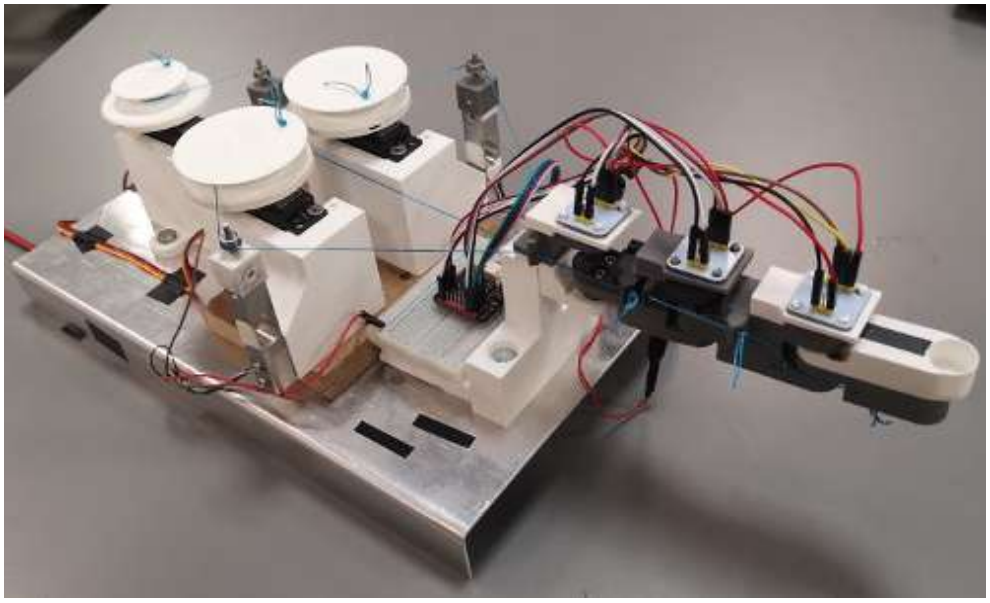
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΛΜΕΠΑ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΔΑΚΤΥΛΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΕΝΟΝΤΩΝ

ΗΛΙΑΔΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ
ΤΜ20207

Επιβλέπων καθηγητής: Δρ. Φασουλάς Ιωάννης

ΗΡΑΚΛΕΙΟ 2026

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΛΜΕΠΑ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην παραμετρική σχεδίαση, την ανάπτυξη και τον έλεγχο ενός ανθρωπόμορφου ρομποτικού δακτύλου οδηγούμενου από τένοντες. Η μηχανική δομή του δακτύλου αποτελείται από τρεις περιστροφικές αρθρώσεις και τρεις φάλαγγες, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους μέσω παθητικών ελατηρίων επαναφοράς. Ο σχεδιασμός της διάταξης πραγματοποιήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε η όδευση των τενόντων στο εσωτερικό των φαλάγγων να οδηγεί σε αποσυζευγμένο κινηματικό έλεγχο των αρθρώσεων.

Στη συνέχεια σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε η βάση στήριξης του μηχανισμού, η οποία φιλοξενεί τον μικροελεγκτή, τους ενεργοποιητές, τους αισθητήρες, καθώς και τα απαραίτητα ηλεκτρονικά κυκλώματα προσαρμογής. Παράλληλα με την ανάπτυξη της διάταξης, πραγματοποιήθηκε κινηματική ανάλυση και μοντελοποίηση του συστήματος, καθώς και στατική μελέτη, λαμβάνοντας υπόψη τα φαινόμενα τριβής που αναπτύσσονται κατά την όδευση των τενόντων.

Η εργασία κλείνει με την υλοποίηση τεσσάρων ελεγκτών για τον έλεγχο της γωνιακής θέσης του δακτύλου στον μικροελεγκτή. Συγκεκριμένα αναπτύχθηκαν: (α) ένας ελεγκτής ανοιχτού βρόχου, (β) ένας αναλογικός-ολοκληρωτικός (PI) ελεγκτής, (γ) ένας ελεγκτής ενδοτικότητας και (δ) ένας ελεγκτής εμπέδησης. Όπου αξιολογήθηκαν, ξεχωριστά μέσα από κατάλληλα σχεδιασμένες πειραματικές δοκιμές.

Abstract

This diploma thesis focuses on the parametric design, development, and control of a tendon-driven anthropomorphic robotic finger. The mechanical structure of the finger consists of three revolute joints and three phalanges, which are interconnected via passive return springs. The mechanism was designed such that the internal tendon routing within the phalanges enables the decoupled kinematic control of the joints.

Subsequently, the support base of the mechanism was designed and manufactured to house the microcontroller, actuators, sensors, and the necessary electronic interfacing circuitry. Concurrently with the hardware development, a kinematic analysis and mathematical modeling of the system were conducted, alongside a static analysis that accounts for the friction phenomena arising during tendon routing.

The thesis concludes with the implementation of four distinct control strategies on the microcontroller to regulate the finger's angular position. Specifically, the following were developed: (a) an open-loop controller, (b) a Proportional-Integral (PI) controller, (c) an admittance controller, and (d) an impedance controller. Each of these controllers was individually evaluated through appropriately designed experimental procedures.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη 2

Abstract 3

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή 5

1.1 Εισαγωγή 5

1.2 Στόχος διπλωματικής εργασίας 12

1.3 Επισκόπηση της διπλωματικής εργασίας 13

Κεφάλαιο 2: Κινηματική και στατική ανάλυση του ρομποτικού δακτύλου 14

2.1 Περιγραφή και παραδοχές του δακτύλου 14

2.2 Ευθύ και αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα ρομποτικού δακτύλου. 17

2.3 Σύνδεση γωνίας άρθρωσης με ενεργό μήκος τένοντα 19

2.4 Υπολογισμός Ιακωβιανών ρομποτικού δακτύλου 21

2.5 Στατική ανάλυση ισορροπίας δακτύλου 22

Κεφάλαιο 3: Παραμετρική σχεδίαση και κατασκευή ρομποτικού δαχτύλου 27

3.1 Σχεδιασμός ρομποτικού δακτύλου 28

3.2 Κατασκευή βάσεων 31

3.3 Συναρμολόγηση δακτύλου 33

Κεφάλαιο 4: Αρχιτεκτονική κυκλωμάτων ελέγχου, αισθητήρων και επενεργητών 36

4.1 Βαθμονόμηση δυναμοκυψελών 38

4.2 Επιλογή επενεργητών 40

Κεφάλαιο 5: Έλεγχος ρομποτικού δακτύλου και πειραματική μελέτη 42

5.1 Έλεγχος ανοιχτού βρόχου 42

5.2 Εισαγωγή στον κλιμακωτό έλεγχο. 44

5.3 Ελεγκτής γωνιών ρομποτικού δακτύλου 45

5.4 Έλεγχος ενδοτικότητας (admittance control) 51

5.5 Ελεγκτής δυνάμεων τένοντα 59

5.6 Έλεγχος εμπέδησης (impedance control) 61

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις 74

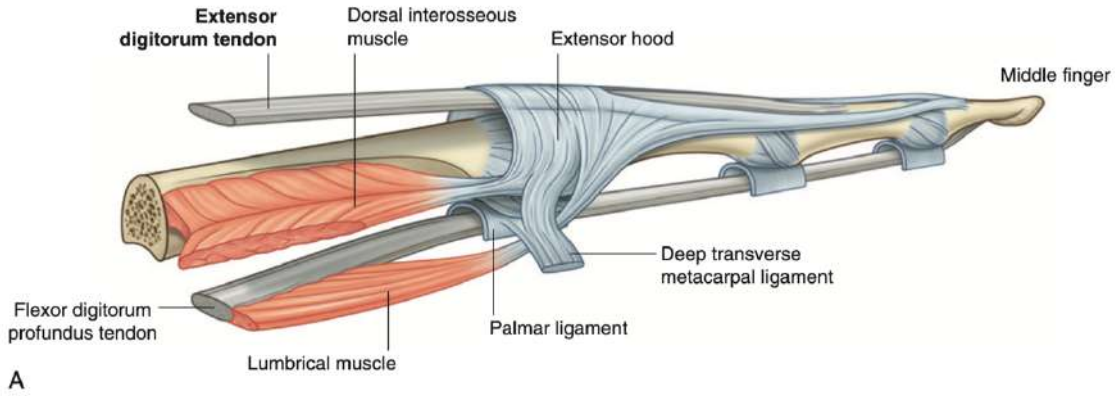
Πηγές 76

Παράρτημα 77

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή

Οι τένοντες συναντώνται στο ανθρώπινο σώμα και αποτελούν τους ινώδεις συνδετικούς ιστούς μέσω των οποίων οι μύες προσφύονται στο σκελετικό σύστημα, αναλαμβάνοντας τον κρίσιμο ρόλο της μετάδοσης της μηχανικής ισχύος. Πρόκειται για ισχυρές, εξαιρετικά οργανωμένες δομές, αποτελούμενες κυρίως από ίνες κολλαγόνου. Εξετάζοντας την ανατομία ενός ανθρώπινου δακτύλου, όπως για παράδειγμα του μέσου δακτύλου (εικόνα 1), διακρίνονται τρεις κύριες αρθρώσεις: η μετακαρποφαλαγγική (MCP), η εγγύς φαλαγγοφαλαγγική (PIP) και η άπω φαλαγγοφαλαγγική (DIP).



Εικόνα 1: Ανατομία μέσου δακτύλου [11].

Η κάμψη του δακτύλου επιτυγχάνεται πρωτίστως μέσω δύο τενόντων, του επιπολής καμπτήρα (flexor digitorum superficialis - FDS), ο οποίος καταφύεται στη μέση φάλαγγα, και του εν τω βάθει καμπτήρα (flexor digitorum profundus - FDP). Ο τελευταίος καταφύεται στην άπω (distal) φάλαγγα, έχοντας πρώτα διέλθει μέσα από μια χαρακτηριστική ανατομική σχισμή που σχηματίζει ο FDS.

Αντίστοιχα, η έκταση του δακτύλου ελέγχεται από τον κοινό εκτείνοντα (extensor digitorum), ο οποίος συνδέεται στη μέση και άπω φάλαγγα μέσω ενός πολύπλοκου δικτύου ινών, γνωστού ως εκτατικός μηχανισμός (extensor hood). Πρόκειται για μια περίπλοκη, τρισδιάστατη κατασκευή με τριγωνικό σχήμα. Η κορυφή αυτού του τριγώνου καταφύεται στην άπω φάλαγγα, το κεντρικό του τμήμα στη μέση φάλαγγα, ενώ τα άκρα της βάσης του περικλείουν την MCP άρθρωση και αγκυρώνονται στους εν τω βάθει εγκάρσιους μετακάρπιους συνδέσμους (deep transverse metacarpal ligaments).

Πέρα από τον ανθρώπινο οργανισμό, οι τένοντες με τεχνητή μορφή, συναντώνται και σε εργαλεία όπως το γαστροσκόπιο (εικόνα 2). Πρόκειται για ένα λεπτό σωλήνα ο οποίος φέρει μικρή κάμερα στο άκρο του και χρησιμοποιεί από δυο έως τέσσερις τένοντες (λεπτό μεταλλικό σύρμα) για τον προσανατολισμό της κάμερας στον γαστρεντερικό σωλήνα του ασθενούς.



Εικόνα 2: Απεικόνιση γαστροσκοπίου, εργαλείο που χρησιμοποιεί τένοντες για την καθοδήγηση και προσανατολισμό μικρής κάμερας στον γαστρεντερικό σωλήνα του ασθενούς.

Επιπλέον οι τένοντες βρίσκουν εφαρμογή και στην ρομποτική. Τα ρομπότ οδηγούμενα από τένοντες, αποτελούν μια κατηγορία ρομποτικών συστημάτων εμπνευσμένη από τα βιολογικά μυοσκελετικά πρότυπα. Βασικό χαρακτηριστικό είναι η μεταφορά ροπής στις αρθρώσεις ή εύκαμπτους συνδέσμους μέσω τενόντων, γεγονός που επιτρέπει να τοποθετούνται οι επενεργητές απομακρυσμένα και όχι πάνω στην άρθρωση.

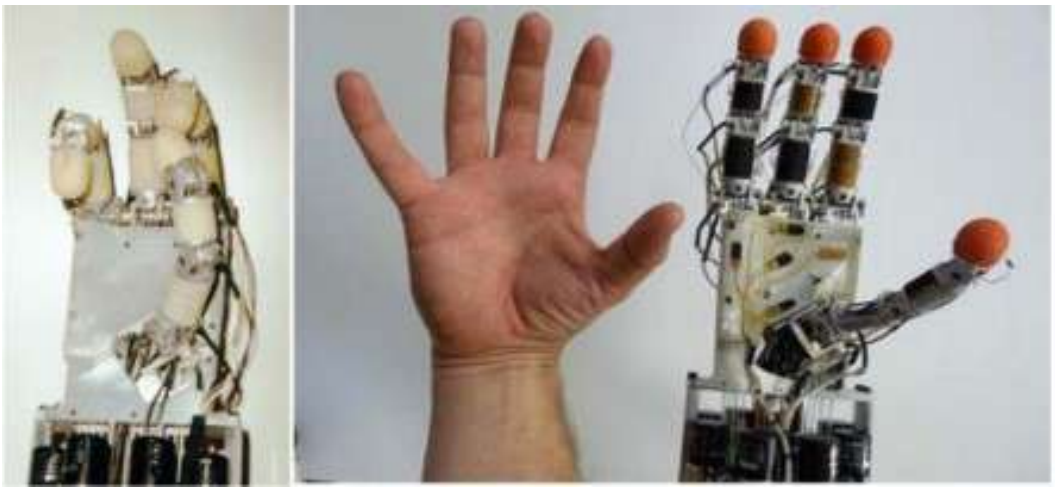
Καθώς από την φύση τους οι τένοντες μπορούν να ασκήσουν δύναμη μόνο μέσω εφελκυσμού, για να μπορέσει να ελεγχθεί κίνηση αμφίδρομα, θα χρειαστεί ένα ζευγάρι 'ανταγωνιστών' τενόντων ή για έναν πιο παθητικό έλεγχο, ελατήρια επαναφοράς. Ιδιαίτερη σημασία στον σχεδιασμό ενός τέτοιου συστήματος έχει η όδευση των τενόντων, όσο πιο κοντά από το κέντρο περιστροφής διέρχονται, τόσο λιγότερο επηρεάζουν τις επόμενες αρθρώσεις.
Η χρήση συστημάτων τενόντων, εμφανίζει αρκετά πλεονεκτήματα, επιτρέπει τον συμπαγή σχεδιασμό και κατ' επέκταση την μείωση της αδράνειας των ρομποτικών βραχιόνων καθώς οι επενεργητές υπεύθυνοι για την κίνηση τους τοποθετούνται απομακρυσμένα και όχι πάνω στις αρθρώσεις. Κάτι τέτοιο ωφελεί την ανάπτυξη υψηλών επιταχύνσεων και ταχυτήτων ενώ παράλληλα μειώνει το βάρος και τις διαστάσεις της κατασκευής, κάνοντας τα συστήματα αυτά ιδανικά σε εφαρμογές περιορισμένου χώρου. Επιπλέον λόγω της ελαστικότητας των συστημάτων αυτών, είναι ιδανικά σε περιπτώσεις εσκεμμένης ή μη αλληλεπίδρασης τους, με άνθρωπο ή εμπόδιο. Τέλος, ειδικά τα συστήματα που χρησιμοποιούν εύκαμπτους συνδέσμους αποτελούν μονόδρομο για εφαρμογές όπως η λαπαροσκοπική χειρουργική, όπου η αυξημένη ευελιξία είναι αναγκαία.

Παρά τα οφέλη που προαναφέρθηκαν, η πρακτική εφαρμογή τέτοιων συστημάτων χρειάζεται να ξεπεράσει αρκετές δυσκολίες. Συνήθως τα συστήματα αυτά είναι συζευγμένα λόγω της όδευσης των τενόντων, επομένως η κίνηση της μιας άρθρωσης επηρεάζει και τις επόμενες, προσθέτοντας επιπλέον δυσκολία στον ακριβή έλεγχο θέσης χωρίς την χρήση πολύπλοκων αλγορίθμων ελέγχου. Επιπλέον τα συστήματα αυτά εμφανίζουν μη γραμμική συμπεριφορά, όπως για παράδειγμα η τριβή των τενόντων που εξαρτάται από πολλούς μεταβαλλόμενους παράγοντες και δυσκολεύει την κίνηση και την μετάδοση δύναμης. Επίσης στα συστήματα αυτά εμφανίζονται αυξημένες φθορές λόγω της διαρκούς τριβής των τενόντων που βρίσκονται σε επαφή με τις εσωτερικές οδεύσεις, οδηγώντας έτσι σε πιθανή αστοχία των τενόντων. Τέλος η μηχανική αντοχή των τενόντων περιορίζει την ικανότητα του μηχανισμού να χειριστεί ωφέλιμο φορτίο.

Τα ρομποτικά συστήματα οδηγούμενα από τένοντες, διακρίνονται σε δύο κατηγορίες σχεδιασμού. Στα συστήματα με στιβαρούς συνδέσμους (Rigid links) τα οποία θυμίζουν ανθρώπινο σκελετό και τα συστήματα με συνεχείς/μαλακούς συνδέσμους (Continuum/Soft links) τα οποία προσομοιάζουν ευέλικτα βιολογικά μέλη όπως οι προβοσκίδες. Επίσης, ανάλογα με τον αριθμό τενόντων, διακρίνονται σε υπό-ενεργοποιούμενα (underactuated), όταν ένας τένοντας κινεί πολλές αρθρώσεις. Υπέρ-ενεργοποιούμενα (over-actuated) συστήματα λέγονται αυτά που χρησιμοποιούν περισσότερους τένοντες από τους βαθμούς ελευθερίας για ακριβέστερο έλεγχο. Τέλος, πλήρως ενεργοποιούμενα συστήματα είναι αυτά που χρησιμοποιούν τόσους τένοντες όσοι είναι οι βαθμοί ελευθερίας για τα παθητικά συστήματα ή τους διπλάσιους για τα συστήματα με ανταγωνιστές τένοντες.

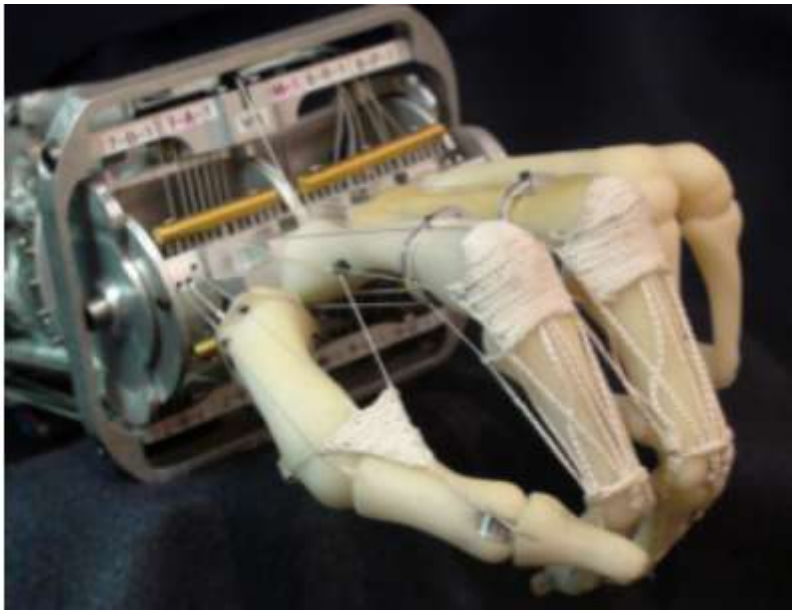
Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές έρευνες για τα ανθρωπόμορφα ρομποτικά δάκτυλα με στιβαρούς συνδέσμους [1],[2],[3],[4], με σκοπό την καλύτερη δυνατή προσομοίωση της ευελιξίας των ανθρώπινων προτύπων. Πιο συγκεκριμένα η [3], εστίασε στον σχεδιασμό ενός δακτύλου με τέσσερις βαθμούς ελευθερίας, οδηγούμενο από τέσσερις επενεργητές. Στόχος ήταν η ακριβής προσομοίωση των λεπτών κινήσεων των ανθρώπινων δακτύλων. Το συγκεκριμένο σχέδιο, επιτρέπει την προσαρμογή των δακτύλων αυτών, σε πιο πολύπλοκα συστήματα, όπως για παράδειγμα ένα πλήρες ανθρωπόμορφο ρομποτικό χέρι (εικόνα 3). Παράλληλα δίνεται η δυνατότητα να επιλεχθεί ο αριθμός των δακτύλων καθώς και η τοποθέτηση τους πάνω στο χέρι. Το ενδιαφέρον στην έρευνα αυτή, είναι η χρήση μιας άρθρωσης δυο βαθμών ελευθερίας στην θέση της μετακαρποφαλαγγικής άρθρωσης, επιτρέποντας την περιστροφή σε δύο άξονες. Η πειραματική αξιολόγηση του δακτύλου

ανέδειξε την εξαιρετική δυναμική συμπεριφορά και ευελιξία του, πλησιάζοντας αρκετά την ανθρώπινη.



Εικόνα 3:Απεικόνιση ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού με τέσσερα δάκτυλα [3].

Αξίζει να αναφερθεί το ACT Hand [2], ένα ρομποτικό χέρι υψηλής ανατομικής πιστότητας. Ο σκελετός των δακτύλων έχει σχεδιαστεί ώστε να προσομοιώνει το μέγεθος, το σχήμα και τις μηχανικές ιδιότητες των ανθρώπινων οστών. Κάθε φάλαγγα διαθέτει έναν εσωτερικό χαλύβδινο πυρήνα, ο οποίος εξασφαλίζει την απαιτούμενη μηχανική αντοχή και περιβάλλεται από ένα εξωτερικό πλαστικό κέλυφος. Αναφορικά με την κινηματική αλυσίδα, τα τέσσερα δάκτυλα διαθέτουν τέσσερις βαθμούς ελευθερίας έκαστο, ενώ ο αντίχειρας πέντε. Επιπροσθέτως, η βάση του παράμεσου και του μικρού δακτύλου ενσωματώνει έναν επιπλέον βαθμό ελευθερίας στην περιοχή της παλάμης, και ο καρπός διαθέτει δύο βαθμούς ελευθερίας, αναπαράγοντας πιστά το ανθρώπινο βιολογικό πρότυπο.



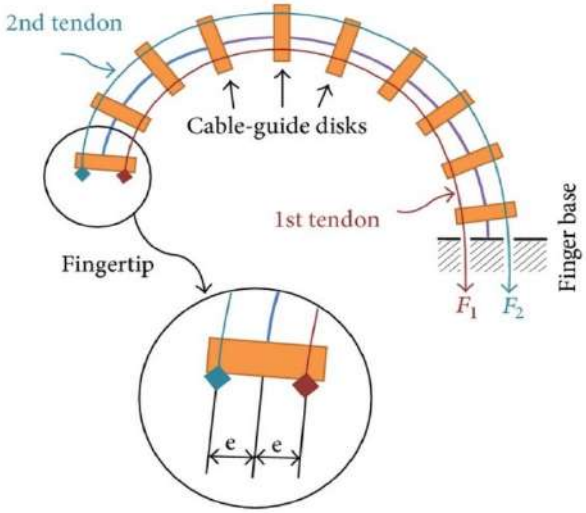
Εικόνα 4: Απεικόνιση του ACT Hand [2], ένα ρομποτικό χέρι υψηλής ανατομικής πιστότητας.

Για την ενεργοποίηση του ACT Hand (εικόνα 4), χρησιμοποιείται αριθμός κινητήρων αυστηρά ίσος με τον αριθμό των ανθρώπινων μυών που ευθύνονται για την κίνηση των δακτύλων. Το σύστημα μετάδοσης υλοποιήθηκε με εξειδικευμένα νήματα σε ρόλο τενόντων, τα οποία επιλέχθηκαν με κριτήρια την υψηλή εφελκυστική αντοχή και τον χαμηλό συντελεστή τριβής κατά την ολίσθησή τους πάνω στα τεχνητά οστά. Στην ανθρώπινη ανατομία, οι τένοντες των εξωγενών (extrinsic) μυών διέρχονται μέσα από τον καρπό, με αποτέλεσμα η περιστροφή του να μεταβάλλει εγγενώς το μήκος της όδευσής τους προς τα δάκτυλα. Για να αντιμετωπιστεί αυτή η πρόκληση, οι ερευνητές βελτιστοποίησαν τον σχεδιασμό του καρπού ώστε να ελαχιστοποιείται τόσο η αναπτυσσόμενη τριβή όσο και η ανεπιθύμητη μεταβολή του μήκους των τενόντων κατά την κίνηση.

Τέλος, ακολουθώντας με ακρίβεια την ανατομική χωροθέτηση του πραγματικού χεριού, οι τένοντες δρομολογήθηκαν (routed) πάνω στον μηχανικό σκελετό σύμφωνα με τα βιολογικά πρότυπα. Για την επίτευξη της μέγιστης δυνατής ρεαλιστικής συμπεριφοράς, οι μελετητές προχώρησαν μέχρι και στην κατασκευή του πολύπλοκου εκτατικού μηχανισμού (extensor hood), ολοκληρώνοντας έτσι τη βιομιμητική προσέγγιση του συστήματος.

Εκτός των ρομποτικών συστημάτων με συμπαγείς συνδέσμους, υπάρχουν και τα συνεχή ρομποτικά συστήματα (continuum Robots) οδηγούμενα από τένοντες. Τα συστήματα αυτά, εμφανίζουν αρκετές δυσκολίες κυρίως στο κομμάτι της μοντελοποίησης, καθώς το μοντέλο πρέπει να είναι αρκετά ακριβές αλλά και να μην χρειάζεται πολύ υπολογιστική ισχύ για να μπορεί να ελεγχθεί μια τέτοια διάταξη σε πραγματικό χρόνο. Όπως φαίνεται και στο [5],

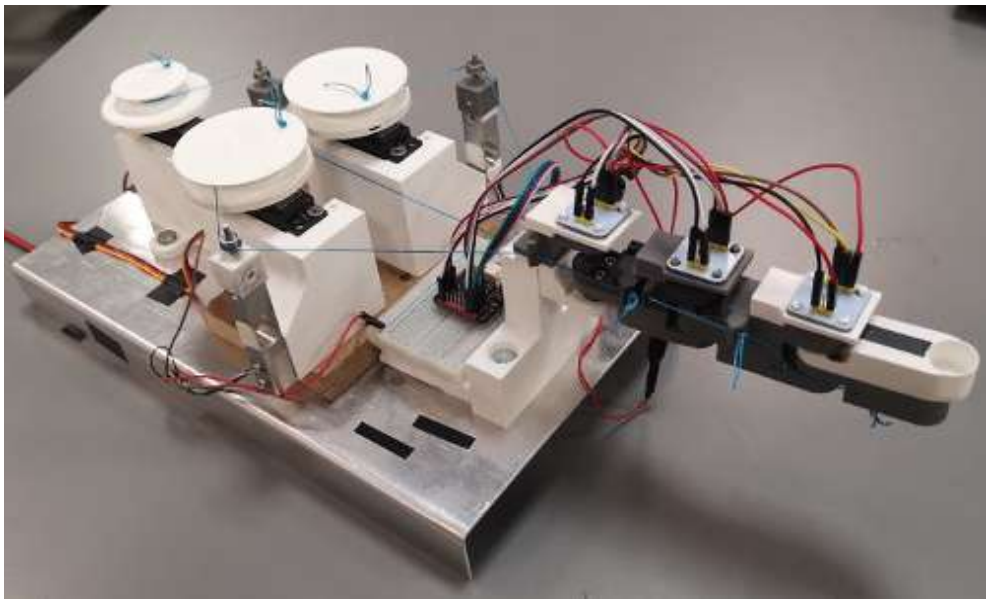
αναπτύχθηκε ένα νέο δυναμικό μοντέλο για έναν συνεχή ρομποτικό βραχίονα που κινείται στο επίπεδο. Η προσέγγιση πραγματοποιήθηκε μέσω δυο κυκλικών τόξων, επιτρέποντας την ακριβή περιγραφή της κίνησης και των δυνάμεων επαφής κατά τη διάρκεια της συγκράτησης αντικειμένων. Το κύριο πλεονέκτημα του μοντέλου αυτού είναι η ταχύτητα υπολογισμού, η οποία το καθιστά ιδανικό για εφαρμογές ελέγχου σε πραγματικό χρόνο. Η αποτελεσματικότητα του μοντέλου επιβεβαιώνεται μέσω πειραματικών δεδομένων που συλλέχθηκαν από ένα πραγματικό σύστημα (εικόνα 5) το οποίο φέρει ελαστικό συνεχή πυρήνα νιτινόλης.



Εικόνα 5: Εύκαμπτο ρομποτικό σύστημα (continuum robot) οδηγούμενο από τένοντες[6].

1.2 Στόχος διπλωματικής εργασίας

Οι βασικοί στόχοι της εργασίας είναι η μελέτη, ο σχεδιασμός, η ανάπτυξη και ο έλεγχος ενός ρομποτικού συστήματος οδηγούμενου από τένοντες.



Εικόνα 6: Απεικόνιση πειραματικής διάταξης, στην εικόνα φαίνονται οι επενεργητές, τα αισθητήρια, το δάκτυλο και η βάση που τα συνδέει μεταξύ τους.

Στην εικόνα 6, απεικονίζεται η πειραματική διάταξη που κατασκευάστηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία. Αποτελείται από ένα ανθρωπόμορφο ρομποτικό δάκτυλο με τρείς αρθρώσεις και τρεις φάλαγγες το οποίο κατασκευάστηκε με τρισδιάστατη εκτύπωση υλικού PLA. Το δάκτυλο μπορεί και κινείται στο επίπεδο χωρίς να επηρεάζεται από την βαρύτητα, με την βοήθεια κινητήρων τύπου servo οι οποίοι χρησιμοποιούν τένοντες για την μεταφορά ροπής στις αρθρώσεις του μηχανισμού. Η έκταση του δακτύλου πραγματοποιείται μέσω ελατηρίων επαναφοράς. Όσον αφορά την μέτρηση της γωνίας των αρθρώσεων, αυτή επιτυγχάνεται με την βοήθεια αισθητήρων φαινομένου Hall. Τέλος η πληροφορία της δύναμης στον τένοντα αποσπάται με την βοήθεια δυναμοκυψελών. Ολόκληρο το ηλεκτρικό κύκλωμα που ελέγχει την παραπάνω διάταξη, βρίσκεται στο κάτω μέρος της βάσης, συμπυκνώνοντας όσο περισσότερο γίνεται την διάταξη.

1.3 Επισκόπηση της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία, αποτελείται από 6 κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένου και του παρόν κεφαλαίου, το οποίο λειτουργεί σαν εισαγωγή ενώ γίνεται και μια αναφορά στους στόχους της εργασίας. Στα επόμενα κεφάλαια θα αναλυθεί η διαδικασία που πραγματοποιήθηκε για την μοντελοποίηση, κατασκευή και πειραματική αξιολόγηση της διάταξης και πιο συγκεκριμένα:

Στο κεφάλαιο 2, γίνεται η κινηματική ανάλυση του δακτύλου και εισάγονται οι έννοιες του ευθύ και αντίστροφου κινηματικού προβλήματος, δίνεται το μοντέλο που συνδέει το μήκος του τένοντα με την γωνία της άρθρωσης καθώς και οι Ιακωβιανές του συστήματος. Στη συνέχεια πραγματοποιείται στατική ανάλυση η οποία δίνει πληροφορία για την τριβή που αναπτύσσεται στους τένοντες και τέλος γίνεται ο πειραματικός προσδιορισμός της καμπύλης των ελατηρίων επαναφοράς.

Στο κεφάλαιο 3, γίνεται περιγραφή του σχεδιασμού του δακτύλου και της συνολικής πειραματικής διάταξης. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται οι σχεδιαστικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν, οι εσωτερικές οδεύσεις των τενόντων, η κατασκευή βάσεων των επενεργητών και αισθητήρων καθώς και η διαδικασία συναρμολόγησης.

Στο κεφάλαιο 4, γίνεται η περιγραφή του ηλεκτρονικού κυκλώματος που χρησιμοποιήθηκε για την συλλογή πληροφορίας των αισθητήρων, την επεξεργασία τους και την δημιουργία εντολών στους επενεργητές. Επιπλέον γίνεται αναφορά στην διαδικασία βαθμονόμησης των δυναμοκυψελών και τέλος, γίνεται μια μικρή μελέτη για την επιλογή των επενεργητών.

Στο κεφάλαιο 5, υλοποιούνται τέσσερις ελεγκτές για τον έλεγχο της γωνιακής θέσης του ρομποτικού δακτύλου, (α) ελεγκτής ανοιχτού βρόχου, (β) αναλογικός-ολοκληρωτικός ελεγκτής (PI), (γ) ελεγκτής ενδοτικότητας και (δ) ελεγκτής εμπέδησης. Οι οποίοι αξιολογούνται ξεχωριστά μέσα από πειραματικές διαδικασίες.

