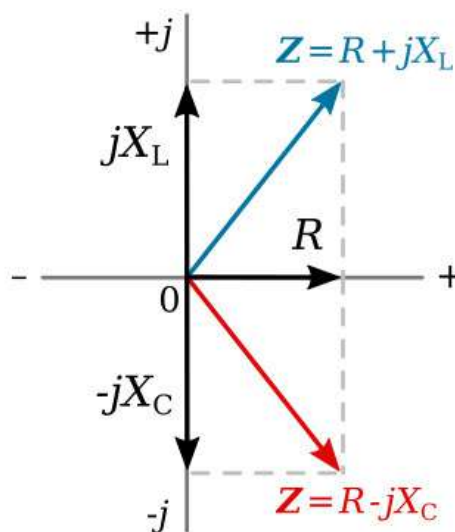
Σχήμα 3.1: Παράδειγμα Ενδοτικότητας : Αντίσταση στην κίνηση ανάλογα με την ενδοτικότητα του συστήματος (Πηγή: [18]).

Η ιδέα της εμπέδησης και της ενδοτικότητας δεν είναι πρωτόγνωρη και μπορεί να παρατηρηθεί παντού. Στον τομέα της ηλεκτρολογίας, η έννοια της εμπέδησης (Z) περιγράφει την σύνθετη αντίσταση και είναι συνδυασμός της ωμικής αντίστασης (R) και δυναμικών παραγόντων όπως η χωρητικότητα (X_C) ή η επαγωγική αντίσταση (X_L). Η μαθηματική έκφραση (Σχήμα 3.2) της εμπέδησης είναι:

$$Z = R \pm jX, \text{ όπου}$$

το j αναφέρεται στο φανταστικό μέρος της αντίστασης λόγω της αντιδραστικότητας του συστήματος. Αντίστοιχα, η ενδοτικότητα (Y) είναι το αντίστροφο της εμπέδησης και γράφεται ως:

$$Y = Z^{-1}$$



Σχήμα 3.2: Η εμπέδηση στο μιγαδικό επίπεδο (Πηγή: [18]).

Αυτές οι έννοιες έχουν αντίστοιχη εφαρμογή στη ρομποτική μέσω των μηχανικών-ηλεκτρικών αναλογιών που χρησιμοποιούνται για την κατανόηση και τη μοντελοποίηση των δυνάμεων και ταχυτήτων που αναπτύσσονται κατά την αλληλεπίδραση ρομπότ και περιβάλλοντος (βλ. Πίνακα 3.1). Για παράδειγμα, η δύναμη σε ένα μηχανικό σύστημα αντιστοιχεί στην τάση σε ένα ηλεκτρικό σύστημα, ενώ η ταχύτητα αντιστοιχεί στο ρεύμα.

Μηχανικές-Ηλεκτρικές Αναλογίες	
Μηχανική Μετάφραση	Ηλεκτρικό Ανάλογο
Δύναμη	Τάση
Ταχύτητα	Ρεύμα
Μετατόπιση	Φορτίο

Πίνακας 3.1: Αναλογίες μεταξύ μηχανικών και ηλεκτρικών συστημάτων (πηγή: [18]).

Συνοπτικά:

- Όταν η δύναμη αποτελεί την έξοδο του συστήματος ελέγχου (άρα ως είσοδος δίνεται θέση ή ταχύτητα), τότε κάνουμε λόγο για **εμπέδηση** και εκφράζεται από τη σχέση $F = Z \cdot V$.
- Όταν η θέση ή ο ρυθμός μεταβολής της αποτελεί την έξοδο του συστήματος ελέγχου (άρα ως είσοδος δίνεται δύναμη), τότε κάνουμε λόγο για **ενδοτικότητα**, η οποία περιγράφεται από την εξίσωση $V = Z^{-1} \cdot F$.

3.1 Έλεγχος ενδοτικότητας στα ρομπότ

Για λόγους απλούστευσης της ανάλυσης, θα θεωρήσουμε ότι ο χώρος εργασίας του ρομπότ είναι Ευκλείδειος. Έστω ότι $\mathbf{p}(t)$, $\dot{\mathbf{p}}(t)$, και $\ddot{\mathbf{p}}(t) \in \mathbb{R}^r$ αντιπροσωπεύουν τη θέση, ταχύτητα και επιτάχυνση του άκρου του βραχίονα στον r -διάστατο χώρο εργασίας, και $\mathbf{p}_d(t)$, $\dot{\mathbf{p}}_d(t)$, και $\ddot{\mathbf{p}}_d(t) \in \mathbb{R}^r$ είναι η επιθυμητή θέση, ταχύτητα και επιτάχυνση που σχεδιάζεται ή παράγεται σε πραγματικό χρόνο για την εκτέλεση της εργασίας.

Επιθυμούμε το ρομπότ να μετατοπίζεται όχι αναγκαστικά λόγω της επιθυμητής τροχιάς $\mathbf{p}_d(t)$ αλλά και λόγω της κίνησης που επάγεται λόγω της εξωτερικής δύναμης. Έστω, λοιπόν $\mathbf{d} \in \mathbb{R}^r$ η επαγόμενη μετατόπιση που παράγεται μέσω ενός δυναμικού μοντέλου ενδοτικότητας (το δυναμικό μοντέλο παρουσιάζεται ελάχιστα πιο μετά στην Εξ.(3.3).)

Η έκφραση αυτή μπορεί μαθηματικά να γραφτεί εάν χρησιμοποιήσουμε μια νέα μεταβλητή που θα την ονομάζουμε **θέση αναφοράς** και ορίζεται σύμφωνα με την παραπάνω πρόταση ως εξής :

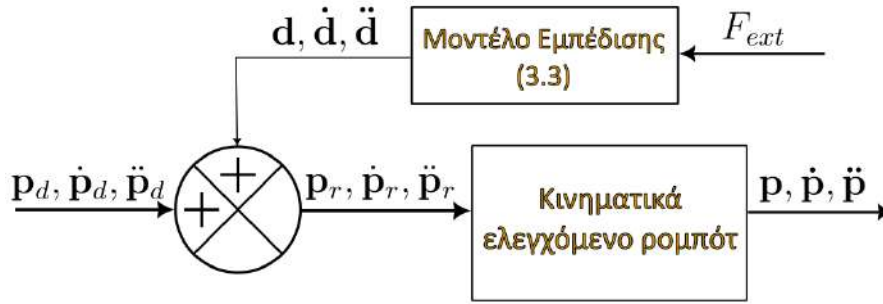
$$\mathbf{p}_r \triangleq \mathbf{p}_d + \mathbf{d} \quad (3.1)$$

Με βάση αυτήν την πρόταση το σφάλμα θέσης $\mathbf{e}$ γράφεται ως :

$$\mathbf{e} = \mathbf{p} - \mathbf{p}_r \quad (3.2)$$

Παρατηρήστε πως σε περίπτωση που το ρομπότ δεν υποστεί καμία άσκηση δύναμης (άρα $\mathbf{d} = \mathbf{0}$), η κίνηση του άκρου θα βασίζεται αποκλειστικά από προκαθορισμένη τροχιά του, δηλαδή $\mathbf{p}_r = \mathbf{p}_d$.

Για την επίτευξη κατάλληλου ελέγχου, ώστε το σύστημα κλειστού βρόχου να συμπεριφέρεται όπως ένα σύστημα μάζας-απόσβεσης-ελατηρίου, σε σχέση με την εξωτερική διαταραχή $\mathbf{F}_{ext}$,



Σχήμα 3.3: Σχήμα μπλοκ ελέγχου ενδοτικότητας (admittance) με νόμο ελέγχου επιθυμητής τροχιάς.

δίνεται η Διαφορική Εξίσωση που μοντελοποιεί το σύστημα αυτό είναι :

$$\mathbf{M}_d \cdot \ddot{\mathbf{d}} + \mathbf{D}_d \cdot \dot{\mathbf{d}} + \mathbf{K}_d \cdot \mathbf{d} = \mathbf{F}_{ext} \quad (3.3)$$

Οι παράμετροι $\mathbf{K}_d$, $\mathbf{D}_d$ και $\mathbf{M}_d$ αντιπροσωπεύουν τη δυναμική συμπεριφορά του άκρου του ρομπότ, και ορίζονται ως εξής:

- Ο όρος "ελατηρίου" $\mathbf{K}_d \in \mathbb{R}^{n \times n}$ είναι ο επιθυμητός πίνακας ακαμψίας του άκρου του ρομπότ, που καθορίζει την αντίσταση του συστήματος στην μετατόπιση όταν ασκούνται εξωτερικές δυνάμεις και είναι υπεύθυνος για την συμπεριφορά του ελατηρίου του συστήματος.
- Ο όρος "απόσβεσης" $\mathbf{D}_d \in \mathbb{R}^{n \times n}$ είναι ο επιθυμητός πίνακας απόσβεσης του άκρου του ρομπότ, ο οποίος ελέγχει τον ρυθμό εξασθένισης των ταλαντώσεων ή αποκλίσεων από την επιθυμητή τροχιά.
- Ο όρος "αδράνειας" $\mathbf{M}_d \in \mathbb{R}^{n \times n}$ είναι ο επιθυμητός πίνακας αδράνειας του άκρου του ρομπότ, ο οποίος περιγράφει την αντίσταση του συστήματος στις αλλαγές ταχύτητας όταν εφαρμόζονται εξωτερικές δυνάμεις.

Οι πίνακες αυτοί μπορούν να επιλεγούν ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εργασίας και συνήθως επιλέγονται ως διαγώνιοι πίνακες, ώστε να απλοποιηθεί η δομή ελέγχου και να διασφαλιστεί η αποσύζευξη μεταξύ των αξόνων κίνησης.

Ο έλεγχος ενδοτικότητας βασίζεται στην υπόθεση ότι το ρομπότ ελέγχεται κινηματικά. Έστω ότι $\mathbf{p}_r(t)$, $\dot{\mathbf{p}}_r(t)$, $\ddot{\mathbf{p}}_r(t)$ αντιπροσωπεύουν την αναφορά κίνησης που παρακολουθείται μέσω του διαθέσιμου κινηματικού ελεγκτή. Σε αυτή την περίπτωση, το περιβάλλον του ρομπότ αντιμετωπίζεται ως μηχανική εμπέδηση, καθώς κατά την αλληλεπίδραση μεταξύ δύο φυσικών συστημάτων, το καθένα από αυτά λειτουργεί συμπληρωματικά προς το άλλο [22]. Ως εκ τούτου, οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης $\mathbf{F}_{ext}$ θεωρούνται μετρήσιμες μέσω κατάλληλου αισθητήρα.

Υπό αυτές τις συνθήκες, για την επίτευξη του στόχου ελέγχου, χρησιμοποιείται το δυναμικό σύστημα (3.3) το οποίο λύνοντας το ως προς $\ddot{\mathbf{d}}$ παράγει ως αποτέλεσμα την επιθυμητή μετατόπιση και ταχύτητα $\mathbf{d}(t)$, $\dot{\mathbf{d}}(t) \in \mathbb{R}^r$ σε πραγματικό χρόνο, με είσοδο την μετρούμενη δύναμη $\mathbf{F}_{ext}$:

$$\ddot{\mathbf{d}} = -\mathbf{M}_d^{-1} \left(\mathbf{F}_{ext} - (\mathbf{D}_d \dot{\mathbf{d}} + \mathbf{K}_d \mathbf{d}) \right) \quad (3.4)$$

Η αναφορά κίνησης $\mathbf{p}_r(t)$, $\dot{\mathbf{p}}_r(t)$, $\ddot{\mathbf{p}}_r(t)$ υπολογίζεται με βάση την εξίσωση 3.1 ως εξής:

$$\mathbf{p}_r(t) = \mathbf{p}_d(t) + \mathbf{d}(t) \quad (3.5)$$

$$\dot{\mathbf{p}}_r(t) = \dot{\mathbf{p}}_d(t) + \dot{\mathbf{d}}(t) \quad (3.6)$$

$$\ddot{\mathbf{p}}_r(t) = \ddot{\mathbf{p}}_d(t) + \ddot{\mathbf{d}}(t) \quad (3.7)$$

Στην εξίσωση (3.7), το $\ddot{\mathbf{d}}(t)$ υπολογίζεται από την εξίσωση (3.4), ενώ οι $\dot{\mathbf{d}}_d$ και $\mathbf{d}$ στις εξισώσεις (3.6) και (3.5) υπολογίζονται μέσω ολοκλήρωσης της (3.4).

Δεδομένου των εξισώσεων (3.5),(3.6),(3.7), το ρομπότ είναι κινηματικά ελεγχόμενο από κάποια επιθυμητή τροχιά $\mathbf{p}_d(t)$. Για την επίτευξη της κίνησης αυτής χρειάζεται η υλοποίηση κάποιου νόμου έλεγχου κίνησης. Κάποιες αναλυτικές μέθοδοι για τέτοιου είδους έλεγχο παρουσιάζονται στο παράρτημα Β'.

Παρατήρηση 2. Αξιίζει να σημειωθεί πως δεν είναι απαραίτητο να υπάρχει το σήμα της επιθυμητής τροχιάς $\mathbf{p}_d(t)$ για να κινηθεί το ρομπότ. Σε αυτήν την περίπτωση το ρομπότ κινείται εξ ολοκλήρου με βάση το επιθυμητό δυναμικό μοντέλο που χρησιμοποιείται και εξαρτάται αποκλειστικά από τις δυνάμεις που του ασκούνται. Εξάλλου, για το πρόβλημα μετακίνησης αντικειμένου χρειάζεται να ληφθεί υπόψιν μόνο η πρόθεση του ανθρώπου και καμία άλλη προδιαγεγραμμένη κίνηση.

Γενικά, η αποτελεσματικότητα και η ευστάθεια του ελεγκτή ενδοτικότητας εξαρτώνται από την υπόθεση ότι το ρομπότ ελέγχεται ιδανικά κινηματικά. Στις πραγματικές εφαρμογές, η επίδοση του ελεγκτή εξαρτάται από την ποιότητα του συστήματος παρακολούθησης τροχιάς του ρομποτικού βραχίονα.

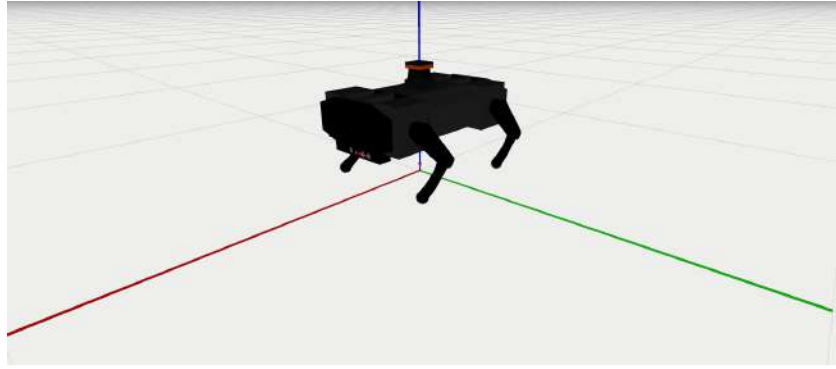
3.2 Προσομοίωση ελέγχου κίνησης και ενδοτικότητας σε τετράποδο ρομπότ και αποτελέσματα

Η εκπόνηση των προσομοιώσεων ελέγχου κίνησης και ενδοτικότητας έγινε με το περιβάλλον προσομοίωσης RViz και χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του τετράποδου ρομπότ A1 όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4. Σε όλες τις προσομοιώσεις εφαρμόστηκε έλεγχος "Υψηλού επιπέδου" που δίνει στα τετράποδα ρομπότ την δυνατότητα δέχονται στον χώρο εργασίας εντολές μετατόπισης και προσανατολισμού στο επίπεδο που βαδίζουν μέσω ROS. Οι εντολές αυτές μπορεί να είναι γραμμικής ταχύτητας v_x, v_y ή και γωνιακής ταχύτητας ω_z . Ο βρόγχος ελέγχου είχε οριστεί στα 2ms και η υλοποίηση όλων των νόμων ελέγχου έγινε χρησιμοποιώντας Python με το μοντέλο του ρομπότ (σχεδιαστικό και κινηματικό) από το [16].

