



Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Προηγμένα Συστήματα Παραγωγής, Αυτοματισμού και Ρομποτικής

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Έλεγχος ρομποτικού δακτύλου για τη θέση και την
άσκηση δύναμης σε επίπεδη επιφάνεια

Καββουσανός Σταύρος

Επιβλέπων: Φασουλάς Ιωάννης
Επίκουρος Καθηγητής ΤΕΙ Κρήτης

Ηράκλειο, Ιούλιος 2016

Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης

Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών (ΔΠΜΣ):

«Προηγμένα Συστήματα Παραγωγής, Αυτοματισμού και Ρομποτικής»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Έλεγχος ρομποτικού δακτύλου για τη θέση και την
άσκηση δύναμης σε επίπεδη επιφάνεια

Μεταπτυχιακός φοιτητής: Καββουσάνος Σταύρος

ΑΜ: 10

Επιβλέπων καθηγητής

Φασουλάς Ιωάννης

Επίκουρος Καθηγητής

Παρουσιάστηκε δημόσια και εξετάστηκε στο Τμήμα στις
.../.../.....

Εξεταστική Επιτροπή:

1. Φασουλάς Ιωάννης, Επίκουρος Καθηγητής ΤΕΙ Κρήτης
(Υπογραφή)
2. Καββουσάνος Εμμανουήλ, Επίκουρος Καθηγητής ΤΕΙ Κρήτης
(Υπογραφή)
3. Σφακιωτάκης Μιχαήλ, Επίκουρος Καθηγητής ΤΕΙ Κρήτης
(Υπογραφή)

Ηράκλειο, Ιούλιος 2016

Η έγκριση της μεταπτυχιακής εργασίας από το Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Προηγμένα Συστήματα Παραγωγής, Αυτοματισμού και Ρομποτικής» του ΤΕΙ Κρήτης δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής εργασίας επιθυμώ να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς όλους όσους με την πολύτιμη βοήθειά τους συντέλεσαν στην περάτωσή της.

Καταρχάς θα ήθελα θερμά να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Φασουλά Ιωάννη που επέβλεψε την εξέλιξη αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας, για την πολύτιμη καθοδήγηση και την αμέριστη βοήθεια που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Κυρίως όμως για την ηθική συμπαράσταση που μου έδειξε σε δύσκολες στιγμές που παρουσιάστηκαν στην πορεία για την ολοκλήρωσή της.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω το Βασίλη Βάμβουκα, φοιτητή του Τμήματος Μηχανολογίας για τη σχεδίαση και την κατασκευή του ρομποτικού δακτύλου.

Θερμές ευχαριστίες απευθύνω στον κ. Γραμματικάκη Ιωάννη, Μηχανολόγο Μηχανικό και Εκπαιδευτικό του 4^{ου} Εσπερινού ΕΠΑΛ Ηρακλείου για τη σχεδίαση και κατασκευή τμημάτων της πειραματικής διάταξης. Πολύτιμος αρωγός σε αυτή την προσπάθεια ήταν ο Καρίτης Αντώνιος, μαθητής του 4^{ου} Εσπερινού ΕΠΑΛ τον οποίο και ευχαριστώ.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου Γκλίβα Ρόζα, Βειϊσάκη Ελένη και Δεδούση Κωνσταντίνο για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχαν για την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής εργασίας αλλά και καθ' όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Ευχαριστίες αξίζουν στους συναδέλφους μου, εκπαιδευτικούς του 4^{ου} Εσπερινού ΕΠΑΛ αλλά και στους φίλους μου για την ηθική συμπαράσταση και το ειλικρινές ενδιαφέρον που μου έδειξαν σε όλη την πορεία της εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να εκφράσω την απέραντη ευγνωμοσύνη μου προς τους γονείς μου και την οικογένειά μου για την συμπαράσταση, την πίστη και την αγάπη τους.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία ασχολείται με το πρόβλημα του ελέγχου ενός ρομποτικού δακτύλου με παραμορφώσιμο άκρο καθώς κινείται πάνω σε μια επίπεδη και άκαμπτη επιφάνεια προς μια προκαθορισμένη θέση έτσι ώστε να εκτελεί κίνηση κύλισης ασκώντας παράλληλα μια δύναμη προς την επιφάνεια.

Δοκιμάζονται σε περιβάλλον προσομοίωσης και πειραματικά, νόμοι ελέγχου ως προς την ικανότητά τους να ελέγχουν τη θέση του ρομποτικού δακτύλου και τη δύναμη που ασκεί σε επιφάνεια, χωρίς τη χρήση αισθητήρων δύναμης και γνώση των συνθηκών επαφής που επικρατούν.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας γίνεται κινηματική και δυναμική ανάλυση του βραχίονα. Περιγράφονται οι σχέσεις που συνδέουν τις μεταβλητές των αρθρώσεων με το άκρο του βραχίονα όταν αυτό βρίσκεται ελεύθερο στο χώρο. Αναφέρονται επίσης οι εξισώσεις που προκύπτουν από τους κινηματικούς περιορισμούς που θέτει η κίνηση του δακτύλου πάνω στην επιφάνεια. Αναπτύσσονται οι δυναμικές εξισώσεις που περιγράφουν την κίνηση του ρομποτικού βραχίονα στην περίπτωση που κινείται στο χώρο, όταν εκτελεί κίνηση κύλισης πάνω στην επιφάνεια και στην γενική περίπτωση που η μορφή της κίνησης στην επιφάνεια είναι εκ των προτέρων άγνωστη.

Το δεύτερο τμήμα αναφέρεται στην αξιολόγηση των νόμων ελέγχου σε περιβάλλον προσομοίωσης. Γίνεται συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων όσο αφορά την απόκριση του συστήματος για κάθε ελεγκτή και αξιολογούνται με βάση τα κριτήρια που έχουν τεθεί.

Το τελευταίο μέρος αφορά την πειραματική διάταξη και τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών. Αναλύονται οι επιμέρους μηχανισμοί και περιγράφονται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση και τον υπολογισμό των διάφορων παραμέτρων του συστήματος. Τέλος παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα, αναλύονται και εξαγονται συμπεράσματα.

Abstract

This thesis deals with the problem of controlling a robotic finger with deformable edge as it moves on a flat rigid surface to a desired position so as to perform rolling motion by exerting a normal force to the surface.

In the last decades many anthropomorphic robotic hands have made that try to approximate the anatomy, flexibility and dexterity of the human hand. The human hand can apply forces in order to obtain stable grasps or perform manipulation procedures. It is capable also of exploring an unknown environment providing information about the state of the interaction with it. The same features are desirable in robot hands.

Each finger of a multi fingered robot hand can be considered as an independent manipulator that is able to interact with the environment. Contacts conditions between fingertip and contacted environment are important because they transmit forces and impose motion constraints. Position and force control is therefore critical to the proper performance of the robotic hand. Moreover, in order for robotic fingers to perform fine movements and secure manipulations, it is important to maintain rolling contacts motion without sliding. For small adjustments of the contacting position of the fingertip, the human hand uses rolling motion instead of sliding because it is more accurate. In addition a rolling contact is beneficial for haptic exploration of unknown objects with dexterous robotic hands because it is more accurate. Hence successful implementation of rolling contact control can significantly enhance the performance of a robot hand.

In this work, control laws are examined as to their ability to control the position of the robotic finger and the force exerted on a surface without the use of force sensors and knowledge of the contact conditions. For this purpose a robotic finger with soft hemispherical tip was constructed. Laboratory experiments and simulations took place and the results are compared and evaluated for the final position of the fingertip, the kind of motion it makes (rolling or sliding) and the normal force that robotic finger applies to the surface.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
2	Κινηματική & δυναμική ανάλυση	5
2.1	Κινηματική ανάλυση	5
2.1.1	Ευθεία κινηματική ανάλυση στο χώρο	6
2.1.2	Αντίστροφη κινηματική ανάλυση στο χώρο	12
2.1.3	Κινηματική ανάλυση ρομποτικού δακτύλου σε επαφή με επιφάνεια.....	15
2.2	Δυναμική ανάλυση	18
2.2.1	Δυναμική ανάλυση ρομποτικού δακτύλου.....	19
3	Έλεγχος & προσομοίωση ρομποτικού δακτύλου	22
3.1	Περιγραφή ελεγκτών	23
3.1.1	Έλεγχος δύναμης και θέσης	23
3.1.2	Έλεγχος δύναμης και θέσης με βελτιωμένες συνθήκες κίνησης.....	24
3.1.3	Έλεγχος δύναμης, θέσης και κίνησης κύλισης.....	25
3.2	Προσομοίωση ελεγκτών	27
3.2.1	Αποτελέσματα προσομοίωσης ελεγκτή για τη δύναμη και τη θέση.....	28
3.2.2	Αποτελέσματα προσομοίωσης ελεγκτή για τη δύναμη και τη θέση με βελτιωμένες συνθήκες κίνησης	31
3.2.3	Αποτελέσματα προσομοίωσης ελεγκτή για τον δύναμη, τη θέση και τη κύλιση	34
4	Ανάπτυξη πειραματικής διάταξης και υλοποίησης των ελεγκτών.....	36
4.1	Κινητήρες	37
4.1.1	Υπολογισμός του λόγου μείωσης του μειωτήρα στροφών	38
4.1.2	Βαθμονόμηση ποτενσιόμετρων.....	39

4.1.3	Υπολογισμός της σταθεράς ροπής.....	40
4.2	Σερβοενισχυτές.....	43
4.3	Αισθητήρας δύναμης.....	46
4.4	Ρομποτικό δάκτυλο	47
4.5	Υλοποίηση ελεγκτών.....	51
4.5.1	Βασικό μοντέλο Simulink	51
4.5.2	Μοντέλο P-D ελεγκτή	53
4.5.3	Μοντέλο ελεγκτή θέσης και δύναμης.....	55
5	Πειραματικά αποτελέσματα	58
5.1	Πειραματικά αποτελέσματα ελεγκτή για τη δύναμη και τη θέση	59
5.2	Πειραματικά αποτελέσματα ελεγκτή για τη δύναμη και τη θέση με βελτιωμένες συνθήκες κίνησης.....	61
5.3	Πειραματικά αποτελέσματα ελεγκτή για τη δύναμη και τη θέση και την κύλιση .	64
6	Συμπεράσματα	66
	Βιβλιογραφία.....	69

Κεφάλαιο 1

1 Εισαγωγή

Οι ρομποτικοί βραχίονες που εργάζονται σε ένα άγνωστο περιβάλλον απαιτείται να διαθέτουν άκρα τα όποια είναι σε θέση να εκτελούν επιδέξιες κινήσεις όπως ακριβώς ένα ανθρώπινο χέρι. Ο συντονισμός των κινήσεων με τη βοήθεια αισθητήρων είναι η έξυπνη σύνδεση από την αντίληψη στη δράση και παίζει κρίσιμο ρόλο στο να αποδοθούν δεξιότητες στα δάκτυλα τεχνητών μελών (πχ χέρια) που αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον. Ένα αισθητήριο σύστημα μπορεί να αντιληφθεί την κατάσταση των ρομποτικών δακτύλων και την περιοχή γύρω από αυτά, ένα κινητήριο σύστημα μετατρέπει τα σήματα ροπών σε κινήσεις και ένα νόμος ελέγχου έχει την ευθύνη για τη σύνδεση των παραπάνω συστημάτων. Γίνεται λοιπόν σημαντικό να προσδιοριστεί τι είδους αρχική γνώση απαιτείται σχετικά με την πολυπλοκότητα της διαδικασίας και ποιες μετρήσεις πρέπει να λαμβάνονται (σε πραγματικό χρόνο).

Έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί αρκετά ρομποτικά χέρια τα οποία λίγο έως πολύ μιμούνται τη λειτουργία και τις κινήσεις ενός ανθρώπινου χεριού. Κάθε δάκτυλο ενός ρομποτικού χεριού μπορεί να θεωρηθεί ως ένας ανεξάρτητος ρομποτικός βραχίονας που είναι σε θέση να αλληλεπιδρά με το περιβάλλον. Οι συνθήκες επαφής μεταξύ του ακροδακτύλου και μιας επιφάνειας είναι σημαντικές γιατί μεταφέρονται δυνάμεις και επιβάλλουν περιορισμούς στην κίνηση. Οι συνθήκες αυτές εξαρτώνται από την τριβή, την πρόσφυση, τη γεωμετρία του ακροδάχτυλου και την παραμόρφωση υπό φορτίο.

Τα ρομποτικά δάκτυλα, για να εκτελέσουν λεπτές κινήσεις και ασφαλείς χειρισμούς όταν ακουμπούν σε μια επιφάνεια, είναι σημαντικό να κάνουν κινήσεις κύλισης και όχι να

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

ολισθαίνουν πάνω σε αυτή, όπως γίνεται και στην περίπτωση ενός ανθρώπινου χεριού. Προκειμένου το χέρι να συγκρατήσει καλύτερα ένα αντικείμενο, τα ακροδάκτυλα κάνουν μικρές κινήσεις. Αυτές οι κινήσεις είναι κύλισης γιατί είναι πιο ακριβείς. Επίσης, όσο αφορά το χειρισμό αντικειμένων, η κινήσεις κύλισης γίνονται όλο και πιο σημαντικές όσο το μέγεθος του αντικειμένου μειώνεται, επειδή είναι δυνατό να αλλάζει σημαντικά ο προσανατολισμός του αντικειμένου καθώς τα δάκτυλα εκτελούν μικρές τέτοιες κινήσεις πάνω στην επιφάνειά του.

Οι άνθρωποι βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στη αίσθηση της αφής για να εξερευνήσουν και να αλληλεπιδράσουν με τον υλικό κόσμο. Μελέτες της ανθρώπινης απτικής αντίληψης δείχνουν ότι η αναζήτηση ακμών και περιγραμμάτων είναι μια σειρά κοινών διερευνητικών διαδικασιών που οι άνθρωποι χρησιμοποιούν για τον καθορισμό της γεωμετρίας αντικειμένων. Η χρήση επαφών κύλισης σε επιδέξια ρομποτικά χέρια πλεονεκτούν στον τομέα της εξερεύνησης άγνωστων αντικειμένων. Σε συνδυασμό με κατάλληλους αισθητήρες είναι δυνατόν να προσδιοριστούν οι ιδιότητες μιας επιφάνειας όπως η υφή, η τριβή ή μικρά χαρακτηριστικά όπως αυλακώσεις ή εξοχές.

Ως εκ τούτου ο επιτυχής έλεγχος της επαφής κύλισης μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την απόδοση ενός ρομποτικού χεριού. Στη βιβλιογραφία που αφορά τον χειρισμό αντικειμένων με ρομποτικά χέρια συχνά θεωρείται ότι οι συνθήκες κύλισης ικανοποιούνται εκ των προτέρων ανεξάρτητα από τις δυνάμεις και τις ροπές που εμφανίζονται κατά την επαφή. Στην πραγματικότητα, οι συνθήκες που επικρατούν κατά την επαφή ενός παραμορφώσιμου ακροδακτύλου και μιας άκαμπτης επιφάνειας είναι αβέβαιες ή τελείως άγνωστες. Επιπλέον, στην πράξη, οι τριβές που εμφανίζονται μπορεί να μην είναι δυνατόν να διατηρήσουν τις απαιτούμενες επαπτομενικές δυνάμεις με αποτέλεσμα το ακροδάκτυλο να ολισθαίνει παρά να κάνει κύλιση στην επιφάνεια. Ωστόσο σκοπός του ελεγκτή είναι να εξασφαλίσει την κίνηση κύλισης του ακροδακτύλου. Ένας τρόπος για να εξασφαλιστούν οι επιθυμητές συνθήκες επαφής και κύλισης είναι ο έλεγχος των κάθετων και επαπτομενικών δυνάμεων με τη χρήση κατάλληλων αισθητήρων με πρόθεση τη διατήρηση της δύναμης επαφής εντός του κώνου τριβής. Επίσης προτείνεται να τοποθετηθούν στα ακροδάκτυλα αισθητήρες που ανιχνεύουν πιθανή ολίσθηση προκειμένου να αποφευχθεί το ενδεχόμενο αυτό επαναπροσδιορίζοντας την επιθυμητή

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

δύναμη επαφής σε μεγαλύτερες τιμές. Ωστόσο η εφαρμογή τέτοιων μεθόδων μπορεί να μην είναι εύκολη στην πράξη, γιατί δεν είναι μόνο δύσκολο να χρησιμοποιηθούν σε μηχανισμούς ρομποτικών δακτύλων αλλά εμφανίζονται δυσκολίες και στην επιτυχή επεξεργασία των σημάτων από τους αισθητήρες λόγω του θορύβου. Επιπλέον, η ρύθμιση των δυνάμεων επαφής στις περιπτώσεις όπου απαιτείται η διατήρηση της κύλισης, μπορεί να οδηγήσει σε ακούσια κίνηση του αντικειμένου γεγονός που αντιτίθεται στην απαίτηση για σταθερή συγκράτησή του.

Στην εργασία αυτή εξετάζεται πειραματικά η ικανότητα ελεγκτών να επιτρέπουν σε ένα ρομποτικό δάκτυλο με παραμορφώσιμο άκρο να εκτελεί δεδομένη κίνηση κύλισης πάνω σε άκαμπτη επιφάνεια ασκώντας συγκεκριμένη δύναμη πάνω σε αυτή. Ο έλεγχος αυτός υλοποιείται υπολογίζοντας τη θέση και τον προσανατολισμό του ακροδακτύλου χωρίς την χρήση αισθητήρων δύναμης. Η πραγματοποίηση των πειραμάτων γίνεται σε ένα επίπεδο ρομποτικό βραχίονα 3 βαθμών ελευθερίας του οποίου το άκρο αποτελείται από παραμορφώσιμο υλικό ημισφαιρικής μορφής.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναπτύσσονται οι μαθηματικές εξισώσεις από τη κινηματική και δυναμική ανάλυση του συστήματος. Αναλύεται ο τρόπος επίλυσης του ευθέως και αντίστροφου κινηματικού προβλήματος για κίνηση του ακροδακτύλου στο χώρο και εξάγονται οι κατάλληλες μαθηματικές σχέσεις. Επίσης γίνεται κινηματική ανάλυση στην περίπτωση που το άκρο κινείται πάνω στην άκαμπτη επιφάνεια και προσδιορίζονται οι προϋποθέσεις έτσι ώστε να εκτελεί κίνηση κύλισης. Στη δυναμική ανάλυση μελετάται η τροχιά κίνησης του βραχίονα που προκαλείται από ένα δεδομένο σύνολο δυνάμεων/ροπών που επιδρούν στις αρθρώσεις του βραχίονα. Η ανάλυση γίνεται για την περίπτωση που το δάκτυλο κινείται ελεύθερα στο χώρο, όταν το άκρο του κινείται πάνω στην επιφάνεια θεωρώντας εκ το προτέρων ότι η κίνηση αυτή έχει χαρακτηριστικά καθαρής κύλισης και τέλος όταν η κίνηση που εκτελείται είναι συνδυασμός κίνησης και ολίσθησης.