Τέλος στο κεφάλαιο 6, γίνεται μια ανασκόπηση της εργασίας, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν καθώς και δίνονται ιδέες για μελλοντικές επεκτάσεις.

Κεφάλαιο 2: Κινηματική και στατική ανάλυση του ρομποτικού δακτύλου

Εισαγωγή

Στην ενότητα αυτή αναλύεται η μηχανολογική δομή του συστήματος και μελετάται η όδευση των τενόντων μέσω ειδικά διαμορφωμένων εσωτερικών οδηγών. Παράλληλα, παρουσιάζεται η κινηματική ανάλυση του ρομποτικού δακτύλου υπό μελέτη. Δίνεται το ευθύ και αντίστροφο κινηματικό, η σύνδεση της μεταβολής του μήκους κάθε τένοντα με την αντίστοιχη γωνία της άρθρωσης και οι Ιακωβιανές του συστήματος. Η ενότητα κλείνει με την στατική μελέτη του μηχανισμού και πιο συγκεκριμένα τον προσδιορισμό της τριβής που αναπτύσσεται στους τένοντες και τον πειραματικό προσδιορισμό της σταθεράς των ελατηρίων επαναφοράς.

2.1 Περιγραφή και παραδοχές του δακτύλου

Στην εικόνα 7 απεικονίζεται ένα γενικό απλοποιημένο σχήμα που περιγράφει το ρομποτικό δάκτυλο υπό μελέτη, επιπλέον στον πίνακα 1 αναλύεται η ονοματολογία που χρησιμοποιείται για την περιγραφή διαφόρων μεγεθών και παραμέτρων του δακτύλου.

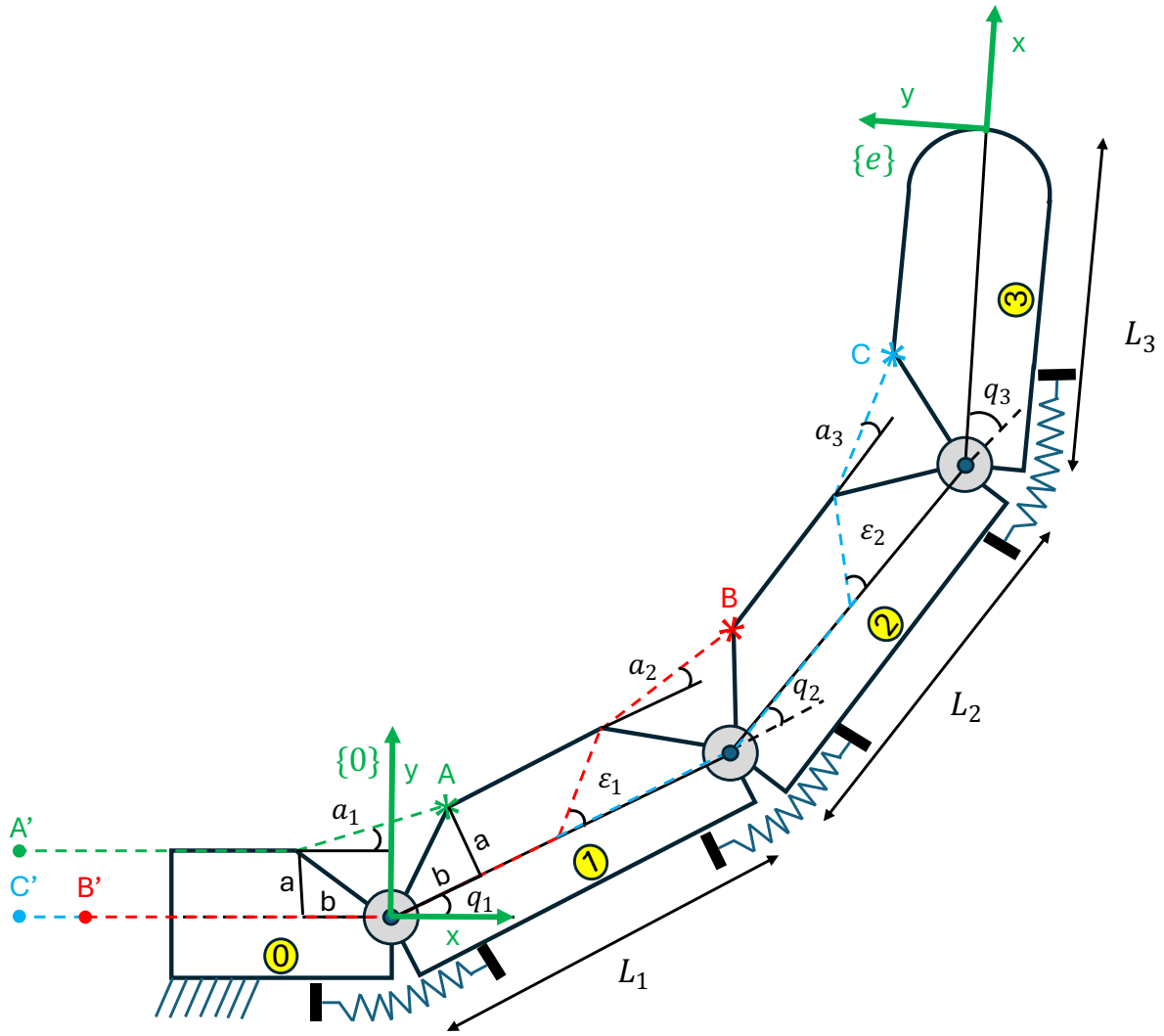
Το ρομποτικό δάκτυλο αποτελείται από τρείς αρθρώσεις και τρείς φάλαγγες, έχοντας την δυνατότητα να κινείται στο επίπεδο, χωρίς να επηρεάζεται από την βαρύτητα. Οι μεταβλητές των αρθρώσεων q_i υποδηλώνουν την γωνία στροφής. Όταν αυτές λαμβάνουν μηδενική τιμή, το δάκτυλο βρίσκεται σε πλήρη έκταση, ευθυγραμμισμένο με τον άξονα X του πλαισίου αναφοράς της βάσης {0}. Επιπλέον έχει τοποθετηθεί ένα πλαίσιο {e}, που υποδηλώνει την θέση και προσανατολισμό του άκρου. Η κάμψη των συνδέσμων επιτυγχάνεται μέσω τενόντων ενώ για την έκταση, χρησιμοποιούνται ελατήρια επαναφοράς. Επισημαίνεται ότι δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στην κάμψη του δακτύλου ενώ μικρότερη σημασία έχει η έκταση του, όπως γίνεται και στην καθημερινότητα.

Οι τένοντες στην εικόνα 7, απεικονίζονται με διακεκομμένες γραμμές. Διέρχονται από ειδικές εσωτερικές οδεύσεις και προσφύονται στην κορυφή του κάθε συνδέσμου στα σημεία A,B,C, ενώ οι απολήξεις τους, αναφέρονται στα σημεία A', B',C'. Όταν οι γωνίες των συνδέσμων είναι μη μηδενικές, οι τένοντες εμφανίζουν γωνίες α με την προέκταση των συνδέσμων. Σημειώνεται ότι για τον συγκεκριμένο μηχανισμό, ο τένοντας που ελέγχει την πρώτη άρθρωση δεν διέρχεται από κάποια εσωτερική όδευση, σε αντίθεση με τους τένοντες που ελέγχουν την δεύτερη και τρίτη άρθρωση.

Οι εσωτερικές οδοί απεικονίζονται στην εικόνα 7 και εμφανίζουν γωνίες ε_1 και ε_2. Για παράδειγμα ο οδηγός που κατευθύνει τον τένοντα στην δεύτερη άρθρωση, ξεκινάει από το σημείο B', διέρχεται από το κέντρο περιστροφής της πρώτης άρθρωσης και εκτρέπεται ανάλογα με την γωνία της άρθρωσης αυτής. Στη συνέχεια εκτρέπεται κατά γωνία ε_1 και καταλήγει στο σημείο B. Τα εσωτερικά μονοπάτια αναλύονται περεταίρω στην ενότητα 3.1.

Το δάκτυλο όπως προαναφέρθηκε αποτελείται από τρείς φάλαγγες, ο σύνδεσμος 0 όπως απεικονίζεται στην εικόνα 7 λειτουργεί σαν τα μετακάρπια οστά στον άνθρωπο, ενώνει δηλαδή το δάκτυλο με την υπόλοιπη διάταξη. Οι σύνδεσμοι 1 έως 3, με μήκη L_1, L_2, L_3, είναι αυτοί που περιστρέφονται μέσω των τενόντων. Για τον σχεδιασμό των συνδέσμων χρησιμοποιήθηκαν οι σχεδιαστικές παράμετροι a και b με βάση την μέγιστη επιθυμητή γωνία της κάθε άρθρωσης που εμπλέκονται οι σύνδεσμοι. Η επιλογή των παραμέτρων αναλύεται περεταίρω στην ενότητα 3.1 .

Για τους σκοπούς της μελέτης, έγιναν ορισμένες παραδοχές. Αρχικά, το ρομποτικό δάκτυλο φέρει άκαμπτους συνδέσμους, οι τένοντες είναι ανελαστικοί και τέλος το δάκτυλο μπορεί και κινείται ελεύθερα στο επίπεδο, δίχως την επιρροή της βαρύτητας και χωρίς να βρίσκεται σε επαφή με κάποια επιφάνεια ή αντικείμενο.



Εικόνα 7: Το ρομποτικό δάκτυλο οδηγούμενο από τένοντες και οι κινηματικές του παράμετροι.

ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

Σύμβολο	Επεξήγηση
$\tilde{x}_i$	Το μεταβαλλόμενο μήκος τένοντα
h_i	Το ενεργό μήκος τένοντα
L_{0i}	Το συνολικό μήκος τένοντα (όταν qi = 0)
L_i	Το μήκος συνδέσμου του ρομποτικού δακτύλου.
a_i	Απόσταση τένοντα από το κέντρο περιστροφής (άξονας Y)
b_i	Απόσταση τένοντα από το κέντρο περιστροφής (άξονας X)
α_i	Γωνία τένοντα με την προέκταση του προηγούμενου συνδέσμου
ε_i	Σχεδιαστική παράμετρος
q_i	Γωνία άρθρωσης
ω_i	Γωνία μεταξύ συνδέσμων
x_e	Συντεταγμένη άξονα X του άκρου του ρομποτικού δακτύλου
y_e	Συντεταγμένη άξονα Y του άκρου του ρομποτικού δακτύλου
x_w	Συντεταγμένη άξονα X του σημείου καρπού του ρομποτικού δακτύλου
y_w	Συντεταγμένη άξονα Y του σημείου καρπού του ρομποτικού δακτύλου
θ	Προσανατολισμός άκρου του ρομποτικού δακτύλου
J_t	Ιακωβιανή τενόντων
J	Ιακωβιανή δακτύλου

Πίνακας 1: Μεταβλητές συστήματος.

2.2 Ευθύ και αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα ρομποτικού δακτύλου.

Το ευθύ κινηματικό πρόβλημα ενός βραχίονα ορίζεται ως το πρόβλημα στο οποίο υπάρχει πληροφορία των γωνιών των αρθρώσεων και το ζητούμενο είναι οι συντεταγμένες του άκρου του ρομποτικού βραχίονα. Οι σχέσεις που συνδέουν τις γωνίες αρθρώσεων με την θέση του άκρου δίνονται παρακάτω και ισχύουν για έναν βραχίονα με τρείς αρθρώσεις που κινείται στο επίπεδο.

$$X = L_1 c_1 + L_2 c_{12} + L_3 c_{123} \quad (1)$$

$$Y = L_1 s_1 + L_2 s_{12} + L_3 s_{123} \quad (2)$$

Όπου X και Y οι συντεταγμένες του άκρου του ρομποτικού δακτύλου και L_i τα μήκη των συνδέσμων. Επιπλέον δίνεται ο παρακάτω πίνακας επεξήγησης γεωμετρικών μεταβλητών.

s_1	$\sin(q_1)$
s_{12}	$\sin(q_1 + q_2)$
s_{123}	$\sin(q_1 + q_2 + q_3)$
c_1	$\cos(q_1)$
c_{12}	$\cos(q_1 + q_2)$
c_{123}	$\cos(q_1 + q_2 + q_3)$

Πίνακας 2: Πίνακας επεξήγησης γεωμετρικών μεταβλητών

Το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα ενός βραχίονα ορίζεται ως το πρόβλημα στο οποίο υπάρχει πληροφορία της θέσης και του προσανατολισμού του άκρου και το ζητούμενο είναι οι γωνίες της κάθε άρθρωσης του βραχίονα. Οι σχέσεις που υπολογίζουν τις γωνίες αρθρώσεων με δεδομένα, την θέση και προσανατολισμό του άκρου, δίνονται παρακάτω και ισχύουν για έναν βραχίονα με τρείς αρθρώσεις που κινείται στο επίπεδο.

$$q_1 = atan2\,(y_w\,, x_w) - atan2\,(L_2 s_2\,, L_1 + L_2 c_2) \quad (3)$$

Όπου x_w και y_w είναι οι συντεταγμένες του καρπού (στην περίπτωση υπό μελέτη οι συντεταγμένες του άκρου του δεύτερου συνδέσμου) και δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις.

$$x_w = x_e - L_3 \cos(\theta) \quad (4)$$

$$y_w = y_e - L_3 \sin(\theta) \quad (5)$$

$$q_2 = atan2\left(\pm\sqrt{1 - D^2}\,, D\right) \quad (6)$$

Όπου:

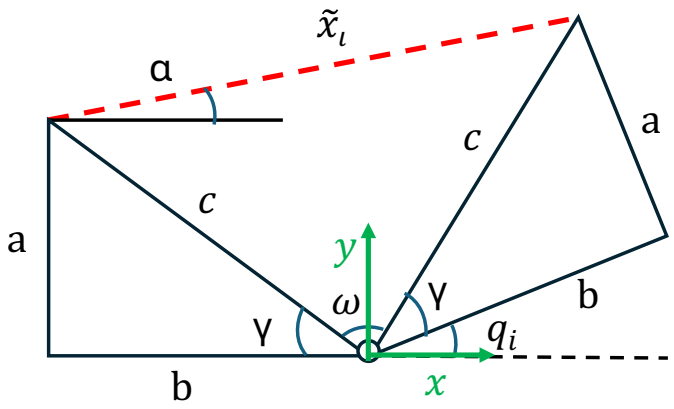
$$D = \frac{x_w^2 + y_w^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1 L_2} \quad (7)$$

$$q_3 = \theta - (q_1 + q_2) \quad (8)$$

Το ευθύ και αντίστροφο κινηματικό του μηχανισμού χρησιμοποιείται σε περίπτωση που είναι επιθυμητό να τοποθετηθεί το άκρο του ρομποτικού δακτύλου σε συγκεκριμένο σημείο μέσα στον χώρο εργασίας του.

2.3 Σύνδεση γωνίας άρθρωσης με ενεργό μήκος τένοντα

Ανατρέχοντας στην εικόνα 7 και εστιάζοντας στην πρώτη άρθρωση του δακτύλου, προκύπτει η εικόνα 8, η οποία απεικονίζει με λεπτομερή τρόπο την γεωμετρία της άρθρωσης αυτής.



Εικόνα 8:Λεπτομερής απεικόνιση άρθρωσης του ρομποτικού δακτύλου με παραμέτρους.

Ειδικότερα, ο τένοντας (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) εκκινεί από ένα σημείο το οποίο απέχει κάθετη απόσταση a και οριζόντια απόσταση b από το κέντρο περιστροφής της άρθρωσης και δένεται σε αντίστοιχο σημείο στον επόμενο σύνδεσμο. Επιπλέον απεικονίζεται η γωνία της άρθρωσης q_i , η γωνία του τένοντα με την προέκταση του συνδέσμου, α και η συνολική γωνία μεταξύ των δυο διαδοχικών συνδέσμων, όπου ορίζεται ω.

Παρακάτω δίνεται η εξίσωση που συνδέει την γωνία της άρθρωσης q_i με το μήκος του ενεργού τένοντα.

$$q_i = 2\cos^{-1}\left(\frac{h_i - Lo_i + 2b_i}{2\sqrt{a_\iota^2 + b_i^2}}\right) - 2\tan^{-1}\left(\frac{a_\iota}{b_i}\right) \quad (9)$$

Τέλος δίνεται η σχέση που συνδέει το ενεργό μήκος τένοντα με την γωνία της άρθρωσης.

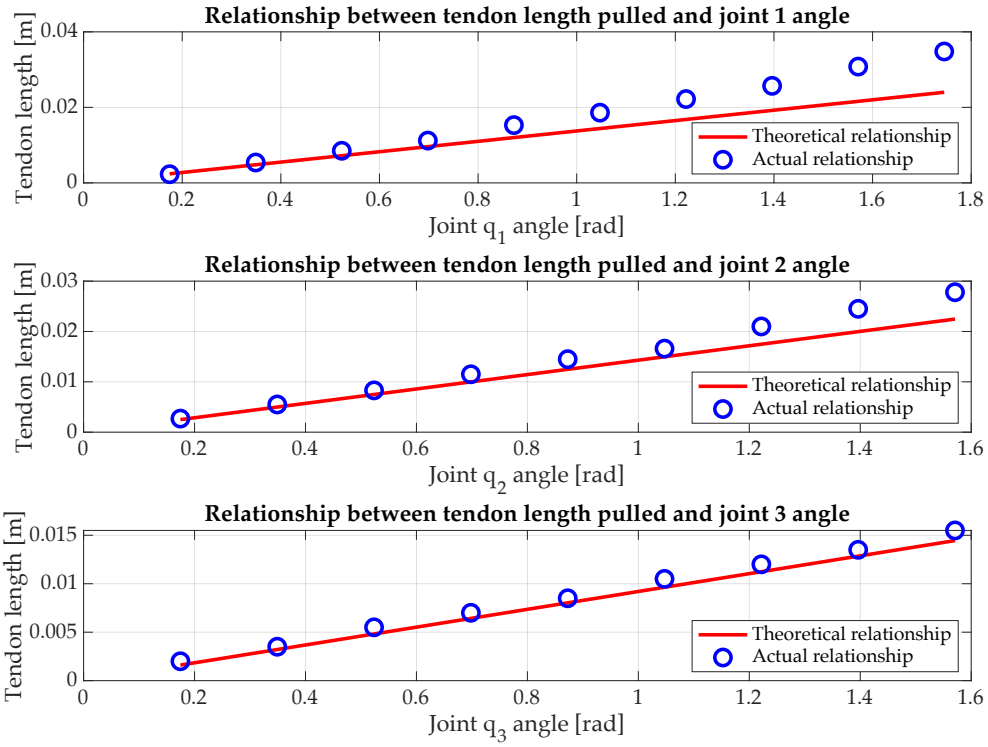
$$h_i = L_{0i} - 2b_i + 2\sqrt{a_i^2 + b_i^2}\cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{a_i}{b_i}\right) + \frac{q_i}{2}\right) \quad (10)$$

Η απόδειξη της σχέσης 10 δίνεται στο παράρτημα.

Για την επιβεβαίωση της ορθότητας της σχέσης 10, πραγματοποιήθηκαν τρία πειράματα, ένα για κάθε άρθρωση. Δόθηκαν εντολές στους επενεργητές σε όλο το επιτρεπτό εύρος κίνησης τους ανά 10^o.

Έπειτα μετρήθηκε το μήκος του τένοντα που μεταβλήθηκε μέσω της περιστροφής των επενεργητών και συγκρίθηκε με το μήκος του τένοντα που υπολογίζει η θεωρητική σχέση 10. Για την κατανόηση του παρακάτω γραφήματος, σημειώνεται ότι οι παράμετροι a και b επιλέχθηκαν με βάση τον παρακάτω πίνακα. Επιπλέον η ποσότητα L_{0i} θεωρείται ίση με το μηδέν.

Αρ. Συνδέσμου	Παράμετρος a	Παράμετρος b
Σύνδεσμος 1	15mm	18mm
Σύνδεσμος 2	15mm	15mm
Σύνδεσμος 3	9.6mm	9.6mm



Εικόνα 9: Απεικόνιση σχέσης μεταξύ ενεργού μήκους τένοντα και γωνίας πρώτης άρθρωσης (άνω τμήμα), ενεργού μήκους τένοντα και γωνίας δεύτερης άρθρωσης (μεσαίο τμήμα) και ενεργού μήκους τένοντα και γωνίας τρίτης άρθρωσης (κάτω τμνήμα).

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 9, τα πειραματικά δεδομένα (μπλε κουκίδες) βρίσκονται αρκετά κοντά στα θεωρητικά δεδομένα (κόκκινη καμπύλη), κάτι το οποίο θεωρείται αρκετό για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας.

2.4 Υπολογισμός Ιακωβιανών ρομποτικού δακτύλου

Σε αυτή την ενότητα μελετάται ο υπολογισμός των Ιακωβιανών και πιο συγκεκριμένα η Ιακωβιανή του βραχίονα και η Ιακωβιανή των τενόντων, με την βοήθεια των οποίων υπολογίζεται η ταχύτητα των αρθρώσεων έχοντας πληροφορία της ταχύτητας του άκρου ή της ταχύτητας του τένοντα και η ροπή στις αρθρώσεις του μηχανισμού γνωρίζοντας είτε την δύναμη που ασκείται στο άκρο του ρομποτικού δακτύλου, είτε την δύναμη που φέρουν οι τένοντες.

2.4.1 Υπολογισμός Ιακωβιανής βραχίονα

Η Ιακωβιανή του βραχίονα συνδέει τις ταχύτητες του άκρου με τις ταχύτητες στις αρθρώσεις όπως φαίνεται με την παρακάτω σχέση.

$$\dot{X} = J\,\dot{q}$$

Από το θεμελιώδες θεώρημα της ρομποτικής ισχύει:

$$T = J^T F \quad (11)$$

Όπου T είναι το $nx1$ διάνυσμα που περιλαμβάνει πληροφορία της ροπής σε κάθε άρθρωση του μηχανισμού και n ο αριθμός των αρθρώσεων. F είναι το $nx1$ διάνυσμα, που στην περίπτωση υπό μελέτη, περιλαμβάνει πληροφορία για την δύναμη που ασκείται ή ασκεί το άκρο του ρομποτικού δακτύλου και ανάγεται σε X και Y συνιστώσες καθώς και σε ροπή M_Z στον άξονα περιστροφής του τελικού συνδέσμου.

$$J = \begin{bmatrix} J_v \\ J_\omega \end{bmatrix},\ J_v = \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial q_1} & \frac{\partial X}{\partial q_2} & \frac{\partial X}{\partial q_3} \\ \frac{\partial Y}{\partial q_1} & \frac{\partial Y}{\partial q_2} & \frac{\partial Y}{\partial q_3} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ και } J_\omega = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Τελικά υπολογίζεται η Ιακωβιανή του βραχίονα με την βοήθεια των σχέσεων του ευθέως κινηματικού που δίνονται στην ενότητα 2.2

$$J = \begin{bmatrix} -L_1 s_1 - L_2 s_{12} - L_3 s_{123} & -L_2 s_{12} - L_3 s_{123} & -L_3 s_{123} \\ L_1 c_1 + L_2 c_{12} + L_3 c_{123} & L_2 c_{12} + L_3 c_{123} & L_3 c_{123} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

2.4.2 Υπολογισμός Ιακωβιανής τενόντων

Η Ιακωβιανή των τενόντων συνδέει τις ταχύτητες του τένοντα με τις ταχύτητες στις αρθρώσεις όπως φαίνεται με την παρακάτω σχέση.

$$\dot{D}l = J_t\,\dot{q}$$

Από το θεμελιώδες θεώρημα της ρομποτικής ισχύει:

$$T = J_t^T F_t \quad (12)$$

Όπου J_t^T η ανάστροφη Ιακωβιανή τενόντων του ρομποτικού δακτύλου και F_t το διάνυσμα δυνάμεων των τενόντων. Η γενική μορφή της Ιακωβιανής τενόντων δίνεται παρακάτω.

$$J_t = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial q_1} & \frac{\partial h_1}{\partial q_2} & \frac{\partial h_1}{\partial q_3} \\ \frac{\partial h_2}{\partial q_1} & \frac{\partial h_2}{\partial q_2} & \frac{\partial h_2}{\partial q_3} \\ \frac{\partial h_3}{\partial q_1} & \frac{\partial h_3}{\partial q_2} & \frac{\partial h_3}{\partial q_3} \end{bmatrix}$$

Πρόκειται για έναν διαγώνιο πίνακα με μη μηδενικά στοιχεία στην διαγώνιο για τον οποίο ισχύει

$$J_t = J_t^T$$

Πιο συγκεκριμένα τα στοιχεία του πίνακα δίνονται από την σχέση 13.

$$\frac{\partial h_i}{\partial q_k} = -\sqrt{a_i{}^2 + b_i{}^2}\sin\left(\tan^{-1}\left(\frac{a_i}{b_i}\right) + \frac{q_k}{2}\right) \quad (13)$$

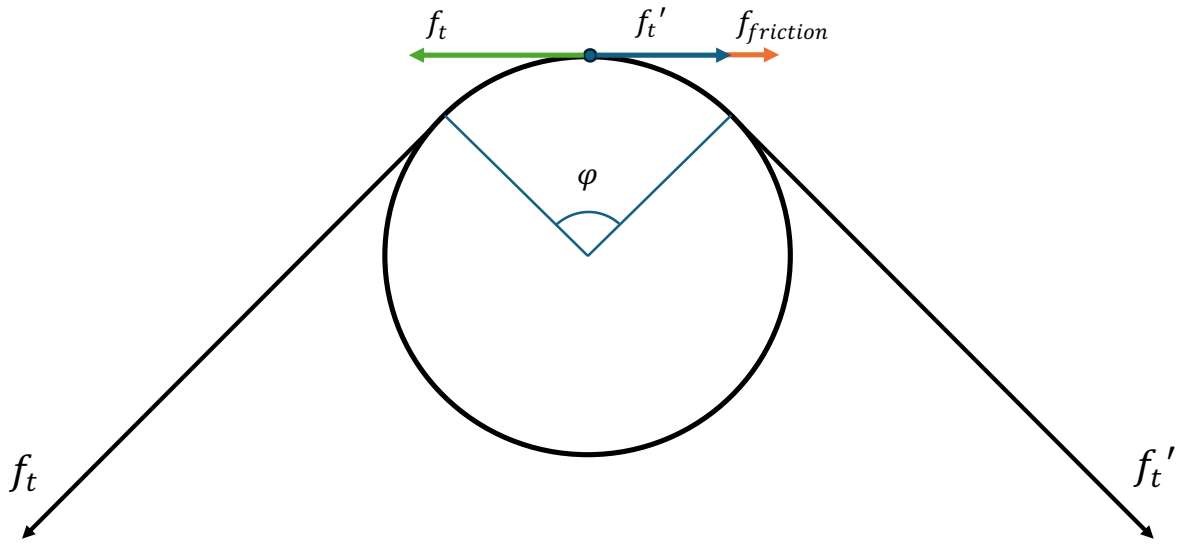
Όταν i = k τότε η παραπάνω ποσότητα είναι μη μηδενική, αντίθετα όταν i ≠ k τότε η παραπάνω ποσότητα είναι ίση με μηδέν.

2.5 Στατική ανάλυση ισορροπίας δακτύλου

Σε αυτήν την ενότητα θα μελετηθεί ο μηχανισμός στατικά, δηλαδή θα αναλυθεί η ισορροπία δυνάμεων-ροπών στον μηχανισμό έτσι ώστε να ισορροπήσει σε μια επιθυμητή θέση. Αρχικά τέλος θα μελετηθεί το φαινόμενο της τριβής και το πώς επηρεάζει την δύναμη υπεύθυνη για την παραγωγή ροπής στην άρθρωση. Έπειτα θα προσδιοριστεί ο συντελεστής τριβής πειραματικά και τέλος θα παρουσιαστεί ο πειραματικός προσδιορισμός της καμπύλης ελατηρίων.

2.5.1 Τριβή συστήματος

Η επαφή ενός τένοντα με κυλινδρικές επιφάνειες εισάγει σημαντικές απώλειες λόγω της τριβής Capstan.



Εικόνα 10:Ανάλυση δυνάμεων κατά την διέλευση του τένοντα από κυλινδρικό οδηγό.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 10, η δύναμη εφελκυσμού του τένοντα εξασθενεί, έπειτα από την επαφή του με κυλινδρικό οδηγό, έχοντας συνολική γωνία περιέλιξης φ. Η σχέση 14, αποτυπώνει μαθηματικά την εξασθένηση αυτή.

$$f_t' = f_t\, e^{-\mu\varphi} \quad (14)$$

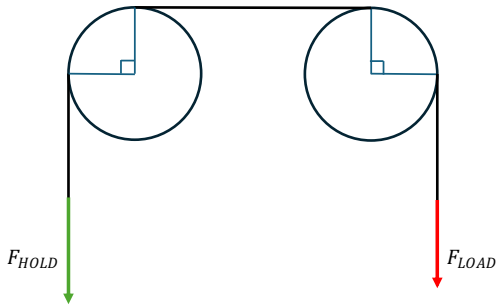
Όπου, μ ο συντελεστής τριβής μεταξύ του υλικού του τένοντα και του υλικού της επιφάνειας με την οποία έρχεται σε επαφή και φ η συνολική γωνία περιέλιξης του τένοντα. Η τριβή capstan δίνεται από την σχέση 15.

$$f_{friction} = f_t(1 - e^{-\mu\varphi}) \quad (15)$$

Στην γενική περίπτωση ένα νήμα μπορεί να εφάπτεται σε διαφορετικά τόξα, υπάρχουν λοιπόν πολλές τριβές οι οποίες δρουν τοπικά σε κάθε εφαπτόμενο τόξο. Αποδεικνύεται ότι υπάρχει μια συνολική εξασθένηση της αρχικής δύναμης, η οποία συνοψίζει όλη την πληροφορία για τις τριβές και δίνεται στο παράρτημα.

2.5.2 Πειραματικός προσδιορισμός συντελεστή τριβής

Για να μπορέσει να υπολογιστεί σωστά η εξασθενημένη δύναμη που προκαλεί την ροπή στρέψης του δακτύλου, πρέπει πρώτα να υπολογιστεί ο συντελεστής τριβής μεταξύ του υλικού του τένοντα και του υλικού των επιφανειών με τις οποίες έρχεται σε επαφή. Για περισσότερη σιγουριά ο συντελεστής τριβής προσδιορίστηκε πειραματικά, χρησιμοποιώντας μια εκτυπωμένη διάταξη με το ίδιο υλικό του δακτύλου.



Εικόνα 11: Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης για τον προσδιορισμό συντελεστή τριβής.

Στην εικόνα 11, απεικονίζεται με απλό σχέδιο, η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του συντελεστή τριβής. Υπάρχουν δυο κυλινδρικές επιφάνειες πάνω στις οποίες εφάπτεται ο τένοντας σχηματίζοντας συνολική γωνία 180^0.

Πραγματοποιήθηκε πείραμα τοποθετώντας, στα άκρα του τένοντα, γνωστό βάρος με αποτέλεσμα να ισορροπήσει ο τένοντας και να μην ολισθαίνει. Σταδιακά αυξάνεται το βάρος μόνο από την μία μεριά έως ότου, ο τένοντας να αρχίσει να ολισθαίνει. Καθώς τα φορτία F_{LOAD} και F_{HOLD} είναι γνωστά, ο συντελεστής τριβής μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την σχέση 16 η οποία προκύπτει από την σχέση 14.

$$\mu = \ln\left(\frac{F_{LOAD}}{F_{HOLD}}\right)\frac{1}{\varphi} \quad (16)$$

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε πέντε φορές και ο συντελεστής τριβής που προέκυψε είναι ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων των πειραμάτων για μεγαλύτερη ακρίβεια.

$$\mu = 0.112$$

Σε αυτό το σημείο ορίζεται ο πίνακας Φ, ο οποίος περιέχει πληροφορία της τριβής για κάθε άρθρωση του ρομποτικού δακτύλου, είναι ένας 3x3 διαγώνιος πίνακας με μη μηδενικά στοιχεία στην κύρια διαγώνιο. Οι γωνίες τριβής (φ_i) δίνονται σε radians.

$$\Phi = \begin{bmatrix} e^{-\mu\varphi_1} & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\mu\varphi_2} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\mu\varphi_3} \end{bmatrix}$$

Όπου:

Γωνία περιέλιξης τένοντα 1(φ_1)	α_1
Γωνία περιέλιξης τένοντα 2(φ_2)	$q_1+2\varepsilon_1-\alpha_2$
Γωνία περιέλιξης τένοντα 3(φ_3)	$q_1+q_2+2\varepsilon_2-\alpha_3$

Οι οδεύσεις των τενόντων, με βάση τις οποίες προκύπτουν οι σχεδιαστικές παράμετροι (ε_i), εξηγούνται με λεπτομέρεια στην ενότητα 3.1. Στον πίνακα 3 δίνονται οι σχεδιαστικές παράμετροι (ε_i), για τον μηχανισμό υπό μελέτη:

ε_1	0.9158 rad (ή 52.5^o)
ε_2	0.6314 rad (ή 36.2^o)

Πίνακας 3: Πίνακας σχεδιαστικών παραμέτρων ε_i.