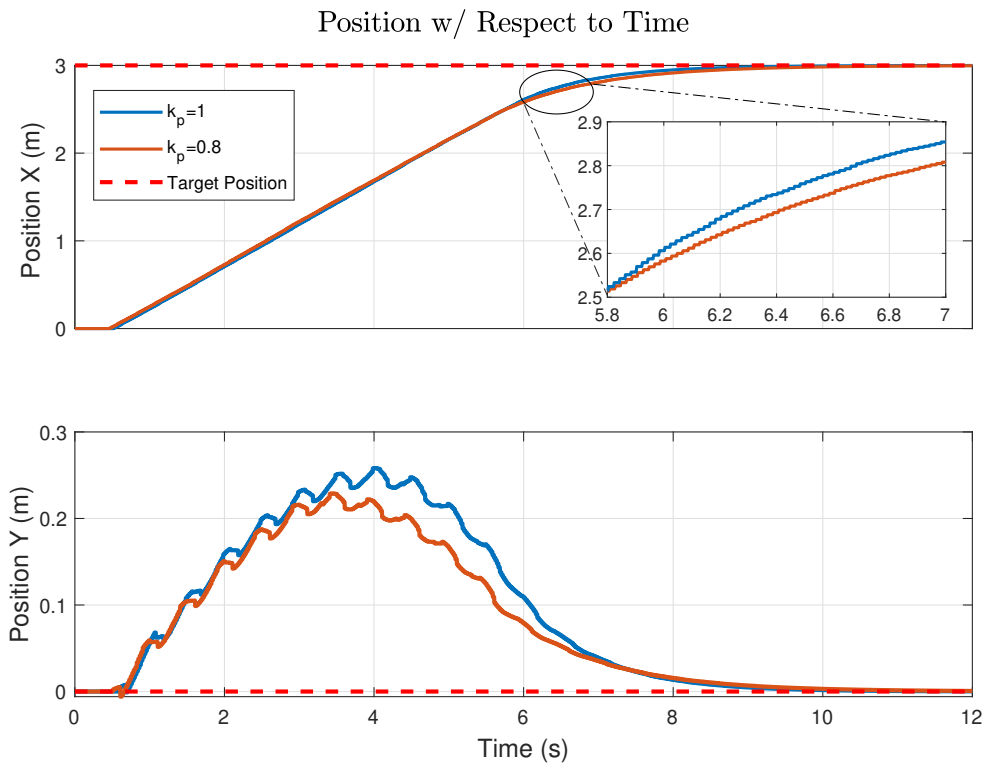
Για την εφαρμογή ελέγχου κίνησης σε οποιοδήποτε πείραμα θεωρούμε τα διανύσματα που αντιπροσωπεύουν την πραγματική γενικευμένη θέση $\mathbf{p}_b = [p_x, p_y, \theta_z]$, την ταχύτητα $\mathbf{v}_b = [v_x, v_y, \omega_z]$ που λαμβάνουμε μέσω της προσομοίωσης και την γενικευμένη δύναμη $\mathbf{F}_b = [F_x, F_y, \tau_z]$ που μπορεί να εφαρμοστεί στο σύστημα, εκφρασμένα ως προς το πλαίσιο $\{B\}$ (το Κέντρο Μάζας του ρομπότ) με αδρανειακό πλαίσιο αναφοράς την αρχή του συστήματος της προσομοίωσης, ακριβώς όπως απεικονίζεται το τετράποδο στο Σχήμα 3.4. Βέβαια, χρειάζεται να σημειωθεί πως για την ενότητα αυτή, τα πειράματα επικεντρώνονται μόνο πάνω στην γραμμική ταχύτητα καθώς επιπλοκές στον προσανατολισμό, λόγω του προφίλ κίνησης των τετράποδων, επηρεάζουν τα αποτελέσματα της γραμμικής θέσης και ταχύτητας και επομένως ο προσανατολισμός του ρομπότ για τα παρακάτω πειράματα είναι $\theta_z = 0$. Ωστόσο, μια προσομοίωση που εμπλέκει το πρόβλημα παρακολούθησης τροχιάς τόσο θέσης όσο και προσανατολισμού βρίσκεται στο Παράρτημα Β'.

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ελέγχου κίνησης και ενδοτικότητας στο τετράποδο ρομπότ A1, για να μελετηθεί η συμπεριφορά του τετράποδου τόσο σε συνθήκες κλασικού ελέγχου όσο και ενδοτικότητας με τελικό σκοπό την πλήρη κατανόηση της ανταπόκρισης του ελέγχου ενδοτικότητας πάνω στα τετράποδα ρομπότ. Για την πλήρη κατανόηση της λειτουργίας των δύο βασικών νόμων ελέγχου προτείνεται η ανάγνωση του Παραρτήματος Β'.

Διεξήχθησαν τρία πειράματα για την επίδειξη και αξιολόγηση των δύο μεθόδων ελέγχου που αναλύθηκαν παραπάνω, με σκοπό την κατανόηση των νόμων αυτών και την ανταπόκρισή τους.



Σχήμα 3.4: Το ρομπότ Unitree A1 στο εικονικό περιβάλλον RViz

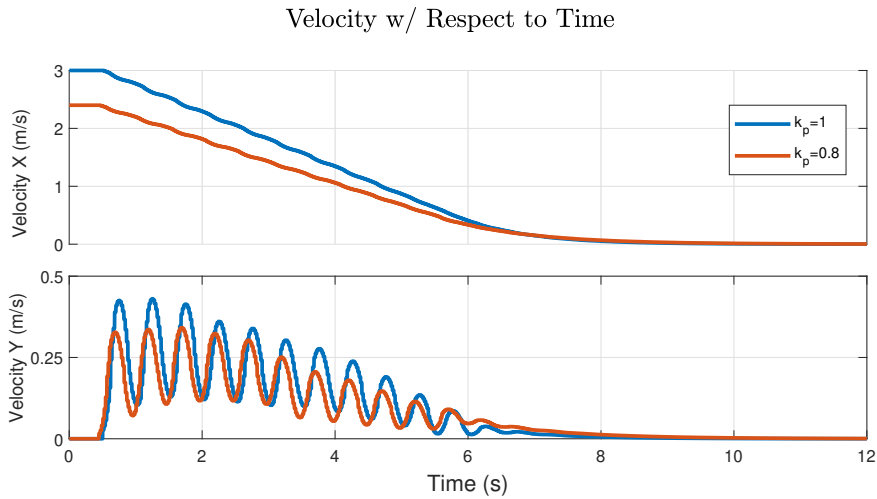


Σχήμα 3.5: Πρόβλημα Προσέγγισης στόχου με διαφορετικά κέρδη : Θέση ως προς τον χρόνο

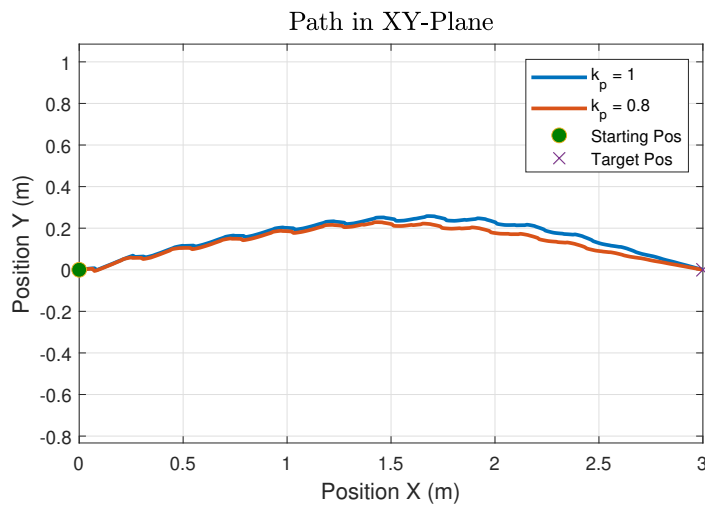
Πρόβλημα Προσέγγισης στόχου με διαφορετικά κέρδη

Στο πρώτο πείραμα, δίνεται το κλασικό πρόβλημα προσέγγισης στόχου στον χώρο εργασίας από το σημείο $[0, 0]$ στο σημείο $\mathbf{p}_T = [3, 0]$ για δύο διαφορετικά αναλογικά κέρδη $k_p = 0.8, 1.0$ με την διάρκεια προσομοίωσης στα $t_{total} = 12s$. Το πρόβλημα αυτό επιλέχθηκε για την ένδειξη μιας αρκετά απλής κίνησης χωρίς επιρροές από εξωτερικές δυνάμεις με τα κέρδη επιλεγμένα ώστε το ρομπότ να μην ξεπερνά την πραγματική μέγιστη εκ φύσεώς του ταχύτητα [40] (τα 3.3 m/s), ενώ ταυτόχρονα να αναδεικνύεται η ελάχιστα πιο γρήγορη σύγκληση προς στον στόχο λόγω αυτών. Τα Σχήματα 3.5, 3.6 δείχνουν ακριδώς την θέση και την ταχύτητα του ρομπότ ως προς τον χρόνο και το Σχήμα 3.7 σχεδιάζει το μονοπάτι που ακολούθησε το ρομπότ.

Παρατήρηση 3. Αξίζει να σημειωθεί ότι ακόμη κι εάν ο στόχος ήταν η κίνηση στον άξονα X παρουσιάζεται και μια ανεπιθύμητη κίνηση στον άξονα Y η οποία οφείλεται στα "παραπατήματα" λόγω του προφίλ κίνησης του ρομπότ. Η κίνηση αυτή παρουσιάζεται σε όλα τα σχήματα και εμφανίζει μάλιστα μικρές ταλαντώσεις οι οποίες φθίνουν μαζί με την συνολική κίνηση του ρομπότ με τα κέρδη να μην αλλάζουν ιδιαίτερα την κυματομορφή.



Σχήμα 3.6: Πρόβλημα Προσέγγισης στόχου με διαφορετικά κέρδη : Ταχύτητα ως προς τον χρόνο



Σχήμα 3.7: Κάτοψη κίνησης του ρομπότ στο πρόβλημα προσέγγισης στόχου

Στο δεύτερο και τρίτο πείραμα εισάγουμε και την έννοια του Ελέγχου ενδοτικότητας ενώ ταυτόχρονα διατηρούμε και απλοποιούμε το πρόβλημα προσέγγισης στόχου σε πρόβλημα σταθεροποίησης με σκοπό την κατανόηση της συμπεριφοράς του ρομπότ απέναντι σε εξωτερικές δυνάμεις. Το πρόβλημα σταθεροποίησης (stabilisation) είναι μια ειδική περίπτωση του προβλήματος προσέγγισης στόχου όπου στόχος μας είναι η ίδια η θέση του ρομπότ. Εφόσον σε κάθε νέο πείραμα το ρομπότ ξεκινά από την θέση $[0, 0]$, ο στόχος μας p_T θα είναι επίσης το $[0, 0]$. Τα πειράματα είναι δύο καθώς επιθυμούμε να δούμε την σημαντικότητα του πίνακα ακαμψίας K_d στην απόκριση του ρομπότ από την άσκηση της ίδιας δύναμης F_b . Για τις προσομοιώσεις του ελέγχου ενδοτικότητας, ορίστηκαν οι ακόλουθες παράμετροι του πίνακα μάζας $M_d = \text{diag}(12, 12, 1.5)$, του πίνακα απόσβεσης $D_d = \text{diag}(20, 20, 5)$, και του πίνακα ακαμψίας K_d . Στην περίπτωση με ελατήριο, ο πίνακας ακαμψίας K_d διαμορφώνεται ως $K_d = \text{diag}(20, 20, 5)$, ενώ χωρίς ελατήριο $K_d = 0_{3 \times 3}$. Η διάρκεια των πειραμάτων είναι $t_{total} = 10s$ και ασκείται δύναμη $F_b = [20, 0]N$ μόνο για τα πρώτα τρία δευτερόλεπτα.

Για το δεύτερο πείραμα μπορούμε να παρατηρήσουμε τα εξής στοιχεία : Από τα Σχήματα 3.8α' και 3.9α' παρατηρούμε πως σύμφωνα με την μπλέ γραμμή, η άσκηση της δύναμης αυτής μετατόπισε το ρομπότ κατά τον άξονα X με μικρές ταλαντωτικές κινήσεις στον άξονα Y λόγω του προφίλ κίνησης και λόγω της δύναμης του ελατηρίου επέστρεψε στην αρχική του θέση. Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή είναι η γραφική αναπαράσταση του μοντέλου mass-spring-damper και δείχνει πως θα συμπεριφερόταν το ρομπότ ιδανικά εάν ασκούσαμε την ίδια δύναμη σε ένα σώμα

μάζας M_d με όρο απόσβεσης D_d και σκληρότητα ελατηρίου K_d . Αξίζει να σημειωθεί πως εξ ορισμού της Εξίσωσης (3.2), η μπλέ γραμμή προσπαθεί να προσεγγίζει όσο το δυνατό περισσότερο μπορεί την μπλε. Η διαφορά μεταξύ της μπλε και τις κόκκινης διακεκομμένης γραμμής οφείλεται στο γεγονός ότι το πραγματικό μας σύστημα μας κινείται με συγκεκριμένο προφίλ κίνησης και τα χαρακτηριστικά του M_d , D_d , K_d αποκλίνουν από τα επιθυμητά χαρακτηριστικά που έχουμε ορίσει, ενώ ταυτόχρονα χρειάζεται να αντιληφθούμε πως η μοντελοποίηση διαχειρίζεται το "δήθεν ρομπότ" μας, ως μια μάζα χωρίς περιορισμό κίνησης πέραν από αυτόν που ορίζουμε εμείς. Επιπλέον παρατηρούμε πως για περίπου 0.5s από την άσκηση της δύναμης αυτής η θέση του ρομπότ συνεχίζει ελάχιστα να απομακρύνεται από τον στόχο μας και σε αυτό οφείλεται κυρίως στην αδράνεια του συστήματος.

Το εντυπωσιακό αυτού του πειράματος είναι πως βάση μιας εικονικής δύναμης μπορούμε να ορίσουμε τον τρόπο ανταπόκρισης του άρα μπορούμε να πούμε πως η επαγόμενη μετατόπιση που παράγεται μέσω ενός δυναμικού μοντέλου ενδοτικότητας είναι επιθυμητή. Αυτή είναι και η αρχική ιδέα που εμπνέει το προτεινόμενο σχήμα ελέγχου που παρουσιάζεται στο 4 την χρήση ενός ελεγκτή ενδοτικότητας. Η κεντρική ιδέα αυτή βέβαια αποτυπώνεται και βασίζεται στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο τρίτο πείραμα.

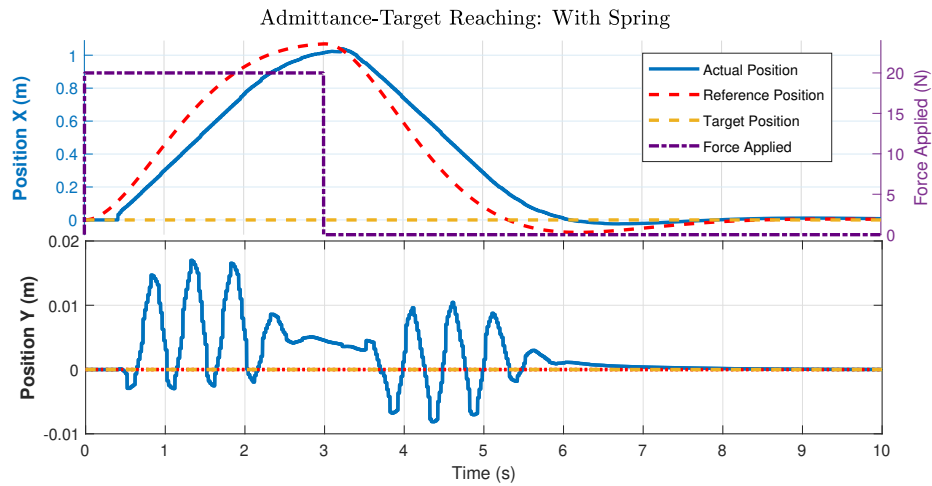
Στο τρίτο πείραμα, στα Σχήματα 3.8β' και 3.9β' παρατηρούμε ότι ακόμα κι εάν επιθυμητός στόχος μας είναι ο προσορισμός στο $p_T = [0, 0]$ η πραγματική θέση (μπλέ γραμμή) φθάνει στο σημείο $[3, 0]$. Ο λόγος είναι πως με την απώλεια του ελατηρίου K_d , δεν ασκείται κάποια δύναμη στο μοντέλο 3.3 για να επιστρέψει πίσω στην αρχική του θέση. Επίσης κατά την βάδιση στον άξονα X, το ρομπότ εμφανίζει ταλαντωτικές κινήσεις στον άξονα Y οι οποίες δεν οφείλονται στην άσκηση της δύναμης άλλα στο προφίλ κίνησης, δηλαδή την προσπάθεια του ρομπότ να μιμηθεί την κίνηση του μοντέλου στον άξονα X. Η συμπεριφορά του ρομπότ στο πείραμα αυτό είναι η βάση για τον προτεινόμενο ελεγκτή καθώς σύμφωνα με την γενική ιδέα του προβλήματος που περιγράφεται στην ενότητα 1.6, επιθυμούμε την κίνηση του ρομπότ μόνο κατά την διάρκεια που ασκείται μια δύναμη. Ωστόσο για τα υπόλοιπα επιθυμητά χαρακτηριστικά της λύσης του προβλήματος χρειάζεται μια προσέγγιση που να εκμεταλλεύεται όσο το καλύτερο μπορεί τους όρους του μοντέλου mass-spring-damper καθώς και να εφαρμοστούν επιπλέον τεχνικές για να πληροί τις προϋποθέσεις που αναγράφονται στο 1.6.

Παρατήρηση 4. Αξίζει να σημειωθεί πως και στις δύο τελευταίες προσομοιώσεις το ρομπότ κατάφερε να προσεγγίσει την τροχιά αναφοράς. Αυτό συνέδη εφόσον ο όρος απόσβεσης D_d ήταν θετικά ορισμένος, επομένως ακόμα και στην περίπτωση που δεν υπήρξε ο όρος του ελατηρίου (βλέπε Σχήμα 3.9β') το ρομπότ τόσο πραγματικά όσο και ψηφιακά συγκλίνει κοντά σε ένα σημείο και σταματά. Βάση της παρατήρησης αυτής συμπεραίνουμε πως ο όρος της απόσβεσης λαμβάνει σημαντικό ρόλο στην εκμετάλλευση της ενέργειας που δίνεται από την άσκηση μιας δύναμης.