Το δεύτερο κεφάλαιο αφορά τη μελέτη των προτεινόμενων νόμων ελέγχου και των προσομοιώσεων που έγιναν για την αποτίμηση τους ως προς τους επιδιωκόμενους στόχους που έχουν τεθεί. Αναλύονται οι μαθηματικές εκφράσεις για τον κάθε ελεγκτή και

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

περιγράφεται ο τρόπος που επηρεάζουν την απόκριση του συστήματος. Περιγράφονται οι συνθήκες στις οποίες πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις, παρουσιάζονται τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων και γίνεται συγκριτική αξιολόγηση ως προς την επίτευξη της δύναμης που ασκεί το δάκτυλο στην επιφάνεια, την τελική θέση του ακροδακτύλου και του είδους της κίνησης που αυτό εκτελεί σε σχέση με τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή της πειραματικής διάταξης και των υποσυστημάτων που την αποτελούν. Αναφέρονται τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση των διάφορων τμημάτων της διάταξης και των υπολογισμών παραμέτρων, όπως του λόγου μείωσης του μειωτήρα των γραναζιών και της σταθεράς ροπής του κινητήρα, της σχέσης μετατροπής των σημάτων από τα ποτενσιόμετρα στις αντίστοιχες γωνίες, της σταθεράς ενίσχυσης των σερβοενισχυτών και τη σχέση σήματος – δύναμης του αντίστοιχου αισθητήρα. Τέλος γίνεται αναφορά για τον τρόπο σχεδίασης και κατασκευής των συνδέσμων του ρομποτικού βραχίονα και του μεταλλικού κουτιού στο οποίο τοποθετήθηκαν οι σερβοενισχυτές. Επίσης περιγράφεται ο τρόπος που σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν οι ελεγκτές μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Το τελευταίο μέρος αφορά την πειραματική εφαρμογή. Περιγράφονται οι αρχικές συνθήκες των πειραμάτων και η επιθυμητή λειτουργία του συστήματος με τον καθορισμό των τιμών των αντίστοιχων μεγεθών. Επιπλέον, παρουσιάζονται και αναλύονται τα πειραματικά αποτελέσματα. Τέλος αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα δεδομένα της εργασίας.

Κεφάλαιο 2

2 Κινηματική & δυναμική ανάλυση

2.1 Κινηματική ανάλυση

Η κινηματική ανάλυση ενός βραχίονα αφορά την επίλυση δύο προβλημάτων, το ευθύ και το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα. Το ευθύ κινηματικό πρόβλημα συνίσταται στην εύρεση της θέσης και του προσανατολισμού του άκρου του βραχίονα ως προς τη βάση του όταν γνωρίζουμε τη θέση κάθε άρθρωσης. Το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα συνίσταται στον προσδιορισμό της θέσης της κάθε άρθρωσης που τοποθετεί το άκρο του βραχίονα σε μια επιθυμητή θέση και προσανατολισμό σε σχέση με τη βάση του. Στην περίπτωση που το άκρο του βραχίονα κινείται πάνω σε επιφάνεια, στην κινηματική ανάλυση ενσωματώνονται οι διάφοροι φυσικοί περιορισμοί που εισάγονται από το σύστημα καθώς και κινηματικοί περιορισμοί που προσδιορίζονται από τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της κίνησης του άκρου.

Οι εξισώσεις της κινηματικής ανάλυσης χρησιμοποιούνται για την αρχικοποίηση του συστήματος και για τους απαραίτητους υπολογισμούς κατά την διάρκεια των πειραμάτων. Συγκεκριμένα υπολογίζονται οι γωνίες των αρθρώσεων για την τοποθέτηση του δακτύλου στην αρχική θέση ως προς την επιφάνεια και την άσκηση συγκεκριμένης αρχικής δύναμης προς αυτή. Επίσης μέσω των εξισώσεων υπολογίζεται η θέση και η παραμόρφωση του υλικού του ακροδακτύλου κάθε χρονική στιγμή κατά τη διάρκεια του πειράματος. Τέλος από την κινηματική ανάλυση προσδιορίζεται η τροχιά και η ταχύτητα του ακροδακτύλου και η εξίσωση που περιγράφει τον κινηματικό περιορισμό για κίνηση κύλισης, μεγέθη που

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

χρησιμοποιούνται κατά την δυναμική ανάλυση του συστήματος αλλά και ως μέτρο αξιολόγησης της απόκρισης των υπό εξέταση ελεγκτών.

2.1.1 Ευθεία κινηματική ανάλυση στο χώρο

Ο αρθρωτός βραχίονας του ρομπότ είναι μια αλληλουχία στερεών σωμάτων τα οποία ονομάζονται σύνδεσμοι και συνδέονται μεταξύ τους με αρθρώσεις. Η σχετική θέση και ο προσανατολισμός κάθε συνδέσμου σε σχέση με το γειτονικό του εκφράζονται από ένα ομογενή μετασχηματισμό. Συνθέτοντας τον κατάλληλο αριθμό ομογενών μετασχηματισμών μπορούμε να υπολογίσουμε τη θέση και τον προσανατολισμό κάθε συνδέσμου ως προς ένα ακίνητο σύστημα αναφοράς, δηλαδή ως προς ένα αδρανειακό πλαίσιο. Το αδρανειακό πλαίσιο τοποθετείται συνήθως στη βάση του βραχίονα και λέγεται πλαίσιο βάσης.

Στην ευθεία κινηματική ανάλυση ενός βραχίονα με n αρθρώσεις υπολογίζεται η θέση και ο προσανατολισμός του άκρου ενός βραχίονα ως προς το αδρανειακό πλαίσιο του βραχίονα ως συνάρτηση των μεταβλητών των αρθρώσεων δηλαδή τον ομογενή μετασχηματισμό:

$$g(q): Q \rightarrow SE(3)$$

που απεικονίζει το χώρο των αρθρώσεων Q στο χώρο $SE(3)$ της θέσης και του προσανατολισμού ενός στερεού σώματος (στην περίπτωση αυτή του άκρου του βραχίονα).

Η ευθεία κινηματική ανάλυση γίνεται με βάση ένα σύνολο συμβατικών κανόνων που αφορούν τους τρόπους τοποθέτησης των πλαισίων στους συνδέσμους, έτσι ώστε να απλοποιούνται οι κινηματικές εξισώσεις του βραχίονα. Το 1955 οι Jacques Denavit και Richard Hartenberg πρότειναν μια σύμβαση με την οποία τοποθετούνται τα πλαίσια στους συνδέσμους έτσι ώστε να προσδιοριστούν οι παράμετροι που απαιτούνται προκειμένου να περιγραφεί κινηματικά ο κάθε σύνδεσμος, τη μέθοδο D-H. Το 1986 ο John Craig πρότεινε μια τροποποιημένη μέθοδο των Denavit-Hartenberg ως προς την τοποθέτηση των πλαισίων και τη σειρά των εκτελούμενων ομογενών μετασχηματισμών, η οποία παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

2.1.1.1 Μέθοδος Denavit-Hartenberg κατά Craig

Τοποθέτηση πλαισίου συντεταγμένων $\{i\}$

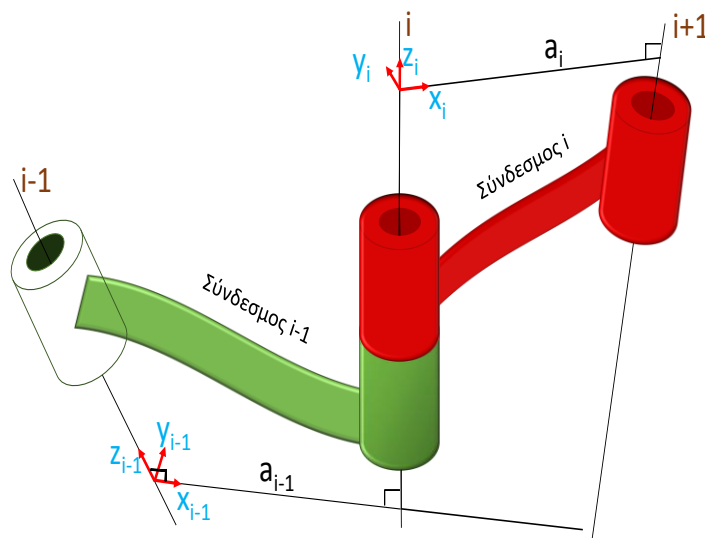
Βασικό στοιχείο της μεθόδου αποτελεί ο σωστός ορισμός των πλαισίων κάθε άρθρωσης. Προκειμένου να γίνει αυτό, πρέπει να τηρηθούν οι παρακάτω τέσσερις κανόνες:

Ο άξονας z_i του πλαισίου $\{i\}$ ταυτίζεται με τον άξονα της άρθρωσης i (εικόνα 2.1).

Η αρχή του πλαισίου $\{i\}$ τοποθετείται στο σημείο τομής της κοινής κάθετου των αξόνων i και $i+1$ με τον άξονα i .

Ο άξονας x_i τοποθετείται στην κοινή κάθετο των i και $i+1$.

Ο άξονας y_i επιλέγεται έτσι ώστε το σύστημα συντεταγμένων να είναι δεξιόστροφο.



Εικόνα 2.1: Τοποθέτηση των πλαισίων σύμφωνα με τις D-H παραμέτρους κατά Craig

Ορισμός κινηματικών παραμέτρων

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

Στην κινηματική ο σύνδεσμος θεωρείται ένα σώμα που συνδέει δύο γειτονικές αρθρώσεις. Οι άξονες των αρθρώσεων ορίζονται από ευθείες στο χώρο, πχ ο άξονας της άρθρωσης i ορίζεται από μια ευθεία γύρω από την οποία περιστρέφεται ο σύνδεσμος i ως προς τον σύνδεσμο $i-1$. Αποδεικνύεται ότι ένας σύνδεσμος μπορεί να περιγραφεί κινηματικά από τις τιμές δύο παραμέτρων που ορίζουν την σχετική θέση των δύο αξόνων ($i-1$ και i) στο χώρο:

- Το μήκος της κοινής καθέτου a_{i-1} μεταξύ των αξόνων $i-1$ και i
- Τη γωνία στροφής α_{i-1} του άξονα $i-1$ γύρω από την κάθετο a_{i-1} έως την παράλληλο του άξονα i

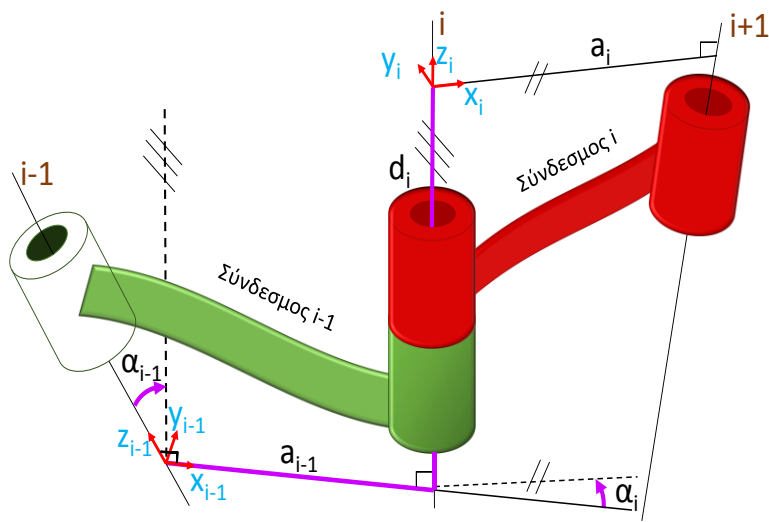
Για την πλήρη περιγραφή της αλυσίδας των συνδέσμων που αποτελούν ένα βραχίονα απαιτούνται δύο επιπλέον παράμετροι οι οποίες προσδιορίζουν τον τρόπο με τον οποίο οι σύνδεσμοι είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους. Οι παράμετροι αυτές είναι:

- Η απόσταση d_i των σημείων τομής των καθέτων a_{i-1} και a_i με τον άξονα i
- Η γωνία q_i της καθέτου a_{i-1} γύρω από τον άξονα i έως την παράλληλο της καθέτου a_i

Κινηματικές εξισώσεις

Προκειμένου να προσδιοριστούν η θέση και ο προσανατολισμός του του πλαισίου $\{i\}$ ως προς το $\{i-1\}$ ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα (εικόνα 2.2):

- Στροφή του πλαισίου $\{i-1\}$ γύρω από τον άξονα x_{i-1} κατά γωνία α_{i-1}
- Μετατόπιση a_{i-1} κατά μήκος του άξονα x_{i-1}
- Στροφή γύρω από τον άξονα z_i κατά γωνία q_i
- Μετατόπιση d_i κατά μήκος του άξονα z_i



Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει ο ομογενής μετασχηματισμός που συνδέει δύο γειτονικούς συνδέσμους και δίνεται από τη σχέση:

$$g_{i-1,i} = \begin{bmatrix} c_{q_i} & -s_{q_i} & 0 & a_{i-1} \\ s_{q_i}c_{\alpha_{i-1}} & c_{q_i}c_{\alpha_{i-1}} & -s_{\alpha_{i-1}} & -s_{\alpha_{i-1}}d_i \\ s_{q_i}s_{\alpha_{i-1}} & c_{q_i}s_{\alpha_{i-1}} & c_{\alpha_{i-1}} & c_{\alpha_{i-1}}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

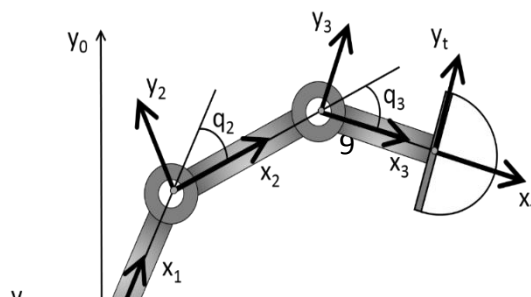
Η θέση και ο προσανατολισμός του άκρου $\{n\}$ ως προς το σύστημα αναφοράς $\{0\}$ βρίσκεται με την κατάλληλη σύνθεση ομογενών μετασχηματισμών της παραπάνω μορφής και είναι συνάρτηση των μεταβλητών των αρθρώσεων:

$$g_{0n}(q_1, \dots, q_n) = g_{01}g_{12} \dots g_{n-1,n} \quad (2.2)$$

2.1.1.2 Ευθεία κινηματική ανάλυση ρομποτικού δακτύλου στο χώρο

Το ρομποτικό δάκτυλο είναι ουσιαστικά ένας βραχίονας τριών βαθμών ελευθερίας με τρεις περιστροφικές αρθρώσεις που κινείται στο επίπεδο x-y. Αρχικά τοποθετείται το αδρανειακό πλαίσιο $\{0\}$ στη βάση του δακτύλου έτσι ώστε να ταυτίζεται με το πλαίσιο $\{1\}$ όταν η πρώτη μεταβλητή περιστροφής q_1 είναι 0.

Το δάκτυλο όπως προαναφέρθηκε κινείται στο επίπεδο x-y άρα οι άξονες των αρθρώσεων είναι παράλληλοι μεταξύ τους όπως και οι άξονες z_i των πλαισίων, οπότε οι κοινές κάθετοι πάνω στις οποίες τοποθετούνται οι άξονες x είναι οι σύνδεσμοι του βραχίονα. Τα τοποθετημένα πλαίσια στο ρομποτικό δάκτυλο φαίνονται στο παρακάτω σχήμα (εικόνα 2.3).



Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

Όλες οι αρθρώσεις είναι περιστροφικές επομένως όταν θα βρίσκονται στις 0 μοίρες όλοι οι x άξονες θα ευθυγραμμίζονται. Οι γωνίες α_i είναι 0 καθώς οι z άξονες είναι παράλληλοι μεταξύ τους. Η απόσταση d_i των συνδέσμων είναι 0 εφόσον το ρομποτικό δάκτυλο κινείται στο επίπεδο με τους άξονες z παράλληλους. Οι παράμετροι των συνδέσμων του δακτύλου δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2.1: Πίνακας με τις D-H παραμέτρους

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	q_i
1	0	0	0	q_1
2	0	l_1	0	q_2
3	0	l_2	0	q_3

Στον πίνακα των DH παραμέτρων κάθε σειρά περιέχει όλες τις απαραίτητες παραμέτρους για την δημιουργία των πινάκων των ομογενών μετασχηματισμών μεταξύ των πλαισίων των γειτονικών συνδέσμων. Έτσι προκύπτουν οι παρακάτω πίνακες:

$$g_{01} = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$g_{12} = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & l_1 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

$$g_{23} = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & l_2 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

όπου $c_i = \cos q_i$ και $s_i = \sin q_i$

Από τους πίνακες των ομογενών μετασχηματισμών των συνδέσμων του βραχίονα και με τη χρήση τριγωνομετρικών ταυτοτήτων προκύπτει ο πίνακας g_{03} :

$$g_{03} = g_{01}g_{02}g_{03} = \begin{bmatrix} c_{123} & -s_{123} & 0 & l_1c_1 + l_2c_{12} \\ s_{123} & c_{123} & 0 & l_1s_1 + l_2s_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Όπου $c_{12} = \cos(q_1 + q_2)$ $c_{123} = \cos(q_1 + q_2 + q_3)$ και αντίστοιχα για τα ημίτονα.

Ο g_{03} μας δίνει τη θέση και τον προσανατολισμό του τελευταίου πλαισίου του βραχίονα ως προς το ακίνητο σύστημα της βάσης. Αν θεωρήσουμε ένα σύστημα συντεταγμένων στο άκρο του βραχίονα και με προσανατολισμό ίδιο με αυτόν του πλαισίου {3} τότε ο πίνακας του ομογενή μετασχηματισμού του άκρου του βραχίονα t είναι:

$$g_{3t} = \begin{bmatrix} [I_{3 \times 3}] & \begin{bmatrix} l_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Ο ομογενής μετασχηματισμός $g_{0t} = g_{03}g_{3t}$ μας δίνει τη θέση και τον προσανατολισμό του άκρου του βραχίονα ως προς το ακίνητο σύστημα της βάσης.

$$g_{0t} = \begin{bmatrix} c_{123} & -s_{123} & 0 & l_1c_1 + l_2c_{12} + l_3c_{123} \\ s_{123} & c_{123} & 0 & l_1s_1 + l_2s_{12} + l_3s_{123} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. **Σφάλμα!** Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

2.1.2 Αντίστροφη κινηματική ανάλυση στο χώρο

Η αντίστροφη κινηματική ανάλυση ενός αρθρωτού βραχίονα αφορά την εύρεση των τιμών των μεταβλητών των αρθρώσεων g_i σε σχέση με τη βάση του, όταν είναι γνωστή η θέση και ο προσανατολισμός του άκρου του βραχίονα g_d . Ζητούνται δηλαδή οι λύσεις τις κινηματικής εξίσωσης των πινάκων:

$$g_{0n}(q_1, q_2, \dots, q_n) = g_d \quad (2.9)$$

Η εξίσωση αυτή ισοδυναμεί με 12 μη γραμμικές εξισώσεις με n αγνώστους.

Το πρόβλημα λοιπόν είναι έντονα μη γραμμικό και ανακύπτουν ζητήματα όπως η μέθοδος επίλυσης που πρέπει να ακολουθηθεί, η ύπαρξη λύσεων αλλά και η πιθανότητα πολλαπλών λύσεων.

Στην περίπτωση των ρομποτικών βραχιόνων προτιμώνται μέθοδοι που δίνουν λύσεις κλειστού τύπου διότι είναι ταχύτερες και πλήρεις σε σχέση με τις αντίστοιχες που δίνουν αριθμητικές λύσεις. Γενικά, οι μέθοδοι που δίνουν λύσεις κλειστού τύπου χωρίζονται σε αλγεβρικές και γεωμετρικές.