2.5.3 Πειραματικός προσδιορισμός καμπύλης ελατηρίων

Όπως αναλύθηκε στην ενότητα 2.4.2, η Ιακωβιανή των τενόντων μπορεί να συνδέσει την δύναμη που ασκείται στους τένοντες, με την ροπή στις αρθρώσεις. Επιπλέον για να ισορροπήσει το ρομποτικό δάκτυλο σε μια θέση πρέπει να ισχύει η συνθήκη ισορροπίας ροπών, επομένως:

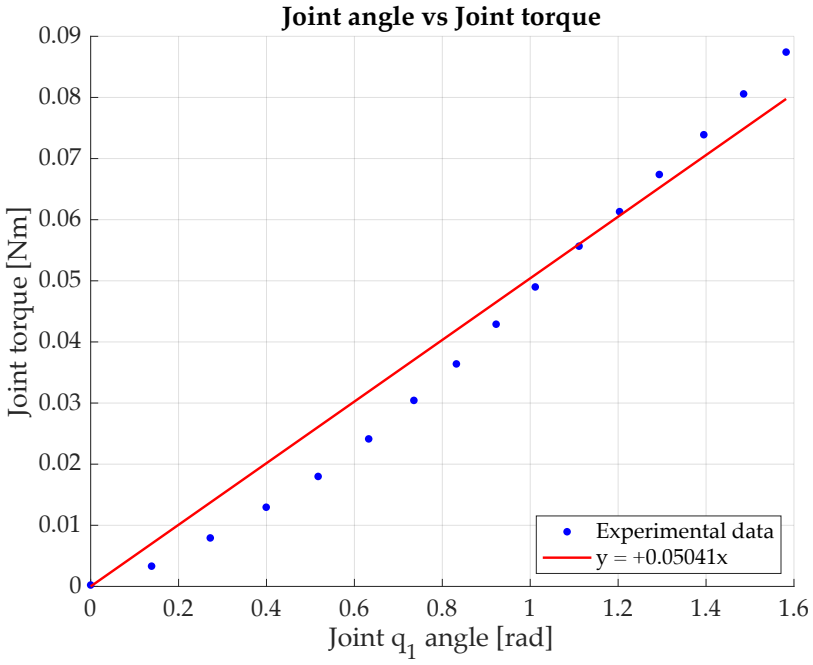
$$T_{spring} = T_{joint}$$

Όπου T_{joint} ,το διάνυσμα ροπών που υπολογίζεται από την σχέση 17, η οποία προκύπτει από την σχέση 12, αν προστεθεί η πληροφορία της τριβής, μέσω του πίνακα Φ.

$$T_{joint} = J_{tendon}^T \Phi F_{tendon} \quad (17)$$

Καθώς όλος ο μηχανισμός χρησιμοποιεί παρόμοια ελατήρια σε κάθε άρθρωση, γίνεται η υπόθεση ότι όλα είναι ίδια. Επομένως πραγματοποιώντας την πειραματική διαδικασία μόνο για μια άρθρωση, είναι αρκετή για τον προσδιορισμό της σταθεράς ελατηρίων για όλο τον μηχανισμό. Η πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει το κομμάτι συλλογής δεδομένων γωνίας και δύναμης τένοντα καθώς και το κομμάτι των υπολογισμών για να προκύψει η καμπύλη που περιγράφει το ελατήριο.

Αρχικά δίνονται εντολές σε όλο το εύρος περιστροφής της άρθρωσης και αποθηκεύονται τα δεδομένα. Στη συνέχεια υπολογίζεται η ροπή του ελατηρίου χρησιμοποιώντας την σχέση 17, αφού ισχύει η συνθήκη ισορροπίας ροπών. Τέλος τα πειραματικά δεδομένα προσεγγίζονται με την καμπύλη του ελατηρίου.



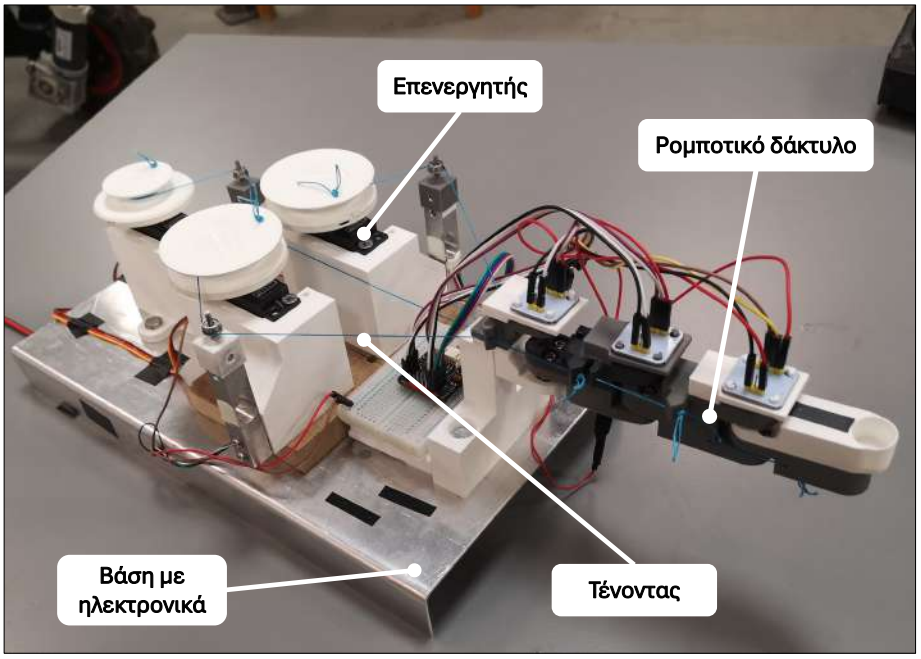
Εικόνα 12:Απεικόνιση γραμμικής προσέγγισης της καμπύλης του ελατηρίου (κόκκινη γραμμή) και πειραματικά δεδομένα (μπλε κουκκίδες).

Όπως φαίνεται και από την εικόνα 12, τα πειραματικά δεδομένα προσεγγίζονται από μια ευθεία γραμμή, παρόλο που ένα πολυώνυμο δευτέρας τάξης φαίνεται να ταιριάζει καλύτερα. Η χρήση της καμπύλης δευτέρας τάξης ερευνήθηκε, όμως καθώς οι συντελεστές ήταν πολύ μικροί, θεωρήθηκε πως μια απλή γραμμική προσέγγιση θα ήταν επαρκής. Πρακτικά η κλίση της ευθείας χρησιμοποιείται ως η σταθερά του ελατηρίου.

Κεφάλαιο 3: Παραμετρική σχεδίαση και κατασκευή ρομποτικού δαχτύλου

Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται διεξοδικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη συναρμογή της πρωτότυπης διάταξης. Πιο συγκεκριμένα εξετάζονται ο σχεδιασμός του δακτύλου, η όδευση των τενόντων, οι παράμετροι σχεδιασμού των συνδέσμων, και ο σχεδιασμός των βάσεων στήριξης για τους επενεργητές, τους αισθητήρες και το συνολικό σύστημα.

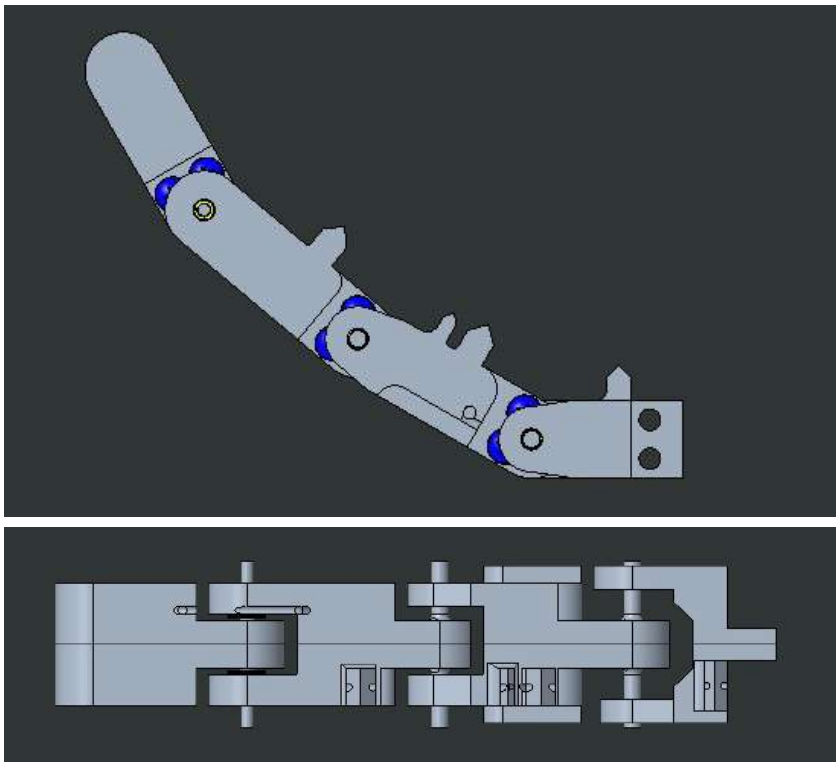


Εικόνα 13: Απεικόνιση πρωτότυπης κατασκευής

Στην εικόνα 13 απεικονίζεται η πλήρης πρωτότυπη κατασκευή, η οποία αποτελείται από το ρομποτικό δάκτυλο, την κεντρική βάση στήριξης με τις ηλεκτρονικές συνδέσεις και το υποσύστημα επενεργητών-αισθητήρων. Το δομικά μέρη του δάκτυλου καθώς και οι ειδικές βάσεις προσαρμογής των κινητήρων και των δυναμοκυψελών έχουν κατασκευαστεί μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης, με υλικό PLA. Χρησιμοποιούνται τρείς κινητήρες servo ο οποίοι συνδέονται με τους τένοντες μέσω τριών τροχαλιών. Τέλος οι τένοντες εμφανίζουν μια εκτροπή της πορείας τους, για να περάσουν από τις δυναμοκυψέλες έτσι ώστε να μπορεί να μετριέται η δύναμη που ασκούν ανά πάσα στιγμή. Στο σημείο που εφάπτονται με την δυναμοκυψέλη έχουν τοποθετηθεί έδρανα κύλισης, τα οποία ελαχιστοποιούν τον συντελεστή τριβής. Τέλος, παθητικά ελατήρια έχουν τοποθετηθεί στις αρθρώσεις του δακτύλου με σκοπό την δημιουργία ροπής επαναφοράς, για την έκταση του δακτύλου.

3.1 Σχεδιασμός ρομποτικού δακτύλου

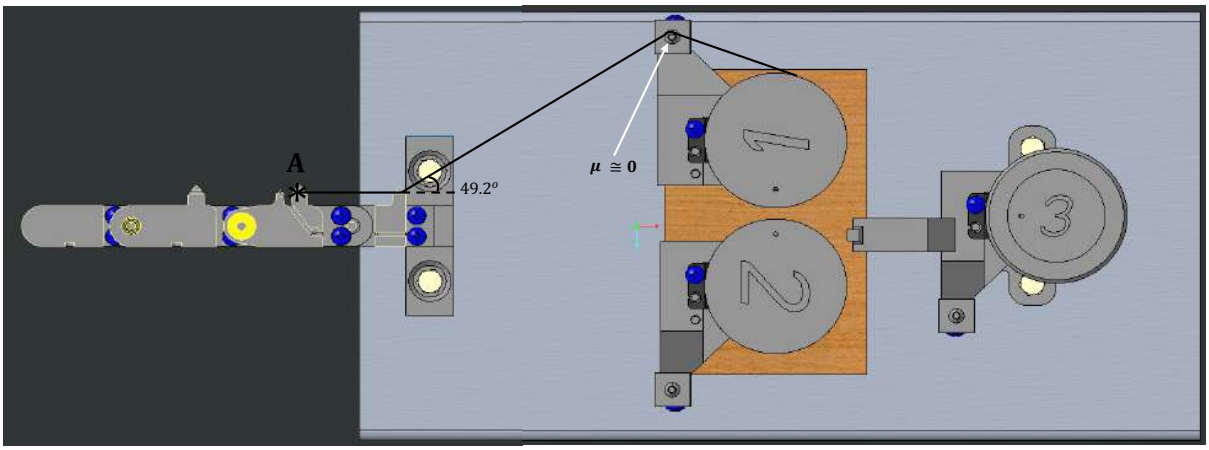
Ο σχεδιασμός του ρομποτικού δακτύλου, εστίασε στην ενίσχυση της στιβαρότητας των αρθρώσεων, ώστε να αποτρέπεται η παραμόρφωση της γεωμετρίας του δακτύλου υπό την επίδραση δυνάμεων, παράλληλων με τον άξονα περιστροφής. Καθώς και στην βελτιστοποίηση των εσωτερικών οδεύσεων των τενόντων, για την περαιτέρω ελαχιστοποίηση των απωλειών λόγω τριβής.



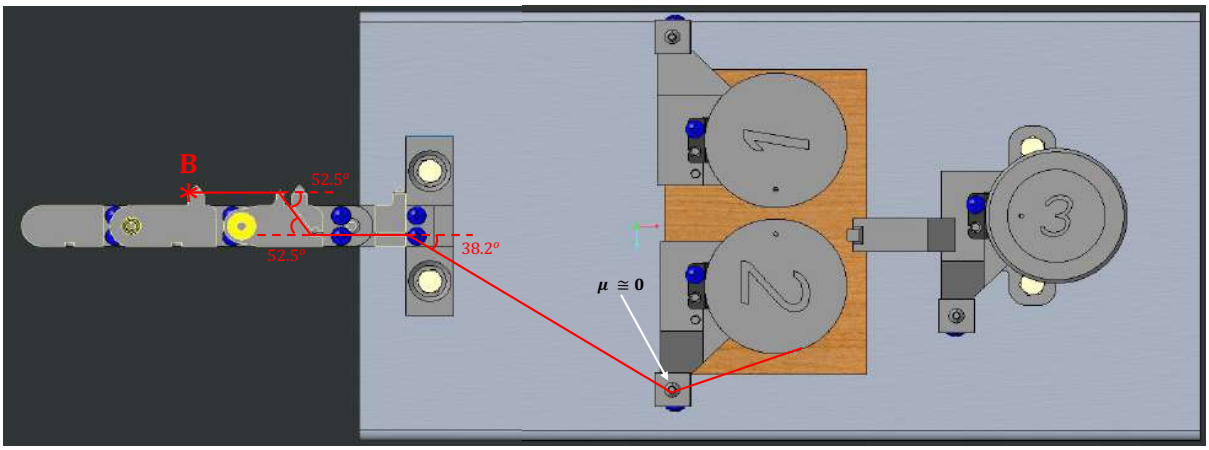
Εικόνα 14: Απεικόνιση ρομποτικού δακτύλου στο σχεδιαστικό λογισμικό CAD, το δάκτυλο φέρει τρείς περιστροφικές αρθρώσεις καθώς και τρείς φάλαγγες.

Κατά τον σχεδιασμό δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην παραμετροποίηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών, επιτρέποντας την εύκολη προσαρμογή του σχεδίου σε διαφορετικές ανάγκες. Για την ταχεία εξαγωγή των σχεδιαστικών μεγεθών, αναπτύχθηκε αλγόριθμος στο υπολογιστικό περιβάλλον MATLAB, ο οποίος υπολογίζει δυναμικά την βέλτιστη γεωμετρία βάσει μεταβλητών όπως το μήκος του εκάστοτε συνδέσμου και το επιθυμητό εύρος περιστροφής. Το δάκτυλο απεικονίζεται στην εικόνα 14 στο σχεδιαστικό περιβάλλον Creo Parametric.

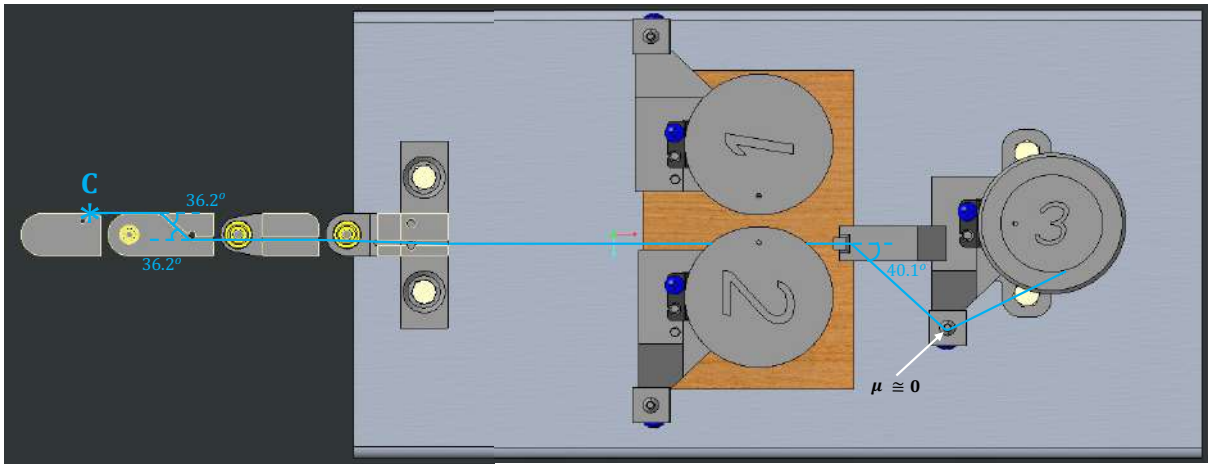
Στις Εικόνες 15, 16 και 17 απεικονίζονται οι εσωτερικές οδεύσεις των τενόντων, για τα σημεία πρόσδεσης A, B και C αντίστοιχα. Το άθροισμα των γωνιών που σχηματίζει ο τένοντας κατά τη διαδρομή του, σε συνδυασμό με τη γωνιακή θέση των προηγούμενων αρθρώσεων, ορίζουν τις γωνίες περιέλιξης, φ_1, φ_2 και φ_3 (όπως αναφέρεται και στην ενότητα 2.5.3). Επισημαίνεται, ότι στα σημεία επαφής του τένοντα με τη δυναμοκυψέλη έχει γίνει παραδοχή μηδενικής τριβής.



Εικόνα 15: Εσωτερικές οδεύσεις τένοντα που περιστρέφει την πρώτη άρθρωση.



Εικόνα 16: Εσωτερικές οδεύσεις τένοντα που περιστρέφει την δεύτερη άρθρωση.



Εικόνα 17: Εσωτερικές οδεύσεις τένοντα που περιστρέφει την τρίτη άρθρωση.

Από τις εικόνες 15 έως 17, φαίνονται μερικές γωνίες οι οποίες συμβάλλουν στην τριβή των τενόντων, επομένως και ειδικά για την διάταξη υπό μελέτη, οι σχέσεις των γωνιών περιέλιξης, που δίνονται στην ενότητα 2.5.2 ανανεώνονται σε:

Γωνία περιέλιξης τένοντα 1(φ_1):	$49.2^o + \alpha_1$
Γωνία περιέλιξης τένοντα 2(φ_2):	$q_1 + 38.2^o + 2\varepsilon_1 - \alpha_2$
Γωνία περιέλιξης τένοντα 3(φ_3):	$q_1 + q_2 + 40.1^o + 2\varepsilon_2 - \alpha_3$

Ανατρέχοντας στην Εικόνα 8 (ενότητα 2.3), ορίζονται οι σχεδιαστικές παράμετροι a και b. Η σχέση που συνδέει τον λόγο $N = \frac{a}{b}$ με τη μέγιστη δυνατή γωνία περιστροφής της άρθρωσης δίνεται παρακάτω.

$$N = \tan\left(\frac{\pi - \omega}{2}\right) \quad (23)$$

Από την σχέση 23, προκύπτει η ποιοτική συμπεριφορά που περιγράφεται στον πίνακα 4

N = 1	Μέγιστη γωνία 90°
N > 1	Μέγιστη γωνία < 90°
N < 1	Μέγιστη γωνία > 90°

Πίνακας 4:Ερμηνεία του λόγου παραμέτρων σχεδιασμού N.

Για την παρούσα μελέτη, καθορίστηκαν οι παράμετροι a και b ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητές γωνίες λειτουργίας, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.

Αρ. Συνδέσμου	Μέγιστη γωνία	Παράμετρος a	Παράμετρος b
Σύνδεσμος 1	100°	15mm	18mm
Σύνδεσμος 2	90°	15mm	15mm
Σύνδεσμος 3	90°	9.6mm	9.6mm

Πίνακας 5:Επιλογές παραμέτρων a και b για επιθυμητές γωνίες λειτουργίας.

Σημειώνεται πως καθώς κάθε σύνδεσμος συμμετέχει σε δύο αρθρώσεις (εκτός του συνδέσμου 0 και 3). Οι γεωμετρικές παράμετροι a και b, ενδέχεται να διαφέρουν στα δύο άκρα του ίδιου συνδέσμου, προκειμένου να ικανοποιούνται οι διαφορετικές απαιτήσεις γωνιών κάθε άρθρωσης.

Ορίζεται το συνολικό μήκος του συνδέσμου, η απόσταση από τα κέντρα περιστροφής ενός συνδέσμου που εμπλέκεται σε δυο αρθρώσεις ή από το κέντρο περιστροφής έως το άκρο του

συνδέσμου για τον τελικό σύνδεσμο. Για τους σκοπούς της μελέτης το συνολικό μήκος είναι 63mm, και είναι ίδιο για όλους τους συνδέσμους.

Τέλος, κρίσιμη παράμετρο αποτελεί η ακτίνα της τροχαλίας του κινητήρα. Δεδομένου ότι οι κινητήρες servo λειτουργούν βέλτιστα εντός συγκεκριμένου εύρους, η γωνία περιστροφής του κινητήρα που απαιτείται (φ_m), για την πλήρη περιστροφή της άρθρωσης, πρέπει να είναι μικρότερη από το μηχανικό όριο του κινητήρα. Βάσει της γεωμετρίας του μηχανισμού, η μεταβολή του μήκους του τένοντα που χρειάζεται, για την επίτευξη της μέγιστης γωνίας ανά άρθρωση, ισούται με 2b. Εξισώνοντας τη μεταβολή αυτή με το μήκος τόξου της τροχαλίας, προκύπτει η σχέση υπολογισμού της ακτίνας.

$$r = \frac{2b}{\varphi_m} \quad (24)$$

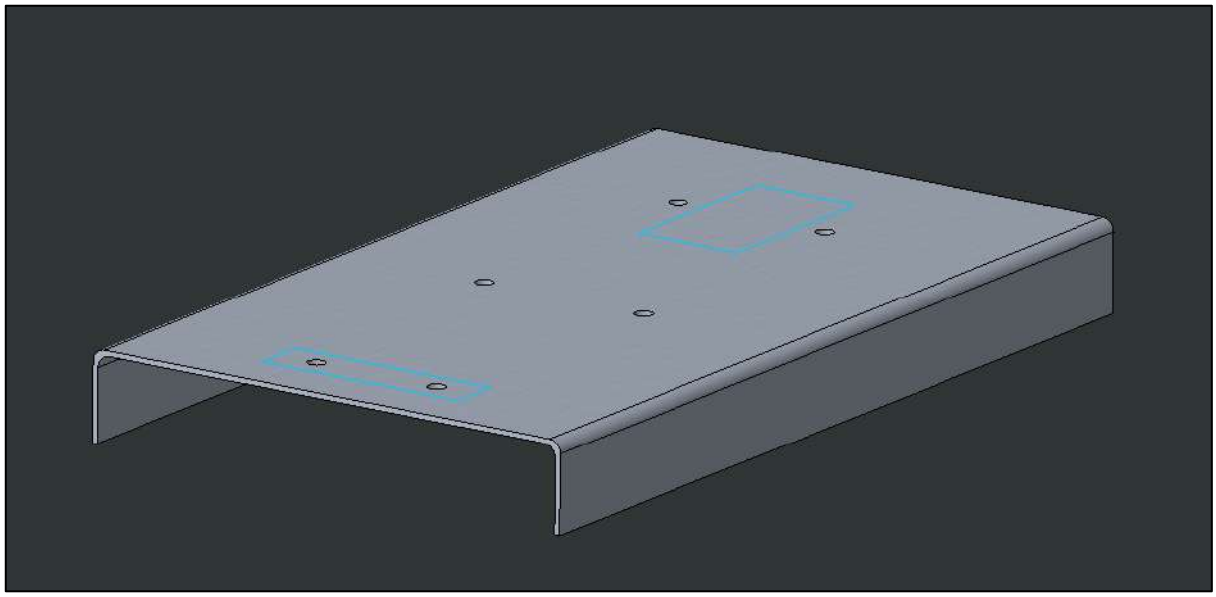
Οι επιλεγμένες ακτίνες παρουσιάζονται στον πίνακα 6.

r_1	13.75mm
r_2	14.3mm
r_3	9.17mm

Πίνακας 6: Επιλεγμένες ακτίνες τροχαλιών.

3.2 Κατασκευή βάσεων

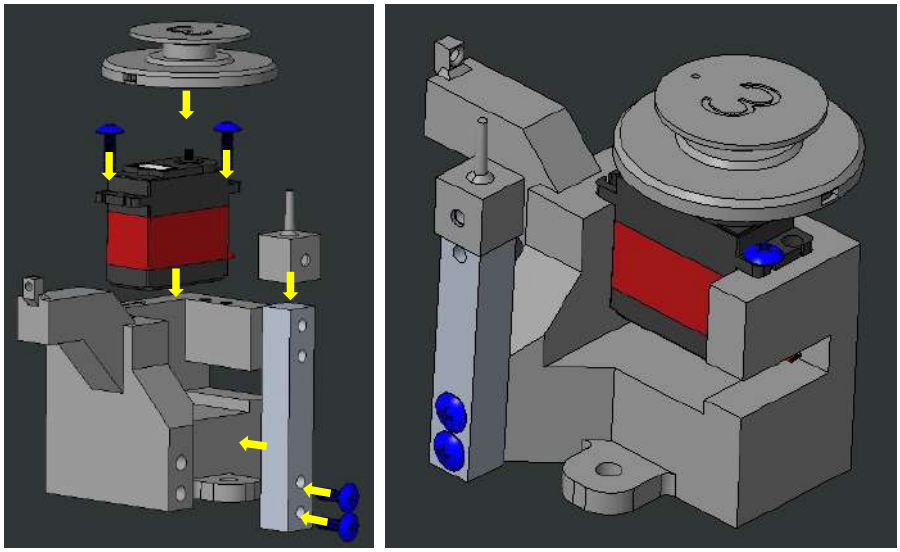
Για την ορθή στήριξη του ρομποτικού δακτύλου και την ασφαλή τοποθέτηση των επενεργητών, των αισθητήρων και των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, απαιτήθηκε ο σχεδιασμός ενός συστήματος βάσεων.



Εικόνα 18: Απεικόνιση βάσης στο περιβάλλον Creo Parametric.

Επιλέχθηκε ένα λεπτό έλασμα αλουμινίου, το οποίο έχει γεωμετρία που φαίνεται στην εικόνα 18, και ανοίχτηκαν οπές για να βιδωθούν, η βάση του δακτύλου και τρείς ξεχωριστές βάσεις στις οποίες τοποθετούνται οι κινητήρες και οι δυναμοκυψέλες. Επιπλέον το έλασμα αυτό φέρει αρκετό χώρο από κάτω για να τοποθετηθούν όλα τα ηλεκτρολογικά κομμάτια με αποτέλεσμα η βάση να είναι όσο πιο συμπαγής γίνεται, σε επίπεδο πρωτοτύπου.

Για τους κινητήρες και τις δυναμοκυψέλες σχεδιάστηκαν ειδικές, τρισδιάστατα εκτυπωμένες βάσεις, από υλικό PLA. Ιδιαίτερα για την στήριξη των δυναμοκυψελών, αντί για απευθείας εκτυπωμένα σπειρώματα, χρησιμοποιήθηκαν θερμικά ενθέματα (heat-set inserts). Η επιλογή αυτή εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή μηχανική αντοχή του σπειρώματος και αποτρέπει την ανεπιθύμητη ολίσθηση ή μετατόπιση του αισθητήρα κατά την εφαρμογή φορτίου.



Εικόνα 19: Διαδικασία συναρμολόγησης βάσης κινητήρων (αριστερά) και πλήρως συναρμολογημένη βάση (δεξιά).

Στην εικόνα 19, απεικονίζεται η διαδικασία συναρμολόγησης της βάσης των κινητήρων και δυναμοκυψελών στα αριστερά, όπου με μπλε χρώμα απεικονίζονται βίδες M4 που χρησιμοποιήθηκαν για την συναρμογή. Στα δεξιά απεικονίζεται η πλήρως συναρμολογημένη βάση.

3.3 Συναρμολόγηση δακτύλου

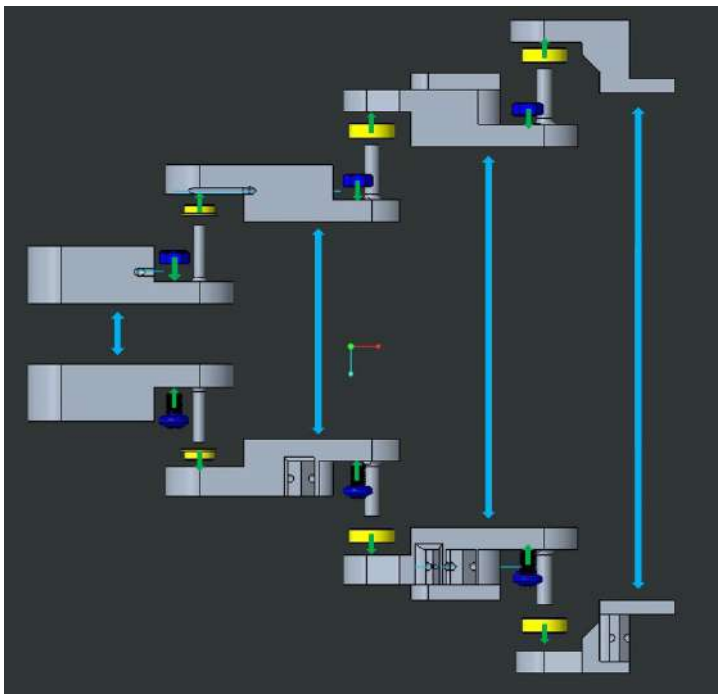
Σε αυτήν την ενότητα περιγράφεται η συναρμολόγηση του δακτύλου για την οποία εκτός από τα εκτυπωμένα κομμάτια των συνδέσμων θα χρειαστούν κοχλίες, περικόχλια, έδρανα κύλισης και τα ελατήρια επαναφοράς (όπως απεικονίζονται στην εικόνα 20):



Εικόνα 20: Απεικόνιση τεμαχίων για συναρμολόγηση ρομποτικού δακτύλου.

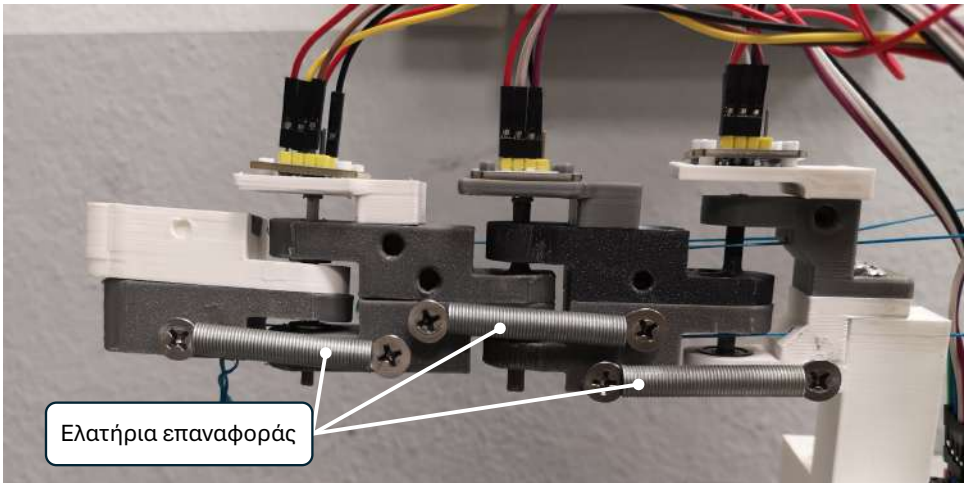
Η συναρμολόγηση του ρομποτικού δακτύλου πραγματοποιήθηκε ακολουθώντας την εξής αλληλουχία βημάτων:

1. Τελικός σύνδεσμος: Αρχικά, γίνεται η συναρμολόγηση των δύο τμημάτων του τελευταίου συνδέσμου.
2. Τοποθέτηση εδράνων κύλισης και ένωση: Στις ειδικά διαμορφωμένες οπές του προηγούμενου συνδέσμου, τοποθετούνται τα έδρανα κύλισης. Στη συνέχεια, οι άξονες περιστροφής του τελευταίου συνδέσμου διέρχονται μέσα από τα έδρανα και βιδώνονται.
3. Επανάληψη διαδικασίας: Το προηγούμενο βήμα επαναλαμβάνεται διαδοχικά μέχρι τον σύνδεσμο 0, ολοκληρώνοντας τον σκελετό του μηχανισμού.
4. Τοποθέτηση ελατηρίων: Τα ελατήρια επαναφοράς προσαρμόζονται στις ειδικές οπές των συνδέσμων και σταθεροποιούνται με την χρήση κοχλιών M5.
5. Όδευση τενόντων: Τέλος, οι τένοντες εισάγονται στους εσωτερικούς οδηγούς και προσδένονται στα αντίστοιχα σημεία κάθε άρθρωσης.