3.2.1 Συμπεράσματα

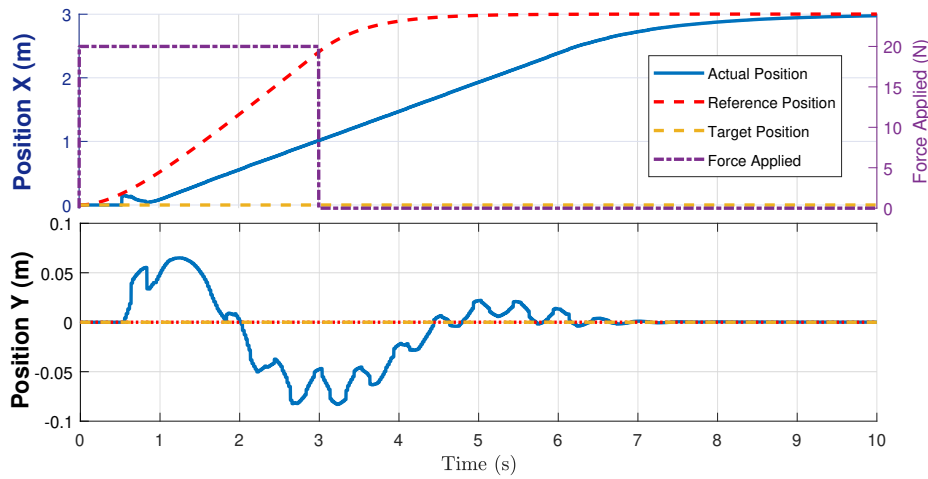
Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των πειραμάτων ελέγχου κίνησης και ενδοτικότητας στο τετράποδο ρομπότ A1, με σκοπό την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του κλασικού ελέγχου κίνησης σε σχέση με τον έλεγχο ενδοτικότητας. Στόχος των πειραμάτων ήταν να αναδειχθεί η συμπεριφορά του ρομπότ σε συνθήκες αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον, με έμφαση στην απόκριση από εξωτερικές δυνάμεις.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο κλασικός έλεγχος προσέγγισης στόχου με διαφορετικά αναλογικά κέρδη προσφέρουν συγκλίνουσα απόδοση ως προς την προσέγγιση του στόχου, ενώ η χρήση διαφορετικών κερδών επηρέασε το ρυθμό σύγκλισης χωρίς να υπερβαίνεται η μέγιστη ταχύτητα του ρομπότ. Η υιοθέτηση της μεθόδου ελέγχου ενδοτικότητας, τόσο στην περίπτωση χρήσης ελατηρίου όσο και χωρίς αυτό, έδειξε ότι η "αντίδραση" του ρομπότ σε εξωτερικές δυνάμεις μπορεί να ελεγχθεί με επιθυμητό τρόπο. Το πείραμα με το ελατήριο υπογράμμισε τη



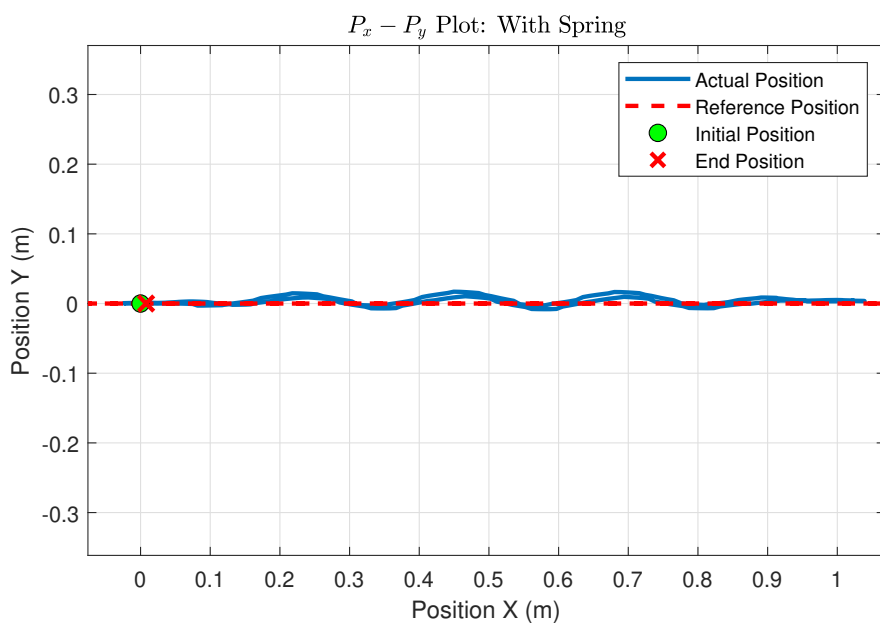
(α') Πείραμα με Ελατήριο

Admittance-Target Reaching: Without Spring

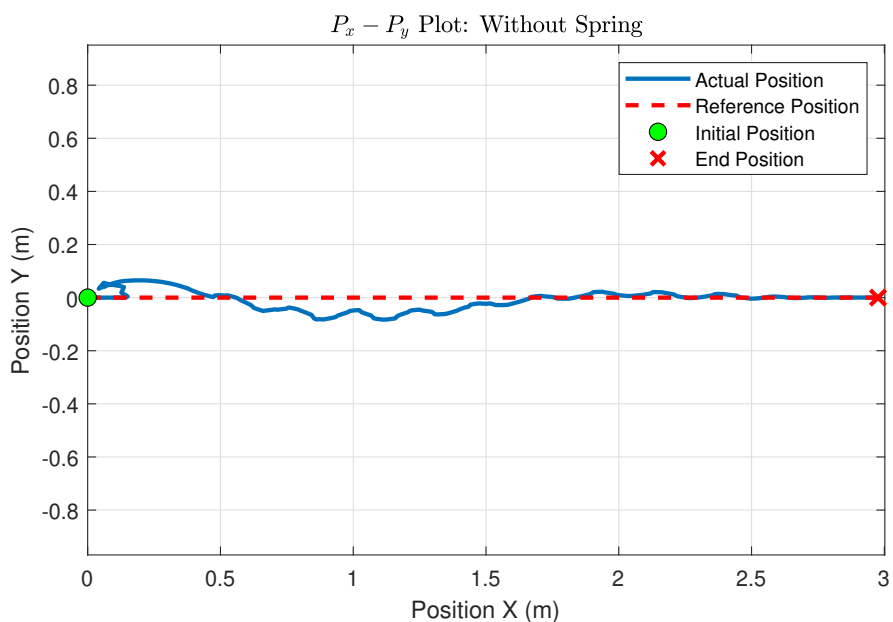


(β') Πείραμα χωρίς Ελατήριο

Σχήμα 3.8: Γραφική παράσταση Θέσης και Δύναμης ως προς τον χρόνο



(α') Κάτοψη με Ελατήριο



(β') Κάτοψη χωρίς Ελατήριο

Σχήμα 3.9: Σύγκριση της κάτοψης με και χωρίς ελατήριο

σημασία του όρου ακαμψίας K_d για την επιστροφή του ρομπότ στην αρχική του θέση, ενώ χωρίς το ελατήριο, το ρομπότ παρέμεινε μακριά από τον στόχο του λόγω της απουσίας του.

Η παρούσα μελέτη αποδεικνύει ότι ο έλεγχος ενδοτικότητας παρέχει ένα αποτελεσματικό πλαίσιο για την απόκριση του ρομπότ σε εξωτερικές διαταραχές, επιτρέποντας την ακριβή ρύθμιση της κίνησης σε σχέση με τις εφαρμοζόμενες δυνάμεις. Η χρήση ελατηρίου στον έλεγχο ενδοτικότητας προσφέρει σταθεροποίηση και επιστροφή του ρομπότ στην αρχική θέση, ενώ χωρίς αυτό, η συμπεριφορά του ρομπότ χαρακτηρίζεται από ελεγχόμενη αλλά σταθερή μετατόπιση. Το κεφάλαιο αυτό, με την ολοκλήρωση των πειραμάτων, αναδεικνύει τη σημασία του ελέγχου ενδοτικότητας ως καθοριστικό παράγοντα για την ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία των τετράποδων ρομπότ σε περιβάλλοντα αλληλεπίδρασης υψηλής απαίτησης όπως της συνεργατικής μεταφοράς αντικειμένων.

Γιατί λοιπόν δεν χρησιμοποιείται απλά ένας ελεγκτής ενδοτικότητας για την λύση του προβλήματος της διπλωματικής αυτής; Σε μια πραγματική εφαρμογή, μας ενδιαφέρει αρκετά το μέγεθος της ενέργειας που χάνεται σε σχέση με την ενέργεια που διαχέεται από το σύστημα. Με άλλα λόγια μας ενδιαφέρει η μεταφορά ενέργειας από τον άνθρωπο στο ρομπότ, με το μέγεθός της εξαρτάται πρωτίτως από την επιλογή των παραμέτρων της εξίσωσης (3.3) και δευτερευόντως από τα πραγματικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε κίνησης του ρομπότ.

Για παράδειγμα, μπορούμε να παρατηρήσουμε πως για μεγάλες τιμές του όρου απόσβεσης D_d υπάρχει μεγάλη ευκολία ως προς την ελεγχσιμότητα. Αυτό όμως αντιστοιχεί με το μειονέκτημα της μεγάλης κατανάλωσης ενέργειας για απλές επιθυμητές κινήσεις όπως το σπρώξιμο του ρομπότ και η ανάπτυξη ταχύτητάς του.

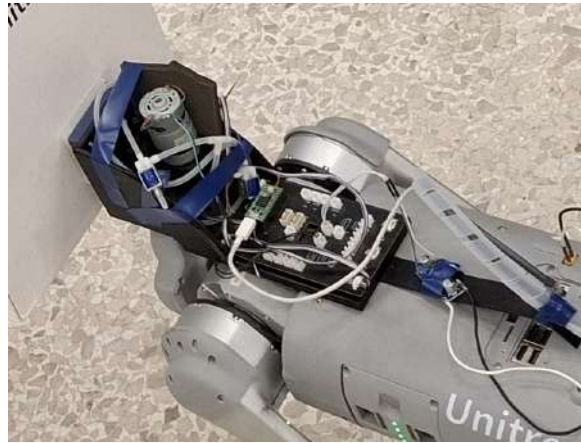
Από την άλλη μεριά, για μικρές τιμές του ίδιου όρου να υπάρχει δυσκολία στον έλεγχο από τον άνθρωπο να σταματήσει το σύστημα μιας και είναι επιρρεπής σε ταλαντώσεις. Ακόμα και στην περίπτωση επιλογής αρνητικής τιμής του όρου αυτού, ένα σπρώξιμο μπορεί να επιφέρει ενέργεια στο σύστημα με αποτέλεσμα την αυτόνομη κίνηση του συστήματος, με ελάχιστη ανθρώπινη κατανάλωση όμως το σύστημα μεταδίνει πολύ γρήγορα σε εκθετικά αυξανόμενες ταλαντώσεις.

Η λογική πίσω από την επιλογή αυτής της συγκεκριμένης μεταβλητότητας του συντελεστή απόσβεσης καθώς και τυχόν επιπλέον εικονικών ωθήσεων που μπορούν να γίνουν λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις δυνατότητες του συστήματος, καθιστά έγκυρη την επιθυμία για ανάλυση και έρευνα πάνω σε έναν ελεγκτή που μπορεί να επιλύσει τους προβληματισμούς που αναφέρθηκαν παραπάνω. Το σχήμα ελέγχου που προτείνεται στο παρακάτω κεφάλαιο καθίσταται ως μια αρκετά πιο σύνθετη λύση από έναν απλό ελεγκτή ενδοτικότητας.

Κεφάλαιο 4

Προτεινόμενο σχήμα ελέγχου

Έστω πως το τετράποδο ρομπότ δέχεται εντολές ταχύτητας $\mathbf{v}_c(t)$ στον χώρο εργασίας και τοποθετείται πλαίσιο αναφοράς $\{B\}$ στο κέντρο μάζας (ΚΜ) του ρομπότ όπως έχει πως έχει προαναφερθεί στις Ενότητες 1.6,3.2. Για την συγκράτηση του αντικειμένου και για την μέτρηση των δυνάμεων, το σύστημα MIGHTY που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 2 βρίσκεται τοποθετημένο πάνω στο ρομπότ δίνοντας μετρήσεις πίεσης $\rho_i, \rho_v \in \mathbb{R}$ με $i = 1, \dots, 4$ όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Το ρομπότ Go1 με τον αισθητήρα MIGHTY

Η παρούσα εργασία εξετάζει το πρόβλημα που περιγράφηκε στην Ενότητα 1.6, δηλαδή της συνεργατικής μεταφοράς ενός μεγάλου αντικειμένου μεταξύ ενός ανθρώπου και ενός τετράποδου ρομπότ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.14. Όπως και στην Ενότητα 3.2, ορίζουμε τις εντολές γραμμικής ταχύτητας $\dot{p}_x, \dot{p}_y \in \mathbb{R}$ που μπορεί να δεχτεί στο επίπεδο που βρίσκεται καθώς και γωνιακή ταχύτητα $\dot{\theta} \in \mathbb{R}$ που μπορεί να δεχτεί γύρω από τον άξονα κάθετο στο επίπεδο που ορίζεται την στιγμή εκείνη και περνά από το Κέντρο Μάζας του ρομπότ z .

Ας συμβολίσουμε με $\mathbf{v}_b \triangleq [\dot{p}_x \ \dot{p}_y \ \dot{\theta}]^T \in \mathbb{R}^3$ τη γενικευμένη ταχύτητα του σώματος εκφρασμένη ως προς το $\{B\}$. Επιπλέον, ας συμβολίσουμε με $\mathbf{F}_s \in \mathbb{R}^6$ την γενικευμένη δύναμη που μετρείται από τον αισθητήρα δύναμης σε σχέση με το σύστημα αναφοράς του αισθητήρα $\{S\}$ βάση των μετρήσεων πίεσης ρ_i, ρ_v σύμφωνα με την ανάλυση του Μέρους 2.3.2. Υπενθυμίζεται πως η δύναμη $\mathbf{F}_s$ αντιστοιχεί στη δύναμη που ασκεί ο χρήστης έμμεσα μέσω του αντικειμένου, προς το σύστημα MIGHTY.

Ο στόχος αυτής της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός σχήματος ελέγχου για την κίνηση του ρομπότ, ορίζοντας την εντολή ταχύτητας $\mathbf{v}_c(t)$, που θα εναρμονίζεται με την πρόθεση του ανθρώπου, θα ελαχιστοποιεί την ενέργεια που μεταφέρεται από τον άνθρωπο στο ρομπότ και θα διασφαλίζει ότι το αντικείμενο παραμένει ασφαλώς προσδεδεδεμένο στο άκρο του ρομπότ. Για τη συγκράτηση του αντικειμένου από την πλευρά του ρομπότ, αλλά και για την ανίχνευση δύναμης/ροπής, χρησιμοποιείται ο αισθητήρας MIGHTY, προσαρτημένος στο πάνω από το κεφάλι

του ρομπότ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.14. Η λειτουργικότητα της αρπάγης MIGHTY έχει αναλυθεί στην ενότητα 2.3 ωστόσο για την καλύτερη ροή και κατανόηση του προτεινόμενου ελεγκτή, οι απαραίτητες εξισώσεις θα εμφανίζονται ξανά.

4.1 Προτεινόμενος Ελεγκτής

Για να αποκτήσει το ρομπότ τα "συμμορφωτικά" χαρακτηριστικά, εφαρμόζεται η έννοια του "ελέγχου ενδοτικότητας" μιας και το ρομπότ μπορεί να δέχεται εντολές ταχύτητας. Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση, έχοντας στο νού μας την ανάλυση του Κεφ.3, η κίνηση αναφοράς του ρομπότ παράγεται σε πραγματικό χρόνο μέσω της επίλυσης της Διαφορικής Εξίσωσης (3.3) από την άσκηση μια εξωτερικής δύναμης $\mathbf{F}_b \in \mathbb{R}^6$ εκφρασμένη ως προς το Κέντρο Μάζας του ρομπότ. Στην περίπτωση μας, η εξίσωση αυτή επιλέγεται ώστε να αναπαρίσταται από το ακόλουθο δυναμικό σύστημα:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_d & \mathbf{0}_{2 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 2} & m_\theta \end{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_b + \mathbf{D}_d \mathbf{v}_b = \mathbf{\Lambda} \mathbf{F}_b + \mathbf{F}_v, \quad (4.1)$$

όπου η $\mathbf{\Lambda} \in \mathbb{R}^{3 \times 6}$ είναι ο πίνακας επιλογής που μεταβαίνει από τον $SE(3)$ στον επίπεδο χώρο και ορίζεται ως εξής:

$$\mathbf{\Lambda} \triangleq \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.2)$$

Οι όροι $\mathbf{M}_d \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ και $m_\theta \in \mathbb{R}_{>0}$ αντιπροσωπεύουν τον θετικά ορισμένο πίνακα αδρανείας για την κίνηση στο επίπεδο $x - y$ και τον συντελεστή αδρανείας γύρω από τον άξονα z , αντίστοιχα, οι οποίοι επιλέγονται ή προκαθορίζονται από τον σχεδιαστή. Επιπλέον, ο $\mathbf{D}_d(t) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ είναι ένας πίνακας μεταβλητής απόσβεσης, και η $\mathbf{F}_v \in \mathbb{R}^3$ είναι ένα πρόσθετο σήμα ελέγχου για να διασφαλίζεται ότι η αρπάγη κενού αέρος δεν θα αποκολληθεί από το αντικείμενο (οι όροι $\mathbf{D}_d(t)$ και $\mathbf{F}_v$ θα οριστούν αργότερα).

Όπως έχει προαναφερθεί στο Μέρος 2.1.2, για την μεταφορά της γενικευμένης δύναμης αλληλεπίδρασης από τον αισθητήρα MIGHTY στο Κέντρο Μάζας, δηλαδή από το πλαίσιο $\{S\}$ στο πλαίσιο $\{B\}$ του ρομπότ, χρησιμοποιούμε τις εξισώσεις (2.12) και (2.13), δηλαδή τις σχέσεις:

$$\mathbf{F}_b = \mathbf{\Gamma}_{bs} \mathbf{F}_s,$$

$$\mathbf{\Gamma}_{bs} \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{bs} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \hat{\mathbf{p}}_{bs} \mathbf{R}_{bs} & \mathbf{R}_{bs} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 6},$$

όπου $\mathbf{p}_{bs} \in \mathbb{R}^3$ και $\mathbf{R}_{bs} \in SO(3)$ αντιστοιχούν στη θέση και τον προσανατολισμό (σε μορφή πίνακα στροφής) του πλαισίου του αισθητήρα $\{S\}$ ως προς το πλαίσιο $\{B\}$. Σημειώστε ότι ο πίνακας $\mathbf{\Gamma}_{bs}$ απεικονίζει τις δυνάμεις από το πλαίσιο του αισθητήρα στο Κέντρο Μάζας (KM), δεδομένης της άκαμπτης σχέσης μεταξύ αυτών των πλαισίων.