Ο τρισδιάστατος χώρος κίνησης ενός στερεού σώματος είναι ένας χώρος 6 βαθμών ελευθερίας οι οποίοι απαιτούνται για την περιγραφή της θέσης και του προσανατολισμού των αντικειμένων. Ένας βραχίονας $n < 6$ βαθμών ελευθερίας δεν μπορεί γενικά να τοποθετήσει το άκρο του σε οποιοσδήποτε θέσεις και προσανατολισμού στο χώρο, αλλά κινείται σε ένα n -βαθμού υποχώρο. Τα μήκη των συνδέσμων και τα όρια των αρθρώσεων περιορίζουν ακόμη περισσότερο τον υποχώρο αυτόν και έτσι ορίζουν τον εφικτό χώρο εργασίας του βραχίονα. Για να υπάρχει λοιπόν λύση στο πρόβλημα της αντίστροφης κινηματικής ανάλυσης πρέπει η επιθυμητή θέση και προσανατολισμός του άκρου του βραχίονα να βρίσκεται στον παραπάνω χώρο.

Σε περίπτωση που προκύπτουν πολλαπλές λύσεις τίθενται κριτήρια με βάση τα οποία επιλέγεται μια από αυτές. Ένα σύνηθες κριτήριο είναι η επιλογή της πλησιέστερης λύσης

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

σε σχέση με την αρχική θέση του βραχίονα. Η παρουσία εμποδίων στο χώρο εργασίας του βραχίονα μπορεί να επιβάλλει την επιλογή συγκεκριμένης λύσης. Γενικά ο αριθμός των λύσεων του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος εξαρτάται από τον αριθμό των αρθρώσεων και είναι επίσης συνάρτηση των παραμέτρων των συνδέσμων και του επιτρεπόμενου πεδίου κίνησης των αρθρώσεων.

Αντίστροφη κινηματική ανάλυση για το ρομποτικό δάκτυλο με αλγεβρική μέθοδο

Έστω ότι η επιθυμητή θέση και ο προσανατολισμός του άκρου του ρομποτικού δακτύλου εκφράζεται με τον πίνακα του ομογενή μετασχηματισμού g_d .

$$g_d = \begin{bmatrix} c_{\varphi_d} & -s_{\varphi_d} & 0 & x_d \\ s_{\varphi_d} & c_{\varphi_d} & 0 & y_d \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Από τη μελέτη του ευθέως κινηματικού προβλήματος προκύπτει ο πίνακας του ομογενή μετασχηματισμού g_{03} τον οποίο εξισώνουμε τον g_d .

$$g_{03} = g_{01} g_{02} g_{03} \begin{bmatrix} c_{123} & -s_{123} & 0 & l_1 c_1 + l_2 c_{12} \\ s_{123} & c_{123} & 0 & l_1 s_1 + l_2 s_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{\varphi_d} & -s_{\varphi_d} & 0 & x_d \\ s_{\varphi_d} & c_{\varphi_d} & 0 & y_d \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Η εξίσωση των αντίστοιχων στοιχείων των πινάκων στην παραπάνω σχέση ισοδυναμεί με τρεις μη γραμμικές εξισώσεις που πρέπει να λυθούν για τους αγνώστους q_1 , q_2 , q_3 :

$$\varphi_d = q_1 + q_2 + q_3 \quad (\text{από } c_{\varphi_d} = c_{123}, s_{\varphi_d} = s_{123})$$

$$x_d = l_1 c_1 + l_2 c_{12}$$

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. **Σφάλμα!** Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

$$y_d = l_1 s_1 + l_2 s_{12}$$

Αν τετραγωνίσουμε τις δύο τελευταίες εξισώσεις και τις προσθέσουμε, έχουμε $x_d^2 + y_d^2 = l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 c_2$, οπότε λύνοντας για c_2 προκύπτει:

$$c_2 = \frac{x_d^2 + y_d^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2}$$

Για να υπάρχει λύση το δεξί μέλος της εξίσωσης αυτής πρέπει να έχει μια τιμή μεταξύ του -1 και του 1. Αν αυτό δεν ισχύει τότε ο στόχος μας δεν μπορεί να επιτευχθεί. Για τη λύση της εξίσωσης επιλέγεται η συνάρτηση της αντίστροφης εφαπτομένης με δύο ορίσματα, δηλαδή η $Atan2(y,x) = \arctan(y/x)$. Η συνάρτηση αυτή επιστρέφει τη γωνία στο σωστό τεταρτημόριο λαμβάνοντας υπόψη το πρόσημο και των δύο ορισμάτων. Συγκεκριμένα:

$$q = Atan2(y, x) = \begin{cases} 0 \leq q \leq 90, & \text{για } +x + y \\ 90 \leq q \leq 180, & \text{για } -x + y \\ -180 \leq q \leq -90, & \text{για } -x - y \\ -90 \leq q \leq 0, & \text{για } +x - y \end{cases}$$

Μπορούμε να γράψουμε $s_2 = \pm\sqrt{1 - c_2^2}$ και τελικά να υπολογίσουμε τη γωνία q_2 από τη

$$q_2 = Atan2(s_2, c_2)$$

Το διπλό πρόσημο για τη λύση του s_2 αντιστοιχεί στην πολλαπλή λύση με τον αγκώνα του βραχίονα πάνω ή κάτω.

Για τον υπολογισμό της q_1 απομονώνουμε το ημίτονο και συνημίτονο της q_1 ξαναγράφοντας τα x_d, y_d ως εξής:

$$x_d = k_1 c_1 - k_2 s_1, y_d = k_1 s_1 + k_2 c_1 \text{ όπου } k_1 = l_1 + l_2 c_2 \text{ και } k_2 = l_2 s_2.$$

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

Ορίζουμε τις σταθερές $r = \sqrt{k_1^2 + k_2^2}$ και $\gamma = \text{Atan2}(k_2, k_1)$, οπότε $k_1 = r c_\gamma$ και $k_2 = r s_\gamma$ και μετά τις αντικαταστάσεις οι εξισώσεις γράφονται στη μορφή:

$$\frac{x_d}{r} = c_\gamma c_1 - s_\gamma s_1 = \cos(\gamma + q_1)$$

$$\frac{y_d}{r} = c_\gamma s_1 - s_\gamma c_1 = \sin(\gamma + q_1)$$

Οπότε

$$\gamma + q_1 = \text{Atan2}\left(\frac{x_d}{r}, \frac{y_d}{r}\right) = \text{Atan2}(y_d, x_d)$$

άρα

$$q_1 = \text{Atan2}(y_d, x_d) - \text{Atan2}(k_2, k_1)$$

Παρατηρούμε ότι αν το $x_d = y_d = 0$ και $l_1 = l_2$ τότε η $\text{Atan2}(y_d, x_d)$ είναι αόριστη και επομένως η τιμή της q_1 μπορεί να είναι αυθαίρετη.

Τέλος από την κινηματική εξίσωση του προσανατολισμού μπορούμε να υπολογίσουμε τη q_3 :

$$q_3 = q_1 + q_2 - \varphi_d$$

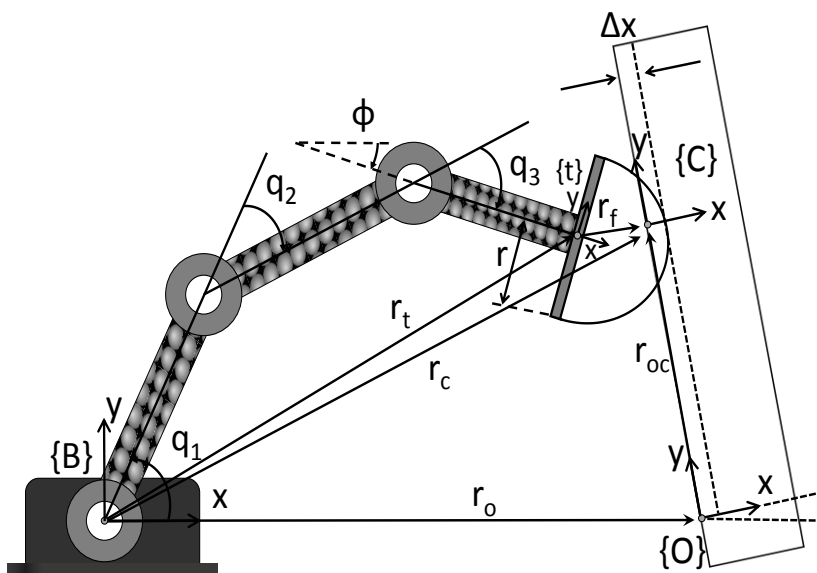
2.1.3 Κινηματική ανάλυση ρομποτικού δακτύλου σε επαφή με επιφάνεια

Ας θεωρήσουμε ένα ρομποτικό δάκτυλο τριών βαθμών ελευθερίας που κινείται στο επίπεδο x - y . Στο άκρο του τελευταίου συνδέσμου βρίσκεται σταθερά τοποθετημένο παραμορφώσιμο υλικό ημισφαιρικής γεωμετρίας και ακτίνας r (ακροδάκτυλο). Το δάκτυλο βρίσκεται σε επαφή με μια άκαμπτη επιφάνεια. Ο άξονας x θεωρείται ότι βρίσκεται κάθετα στην επιφάνεια ενώ ο άξονας y έχει διεύθυνση εφαπτομένη με αυτή. Ας

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

ονομάσουμε $\{B\}$, $\{O\}$ τα αδρανειακά πλαίσια συντεταγμένων που επισυνάπτονται στις βάσεις του δακτύλου και της επιφάνειας αντίστοιχα (εικόνα 2.4).

Το πλαίσιο συντεταγμένων της επιφάνειας περιγράφεται από το διάνυσμα θέσης $r_o \in \mathbb{R}^2$ ως προς το πλαίσιο συντεταγμένων της βάσης του δακτύλου και από τον πίνακα στροφής $R_o = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} := R_{(\theta)}$ όπου θ η γωνία της επιφάνειας ως προς τον άξονα x . Το πλαίσιο συντεταγμένων στο άκρο του δακτύλου (άκρο του τελευταίου συνδέσμου) $\{t\}$ περιγράφεται από το διάνυσμα θέσης $r_t \in \mathbb{R}^2$ και τον πίνακα στροφής $R_t = R_{(\varphi)}$ όπου $\varphi = \sum_{i=1}^3 q_i$ είναι ο προσανατολισμός του άκρου και q_i οι γωνίες των αρθρώσεων. Επιπλέον αν θεωρήσουμε το πλαίσιο συντεταγμένων $\{c\}$ τοποθετημένο στο σημείο επαφής $c = [x_c \ y_c]$ του ακροδακτύλου με την επιφάνεια, αυτό περιγράφεται από το διάνυσμα θέσης $r_c \in \mathbb{R}^2$ και τον πίνακα στροφής $R_c = R_{(\theta)}$. Επίσης $n_x = R_{(\theta)}[1 \ 0]^T$ είναι το μοναδιαίο διάνυσμα σε διεύθυνση κάθετη προς την επιφάνεια το οποίο είναι σταθερό και ανεξάρτητο από το σημείο επαφής r_c και $n_y = R_{(\theta)}[0 \ 1]^T$ προσδιορίζει το μοναδιαίο διάνυσμα κατά την εφαπτομενική διεύθυνση. Αν θεωρήσουμε $r_{oc}, r_f \in \mathbb{R}^2$ τα διανύσματα θέσης του σημείου c από τη βάση της επιφάνειας και του άκρου του ακροδακτύλου αντίστοιχα, παρατηρείται ότι $r_{oc} = n_y y_c$ και $r_f = n_x(r - \Delta x)$, όπου y_c είναι η τεταγμένη του σημείου επαφής c ως προς το πλαίσιο συντεταγμένων της επιφάνειας και Δx η παραμόρφωση του υλικού του ακροδακτύλου. Όλα τα διανύσματα εκφράζονται σε σχέση με το αδρανειακό πλαίσιο συντεταγμένων $\{B\}$.



Εικόνα 2.4: Κινηματική ανάλυση ρομποτικού δακτύλου σε επαφή με επιφάνεια

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

Με βάση τη γεωμετρία του ρομποτικού δακτύλου που είναι σε επαφή με την επιφάνεια συνεπάγεται η παρακάτω σχέση:

$$r_o + r_{oc} = r_c = r_t + r_f \quad (2.12)$$

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω σχέση μπορεί εύκολα να προσδιοριστούν τα $\Delta\chi$ και y_c ως συναρτήσεις των παραμέτρων της επιφάνειας και του άκρου του δακτύλου

$$\Delta\chi = r + n_x^T(r_t - r_o) \quad (2.13)$$

$$y_c = n_y^T(r_t - r_o) \quad (2.14)$$

Γίνεται αντιληπτό ότι, αν γνωρίζουμε τη θέση και τον προσανατολισμό της επιφάνειας και το κινηματικό μοντέλο του δακτύλου, μπορούν να υπολογιστούν τα παραπάνω μεγέθη μετρώντας τις γωνίες των αρθρώσεων.

Θεωρούμε $p = [r_t^T \ \varphi]^T \in \mathbb{R}^3$ το γενικευμένο διάνυσμα θέσης του άκρου και $q \in \mathbb{R}^3$ το διάνυσμα των γωνιών των αρθρώσεων. Οι ταχύτητα του άκρου \dot{p} και οι τις ταχύτητες των αρθρώσεων \dot{q} συνδέονται με την Ιακωβιανή του δακτύλου $J = \begin{bmatrix} J_u \\ J_\omega \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ μέσω της σχέσης :

$$\dot{p} = J\dot{q} \quad (2.15)$$

Σε μια κίνηση κύλισης, όταν το ακροδάκτυλο είναι κατασκευασμένο από μαλακό παραμορφώσιμο υλικό ημισφαιρικής γεωμετρίας, το σημείο επαφής στο δάκτυλο κινείται κατά μήκος της περιφέρειας ενός κύκλου μεταβλητής ακτίνας $r - \Delta\chi$ και μπορεί να υπολογιστεί από το ολοκλήρωμα $-\int_0^t (r - \Delta\chi)\dot{\varphi} d\tau$. Η παράγωγος του εκφράζει την ταχύτητα κύλισης $u_r = -(r - \Delta\chi)\dot{\varphi}$. Αν την αφαιρέσουμε από την ταχύτητα του σημείου

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. **Σφάλμα!** Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

επαφής \dot{y}_c στην επιφάνεια βρίσκουμε την ταχύτητα ολίσθησης που είναι συνάρτηση της κατάστασης του συστήματος:

$$u_s = \dot{y}_c + (r - \Delta\chi)\dot{\phi} \quad (2.16)$$

Αν η κίνηση είναι καθαρή κύλιση, $u_s = 0$ (δηλαδή $\dot{y}_c = u_r$) η παραπάνω εξίσωση μπορεί να πάρει την ακόλουθη μορφή:

$$A^T \dot{q} = 0, \quad \text{όπου } A = J^T \begin{bmatrix} n_y \\ r - \Delta\chi \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{3 \times 1} \quad (2.17)$$

Σε αυτή την περίπτωση η εξίσωση (2.17) περιγράφει τον κινηματικό περιορισμό για καθαρή κίνηση κύλισης. Σε κάθε άλλη περίπτωση $u_s \neq 0$ και το ακροδάκτυλο ολισθαίνει.

2.2 Δυναμική ανάλυση

Η δυναμική ανάλυση ενός ρομποτικού βραχίονα αφορά την ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου του βραχίονα, δηλαδή των εξισώσεων που περιγράφουν την κίνηση του συστήματος και οι οποίες σχετίζουν τις δυνάμεις ή τις ροπές στις αρθρώσεις με τις θέσεις, τις ταχύτητες και τις επιταχύνσεις. Οι δυναμικές εξισώσεις της κίνησης χρησιμοποιούνται για να υπολογιστούν: α) οι δυνάμεις/ροπές των αρθρώσεων που απαιτούνται ώστε να ακολουθηθεί μια δεδομένη τροχιά κίνησης του βραχίονα (θέση, ταχύτητα, επιτάχυνση), υπολογισμός που έχει άμεση σχέση με τον έλεγχο και τη δυναμική αντιστάθμιση του βραχίονα, β) η τροχιά κίνησης (θέση, ταχύτητα, επιτάχυνση) που προκαλείται από δεδομένο σύνολο δυνάμεων/ροπών που επιδρούν στις αρθρώσεις του βραχίονα, υπολογισμός που σχετίζεται με την προσομοίωση της κίνησης του βραχίονα.

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

2.2.1 Δυναμική ανάλυση ρομποτικού δακτύλου

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Lagrange το δυναμικό μοντέλο του ρομποτικού δακτύλου περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$M(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q})\dot{q} = \tau \quad (2.18)$$

όπου $H(q, \dot{q})\dot{q} = \frac{1}{2}\dot{M}(q) + S(q, \dot{q}) + B$.

Το $\tau \in \mathbb{R}^3$ υποδηλώνει το διάνυσμα των ροπών στις αρθρώσεις, $M(q) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ είναι ο πίνακας αδράνειας του δακτύλου, συμμετρικός και θετικά ορισμένος, $S(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ είναι ένας αντισυμμετρικός πίνακας ενώ ο πίνακας B αντιπροσωπεύει τους συντελεστές απόσβεσης στις αρθρώσεις. Ο πίνακας $\frac{1}{2}\dot{M}(q) + S(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ αποτελείται από στοιχεία που αντιστοιχούν στις δυνάμεις Coriolis, και τις κεντρομόλες δυνάμεις.

Στα συμμορφωτά μοντέλα θεωρείται ότι η κίνηση του δακτύλου περιγράφεται από τις μεταβλητές των αρθρώσεων (θέση, ταχύτητα) αλλά και από μικρές κινήσεις που οφείλονται στις παραμορφώσεις στο σημείο επαφής. Όσο αφορά τις κάθετες δυνάμεις επαφής αυτές εξαρτώνται από τις κάθετες παραμορφώσεις που με τη σειρά τους σχετίζονται με τις κάθετες μετατοπίσεις. Με βάση τα παραπάνω το υλικό του ακροδακτύλου λειτουργεί ως μη γραμμικό ελατήριο στο οποίο η κάθετη δύναμη επαφής με την επιφάνεια είναι συνάρτηση της μέγιστης παραμόρφωσης, δηλαδή είναι της μορφής $f_x(\Delta\chi)$.

Οι εφαπτομενικές δυνάμεις επαφής μπορούν να μοντελοποιηθούν χρησιμοποιώντας τους πολλαπλασιαστές Lagrange που προκύπτουν από τους κινηματικούς περιορισμούς που έχουν τεθεί, δηλαδή την κύλιση του ακροδακτύλου. Έτσι προκύπτει το δυναμικό μοντέλο του ρομποτικού δακτύλου που κινείται σε επίπεδη επιφάνεια θεωρώντας ότι εκτελεί κίνηση κύλισης (κινηματικός περιορισμός) που περιγράφεται από το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων:

$$M(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q})\dot{q} + J^T \begin{bmatrix} n_x \\ 0 \end{bmatrix} f_x(\Delta\chi) = \tau + A\lambda \quad (2.19)$$

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

$$A^T \dot{q} = 0$$

όπου η κάθετη στην επιφάνεια δύναμη $f_x(\Delta\chi)$ είναι μια άγνωστη αλλά μονότονα αύξουσα συνάρτηση της μέγιστης παραμόρφωσης του ακροδακτύλου για $\Delta\chi > 0$ και $f_x(\Delta\chi)=0$ αν $\Delta\chi \leq 0$ και λ ο πολλαπλασιαστής Lagrange.

Η παραπάνω δυναμικές εξισώσεις που περιγράφουν το μοντέλο με τους περιορισμούς βασίζεται στην υπόθεση ότι στην πράξη η κάθετη δύναμη συνάφειας είναι αρκετά μεγάλη για να διατηρήσει τις επαπτομενικές δυνάμεις που παράγονται από την εισαγωγή των περιορισμών στο μοντέλο. Η υπόθεση όμως αυτή εξαρτάται από τις συνθήκες επαφής ανάμεσα στο ακροδάκτυλο και την επιφάνεια οι οποίες είναι αβέβαιες ή και τελείως άγνωστες. Οποιαδήποτε συστήματα ελέγχου που βασίζονται σε μοντέλα που ενσωματώνουν κινηματικούς περιορισμούς σχετικά με την κύλιση ενδέχεται να οδηγήσουν σε ολίσθηση του ακροδακτύλου, εφόσον οι συνθήκες στην επιφάνεια δεν επιτρέπουν τη διατήρηση των απαραίτητων για την κύλιση επαπτομενικών δυνάμεων.