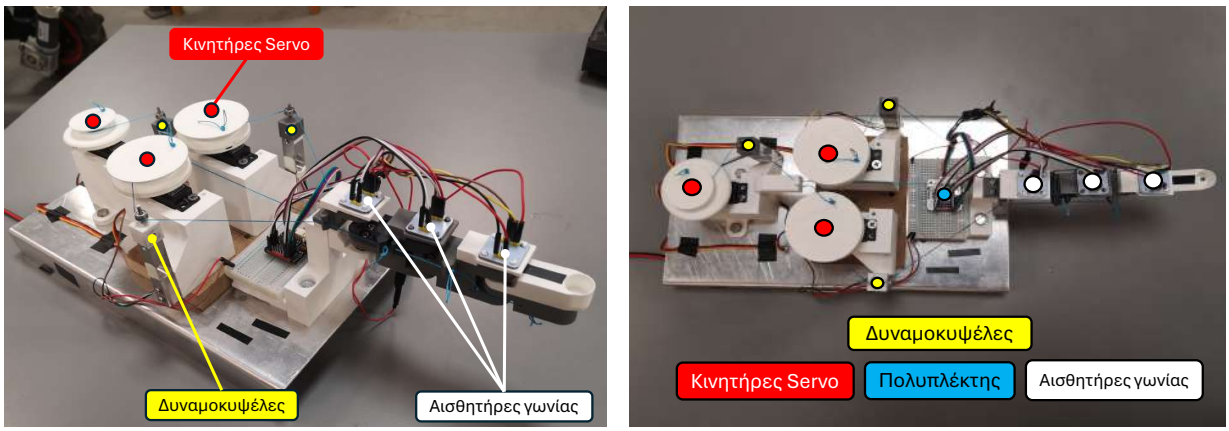
Εικόνα 21: Απεικόνιση διαδικασίας συναρμολόγησης ρομποτικού δακτύλου.

Στην εικόνα 21 απεικονίζεται η διαδικασία της συναρμολόγησης ξεκινώντας από τον τελικό σύνδεσμο. Με γκρι χρώμα απεικονίζονται τα εκτυπωμένα κομμάτια των συνδέσμων, με μπλε χρώμα οι κοχλίες και τα περικόχλια ενώ με κίτρινο χρώμα τα έδρανα κύλισης.



Εικόνα 22: Απεικόνιση παθητικών ελατηρίων επαναφοράς

Στην εικόνα 22 απεικονίζονται τα παθητικά ελατήρια επαναφοράς.



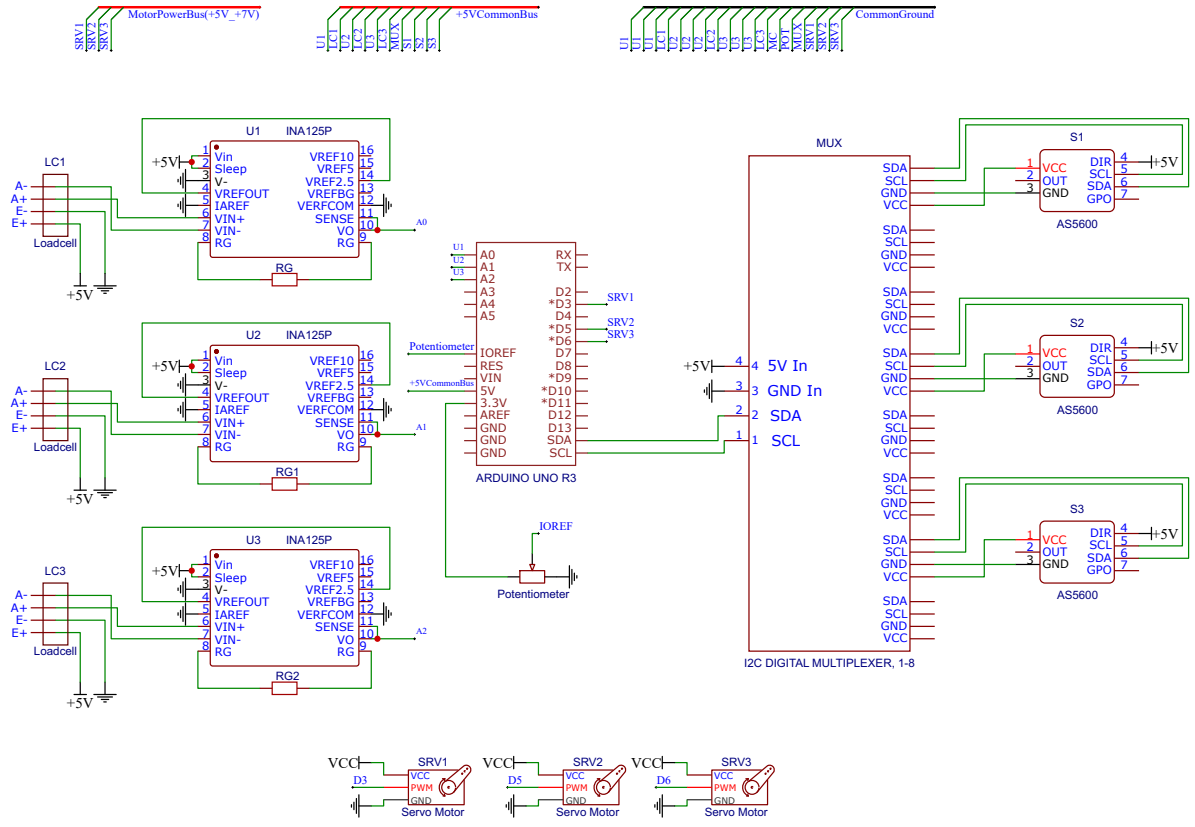
Εικόνα 23: Απεικόνιση συναρμολογημένης διάταξης.

Στην εικόνα 23 απεικονίζεται η συναρμολογημένη διάταξη μαζί με όλα τα ηλεκτρονικά στοιχεία.

Κεφάλαιο 4: Αρχιτεκτονική κυκλωμάτων ελέγχου, αισθητήρων και επενεργητών

Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται ο σχεδιασμός του ηλεκτρονικού συστήματος και της καλωδίωσης που απαιτούνται για τη λειτουργία της διάταξης. Επιπλέον, περιγράφεται η επιλογή των κατάλληλων επενεργητών, καθώς και η πειραματική διαδικασία βαθμονόμησης των δυναμοκυψελών.

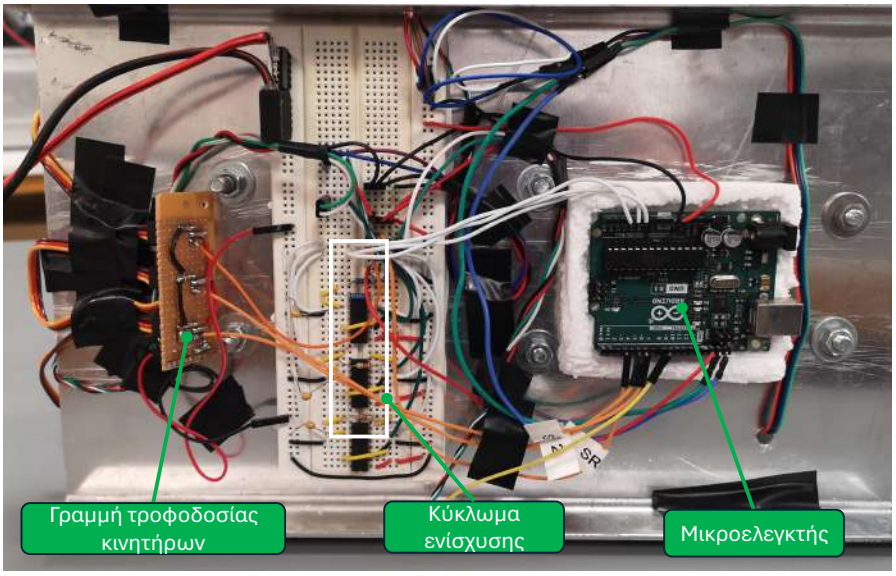


Εικόνα 24: Ηλεκτρονικό Σχηματικό διάγραμμα διάταξης.

Στην εικόνα 24 απεικονίζεται το συνολικό ηλεκτρικό διάγραμμα της διάταξης. Ο κεντρικός έλεγχος υλοποιείται μέσω ενός μικροελεγκτή, ο οποίος συλλέγει τα δεδομένα των αισθητήρων και παράγει τα κατάλληλα σήματα ελέγχου προς τους κινητήρες. Δεδομένου ότι χρησιμοποιούνται κινητήρες τύπου servo, δεν απαιτείται εξωτερικό κύκλωμα οδήγησης. Η τροφοδοσία τους προέρχεται από έναν κοινό δίαυλο διανομής ισχύος, που παίρνει τιμές 5V-7V.

Για την ενίσχυση του σήματος των δυναμοκυψελών, επιλέχθηκαν ολοκληρωμένα κυκλώματα ενίσχυσης (INA 125P) με τάση λειτουργίας 5V, τα οποία εξασφαλίζουν υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας, απαραίτητη για την ορθή λειτουργία του βρόχου ελέγχου που θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο. Το κέρδος της ενίσχυσης ρυθμίζεται μέσω αντίστοιχων αντιστάσεων RG.

Η μέτρηση της γωνιακής θέσης των αρθρώσεων πραγματοποιείται μέσω αισθητήρων φαινομένου Hall (AS5600), με τάση λειτουργίας που κυμαίνεται από 3 έως 5V. Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες χρησιμοποιούν μαγνήτη διαμετρικά μαγνητισμένο, σε μια απόσταση από 0.5 έως 3 χιλιοστά. Η ανάλυση είναι 12 bit, η οποία μεταφράζεται σε 4096 διακριτά βήματα. Αυτό συνεπάγεται σε μια γωνιακή ανάλυση της τάξης των 0.087^{o} ανά βήμα. Η επικοινωνία επιτυγχάνεται μέσω του πρωτοκόλλου I^2C, επειδή όμως φέρουν την ίδια εργοστασιακή διεύθυνση, η ανάγνωσή τους καθίσταται δυνατή, μόνο μέσω της χρήσης ενός πολυπλέκτη (I^2C Multiplexer).

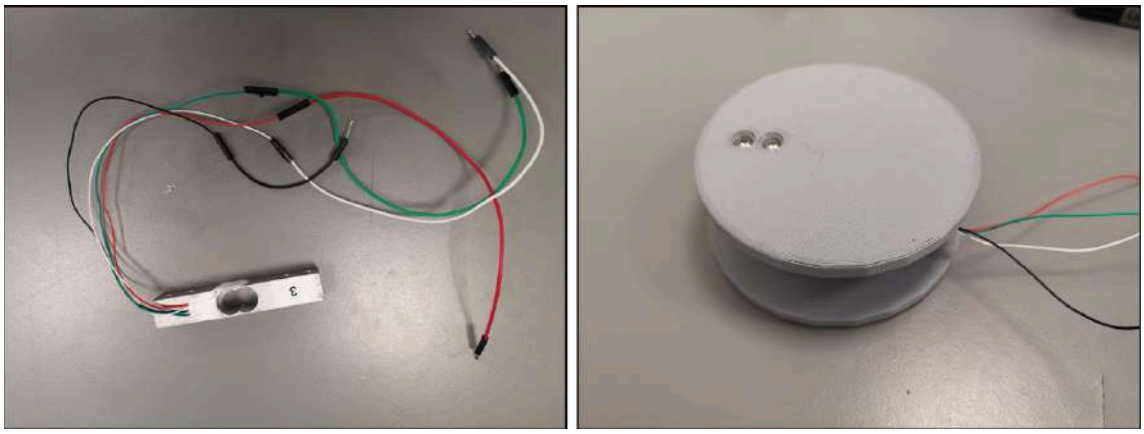


Εικόνα 25: Απεικόνιση ηλεκτρικών συνδέσεων της διάταξης.

Στην εικόνα 25 απεικονίζεται το κάτω μέρος της βάσης στο οποίο έχουν υλοποιηθεί όλες οι ηλεκτρικές συνδέσεις που αναλύθηκαν παραπάνω. Στην εικόνα επισημαίνονται ο μικροελεγκτής, τα κυκλώματα ενίσχυσης καθώς και η κοινή γραμμή που τροφοδοτεί τους κινητήρες.

4.1 Βαθμονόμηση δυναμοκυψελών

Σε αυτήν την ενότητα θα περιγραφεί η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την βαθμονόμηση των αισθητήρων δύναμης. Πρέπει το κάθε αισθητήριο να συνδεθεί με ένα κύκλωμα ενίσχυσης, όπως αυτό φαίνεται στο γενικό ηλεκτρικό διάγραμμα (εικόνα 24) και έπειτα να τοποθετηθεί πάνω σε μια ειδική εκτυπωμένη βάση, πάνω στην οποία μπορεί να τοποθετηθεί γνωστό βάρος χωρίς κίνδυνο.

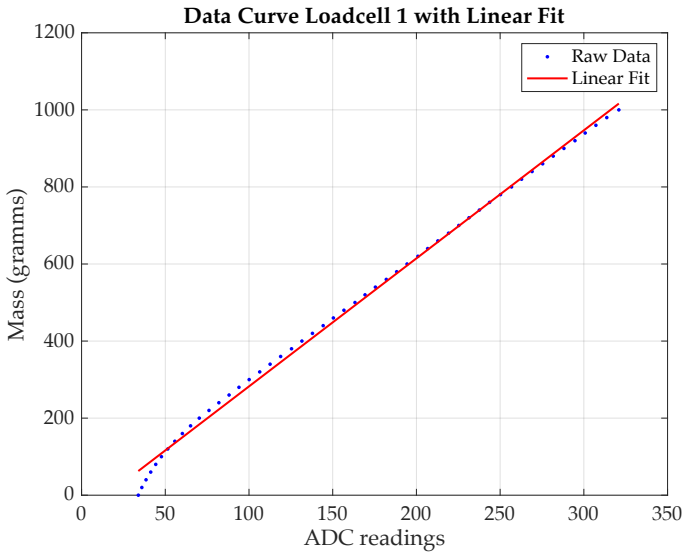


Εικόνα 26:Απεικόνιση δυναμοκυψέλης (αριστερά) και πειραματικής διάταξης βαθμονόμησης της δυναμοκυψέλης (δεξιά).

Στην εικόνα 26 απεικονίζεται η δυναμοκυψέλη στα αριστερά και στα δεξιά η δυναμοκυψέλη που έχει τοποθετηθεί στην ειδική βάση. Η διαδικασία της βαθμονόμησης πραγματοποιήθηκε ακολουθώντας τα εξής βήματα. Πρώτα τοποθετείται το κενό δοχείο στην ειδική βάση και καταγράφεται η αρχική τιμή ηρεμίας. Στη συνέχεια γίνεται η σταδιακή προσθήκη νερού σε βήματα των 100ml, καταγράφοντας τις αντίστοιχες τιμές εξόδου, έως ότου επέλθει κορεσμός του αναλογικού-ψηφιακού μετατροπέα (ADC). Τέλος πραγματοποιείται γραμμική παρεμβολή στα δεδομένα φόρτισης για την εξαγωγή της εξίσωσης μετατροπής του αναλογικού σήματος σε γραμμάρια.

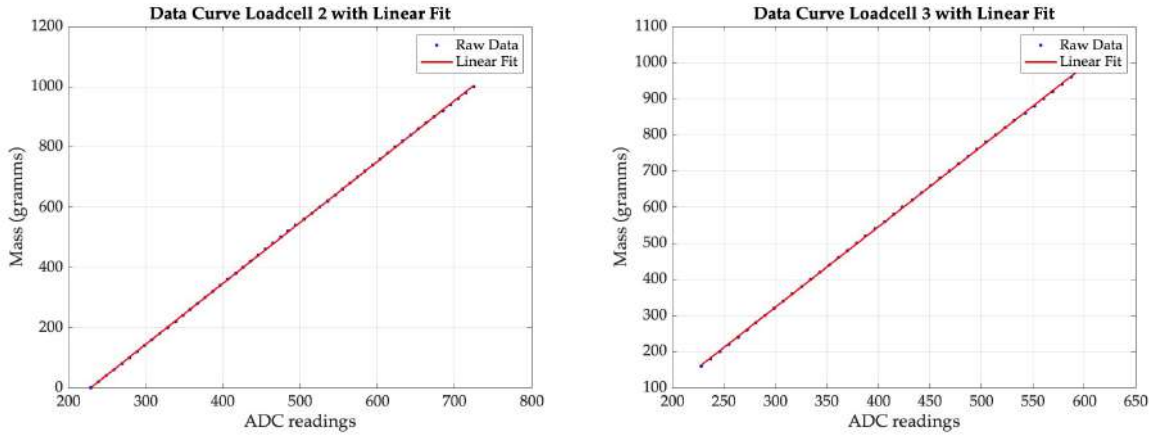
Σε αυτό το σημείο αξίζει να σχολιαστεί η τάση αναφοράς που χρησιμοποιεί ο μικροελεγκτής και το πως επηρεάζει την διακριτική ικανότητα. Η διακριτική ικανότητα του συστήματος εξαρτάται άμεσα από την επιλεγμένη τάση αναφοράς του μικροελεγκτή. Η τυπική τάση

αναφοράς, είναι 5V, για την οποία το βήμα κβάντισης του 10-bit ADC (1024 τιμές) αντιστοιχεί σε 4.8mV. Επιλέγεται τάση αναφοράς 2.2V καθώς το βήμα βελτιώνεται στα 2.1mV. Συνδυάζοντας την κατάλληλη τάση αναφοράς με την ορθή ρύθμιση του κέρδους ενίσχυσης, επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση του ωφέλιμου εύρους μετρήσεων του αισθητήρα.



Εικόνα 27: Καμπύλη βαθμονόμησης της πρώτης δυναμοκυψέλης με εφαρμογή γραμμικής παρεμβολής.

Στην εικόνα 27 απεικονίζονται τα δεδομένα της πρώτης δυναμοκυψέλης με μπλε κουκίδες και με κόκκινη γραμμή η γραμμική εξίσωση που περιγράφει το αισθητήριο. Στον οριζόντιο άξονα είναι οι τιμές που διαβάζει ο μικροελεγκτής και στον κατακόρυφο άξονα, το φορτίο σε γραμμάρια που χρησιμοποιήθηκε για την βαθμονόμηση.



Εικόνα 28: Καμπύλη βαθμονόμησης της δεύτερης δυναμοκυψέλης (αριστερά) και της τρίτης δυναμοκυψέλης (δεξιά) με εφαρμογή γραμμικής παρεμβολής.

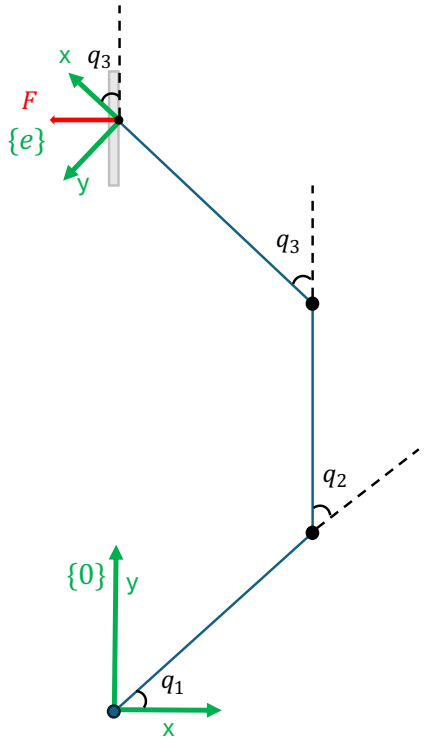
Στην εικόνα 28 απεικονίζεται η καμπύλη της δεύτερης δυναμοκυψέλης στα αριστερά ενώ στα δεξιά η καμπύλη της τρίτης δυναμοκυψέλης και παρακάτω δίνονται οι χαρακτηριστικές εξισώσεις όλων των αισθητήριων.

Δυναμοκυψέλη 1	$y_1 = 3.32x_1 - 49.9$
Δυναμοκυψέλη 2	$y_2 = 2.02x_2 - 464.25$
Δυναμοκυψέλη 3	$y_3 = 2.22x_3 - 345.6$

Πίνακας 7: Πίνακας χαρακτηριστικών εξισώσεων των δυναμοκυψελών.

4.2 Επιλογή επενεργητών

Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο μέσος άνθρωπος ασκεί δύναμη περίπου 40-50 N (ή 4-5 κιλά) [7] στα ακροδάκτυλα του (χωρίς την συνδρομή του σωματικού βάρους), τέθηκε ως ρεαλιστικός στόχος για το ρομποτικό σύστημα η ικανότητα άσκησης δύναμης ίση με 30 N στο άκρο του.



Εικόνα 29: Σχηματική αναπαράσταση δακτύλου σε επαφή με επιφάνεια.

Για τον υπολογισμό της απαιτούμενης ροπής των κινητήρων, θεωρήθηκε μια τυπική πόζα επαφής με $q_1 = q_2 = q_3 = 45^0$, όπως φαίνεται στην εικόνα 29, καθώς η συγκεκριμένη διαμόρφωση ευνοεί τη βέλτιστη μετάδοση δυνάμεων. Χρησιμοποιώντας την παραδοχή ότι το δάκτυλο θα έρχεται σε επαφή με οποιαδήποτε επιφάνεια μέσω σημειακής επαφής, η απαιτούμενη δύναμη εφελκυσμού στους τένοντες δίνεται από την σχέση:

$$F_t = J_t^{-T} J^T F \quad (25)$$

το γενικευμένο διάνυσμα δύναμης του άκρου το οποίο εκφράζεται στο πλαίσιο της βάσης {0}:

$$F = \begin{bmatrix} -30 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Υπολογίζοντας την δύναμη των τενόντων και γνωρίζοντας την ακτίνα των τροχαλιών, υπολογίζεται η απαιτούμενη ροπή. Βάσει των παραπάνω υπολογισμών, προέκυψε η ανάγκη χρήσης κινητήρων με ικανότητα παροχής μέγιστης ροπής 3.4 Nm στον άξονά τους. Η πλήρης διαδικασία για να βρεθεί η απαραίτητη ροπή των κινητήρων, δίνεται στο παράρτημα.

Για την οδήγηση της διάταξης επιλέχθηκαν κινητήρες τύπου servo (Feetech FT6335M), καθώς μπορούν να παρέχουν την απαραίτητη ροπή για την εμφάνιση της επιθυμητής δύναμης στο άκρο του δακτύλου. Οι κινητήρες τύπου servo αποτελούν μηχανισμούς συνεχούς ρεύματος, οι οποίοι ενσωματώνουν την δική τους μονάδα ελέγχου, αισθητήρα θέσης καθώς και κιβώτιο μείωσης στην έξοδό τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι, λόγω της ύπαρξης αυτής της μονάδας ελέγχου, η ανάπτυξη ελεγκτών που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 5, θα πρέπει να βασιστεί σε μια κλιμακωτή αρχιτεκτονική ελέγχου.

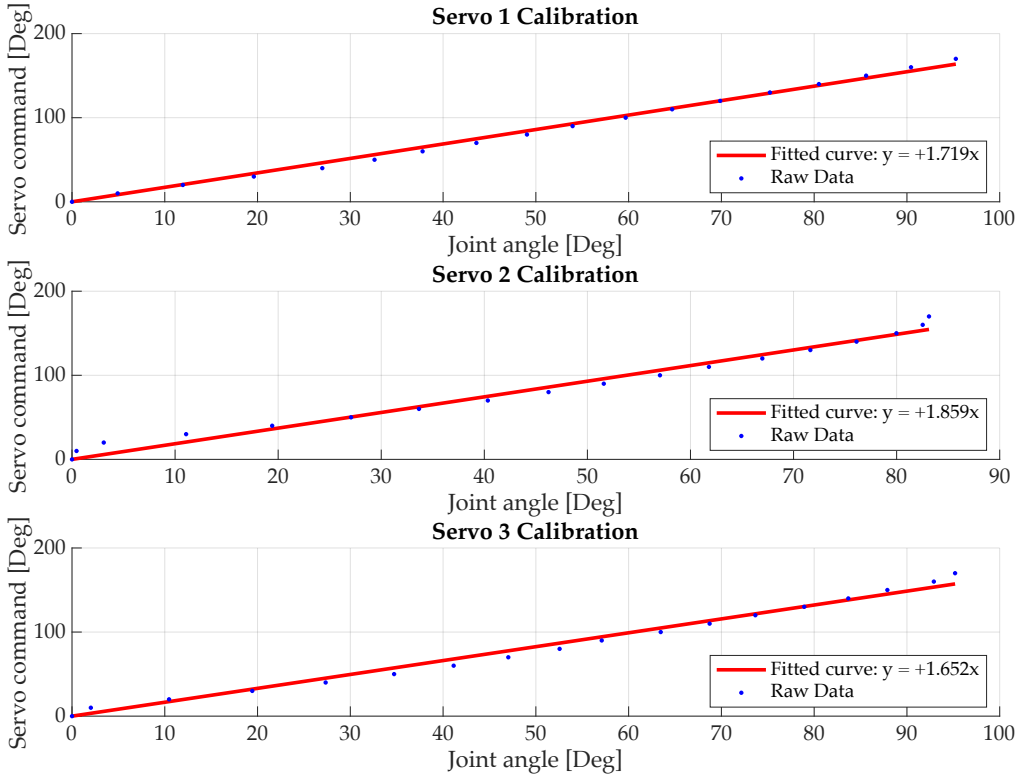
Κεφάλαιο 5:Έλεγχος ρομποτικού δακτύλου και πειραματική μελέτη

Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο υλοποιούνται τέσσερις προσεγγίσεις στο κομμάτι του ελέγχου της διάταξης. Αρχικά, για την προσπάθεια ελέγχου της γωνιακής θέσης, χρησιμοποιείται ο έλεγχος ανοιχτού βρόχου με βάση μια βαθμονόμηση που πραγματοποιείται στους κινητήρες. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η κλιμακωτή αρχιτεκτονική ενός αναλογικού-ολοκληρωτικού ελεγκτή (PI). Έπειτα, γίνεται η κατασκευή ενός ελεγκτή ενδοτικότητας και ενός ελεγκτή εμπέδησης, αξιολογώντας τον κάθε ελεγκτή ξεχωριστά μέσα από πειραματικές διαδικασίες.

5.1 Έλεγχος ανοιχτού βρόχου

Η ακριβής αντιστοίχιση μεταξύ της εντολής (μsec ή γωνίας) και της παραγόμενης γωνίας κάθε άρθρωσης είναι κρίσιμη για τη λειτουργία του ρομπότ σε ανοιχτό βρόχο. Για τον σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση των κινητήρων, με την χρήση αισθητήρων φαινομένου Hall (AS5600). Αρχικά έγινε η σταδιακή εφαρμογή βηματικών εντολών σε όλο το επιτρεπτό εύρος λειτουργίας (με βήμα 10 μοιρών) για κάθε κινητήρα. Έπειτα έγινε καταγραφή της πραγματικής γωνιακής μετατόπισης της εκάστοτε άρθρωσης, αφού ισορροπήσει το σύστημα. Τέλος πραγματοποιήθηκε η προσαρμογή καμπύλης στα πειραματικά δεδομένα.



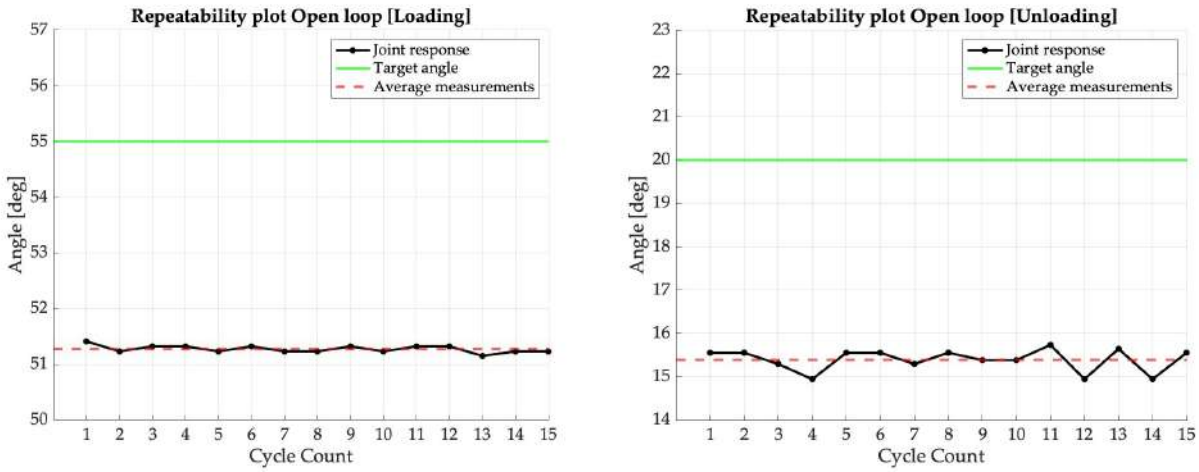
Εικόνα 30: Καμπύλη βαθμονόμησης του πρώτου κινητήρα με εφαρμογή γραμμικής παρεμβολής.

Στην εικόνα 30 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσαρμογής για τους κινητήρες. Όπως παρατηρείται στις παραγόμενες εξισώσεις, η συμπεριφορά των κινητήρων μπορεί να προσεγγιστεί γραμμικά. Ο παραπάνω πειραματικός προσδιορισμός καθίσταται απαραίτητος για την βελτίωση της ακρίβειας τοποθέτησης. Στον πίνακα 8 παρουσιάζονται οι εξισώσεις βαθμονόμησης των κινητήρων, όπου y η γωνία της άρθρωσης και x η εντολή που αντιστοιχεί για να επιτευχθεί η γωνία αυτή.

Κινητήρας 1	$y = 1.719x$
Κινητήρας 2	$y = 1.859x$
Κινητήρας 3	$y = 1.652x$

Πίνακας 8: Πίνακας εξίσωσης βαθμονόμησης κινητήρων.

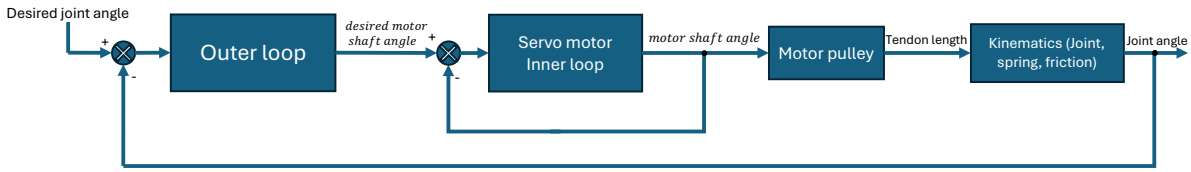
Πραγματοποιήθηκε πείραμα για την αξιολόγηση του ελεγκτή ανοιχτού βρόχου και συγκεκριμένα την ποσοτικοποίηση του σφάλματος μόνιμης κατάστασης και της επαναληψιμότητας (ο υπολογισμός της επαναληψιμότητας δίνεται στο παράρτημα) κατά την έκταση και την κάμψη του δακτύλου. Το ρομποτικό δάκτυλο ξεκίνησε από μια αρχική θέση 20^{o}, στη συνέχεια δόθηκε βηματική εντολή να μεταβεί στις 55^{o} και στη συνέχεια επέστρεψε στην αρχική θέση. Το πείραμα που περιεγράφηκε, επαναλήφθηκε για 15 κύκλους.



Εικόνα 31: Γραφική αναπαράσταση αποτελεσμάτων του πειράματος για τον ανοιχτό βρόχο για κάμψη (αριστερά) και έκταση (δεξιά) του δακτύλου. Με πράσινη γραμμή φαίνεται η επιθυμητή θέση, με κόκκινη διακεκομμένη το μέσο σφάλμα μόνιμης κατάστασης.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 31, ο ανοιχτός βρόχος παρουσιάζει αρκετά καλή επαναληψιμότητα κατά την κάμψη (±0.0342°) ,ενώ παράλληλα εμφανίζει ένα μεγάλο μέσο σφάλμα μόνιμης κατάστασης (≈3.8°). Παρομοίως κατά την έκταση του δακτύλου, η επαναληψιμότητα αν και χειρότερη συγκριτικά με την περίπτωση της κάμψης, είναι αρκετά καλύτερη (±0.1294°) απ' ότι το μέσο σφάλμα μόνιμης κατάστασης (≈4.7°).

5.2 Εισαγωγή στον κλιμακωτό έλεγχο.