Για την ελαχιστοποίηση της ενέργειας που μεταφέρεται από τον άνθρωπο στο ρομπότ, εφαρμόζουμε τον μεταβλητό όρο απόσβεσης που προτάθηκε αρχικά στο [43], ο οποίος δίνεται από την εξής σχέση:

$$\mathbf{D}_d(P^+) \triangleq \zeta(P^+) \begin{bmatrix} \mathbf{D}_1 & \mathbf{0}_{2 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 2} & d_\theta \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

όπου $\mathbf{D}_1 \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ είναι ένας σταθερός θετικά ορισμένος πίνακας και $d_\theta \in \mathbb{R}_{>0}$ ο συντελεστής απόσβεσης γύρω από τον άξονα z . Η παράμετρος ζ είναι ο μεταβλητός συντελεστής απόσβεσης, ο οποίος επιλέγεται ως εξής:

$$\zeta(P^+) \triangleq \underline{\zeta} + (\bar{\zeta} - \underline{\zeta})e^{-\lambda P^+}, \quad (4.4)$$

όπου $P^+ = \max(0, \mathbf{v}_b^T \mathbf{F}_b) \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ είναι η ισχύς που μεταφέρεται από τον άνθρωπο στο ρομπότ και οι $\underline{\zeta}, \bar{\zeta} \in \mathbb{R}_{>0}$ είναι θετικές προκαθορισμένες σταθερές παράμετροι που αντιστοιχούν στους ελάχιστους και μέγιστους συντελεστές απόσβεσης, αντίστοιχα. Η λογική πίσω από την επιλογή αυτής της συγκεκριμένης μεταβλητότητας του συντελεστή απόσβεσης είναι να μειωθεί η ενέργεια που διαχέεται, δηλαδή $\mathbf{v}_b^T \mathbf{D}_d \mathbf{v}_b$, όταν ο άνθρωπος καθοδηγεί το ρομπότ, δηλαδή όταν $\mathbf{v}_b^T \mathbf{F}_b > 0$, και να αυξάνεται η απόσβεση όταν η πρόθεση του ανθρώπου έρχεται σε αντίθεση με την κίνηση του ρομπότ, δηλαδή όταν $\mathbf{v}_b^T \mathbf{F}_b < 0$, αυξάνοντας τον συντελεστή απόσβεσης.

Με άλλα λόγια, χρησιμοποιώντας αυτόν τον μεταβλητό όρο, ο χρήστης θα μπορεί να καθοδηγεί το ρομπότ με σχετικά χαμηλή εικονική ιξώδη τριβή, ενώ θα μπορεί να σταματήσει την κίνηση εύκολα όταν το επιθυμεί, αυξάνοντας γρήγορα αυτόν τον όρο. Αυτή η ιδιότητα καθιστά το σύστημα εύκολο στον έλεγχο και, ταυτόχρονα, μειώνει την απαιτούμενη προσπάθεια από τον χρήστη.

Για να διασφαλιστεί ότι το αντικείμενο δεν θα αποκολληθεί από την υποπίεση, πρέπει να εξασφαλιστεί ότι το ακόλουθο κριτήριο θα ισχύει για κάθε χρονική στιγμή στον συνεχή χρόνο $t \in \mathbb{R}_{\geq 0}$:

$$\min(\mathbf{f}_s) > f_{\min}, \quad (4.5)$$

όπου $\mathbf{f}_s = [f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4]^T$ είναι το διάνυσμα που περιλαμβάνει όλες τις δυνάμεις $f_i \in \mathbb{R}, i = 1, \dots, 4$, οι οποίες εκτιμώνται από τους τέσσερις θαλάμους του MIGHTY και $f_{\min} \in \mathbb{R}_{<0}$ η εκτιμώμενη κατώτατη τιμή που είναι αρκετή για να αποκολληθεί το αντικείμενο από το κενό αέρος (στο [35], η εκτιμώμενη δύναμη που εφαρμόζεται από το κενό χρησιμοποιείται ως $f_{\min}$). Για αυτόν τον σκοπό, προτείνουμε τη χρήση ενός επιπρόσθετου σήματος ελέγχου, δηλαδή της $\mathbf{F}_v$, το οποίο βασίζεται στην έννοια των τεχνητών δυναμικών πεδίων φράγματος [26]. Βάσει αυτής της προσέγγισης, η εικονική δύναμη ελέγχου που εφαρμόζεται στην εξίσωση του ελεγκτή εισαγωγής, δηλαδή στην Εξίσωση (4.1), υπολογίζεται μέσω της κλίσης μιας συνάρτησης δυναμικού $W \in \mathbb{R}_{\geq 0}$. Επιλέγουμε να εφαρμόσουμε αυτό το σήμα ελέγχου ως μια εικονική ροπή γύρω από τον άξονα z του ρομπότ. Συγκεκριμένα, προτείνουμε το ακόλουθο σήμα ελέγχου:

$$\mathbf{F}_v \triangleq \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{\partial W}{\partial \theta} \end{bmatrix}^T \quad (4.6)$$

όπου η τεχνητή συνάρτηση δυναμικού φράγματος ορίζεται ως:

$$W \triangleq \begin{cases} \frac{k_1}{2} \left(\frac{1}{f_m} - \frac{1}{f_0} \right)^2 + \frac{k_2}{2} (f_m - f_0)^2 & , \text{αν } f_m < f_0 \\ 0 & , \text{άλλως} \end{cases}, \quad (4.7)$$

όπου οι $k_1, k_2 \in \mathbb{R}_{>0}$ είναι ρυθμιζόμενοι συντελεστές, το $f_0 \in \mathbb{R}_{>0}$ είναι μια θετική παράμετρος που ορίζει την περιοχή επιρροής του δυναμικού πεδίου, και το f_m είναι η τιμή που δίνεται από:

$$f_m(\mathbf{f}) = \mathbf{h}(\mathbf{f}_s) - f_{\min} \quad (4.8)$$

όπου η συνάρτηση $\mathbf{h}(\cdot) : \mathbb{R}^4 \rightarrow \mathbb{R}$ είναι η εκθετική ομαλή συνάρτηση ελάχιστου, η οποία δίνεται από:

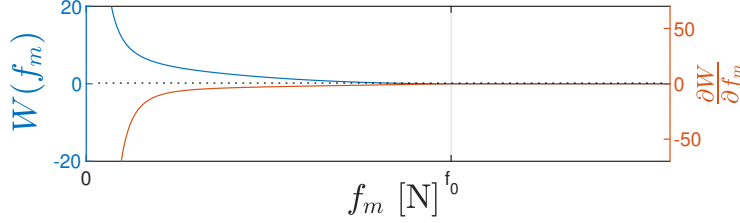
$$\mathbf{h}(\mathbf{y}) = -\ln \left(\sum_{i=1}^4 e^{-y_i} \right), \quad (4.9)$$

για οποιοδήποτε $\mathbf{y} = [y_1 \ y_2 \ y_3 \ y_4]^T$. Σημειώστε ότι η συνάρτηση $\mathbf{h}(\mathbf{y})$ είναι C^∞ συνεχής και αποδίδει μια τιμή που είναι πάντοτε μικρότερη ή ίση από το πραγματικό ελάχιστο των στοιχείων του διανύσματος $\mathbf{y}$, δηλαδή:

$$\min(\mathbf{y}) \geq \mathbf{h}(\mathbf{y}), \quad \forall \mathbf{y} \in \mathbb{R}^4, \quad (4.10)$$

όπου $\min(\mathbf{y}) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ είναι η συνάρτηση που παρέχει το ελάχιστο στοιχείο οποιουδήποτε διανύσματος $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^n$. Η τεχνητή συνάρτηση δυναμικού και η παράγωγός της ως προς το f_m παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.2. Σημειώνεται ότι τα εξής ισχύουν για τη συνάρτηση W και την παράγωγό της:

- $W > 0$, για όλες τις τιμές $f_m < f_0$,
- $W = \frac{\partial W}{\partial f_m} = 0$, για όλες τις τιμές $f_m \geq f_0$,
- Τόσο η W όσο και η $-\frac{\partial W}{\partial f_m}$ τείνουν στο ∞ καθώς το $f_m \rightarrow 0$.



Σχήμα 4.2: Η τεχνητή συνάρτηση δυναμικού φράγματος και η παράγωγός της.

Στη συνέχεια, προχωρούμε στον υπολογισμό της $\frac{\partial W}{\partial \theta}$ της (4.6). Ακολουθώντας τον κανόνα της αλυσίδας, προκύπτει:

$$\frac{\partial W}{\partial \theta} = \frac{\partial W}{\partial f_m} \cdot \frac{\partial f_m}{\partial \mathbf{f}} \cdot \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \theta}. \quad (4.11)$$

Υπολογίζοντας τις μερικές παραγώγους αναλυτικά, λαμβάνουμε από την (4.7):

$$\frac{\partial W}{\partial f_m} = \begin{cases} \left(\frac{k_1}{f_0 f_m^3} + k_2 \right) (f_m - f_0) & , \text{αν } f_m < f_0 \\ 0 & , \text{άλλως} \end{cases}, \quad (4.12)$$

και από την (4.8):

$$\frac{\partial f_m}{\partial \mathbf{f}} = [\mu_1 \quad \mu_2 \quad \mu_3 \quad \mu_4],$$

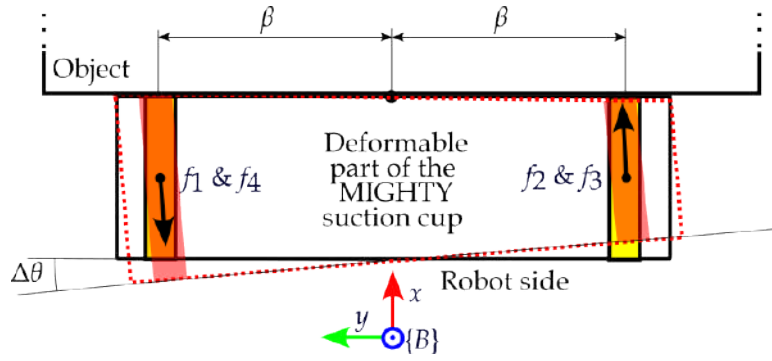
όπου $\mu_i = \frac{e^{-f_i}}{\sum_{j=1}^4 e^{-f_j}}$, $i = 1, \dots, 4$.

Ο όρος $\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \theta}$ της (4.11) προκύπτει εξετάζοντας τη γραμμική σχέση μεταξύ της Δf_i και της $\Delta \theta$, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.3, η οποία προσεγγίζει την πραγματική παράγωγο λαμβάνοντας υπόψη μια επαρκώς μικρή διαφορά γωνιών $\Delta \theta$:

$$\begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta f_2 \\ \Delta f_3 \\ \Delta f_4 \end{bmatrix} \approx \beta \kappa \begin{bmatrix} -\Delta \theta \\ \Delta \theta \\ \Delta \theta \\ -\Delta \theta \end{bmatrix} \Rightarrow \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \theta} \triangleq \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \theta} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \theta} \\ \frac{\partial f_3}{\partial \theta} \\ \frac{\partial f_4}{\partial \theta} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} -\beta \kappa \\ \beta \kappa \\ \beta \kappa \\ -\beta \kappa \end{bmatrix}, \quad (4.13)$$

όπου $\beta, \kappa \in \mathbb{R}_{>0}$ η απόσταση των θαλάμων της αρπάγης MIGHTY από το κέντρο κατά μήκος του άξονα y του πλαισίου $\{B\}$ (όπως φαίνεται στο Σχ. 4.3) και ο συντελεστής ακαμψίας του παραμορφώσιμου μέρους της αντίστοιχα. Η ακριδής εκτίμηση των β και κ μπορεί να επιτευχθεί με τη βαθμονόμηση της (4.13), βασιζόμενη σε στατιστικά δεδομένα δυνάμεων που συλλέγονται για συγκεκριμένες γωνίες $\Delta \theta$. Ωστόσο, δεν είναι απαραίτητη η ακριδής χαρτογράφηση, καθώς δεν αναμένεται να επηρεάσει σημαντικά την απόδοση του προτεινόμενου σχήματος ελέγχου, δεδομένου ότι οι μη μοντελοποιημένες αβεβαιότητες ενσωματώνονται στα κέρδη k_1 και k_2 που εισήχθησαν στην (4.7). Σημαντικό ρόλο, ωστόσο, διαδραματίζει το πρόσημο των στοιχείων της (4.13) στην κατεύθυνση αυτού του πρόσθετου σήματος ελέγχου.

Παρατήρηση 5. Αξίζει να παρατηρηθεί πως η κλίση του τεχνητού δυναμικού φράγματος που δίνεται στην (4.12) περιλαμβάνει δύο κέρδη ελέγχου, συγκεκριμένα τα k_1 και k_2 , με το πρώτο να αναφέρεται στον μη γραμμικό όρο και το δεύτερο στον γραμμικό όρο. Για να ρυθμιστούν αυτά



Σχήμα 4.3: Λογική πίσω από την (4.13).

τα κέρδη, μπορεί να επιλεγεί αυθαίρετα μια τιμή για το k_1 , καθώς το $-\frac{\partial W}{\partial f_m}$ τείνει στο άπειρο για οποιαδήποτε θετική τιμή του k_1 , ενώ το κέρδος k_2 μπορεί στη συνέχεια να ρυθμιστεί για να προσαρμοστεί η ομαλότητα του σήματος ελέγχου.

Ας θεωρήσουμε ότι $\mathbf{x} \triangleq [x_1 \ x_2^T \ x_3]^T \in \mathbb{R}^4$ είναι η κατάσταση του συστήματος, όπου $x_1 \triangleq \theta$ είναι η γωνία περιστροφής του ρομπότ σε σχέση με το αδρανειακό πλαίσιο $\{0\}$ πάνω στο επίπεδο στήριξης¹, $\mathbf{x}_2 \triangleq [\dot{p}_x \ \dot{p}_y]^T \in \mathbb{R}^2$ και $x_3 \triangleq \theta$. Επιπλέον, θεωρούμε ότι $\mathbf{u} \triangleq [\mathbf{u}_1^T \ u_2]^T \in \mathbb{R}^3$ είναι η είσοδος του συστήματος, όπου $\mathbf{u}_1 \triangleq \mathbf{f}_{b,xy} \in \mathbb{R}^2$ είναι τα στοιχεία $x-y$ του $\mathbf{F}_b$ και $u_2 \triangleq \tau_{b,z} \in \mathbb{R}$ είναι το τελευταίο στοιχείο του $\mathbf{F}_b$. Τότε, το σύστημα κλειστού βρόγχου μπορεί να γραφθεί, βάσει των εξισώσεων (4.1)-(4.6), στην ακόλουθη μορφή:

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{\mathbf{x}}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_3 \\ \mathbf{M}_d^{-1} (-\zeta \mathbf{D}_1 \mathbf{x}_2 + \mathbf{u}_1) \\ \frac{1}{m_\theta} \left(-\zeta d_\theta x_3 - \frac{\partial W}{\partial x_1} + u_2 \right) \end{bmatrix}, \quad (4.14)$$

δεδομένου ότι $f_m|_{t=0} > 0$, δηλαδή το αντικείμενο συγκρατείται αρχικά από την αρπάγη.

Θεώρημα 1. Τα παρακάτω επιχειρήματα ισχύουν για το σύστημα κλειστού βρόγχου, όπως εκφράζεται από το δυναμικό σύστημα που εκφράζεται στην εξίσωση (4.14):

1. Το σύστημα είναι παθητικό σε σχέση με το ζεύγος $[\mathbf{x}_2^T \ x_3]^T$, $\mathbf{u}$ (θυμίζουμε πως $[\mathbf{x}_2^T \ x_3]^T = \mathbf{v}_b$).
2. Το κριτήριο διατήρησης δύναμης, όπως δίνεται στην (4.5), ισχύει για όλα τα $t \in \mathbb{R}_{\geq 0}$, δηλαδή το αντικείμενο δεν θα αποκολληθεί ποτέ από την αρπάγη στον συνεχή χρόνο, δεδομένου ότι η $\mathbf{u}$ έχει πεπερασμένη ενέργεια.

Απόδειξη. Ας ορίσουμε την παρακάτω συνάρτηση αποθήκευσης:

$$L = \frac{1}{2} \mathbf{x}_2^T \mathbf{M}_d \mathbf{x}_2 + \frac{1}{2} m_\theta x_3^2 + W. \quad (4.15)$$

Λαμβάνοντας την χρονική παράγωγο της (4.15) και υποθέτοντας ότι $\frac{dW}{dt} \approx \frac{\partial W}{\partial x_1} \dot{x}_1$, δηλαδή ότι η W επηρεάζεται κυρίως από τη γωνία θ , προκύπτει:

$$\dot{L} = \frac{\partial L}{\partial \mathbf{x}} \dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial W}{\partial x_1} & \mathbf{x}_2^T \mathbf{M}_d & m_\theta x_3 \end{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}. \quad (4.16)$$

¹Ο άξονας z του αδρανειακού πλαισίου του ρομπότ θεωρείται ότι έχει την ίδια κατεύθυνση με τον άξονα z του πλαισίου $\{B\}$

Αντικαθιστώντας την $\dot{\mathbf{x}}$ από την (4.14) στην (4.16), έχουμε:

$$\begin{aligned}\dot{L} &= x_3 \frac{\partial W}{\partial x_1} - \zeta \mathbf{x}_2^T \mathbf{D}_1 \mathbf{x}_2 + \mathbf{x}_2^T \mathbf{u}_1 - \zeta d_\theta x_3^2 - x_3 \frac{\partial W}{\partial \theta} + x_3 u_2 \\ &= - \underbrace{\zeta (\mathbf{x}_2^T \mathbf{D}_1 \mathbf{x}_2 + d_\theta x_3^2)}_{\geq 0} + [\mathbf{x}_2^T \ x_3] \mathbf{u},\end{aligned}\quad (4.17)$$

το οποίο αποδεικνύει το Επιχείρημα 1 του θεωρήματος, καθώς το σύστημα είναι παθητικό σε σχέση με τον όρο $[\mathbf{x}_2^T \ x_3]^T$ για τη δεδομένη είσοδο $\mathbf{u}$.