Στην περίπτωση που το δάκτυλο παράλληλα με την κίνηση κύλισης ολισθαίνει στην επιφάνεια ο περιορισμός κύλισης παύει να ισχύει, δηλαδή $A^T \dot{q} \neq 0$ και η ταχύτητα ολίσθησης $u_s \equiv A^T \dot{q}$ δημιουργεί δυνάμεις τριβής ολίσθησης. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να αγνοηθεί ο όρος του περιορισμού κύλισης και ο πολλαπλασιαστής Langrange αντικαθίσταται από μια επαπτομενική δύναμη $-f_y$ η οποία περιγράφει την αντίδραση του ρομποτικού δακτύλου με την επιφάνεια καθώς αυτό κυλίεται η ολισθαίνει σε αυτή οπότε το δυναμικό μοντέλο του ρομποτικού δακτύλου χωρίς την θεώρηση των κινηματικών περιορισμών κύλισης περιγράφεται από την εξίσωση:

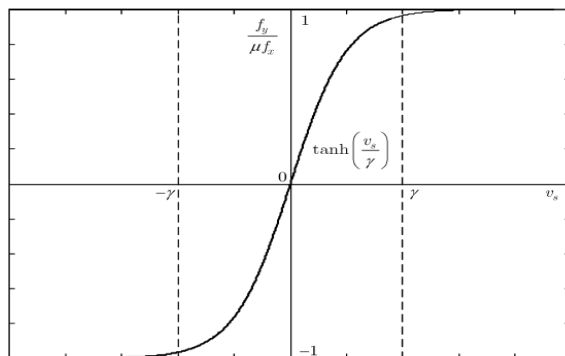
$$M(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q})\dot{q} + J^T \begin{bmatrix} n_x \\ 0 \end{bmatrix} f_x(\Delta\chi) = \tau - Af_y \quad (2.20)$$

Η f_y αποτελεί τη δύναμη επιβολής του άκρου στην επιφάνεια επαφής κατά την επαπτομενική κατεύθυνση της κίνησης του δακτύλου . Για τις ανάγκες των προσομοιώσεων θα πρέπει να ενσωματωθούν στις δυναμικές εξισώσεις κατάλληλα μοντέλα τριβής συσχετίζοντας τα παράλληλα με την εμφάνιση των επαπτομενικών δυνάμεων . Το μοντέλο τριβής που υιοθετείται στην παρούσα εργασία είναι το ακόλουθο:

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

$$f_y = \mu \tanh\left(\frac{u_s}{\gamma}\right) f_x \quad (2.21)$$

Πρόκειται για μια συνεχή και παραγωγίσιμη συνάρτηση ως προς την ταχύτητα κύλισης και την κάθετη δύναμη εφαρμογής και ως εκ τούτου συνάρτηση των καταστάσεων του συστήματος (εικόνα 2.5).



Εικόνα 2.5: Μοντέλο εφαπτομενικής δύναμης

Εξαρτάται από δύο σταθερές παραμέτρους, το συντελεστή τριβής μ και την παράμετρο γ που χαρακτηρίζει τη σχέση της εφαπτομενικής δύναμης με την ταχύτητα ολίσθησης και συγκεκριμένα προσδιορίζει το όριο πέρα από το οποίο η δύναμη τριβής είναι ανεξάρτητη από την ταχύτητα ολίσθησης. Όταν ξεπεραστεί αυτό το όριο τότε το ακροδάκτυλο ολισθαίνει.

Κεφάλαιο 3

3 Έλεγχος & προσομοίωση ρομποτικού δακτύλου

Το πρόβλημα του ελέγχου ενός ρομποτικού βραχίονα αναφέρεται στον καθορισμό των δυνάμεων και των ροπών που πρέπει να αναπτυχθούν από τους ενεργοποιητές των αρθρώσεων έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η εκτέλεση των εντολών εργασίας του βραχίονα με ταυτόχρονη ικανοποίηση των προδιαγραφών λειτουργίας. Η εργασία του βραχίονα αφορά την εκτέλεση προκαθορισμένων κινήσεων και την εφαρμογή προκαθορισμένων δυνάμεων επαφής όταν ο βραχίονας αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του.

Οι νόμοι ελέγχου που σχεδιάζονται, προτού εφαρμοστούν σε πραγματικά συστήματα, δοκιμάζονται σε περιβάλλον προσομοίωσης. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο του βραχίονα που προκύπτει από τη δυναμική ανάλυση προσδιορίζεται η επίδραση του ελεγκτή στη λειτουργία του βραχίονα και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα επιθυμητά.

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση **τριών νόμων ελέγχου**, όπως αυτοί προτείνονται στο [1] για τον έλεγχο της δύναμης και της θέσης ενός ρομποτικού δακτύλου σε επαφή με άκαμπτη επιφάνεια. Οι ελεγκτές εφαρμόζονται στο δυναμικό μοντέλο του ρομποτικού δακτύλου και εξετάζεται κατά πόσο τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ανταποκρίνονται στην επιθυμητή λειτουργία του δακτύλου η οποία είναι η άσκηση κάθετης δύναμης συγκεκριμένης τιμής στην επιφάνεια καθώς αυτό κινείται προς επιθυμητή θέση εκτελώντας κίνηση κύλισης.

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

3.1 Περιγραφή ελεγκτών

3.1.1 Έλεγχος δύναμης και θέσης

Ο πρώτος ελεγκτής έχει την παρακάτω μορφή:

$$\tau = J^T \text{Rot}(\bar{z}, \theta) F - K_u \dot{q}$$

(Σφάλμα!
Χρησιμοποιήστε
την καρτέλα
"Κεντρική
σελίδα", για να
εφαρμόσετε το
Heading 1 στο
κείμενο που
θέλετε να
εμφανίζεται
εδώ..1)

$$F(f_d, e, k_y) = [f_d \quad -k_y e \quad 0]^T$$

(Σφάλμα!
Χρησιμοποιήστε
την καρτέλα
"Κεντρική
σελίδα", για να
εφαρμόσετε το
Heading 1 στο
κείμενο που
θέλετε να
εμφανίζεται
εδώ..2)

όπου $K_u = \text{diag}(k_{u1}, k_{u2}, k_{u3}) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, $k_{ui} ([Nm][rad/sec]^{-1}) \in \mathbb{R}^+$ είναι κέρδη τα οποία σχετίζονται με την ιξώδη τριβή που εμφανίζεται στις αρθρώσεις, $\text{Rot}(\bar{z}, \theta) := \begin{bmatrix} R(\theta) & 0_{2 \times 1} \\ 0_{1 \times 2} & 1 \end{bmatrix}$ αποτελεί τον πίνακα στροφής που περιγράφει τον προσανατολισμό του

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

πλαisiou{B} της επιφάνειας σε σχέση με το αδρανειακό πλαίσιο {O} και F είναι το διάνυσμα μιας γενικευμένης δύναμης διόρθωσης που σχετίζεται με τον επιθυμητή λειτουργία του δακτύλου και περιλαμβάνει έναν όρο προσωτροφοδότησης της επιθυμητής δύναμης και έναν όρο ανατροφοδότησης του σφάλματος θέσης $e = y_c - y_d$ κατά την εφαπτομενική διεύθυνση της επιφάνειας πολλαπλασιασμένο με το αντίστοιχο κέρδος $k_y [N/m] \in \mathbb{R}^+$. Το μέγεθος τ αντιστοιχεί στην υπολογιζόμενη απαιτούμενη ροπή που πρέπει να δίνουν οι κινητήρες των τριών αρθρώσεων προκειμένου το ρομποτικό δάκτυλο να επιτύχει την επιθυμητή κάθετη δύναμη και παράλληλα να εξαλειφθεί το σφάλμα θέσης.

Ο όρος f_d δημιουργεί μια κάθετη προς την επιφάνεια δύναμη που ασκείται από το δάκτυλο, ενώ ο όρος $-k_y e$ παράγει μια εφαπτομενική δύναμη κατά τη διεύθυνση της κίνησης που έχει ως αποτέλεσμα να ωθεί τον τελευταίο σύνδεσμο του δακτύλου προς την επιθυμητή θέση. Η κίνηση κύλισης εξαρτάται από τις συνθήκες επαφής που επικρατούν ανάμεσα στο δάκτυλο, την επιφάνεια και την ταχύτητα που θα κινηθεί προς την τελική θέση. Συγκεκριμένα αν η επιφάνεια μπορεί να διατηρήσει την εφαπτομενική δύναμη που δημιουργεί ο ελεγκτής το δάκτυλο θα κάνει κίνηση κύλισης, διαφορετικά θα ολισθαίνει ή θα κάνει συνδυασμένη κίνηση κύλισης και ολίσθησης. Συνθήκες κύλισης είναι δυνατόν να εμφανιστούν και στην περίπτωση κίνησης του δακτύλου με χαμηλή ταχύτητα.

Αξίζει να αναφερθεί ότι ο έλεγχος επιτυγχάνεται με τη γνώση μόνο των καταστάσεων του συστήματος (θέση και ταχύτητα των αρθρώσεων) και χωρίς τη χρήση αισθητήρων δύναμης. Το σήμα ελέγχου που προκύπτει από τη γενικευμένη δύναμη διόρθωσης F απεικονίζεται στο χώρο των αρθρώσεων ως σήμα ροπής με τη χρήσης της ανάστροφης Ιακωβιανής μέσω της σχέσης:

$$\tau = J^T F$$

**(Σφάλμα!
Χρησιμοποιήστε
την καρτέλα
"Κεντρική
σελίδα", για να
εφαρμόσετε το
Heading 1 στο**

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

κείμενο που
θέλετε να
εμφανίζεται
εδώ..3)

3.1.2 Έλεγχος δύναμης και θέσης με βελτιωμένες συνθήκες κίνησης

Η δομή του δεύτερου ελεγκτή έχει ως εξής:

$$\tau = J^T \text{Rot}(\bar{z}, \theta) F - K_u \dot{q}$$

(Σφάλμα!
Χρησιμοποιήστε
την καρτέλα
"Κεντρική
σελίδα", για να
εφαρμόσετε το
Heading 1 στο
κείμενο που
θέλετε να
εμφανίζεται
εδώ..4)

$$F(f_d, e, \Delta\chi, k_y, k_r) = [f_d \quad -k_y e \quad (r - \Delta\chi)k_r e]^T$$

(Σφάλμα!
Χρησιμοποιήστε
την καρτέλα
"Κεντρική
σελίδα", για να
εφαρμόσετε το
Heading 1 στο
κείμενο που
θέλετε να
εμφανίζεται
εδώ..5)

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

Στη γενικευμένη δύναμη διόρθωσης του πρώτου ελεγκτή έχει προστεθεί ένα όρος ροπής $(r - \Delta\chi)k_r e$, που είναι συνάρτηση του σφάλματος θέσης e του ακροδακτύλου, δηλαδή εξαρτάται κι αυτή από τις μεταβλητές των αρθρώσεων του βραχίονα και ρυθμίζεται από το κέρδος k_r . Η ροπή που αναπτύσσεται έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μιας εφαπτομενικής δύναμης στο σημείο επαφής του ακροδακτύλου με φορά αντίθετη της δύναμης που δημιουργεί ο όρος $-k_y e$. Η συνιστάμενη δύναμη κατά τη διεύθυνση της κίνησης μειώνεται ευνοώντας την εκτέλεση κίνησης κύλισης από το ακροδάκτυλο. Ωστόσο το είδος της κίνησης που θα πραγματοποιηθεί εξαρτάται και πάλι από το συντελεστή τριβής ανάμεσα στην επιφάνεια και το ακροδάκτυλο. Ουσιαστικά η προσθήκη του παραπάνω όρου γίνεται ώστε να περιοριστούν οι μεγάλες εφαπτομενικές δυνάμεις που αναπτύσσονται κυρίως κατά την εκκίνηση του ακροδακτύλου.

3.1.3 Έλεγχος δύναμης, θέσης και κίνησης κύλισης

Ο τρίτος νόμος ελέγχου περιγράφεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\tau = J^T \text{Rot}(\bar{z}, \theta)(F + F_{rol}) - K_u \dot{q}$$

$$F_{rol}(e_r) = [0 \quad -k_s e_r \quad -(r - \Delta\chi)(k_s + k_r)e_r]^T$$

(Σφάλμα!
Χρησιμοποιήστε
την καρτέλα
"Κεντρική
σελίδα", για να
εφαρμόσετε το
Heading 1 στο
κείμενο που
θέλετε να
εμφανίζεται
εδώ..6)

(Σφάλμα!

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

Χρησιμοποιήστε
την καρτέλα
"Κεντρική
σελίδα", για να
εφαρμόσετε το
Heading 1 στο
κείμενο που
θέλετε να
εμφανίζεται
εδώ..7)

Στη γενικευμένη δύναμη διόρθωσης F προστίθεται ένα σήμα ελέγχου F_{rol} που βασίζεται στο σφάλμα θέσης για κίνηση κύλισης (rolling position error) το οποίο προσδιορίζεται από την τρέχουσα κινηματική κατάσταση του δακτύλου και τις κινηματικές εξισώσεις που αντιστοιχούν σε κίνηση κύλισης. Το k_s αντιστοιχεί σε ένα θετικό κέρδος και το e_r υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$e_r = y_c - y_{rol}$$

(Σφάλμα!
Χρησιμοποιήστε
την καρτέλα
"Κεντρική
σελίδα", για να
εφαρμόσετε το
Heading 1 στο
κείμενο που
θέλετε να
εμφανίζεται
εδώ..8)

Το y_c υπολογίζεται από την κινηματική του δακτύλου (σχέση 2.14). Το y_{rol} είναι η απόσταση που θα κάλυπτε το ακροδάκτυλο αν εκτελούσε καθαρή κίνηση κύλισης, είναι

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

συνάρτηση της κατάστασης του συστήματος και μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$y_{rol} = y_c(0) - \int_0^t (r - \Delta\chi)\dot{\varphi}d\tau = y_c(0) + r\varphi(0) - r\varphi(t) + \int_0^t \Delta\chi\dot{\varphi}d\tau$$

**(Σφάλμα!
Χρησιμοποιήστε
την καρτέλα
"Κεντρική
σελίδα", για να
εφαρμόσετε το
Heading 1 στο
κείμενο που
θέλετε να
εμφανίζεται
εδώ..9)**

Από τις εξισώσεις (3.8) και (3.9) προκύπτει ο σχετικός προσανατολισμός μεταξύ αρχικής και τελικής τιμής της θέσης του ακροδακτύλου στην περίπτωση κίνησης κύλισης.

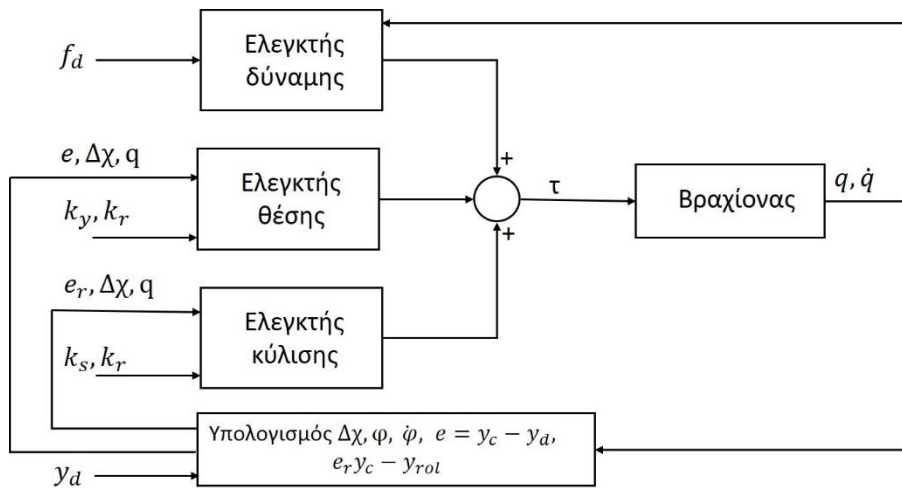
$$r(\varphi(t) - \varphi(0)) = y_c(0) - y_c + \int_0^t \Delta\chi\dot{\varphi}d\tau$$

**(Σφάλμα!
Χρησιμοποιήστε
την καρτέλα
"Κεντρική
σελίδα", για να
εφαρμόσετε το
Heading 1 στο
κείμενο που
θέλετε να
εμφανίζεται**

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

εδώ..10)

Ένα εποπτικό διάγραμμα του ελεγκτή παρουσιάζεται στην εικόνα 3.1. Θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι αποτελείται από τρία ανεξάρτητα μεταξύ τους στοιχεία, το τμήμα που ελέγχει τη δύναμη, το τμήμα του ελέγχου θέσης και εκείνο για τον έλεγχο της κύλισης. Όσο αφορά τον έλεγχο δύναμης μπορεί να λεχθεί ότι ο ελεγκτής λειτουργεί ως ανοιχτού βρόχου δεδομένου ότι δεν υπάρχει σήμα ανάδρασης από κάποιο αισθητήριο δύναμης. Τα μόνα σήματα που χρησιμοποιούνται για ανατροφοδότηση είναι από τα ποτενσιόμετρα των κινητήρων για τον υπολογισμό των απαραίτητων παραμέτρων μέσω των κινηματικών εξισώσεων.



Εικόνα 3.1: Μπλοκ διάγραμμα της στρατηγικής ελέγχου του τρίτου ελεγκτή

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

3.2 Προσομοίωση ελεγκτών

Η προσομοίωση της λειτουργίας του ρομποτικού δακτύλου σε υπολογιστικό περιβάλλον έχει ως σκοπό τον έλεγχο της απόκρισης του συστήματος εφαρμόζοντας του προαναφερθέντες ελεγκτές. Έγιναν δοκιμές για να προσδιοριστεί ο τρόπος δράσης του κάθε ελεγκτή στην επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί για τη λειτουργία του συστήματος, δηλαδή την άσκηση συγκεκριμένης δύναμης από το δάκτυλο σε μια άκαμπτη επιφάνεια και την μετακίνηση του άκρου του σε επιθυμητή θέση εκτελώντας κίνηση κύλισης πάνω στην επιφάνεια. Επίσης έγιναν προσομοιώσεις για τον τρόπο επίδρασης των κερδών στην απόδοση των ελεγκτών και ο προσδιορισμός των ορίων πέρα από τα οποία το σύστημα περνάει σε αστάθεια. Τέλος μέσω προσομοιώσεων προσδιορίστηκε και η βέλτιστη απόσταση της επιφάνειας από τη βάση του βραχίονα.