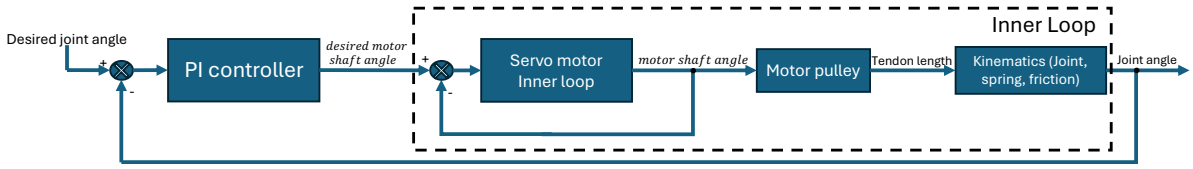
Εικόνα 31: Σχηματική απεικόνιση λογικής κλιμακωτού ελέγχου για την διάταξη.

Στην εικόνα 31 απεικονίζεται σχηματικά η λογική του κλιμακωτού ελέγχου (cascaded control) που εφαρμόζεται στην παρούσα διάταξη. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη χρήση δυο διακριτών βρόχων ελέγχου: ενός εξωτερικού και ενός εσωτερικού. Για την διασφάλιση της ευστάθειας του συστήματος, ο εσωτερικός βρόχος λειτουργεί σε σημαντικά υψηλότερη συχνότητα από τον εξωτερικό. Στην γενική περίπτωση οι ψηφιακοί servo κινητήρες εμφανίζουν συχνότητα 200-400 Hz στον εσωτερικό τους ελεγκτή. Παράλληλα η διάταξη υπό μελέτη χρησιμοποιεί συχνότητα 100 Hz στον εξωτερικό βρόχο επομένως εξασφαλίζεται η σωστή λειτουργία του κλιμακωτού ελεγκτή.

Ειδικότερα, ο εξωτερικός βρόχος, ελέγχει την τελική γωνία της άρθρωσης, συγκρίνοντας την επιθυμητή τιμή με την πραγματική (όπως αυτή καταγράφεται από τους αισθητήρες) και παράγοντας την κατάλληλη εντολή αναφοράς. Η εντολή αυτή τροφοδοτείται στον εσωτερικό βρόχο του κινητήρα, ο οποίος συνήθως ενσωματώνει έναν ελεγκτή τύπου PD και ελέγχει τον ίδιο τον κινητήρα. Λόγω του εσωτερικού ελέγχου, οι εμπορικοί κινητήρες servo προσεγγίζουν ικανοποιητικά την εντολή θέσης, ωστόσο, όπως φάνηκε, παρουσιάζουν σφάλμα μόνιμης κατάστασης, το οποίο αυξάνεται υπό την παρουσία εξωτερικού φορτίου.

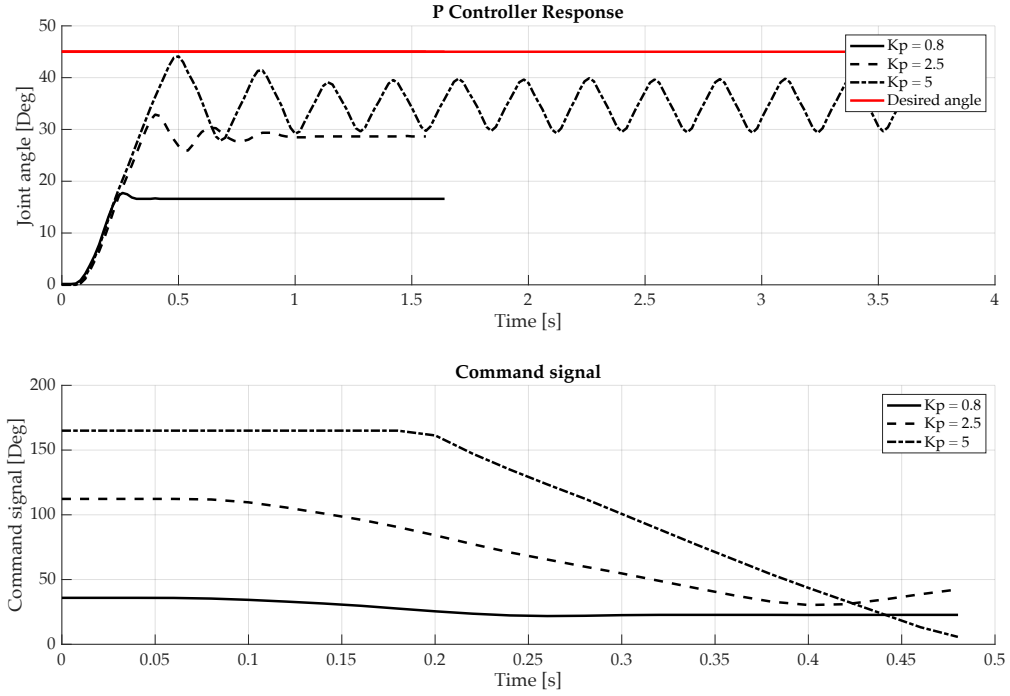
5.3 Ελεγκτής γωνιών ρομποτικού δακτύλου

Για να λυθεί το πρόβλημα του σφάλματος μόνιμης κατάστασης, επιλέχθηκε να υλοποιηθεί ένας κλιμακωτός ελεγκτής PI. Ο ελεγκτής αυτός χρησιμοποιεί πληροφορία από τα αισθητήρια γωνίας, για να ελέγχει τις εντολές που δέχονται οι κινητήρες με δυναμικό τρόπο, έτσι ώστε οι αρθρώσεις του ρομποτικού δακτύλου να φτάνουν πάντα στις επιθυμητές γωνίες.



Εικόνα 32: Διάγραμμα βαθμίδων του κλειστού βρόχου ελέγχου θέσης της άρθρωσης με χρήση ελεγκτή PI.

Στην εικόνα 32, απεικονίζεται ο ελεγκτής PI που προαναφέρθηκε. Δέχεται είσοδο το σφάλμα της γωνίας της άρθρωσης και παράγει την εντολή που πρέπει να στείλει στους κινητήρες έτσι ώστε να φτάσουν στην επιθυμητή γωνία. Τα κέρδη του ελεγκτή ρυθμίστηκαν πειραματικά, ξεκινώντας μόνο με αναλογικό έλεγχο και επιλέγοντας το κέρδος με το οποίο η διάταξη εμφάνιζε ταχύτητα στην απόκριση, χωρίς ταλαντώσεις.



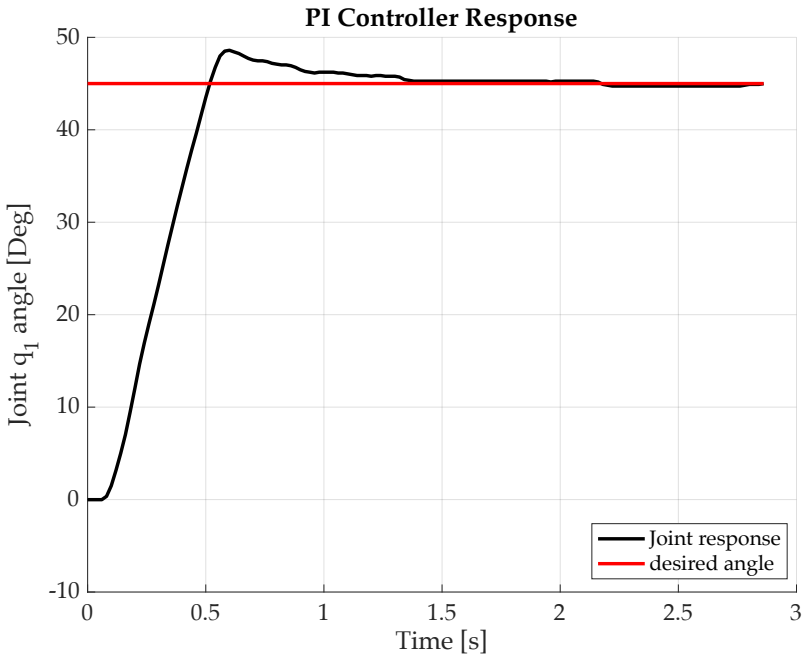
Εικόνα 33: Γραφική αναπαράσταση των αποκρίσεων της πρώτης άρθρωσης για βηματική είσοδο 45º με διαφορετικά αναλογικά κέρδη (άνω τμήμα), γραφική αναπαράσταση των σημάτων ελέγχου της πρώτης άρθρωσης για είσοδο 45º με διαφορετικά αναλογικά κέρδη (κάτω τμήμα).

Στην εικόνα 33 απεικονίζονται οι αποκρίσεις της πρώτης άρθρωσης για βηματική είσοδο 45º με διαφορετικά κέρδη. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το κέρδος τόσο η άρθρωση πλησιάζει πιο κοντά στην επιθυμητή τιμή, όμως εμφανίζονται ταλαντώσεις. Επιπλέον ο χρόνος ανόδου και για τις τρείς περιπτώσεις είναι ίδιος ,όπως αυτό φαίνεται και από την κλήση των καμπυλών. Αυτό μπορεί να οφείλεται στον κορεσμό του ελεγκτή του ίδιου του κινητήρα servo καθώς όπως φαίνεται και στην εικόνα 32 στο κάτω τμήμα, τα σήματα ελέγχου για διαφορετικά κέρδη δεν είναι ίδια.

Επιλέγοντας το αναλογικό κέρδος να είναι ίσο με 0.8, έγινε η εισαγωγή του ολοκληρωτικού όρου για να μηδενιστεί το σφάλμα της μόνιμης κατάστασης. Καθώς το αναλογικό κέρδος είναι αρκετά χαμηλό, το ολοκληρωτικό κέρδος επιλέχθηκε να είναι μεγάλο. Τα τελικά κέρδη δίνονται παρακάτω.

Kp	0.8 (αδιάστατο)
Ki	5.5 (s^{-1})

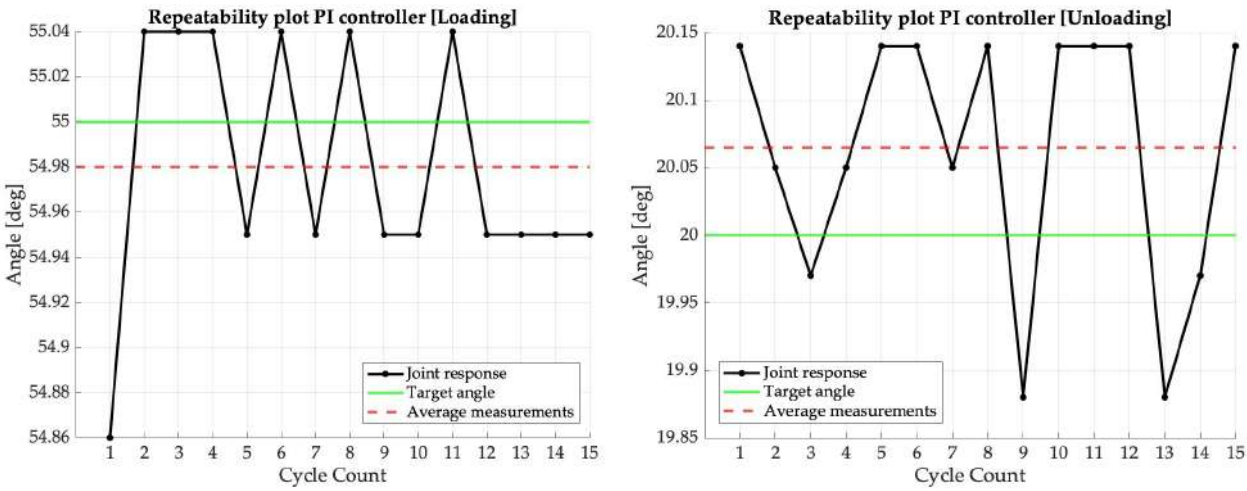
Πίνακας 9: Πίνακας τελικών επιλεγμένων κερδών του ελεγκτή PI.



Εικόνα 34: Γραφική αναπαράσταση απόκρισης της πρώτης άρθρωσης σε είσοδο βαθμίδα 45ºμε την χρήση ελεγκτή PI.

Στην εικόνα 34 απεικονίζεται η τελική απόκριση της άρθρωσης με τον ελεγκτή PI, όπως φαίνεται, υπάρχει μηδενικό ή αμελητέο σφάλμα μόνιμης κατάστασης, με την άρθρωση να ισορροπεί στην επιθυμητή γωνία σε περίπου 1.4 s. Επιπλέον η άρθρωση εμφανίζει μια υπερύψωση με μέγιστη τιμή τις 48º, όμως ο ολοκληρωτικός όρος διορθώνει την υπερύψωση σε περίπου 0.8 δευτερόλεπτα.

Με αντίστοιχο τρόπο όπως και στην ενότητα 5.1. πραγματοποιήθηκε πείραμα για την ποσοτικοποίηση της επαναληψιμότητας και του σφάλματος μόνιμης κατάστασης για την κάμψη και την έκταση του δακτύλου, χρησιμοποιώντας τον ελεγκτή PI.



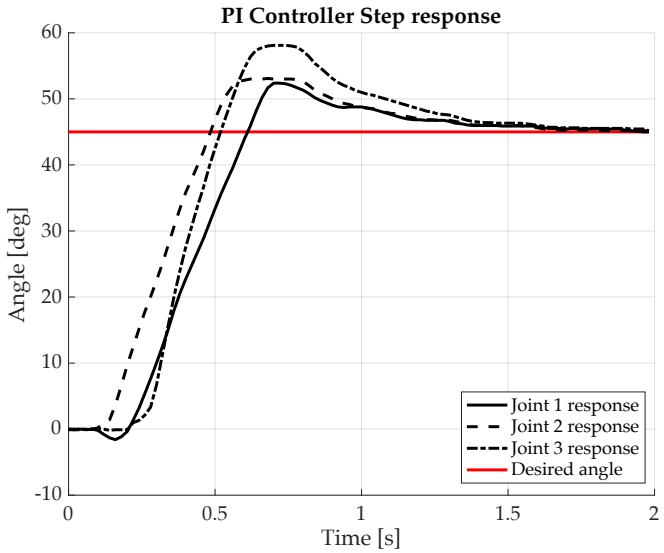
Εικόνα 35: Γραφική αναπαράσταση αποτελεσμάτων του πειράματος για τον κλειστό βρόχο για κάμψη (αριστερά) και έκταση (δεξιά) του δακτύλου. Με πράσινη γραμμή φαίνεται η επιθυμητή θέση, με κόκκινη διακεκομμένη το μέσο σφάλμα μόνιμης κατάστασης.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 35, ο αναλογικός-ολοκληρωτικός ελεγκτής παρουσιάζει αρκετά καλή επαναληψιμότητα κατά την κάμψη (±0.0241°) ενώ παράλληλα εμφανίζει ένα ελάχιστο μέσο σφάλμα μόνιμης κατάστασης (≈0.02°). Παρομοίως κατά την έκταση του δακτύλου, η επαναληψιμότητα αν και χειρότερη συγκριτικά με την περίπτωση της κάμψης, είναι αρκετά καλή (±0.604°) και το μέσο σφάλμα μόνιμης κατάστασης παραμένει σε πολύ χαμηλά επίπεδα (≈0.06°).

Όπως φάνηκε και στην πειραματική διαδικασία για τον ανοιχτό βρόχο, ο μηχανισμός εμφανίζει καλύτερη επαναληψιμότητα όταν κινείται με τους κινητήρες απ' ότι όταν κινείται με τα ελατήρια επαναφοράς. Αυτό συμβαίνει γιατί η κίνηση κατά την επιστροφή είναι λιγότερο ελεγχόμενη. Όταν δοθεί εντολή για κίνηση σε μικρότερη γωνία, ο κινητήρας αντιδρά πιο γρήγορα από το δάκτυλο, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μικρή χαλάρωση στον τένοντα. Το δάκτυλο επιταχύνεται από το ελατήριο έχοντας ελάχιστη απόσβεση.

Όταν το δάκτυλο φτάσει στην επιθυμητή θέση, έχει μεγάλη ταχύτητα η οποία διακόπτεται απότομα λόγω του κινητήρα, εισάγοντας κρουστικό φορτίο στον τένοντα, το οποίο προκαλεί στιγμιαία ταλάντωση. Αυτό το φαινόμενο προκαλεί τον μηχανισμό να ισορροπήσει σε ελάχιστα διαφορετική θέση, που έχει ως αποτέλεσμα κακή επαναληψιμότητα, σε σχέση με την ελεγχόμενη κίνηση του μηχανισμού, όταν αυτός κινείται μόνο με τους κινητήρες.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε πείραμα με σκοπό την αξιολόγηση της απόκρισης του μηχανισμού σε είσοδο βαθμίδας, υπό συνθήκες ταυτόχρονης κίνησης όλων των αρθρώσεων, χρησιμοποιώντας τα ίδια κέρδη για τον ελεγκτή PI. Το ρομποτικό δάκτυλο κλήθηκε να μεταβεί από μια αρχική θέση 0^o σε μια τελική επιθυμητή γωνία 45^o για όλους τους συνδέσμους.

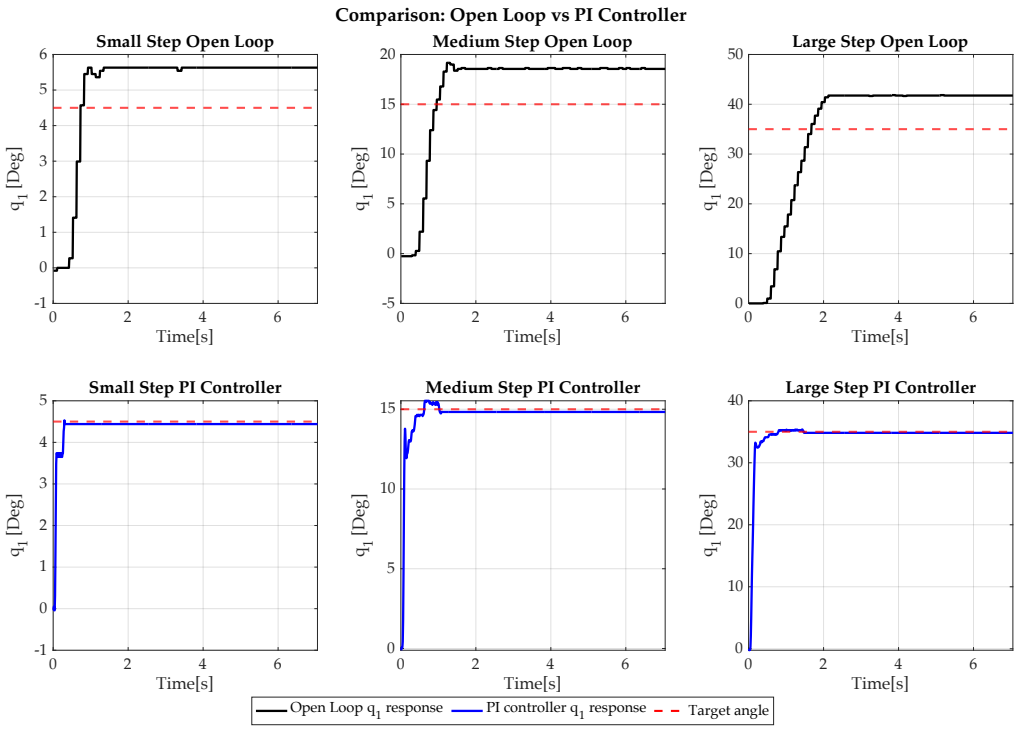


Εικόνα 36: Βηματική απόκριση των τριών αρθρώσεων του ρομποτικού δακτύλου κατά την ταυτόχρονη κίνηση τους με στόχο 45^o υπό τον έλεγχο κλειστού βρόχου PI.

Όπως απεικονίζεται και στο διάγραμμα απόκρισης του ελεγκτή PI (εικόνα 36), η ταυτόχρονη κίνηση των αρθρώσεων προκαλεί έντονα φαινόμενα υπερύψωσης, με μέγιστη υπερύψωση να εμφανίζει η τρίτη άρθρωση, φτάνοντας στις 58.1^o. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην μεταβαλλόμενη αδράνεια καθώς η αδράνεια που βιώνει κάθε σύνδεσμος δεν είναι σταθερή. Αντίθετα, μεταβάλλεται ανάλογα με την περιστροφή και των υπόλοιπων συνδέσμων. Επιπλέον η κίνηση ενός συνδέσμου προκαλεί ροπές αλληλεπίδρασης στους υπόλοιπους συνδέσμους, δρώντας έτσι σαν εξωτερικές διαταραχές για τον ελεγκτή.

Επειδή ο ελεγκτής PI είχε ρυθμιστεί για τη λειτουργία κάθε άρθρωσης μεμονωμένα, η απόκρισή του κατά τη συντονισμένη κίνηση είναι υπερβολικά απότομη. Παρά την αρχική αστάθεια, ο ολοκληρωτικός όρος του ελεγκτή καταφέρνει μετά την πάροδο ορισμένου χρόνου να εξαλείψει το σφάλμα και να επαναφέρει τις αρθρώσεις στην επιθυμητή τιμή.

Για την πιο άμεση σύγκριση του ανοιχτού βρόχου και του αναλογικού-ολοκληρωτικού ελεγκτή, πραγματοποιήθηκε μια νέα σειρά πειραμάτων για την αξιολόγηση της απόκρισης του συστήματος σε βηματικές εντολές με διαφορετικές τιμές, με το ρομποτικό δάκτυλο να ξεκινάει από αρχική θέση στις 0°.



Εικόνα 37: Συγκριτική αξιολόγηση της απόκρισης της πρώτης άρθρωσης υπό έλεγχο ανοιχτού βρόχου (άνω σειρά) και κλειστού βρόχου PI (κάτω σειρά) για διαφορετικές βηματικές εντολές.

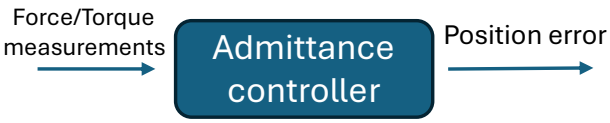
Στην εικόνα 37 απεικονίζονται οι αποκρίσεις της πρώτης άρθρωσης για διαφορετικές βηματικές εντολές. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν τρία πειράματα. Το small Step, όπου η βηματική εντολή ήταν στις 4.5°, το medium Step, όπου η βηματική εντολή ήταν στις 15° και τέλος το large Step, όπου η βηματική εντολή ήταν 35°.

Τα άνω διαγράμματα απεικονίζουν τις αποκρίσεις της άρθρωσης όταν αυτή χρησιμοποιεί λογική ανοιχτού βρόχου για τον έλεγχο της. Παρατηρείται ότι το σφάλμα μόνιμης κατάστασης δεν είναι μηδενικό και μάλιστα μεταβάλλεται, ενδεικτικά το σφάλμα στο πείραμα μικρών μεταβολών είναι περίπου ίσο με 1° ενώ για το πείραμα μεγάλων μεταβολών ξεπερνάει τις 5°. Αντίθετα τα κάτω διαγράμματα απεικονίζουν τις αποκρίσεις της άρθρωσης όταν αυτή χρησιμοποιεί τον ελεγκτή κλειστού βρόχου. Παρατηρείται πως σε όλες τις περιπτώσεις η άρθρωση φτάνει ή πλησιάζει με ελάχιστο σφάλμα μόνιμης κατάστασης, την επιθυμητή γωνία.

5.4 Έλεγχος ενδοτικότητας (admittance control)

Έχοντας εξασφαλίσει έλεγχο της γωνιακής θέσης με την βοήθεια του αναλογικού-ολοκληρωτικού ελεγκτή, είναι σημαντικό να μελετηθεί και η συμπεριφορά της διάταξης σε εξωτερικές διαταραχές. Γι' αυτόν τον λόγο ,σε αυτήν την ενότητα, θα υλοποιηθεί ο ελεγκτής ενδοτικότητας, ο οποίος χτίζεται πάνω στον αναλογικό-ολοκληρωτικό ελεγκτή της ενότητας 5.3. Ο ελεγκτής ενδοτικότητας, δεν ελέγχει άμεσα την γωνία των αρθρώσεων αλλά, χρησιμοποιώντας δεδομένα δύναμης ή ροπής και σε συνδυασμό με την επιθυμητή γωνία, παράγει συνεχώς ένα σφάλμα θέσης το οποίο αποτελεί είσοδο για τον αναλογικό-ολοκληρωτικό ελεγκτή θέσης. Με αυτόν τον τρόπο, το ρομποτικό δάκτυλο μπορεί να πραγματοποιεί έλεγχο θέσης, ενώ παράλληλα αν δεχθεί εξωτερική διαταραχή, να συμπεριφερθεί όπως ένα εικονικό σύστημα μάζας-ελατήριο-αποσβεστήρας, ακολουθώντας την τροχιά του.

Ο ελεγκτής αυτός χρησιμοποιείται πολύ συχνά σε συνεργατικά ρομπότ (cooperative robots), τα οποία βρίσκονται πολύ κοντά σε ανθρώπους, για να μην προκληθεί τραυματισμός λόγω ανεπιθύμητης επαφής. Στην περίπτωση υπό μελέτη, ο ελεγκτής χρησιμοποιήθηκε ώστε το δάκτυλο να συμπεριφέρεται αρχικά σαν ελατήριο και στην συνέχεια σαν ελατήριο με αποσβεστήρα.



Εικόνα 38: Σχηματική αναπαράσταση λογικής ελεγκτή ενδοτικότητας.

Στην εικόνα 38 φαίνεται ένα απλό σχεδιάγραμμα της λογικής του ελεγκτή αυτού. Στην είσοδο του, δέχεται πληροφορία των ροπών στις αρθρώσεις, οι οποίες προκύπτουν από τις δυνάμεις των τενόντων μέσα από τις δυναμοκυψέλες. Στην έξοδο παράγεται το σφάλμα που θα σταλεί στον αναλογικό-ολοκληρωτικό ελεγκτή.

5.4.1 Μελέτη ελεγκτή για συμπεριφορά άρθρωσης σαν ελατήριο

Αρχικά μελετήθηκε η συμπεριφορά του μηχανισμού, με τις αρθρώσεις σαν εικονικά ελατήρια. Πιο συγκεκριμένα η γενική εξίσωση:

$$M_d\ddot{e} + D_d\dot{e} + K_d e = \tau \quad (29)$$

Όπου, τ η ροπή στις αρθρώσεις του μηχανισμού και e το σφάλμα:

$$e = (q_{desired} - q_{reference}) \quad (30)$$

Όπου $q_{desired}$ η επιθυμητή γωνία ισορροπίας του μηχανισμού και $q_{reference}$ η μεταβαλλόμενη γωνία ισορροπίας του μηχανισμού με βάση την προσομοίωση της συμπεριφοράς της άρθρωσης.

M_d	Εικονική παράμετρος που επηρεάζει την αδράνεια του ρομποτικού δακτύλου.
D_d	Εικονική παράμετρος που επηρεάζει την απόσβεση που εμφανίζει το ρομποτικό δάκτυλο
K_c	Εικονική παράμετρος που επηρεάζει την σκληρότητα που εμφανίζει το ρομποτικό δάκτυλο

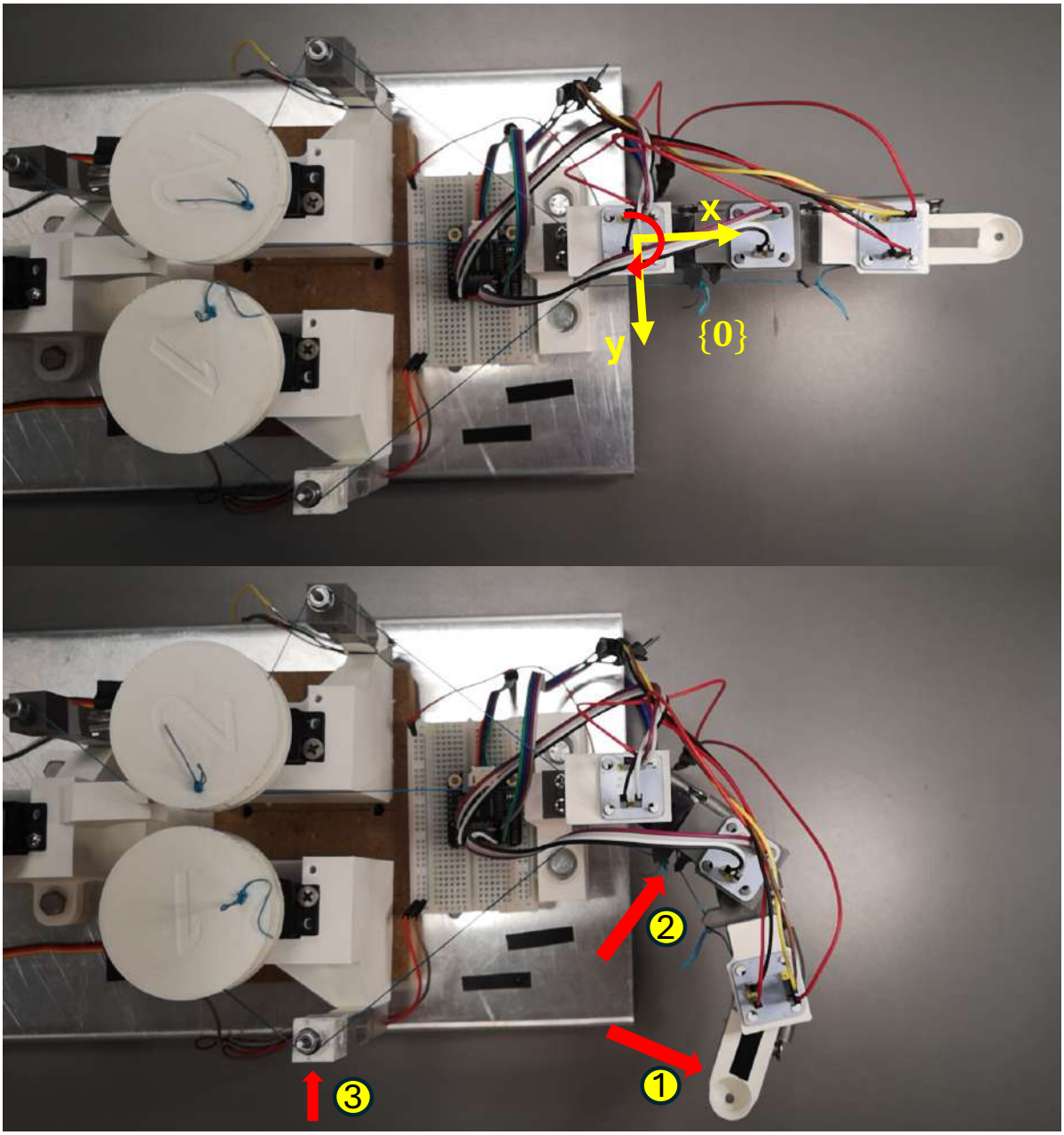
Πίνακας 10: Πίνακας εικονικών παραμέτρων ελέγχου ενδοτικότητας.

Στον πίνακα 11 απεικονίζεται η επεξήγηση των εικονικών παραμέτρων σύμφωνα με τις οποίες ρυθμίζεται η συμπεριφορά του ρομπότ. Για την προσομοίωση με ελατήριο, οι παράμετροι M_d και D_d μηδενίζονται και προκύπτει:

$$K_d e = -J_t^T F_t \quad (31)$$

Λύνοντας ως προς το $q_{reference}$ προκύπτει:

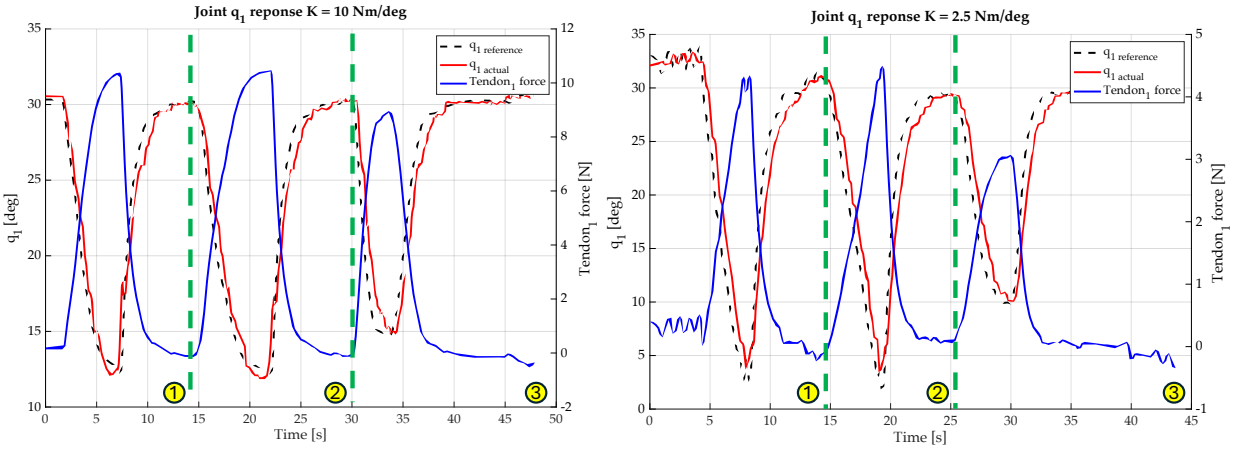
$$q_{reference} = q_{desired} + \frac{J_t^T F_t}{K_d} \quad (32)$$



Εικόνα 39: Πειραματική διάταξη ελέγχου ενδοτικότητας: Αρχική θέση συστήματος αναφοράς (άνω τμήμα) και στάση διεξαγωγής πειράματος με τα τρία σημεία εφαρμογής της εξωτερικής δύναμης (κάτω τμήμα).