Συμπληρώνοντας το τετράγωνο στην (4.17), προκύπτει:

$$\begin{aligned}\dot{L} &= - \left\| \sqrt{\mathbf{D}_d} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_2 \\ x_3 \end{bmatrix} - \frac{1}{2} \sqrt{\mathbf{D}_d^{-1}} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \right\|^2 + \frac{1}{4} \mathbf{u}^T \mathbf{D}_d^{-1} \mathbf{u} \\ &\leq \frac{1}{4} \mathbf{u}^T \mathbf{D}_d^{-1} \mathbf{u}, \forall t \in \mathbb{R}_{\geq 0}.\end{aligned}\quad (4.18)$$

Ολοκληρώνοντας την (4.18) ως προς τον χρόνο, προκύπτει:

$$L(t) \leq L_0 + \int_0^t \frac{1}{4} \mathbf{u}^T \mathbf{D}_d^{-1} \mathbf{u} \ dt, \quad (4.19)$$

όπου το $L_0 \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ είναι η αρχική τιμή της συνάρτησης αποθήκευσης, που σημαίνει ότι το $L(t)$ θα είναι φραγμένο για όλα τα $t \in \mathbb{R}_{\geq 0}$, εφόσον η $\mathbf{u}$ έχει πεπερασμένη ενέργεια, και κατά συνέπεια το ολοκλήρωμα $\int_0^t \frac{1}{4} \mathbf{u}^T \mathbf{D}_d^{-1} \mathbf{u} \ dt$ θα είναι φραγμένο, λόγω του θετικά ορισμένου πίνακα $\mathbf{D}_d^{-1}$. Συνεπώς, βάσει του ορισμού του L , που δίνεται στην (4.15), η $W(t)$ θα είναι επίσης άνω φραγμένη για όλα τα $t \in \mathbb{R}_{\geq 0}$. Η φραγμένη συμπεριφορά της W , βάσει των εξισώσεων (4.7) και (4.8), σημαίνει ότι ξεκινώντας από οποιαδήποτε θετική αρχική τιμή, η f_m δεν θα φτάσει ποτέ στο μηδέν και συνεπώς:

$$f_m = h(\mathbf{f}_s) - f_{min} > 0, \forall t \in \mathbb{R}_{\geq 0}. \quad (4.20)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την (4.10) στην (4.20), καταλήγουμε στο ότι το κριτήριο (4.5) ικανοποιείται για κάθε χρονική στιγμή $t \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ και συνεπώς αποδεικνύεται και το Επιχείρημα 2 του θεωρήματος. ■

4.2 Πειράματα και Αποτελέσματα

Για την πειραματική αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου, χρησιμοποιήθηκε το τετράποδο ρομπότ Unitree Go1, με την αρπάγη κενού MIGHTY να είναι τοποθετημένη στο επάνω μπροστινό τμήμα του ρομπότ (πάνω από το κεφάλι του). Εφαρμόστηκε ο "υψηλού επιπέδου" έλεγχος χώρου εργασίας του ρομπότ (High-Level State), ο οποίος δέχεται εντολές ταχύτητας μέσω ROS, και το στυλ βάδισης που επιλέχθηκε ήταν το "Trot walking". Η προτεινόμενη μέθοδος ελέγχου υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας C++ και Python και είναι διαθέσιμη στο εξής repository GitHub: human-quadruped-variable-admittance.

Ο βρόχος ελέγχου εκτελούνταν σε εξωτερικό υπολογιστή, ο οποίος επικοινωνούσε με το ρομπότ μέσω σύνδεσης Ethernet (point-to-point). Ο βρόγχος ελέγχου είχε οριστεί στα 2ms, ενώ η συχνότητα εκτίμησης της δύναμης που παρέχεται από τον αισθητήρα MIGHTY ήταν 10Hz (χρησιμοποιήθηκε η τεχνική sample-and-hold για τον συγχρονισμό και των δύο βρόχων). Οι επιλεγμένες παράμετροι ήταν οι εξής: $\mathbf{M}_d = 13\mathbf{I}_2$ kg, $m_\theta = 1.5$ kgm², $\mathbf{D}_d = \text{diag}(20, 20, 5)$, $\zeta = 0.1$, $\bar{\zeta} = 1$, $\lambda = 3$, $k_1 = 10$, $k_2 = 1$, $f_0 = 20$ N, $\beta = 0.04$ m, $\kappa = 20.0$ N/m και το κατώτερο όριο στο οποίο το αντικείμενο αποκολλάται είναι ίσο με $f_{min} = -48$ N.



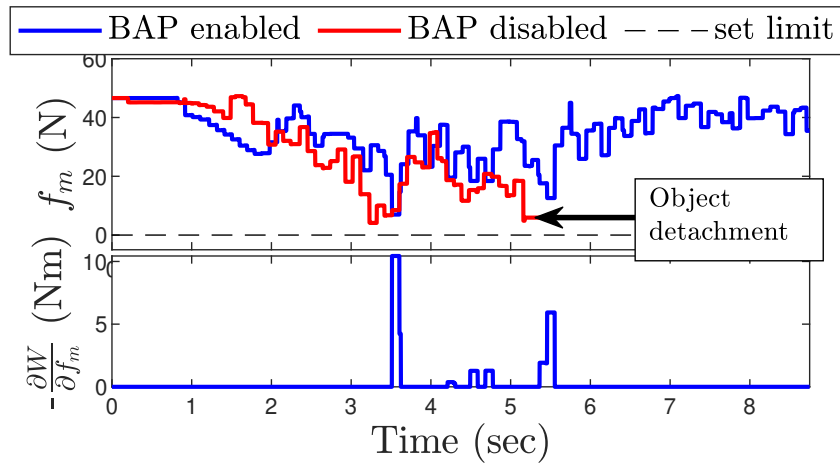
(α') Αρχική θέση του πειράματος που αφορά την κίνηση σε τόξο. (β') Τελική θέση του πειράματος που αφορά την κίνηση σε τόξο.

Σχήμα 4.4: Κίνηση του αντικειμένου σε τόξο γύρω από το ρομπότ.

Διεξήχθησαν δύο πειράματα για την επίδειξη και αξιολόγηση των δύο βασικών λειτουργιών της προτεινόμενης μεθόδου, δηλαδή την εξασφάλιση ότι το αντικείμενο θα παραμείνει συνδεδεμένο στην αρπάγη και τη μείωση της φυσικής και γνωστικής προσπάθειας που απαιτείται από τον χρήστη. Στο πρώτο πείραμα, ο χρήστης κλήθηκε να ακολουθήσει μια κίνηση σε τόξο γύρω από το ρομπότ, ξεκινώντας από τη θέση που φαίνεται στο Σχ. 4.4α' και φτάνοντας στη θέση που φαίνεται στο Σχ. 4.4β' (δηλαδή ένα τόξο 90°). Αυτή η συγκεκριμένη κίνηση επιλέχθηκε για να προσεγγίσει και να δοκιμάσει συνθήκες κοντά στην αποκόλληση του αντικειμένου. Για την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος, εξετάζονται και οι δύο περιπτώσεις, με το Τεχνητό Δυναμικό Φράγματος (ΤΔΦ/ΒΑΡ) ενεργοποιημένο και απενεργοποιημένο. Το Σχ. 4.5 απεικονίζει, το f_m και το σήμα ελέγχου που προκαλείται από το ΤΔΦ (όταν είναι ενεργοποιημένο). Σημειώστε ότι όταν το ΤΔΦ είναι ενεργοποιημένο, το σύστημα "αναγνωρίζει" ομαλά την κατάσταση που είναι κοντά στην αποκόλληση και ενεργεί επιταχύνοντας την περιστροφή περαιτέρω, ώστε να διασφαλίσει ότι το αντικείμενο δεν θα αποκολληθεί. Αυτό φαίνεται από τις τιμές του $-\frac{\partial W}{\partial f_m}$, το οποίο λειτουργεί ως πρόσθετη ροπή γύρω από τον άξονα z του ρομπότ, σύμφωνα με την (4.6). Από την άλλη πλευρά, όταν το ΤΔΦ δεν είναι ενεργοποιημένο, το σύστημα δεν μπορεί να αντιδράσει όταν το αντικείμενο είναι κοντά στην αποκόλληση και συνεπώς η αρπάγη αποτυγχάνει να συγκρατήσει το αντικείμενο στο $t \approx 5.1s$, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.5 (κόκκινη γραμμή).

Παρατήρηση 6. Αξίζει να σημειωθεί ότι η προτεινόμενη μέθοδος εγγυάται *θεωρητικά*, όπως αποδεικνύεται στο Θεώρημα 1, ότι το αντικείμενο δεν θα αποκολληθεί από την αρπάγη *στο συνεχές χρόνο*. Ωστόσο, δεδομένης της διακριτοποίησης του χρόνου σε πραγματικές εφαρμογές, όπως στην περίπτωσή μας, όπου η συχνότητα μέτρησης της δύναμης είναι τα $10Hz$, ενδέχεται να υπάρξουν περιπτώσεις όπου το αντικείμενο θα αποκολληθεί λόγω πιθανών απότομων αλλαγών στην κίνηση. Παρόλα αυτά, το εύρος αυτής της περιοριστικής συνθήκης μπορεί να διευρυνθεί χρησιμοποιώντας ταχύτερες μετρήσεις ή/και μικρότερο κύκλο ελέγχου.

Στο δεύτερο πείραμα, ο χρήστης κλήθηκε να μετακινήσει το αντικείμενο κατά μήκος του άξονα x της αρχικής θέσης του ρομπότ, ξεκινώντας από την αρχική θέση και φτάνοντας με ακρίβεια στη συγκεκριμένη τελική θέση που απεικονίζεται στο Σχ. 4.6. Για την αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου, εξετάστηκαν τρεις περιπτώσεις:



Σχήμα 4.5: Η κλίση του Τεχνητού Δυναμικού Φράγματος (ΤΔΦ) και οι αντίστοιχες τιμές των $f_i, i = 1, \dots, 4$ και f_m στο πείραμα που αφορά την περιστροφή του αντικειμένου.

- α) η περίπτωση κατά την οποία ο συντελεστής απόσβεσης ήταν σταθερός και ίσος με $\underline{\zeta}$,
- β) η περίπτωση κατά την οποία ο συντελεστής απόσβεσης ήταν σταθερός και ίσος με $\bar{\zeta}$,
- γ) η περίπτωση κατά την οποία χρησιμοποιήθηκε ο προτεινόμενος συντελεστής απόσβεσης μεταβαλλόμενης ισχύος, με $\underline{\zeta} = 0.4$ και $\bar{\zeta} = 1.5$.

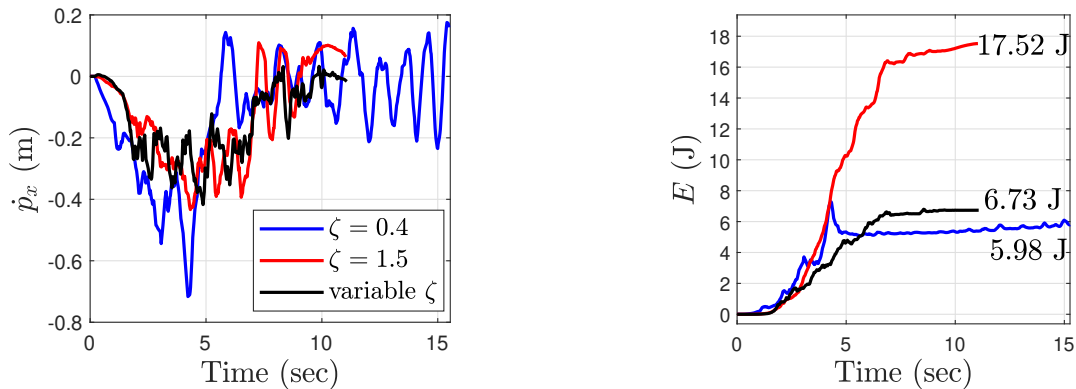
Σημειώνεται ότι σε αυτό το πείραμα, σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, το Τεχνητό Δυναμικό Φράγμα (ΤΔΦ) ήταν ενεργοποιημένο. Στα Σχ. 4.7α' και 4.7β', παρουσιάζονται αντίστοιχα η ταχύτητα κατά μήκος του άξονα x του ρομπότ και η αθροιστική ενέργεια, για κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις. Σημειώνεται ότι στα παρακάτω σχήματα απεικονίζεται η αναφορά ταχύτητας (που ακολουθεί ο έλεγχος του ρομπότ στον χώρο εργασίας), ενώ η αθροιστική ενέργεια υπολογίζεται σύμφωνα με το ολοκλήρωμα $E(t) = \int_0^t \mathbf{v}_b^T \mathbf{F}_b dt$. Παρατηρήστε ότι όταν χρησιμο-



Σχήμα 4.6: Πείραμα που αφορά τη μετακίνηση του αντικειμένου.

ποιείται σχετικά χαμηλή απόσβεση, δηλαδή για $\zeta = \underline{\zeta}$, ο χρήστης δυσκολεύεται να σταματήσει την κίνηση και να ρυθμίσει με ακρίβεια τη θέση του αντικειμένου προς τον στόχο, καθώς είναι εμφανές ότι η συμπεριφορά του συστήματος περιλαμβάνει ταλαντωτικές κινήσεις (όπως φαίνεται στο Σχ. 4.7α'), σε αντίθεση με την περίπτωση όπου χρησιμοποιείται ο προτεινόμενος μεταβαλλόμενος όρος απόσβεσης. Επιπλέον, σημειώστε ότι ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει

στην τελική θέση είναι σημαντικά μεγαλύτερος όταν χρησιμοποιείται σταθερή χαμηλή απόσβεση, λόγω του γεγονότος ότι ο χρήστης αντιμετωπίζει τις προαναφερθείσες δυσκολίες, γεγονός που αντικατοπτρίζει το σχετικά υψηλό γνωστικό φορτίο που απαιτείται από τον χρήστη. Από την άλλη πλευρά, όταν χρησιμοποιείται σχετικά υψηλή απόσβεση, δηλαδή με $\zeta = \bar{\zeta}$, η συνολική ενέργεια που μεταφέρεται από τον άνθρωπο στο ρομπότ είναι σημαντικά υψηλότερη από αυτή που απαιτείται όταν χρησιμοποιείται η προτεινόμενη μέθοδος, δηλαδή 2.6 φορές υψηλότερη, καθιστώντας όλη τη διαδικασία σωματικά απαιτητική (όπως φαίνεται στο Σχ. 4.7β'). Συνεπώς, η προτεινόμενη μέθοδος απόσβεσης βάσει της ισχύος περιλαμβάνει τόσο τη μείωση του γνωστικού φορτίου, καθώς αυξάνει αυτόματα τον συντελεστή απόσβεσης όταν ο χρήστης επιθυμεί να σταματήσει την κίνηση του ρομπότ, όσο και τη μείωση του φυσικού φορτίου, καθώς το σύστημα μειώνει αυτόματα την απόσβεση όταν ο χρήστης καθοδηγεί το ρομπότ προς την κατεύθυνση της κίνησης.



(α') Ταχύτητα κατά μήκος του άξονα x κατά τη διάρκεια του πειράματος που αφορά τη μετακίνηση του αντικειμένου.

(β') Αθροιστική ενέργεια που μεταφέρεται από τον άνθρωπο στο ρομπότ κατά τη διάρκεια του πειράματος που αφορά τη μετακίνηση του αντικειμένου.

Σχήμα 4.7: Πείραμα που αφορά τη μετακίνηση.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αναπτύχθηκε και αξιολογήθηκε ένα σχήμα ελέγχου για τη συνεργατική μεταφορά αντικειμένου μεταξύ ανθρώπου και τετράποδου ρομπότ. Το τετράποδο ρομπότ που χρησιμοποιήθηκε, το Unitree Go1, ήταν εξοπλισμένο με το σύστημα MIGHTY, μια καινοτόμο συσκευή ανεπτυγμένη από την ομάδα του ITE που χρησιμοποιήθηκε τόσο ως σύστημα αρπαγής όσο και ως αισθητήρας δύναμης/ροπής. Το προτεινόμενο σχήμα ελέγχου βασισμένο στον έλεγχο ενδοτικότητας ενσωματώνει έναν όρο μεταβαλλόμενης απόσβεσης, ο οποίος είναι σε θέση να αποφεύγει τις ταλαντώσεις κατά τη συνεργατική χειραγώγηση, αυξάνοντας συνεπώς την ευχρηστία για τον χρήστη (χαμηλός νοητός φόρτος), ενώ ταυτόχρονα επιφέρει σχετικά χαμηλό φυσικό φορτίο στον χειριστή. Επιπλέον, περιλαμβάνεται στον σχεδιασμό του ελεγκτή και μια λειτουργία αποφυγής αποκόλλησης του αντικειμένου από την αρπάγη, βασισμένη σε ένα Τεχνητό Δυναμικό Φράγματος (BAP).

Τα πειραματικά αποτελέσματα κατέδειξαν την ικανότητα του συστήματος να μειώνει τόσο το φυσικό όσο και το νοητό φόρτο του χρήστη. Η ενσωμάτωση του τεχνητού δυναμικού φράγματος (BAP) παρείχε επιπλέον δυνατότητες αποφυγής αποκόλλησης του αντικειμένου από την αρπάγη, εξασφαλίζοντας την ασφάλεια και την ακρίβεια της χειραγώγησης. Το σημαντικότερο εύρημα της έρευνας είναι η απόδειξη πως η χρήση του μεταβαλλόμενου όρου απόσβεσης, που βασίζεται σε παρατηρήσεις ισχύος, επιτρέπει στο σύστημα να προσαρμόζεται δυναμικά στις απαιτήσεις της συνεργασίας ανθρώπου-ρομπότ, προσφέροντας αυξημένη ελεγχσιμότητα.