Η προσομοίωση των νόμων ελέγχου πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια κατάλληλου προγράμματος στο Matlab. Το δυναμικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τον βραχίονα περιγράφεται από τις εξισώσεις (2.20) και (2.21). Η κάθετη δύναμη που ασκεί το δάκτυλο στην επιφάνεια προσομοιώνεται από την σχέση:

$$f_x(\Delta\chi) = k\Delta\chi^2$$

**(Σφάλμα!
Χρησιμοποιήστε
την καρτέλα
"Κεντρική
σελίδα", για να
εφαρμόσετε το
Heading 1 στο
κείμενο που
θέλετε να
εμφανίζεται
εδώ..11)**

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

όπου $k = 533990 \text{ N/m}^2$ είναι ο συντελεστής παραμόρφωσης του υλικού του ακροδακτύλου που υπολογίστηκε κατόπιν κατάλληλου πειράματος. Οι αρχικές συνθήκες και οι επιθυμητές τιμές που τέθηκαν για την προσομοίωση είναι οι ακόλουθες:

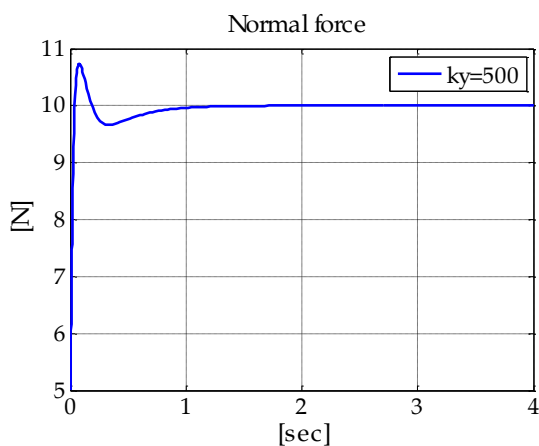
Πίνακας 3.1: Αρχικές και επιθυμητές τιμές

Αρχική δύναμη $f(0)$ [N]	5
Επιθυμητή δύναμη f_d [N]	10
Αρχική θέση του άκρου $y_c(0)$ [m]	-0.012
Επιθυμητή τελική θέση του άκρου y_d [m]	$y_c(0)-0.010$
Αρχικός προσανατολισμός άκρου [deg]	0

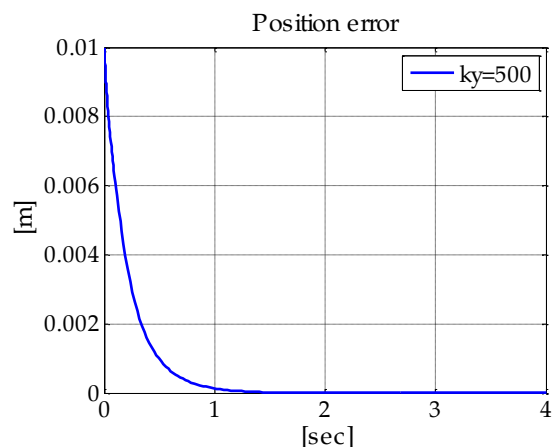
Η κλίση της επιφάνειας είναι 0° και τοποθετήθηκε σε απόσταση 0.166 m από τη βάση του βραχίονα. Ο συντελεστής τριβής μ ισούται με 0.5 ενώ η παράμετρος γ ορίζεται στα 0.01 m/sec. Τέλος οι παράμετροι k_{u1} k_{u2} k_{u3} έχουν τιμές 0.3, 0.1 και 0.005 αντίστοιχα.

3.2.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης ελεγκτή για τη δύναμη και τη θέση

Από τις εικόνες (3.2) και (3.3) που απεικονίζουν την κάθετη δύναμη που ασκεί το δάκτυλο στην επιφάνεια και το σφάλμα θέσης παρατηρείται ότι ο ελεγκτής ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις που είχαν τεθεί ως προς την επιθυμητή δύναμη και την τελική θέση του άκρου του βραχίονα. Από το διάγραμμα της δύναμης προκύπτει ότι το σύστημα επιτυγχάνει την δύναμη των 10 N σε χρόνο 1.5 sec που είναι ικανοποιητικός όπως επίσης το σφάλμα θέσης e μηδενίζεται πολύ γρήγορα (περίπου σε 1 sec).



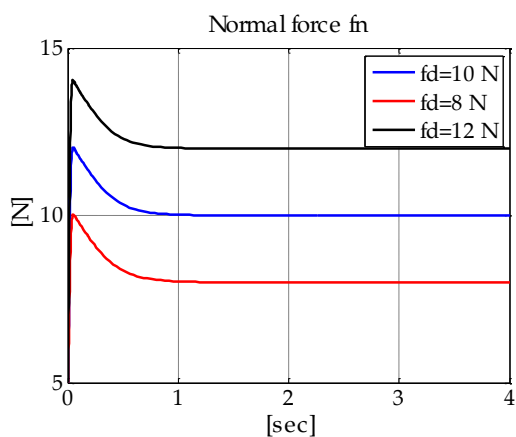
Εικόνα 3.3: Κάθετη δύναμη



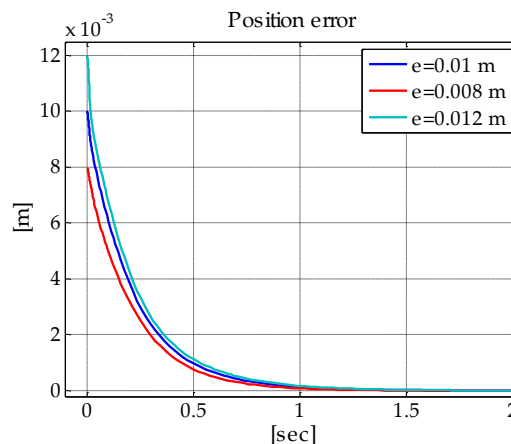
Εικόνα 3.3: Σφάλμα θέσης

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

Έγιναν προσομοιώσεις και για διαφορετικές τιμές όσο αφορά την επιθυμητή θέση και δύναμη με τα ίδια αποτέλεσμα, όπως φαίνεται στις εικόνες (3.4) και 3.5) οπότε μπορεί να θεωρηθεί ότι ο ελεγκτής αποδίδει εξίσου ικανοποιητικά για μια περιοχή επιθυμητών τιμών χωρίς την απαίτηση ρύθμισης της τιμής του κέρδους k_y ($k_y = 500$).

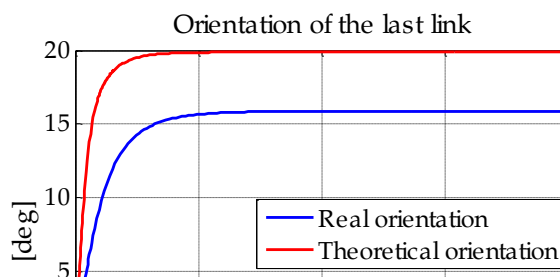
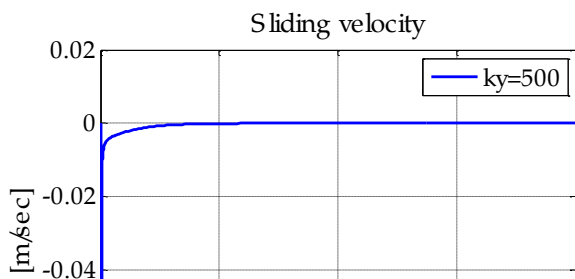


Εικόνα 3.4: Απόκριση του συστήματος για διάφορες δυνάμεις



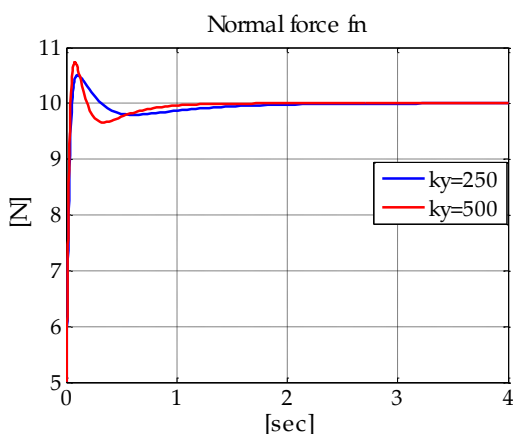
Εικόνα 3.5: Απόκριση του συστήματος για διάφορες θέσεις

Ωστόσο η κίνηση που εκτελεί το δάκτυλο είναι περισσότερο κίνησης ολίσθησης παρά κύλισης ειδικά κατά την εκκίνηση, όπως προκύπτει από τη σημαντική ταχύτητα ολίσθησης (εικόνα 3.6) που αναπτύσσεται στην αρχή της κίνησης. Η ολίσθηση διαρκεί περίπου 0.2 sec οπότε και η ταχύτητα ολίσθησης σχεδόν μηδενίζεται. Ένδειξη ότι το δάκτυλο ολισθαίνει είναι και ο προσανατολισμός του τελευταίου συνδέσμου του βραχίονα η γωνία του οποίου ($\Delta\phi = 15.88^\circ$) είναι μικρότερη από τη γωνία που θα είχε αν εκτελούσε καθαρή κίνηση κύλισης ($\Delta\phi = 19,88^\circ$) (εικόνα 3.7).

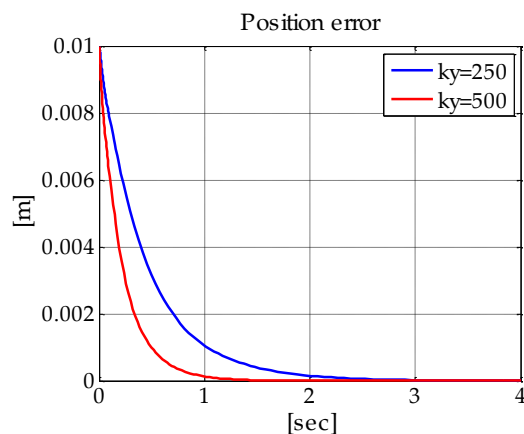


Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

Για μικρότερο κέρδος k_y το σύστημα γίνεται πιο αργό ως προς το χρόνο αποκατάστασης, ωστόσο η απόκριση του συστήματος στη μόνιμη κατάσταση για τη δύναμη και τη θέση είναι και πάλι η ίδια (εικόνες 3.8 και 3.9). Ταυτόχρονα μειώνεται αισθητά η ταχύτητα ολίσθησης, σχεδόν 10 φορές μικρότερη, δεδομένου ότι η επαπτομενική δύναμη που αναπτύσσεται στον τελευταίο σύνδεσμο του βραχίονα είναι μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη που εμφανίζεται στο γρήγορο σύστημα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ολίσθηση του δακτύλου να διαρκεί μικρότερο χρονικό διάστημα η μεταβολή του προσανατολισμού του άκρου να αυξηθεί και εν τέλει να βελτιωθούν οι συνθήκες κύλισης του συστήματος (εικόνες 3.10 και 3.11).

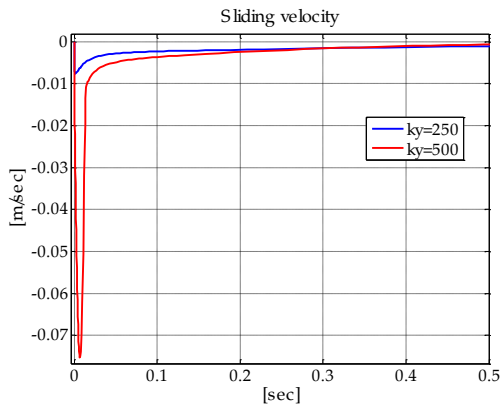


Εικόνα 3.8: Κάθετη δύναμη για διάφορες τιμές k_y

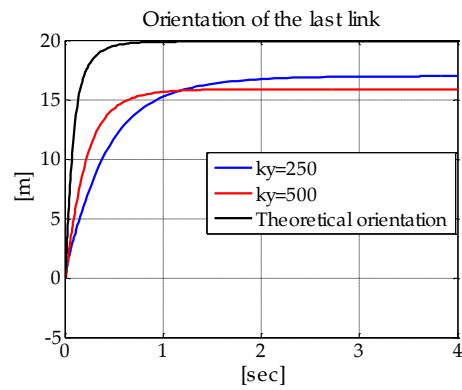


Εικόνα 3.9: Σφάλμα θέσης για διάφορες τιμές k_y

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

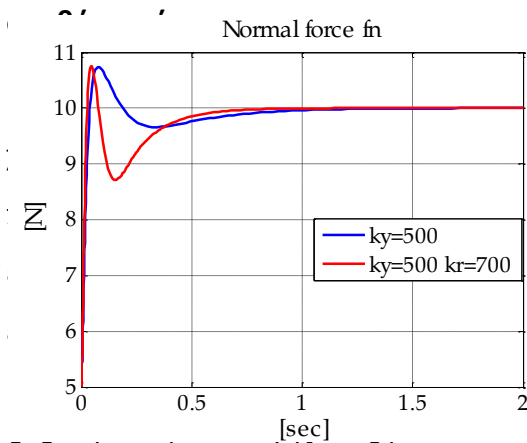


Εικόνα 3.10: Ταχύτητα ολίσθησης για διάφορες τιμές k_y

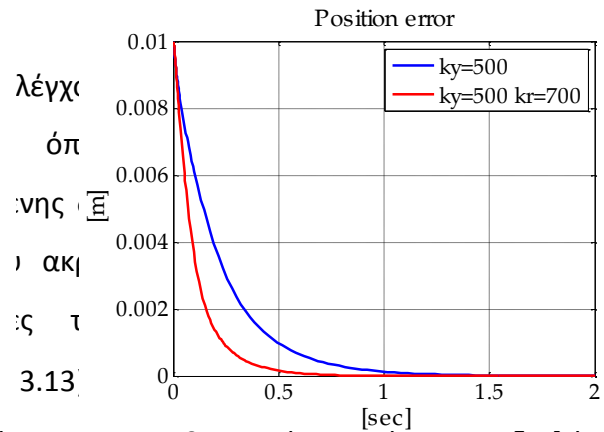


Εικόνα 3.11: Προσανατολισμός του άκρου για διάφορες

3.2.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης ελεγκτή για τη δύναμη και τη θέση με βελτιωμένες



Εικόνα 3.12: Κάθετη δύναμη

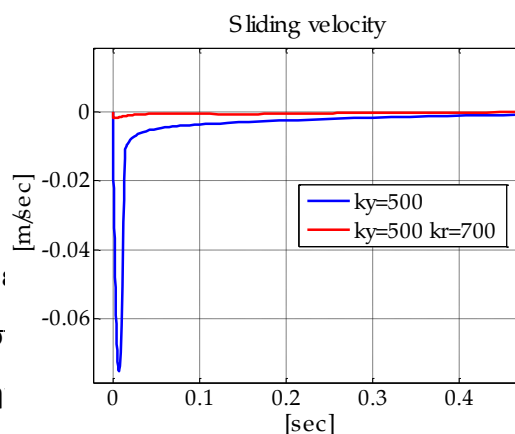
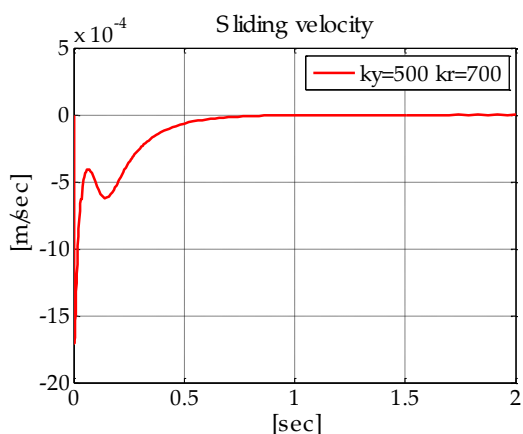


Εικόνα 3.13: Σφάλμα θέσης

δεδομένου ότι το σφάλμα θέσης e συνκλίνει προς στο 0 σε χρόνο περίπου υποδιπλάσιο

... μέρ...
 διαγραμμάτων των ταχυτήτων των αρθρώσεων του βραχίονα (εικόνα 3.14).

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

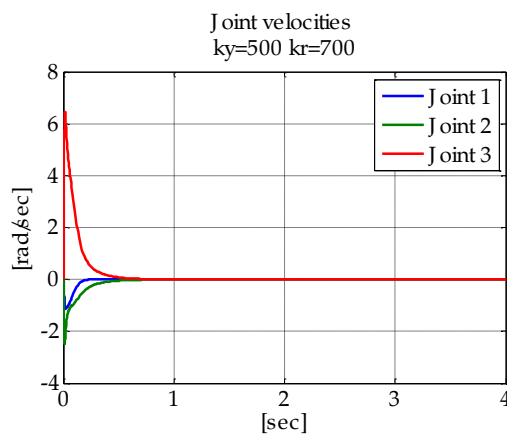
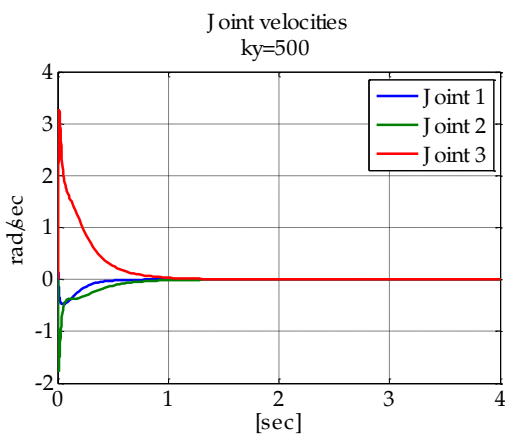


15) :
νω σ
ά τη

εμφανίζει την μέγιστη τιμή της και στη συνέχεια σχεδόν μηδενίζεται, όποτε το

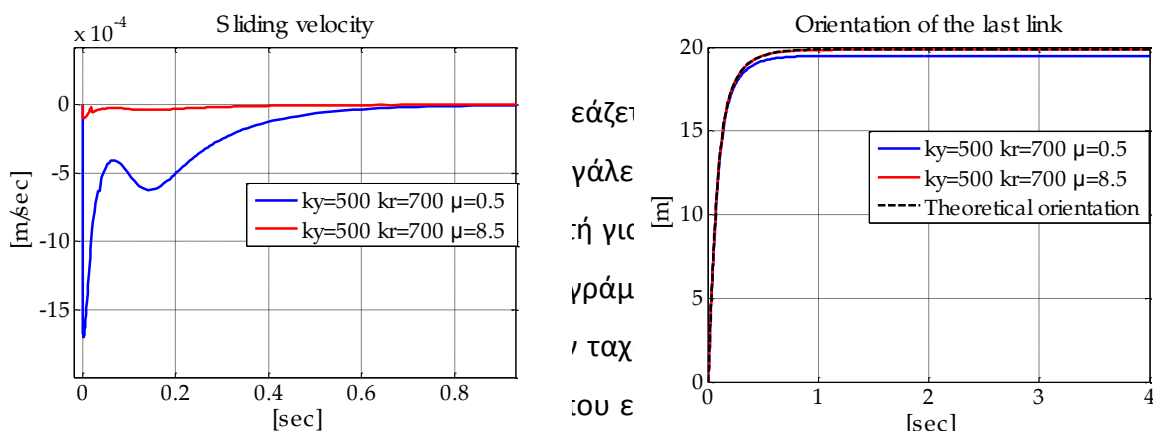
Εικόνα 3.15: Ταχύτητα ολίσθησης

βραχίονα πλησιάζει την θεωρητική τιμή που αντιστοιχεί σε καθαρή κίνηση κύλισης και η απόκλιση που εμφανίζεται οφείλεται στην αρχική ολίσθηση του δακτύλου (εικόνα 3.16).



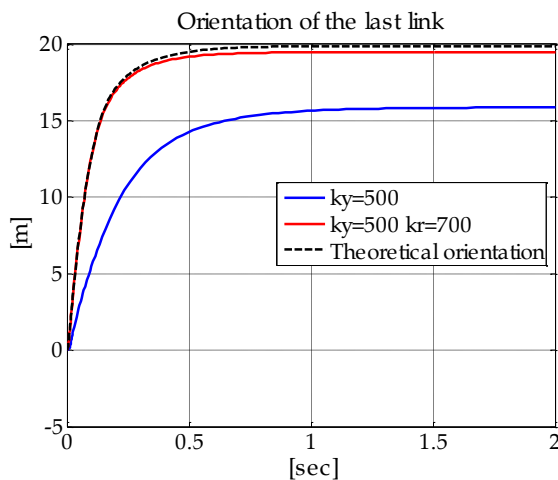
Εικόνα 3.14: Σύγκριση των ταχυτήτων των αρθρώσεων

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.