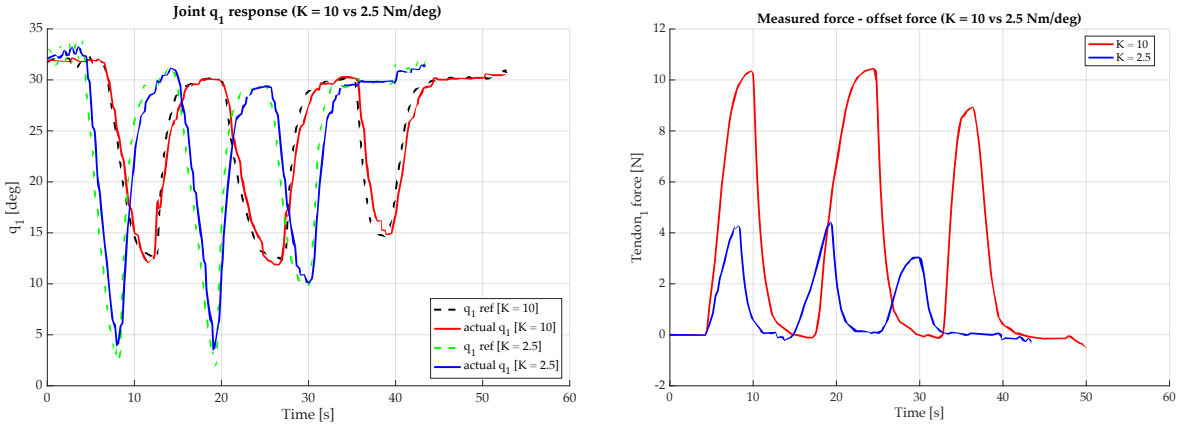
Στην εικόνα 39 απεικονίζεται στο άνω τμήμα, η διάταξη έχοντας όλες τις γωνίες ίσες με το μηδέν μαζί με το αδρανειακό πλαίσιο {0} καθώς και την θετική φορά της ροπής. Στο κάτω τμήμα, απεικονίζεται η αρχική πόζα για την διεξαγωγή του πειράματος, ισορροπώντας όλες τις αρθρώσεις, περίπου στις 30^{o} καθώς και τα τρία σημεία εφαρμογής της εξωτερικής δύναμης. Πραγματοποιήθηκε πείραμα το οποίο μελετούσε την απόκριση της πρώτης άρθρωσης, όταν ασκήθηκε εξωτερική δύναμη με παρόμοιο τρόπο, σε τρία διαφορετικά σημεία στο ρομποτικό δάκτυλο.

Αρχικά το δάκτυλο ισορροπεί όλες τις αρθρώσεις στην αρχική του θέση (περίπου 30°) και μηδενίζονται οι δυναμοκυψέλες, στην συνέχεια ασκείται εξωτερική δύναμη στα τρία διαφορετικά σημεία και καταγράφονται τα δεδομένα. Η διαδικασία επαναλήφθηκε για διαφορετικά κέρδη K_d και στο τέλος συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα.



Εικόνα 40: Πειραματική απόκριση της πρώτης άρθρωσης υπό τον έλεγχο ενδοτικότητας για υψηλή (αριστερά) και χαμηλή (δεξιά) εικονική δυσκαμψία, κατά την άσκηση δύναμης στα τρία διαφορετικά σημεία.

Στην εικόνα 40 γίνεται η σύγκριση των αποκρίσεων του μηχανισμού για δυο διαφορετικές τιμές του K_d , μια μεγάλη (10 Nm/deg ή 0.174 Nm/rad) και μια μικρή (2.5 Nm/deg ή 0.00425 Nm/rad). Παρατηρείται πως για μεγάλη σκληρότητα, χρειάζεται να ασκηθεί μεγάλη δύναμη για να υποχωρήσει ο μηχανισμός, σε αντίθεση με την μικρή σκληρότητα, που χρειάζεται αρκετά μικρότερη δύναμη για υποχώρηση αντίστοιχου μεγέθους. Επιπλέον παρατηρείται πως και στις δυο περιπτώσεις, χρειάζεται να ασκηθεί ελάχιστα μεγαλύτερη δύναμη στην περιοχή 2 για υποχώρηση αντίστοιχη της περιοχής 1. Αυτό είναι λογικό καθώς ασκείται μεγαλύτερη ροπή στην πρώτη άρθρωση αν ασκηθεί η δύναμη στην περιοχή 1, λόγω της μεγαλύτερης απόστασης του σημείου εφαρμογής.



Εικόνα 41: Πειραματική απόκριση της πρώτης άρθρωσης υπό τον έλεγχο ενδοτικότητας (αριστερά) και σύγκριση μετρούμενων δυνάμεων (δεξιά), κατά την άσκηση δύναμης στα τρία διαφορετικά σημεία.

Στην εικόνα 41 απεικονίζεται μια πιο άμεση σύγκριση των δεδομένων που εμφανίστηκαν στην εικόνα 40 ,για διαφορετικές σκληρότητες της άρθρωσης. Όπως φαίνεται στα δεξιά, οι δυνάμεις που παρατηρούνται για K = 10 Nm/deg είναι πολύ μεγαλύτερες απ' ότι για K = 2.5 Nm/deg και στα αριστερά φαίνεται ξεκάθαρα το αποτέλεσμα. Η πιο μαλακή άρθρωση με μικρότερη δύναμη υποχωρεί περισσότερο και πιο γρήγορα απ' ότι η σκληρότερη άρθρωση, όπου με μεγαλύτερες δυνάμεις καθυστερεί να υποχωρήσει και υποχωρεί λιγότερο.

Στις Εικόνες 40 και 41 παρατηρείται ότι η μετρούμενη δύναμη λαμβάνει σε ορισμένα σημεία αρνητικές τιμές. Υπενθυμίζεται ότι έχει προηγηθεί μηδενισμός των δυναμοκυψελών, στην αρχική πόζα του πειράματος. Σκοπός αυτού του μηδενισμού ήταν η αποκλειστική καταγραφή της μεταβολής των δυνάμεων πέραν της αρχικής τάσης του τένοντα κατά την ισορροπία, η οποία εκτιμάται περίπου στα 2.5 N. Επομένως, σε ορισμένες φάσεις του πειράματος, η πραγματική δύναμη στον τένοντα μειώθηκε κάτω από αυτή την τιμή αναφοράς, γεγονός που εξηγεί την εμφάνιση των αρνητικών ενδείξεων.

5.4.2 Μελέτη ελεγκτή για συμπεριφορά άρθρωσης σαν ελατήριο με απόσβεση

Στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκε ο ελεγκτής με σκοπό να συμπεριφέρεται η κάθε άρθρωση σαν ελατήριο με απόσβεση. Από την γενική σχέση που δόθηκε στην ενότητα 5.5.1 (σχέση 29), μηδενίζεται μόνο ο όρος M_d:

$$D_d\dot{e} + K_d e = \tau$$

Μετατρέποντας την παραπάνω συνεχή διαφορική εξίσωση σε διακριτό χρόνο, μέσω της μεθόδου implicit (backward) Euler, προκύπτει:

$$D_d \frac{e_{new} - e_{old}}{dt} + K_d\, e_{new} = \tau \quad (33)$$

Όπου η παράγωγος του σφάλματος δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\dot{e} = \frac{e_{new} - e_{old}}{dt} \quad (34)$$

Και τα κέρδη που είναι υπεύθυνα για την εικονική δυσκαμψία και απόσβεση, K_d = 2.5 Nm/deg (ή 0.00425 Nm/rad) και D_d = 5 N s/deg (ή 0.0085 N s/rad)

Χρησιμοποιώντας την σχέση 33 και επιλύοντας αλγεβρικά ως προς το νέο σφάλμα, e_{new} προκύπτει:

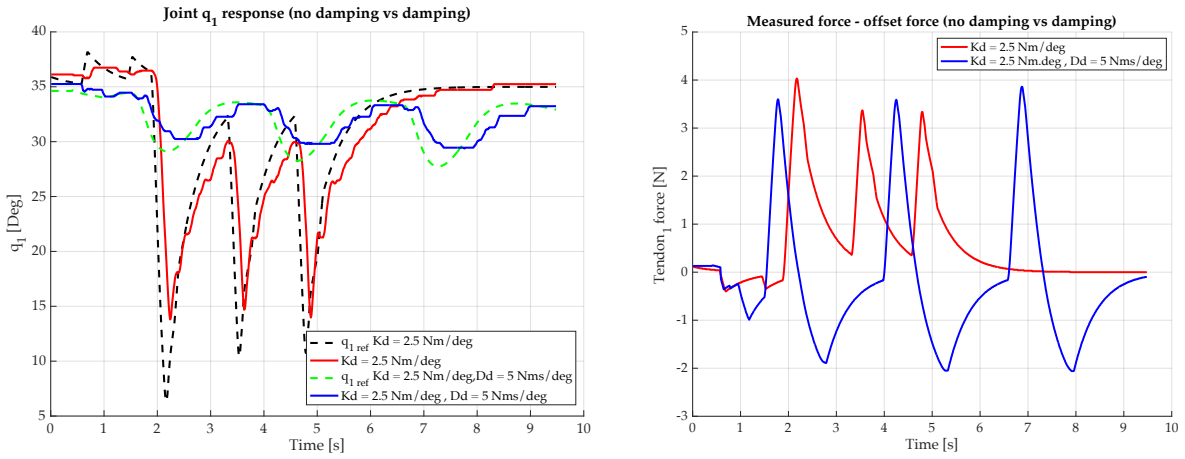
$$e_{new} = \frac{(J_t^T F_t)\, dt + D_d\, e_{old}}{D_d + K_d\, dt} \quad (35)$$

Χρησιμοποιώντας την σχέση 30 και λύνοντας ως προς την εντολή που θα σταλεί στο ρομποτικό δάκτυλο προκύπτει:

$$q_{reference_{new}} = q_{desired} + \frac{(J_t^T F_t)\, dt + D_d(q_{reference_{old}} - q_{desired})}{D_d + K_d\, dt} \quad (36)$$

Η χρήση της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών προς τα πίσω (Implicit Euler), επιλέχθηκε διότι εξασφαλίζει την αριθμητική ευστάθεια του συστήματος ανεξαρτήτως του χρονικού βήματος δειγματοληψίας (dt), προσδίδοντας εξαιρετικά ομαλή συμπεριφορά στον ελεγκτή.

Για την περεταίρω αξιολόγηση του ελεγκτή, πραγματοποιήθηκε ένα πείραμα, εκκινώντας τον μηχανισμό από τις 10º, μηδενίζοντας τις δυναμοκυψέλες και στη συνέχεια αφού ο μηχανισμός ισορροπήσει σε νέα θέση (35º) ασκούνται κρουστικά φορτία, για την μελέτη της εικονικής απόσβεσης. Παρόλο που γίνεται χρήση ενός low pass φίλτρου, το οποίο εξομαλύνει τις υψηλές συχνότητες και αναπόφευκτα αποτρέπει την καταγραφή ιδανικών κρουστικών φορτίων, η επίδραση της εικονικής απόσβεσης είναι εμφανής στην απόκριση του συστήματος. Καθώς εμφανίζεται το κρουστικό φορτίο στο σύστημα, ο εικονικός αποσβεστήρας, καταναλώνει αποτελεσματικά την ενέργεια του συστήματος.



Εικόνα 42: Πειραματική απόκριση του ελεγκτή ενδοτικότητας σε κρουστικά φορτία, συγκρίνοντας την συμπεριφορά της άρθρωσης με και χωρίς τη χρήση εικονικής απόσβεσης (αριστερά). Σύγκριση μετρούμενων δυνάμεων υπό τον ελεγκτή ενδοτικότητας με και χωρίς εικονική απόσβεση (δεξιά).

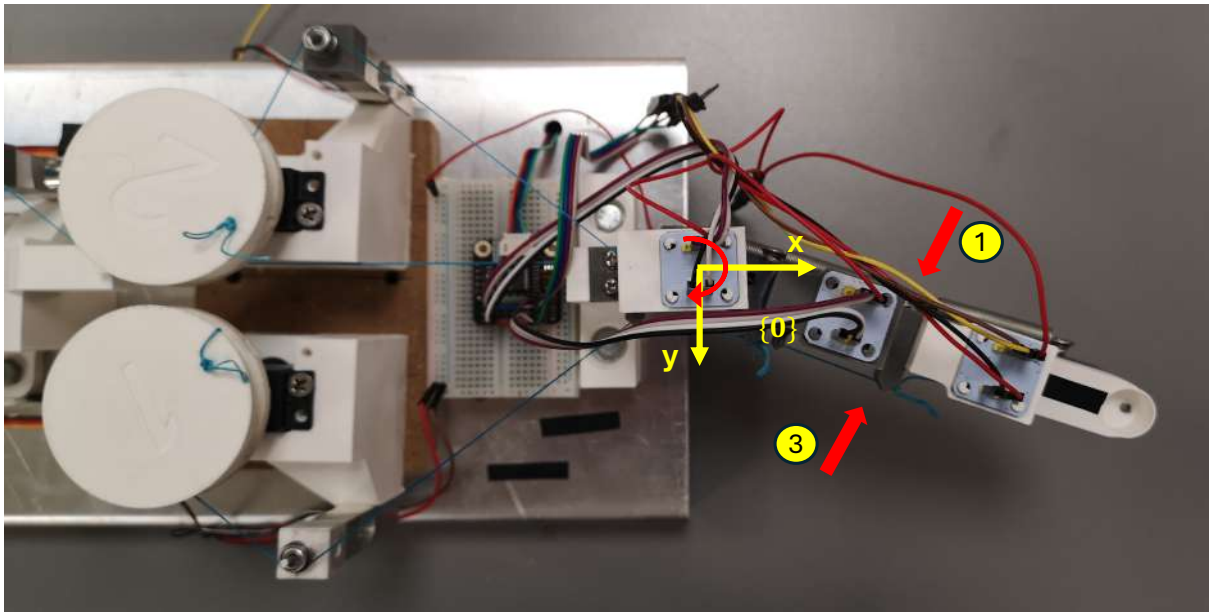
Στην εικόνα 42, απεικονίζεται στο αριστερό διάγραμμα η μεταβολή της πρώτης άρθρωσης κατά την εφαρμογή των κρουστικών φορτίων. Στο δεξί διάγραμμα καταγράφονται οι δυνάμεις που ασκήθηκαν στιγμιαία στην δυναμοκυψέλη και όχι σε κάποιο σημείο του δακτύλου, για να μειωθεί ο κίνδυνος ζημιάς λόγω κρουστικών φορτίων.

Η κόκκινη καμπύλη, αντιπροσωπεύει την συμπεριφορά της διάταξης όταν αυτή λειτουργεί μόνο σαν εικονικό ελατήριο. Όπως παρατηρείται η έλλειψη της απόσβεσης, επιτρέπει στο κρουστικό φορτίο να προκαλέσει έντονες και απότομες μεταβολές στην γωνία της άρθρωσης. Αντίθετα η μπλε καμπύλη, αντιστοιχεί στην συμπεριφορά της διάταξης, όταν αυτή λειτουργεί σαν εικονικό ελατήριο με απόσβεση. Είναι εμφανές ότι κατά την ύπαρξη κρουστικών φορτίων, εμφανίζεται αντίσταση του μηχανισμού, κάτι που επιτρέπει στο ρομποτικό δάκτυλο να λειτουργεί με ομαλότητα και σταθερότητα.

5.4.3 Ειδική περίπτωση ελεγκτή ενδοτικότητας ‘λειτουργία καθοδήγησης’

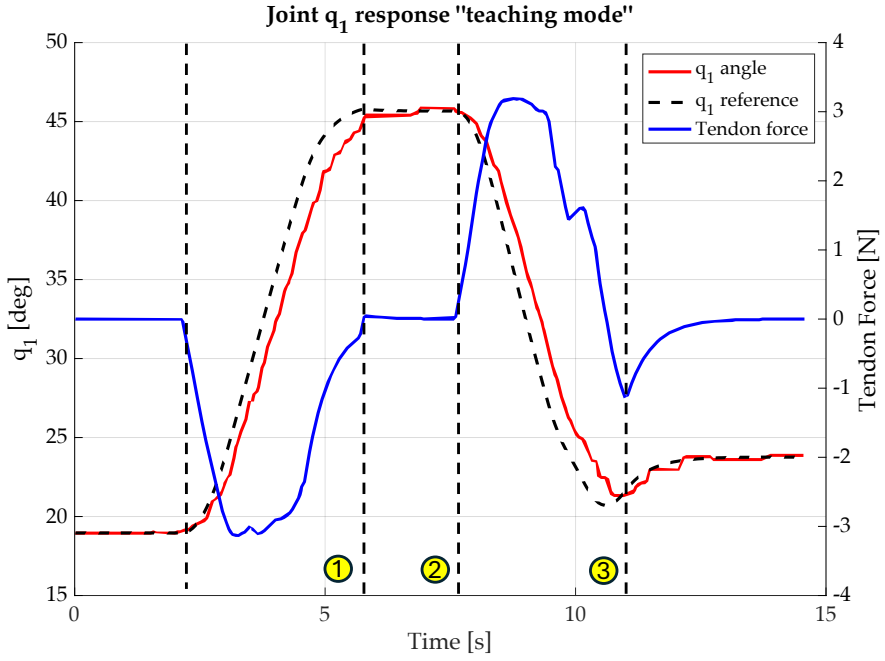
Στην παρούσα ενότητα μελετάται μια ειδική εφαρμογή του ελεγκτή ενδοτικότητας, γνωστή στη βιομηχανική ρομποτική ως λειτουργία καθοδήγησης (teaching mode). Θέτοντας τις εικονικές παραμέτρους δυσκαμψίας (K_d) και αδράνειας (M_d) ίσες με το μηδέν, ο μηχανισμός συμπεριφέρεται αποκλειστικά σαν εικονικός αποσβεστήρας. Αυτό επιτρέπει στον χρήστη να μεταβάλλει φυσικά την πόζα του ρομπότ, ασκώντας εξωτερικές δυνάμεις.

Για την αξιολόγηση της συγκεκριμένης λειτουργίας, διεξήχθη πείραμα εστιάζοντας στην πρώτη άρθρωση του δακτύλου. Στην εικόνα 43 απεικονίζεται η αρχική διαμόρφωση του συστήματος κατά την εκκίνηση του πειράματος, το πλαίσιο αναφοράς της βάσης {0} καθώς και οι κατευθύνσεις (διανύσματα 1 και 3) των ασκούμενων εξωτερικών δυνάμεων.



Εικόνα 43: Αρχική διαμόρφωση του πειράματος λειτουργίας καθοδήγησης. Το βέλος 1 υποδηλώνει την κατεύθυνση της εξωτερικής δύναμης που εφαρμόζεται κατά την πρώτη φάση, ενώ το βέλος 3 υποδηλώνει την αντίρροπη δύναμη κατά την τρίτη φάση.

Στην εικόνα 44 παρατίθεται η χρονική απόκριση της γωνίας της άρθρωσης (κόκκινη καμπύλη) σε συνάρτηση με την παραγόμενη δύναμη στον τένοντα (μπλε καμπύλη). Η άρθρωση εκκινεί από μια αρχική θέση ηρεμίας (18^o). Η πειραματική διαδικασία χωρίζεται σε τρεις διακριτές περιοχές δράσης.



Εικόνα 44: Γραφική αναπαράσταση απόκρισης της γωνίας της πρώτης άρθρωσης (κόκκινη καμπύλη), της γωνίας αναφοράς (μαύρη διακεκομμένη) και της μετρούμενης δύναμης τένοντα (μπλε καμπύλης).

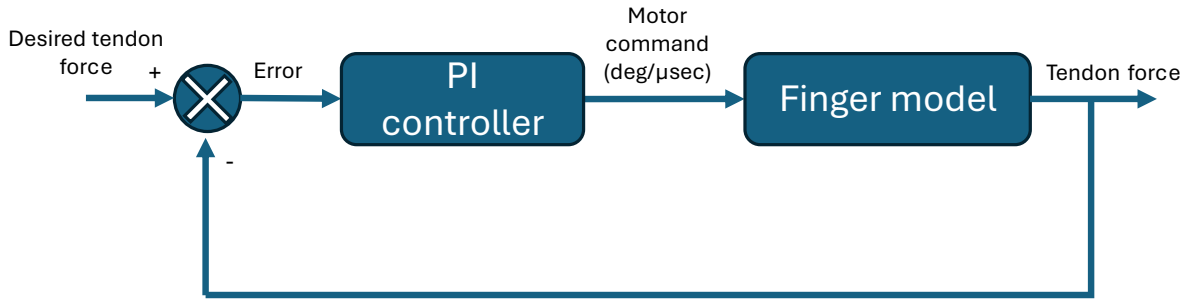
Στην πρώτη περιοχή, εφαρμόζεται εξωτερική δύναμη (κατά την φορά του βέλους 1), η οποία προκαλεί χαλάρωση του τένοντα. Ο μηχανισμός αντιδρά ομαλά και περιστρέφεται ακολουθώντας την κατεύθυνση της ασκούμενης δύναμης.

Στην δεύτερη περιοχή, η εξωτερική δύναμη παύει να ασκείται. Λόγω της φύσης του ελεγκτή, η απουσία δύναμης οδηγεί σε μηδενική ταχύτητα, με αποτέλεσμα η άρθρωση να ακινητοποιείται και να διατηρεί σταθερή τη γωνία της στη νέα θέση (45°).

Τέλος στην τρίτη περιοχή, εφαρμόζεται νέα εξωτερική δύναμη, αντίρροπης κατεύθυνσης (βέλος 3), η οποία προκαλεί τάνιση του τένοντα. Το δάκτυλο ανταποκρίνεται, υποχωρώντας και σταθεροποιείται σε νέα θέση (25°) μόλις η φόρτιση τερματιστεί.

5.5 Ελεγκτής δυνάμεων τένοντα

Σε αυτή την ενότητα θα υλοποιηθεί ένας ελεγκτής δύναμης τύπου PI καθώς θα αποτελέσει βασικό κομμάτι του ελεγκτή εμπέδησης που θα μελετηθεί στην επόμενη ενότητα.



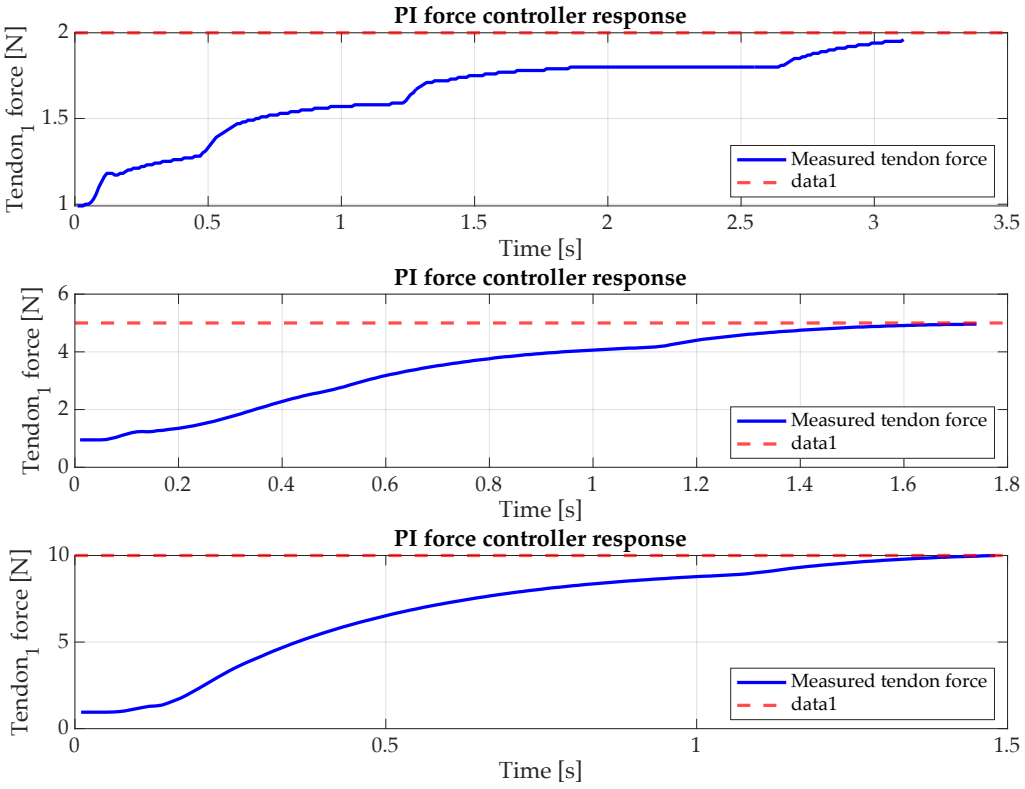
Εικόνα 45: Σχηματική απεικόνιση του PI ελεγκτή δύναμης.

Στην εικόνα 45 απεικονίζεται με σχηματικό τρόπο η λογική του ελεγκτή PI της δύναμης τένοντα. Ο ελεγκτής δέχεται είσοδο το σφάλμα της δύναμης του τένοντα και με κατάλληλους υπολογισμούς υπολογίζει την εντολή που πρέπει να στείλει στους κινητήρες έτσι ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή δύναμη. Τα κέρδη του ελεγκτή ρυθμίστηκαν πειραματικά, καταλήγοντας σε $K_p = 1.6$ deg/N και $K_i = 4$ deg/N s. Επισημαίνεται ότι τα κέρδη ρυθμίστηκαν με βάση τα ελατήρια επαναφοράς, για διαφορετικά ελατήρια τα κέρδη ενδέχεται να μην επαρκούν.

Για την αξιολόγηση της βηματικής απόκρισης του ελεγκτή δύναμης, σχεδιάστηκε ένα πειραματικό πρωτόκολλο, με σκοπό την προσομοίωση συνθηκών φυσικής αλληλεπίδρασης. Ως γνωστό, η ανάπτυξη και ρύθμιση δύναμης σε ένα μηχανισμό που οδηγείται από τένοντες προϋποθέτει την παρουσία εξωτερικής αντίδρασης.

Αν η διαδικασία εκτελούταν στον ελεύθερο χώρο, η εντολή αναφοράς θα μεταφράζονταν σε γωνιακή μετατόπιση, αποτρέποντας την άμεση ανάπτυξη εφελκυστικής τάσης στον τένοντα.

Για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού, τοποθετήθηκε στο άκρο του μηχανισμού ένα ενδοτικό εμπόδιο (αφρώδες υλικό), περιορίζοντας τον χώρο εργασίας του. Η πειραματική διαδικασία υλοποιήθηκε σε δύο διαδοχικά στάδια. Αρχικά, επιβλήθηκε μια δύναμη προφόρτησης ίση με 1N, φέρνοντας το δάκτυλο σε επαφή με το εμπόδιο και εξαλείφοντας οποιαδήποτε χαλάρωση του τένοντα. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε η τελική βηματική είσοδος και καταγράφηκε η απόκριση του ελεγκτή. Με τον ίδιο τρόπο πραγματοποιήθηκε το πείραμα και για μεταβαλλόμενη είσοδο.



Εικόνα 46: Απόκριση ελεγκτή δύναμης σε βηματική είσοδο 2N (άνω τμήμα),ι σε βηματική είσοδο 5N (μεσαίο τμήμα) και 10N (κάτω τμήμα).

Στην εικόνα 46 απεικονίζεται η απόκριση του ελεγκτή δύναμης για διαφορετικές τιμές επιθυμητής δύναμης. Όπως διαπιστώνεται, ο χρόνος ανόδου του συστήματος βελτιώνεται αισθητά καθώς αυξάνεται το μέγεθος της επιθυμητής δύναμης. Ενδεικτικά για επιθυμητή δύναμη 2N ο χρόνος ανόδου είναι ίσος με περίπου 2.7 δευτερόλεπτα, ενώ για επιθυμητή δύναμη 10N είναι περίπου ίσος με 0.6 δευτερόλεπτα. Η συμπεριφορά αυτή ερμηνεύεται βάσει της ρύθμισης του ελεγκτή PI, το αναλογικό κέρδος διατηρήθηκε σκόπιμα σε χαμηλά επίπεδα, προκειμένου να αποτραπούν φαινόμενα ταλάντωσης λόγω της απουσίας της απόσβεσης.

Συνεπώς, σε μικρές βηματικές αλλαγές της δύναμης, το αρχικό σφάλμα είναι μικρό και η δράση του αναλογικού όρου ανεπαρκής. Ως αποτέλεσμα, η διόρθωση βασίζεται σχεδόν εξολοκλήρου στον ολοκληρωτικό όρο, ο οποίος εισάγει χρονική υστέρηση μέχρι να συσσωρευτεί το απαιτούμενο σφάλμα. Αντιθέτως, στις περιπτώσεις υψηλής επιθυμητής δύναμης, το αρχικό σφάλμα επαρκεί ώστε ο αναλογικός όρος να προσφέρει σημαντική αρχική διέγερση στους κινητήρες, επιταχύνοντας τη συνολική απόκριση του μηχανισμού.

5.6 Έλεγχος εμπέδησης (impedance control)

Σε αυτήν την ενότητα αναλύεται η μέθοδος του ελέγχου εμπέδησης (impedance control), η οποία συχνά αντιπαραβάλλεται με τον έλεγχο ενδοτικότητας. Η βασική αρχή του ελεγκτή αυτού είναι η ρύθμιση της δυναμικής σχέσης μεταξύ της θέσης του ρομπότ και της ασκούμενης δύναμης. Όταν το περιβάλλον αλληλοεπιδράσει με το σύστημα, αυτό, αντί να συμπεριφερθεί σαν άκαμπτο σώμα, προσομοιώνει τη δυναμική συμπεριφορά ενός συστήματος μάζας-ελατηρίου-αποσβεστήρα. Ο ελεγκτής αυτός χρησιμοποιείται αρκετά συχνά σε περιπτώσεις που η εφαρμογή του ρομπότ απαιτεί συνεχή επαφή του με κάποια επιφάνεια με ταυτόχρονη άσκηση ελεγχόμενης δύναμης.

Η δυναμική εξίσωση που περιγράφει έναν βραχίονα με τρείς αρθρώσεις που κινείται στο επίπεδο XY, με βάση τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο Κεφάλαιο 2 είναι η εξής:

$$M(\ddot{q})\,\ddot{q} + C(q,\dot{q})\,\dot{q} + G(q) = \tau \quad (37)$$

Όπου ο πίνακας M είναι ο πίνακας αδράνειας του ρομποτικού δακτύλου, ο C είναι ο πίνακας των Coriolis και φυγόκεντρων δυνάμεων του ρομποτικού δακτύλου και ο G ο πίνακας επίδρασης της βαρύτητας, που στην περίπτωση αυτή μπορεί να αγνοηθεί καθώς η βαρύτητα δεν επηρεάζει την κίνηση του ρομπότ λόγω της κίνησης του στο επίπεδο. Η συνολική ροπή που ασκείται στον μηχανισμό προέρχεται από την εξασθενημένη δύναμη των τενόντων και τα ελατήρια επαναφοράς όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\tau = J_t^T \Phi\, F_t - K_s(q - q_0) \quad (38)$$

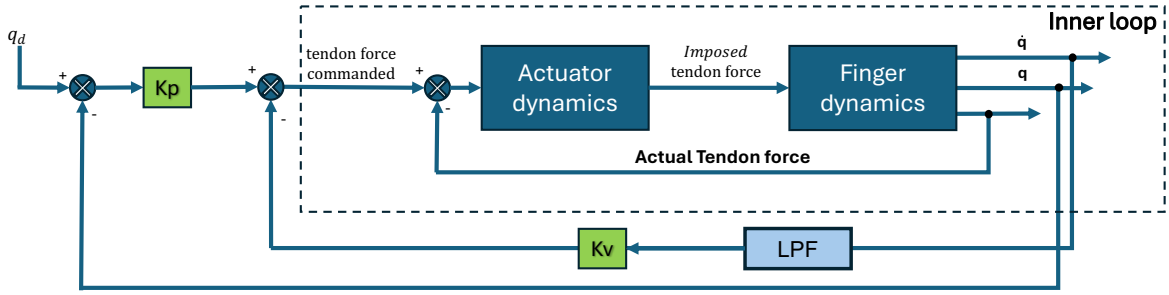
Τέλος από τις σχέσεις 37 και 38, δίνεται η τελική εξίσωση που περιγράφει τον μηχανισμό:

$$M(\ddot{q})\,\ddot{q} + C(q,\dot{q})\,\dot{q} = J_t^T \Phi\, F_t - K_s(q - q_0) \quad (39)$$

Όπου οι πίνακες M,C,J_t,Φ και K_s έχουν διαστάσεις 3x3. Επιπλέον τα F_t και (q-q_0) έχουν διαστάσεις 3x1.