Η μαθηματική ανάλυση του προτεινόμενου συστήματος, που παρουσιάστηκε και αποδείχθηκε στην εργασία αυτή, επιβεβαίωσε την ορθότητα του συστήματος στο συνεχή χρόνο αλλά παρουσίασε τις δυνατότητές της και στα πειραματικά μέρη. Το σχήμα ελέγχου απέδειξε την ικανότητά του να διατηρεί την ακεραιότητα της σύνδεσης του ρομπότ με το αντικείμενο σε πραγματικό χρόνο, παρέχοντας μια σταθερή και αξιόπιστη λύση για εφαρμογές που απαιτούν συνεργατική μεταφορά αντικειμένων, δοσμένου ενός αρκούντως μικρού κύκλου ελέγχου και μέτρησης δύναμης.

5.1 Μελλοντική Έρευνα

Παρόλο που η έρευνα αυτή παρείχε θετικά και ενθαρρυντικά αποτελέσματα, υπάρχουν αρκετές προοπτικές και περιοχές που μπορούν να βελτιωθούν ή να εξερευνηθούν περαιτέρω στο μέλλον:

➤ **Αύξηση Συχνότητας Δειγματοληψίας και Ανάπτυξη Καλύτερων Αισθητήρων**

Ένα από τα βασικά σημεία που εντοπίστηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ήταν ότι η συχνότητα δειγματοληψίας της μέτρησης δυνάμεων ήταν (10Hz) και θα ήταν επιθυμητό να μπορούσε να αυξηθεί για να προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια και σταθερότητα στο σύστημα. Η ανάπτυξη και χρήση πιο εξελιγμένων αισθητήρων δύναμης/ροπής με υψηλότερη συχνότητα δειγματοληψίας θα μπορούσε να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος, ελαχιστοποιώντας τα σφάλματα που προκύπτουν από την καθυστέρηση στις μετρήσεις. Συστήματα που λειτουργούν σε πραγματικό χρόνο, όπως αυτά που απαιτούν συνεργασία ανθρώπου-ρομπότ, θα επωφεληθούν σημαντικά από τέτοιες τεχνολογικές αναβαθμίσεις.

➤ **Επέκταση σε Δυναμικά και Ασταθή Περιβάλλοντα**

Η πειραματική αξιολόγηση που πραγματοποιήθηκε σε ελεγχόμενες συνθήκες έδειξε την αποτελεσματικότητα του συστήματος. Μια σημαντική μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να επικεντρωθεί στη δοκιμή του προτεινόμενου συστήματος σε πιο πολύπλοκα και δυναμικά περιβάλλοντα, όπως ανώμαλα εδάφη ή περιβάλλοντα με εμπόδια. Η μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος σε ασταθείς συνθήκες θα επιτρέψει τη βελτίωση της προσαρμοστικότητας και της ανθεκτικότητας του ελέγχου, κάτι που είναι κρίσιμο για εφαρμογές στον πραγματικό κόσμο, όπως η διάσωση ή η εργασία σε βιομηχανικά περιβάλλοντα.

➤ **Διερεύνηση Νέων Στρατηγικών Συνεργασίας**

Η έρευνα αυτή επικεντρώθηκε στη συνεργατική μεταφορά αντικειμένων χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση βασισμένη στον έλεγχο ενδοτικότητας και τη μεταβαλλόμενη απόσβεση. Στο μέλλον, θα μπορούσαν να προστεθούν παραπάνω στρατηγικές συνεργασίας πάνω σε αυτή που θα βελτιώναν ακόμα περισσότερο την αλληλεπίδραση ανθρώπου-ρομπότ. Για παράδειγμα, η ενσωμάτωση πολυτροπικών σημάτων, όπως φωνητικές εντολές, θα μπορούσε να διευκολύνει την επικοινωνία μεταξύ του χρήστη και του ρομπότ, επιτρέποντας πιο φυσική και άμεση αλληλεπίδραση.

➤ **Ενσωμάτωση Μηχανικής Μάθησης**

Η χρήση τεχνικών μηχανικής μάθησης αποτελεί μια ακόμα πολλά υποσχόμενη κατεύθυνση. Ειδικότερα, η εφαρμογή αλγορίθμων ενισχυτικής μάθησης (reinforcement learning) θα μπορούσε να επιτρέψει στο ρομπότ να "μάθει" από την αλληλεπίδρασή του με τον χρήστη, προσαρμόζοντας δυναμικά τις στρατηγικές ελέγχου του. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε ακόμα πιο προσαρμοστικά και ευέλικτα συστήματα, τα οποία θα αντιλαμβάνονται τις προθέσεις του χρήστη και θα προσαρμόζουν ανάλογα τη συμπεριφορά τους σε πραγματικό χρόνο και ταυτόχρονα θα μπορούσε να συνδυαστεί με επιπλέον ενσωμάτωση πολυτροπικών σημάτων.

➤ **Βελτίωση του Ελέγχου Ισχύος και Αποδοτικότητας**

Αν και ο έλεγχος απόσβεσης βάσει ισχύος αποδείχθηκε επιτυχής στη μείωση του φυσικού φορτίου του χρήστη, η βελτίωση της αποδοτικότητας του συστήματος σε επίπεδο κατανάλωσης ενέργειας και υπολογιστικού κόστους θα μπορούσε να αποτελέσει ενδιαφέρουσα κατεύθυνση για μελλοντική έρευνα. Η βελτιστοποίηση του ελέγχου απόσβεσης σε συνδυασμό με αλγορίθμους πρόβλεψης της κίνησης του χρήστη μπορεί να οδηγήσει σε συστήματα που θα είναι λιγότερο απαιτητικά ενεργειακά αλλά και πιο "έξυπνα" στις αντιδράσεις τους.

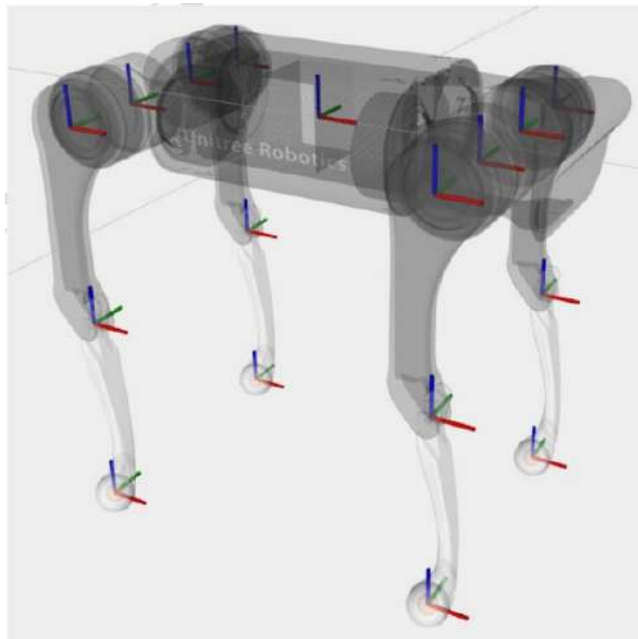
5.2 Συνολική Αξιολόγηση

Η εργασία αυτή παρουσίασε σημαντικές καινοτομίες στον τομέα της συνεργατικής χειραγώγησης αντικειμένων από ανθρώπους και τετράποδα ρομπότ. Η εφαρμογή της μεταβαλλόμενης απόσβεσης και της χρήσης τεχνητού δυναμικού φράγματος απέδειξε ότι είναι δυνατή η υλοποίηση συστημάτων που μειώνουν τις ταλαντώσεις και τις αστοχίες, ενώ αυξάνουν την απόδοση και την ασφάλεια κατά τη συνεργασία ανθρώπου-ρομπότ.

Συνοψίζοντας, τα ευρήματα της παρούσας έρευνας όχι μόνο επιβεβαιώνουν την αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων μεθόδων αλλά ανοίγουν νέους ορίζοντες για την ανάπτυξη πιο εξελιγμένων και προσαρμοστικών συστημάτων ελέγχου στο μέλλον. Οι δυνατότητες που προκύπτουν από την εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών είναι πολλές και μπορούν να επεκταθούν σε διάφορους τομείς, από τη βιομηχανία μέχρι τους υγειονομικούς χώρους και την έρευνα.

Παράρτημα Α΄

Εύρεση Ιακωβιανής τετράποδου ρομπότ με την χρήση των παραμέτρων Denavit–Hartenberg



Σχήμα Α΄.1: Τα πλαίσια συντεταγμένων των τετράποδων της Unitree [39]

Η μη συμβατική διάταξη των πλαισίων του ρομπότ που φαίνεται στο Σχήμα Α΄.1 εξετάστηκε προσεκτικά κατά την εξαγωγή των σταθερών από το URDF¹ του Go1. Η εύρεση της Ιακωβιανής αυτή έγινε μόνο για το ένα πόδι (βλ. Σχήμα Α΄.3) και στη συνέχεια λόγω συμμετρίας τοποθετήθηκαν επιπλέον παράμετροι που συμβάλλουν στην γενίκευση εύρεσης της Ιακωβιανής για οποιοδήποτε πόδι.

¹Το URDF (Unified Robot Description Format) είναι ένα XML αρχείο που χρησιμοποιείται για την περιγραφή των αρθρώσεων, των συνδέσμων, και άλλων χαρακτηριστικών ενός ρομπότ, με σκοπό την προσομοίωση ή τον έλεγχο του ρομπότ σε περιβάλλοντα όπως το ROS (Robot Operating System).

Διευκρίνιση : Αρίθμηση ποδιών

Η αρίθμηση του $i = \{1, \dots, 4\}$ συμβολίζει το κάθε διαφορετικό πόδι. Σύμφωνα και με την αρίθμηση των ποδιών που γίνεται απο την Unitree [39], η αντιστοίχιση έχει ως εξής :

$$i = \{1, 2, 3, 4\} = \{FR, FL, RR, RL\}, \text{ όπου} \quad (A'.1)$$

το πρώτο γράμμα δείχνει εάν είναι μπροστινό (**F**ront) ή πίσω (**R**ear) πόδι ενώ το δεύτερο γράμμα δείχνει εάν είναι στα αριστερά (**L**eft) ή δεξιά (**R**ight).

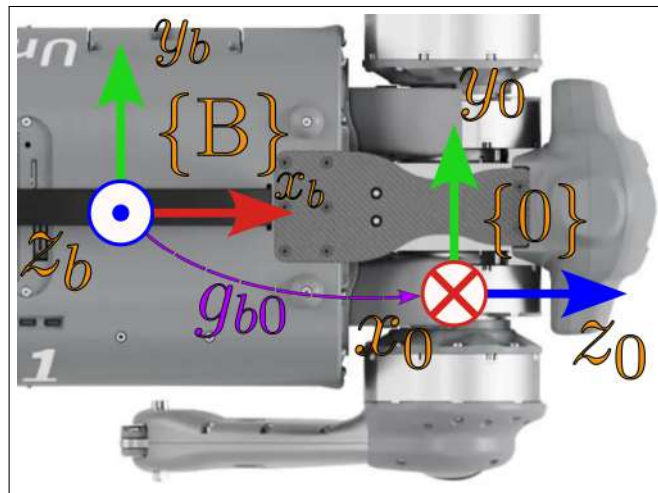
Έτσι λέμε πως τα σύνολα Front και Rear περιέχουν τους δείκτες $\{1, 2\}$ και $i = \{3, 4\}$ αντίστοιχα, ενώ τα σύνολα Right και Left περιέχουν τους δείκτες $\{1, 4\}$ και $\{2, 3\}$.

Βάση της διευκρίνισης, θεωρούμε το μπροστινό δεξιά πόδι ως το 1^ο πόδι και η γενίκευση γίνεται με βάση το πόδι αυτό. Επιπλέον, στα σχήματα, χάριν απλότητας της οπτικοποίησης, τα πλαίσια του ποδιού δεν δείχνουν τον i -δείκτη.

Πριν την έναρξη ανάλυσης των παραμέτρων DH σε πίνακα, θα χρειαστεί, ο ομογενής μετασχηματισμός από το KM του ρομπότ, δηλαδή το $\{B\}$ ως προς το πρώτο σύνδεσμο του i -οστού ποδιού όπως φαίνεται στο Σχήμα Α'.2 ο οποίος γράφεται :

$$g_{b0i} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{b0i} & \mathbf{p}_{b0i} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}, \text{ όπου} \quad (A'.2)$$

- $\mathbf{R}_{b0} = \mathbf{R}_{y, 90^\circ}$
- $\eta_x \triangleq \begin{cases} 1 & : \text{if leg} \in \text{Front} \\ -1 & : \text{if leg} \in \text{Rear} \end{cases}$
- $\mathbf{p}_{b0} = \begin{bmatrix} (\eta_x \cdot h_x) & (-\eta_y \cdot h_y) & 0 \end{bmatrix}^T$
- $\eta_y \triangleq \begin{cases} 1 & : \text{leg} \in \text{Right} \\ -1 & : \text{leg} \in \text{Left} \end{cases}$



Σχήμα Α'.2: Οπτικοποίηση των πλαισίων αναφοράς πάνω στο ρομπότ Go1

Η μέθοδος των modified dh παραμέτρων χρησιμοποιείται για την γρήγορη εύρεση του πίνακα ομογενούς μετασχηματισμού σε πολύπλοκες ακολουθίες απο συνδέσμους. Ως αποτέλεσμα μπορεί να δώσει ομογενείς μετασχηματισμούς μεταξύ των συνδετικών πλαισίων $\{j - 1, j\}$ και χρησιμοποιείται συνήθως για την εύρεση του ομογενούς μετασχηματισμού από την βάση της πρώτης άρθρωσης έως το άκρο του βραχίονα με βάση της ιδιότητας πολλαπλασιασμού ομογενών μετασχηματισμών. Δηλαδή, έστω k συνολικοί σύνδεσμοι με το $\{0\}$ να βρίσκεται στον πρώτο σύνδεσμο και το άκρο $\{e\}$ να βρίσκεται στο άκρο του ρομπότ. Τότε ο ομογενής μετασχηματισμός του άκρου ως προς το πλαίσιο δίνεται :

$$\mathbf{g}_{0e} = \mathbf{g}_{01} \cdot \mathbf{g}_{12} \cdots \mathbf{g}_{j-1,j} \cdots \mathbf{g}_{k-1,e} \quad (\text{A'.3})$$

Η εύρεση του κάθε ομογενούς μετασχηματισμού ζεύγους πλαισίων δίνεται απο την κάθε γραμμή του πίνακα DH με βάση τον τύπο :

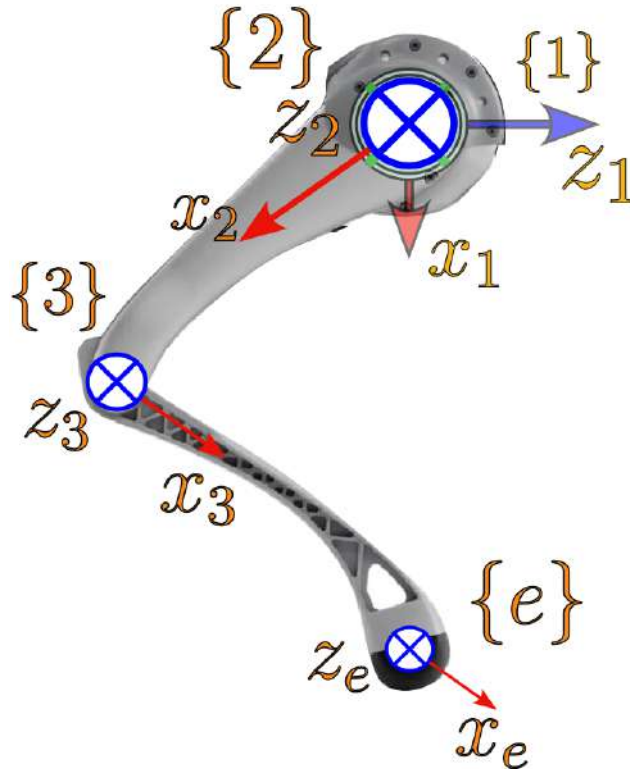
$$\mathbf{g}_{j-1,j} = \mathbf{g}_{rot}(x_{j-1}, \alpha_{j-1}) \cdot \mathbf{g}_{tr}(x_{j-1}, a_{j-1}) \cdot \mathbf{g}_{rot}(z_j, \theta_j) \cdot \mathbf{g}_{tr}(z_j, d_j), \text{ όπου:} \quad (\text{A'.4})$$

$$\mathbf{g}_{rot}(x_{j-1}, \alpha_{j-1}) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{x, \alpha_{j-1}} & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \text{ και } \mathbf{g}_{tr}(x_{j-1}, a_{j-1}) = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & a_{j-1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{g}_{rot}(z_j, \theta_j) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{z, \theta_j} & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \text{ και } \mathbf{g}_{tr}(z_j, d_j) = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & d_j \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}$$

MODIFIED DH PARAMETERS				
Link- <i>j</i>	$\alpha(rad)$	$a(m)$	$d(m)$	$\theta(rad)$
$\{0\} \rightarrow \{1\}$	0	0	0	q_1
$\{1\} \rightarrow \{2\}$	$-\eta_y \cdot \frac{\pi}{2}$	0	d_1	q_2
$\{2\} \rightarrow \{3\}$	0	l_1	0	q_3
$\{3\} \rightarrow \{e\}$	0	l_2	0	0

Πίνακας Α΄.1: Πίνακας Denavit-Hartenberg



Σχήμα Α΄.3: Πλαίσια αναφοράς για τις DH παραμέτρους.