Εικόνα 3.17: Ταχύτητα ολίσθησης και προσανατολισμός του άκρου για διαφορετικούς συντελεστές τριβής

υποδηλώνει η θετική προσανατολισμός της καθαρής κίνηση κύλισης



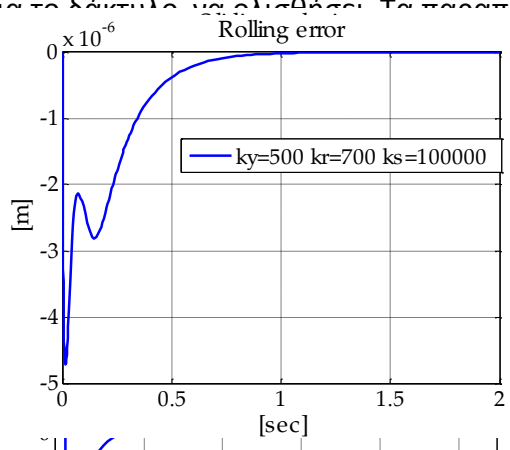
Εικόνα 3.16: Προσανατολισμός του άκρου

ανίζεται αλλά και ο μή που αντιστοιχεί σε

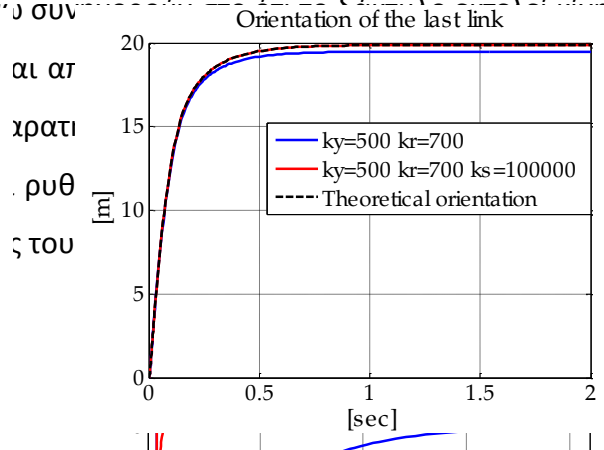
Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

3.2.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης ελεγκτή για τον δύναμη, τη θέση και τη κύλιση

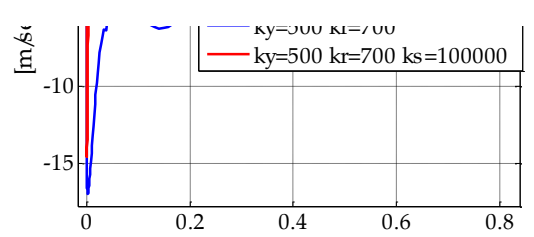
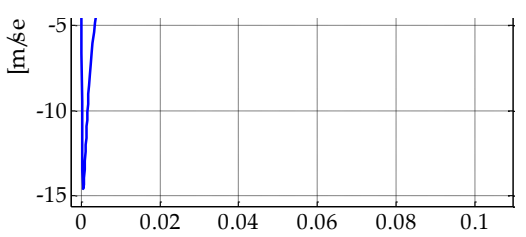
Στις εικόνες (3.19-3.22) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τον τρίτο νόμο ελέγχου ο οποίος περιλαμβάνει τον επιπλέον όρο F_{roll} που περιλαμβάνει το σφάλμα στην κίνηση κύλισης e_r . Η ταχύτητα ολίσθησης (εικόνα 3.19) που αναπτύσσεται κατά την εκκίνηση είναι πολύ μικρή και συγκλίνει στο μηδέν σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα (εντός 0.06 sec). Επίσης η απόκριση του σφάλματος e_r (εικόνα 3.20) είναι της τάξης του 10^{-6} από την αρχή της κίνησης, όπου υπάρχουν οι μεγαλύτερες πιθανότητες



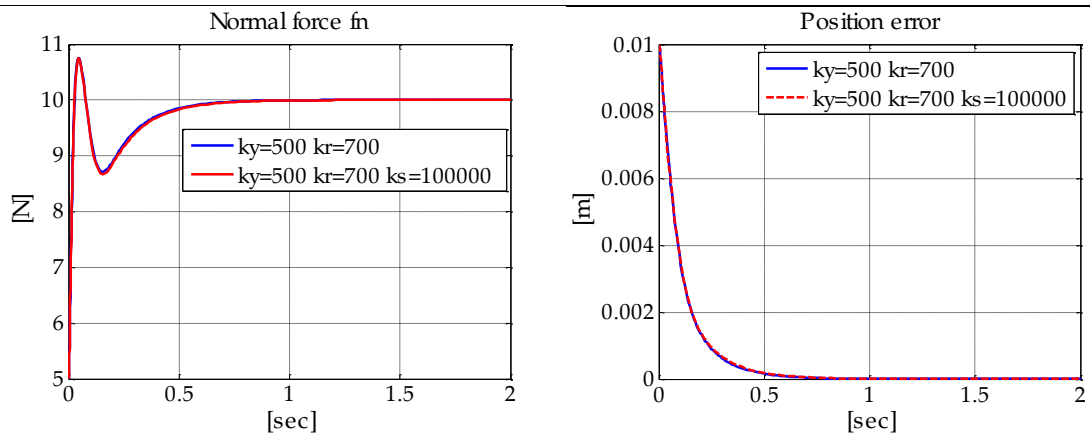
Εικόνα 3.20: Σφάλμα κύλισης



Εικόνα 3.21: Προσανατολισμός του άκρου



Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.



Εικόνα 3.22: Κάθετη δύναμη και σφάλμα θέσης

Κεφάλαιο 4

4 Ανάπτυξη πειραματικής διάταξης και υλοποίησης των ελεγκτών

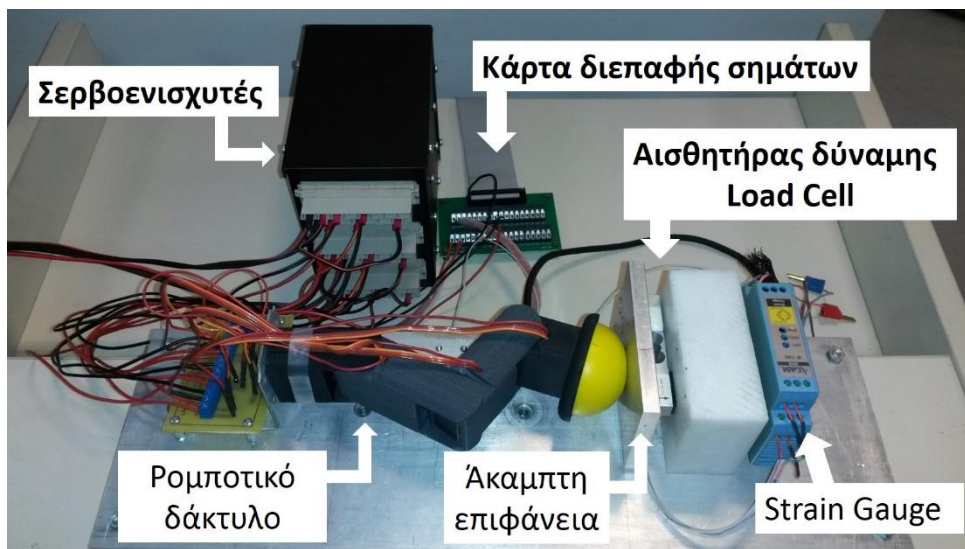
Τα βασικά μέρη της πειραματικής διάταξης είναι τα ακόλουθα (εικόνα 4.1):

- Το ρομποτικό δάκτυλο που περιλαμβάνει τους τρεις κινητήρες
- Τρεις σερβοενισχυτές
- Μια κάρτα Data Acquisition and Control (DAQ&C) που βρίσκεται εγκατεστημένη σε ηλεκτρονικό υπολογιστή
- Την άκαμπτη επιφάνεια στην οποία έχει ενσωματωθεί ο αισθητήρας δύναμης (load cell).

Η γενική λειτουργία της διάταξης είναι η εξής: Τα σήματα ελέγχου (σήματα 0-10 V) στέλνονται από την DAQ&C στους σερβοενισχυτές, οι οποίοι με τη σειρά τους τροφοδοτούν με το ανάλογο ρεύμα τους κινητήρες των αρθρώσεων (οι σερβοενισχυτές έχουν ρυθμιστεί για να υλοποιούν έλεγχο ρεύματος). Η γωνίες των αρθρώσεων υπολογίζονται μέσω των ποτενσιόμετρων των κινητήρων, τα σήματα των οποίων στέλνονται στην DAQ&C. Ο έλεγχος του συστήματος επιτυγχάνεται μέσω του ηλεκτρονικού υπολογιστή σε περιβάλλον Matlab.

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται τα επιμέρους τμήματα της διάταξης και τα πειράματα που έγιναν για τον προσδιορισμό των απαραίτητων παραμέτρων. Επίσης αναλύεται ο τρόπος που σχεδιάστηκε το υπολογιστικό μοντέλο των ελεγκτών για την πραγματοποίηση των πειραμάτων.



Εικόνα 4.1: Πειραματική διάταξη

4.1 Κινητήρες

Η κίνηση των αρθρώσεων του ρομποτικού δακτύλου πραγματοποιείται με τρεις κινητήρες DC μόνιμου μαγνήτη. Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται το μοντέλο MG 995 της εταιρείας Tower Pro που διαθέτει μειωτήρα στροφών με μεταλλικά γρανάζια και ποτενσιόμετρο. Επίσης ο μηχανισμός περιλαμβάνει μονάδα ελέγχου η οποία όμως αφαιρέθηκε, δεδομένου ότι ο έλεγχος του κινητήρα γίνεται εξωτερικά με τη βοήθεια του Η/Υ. Η τάση λειτουργίας των servo επιλέχθηκε να είναι στα 6 V DC. Για τις ανάγκες της εργασίας υλοποιήθηκαν τα παρακάτω πειράματα-υπολογισμοί προσδιορισμού συγκεκριμένων παραμέτρων των σερβομηχανισμών:

- Υπολογισμός της σχέσης μετάδοσης του μειωτήρα στροφών
- Πείραμα για τον εύρεση της μαθηματικής σχέσης που συνδέει το σήμα ελέγχου από το ποτενσιόμετρο με τη γωνία που βρίσκεται άξονας του σερβομηχανισμού.

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

- Πείραμα υπολογισμού της σταθεράς ροπής του κινητήρα

4.1.1 Υπολογισμός του λόγου μείωσης του μειωτήρα στροφών

Ο μειωτήρας στροφών αποτελείται από 8 μεταλλικά γρανάζια που παρεμβάλλονται μεταξύ του άξονα του κινητήρα και του άξονα του servo. Για τον προσδιορισμό του λόγου μείωσης απαιτείται ο υπολογισμός των οδοντώσεων του κάθε γραναζιού. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκε κώδικας στο Matlab με τον οποίο, έχοντας σαν δεδομένο φωτογραφία του γραναζιού και χρησιμοποιώντας απλές τεχνικές επεξεργασίας εικόνας, γίνεται αυτόματα ο υπολογισμός των οδοντώσεων.

Αρχικά η εικόνα μετατρέπεται σε δυαδική (ασπρόμαυρη) χρησιμοποιώντας κατάλληλο κατώφλι (threshold). Στη συνέχεια «γεμίζονται» τυχόν οπές που υπάρχουν στην εικόνα έτσι ώστε να υπάρχει μια καθαρή αναπαράσταση της μορφής του γραναζιού. Κατόπιν «γεμίζονται» τα κενά ανάμεσα στις οδοντώσεις οπότε προκύπτει μια νέα που αναπαριστά ένα κυκλικό δίσκο. Αφαιρώντας τις δυο προηγούμενες δημιουργείται η τελική δυαδική εικόνα που απεικονίζει τις οδοντώσεις του γραναζιού ως λευκές περιοχές. Τέλος με τις κατάλληλες εντολές καταμετρώνται οι παραπάνω περιοχές και αποτυπώνεται η αρίθμηση των οδοντώσεων στην έγχρωμη εικόνα του γραναζιού. Η παραπάνω διαδικασία και το τελικό αποτέλεσμα για ένα από τα γρανάζια του μειωτήρα παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν (εικόνα 4.2).

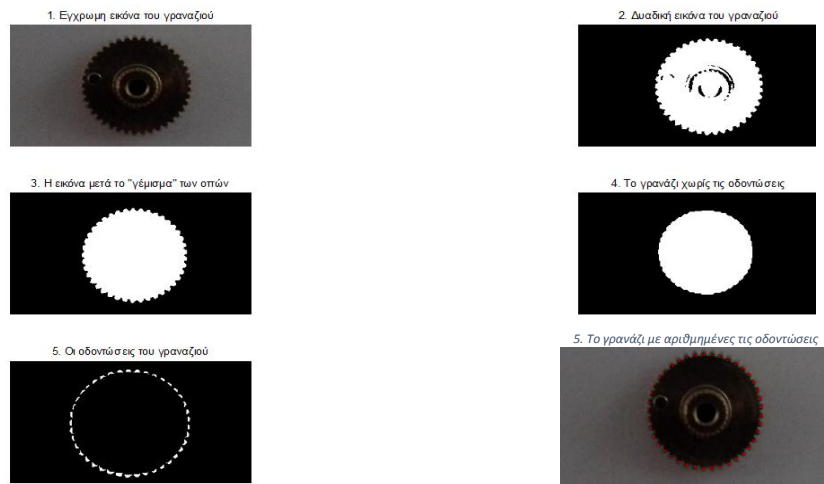
Με βάση τα παραπάνω και λαμβάνοντας υπόψιν τη σειρά με την οποία εμπλέκονται τα γρανάζια μεταξύ τους υπολογίστηκε ο λόγος μείωσης n :

$$n = 240.875$$

**(Σφάλμα!
Χρησιμοποιήστε
την καρτέλα
"Κεντρική
σελίδα", για να
εφαρμόσετε το
Heading 1 στο
κείμενο που
θέλετε να**

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

εμφανίζεται
εδώ..1)



Εικόνα 4.2: Τα στάδια επεξεργασίας της εικόνας του γραναζιού

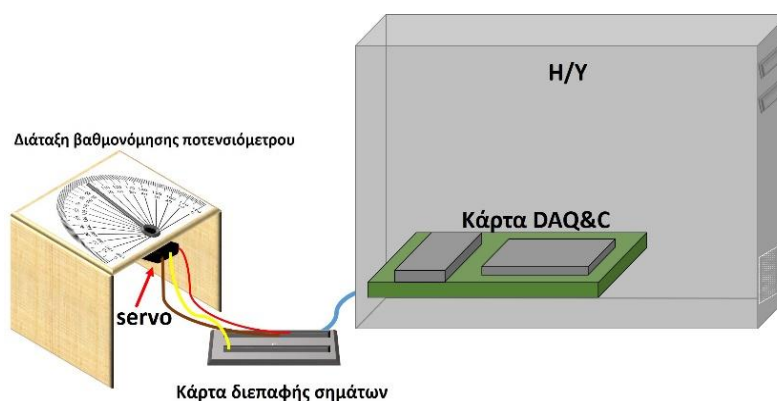


Εικόνα 4.3: Το γρανάζι με αριθμημένες τις οδοντώσεις του

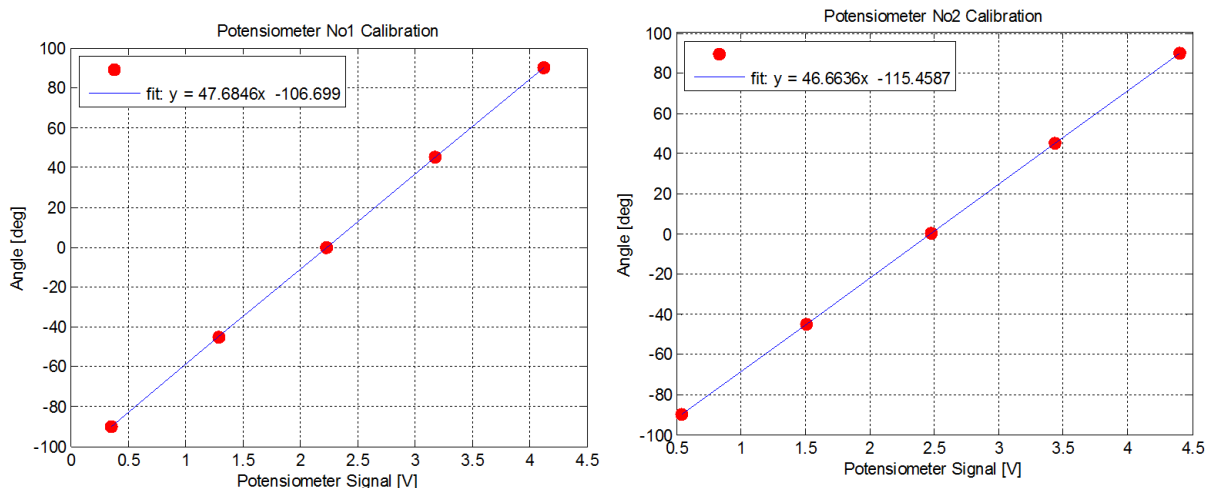
Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

4.1.2 Βαθμονόμηση ποτενσιόμετρων

Για τον προσδιορισμό της σχέσης που συνδέει τη γωνία του άξονα με την τάση εξόδου από το ποτενσιόμετρο κατασκευάστηκε ξύλινη διάταξη η οποία περιλαμβάνει μοιρογνώνιο πάνω στην οποία στερεώθηκαν διαδοχικά τα servo (εικόνα 4.4). Για δεδομένη θέση του άξονα λαμβάνεται το σήμα εξόδου από το ποτενσιόμετρο μέσω αναλογικής εισόδου της κάρτας δεδομένων. Σχεδιάστηκε μοντέλο στο Simulink όπου με τη χρήση κατάλληλων blocks λαμβάνεται κάθε φορά η τιμή από την κάρτα και αποθηκεύεται στο workspace. Κατόπιν επεξεργασίας των τιμών προκύπτουν οι ακόλουθες γραφικές παραστάσεις (εικόνες 4.5 και 4.6).

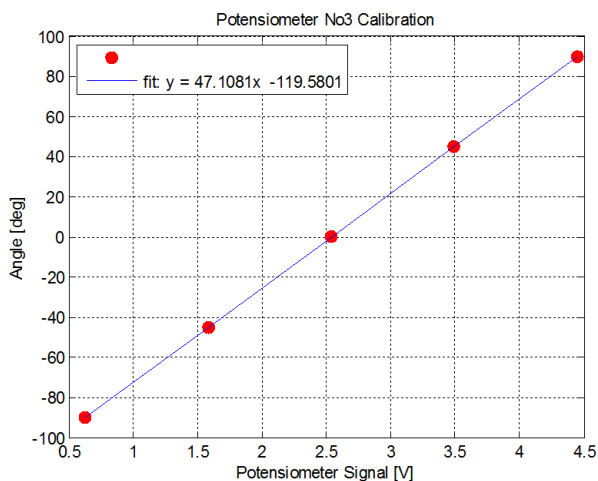


Εικόνα 4.4: Πειραματική διάταξη βαθμονόμησης ποτενσιόμετρων



Εικόνα 4.5: Αποτελέσματα βαθμονόμησης ποτενσιόμετρων 1ου & 2ου κινητήρα

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.