5.6.1 Πειραματική εφαρμογή ελεγκτή εμπέδησης χωρίς μοντέλο

Παρακάτω (εικόνα 47), φαίνεται η κλιμακωτή (cascaded) αρχιτεκτονική του ελεγκτή εμπέδησης υπό μελέτη. Διακρίνονται δυο βρόχοι ελέγχου, ο εξωτερικός βρόχος, που καθορίζει την δυναμική συμπεριφορά της άρθρωσης μέσω ενός PD ελεγκτή και ο εσωτερικός βρόχος, ο οποίος εξασφαλίζει την παραγωγή της επιθυμητής δύναμης του τένοντα χρησιμοποιώντας έναν PI ελεγκτή.



Εικόνα 47: Σχηματική απεικόνιση λογικής του απλού ελεγκτή εμπέδησης.

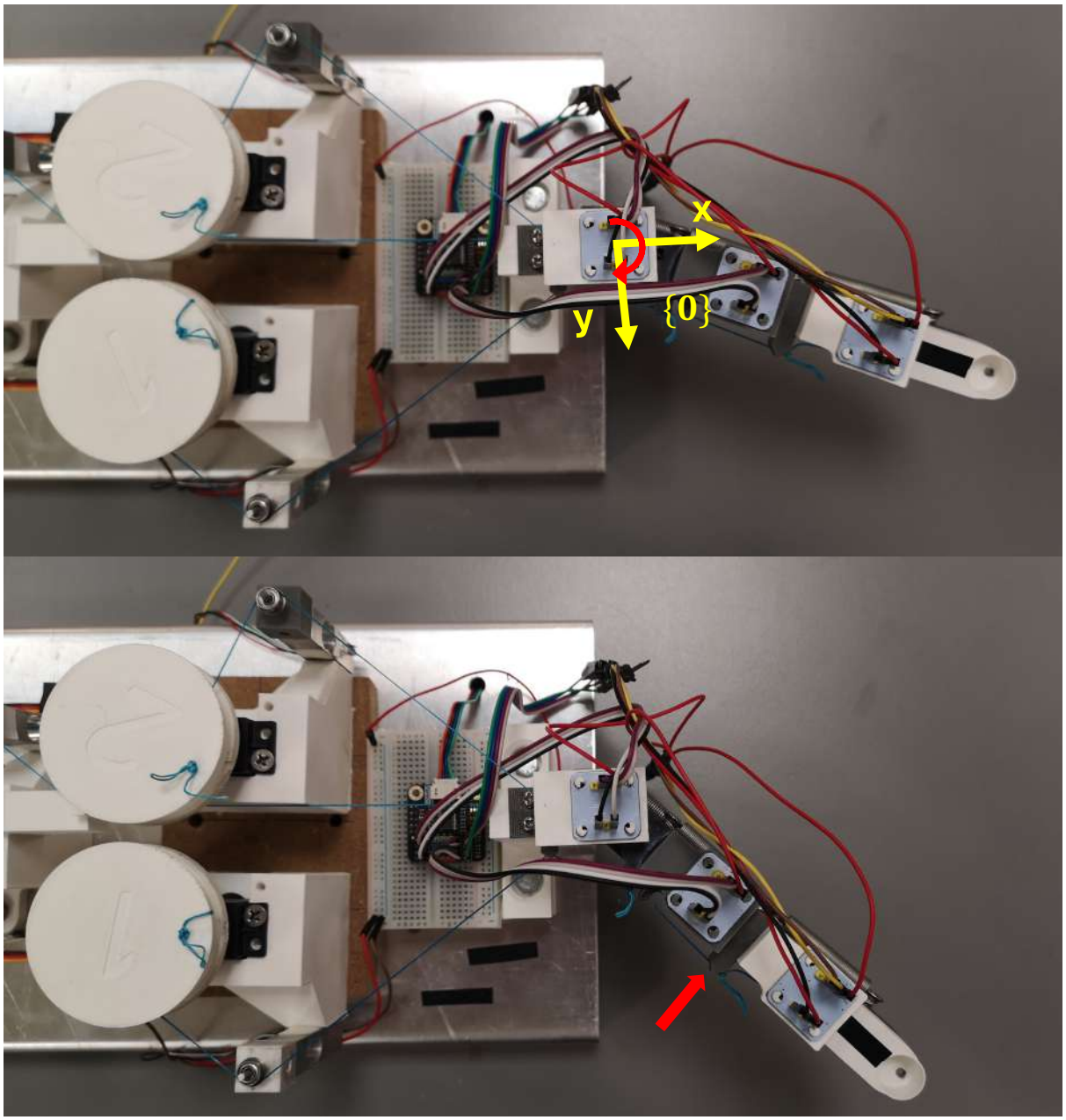
Για την υλοποίηση του εξωτερικού βρόχου, χρησιμοποιείται η τελική εξίσωση που παρουσιάστηκε προηγουμένως και αγνοείται πλήρως η ύπαρξη του μοντέλου. Αντιθέτως γίνεται χρήση ενός απλού βρόχου PD για τον υπολογισμό της επιθυμητής δύναμης, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$F_{commanded} = K_p(q_{desired} - q_{actual}) - K_v\,\dot{q}_{actual} \quad (40)$$

Για την παρούσα εργασία το K_v είναι ίσο με μηδέν και η σχέση 40 γίνεται

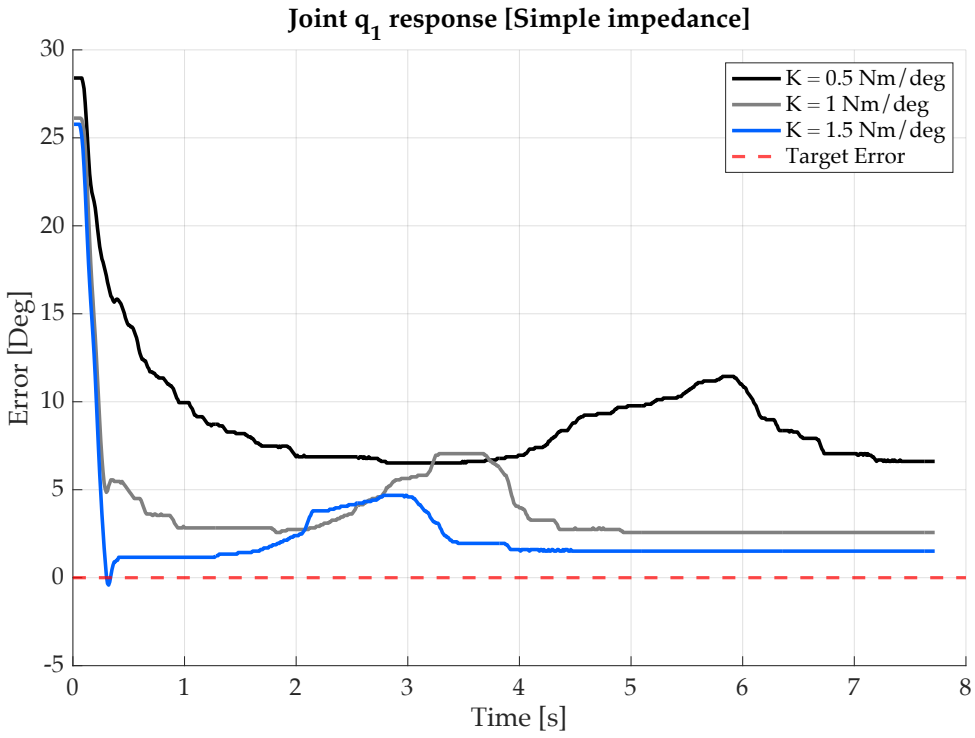
$$F_{commanded} = K_p(q_{desired} - q_{actual}) \quad (41)$$

Στη συνέχεια πραγματοποιείται η πειραματική αξιολόγηση της απόκρισης της πρώτης άρθρωσης υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και η επαλήθευση της ελαστικής συμπεριφοράς του συστήματος.



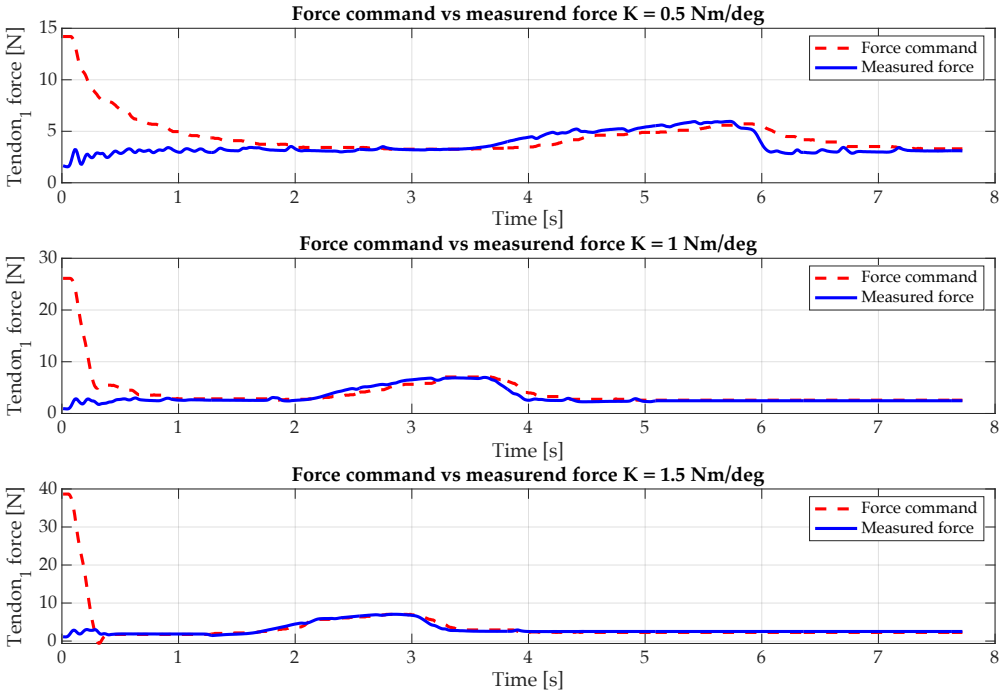
Εικόνα 48: Πειραματική διάταξη ελέγχου εμπέδησης: Αρχική θέση συστήματος αναφοράς (άνω τμήμα) και στάση διεξαγωγής πειράματος με το σημείο εφαρμογής της εξωτερικής δύναμης (κάτω τμήμα).

Στην εικόνα 48 απεικονίζεται η πειραματική διάταξη στο άνω τμήμα στην αρχική θέση ισορροπίας του ρομποτικού δακτύλου (περίπου στις 10^{o}). Στο κάτω τμήμα δίνεται βηματική εντολή κίνησης και το σύστημα ισορροπεί στις 35^{o}, έπειτα, ασκείται εξωτερική δύναμη στο άκρο της πρώτης άρθρωσης (κόκκινο βέλος). Στο στάδιο αυτό μελετάται η 'ενδοτική' απόκριση του μηχανισμού, προσομοιώνοντας τη λειτουργία ελατηρίου.



Εικόνα 49: Χρονική εξέλιξη σφάλματος θέσης της πρώτης άρθρωσης για διαφορετικές εικονικές δυσκαμψίες, χρησιμοποιώντας τον απλό ελεγκτή εμπέδησης.

Στην εικόνα 49 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη του σφάλματος της γωνίας. Παρατηρείται ότι με την αύξηση της επιθυμητής δυσκαμψίας (K), το σύστημα προσεγγίζει ακριβέστερα την επιθυμητή γωνία, ελαχιστοποιώντας το σφάλμα μόνιμης κατάστασης. Επιπλέον είναι ορατή η ταχύτερη απόκριση, όσο αυξάνεται η δυσκαμψία. Και στις τρείς περιπτώσεις εμφανίζονται περιοχές αύξησης του σφάλματος, οι οποίες αντιστοιχούν στις στιγμές άσκησης εξωτερικής δύναμης. Συγκρίνοντας την καμπύλη χαμηλής δυσκαμψίας (K = 0.5 Nm/deg) με αυτήν της υψηλής (K = 1.5 Nm/deg), επιβεβαιώνεται ότι η δεύτερη παρουσιάζει μικρότερη απόκλιση υπό την επίδραση του ίδιου εξωτερικού φορτίου, προσομοιώνοντας επιτυχώς την συμπεριφορά ενός πιο ‘σκληρού’ ελατηρίου. Σημειώνεται πως η περεταίρω αύξηση της επιθυμητής δυσκαμψίας οδηγεί το σύστημα σε ταλαντωτική συμπεριφορά.



Εικόνα 50: Σύγκριση εντολής δύναμης (κόκκινη διακεκομμένη καμπύλη) με μετρήσιμη δύναμη τένοντα (μπλε καμπύλη) για διαφορετικές εικονικές δυσκαμψίες, χρησιμοποιώντας τον απλό ελεγκτή εμπέδησης.

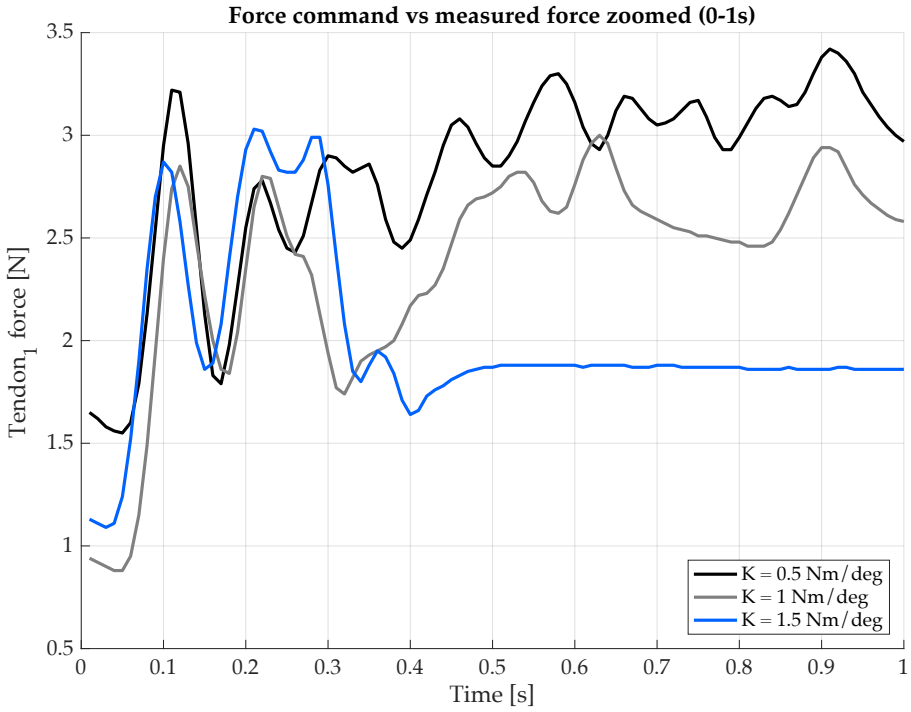
Η εικόνα 50 συγκρίνει την εντολή δύναμης (Force command) με την μετρούμενη δύναμη στους τένοντες. Όπως και προηγουμένως, η αύξηση της δυσκαμψίας βελτιώνει την ικανότητα του συστήματος να παρακολουθεί την εντολή. Αξίζει να σημειωθεί η συμπεριφορά του συστήματος σε δύο διακριτές φάσεις (εστιάζοντας στην καμπύλη για K = 1.5 Nm/deg).

Κατά την φάση εκκίνησης (0-0.5s), παρατηρείται μια μεγάλη απόκλιση μεταξύ εντολής και μετρούμενης δύναμης. Αυτό συμβαίνει καθώς δίνεται εντολή κίνησης (από 10^0 σε 35^0), το σφάλμα θέσης μεγαλώνει απότομα, με αποτέλεσμα να μεγαλώνει υπέρμετρα και η εντολή. Ωστόσο οι δυναμοκυψέλες καταγράφουν την πραγματική δύναμη που απαιτείται για την υπερνίκηση των τριβών και της αδράνειας του δακτύλου καθώς αυτό κινείται.

Τέλος στην φάση εξωτερικής διαταραχής (2-3s), ο τένοντας εφελκύεται και οι κινητήρες αντιδρούν. Σε αυτό το διάστημα, η μετρούμενη δύναμη ταυτίζεται ικανοποιητικά με την εντολή, αποδεικνύοντας τη σωστή λειτουργία του βρόχου ελέγχου υπό φόρτιση.

Στην εικόνα 50 η κλίμακα του άξονα Y έχει βαθμονομηθεί για να φαίνεται και η εντολή δύναμης αλλά και η μετρούμενη. Ως αποτέλεσμα, φαίνεται πως η μετρούμενη δύναμη δεν μεταβάλλεται ενώ στην πραγματικότητα δεν ισχύει κάτι τέτοιο.

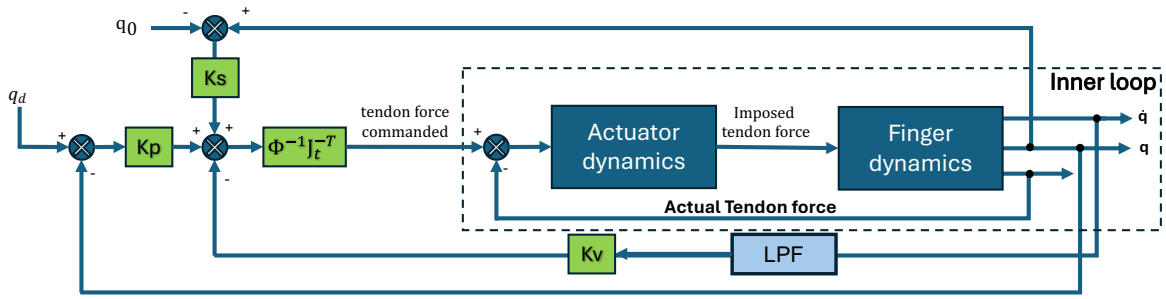
Η εικόνα 51 παρακάτω, απεικονίζει μόνο τις μετρούμενες δυνάμεις για διαφορετικές δυσκαμψίες για το πρώτο δευτερόλεπτο κίνησης.



Εικόνα 51: Γραφική αναπαράσταση των μετρούμενων δυνάμεων τένοντα για διαφορετικές εικονικές δυσκαμψίες, για το πρώτο δευτερόλεπτο κίνησης, χρησιμοποιώντας τον απλό ελεγκτή εμπέδησης.

5.6.2 Πειραματική εφαρμογή ελεγκτή εμπέδησης βασισμένου στο μοντέλο

Παρακάτω (εικόνα 52), φαίνεται η κλιμακωτή αρχιτεκτονική του ελεγκτή εμπέδησης βασισμένου στο μοντέλο. Διακρίνονται δυο βρόχοι ελέγχου, ο εξωτερικός βρόχος, που καθορίζει την δυναμική συμπεριφορά της άρθρωσης και ο εσωτερικός βρόχος, ο οποίος εξασφαλίζει την παραγωγή της επιθυμητής δύναμης του τένοντα χρησιμοποιώντας έναν PI ελεγκτή.



Εικόνα 52: Σχηματική απεικόνιση λογικής του ελεγκτή εμπέδησης βασισμένου στο μοντέλο.

Είναι επιθυμητό η άρθρωση να συμπεριφέρεται σαν ένα σύστημα ελατήριο-αποσβεστήρας όπως φαίνεται και με την παρακάτω σχέση:

$$\tau_{desired} = K_p(q_{desired} - q_{actual}) - K_v\dot{q}_{actual} \quad (42)$$

$$\tau_{actuator} = \tau_{desired}$$

$$J_t^T \Phi F_t = K_p(q_{desired} - q_{actual}) + K_s(q - q_0) - K_v\dot{q}_{actual}$$

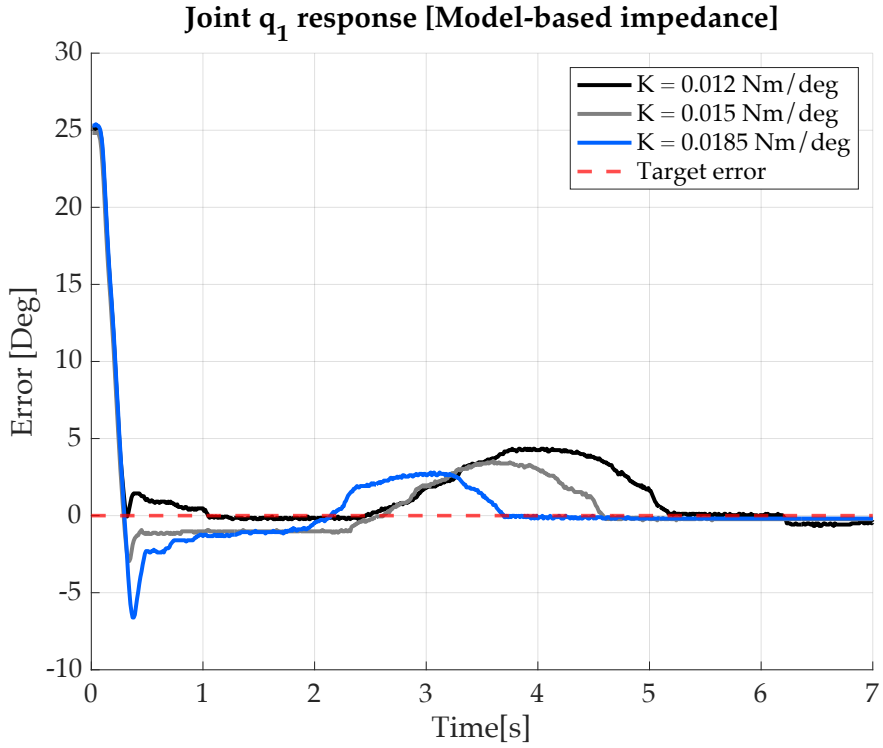
Η επιθυμητή δύναμη τένοντα προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$F_{commanded} = \Phi^{-1} J_t^{-T} \{K_p(q_{desired} - q_{actual}) + K_s(q - q_0) - K_v \dot{q}_{actual}\} \quad (43)$$

Για την παρούσα εργασία το K_v είναι ίσο με μηδέν και η σχέση 43 γίνεται

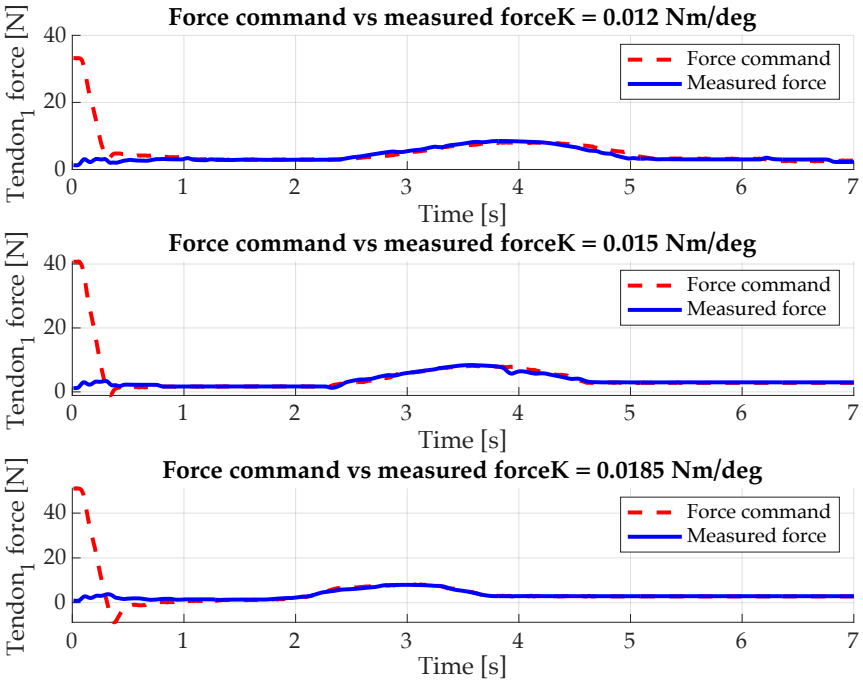
$$F_{commanded} = \Phi^{-1} J_t^{-T} \{K_p(q_{desired} - q_{actual}) + K_s(q - q_0)\} \quad (44)$$

Όπου K_s ο πίνακας με τις δυσκαμψίες των ελατηρίων επαναφοράς (σκληρότητα), Φ^{-1} ο αντίστροφος πίνακας τριβής συστήματος (ενότητα 2.5.2) και J_t^{-T} η αντίστροφη ανάστροφη Ιακωβιανή τενόντων (ενότητα 2.4.2). Πραγματοποιήθηκαν πειράματα για την αξιολόγηση της απόκρισης της άρθρωσης, χρησιμοποιώντας τις ίδιες συνθήκες διεξαγωγής όπως και στην ενότητα 5.6.1.



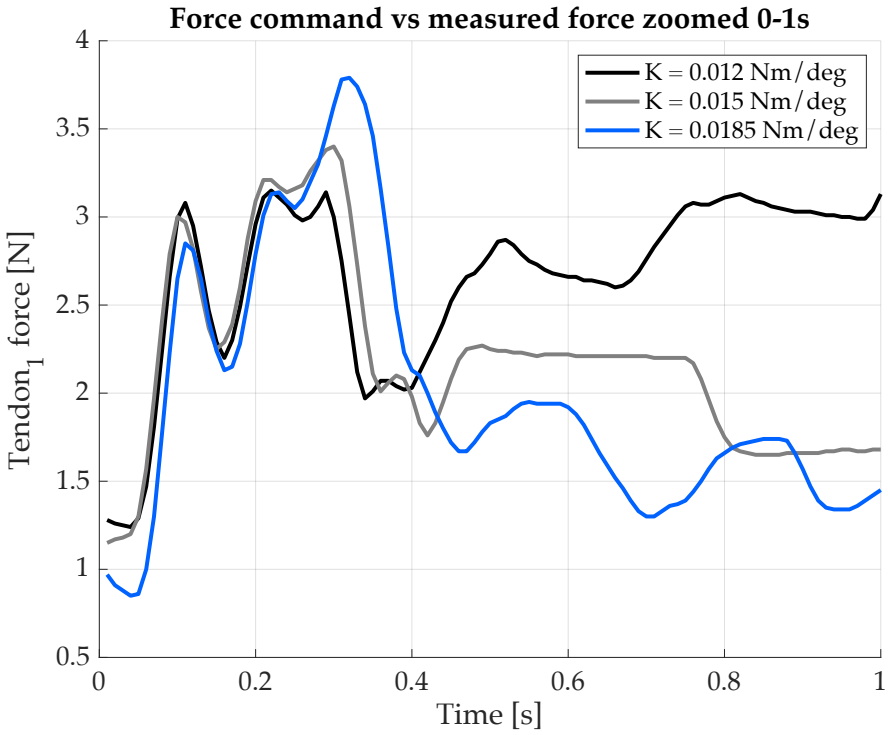
Εικόνα 53: Χρονική εξέλιξη σφάλματος θέσης της πρώτης άρθρωσης για διαφορετικές εικονικές δυσκαμψίες χρησιμοποιώντας τον ελεγκτή εμπέδησης βασισμένο στο μοντέλο του συστήματος.

Στην εικόνα 53 απεικονίζεται το σφάλμα γωνίας. Παρατηρείται ότι η χρήση του μοντέλου βελτιώνει την συνολική απόκριση συγκριτικά με την απλή προσέγγιση, μειώνοντας ταχύτερα το σφάλμα και προσεγγίζοντας καλύτερα την επιθυμητή γωνία. Ωστόσο παρατηρείται ότι το σφάλμα λαμβάνει αρνητικές τιμές, υποδεικνύοντας την ύπαρξη υπερύψωσης κατά την κίνηση. Το φαινόμενο αυτό είναι αναμενόμενο για συστήματα με υψηλή δυσκαμψία χωρίς απόσβεση. Σημειώνεται πως και σε αυτή την περίπτωση η περεταίρω αύξηση της εικονικής δυσκαμψίας οδηγεί το σύστημα σε ταλαντωτική συμπεριφορά.



Εικόνα 54: Σύγκριση εντολής δύναμης (κόκκινη διακεκομμένη καμπύλη) με μετρήσιμη δύναμη τένοντα (μπλε καμπύλη) για διαφορετικές εικονικές δυσκαμψίες, χρησιμοποιώντας τον ελεγκτή εμπέδησης βασισμένο στο μοντέλο του συστήματος.

Όσον αφορά την παρακολούθηση της εντολής από το σύστημα (εικόνα 54), επιβεβαιώνεται και πάλι ότι η υψηλότερη δυσκαμψία οδηγεί σε ταχύτερη και ακριβέστερη απόκριση του συστήματος στις εντολές, για τον ίδιο λόγο που αναφέρθηκε στην ενότητα 5.6.1. Παρακάτω δίνεται γράφημα των μετρούμενων δυνάμεων για το πρώτο δευτερόλεπτο κίνησης, για διαφορετικές δυσκαμψίες (εικόνα 55).



Εικόνα 55: Γραφική αναπαράσταση των μετρούμενων δυνάμεων τένοντα για διαφορετικές εικονικές δυσκαμψίες, για το πρώτο δευτερόλεπτο κίνησης, χρησιμοποιώντας τον ελεγκτή εμπέδησης βασισμένο στο μοντέλο του συστήματος.

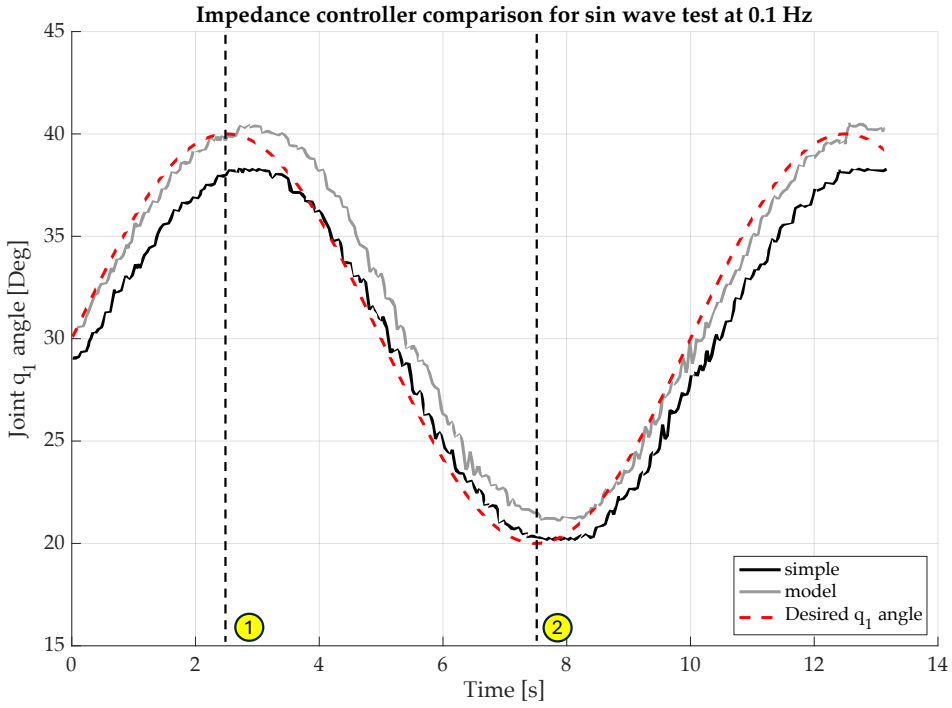
5.6.3 Σύγκριση ελεγκτών εμπέδησης

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση των ελεγκτών εμπέδησης που παρουσιάστηκαν στις ενότητες 5.6.1 και 5.6.2. Παρακάτω δίνεται ένας πίνακας επεξήγησης για την ονοματολογία που χρησιμοποιήθηκε.

Simple (απλός)	$F_{commanded} = K_p(q_{desired} - q_{actual})$
Model (βασισμένος στο μοντέλο)	$F_{commanded} = \Phi^{-1} J_t^{-T} \{K_p(q_{desired} - q_{actual}) + K_s(q - q_0)\}$
Model corrected (βασισμένος στο μοντέλο διορθωμένος)	$F_{commanded} = \Phi_{new}^{-1} J_t^{-T} \{K_p(q_{desired} - q_{actual}) + K_s(q - q_0)\}$

Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε πείραμα παρακολούθησης ημιτονοειδούς τροχιάς 0.1 Hz, με την επιθυμητή γωνία να περιγράφεται από την εξίσωση $q_{desired}=10\sin(0.2\pi t)+30$. Το πείραμα εστίασε στην απόκριση της πρώτης άρθρωσης, η οποία βρίσκεται σε αρχική γωνία 30°. Σημειώνεται πως για τα πειράματα με μεταβαλλόμενη είσοδο αυξήθηκε ο συντελεστής

τριβής (από μ =0.112 σε μ = 0.6), καθώς ο προηγούμενος προσδιορισμός του δεν ήταν επαρκής για δυναμικά πειράματα.



Εικόνα 56: Γραφική αναπαράσταση του ημιτονοειδούς σήματος εισόδου (κόκκινη διακεκομμένη καμπύλη) σε σχέση με τις αποκρίσεις του απλού ελεγκτή εμπέδησης (μαύρη καμπύλη) και του ελεγκτή εμπέδησης βασισμένου στο μοντέλο (γκρι καμπύλη).