Επομένως με την χρήση του πίνακα Α'.1 και των εξισώσεων (Α'.3), (Α'.4) θεωρώντας γνωστό τον ομογενή μετασχηματισμό g_{0i,e_i} για την εύρεση της Ιακωβιανής ο χρήστης μπορεί να βρεί την κάθε Ιακωβιανή του κάθε άκρου με βάση την εξίσωση :

$$J_i = \frac{\partial g_{0i,e_i}}{\partial q_j} \quad (A'.5)$$

Διαφορετικά μπορεί να ακολουθηθεί η παρακάτω μεθοδολογία για το κάθε πόδι:

Έστω n ο αριθμός των αρθρώσεων και το πλαίσιο $\{e\}$ στο άκρο του βραχίονα, τότε :

Υπολογισμός Ιακωβιανής βραχίονα J_v (γραμμικά στοιχεία)

1. Βρίσκω τον ομογενή μετασχηματισμό $g_{0n}(\mathbf{R}_{0n}, \mathbf{p}_{0n})$
2. Παίρνω την θέση $\mathbf{p}_{0e} \triangleq \mathbf{p}(\mathbf{q}) = [p_x(\mathbf{q}) \ p_y(\mathbf{q}) \ p_z(\mathbf{q})]^T \in \mathbb{R}^3$
3. Παίρνω την κλήση της **θέσης** ως προς κάθε άρθρωση : $(\nabla \mathbf{p})_q$

Η J_v στην γενική της μορφή είναι $J_{v,i,j} = \frac{\partial p_i(\mathbf{q})}{\partial q_j}, i = x, y, z$ και $j = 1, \dots, n$

$$J_v = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{p}(\mathbf{q})}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial \mathbf{p}(\mathbf{q})}{\partial q_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nabla^T p_x(\mathbf{q}) \\ \nabla^T p_y(\mathbf{q}) \\ \nabla^T p_z(\mathbf{q}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_x(\mathbf{q})}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial p_x(\mathbf{q})}{\partial q_n} \\ \frac{\partial p_y(\mathbf{q})}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial p_y(\mathbf{q})}{\partial q_n} \\ \frac{\partial p_z(\mathbf{q})}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial p_z(\mathbf{q})}{\partial q_n} \end{bmatrix}$$

Υπολογισμός Ιακωβιανής βραχίονα J_ω (γωνιακά στοιχεία)

1. Βρίσκω τον πίνακα στροφής της κάθε άρθρωσης εκφρασμένες ως προς την βάση:
Για $j = 1, 2, \dots, n$,παίρνω τον κάθε $\mathbf{R}_{0j}$. (πχ για $n = 3$ β.ε χρειάζομαι τους $\mathbf{R}_{01}, \mathbf{R}_{02}, \mathbf{R}_{0e}$)
2. Παίρνω την 3η στήλη (σ_3) του κάθε πίνακα στροφής: $\mathbf{R}_{0j} \longrightarrow \mathbf{z}_{0j} \triangleq \mathbf{R}_{0j}|_{\sigma_3}$
 - Αν η j -άρθρωση είναι **πρισματική** τότε $\mathbf{z}_{0j} = \mathbf{0}_{3 \times 1}$
3. Ενώνω τις στήλες σε σειρά :

$$J_\omega(\mathbf{q})_{n \times 3} = [\mathbf{R}_{01}|_{\sigma_3} \ \dots \ \mathbf{R}_{0j}|_{\sigma_3} \ \dots \ \mathbf{R}_{0n}|_{\sigma_3}] = [\mathbf{z}_{01} \ \dots \ \mathbf{z}_{0j} \ \dots \ \mathbf{z}_{0e}]$$

Παράρτημα Β'

Κινηματικός Έλεγχος Ρομπότ

Ο κινηματικός έλεγχος ρομπότ είναι μια κλασσική μέθοδος που χρησιμοποιείται αρκετά συχνά στην βιομηχανία για συχνά προβλήματα, όπως η προσπάθεια κίνησης από σημείο σε σημείο. Για την εφαρμογή κινηματικού ελέγχου είναι απαραίτητη η γνώση της εξίσωσης του δυναμικού μοντέλου του ρομπότ, καθώς για διαφορετικές διαμορφώσεις του ρομπότ ο τρόπος προσέγγισης της κίνησης εξαρτάται από τα δυναμικά χαρακτηριστικά του ρομπότ.

Β'.1 Δυναμικό Μοντέλο του Ρομπότ

Έστω ρομπότ n βαθμών ελευθερίας, όπου $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^n$ η θέση, ταχύτητα και επιτάχυνση των αρθρώσεων αντίστοιχα και $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^n$ οι ροπές που ασκούνται στις αρθρώσεις ως η ελεγχόμενη είσοδος. Το δυναμικό μοντέλο ενός ρομπότ, στην απλούστερή του μορφή [51], μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} \quad (\text{B'.1})$$

Αυτή η διαφορική εξίσωση μπορεί να βρεθεί μέσω εξισώσεων κίνησης, όπως η μέθοδος Newton-Euler και η μέθοδος Lagrange. Ας παρατηρήσουμε τους όρους-συντελεστές που απαρτίζουν την διαφορική εξίσωση:

- Ο πίνακας $\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ονομάζεται **πίνακας αδράνειας** και έχει τις εξής ιδιότητες:
 - Είναι **συμμετρικός**, δηλαδή $\mathbf{M}^T = \mathbf{M}$.
 - Είναι **θετικά ορισμένος**, δηλαδή $\forall \mathbf{x} \in \mathbb{R}_{\neq 0}^n$, ισχύει $\mathbf{x}^T \mathbf{M} \mathbf{x} > 0$.
 - Το μητρώο $\mathbf{Z} = \dot{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) - 2\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ είναι αντισυμμετρικό, δηλαδή $\forall \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$, ισχύει $\mathbf{x}^T \mathbf{Z} \mathbf{x} > 0$
- Ο πίνακας $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ονομάζεται **πίνακας Coriolis** και τα **ξεχωριστά** στοιχεία που περιέχει αφορούν τις παρακάτω δυνάμεις:
 - **Κεντρομόλους δυνάμεις (Centripetal forces):** Εμφανίζονται όταν μια μάζα ακολουθεί κυκλική τροχιά. Τέτοιες δυνάμεις σε ένα ρομπότ **εμπλέκουν τετράγωνα ταχυτήτων $\dot{q}_i^2$**
 - **Δυνάμεις Κοριόλις (Coriolis forces):** Εμφανίζονται όταν μια μάζα κινείται μέσα σε ένα πλαίσιο αναφοράς που περιστρέφεται σε σχέση με ένα αδρανειακό πλαίσιο. Τέτοιες δυνάμεις σε ένα ρομπότ **εμπλέκουν γινόμενα ταχυτήτων διαφορετικών αρθρώσεων $\dot{q}_i \cdot \dot{q}_j, i \neq j$**
- Το διάνυσμα $\mathbf{G}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^n$ ονομάζεται **διάνυσμα βαρύτητας** και παριστάνει τη ροπή που εφαρμόζεται στις αρθρώσεις λόγω βαρύτητας.

Η εξίσωση (Β'.1) μπορεί να εκφραστεί ως προς το χώρο εργασίας $SE(3)$ με την χρήση της σχέσης (2.9) και λαμβάνεται η εξίσωση:

$$\mathbf{M}_p(\mathbf{p})\ddot{\mathbf{p}} + \mathbf{C}_p(\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}})\dot{\mathbf{p}} + \mathbf{G}_p(\mathbf{p}) = \mathbf{F}, \quad (\text{B'.2})$$

όπου:

- $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^6$, η γενικευμένη θέση του ρομπότ ως προς κάποιο πλαίσιο αναφοράς.
- $\mathbf{M}_p \triangleq \mathbf{J}^{-T}\mathbf{M}\mathbf{J}^{-1} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$
- $\mathbf{C}_p \triangleq \mathbf{J}^{-T}\mathbf{C}\mathbf{J}^{-1} - \mathbf{M}_p\dot{\mathbf{J}}\mathbf{J}^{-1} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$
- $\mathbf{G}_p \triangleq \mathbf{J}^{-T}\mathbf{G} \in \mathbb{R}^6$
- $\mathbf{F} = \mathbf{J}^{-T}\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^6$, η γενικευμένη δύναμη που αντιπροσωπεύει τις εξωτερικές δυνάμεις ή ροπές που ασκούνται στο άκρο εκφρασμένες ως προς την βάση του ρομπότ (πλαίσιο $\{\mathbf{0}\}$)

Κύριος στόχος των ρομπότ στην βιομηχανία είναι συγκεκριμένες σταθερές και ακριβείς κινήσεις από ένα σημείο σε ένα άλλο. Τα προβλήματα αυτά στην ρομποτική χωρίζονται σε 2 κατηγορίες :

1. Στη προσέγγιση στόχου (**Target Reaching**), που αναφέρεται στην προσέγγιση ενός **σταθερού** στόχου απο ένα σημείο σε ένα άλλο.
2. Στη παρακολούθηση τροχιάς (**Trajectory Tracking**), δηλαδή την προσέγγιση ενός **μεταβαλλόμενου** στόχου απο ένα αρχικό σημείο σε ένα άλλο.

Γνωρίζοντας, πλέον το δυναμικό μοντέλο, μπορούμε να ορίσουμε τα προβλήματα αυτά τόσο στον **χώρο των αρθρώσεων** (joint space) όσο και στον **χώρο εργασίας** (task space).

Σημείωση : Για λόγους απλότητας ανάγνωσης των προβλημάτων στο *task space*, θα θεωρήσουμε την πως ο χώρος εργασίας είναι Ευκλείδειος (δηλαδή ο νόμος ελέγχου που θα αναλυθεί θα αφορά θα αφορά την γραμμική κίνηση $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^{(r=3)}$ του ρομπότ στον χώρο). Η επέκταση στον $SE(3)$ γίνεται εύκολα, γνώση του όρου του γενικευμένου σφάλματος [52].

Β'.1.1 Έλεγχος στο επίπεδο των ροπών

Χώρος Αρθρώσεων

Έστω ρομπότ n βαθμών ελευθερίας που δέχεται **εντολές ροπών $\boldsymbol{\tau}$** στις αρθρώσεις.

Ας ορίσουμε το πρόβλημα παρακολούθησης τροχιάς (Trajectory Tracking) στον χώρο των αρθρώσεων:

Ορισμός Β'.1.1 (Trajectory Tracking @ Joint Space). Έστω $\mathbf{q}_d(t), \dot{\mathbf{q}}_d(t) \in \mathbb{R}^n$ ο **μεταβαλλόμενος** στόχος, δηλαδή **τροχιά**, που επιθυμούμε να ακολουθήσουν οι αρθρώσεις του ρομπότ. Μαθηματικά, αυτο που ζητείται σε αυτήν την περίπτωση είναι :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{q}(t) = \mathbf{q}_d(t) \ \& \ \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\mathbf{q}}(t) = \dot{\mathbf{q}}_d(t)$$

ΛΥΣΗ: Θεωρούμε τον παρακάτω νόμο ελέγχου με ανάδραση κατάστασης και αντιστάθμιση της βαρύτητας:

$$\boldsymbol{\tau} \triangleq \mathbf{G}(\mathbf{q}) - \mathbf{K}_p(\mathbf{q} - \mathbf{q}_d) - \mathbf{K}_d(\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_d) + \mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}}_d \quad (\text{B'.3})$$

Όπου $K_p, K_d \in \mathbb{R}^{n \times n}$ σταθεροί θετικά ορισμένοι (διαγώνιοι) πίνακες κερδών.

Αντικαθιστώντας την (Β'.3) στην (Β'.1) λαμβάνουμε την εξίσωση κλειστού βρόγχου, ορίζοντας ως σφάλμα $e \triangleq q - q_d$.

Σημείωση : Στην περίπτωση του προβλήματος Target reaching, ο ορισμός Β'.1.1 απαιτεί να ικανοποιεί το εξής όριο

$$\lim_{t \rightarrow \infty} q(t) = q_T,$$

όπου $q_T \in \mathbb{R}^n$ ο **σταθερός** στόχος που επιθυμούμε να προσεγγίσει ομαλά το ρομπότ και η ο νόμος ελέγχου (Β'.3) απλοποιείται στην μορφή :

$$\tau \triangleq G(q) - K_p(q - q_T) - K_d \dot{q}$$

Χώρος Εργασίας

Ας ορίσουμε το πρόβλημα παρακολούθησης τροχιάς (Trajectory Tracking) στον χώρο εργασίας.

Ορισμός Β'.1.2 (Trajectory Tracking @ Task Space). Έστω $p_d(t), \dot{p}_d(t) \in \mathbb{R}^{r=3}$ ο **μεταβαλλόμενος** στόχος ,δηλαδή **τροχιά**, που επιθυμούμε να ακολουθήσει το άκρο του ρομπότ. Μαθηματικά , αυτο που ζητείται σε αυτήν την περίπτωση είναι :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} p(t) = p_d(t) \quad \& \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{p}(t) = \dot{p}_d(t)$$

ΛΥΣΗ: Θεωρούμε τον παρακάτω νόμο ελέγχου με ανάδραση κατάστασης και αντιστάθμιση της βαρύτητας:

$$\tau \triangleq G(q) - J_p^T \cdot (K_p(p - p_d) - K_d(\dot{p} - \dot{p}_d) + M_p \ddot{p}_d + C_p \dot{p}_d) \quad (B'.4)$$

Όπου $K_p, K_d \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ σταθεροί θετικά ορισμένοι (διαγώνιοι) πίνακες κερδών

Β'.1.2 Έλεγχος στο επίπεδο των ταχυτήτων

Έστω ρομπότ n βαθμών ελευθερίας, ιδανικά κινηματικά ελεγχόμενο και δέχεται εντολές ταχυτήτων στις αρθρώσεις $\dot{q}_c \in \mathbb{R}^n$. Θεωρούμε πως η δυναμική του ρομπότ που δίνεται στην (Β'.1) έχει αντισταθμιστεί πλήρως από τον έλεγχο ταχύτητας και συνεπώς απο εδώ και στο εξής στον κινηματικό έλεγχο ισχύει παρακάτω σχέση:

$$\dot{q} = \dot{q}_c \quad (B'.5)$$

Χώρος Αρθρώσεων

ΛΥΣΗ: Με τον ορισμό Β'.1.1 να συνεχίζει να ισχύει, θεωρούμε τον παρακάτω νόμο ελέγχου :

$$\dot{q}_c \triangleq \dot{q}_d - K_p(q - q_d) \quad (B'.6)$$

Όπου $K_p \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ σταθερος θετικά ορισμένος (διαγώνιος) πίνακας κερδών.

Χώρος Εργασίας

ΛΥΣΗ: Με τον ορισμό Β'.1.2 να συνεχίζει να ισχύει, θεωρούμε τον παρακάτω νόμο ελέγχου :

$$\dot{q}_c \triangleq J^\dagger(q)(\dot{p}_d - K_p(p - p_d)) \quad (B'.7)$$

Όπου $K_p \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ σταθερός θετικά ορισμένος (διαγώνιος) πίνακας κερδών.

Παρατήρηση

Όταν δεν υπάρχει εξωτερική δύναμη τ , $F_{ext} = 0$, το σφάλμα $e = q - q_d$, $\dot{e} = \dot{p} - \dot{p}_d$, για τον χώρο των αρθρώσεων και τον χώρο εργασίας αντίστοιχα, όσο και οι παράγωγοί του, συγκλίνουν στο μηδέν. Με άλλα λόγια, η επιθυμητή τροχιά $p_d(t)$, $q_d(t)$ και η ταχύτητά της $\dot{p}_d(t)$, $\dot{q}_d$, θα ακολουθούνται με ακρίβεια μετά την ολοκλήρωση του μεταδατικού φαινομένου. Το μεταδατικό φαινόμενο στις περιπτώσεις αυτές συμβαίνει λόγω της διαφορετικής τιμής μεταξύ της πραγματικής και επιθυμητής αρχικής θέσης. Επιπλέον, στην περίπτωση τ , $F_{ext} \neq 0$, αποδεικνύεται ότι το σύστημα κλειστού βρόχου παραμένει παθητικό για το αντίστοιχο $\dot{e}$.

Β'.1.3 Προσομοίωση του προβλήματος Trajectory Tracking στον χώρο εργασίας σε τετράποδο ρομπότ στο επίπεδο των ταχυτήτων

Αυτό το εικονικό πείραμα είναι συμπληρωματικό της ενότητας 3.2 καθώς αποτελεί ένα επιπλέον κομμάτι στο μέρος του κινηματικού ελέγχου. Παρακάτω παρουσιάζεται η εφαρμογή του **trajectory tracking** στον χώρο εργασίας: με επιθυμητή τροχιά να είναι ($N = 1$) μια πλήρης περιστροφή πάνω σε κύκλο ακτίνας r και ενώ ταυτόχρονα ακολουθείται η τροχιά στον προσανατολισμό σύμφωνα με την Εξίσωση (Β'.10), για συνολικό χρόνο προσομοίωσης $t_{total} = 12s$. Η αρχική γενικευμένη θέση του ρομπότ είναι το $[0 \ 0 \ 0]$ και για το σφάλμα του προσανατολισμού ισχύει ότι,

$$e_o = \theta - \theta_d. \quad (B'.8)$$

. Έστω το αδρανειακό πλαίσιο αναφοράς $\{0\}$ τοποθετημένο στην αρχή του συστήματος της προσομοίωσης, όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 3.4 και το πλαίσιο $\{B\}$ να βρίσκεται στο ΚΜ του ρομπότ, τοποθετημένο όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 1.14. Οι επιθυμητές τροχιές είναι οι :

•

$$(p_{Tx}(t))^2 + (p_{Ty}(t))^2 = r^2 \quad (B'.9)$$

•

$$\theta_T = \frac{\pi}{6} \cos(\omega t) \quad (B'.10)$$

με $r = 0.7m$ και γωνιακή συχνότητα $\omega = 2\pi/f$ όπου $f = \frac{(N=1)}{t_{total}}$. Επισημαίνεται πως έγινε μια αναλυτική παραγωγή της κάθε τροχιάς κατά την διαδικασία αυτή για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων καθώς είναι απαραίτητες με βάση την εξίσωση Β'.7.

Τον υπολογισμό της γωνιακής θέσης του τετράποδου ρομπότ ως προς το αδρανειακό πλαίσιο αναφοράς (το πλαίσιο $\{0\}$) απαιτείται η γνώση του προσανατολισμού του ρομπότ, η οποία δίνεται από τον πίνακα στροφής R_{ob} . Στόχος είναι να βρεθεί η γωνία κατεύθυνσης του ρομπότ στο οριζόντιο επίπεδο (XY) του παγκόσμιου συστήματος αναφοράς, αγνοώντας την κλίση στον άξονα z .