Εικόνα 4.6: Αποτελέσματα βαθμονόμησης ποτενσιόμετρου 3ου κινητήρα

4.1.3 Υπολογισμός της σταθεράς ροπής

Σε ένα DC κινητήρα με μόνιμους μαγνήτες η ροπή που αναπτύσσεται στο άξονά του σε σχέση με την ένταση του ρεύματος στον σπλισμό δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\tau_m = k_m i_m$$

(Σφάλμα!
Χρησιμοποιήστε
την καρτέλα
"Κεντρική
σελίδα", για να
εφαρμόσετε το
Heading 1 στο
κείμενο που
θέλετε να
εμφανίζεται
εδώ..2)

όπου k_m είναι η σταθερά ροπής του κινητήρα. Εφόσον υπάρχει μειωτήρας στροφών με μείωση n , η ροπή στην έξοδο δηλαδή στον άξονα της άρθρωσης είναι:

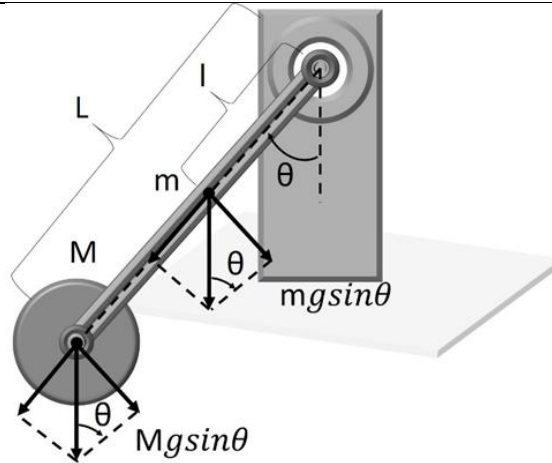
Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

$$\tau_o = \tau_m n$$

(Σφάλμα!
Χρησιμοποιήστε
την καρτέλα
"Κεντρική
σελίδα", για να
εφαρμόσετε το
Heading 1 στο
κείμενο που
θέλετε να
εμφανίζεται
εδώ..3)

Έστω ότι στον κινητήρα συνδέεται (μέσω του μειωτήρα) ένας βραχίονας μήκους $L=2l$ και μάζας m (θεωρείται ότι είναι συγκεντρωμένη στο κέντρο του) στο άκρο του οποίου υπάρχει μάζα M (εικόνα 4.7).

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.



Εικόνα 4.7: Πείραμα υπολογισμού σταθεράς ροπής του κινητήρα

Για να ισορροπήσει ο βραχίονας σε γωνία θ , απαιτείται ροπή:

$$\tau_{link} = Mgsin\theta L + mgsin\theta l \equiv \tau_o$$

η οποία αν αναχθεί στον άξονα του κινητήρα, ισούται με:

$$t_m = \frac{Mgsin\theta L + mgsin\theta l}{n}$$

(Σφάλμα!

Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ..4)

(Σφάλμα!

Χρησιμοποιήστε την καρτέλα

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

"Κεντρική
σελίδα", για να
εφαρμόσετε το
Heading 1 στο
κείμενο που
θέλετε να
εμφανίζεται
εδώ..5)

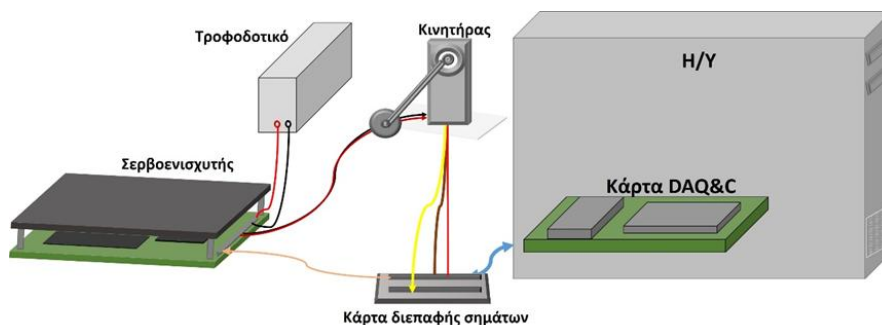
Εξισώνοντας τις εξισώσεις (4.2) και (4.5) προκύπτει ο τύπος που δίνει τη σταθερά ροπής σε σχέση με την ένταση του ρεύματος οπλισμού του κινητήρα και τη θέση του άξονά του.

$$k_m = \frac{Mg \sin \theta L + mg \sin \theta l}{i_m n}$$

(Σφάλμα!
Χρησιμοποιήστε
την καρτέλα
"Κεντρική
σελίδα", για να
εφαρμόσετε το
Heading 1 στο
κείμενο που
θέλετε να
εμφανίζεται
εδώ..6)

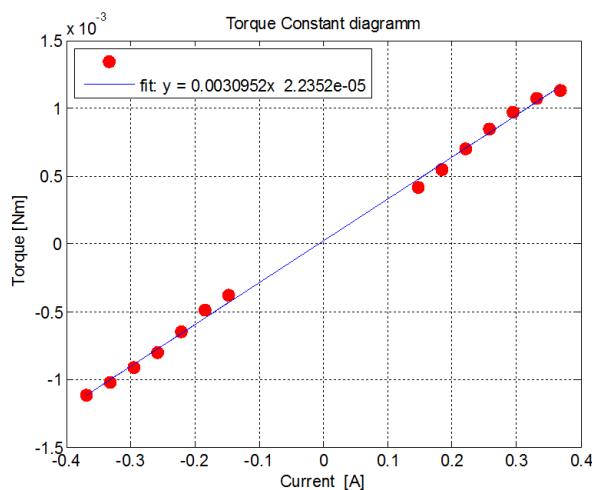
Για τον προσδιορισμό της σταθεράς k_m χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω πειραματική διάταξη.

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.



Εικόνα 4.8 Πειραματική διάταξη υπολογισμού της σταθεράς ροπής του κινητήρα

Σχεδιάστηκε μοντέλο Simulink με το οποίο μέσω της κάρτας DAQ&C στέλνονται στο σερβοενισχυτή γνωστά σήματα ελέγχου τάσης που αντιστοιχούν σε γνωστές τιμές έντασης του ρεύματος και με τα οποία τροφοδοτείται ο κινητήρας. Ο άξονας περιστρέφεται κατά γωνία θ η τιμή της οποίας λαμβάνεται μέσω του ποτενσιόμετρου και της κάρτας από το μοντέλο. Με επεξεργασία των δεδομένων προέκυψε η γραφική παράσταση της εικόνας (4.9) και ο υπολογισμός της σταθεράς ροπής του κινητήρα.



Εικόνα 4.9: Αποτελέσματα πειραμάτων υπολογισμού της σταθεράς k_m

$$k_m = 0.0031 \text{ [Nm/A]}$$

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

4.2 Σερβοενισχυτές

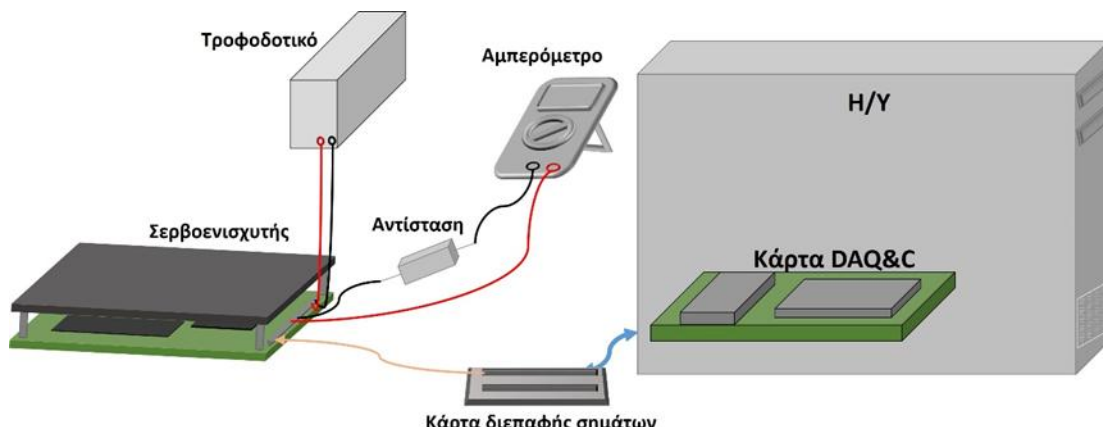
Η οδήγηση των κινητήρων του ρομποτικού βραχίονα γίνεται με 3 σερβοενισχυτές σειράς LC 3002 της εταιρείας Faulhaber . Έχουν ρυθμιστεί έτσι ώστε να υλοποιούν έλεγχο ρεύματος (current control), δηλαδή, προκειμένου ο κάθε κινητήρας να αναπτύξει συγκεκριμένη ροπή στον άξονά του, τροφοδοτείται από τον αντίστοιχο σερβοενισχυτή με ελεγχόμενη ένταση ρεύματος. Τα σήματα εισόδου στους σερβοενισχυτές είναι τάσεις εύρους $\pm 10\text{ V DC}$ και προέρχονται από τον ελεγκτή του συστήματος.

Η τάση ελέγχου V_{in} και το ρεύμα εξόδου συνδέονται με την ακόλουθη σχέση:

$$i_m = k_a V_{in}$$

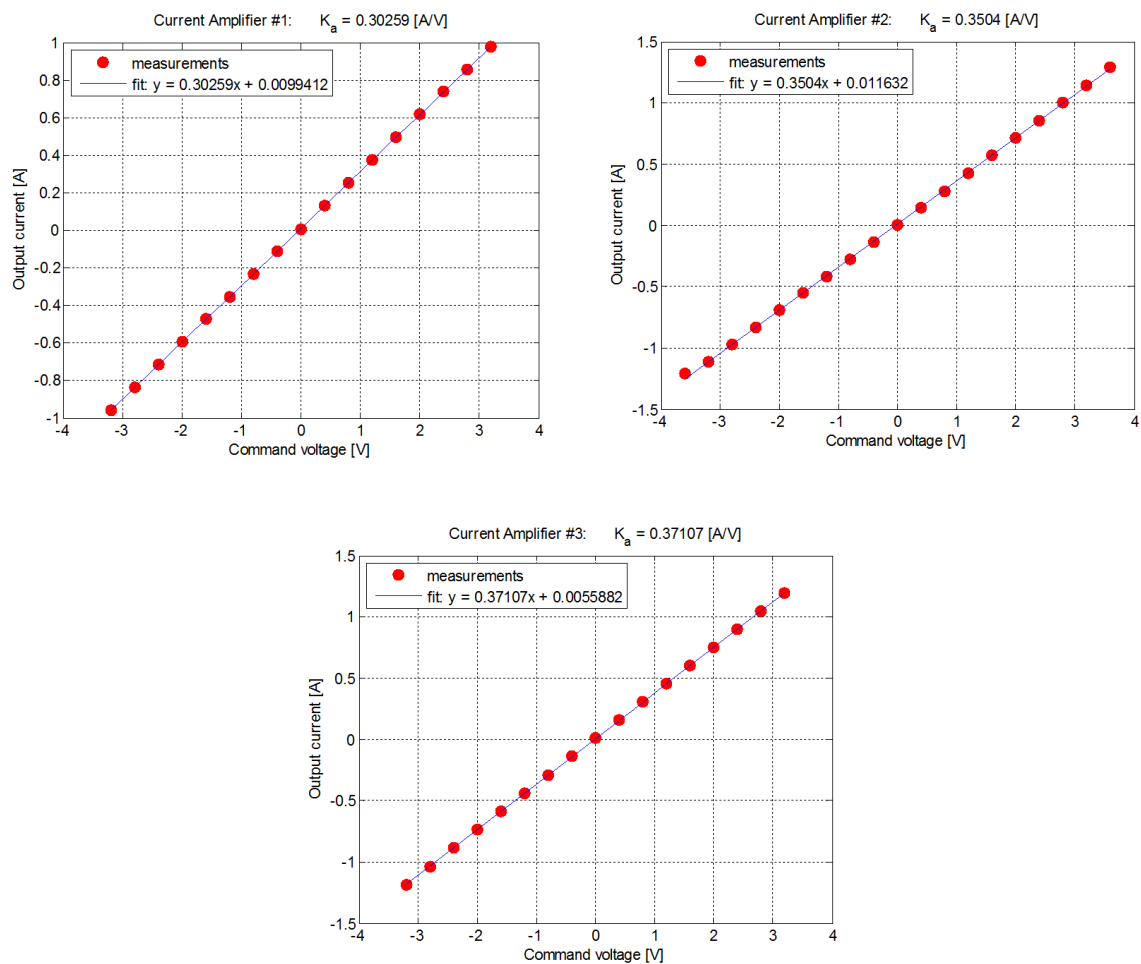
(Σφάλμα!
Χρησιμοποιήστε
την καρτέλα
"Κεντρική
σελίδα", για να
εφαρμόσετε το
Heading 1 στο
κείμενο που
θέλετε να
εμφανίζεται
εδώ..7)

όπου k_a είναι ο συντελεστής ενίσχυσης του σερβοενισχυτή. Προκειμένου να προσδιοριστεί ο συντελεστής αυτός υλοποιήθηκε η παρακάτω πειραματική διάταξη (εικόνα 4.10) όπου μια βαττική αντίσταση τροφοδοτείται από το σερβοενισχυτή. Για γνωστά σήματα ελέγχου λαμβάνονται οι τιμές της έντασης του ρεύματος με τη χρήση αμπερομέτρου.



Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

Κατόπιν επεξεργασίας των αποτελεσμάτων προέκυψαν οι ακόλουθες γραφικές παραστάσεις και οι συντελεστές ενίσχυσης των τριών σερβοενισχυτών (εικόνα 4.11)



Εικόνα 4.11: Αποτελέσματα βαθμονόμησης των σερβοενισχυτών

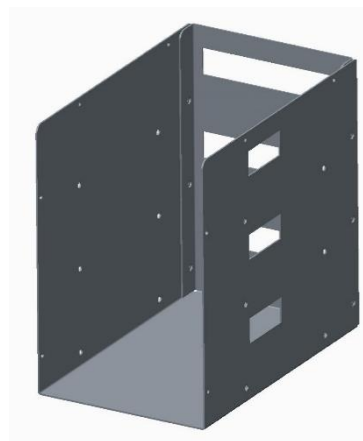
Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

Οι σερβοενισχυτές τοποθετήθηκαν εντός μεταλλικού κουτιού το οποίο σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε για το σκοπό αυτό. Το κύριο σώμα του κουτιού αποτελείται από δύο τμήματα ενώ εσωτερικά υπάρχουν έξι μεταλλικά στηρίγματα, δύο για κάθε σερβοενισχυτή, που λειτουργούν ως βάσεις στερέωσης.

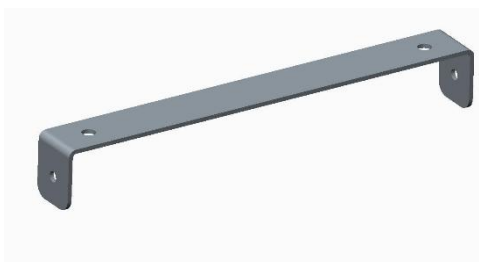
Κατά τη σχεδίαση ελήφθησαν υπόψιν οι διαστάσεις των σερβοενισχυτών, τα απαραίτητα ανοίγματα που πρέπει να υπάρχουν στο κουτί (τρία για κάθε σερβοενισχυτή, ένα για την τοποθέτηση του συνδετήρων των καλωδιώσεων και τα υπόλοιπα για πρόσβαση στους μικροδιακόπτες ρύθμισης) καθώς και οι απαραίτητες οπές για τοποθέτηση των βιδών στήριξης (εικόνες 4.12 και 4.13).



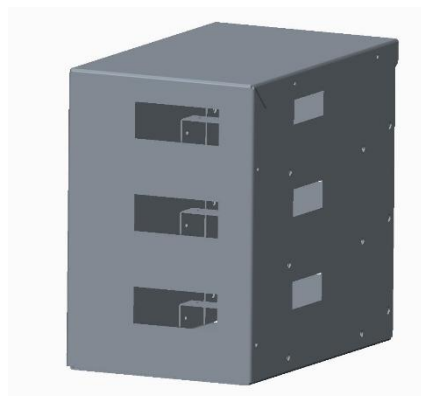
α.



β.



γ.



δ.

Εικόνα 4.12 Τρισδιάστατα σχέδια του μεταλλικού κουτιού: α) το πάνω μέρος β) το κάτω μέρος γ) βάση στήριξης δ) συναρμολόγηση του κουτιού

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.



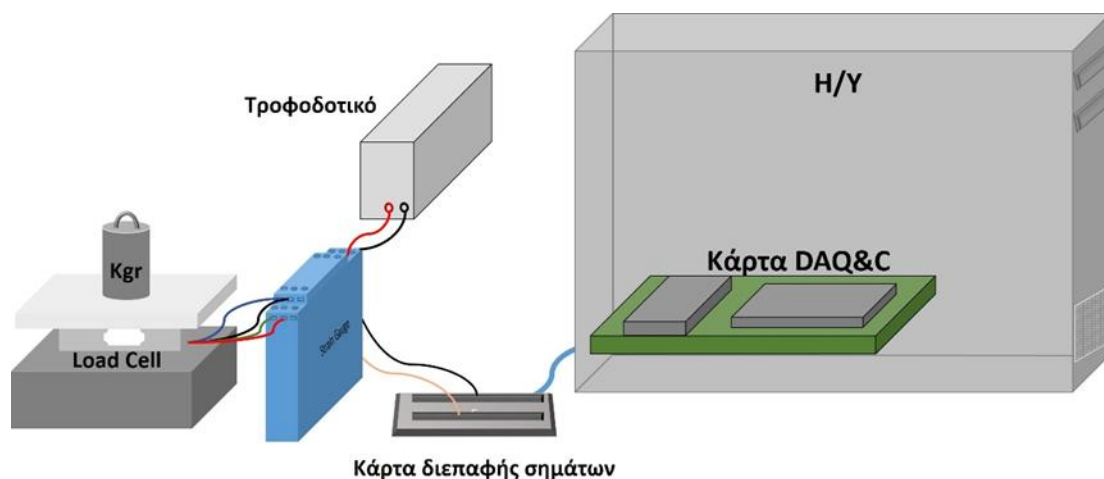
Εικόνα 4.13 το μεταλλικό κουτί με τους σερβοενισχυτές

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

4.3 Αισθητήρας δύναμης

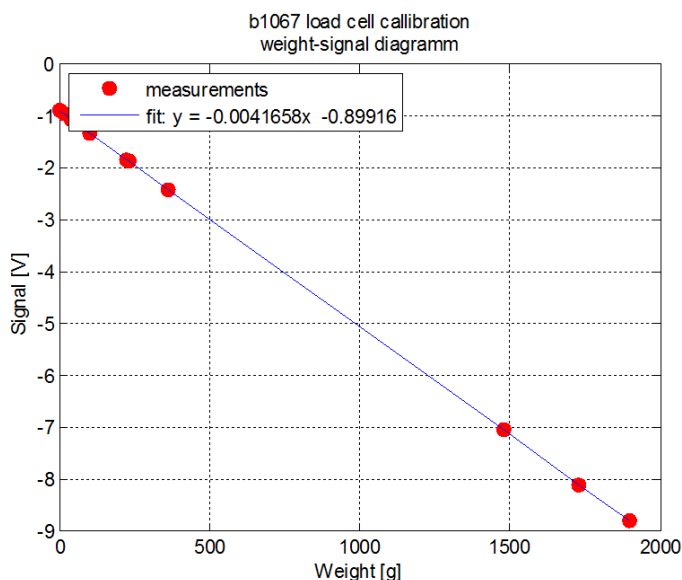
Η μέτρηση της δύναμης που ασκεί το ρομποτικό δάκτυλο στην επιφάνεια υπολογίζεται με τη χρήση δυναμοκυψέλης. Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο DFS-3 της εταιρείας HBM. Η δυναμοκυψέλη τοποθετήθηκε σε βάση από ertalon, ενώ η πλατφόρμα ζύγισης, που αποτελεί και την επιφάνεια πάνω στην οποία κινείται το ακροδάκτυλο του βραχίονα, είναι από αλουμίνιο. Η ενίσχυση του σήματος από το load cell γίνεται με τη χρήση συσκευής Strain Gauge και ειδικότερα του ADAM-3016 της εταιρείας Advantech.