Όπως παρατηρείται και στην εικόνα 56, αποτυπώνεται μια σαφής διαφοροποίηση στη συμπεριφορά των δυο ελεγκτών, η οποία εξαρτάται από την κατεύθυνση της κίνησης. Ο απλός ελεγκτής εμπέδησης αδυνατεί να παρακολουθήσει με ακρίβεια το σήμα εισόδου κατά την ανοδική του πορεία (περιοχή 2), ενώ αντίθετα, παρουσιάζει ικανοποιητική παρακολούθηση κατά την καθοδική του πορεία (περιοχή 1). Το παραπάνω συμπέρασμα αντιστρέφεται, όταν γίνεται χρήση του ελεγκτή εμπέδησης που βασίζεται στο μοντέλο.

Για την ποσοτικοποίηση της παρατήρησης αυτής υπολογίστηκε το σφάλμα τετραγωνικής ρίζας μέσης τιμής (RMSE) για κάθε ελεγκτή στις δύο περιοχές κίνησης, με τα αποτελέσματα να συνοψίζονται στον πίνακα 12:

Ελεγκτής	**Περιοχή 1**	**Περιοχή 2**
Απλός	2.07°	0.88°
Βασισμένος στο μοντέλο	0.78°	2.15°

Πίνακας 11: Σφάλματα RMSE για τις περιοχές 1 και 2 των ελεγκτών υπό μελέτη.

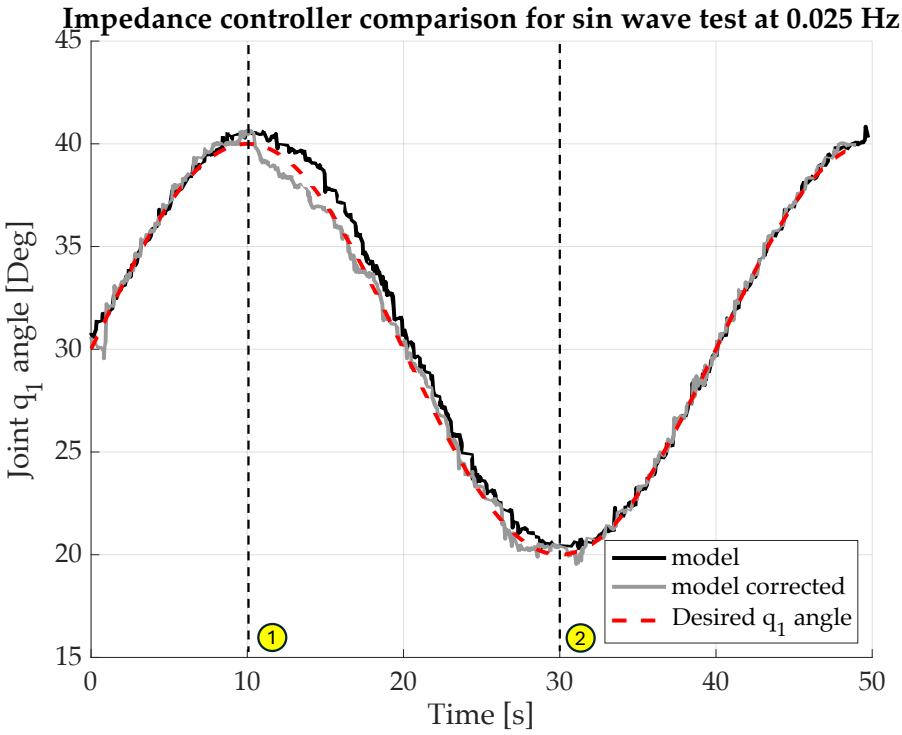
Η παρατηρούμενη διαφορά στην απόκριση πηγάζει από την διαφορετική δυναμική του συστήματος ανάλογα με την κατεύθυνση της κίνησης. Κατά τη μετάβαση σε μεγαλύτερη γωνιακή θέση, η κινητήρια δύναμη προέρχεται από τους κινητήρες. Σε αυτή τη φάση, η ενσωμάτωση του μοντέλου στον ελεγκτή λειτουργεί ευνοϊκά, καθώς παρέχει δυναμική αντιστάθμιση έναντι της τριβής και της αντίστασης των ελατηρίων επαναφοράς.

Αντιθέτως, κατά τη μετάβαση σε μικρότερη γωνιακή θέση, οι κινητήρες απλώς απελευθερώνουν τον τένοντα και η κίνηση βασίζεται αποκλειστικά στη δύναμη των ελατηρίων. Υπό αυτές τις συνθήκες, η στατική τριβή, η εναπομένουσα τάση στον τένοντα καθώς και η εκφόρτωση του ολοκληρωτικού όρου (στον εσωτερικό βρόχο του ελεγκτή εμπέδησης), επιδρούν αρνητικά στη δυναμική του συστήματος. Το αποτέλεσμα είναι το δυναμικό μοντέλο να υπεραντισταθμίζει την κίνηση, προκαλώντας το εμφανές σφάλμα παρακολούθησης.

Προτείνεται μια διαφορετική προσέγγιση στην υλοποίηση του ελεγκτή εμπέδησης βασισμένου στο μοντέλο και πιο συγκεκριμένα στην αντιστάθμιση της τριβής, για την βελτιστοποίηση της παρακολούθησης του σήματος εισόδου. Ο ελεγκτής θα χρησιμοποιεί έναν ανανεωμένο πίνακα Φ. Η προτεινόμενη αλλαγή γίνεται δυνατή με την παρακολούθηση του πρόσημου της ταχύτητας που υπολογίζεται.

$$\Phi_{new} = \begin{bmatrix} e^{-\mu\varphi_1 \mathrm{sgn}\,(\dot{q_1})} & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\mu\varphi_2 \mathrm{sgn}\,(\dot{q_2})} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\mu\varphi_3 \mathrm{sgn}\,(\dot{q_3})} \end{bmatrix}$$

Με απλά λόγια αυτό που συμβαίνει είναι ότι κατά την κάθοδο, ο ελεγκτής πλέον δεν υπεραντισταθμίζει την κίνηση. Πραγματοποιήθηκε ένα επιπλέον πείραμα με διαφορετική συχνότητα για να μελετηθεί το αποτέλεσμα της διόρθωσης του ελεγκτή που συζητήθηκε προηγουμένως αλλά και να μελετηθεί η απόκριση του συστήματος σε πιο αργή συχνότητα.



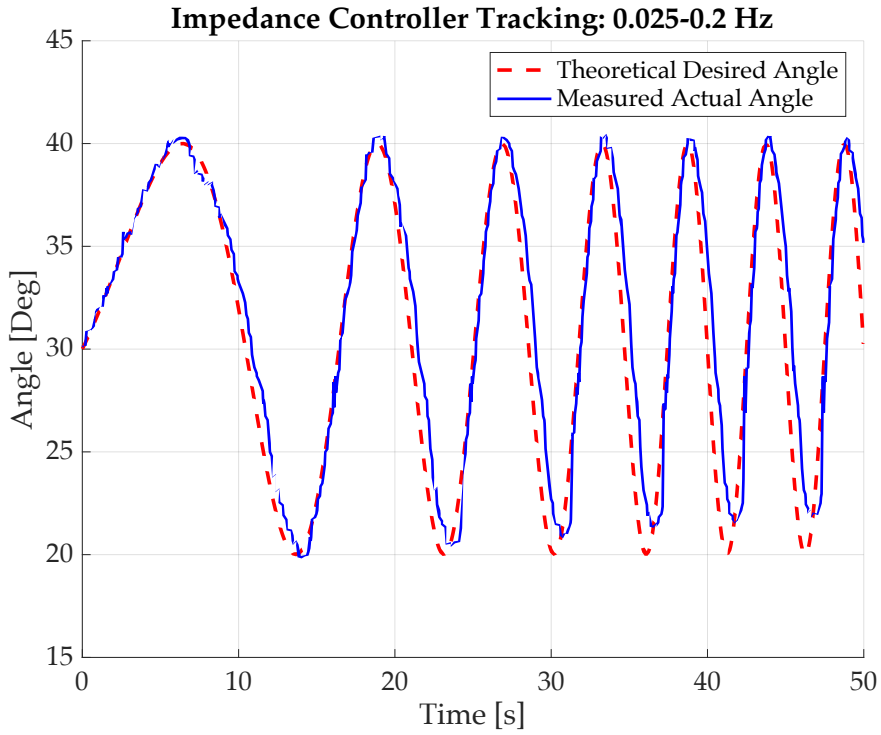
Εικόνα 57: Γραφική αναπαράσταση του ημιτονοειδούς σήματος εισόδου (κόκκινη διακεκομμένη καμπύλη) σε σχέση με τις αποκρίσεις του ελεγκτή εμπέδησης μοντέλου, χωρίς διόρθωση (μαύρη καμπύλη) και του ελεγκτή εμπέδησης μοντέλου, με διόρθωση (γκρι καμπύλη).

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 57, με μαύρη καμπύλη απεικονίζεται ο ελεγκτής βασισμένος στο μοντέλο χωρίς καμία διόρθωση, ενώ με την γκρι καμπύλη απεικονίζεται ο ελεγκτής βασισμένος στο μοντέλο με την διόρθωση που προαναφέρθηκε. Παρατηρείται ότι η διόρθωση βοηθάει το σύστημα να παρακολουθεί το σήμα εισόδου καλύτερα. Πιο συγκεκριμένα στον πίνακα 13 δίνονται τα σφάλματα (RMSE) για την άνοδο (περιοχή 2) και την κάθοδο (περιοχή 1).

Ελεγκτής	**Περιοχή 1**	**Περιοχή 2**
Βασισμένος στο μοντέλο	0.95°	0.23°
Βασισμένος στο μοντέλο διορθωμένος	0.48°	0.23°

Πίνακας 13: Σφάλματα RMSE για τις περιοχές 1 και 2 των ελεγκτών υπό μελέτη.

Η χρήση του διορθωμένου ελεγκτή προκαλεί βελτίωση στην συνολική απόκριση του μηχανισμού καθ' όλη την παρακολούθηση του σήματος εισόδου. Τέλος πραγματοποιήθηκε ένα τελευταίο πείραμα ημιτονοειδούς σήματος με μεταβαλλόμενη συχνότητα, για την μελέτη του συστήματος σε πιο μεγάλο φάσμα συχνοτήτων και συγκεκριμένα από 0.025 – 0.2 Hz.



Εικόνα 58: Γραφική αναπαράσταση του ημιτονοειδούς σήματος εισόδου (κόκκινη διακεκομμένη καμπύλη) σε σχέση με την απόκριση του ελεγκτή εμπέδησης βασισμένου στο μοντέλο με διόρθωση (μπλε καμπύλη).

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 58, για χαμηλές συχνότητες το σύστημα μπορεί και παρακολουθεί το σήμα αρκετά καλά, όμως αυξανόμενης της συχνότητας φαίνεται ότι αδυνατεί να παρακολουθήσει το σήμα και πιο συγκεκριμένα την κάθοδο και πάλι. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο καθώς ο ελεγκτής δεν έχει ρυθμιστεί για την παρακολούθηση τέτοιων σημάτων.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στη μελέτη, τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τον έλεγχο ενός ρομποτικού δακτύλου οδηγούμενου από τένοντες. Στόχος ήταν η δημιουργία μιας διάταξης που να αξιοποιεί τα εγγενή πλεονεκτήματα των συστημάτων αυτών, αντιμετωπίζοντας παράλληλα τις προκλήσεις του ελέγχου που προκύπτουν από τις τριβές, τις μη γραμμικότητες και τη δυναμική σύζευξη των αρθρώσεων.

Μέσω μιας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας, πραγματοποιήθηκε η κινηματική και στατική ανάλυση του συστήματος (συμπεριλαμβανομένης της τριβής Capstan και της μη γραμμικής συμπεριφοράς των ελατηρίων επαναφοράς).

Στη συνέχεια, κατασκευάστηκε ένα πλήρως λειτουργικό πρωτότυπο μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης, σχεδιάστηκε το κατάλληλο ηλεκτρονικό σύστημα λήψης μετρήσεων (αισθητήρες Hall, δυναμοκυψέλες, I^2C πολυπλέκτης) και υλοποιήθηκαν αλγόριθμοι ελέγχου, η απόδοση των οποίων αξιολογήθηκε πειραματικά. Μέσα από την εκτενή πειραματική μελέτη της διάταξης, εξήχθησαν τα ακόλουθα κρίσιμα συμπεράσματα:

Η χρήση λογικής ανοιχτού βρόχου κατά τον έλεγχο θέσης του ρομποτικού δακτύλου, αποδείχτηκε ανεπαρκής, καθώς παρουσίαζε σημαντικό σφάλμα μόνιμης κατάστασης. Αντίθετα, η υλοποίηση ενός κλιμακωτού ελεγκτή PI εξάλειψε το σφάλμα μόνιμης κατάστασης και βελτίωσε την επαναληψιμότητα του μηχανισμού. Ωστόσο καθώς ο ελεγκτής είχε ρυθμιστεί για την μελέτη μιας άρθρωσης, κατά την κίνηση και των τριών αρθρώσεων, αποδείχθηκε ότι ενώ εξαλείφει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης, η απόκριση χρειάζεται περεταίρω μελέτη για την βελτιστοποίηση της.

Επιπλέον, αποδείχτηκε ότι η έκταση του δακτύλου, που βασίζεται στην παθητική επαναφορά μέσω ελατηρίων, εμφανίζει ελαφρώς χειρότερη επαναληψιμότητα σε σχέση με την ενεργή οδήγηση μέσω των κινητήρων. Αυτό αποδίδεται στη χαλάρωση του τένοντα και στα κρουστικά φορτία που αναπτύσσονται όταν η ταχύτητα επαναφοράς ανακόπτεται απότομα.

Μέσω της υλοποίησης ελεγκτή ενδοτικότητας μελετήθηκε πειραματικά η απόκριση του μηχανισμού, σε περιπτώσεις ύπαρξης εξωτερικών φορτίων. Η συμπεριφορά κρίθηκε κατάλληλη, καθώς εμφάνιζε υποχώρηση χωρίς την υπέρμετρη αύξηση δυνάμεων. Επιπλέον, η εισαγωγή εικονικής απόσβεσης, απορρόφησε αποτελεσματικά την ενέργεια κρουστικών

φορτίων, προσδίδοντας ομαλότητα στο σύστημα. Τέλος, μέσω του μηδενισμού της εικονικής δυσκαμψίας, υλοποιήθηκε με επιτυχία μια λειτουργία καθοδήγησης. Το ρομποτικό δάκτυλο μπόρεσε να καθοδηγηθεί παθητικά σε νέες θέσεις μέσω της άσκησης εξωτερικών δυνάμεων.

Η πειραματική σύγκριση μεταξύ ενός απλού ελεγκτή εμπέδησης και ενός ελεγκτή βασισμένου στο δυναμικό μοντέλο ανέδειξε ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον εύρημα. Η ενσωμάτωση του θεωρητικού μοντέλου προσέφερε βελτίωση στα απλά πειράματα με βηματική είσοδο. Παρόλα αυτά όταν ο μηχανισμός μελετήθηκε για μεταβαλλόμενο σήμα εισόδου, η συμπεριφορά του ελεγκτή βασισμένου στο μοντέλο βασίζονταν στην κατεύθυνση της κίνησης. Συνεπώς χρειάστηκε μια πιο περίπλοκη λογική ελέγχου, κατά την οποία ο ελεγκτής θα έχει γνώση της κατεύθυνσης κίνησης. Αυτό επιτεύχθηκε με την υλοποίηση της ασύμμετρης αντιστάθμισης της τριβής, πρακτικά ενισχύοντας την δύναμη κατά την κάμψη του δακτύλου και ελαττώνοντας την κατά την έκταση.

Αν και η παρούσα εργασία κάλυψε εκτενώς τον σχεδιασμό και τον έλεγχο της διάταξης, υπάρχουν αρκετά περιθώρια μελλοντικής βελτίωσης και επέκτασης της έρευνας:

Η αντικατάσταση των νημάτων με υλικά εξαιρετικά χαμηλής τριβής και υψηλής αντοχής μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένες τριβές και καλύτερες αποκρίσεις. Επιπλέον, η χρήση κινητήρων συνεχούς ρεύματος με ενσωματωμένους αισθητήρες ρεύματος, θα καταργούσε την ανάγκη για εξωτερικές δυναμοκυψέλες, μειώνοντας τον όγκο και το βάρος της διάταξης. Καθώς και θα επέτρεπε τον πιο αυστηρό προσδιορισμό των κερδών των ελεγκτών που υλοποιήθηκαν.

Στο επίπεδο της μοντελοποίησης, η ενσωμάτωση καλύτερων δυναμικών μοντέλων τριβής, η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του τένοντα, η μοντελοποίηση της υστέρησης του συστήματος καθώς και ο προσδιορισμός της ελαστικής συμπεριφοράς των συνδέσμων θα μπορούσε να βελτιώσει περεταίρω την ακρίβεια ελέγχου της διάταξης.

Τέλος, μια διαφορετική προσέγγιση στον σχεδιασμό του δακτύλου (χρήση περιστροφικών ελατηρίων ή ακόμη και συστήματος ανταγωνιστών τενόντων για τον έλεγχο επαναφοράς), πιθανώς να οδηγήσει σε καλύτερα αποτελέσματα και να επιτρέψει περισσότερο και καλύτερο έλεγχο της συμπεριφοράς της διάταξης.

Πηγές

[1] Shirafuji, S., Ikemoto, S., & Hosoda, K. (n.d.). *Development of a Tendon-Driven Robotic Finger for an Anthropomorphic Robotic Hand*.

[2] Deshpande, A. D., Xu, Z., Weghe, M. J. vande, Brown, B. H., Ko, J., Chang, L. Y., Wilkinson, D. D., Bidic, S. M., & Matsuoka, Y. (n.d.). *Mechanisms of the Anatomically Correct Testbed (ACT) Hand*.

[3] Mnyusiwalla, H., Vulliez, P., Gazeau, J. P., & Zeghloul, S. (2016). A New Dexterous Hand Based on Bio-Inspired Finger Design for Inside-Hand Manipulation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, *46*(6), 809–817. https://doi.org/10.1109/TSMC.2015.2468678

[4] Liow, L., Clark, A. B., & Rojas, N. (n.d.). *OLYMPIC: A Modular, Tendon-Driven Prosthetic Hand with Novel Finger and Wrist Coupling Mechanisms*.

[5] Dehghani, M., & Moosavian, S. A. A. (2014). Dynamics modeling of a continuum robotic arm with a contact point in planar grasp. *Journal of Robotics*, *2014*. https://doi.org/10.1155/2014/308283

[6] Dehghani, Mohammad & Moosavian, S.A.A.. (2014). Dynamics Modeling of a Continuum Robotic Arm with a Contact Point in Planar Grasp. Journal of Robotics. 2014. 10.1155/2014/308283.

[7] Date, S., Kurumadani, H., Nakamae, N., Ishii, Y., Kurauchi, K., Maniwa, N., Goto, N., Fukushima, T., Hirao, K., & Sunagawa, T. (2025). Ulnar finger posture effect on a pinch strength. *PLOS ONE*, *20*(6 June). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0325359

[8] Dinh, B. K., Xiloyannis, M., Antuvan, C. W., Cappello, L., & Masia, L. (2017). Hierarchical Cascade Controller for Assistance Modulation in a Soft Wearable Arm Exoskeleton. *IEEE Robotics and Automation Letters*, *2*(3), 1786–1793. https://doi.org/10.1109/LRA.2017.2668473

[9] Δουλγέρη Ζωή. (2007). *Ρομποτική: Κινηματική, Δυναμική και Έλεγχος Αρθρωτών Βραχιόνων*. Κριτική.

[10] George B. Thomas, Jr. (2018). *Thomas Απειροστικός λογισμός* (Hass Joel, Heil Christopher, & Weir D. Maurice, Eds.; 14th ed.). Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.

[11] Drake, R. L. ., Vogl, Wayne., Mitchell, A. W. M. ., & Gray, Henry. (2020). *Gray's anatomy for students*. Elsevier.

Παράρτημα

- Απόδειξη $h_i = L_{0i} - 2b_i + 2\sqrt{a_i^2 + b_i^2}\cos\left(tan^{-1}\left(\frac{a_i}{b_i}\right) + \frac{q_i}{2}\right)$ [σχέσης 10]:

Το ενεργό μήκος του τένοντα ορίζεται ως:

$$h_i = L_{0i} - 2\mathrm{b_i} + \tilde{x}_i$$

Το μεταβαλλόμενο μήκος τένοντα ορίζεται ως:

$$\tilde{x}_i = \sqrt{2{c_i}^2(1 - \cos(\omega_i))}$$

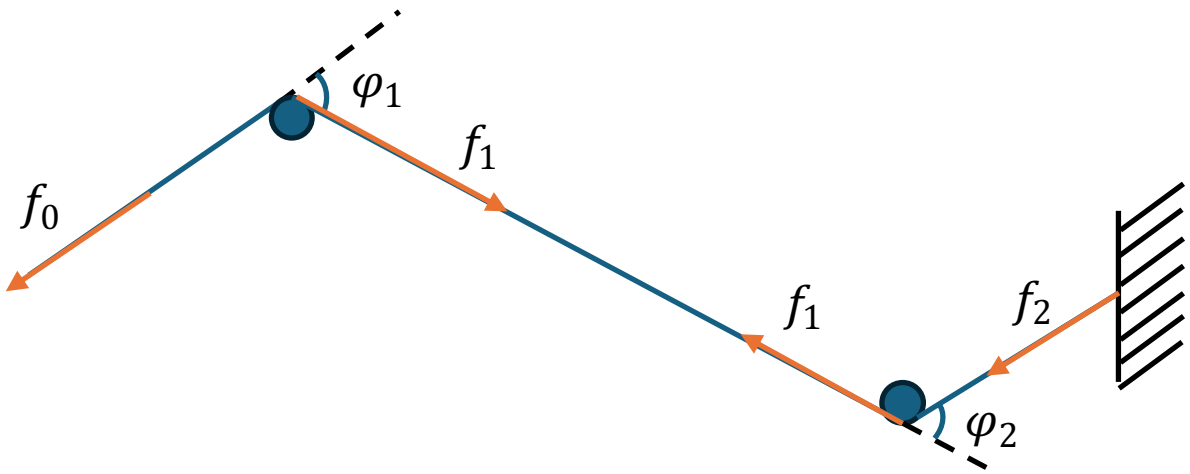
Όπου:

- $\omega_i = 180^o - (2\gamma_i + q_i)$
- $\gamma_i = \tan^{-1}\left(\frac{\mathrm{a_i}}{\mathrm{b_i}}\right)$
- $c_i^2 = \mathrm{a_i^2} + \mathrm{b_i^2}$

Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω το ενεργό μήκος του τένοντα ορίζεται ως:

$$\mathbf{h_i = L_{0i} - 2b_i + 2\sqrt{{a_i}^2 + {b_i}^2}\cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{a_i}{b_i}\right) + \frac{q_i}{2}\right)}$$

- Απόδειξη $f_n = f_0 e^{-\mu\sum\varphi}$ [συνολική τριβή & συνολική εξασθένηση δύναμης]



Έστω ένας τένοντας που ακολουθεί την παραπάνω όδευση στο σημείο πρόσδεσης. Ορίζεται f_0 η αρχική δύναμη που ασκείται στον τένοντα και f_2 η δύναμη που ασκείται στο σημείο πρόσδεσης του τένοντα. Επιπλέον μ ο συντελεστής τριβής μεταξύ των κυλινδρικών επιφανειών με τις οποίες έρχεται σε επαφή ο τένοντας (μπλε κύκλοι). Ισχύει:

$$Συνολική\ τριβή = f_0 - f_2$$

Για την εύρεση της f_2 εφαρμόζεται η εξίσωση Capstan σε κάθε σημείο όπου ο τένοντας αλλάζει διεύθυνση:

$$f_1 = f_0\, e^{-\mu\varphi_1}$$

$$f_2 = f_1\, e^{-\mu\varphi_2}$$

Αντικαθιστώντας την δύναμη f_1 στην σχέση της f_2:

$$f_2 = f_0\, e^{-\mu\varphi_1} e^{-\mu\varphi_2}$$

$$f_2 = f_0\, e^{-\mu(\varphi_1+\varphi_2)}$$

Τελικά η συνολική τριβή προκύπτει:

$$Συνολική\ τριβή = f_0\,(1 - e^{-\mu(\varphi_1+\varphi_2)})$$

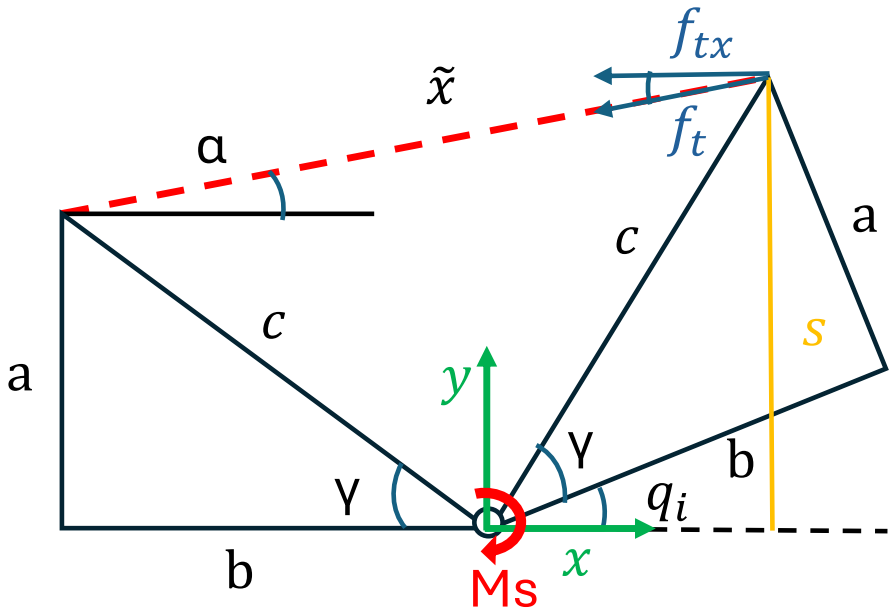
Επεκτείνοντας την παραπάνω σχέση για n αλλαγές διεύθυνσης (n αριθμός κυλινδρικών επιφανειών) η δύναμη που ασκεί ο τένοντας στο σημείο πρόσδεσης υπολογίζεται:

$$\boldsymbol{f_n = f_0\, e^{-\mu\sum_{i=1}^{n}\varphi_i}}$$

Και η συνολική τριβή:

$$\textbf{Συνολική τριβή} = f_0\,(1 - e^{-\mu \sum_{i=1}^{n} \varphi_i})$$

- Απόδειξη $\alpha = \frac{q_i}{2}$ [γωνίας τένοντα με προέκταση συνδέσμου, βοηθάει στον υπολογισμό της τριβής]



Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται σχηματικά μια άρθρωση του μηχανισμού σε απλοποιημένη μορφή και ισχύει:

$$\sin(\alpha) = \frac{\text{s-a}}{\tilde{\text{x}}}$$

Ο αριθμητής απλοποιείται:

$$\text{s-a} = c\,\sin(\gamma + q_i) - c\,\sin(\gamma)$$

$$\text{s-a} = c\,[\sin(\gamma + q_i) - \sin(\gamma)]$$

Από την ταυτότητα:

- $\sin(A) - \sin(B) = 2\sin\left(\frac{A-B}{2}\right)\cos\left(\frac{A+B}{2}\right)$

Έστω

- $A = \gamma + q_i$
- $B = \gamma$

Ο αριθμητής γίνεται:

$$2c\sin\left(\frac{(\gamma+q_i)-\gamma}{2}\right)\cos\left(\frac{(\gamma+q_i)+\gamma}{2}\right)$$

Απλοποιώντας περεταίρω, ο αριθμητής γράφεται στην τελική μορφή του:

$$Αριθμητής = 2c\sin\left(\frac{q_i}{2}\right)\cos\left(\gamma+\frac{q_i}{2}\right)$$

Ο παρονομαστής απλοποιείται:

$$\tilde{x} = c\sqrt{2(1-\cos(\omega))}$$

Από την ταυτότητα:

- $1-\cos(\omega) = 2\sin^2\left(\frac{\omega}{2}\right)$

Ο παρονομαστής απλοποιείται:

$$\tilde{x} = 2c\sin\left(\frac{\omega}{2}\right)$$

Ισχύει ότι:

$$\omega = 180^0 - (2\gamma + q_i)$$

Επομένως ο παρονομαστής:

$$\tilde{x} = 2c\sin(\,90^0 - \left(\gamma+\frac{q_i}{2}\right))$$

Από την ταυτότητα:

- $\sin(90^0 - q) = \cos\,(q)$

Ο παρονομαστής:

$$\tilde{x} = 2c\cos\left(\gamma+\frac{q_i}{2}\right)$$

Συνδυάζοντας τον ονομαστή και τον παρονομαστή:

$$\sin(\alpha) = \frac{2c\sin\left(\frac{q_i}{2}\right)\cos\left(\gamma+\frac{q_i}{2}\right)}{2c\cos\left(\gamma+\frac{q_i}{2}\right)}$$

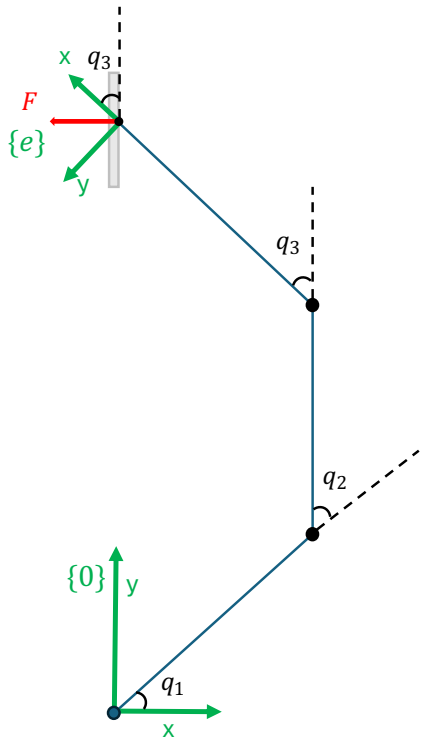
Έπειτα από απλοποιήσεις κοινών όρων:

$$\sin(\alpha) = \sin\left(\frac{q_i}{2}\right)$$

Τελικά:

$$\boldsymbol{\alpha = \frac{q_i}{2}}$$

- Υπολογισμός επιθυμητής ροπής κινητήρα



Έστω το ρομποτικό δάκτυλο στην παραπάνω πόζα (q1=q2=q3=45 μοίρες) και η επιθυμητή ασκούμενη δύναμη του άκρου ίση με 30N. Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις που συνδέουν τις Ιακωβιανές του βραχίονα και των τενόντων με την ροπή που εμφανίζεται στις αρθρώσεις προκύπτει:

$$F_t = J_t^{-T} J^T \Phi^{-1} F$$

Όπου:

$$F_t = \begin{bmatrix} F_{t1} \\ F_{t2} \\ F_{t3} \end{bmatrix}$$

Το διάνυσμα με τις δυνάμεις τενόντων που εμφανίζει ο μηχανισμός.

$$F = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ \tau_Z \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} -30 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Το γενικευμένο διάνυσμα δυνάμεων για ρομποτικό βραχίονα που κινείται στο επίπεδο.

$$\Phi^{-1} = \begin{bmatrix} e^{\mu \Sigma \varphi} & 0 & 0 \\ 0 & e^{\mu \Sigma \varphi} & 0 \\ 0 & 0 & e^{\mu \Sigma \varphi} \end{bmatrix}$$

Ο αντίστροφος πίνακας Φ ο οποίος αντισταθμίζει τα φαινόμενα τριβής για τον σωστό υπολογισμό της επιθυμητής δύναμης τενόντων και κατά συνέπεια της ροπής των κινητήρων. Υπολογίζοντας τις ιακωβιανές και λύνοντας ως προς το διάνυσμα F_t προκύπτουν οι επιθυμητές δυνάμεις σε Newtons:

$$F_t = \begin{bmatrix} 242.32 \\ 237.65 \\ 146.24 \end{bmatrix}$$

Επιπλέον γνωρίζοντας και την ακτίνα των τροχαλιών των κινητήρων (σε μέτρα), πολλαπλασιάζοντας την δύναμη των τενόντων με την ακτίνα προκύπτει η επιθυμητή ροπή στον άξονα του κινητήρα σε Nm:

$$\boldsymbol{\tau_{motor}} = \begin{bmatrix} \mathbf{3.33} \\ \mathbf{3.39} \\ \mathbf{1.34} \end{bmatrix}$$

- Προσδιορισμός της επαναληψιμότητας

Αρχικά χρειάζεται να προσδιοριστεί η μέση τιμή των μετρήσεων:

$$\bar{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=0}^{i=n} X_i$$

Όπου n ο συνολικός αριθμός των κύκλων. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η τυπική απόκλιση του δείγματος (standard deviation), S:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{i=n}(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$

Τέλος η επαναληψιμότητα εκφράζεται στατιστικά με διάστημα εμπιστοσύνης τριών τυπικών αποκλίσεων (3σ rule):

$$Επαναληψιμότητα = \pm 3\, S$$