Για την εύρεση της κατεύθυνσης του ρομπότ στο επίπεδο XY, λαμβάνουμε το μοναδιαίο διάνυσμα στην κατεύθυνση του άξονα z :

$$z \triangleq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

και κατασκευάζουμε τον **μηδενοχώρο του z** στον 3D χώρο, δηλαδή τον χώρο των διανυσμάτων που βρίσκονται στο επίπεδο XY, χρησιμοποιώντας τον παρακάτω πίνακα προβολής:

$$\mathbf{N}_z = \mathbf{I}_3 - \mathbf{z} \cdot \mathbf{z}^\top,$$

όπου $\mathbf{I}_3$ είναι η μοναδιαία μήτρα $\in \mathbb{R}^{3 \times 3}$. Για τον προσδιορισμό της κατεύθυνσης του ρομπότ στο επίπεδο XY , λαμβάνουμε τον άξονα X του ρομπότ εξάγοντας την πρώτη στήλη του πίνακα στροφής $\mathbf{R}_{0b}$, δηλαδή το διάνυσμα $\mathbf{x}_{0b}$. Έπειτα, προβάλλουμε το $\mathbf{x}_{0b}$ στο επίπεδο XY μηδενίζοντας, έτσι, το z -στοιχείο του, δηλαδή:

$$\mathbf{p}_{\text{proj}} = \mathbf{N}_z \cdot \mathbf{x}_{0b} \in \mathbb{R}^3$$

Το διάνυσμα $\mathbf{p}_{\text{proj}}$ είναι η προβολή του άξονα X του ρομπότ (δηλαδή, το διάνυσμα $\mathbf{x}_{0b}$) στο οριζόντιο επίπεδο, αγνοώντας το ύψος του στον άξονα z . Για την εύρεση της γωνίας κατεύθυνσης, έστω ϕ , υπολογίζουμε τη γωνία μεταξύ της προβολής αυτής και του άξονα X του $\{0\}$, δηλαδή

$$\text{του διανύσματος } \mathbf{x}_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} :$$

$$\phi = \arccos \left(\frac{\mathbf{x}_0 \cdot \mathbf{p}_{\text{proj}}}{\|\mathbf{x}_0\| \|\mathbf{p}_{\text{proj}}\|} \right)$$

Ο άξονας περιστροφής που απαιτείται για αυτή την περιστροφή είναι κάθετος στο επίπεδο XY και δίνεται από το κανονικοποιημένο διάνυσμα κατεύθυνσης:

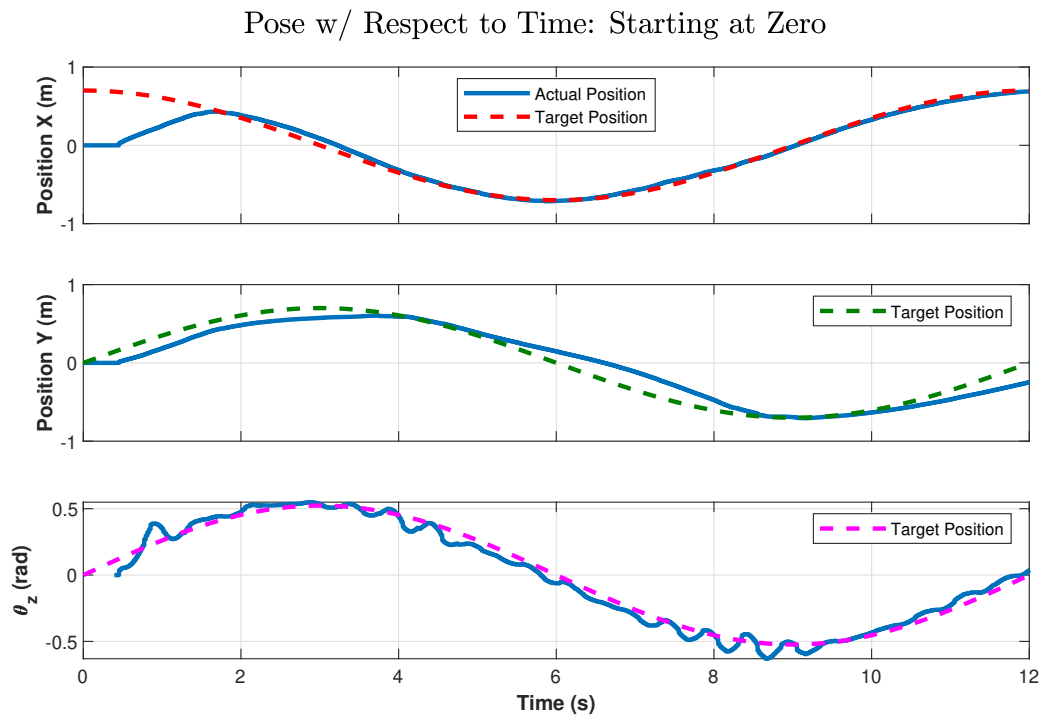
$$\mathbf{k} = \frac{\mathbf{p}_{\text{proj}}}{\|\mathbf{p}_{\text{proj}}\|}$$

Συνεπώς, το τελικό διάνυσμα περιστροφής είναι:

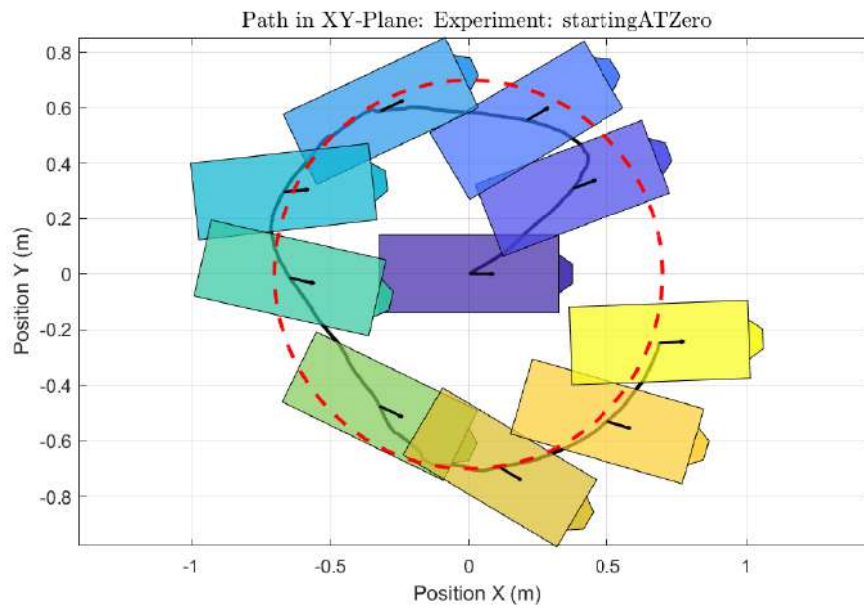
$$\mathbf{k}\phi \in \mathbb{R}^3$$

όπου ϕ είναι η γωνία περιστροφής γύρω από τον άξονα z . Τελικά, λαμβάνουμε το τρίτο στοιχείο αυτής της αναπαράστασης έστω θ , το οποίο αντιπροσωπεύει το ποσό της περιστροφής γύρω από τον άξονα z .

Για το πείραμα αυτό η παράμετρος κέρδους είναι $k_p = 2.5$, ο χρόνος δειγματοληψίας στα 0.2ms και το πείραμα λαμβάνει μέρος στο περιβάλλον προσομοίωσης RViz. Στο παράδειγμα αυτό παρατηρείται από τα Σχήματα Β'.1 και Β'.2 ότι η παρακολούθηση τροχιάς γίνεται με επιτυχία, ωστόσο η βλάβιση με την ταυτόχρονη προσπάθεια προσέγγισης του προσανατολισμού, εμφανίζει στον προσανατολισμό μικρές ταλαντώσεις παρόμοιου πλάτους καθ' όλη την διάρκεια της κίνησης, με αποτέλεσμα την μερική αποτυχία στην ακρίβεια της παρακολούθησης στον γραμμικό χώρο. Τα σφάλματα αυτά οφείλονται στη συχνότητα και το πλάτος της τροχιάς του προσανατολισμού, άλλα και στο προφίλ κίνησης του ρομπότ που είναι προκαθορισμένο. Αξίζει να σημειωθεί, πως το κέρδος k_p είναι $2.5 \times$ μεγαλύτερο από εκείνο του πειράματος Προσέγγισης Στόχου, καθώς για το ίδιο πείραμα για χαμηλές τιμές του k_p όπως η τιμή 1, το τετράποδο παρακολουθεί την τροχιά με μεγάλα σφάλματα τόσο στην γενικευμένη θέση όσο και στην γενικευμένη ταχύτητα.



Σχήμα Β΄.1: Γραφική παράσταση της γενικευμένης θέσης ως προς τον χρόνο



Σχήμα Β΄.2: Κάτοψη της τροχιάς

Βιβλιογραφία

- [1] Arash Ajoudani, Andrea Maria Zanchettin, Serena Ivaldi, Alin Albu-Schäffer, Kazuhiro Kosuge, and Oussama Khatib. Progress and prospects of the human–robot collaboration. *Autonomous Robots*, 42(5):957–975, 2018.
- [2] M. Akizono, M. Iwasaki, T. Nemoto, and O. Asakura. Development on walking robot for underwater inspection. In *International Conference on Advanced Robotics*, pages 652–663. Springer-Verlag, 1989.
- [3] R. N. Alexander. Terrestrial locomotion, mechanics and energetics of animal locomotion. In R. N. Alexander and G. Goldspink, editors, *Mechanics and Energetics of Animal Locomotion*. Chapman and Hall, London, 1977.
- [4] Luis David Andrés. A brief history of industrial robotics in the 20th century. *Open Access Library Journal*, 6:1–12, 2019.
- [5] ANYbotics. Anymal robotics. <https://www.anybotics.com/robotics/anymal/>, 2024.
- [6] Old King Back. Go2 robot image. <https://www.oldkingback.com/robot.html>, 2024.
- [7] J. Bares and D. Wettergreen. Dante ii: Technical description, results, and lessons learned. *The International Journal of Robotic Research*, 18(7):621–649, 1999.
- [8] J. Bares and W. L. Whittaker. Configuration of an autonomous robot for mars exploration. In *World Conference on Robotics Research: The Next Five Years and Beyond*, volume 1, pages 37–52, Gaithersburg, 1989.
- [9] J. E. Bares and W. L. Whittaker. Configuration of autonomous walkers for extreme terrain. *The International Journal of Robotic Research*, 12(6):535–559, 1993.
- [10] Y. Baudoin, M. Acheroy, M. Piette, and J. P. Salmon. Humanitarian demining and robotics. *Mine Action Information Center Journal*, 3, 1999.
- [11] M. G. Bekker. *Off-the-road Locomotion*. University of Michigan Press, Ann Arbor, 1960.
- [12] K. Berns. The walking machine catalogue. <http://agrosy.informatik.uni-kl.de/wmc/start.php/>, 2005. Available online.
- [13] T. E. Bihari, T. M. Wallister, and M. R. Patterson. Controlling the adaptive suspension vehicle. *IEEE Computer*, 22(6):59–65, 1989.
- [14] D. Butch. Dino butch. <http://hebb.mit.edu/people/russt/robots/>, 2005.
- [15] J. S. Byrd and K. R. DeVries. A six-legged telerobot for nuclear applications development. *The International Journal of Robotic Research*, 9(2):43–52, 1990.

- [16] CHAMP: Chassis, Locomotion and Manipulation Planning. CHAMP GitHub Repository. GitHub repository, 2023. <https://github.com/chvmp/champ>.
- [17] H. Cruse, T. Kindermann, M. Schumm, J. Dean, and J. Schmitz. Walnut: A biologically inspired network to control six-legged walking. *Neural Networks*, 11:1435–1447, 1998.
- [18] Robotics Explained. Understanding impedance and admittance control in robotics. <https://robotics-explained.com/impedancecontrol>, 2024.
- [19] M. Frik, M. Guddat, M. Karatas, and D. C. Losch. A novel approach to autonomous control of walking machines. In *Second International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR’99)*, pages 333–342, Portsmouth, UK, 1999.
- [20] Pablo Gonzalez de Santos, Elena Garcia, and Joaquin Estremera. *Quadrupedal Locomotion: An Introduction to the Control of Four-legged Robots*. Springer London, 2006.
- [21] S. Hirose and K. Kato. Quadruped walking robot to perform mine detection and removal task. In *Proceedings of the 1st International Conference on Climbing and Walking Robots*, pages 261–266, Brussels, Belgium, 1998.
- [22] Neville Hogan. Impedance control: An approach to manipulation. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 107(1):1–24, 1985.
- [23] Bengt Ilon. Wheels for a course stable self-propelling vehicle movable in any desired direction on the ground or some other base. *US Patent 3,876,255*, 1975.
- [24] Y. Ishino, T. Naruse, T. Sawano, and N. Honma. Walking robot for underwater construction. In *International Conference on Advanced Robotics*, page 107–114, 1983.
- [25] M. Kaneko, M. Abe, and K. Tanie. A hexapod walking machine with decoupled freedoms. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, RA-1(4):183–190, 1985.
- [26] T. Kastritsi, D. Papageorgiou, and Z. Doulgeri. On the stability of robot kinesthetic guidance in the presence of active constraints. In *2018 European Control Conference (ECC)*, pages 622–627, 2018.
- [27] P. J. McKerrow. *Introduction to Robotics*. Addison-Wesley Publishing Co., Boston, 1991.
- [28] T. A. McMahon. *Muscles, Reflexes, and Locomotion*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1984.
- [29] H. Moravec. *MIND CHILDREN: The Future of Robot and Human Intelligence*. Harvard University Press, Cambridge, MA, 1988.
- [30] Eadweard Muybridge. *Animals in Motion*. Dover Publications, Inc., New York, 1957. First published in 1899.
- [31] K. Nonami, Q. J. Huang, D. Komizo, N. Shimoi, and H. Uchida. Humanitarian mine detection six-legged walking robot. In *Third International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR’00)*, pages 861–868, Madrid, Spain, 2000.
- [32] NATO Advanced Study Institute on Recent Advances in Integrated Circuit Processing. *Recent Advances in Integrated Circuit Processing: Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Recent Advances in Integrated Circuit Processing, Siesta Key, Florida, June 21–July 2, 1982*. Springer, 1983.

-
- [33] D. Orin. Supervisory control of a multilegged robot. *The International Journal of Robotic Research*, 1(1):79–91, 1982.
 - [34] E. Papadakis, M. Sigalas, M. Vangos, and P. Trahanias. Mighty: Multi-functional suction cup for object gripping and surface attachment. In *2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 1–8, 2023.
 - [35] Emmanouil Papadakis, Markos Sigalas, Michail Vangos, and Panos Trahanias. The gem-c controller for load compensation in object manipulation. In *2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 13904–13909, 2024.
 - [36] F. Pfeiffer and H. J. Weidemann. Dynamics of the walking stick insect. *IEEE Control Systems Magazine*, 11(2):9–13, 1991.
 - [37] Konstantinos Plotas, Emmanouil Papadakis, Drosakis Drosakis, Panos Trahanias, and Dimitrios Papageorgiou. Collaborative object transfer between a human and a quadruped robot using the mighty suction cup. In *[Under review] 2025 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2025.
 - [38] M. H. Raibert, M. Buehler, and D. Koditschek. *Quadrupedal Locomotion: An Introduction to the Control of Four-legged Robots*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006.
 - [39] Unitree Robotics. B1 robotic equipment manual. <https://manuals.plus/unitree/b1-robotic-equipment-manual>, 2024.
 - [40] Unitree Robotics. Go1 and a1 robots. <https://www.unitree.com/>, 2024.
 - [41] RobotsGuide.com. Unimate robot image. <https://robotsguide.com/robots/unimate>, 2020.
 - [42] B. Siciliano and O. Khatib. *Springer Handbook of Robotics*. Springer, London, 1st edition, 2008.
 - [43] Antonis Sidiropoulos, Theodora Kastritsi, Dimitrios Papageorgiou, and Zoe Doulgeri. A variable admittance controller for human-robot manipulation of large inertia objects. In *2021 30th IEEE International Conference on Robot & Human Interactive Communication (RO-MAN)*, pages 509–514, 2021.
 - [44] Science Buddies Staff. Arduino walking robot. https://www.sciencebuddies.org/science-fair-projects/project-ideas/Robotics_p058/robotics/arduino-walking-robot, 2023.
 - [45] H. Tirmant, M. Baloh, L. Vermeiren, T. M. Guerra, and M. Parent. B2: An alternative two wheeled vehicle for an automated urban transportation system. In *IEEE Intelligent Vehicle Symposium*, Versailles, France, 2002.
 - [46] D. J. Todd. *Walking Machines: An Introduction to Legged Robots*. Kogan Page, Ltd., London, 1985.
 - [47] Wevolver. Spot mini - specifications. <https://www.wevolver.com/specs/spot.mini>, 2024.
 - [48] D. M. Wilson. Insect walking. *Annual Review of Entomology*, 11:103–122, 1966.
 - [49] Reuben Hoggett Wood. Walking machines - cybernetic zoo. <https://cyberneticzoo.com/walking-machines/>, 2024.
-

- [50] C. Zhang and S. Song. Stability analysis of wave-crab gaits of a quadruped. *Journal of Robotic Systems*, 7(2):243–276, 1990.
- [51] Ζωή Δουλγέρη. *Ρομποτική Κινηματική, δυναμική και έλεγχος αρθρωτών βραχιόνων*. Εκδόσεις Κριτική, January 2007.
- [52] Παπαγεωργίου, Δημήτριος Ν. *Control of Collaborative Robots for Safe Operation and Assisted Kinesthetic Guidance Utilizing Dynamical Systems and Constraint Enforcement*. PhD thesis, Aristotle University of Thessaloniki, School of Engineering, Department of Electrical and Computer Engineering, 2019. Available at: <https://doi.org/10.26262/heal.auth.ir.303363>.