Η βαθμονόμηση της δυναμοκυψέλης έγινε μέσω της πειραματικής διάταξης του παρακάτω σχήματος το οποίο αποτελείται από το σύστημα load cell - strain gauge, τροφοδοτικό για την τροφοδοσία του strain gauge με 24 V DC και τον ΗΥ με την κάρτα DAQ&C (εικόνα 4.13). Τοποθετήθηκαν διαδοχικά αντικείμενα γνωστού βάρους και τα σήματα λαμβάνονται και αποθηκεύονται μέσω της κάρτας με τη βοήθεια κατάλληλου μοντέλου Simulink.



Εικόνα 4.13: Πειραματική διάταξη βαθμονόμησης αισθητήρα δύναμης

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.



Εικόνα 4.14: Αποτελέσματα βαθμονόμησης αισθητήρα δύναμης

4.4 Ρομποτικό δάκτυλο

Το ρομποτικό δάκτυλο αποτελείται από τρεις συνδέσμους και τη βάση, κάθε ένα από τα οποία αποτελείται από δύο επιμέρους τμήματα, καθώς επίσης και το υλικό του ακροδακτύλου. Εντός των τμημάτων του κάθε συνδέσμου βρίσκεται ο σερβομηχανισμός. Η μετάδοση της κίνησης μεταξύ των συνδέσμων γίνεται με τη χρήση πλαστικού βραχίονα.

Κατά το στάδιο της σχεδίασης ελήφθησαν υπόψιν μια σειρά από παραμέτρους έτσι ώστε να διασφαλιστεί η στιβαρότητα και η λειτουργικότητα της κατασκευής. Σε κάθε τμήμα των συνδέσμων σχεδιάστηκαν εσοχές και προεξοχές για πιο σταθερή συναρμολόγηση τους όπως επίσης και οπές για της βίδες στερέωσης. Σχεδιάστηκαν οπές για τους άξονες των κινητήρων και την εξαγωγή των καλωδιώσεων και άξονες για τη διευκόλυνση της κίνησης μεταξύ των συνδέσμων. Το εσωτερικό των συνδέσμων σχεδιάστηκε λαμβάνοντας υπόψιν την γεωμετρία του σερβομηχανισμού. Στη τμήμα της βάσης σχεδιάστηκε κατάλληλη οπή για την τοποθέτηση παξιμαδιού για τις βίδες στήριξης της κατασκευής. Η σχεδίαση του τελευταίου συνδέσμου έγινε με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να τοποθετηθεί το υλικό του ακροδακτύλου. Τέλος σχεδιάστηκε ρουλεμάν το οποίο

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

τοποθετήθηκε
προαναφέρθηκαν

ουθούν εικόνες (4.15-4.20) με τα σχέδια που



Εικόνα 4.15: Σχέδια των τμημάτων της βάσης



Εικόνα 4.16: Σχέδια των τμημάτων του 1ου συνδέσμου



Εικόνα 4.17: Σχέδια των τμημάτων του 2ου συνδέσμου

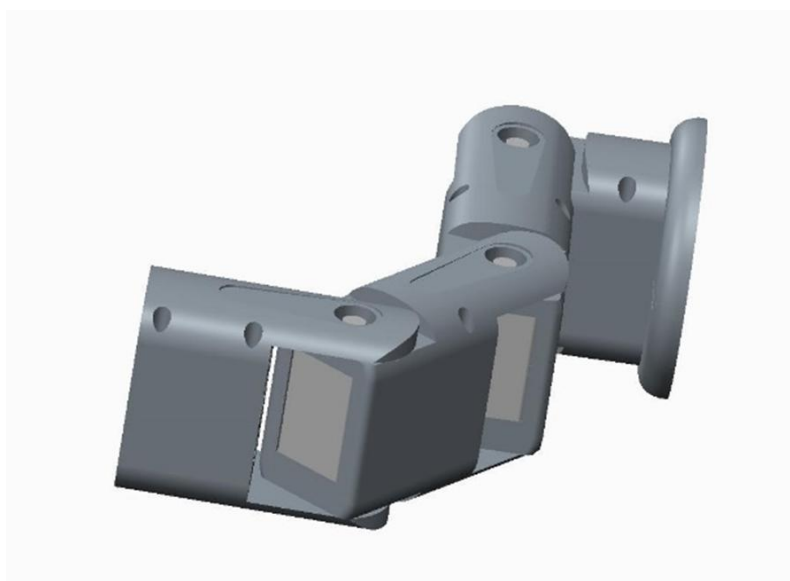
Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.



Εικόνα 4.18: Σχέδια των τμημάτων του 3ου συνδέσμου



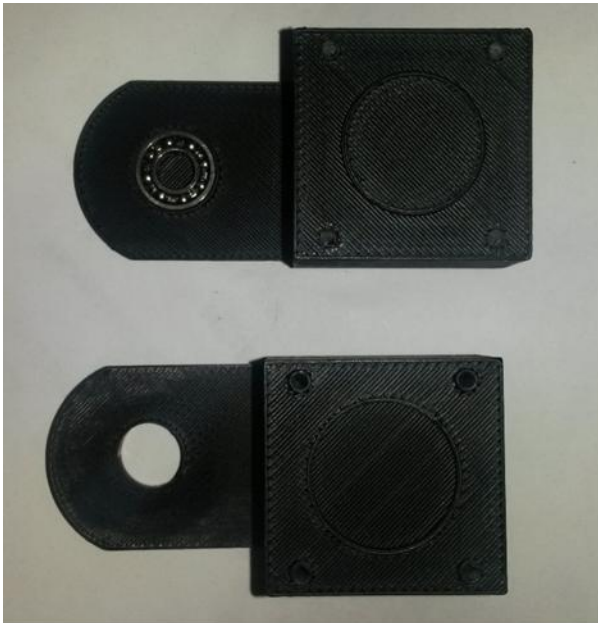
Εικόνα 4.19: Σχέδια του κινητήρα και του ρουλεμάν



Εικόνα 4.20: Σχέδιο της συναρμολόγησης των τμημάτων του δακτύλου

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

Η κατασκευή των τμημάτων του δακτύλου έγιναν με τη μέθοδο της τρισδιάστατης εκτύπωσης (3D Printing) και το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι ABS plus (εικόνα 4.21).



Εικόνα 4.21: Εκτυπωμένα τμήματα του δακτύλου

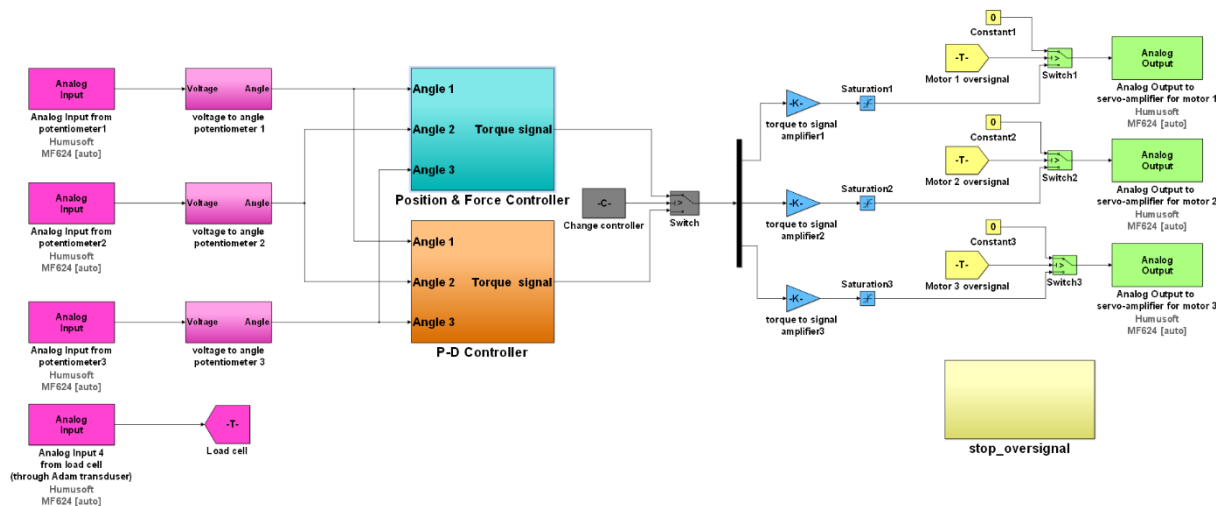
Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

4.5 Υλοποίηση ελεγκτών

Οι ελεγκτές σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν σε περιβάλλον Matlab με χρήση των προγραμμάτων Simulink και Real-Time Windows Target. Ο χειρισμός των ελεγκτών και κατ'επέκταση του ρομποτικού δακτύλου γίνεται με κατάλληλο κώδικα στον οποίο επιπλέον ορίζονται οι αρχικές και επιθυμητές τιμές των πειραμάτων.

4.5.1 Βασικό μοντέλο Simulink

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων απαιτούνται αρχικές συνθήκες όπως η τοποθέτηση του δακτύλου σε συγκεκριμένη θέση και προσανατολισμό ως προς την άκαμπτη επιφάνεια ασκώντας παράλληλα δεδομένη αρχική δύναμη. Η επίτευξη των παραπάνω συνθηκών υλοποιείται μέσω ενός P-D ελεγκτή, ο οποίος σχεδιάστηκε και ενσωματώθηκε στο βασικό μοντέλο Simulink. Στην εικόνα (4.22) παρουσιάζεται η συνολική δομή του μοντέλου Simulink.



Εικόνα 4.22: Συνολικό μοντέλο Simulink

Τα σήματα από τα ποτενσιόμετρα των κινητήρων λαμβάνονται μέσω της DAQ&C, χρησιμοποιώντας κατάλληλα blocks (Analog Input blocks). Αυτά ρυθμίζονται έτσι ώστε το καθένα να επικοινωνεί με την κατάλληλη είσοδο που έχει συνδεθεί το αντίστοιχο ποτενσιόμετρο. Στη συνέχεια τα σήματα τάσης μετατρέπονται σε αντίστοιχα σήματα

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

γωνίας με τη χρήση κατάλληλου subsystem στο οποίο έχει ενσωματωθεί η σχέση που προέκυψε από το πείραμα βαθμονόμησης του κάθε ποτενσιόμετρου. Οι γωνίες των αρθρώσεων αποτελούν την είσοδο για τα subsystem που υλοποιούν τους ελεγκτές, τον P-D ελεγκτή (*P-D Controller subsystem*) για την αρχικοποίηση του βασικού πειράματος και τους υπό εξέταση ελεγκτές (*Position & Force Controller subsystem*). Τα σήματα ελέγχου, που έχουν διαστάσεις ροπής, μετατρέπονται σε σήματα τάσης πολλαπλασιαζόμενα με κατάλληλο συντελεστή που προκύπτει από τις εξισώσεις (4.2), (4.3) και (4.7). Η σχέση μετατροπής της ροπής σε τάση έχει την ακόλουθη μορφή:

$$V_{in} = \frac{1}{k_m k_a n} \tau_o$$

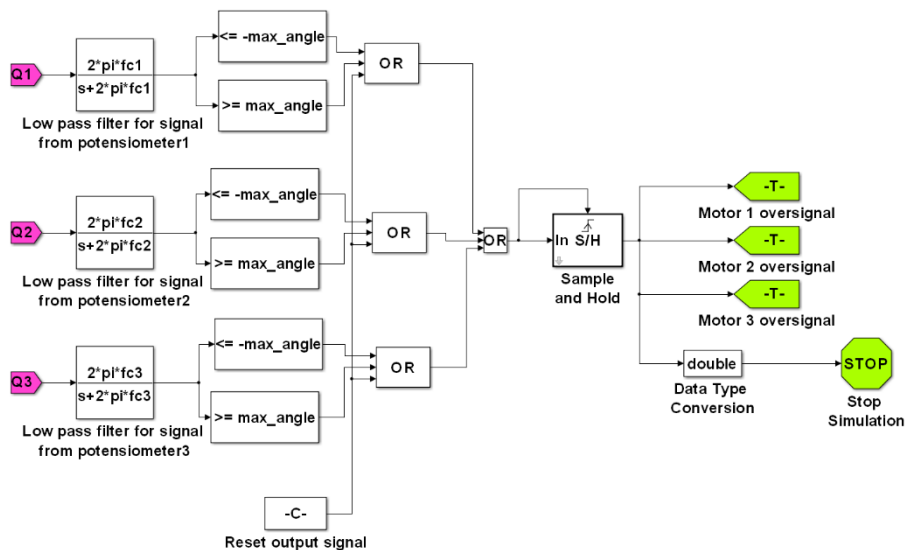
**(Σφάλμα!
Χρησιμοποιήστε
την καρτέλα
"Κεντρική
σελίδα", για να
εφαρμόσετε το
Heading 1 στο
κείμενο που
θέλετε να
εμφανίζεται
εδώ..8)**

Τέλος τα σήματα τάσης οδηγούνται μέσω των Analog Output blocks και της DAQ&C στους σερβοενισχυτές και από εκεί στους κινητήρες. Η εναλλαγή από τον P-D ελεγκτή στον ελεγκτή θέσης και δύναμης γίνεται με Switch block το οποίο ενεργοποιείται μέσω του κώδικα χειρισμού του πειράματος, αλλάζοντας την τιμή της σταθεράς *Change controller*.

Για την αποφυγή υπερφόρτισης των σερβοενισχυτών έχει ενσωματωθεί κατάλληλο Saturation block με το οποίο περιορίζεται το σήμα ελέγχου έτσι ώστε το ρεύμα που ο κάθε σερβοενισχυτής τροφοδοτεί τον αντίστοιχο κινητήρα να μην υπερβαίνει το μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή, $i_{max} = 2 A$. Επίσης μέσω του subsystem *Stop oversignal* (εικόνα 4.23) αποτρέπεται η περιστροφή των αξόνων των κινητήρων εκτός ορίων ($-90^\circ \leq q_{max} \leq 90^\circ$). Η λειτουργία του συγκεκριμένου υποσυστήματος έχει ως εξής: Τα σήματα από τα

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

ποτενσιόμετρα των κινητήρων αφού φιλτραριστούν (χρησιμοποιείται χαμηλοπερατό φίλτρο $1^{η}$ τάξης με συχνότητα αποκοπής $f_c = 20 \text{ Hz}$) συγκρίνονται με τις οριακές τιμές. Για όσο χρονικό διάστημα οι γωνίες των αρθρώσεων βρίσκονται εντός ορίων (σταθερά max_angle) η έξοδος του subsystem είναι ίση με 0 (τιμή της σταθεράς *Motor oversignal*) και τα σήματα από τους ελεγκτές οδηγούνται κανονικά στους σερβοενισχυτές. Όταν μια άρθρωση υπερβεί τα όρια, η τιμή της σταθεράς *Motor oversignal* γίνεται ίση με 1 γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα αφ' ενός να μηδενίζονται τα σήματα ελέγχου των σερβοενισχυτών (τα Switch blocks 1, 2 και 3 αλλάζουν κατάσταση και αποκτούν τιμή εισόδου ίση με 0) και αφ' ετέρου να διακόπτεται η συνολική λειτουργία του μοντέλου Simulink.



Εικόνα 4.23: Stop oversignal subsystem

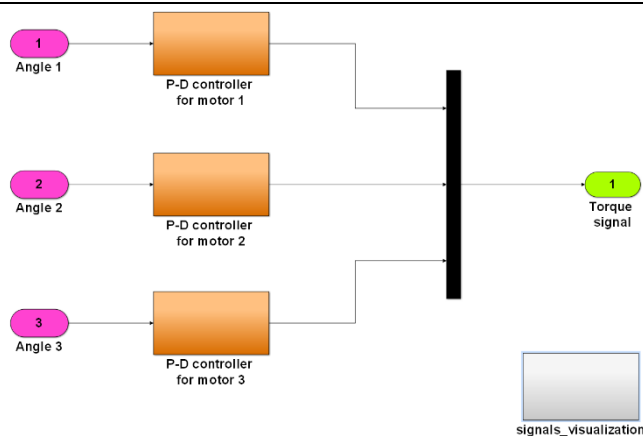
4.5.2 Μοντέλο P-D ελεγκτή

Το υποσύστημα *P-D Controller* περιλαμβάνει τους επιμέρους ελεγκτές για τους κινητήρες των αρθρώσεων του ρομποτικού δακτύλου καθώς επίσης και ένα υποσύστημα για την απεικόνιση των απαραίτητων μεγεθών (εικόνα 4.24). Κατά τα την έναρξη του πειράματος το δάκτυλο προβλέπεται να ξεκινάει από μια αρχική θέση (σε συσπείρωση και με ελεύθερο το άκρο του, *initial position*) και στη συνέχεια να έρχεται σε κατάλληλη επαφή με την επιφάνεια, όπως καθορίζουν οι αρχικές συνθήκες (*final position*). Για το σκοπό αυτό

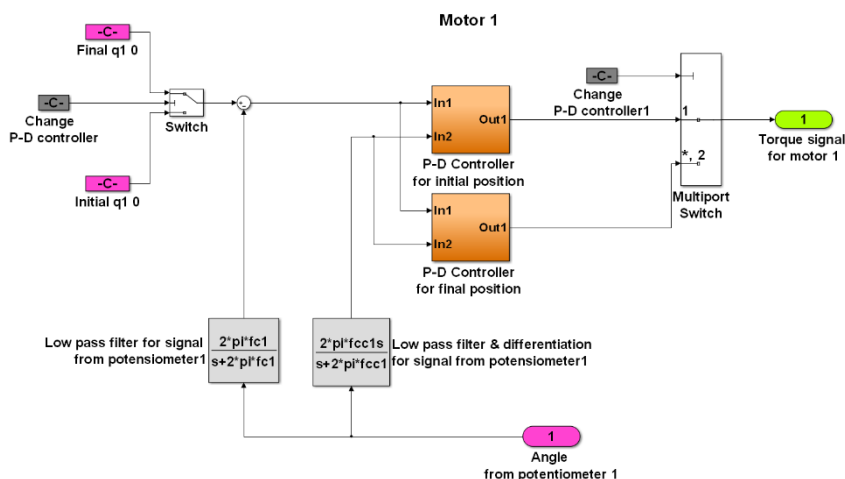
Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

ο P-D ελεγκτής ρυθμίζεται με διαφορετικά κέρδη για κάθε θέση όπως φαίνεται στην εικόνα (4.25) (*P-D Controller for initial position* και *P-D Controller for final position* subsystems). Η εναλλαγή των επιθυμητών γωνιών των αρθρώσεων (που αντιστοιχούν στις ανάλογες θέσεις του άκρου του δακτύλου) και των κατάλληλων κερδών γίνεται με τα Switch blocks που υπάρχουν και ελέγχονται από την τιμή της σταθεράς *Change P-D controller*. Τα σήματα από τα ποτενσιόμετρα διέρχονται μέσα από χαμηλοπερατό φίλτρο 1^{ης} τάξης, ενώ για την αποφυγή της ενίσχυσης του θορύβου που προκαλεί ο D όρος χρησιμοποιείται μια φιλτραρισμένη έκδοση του όρου διαφόρισης η οποία περιορίζει το πρόβλημα.

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.



Εικόνα 4.24: P-D Controller subsystem

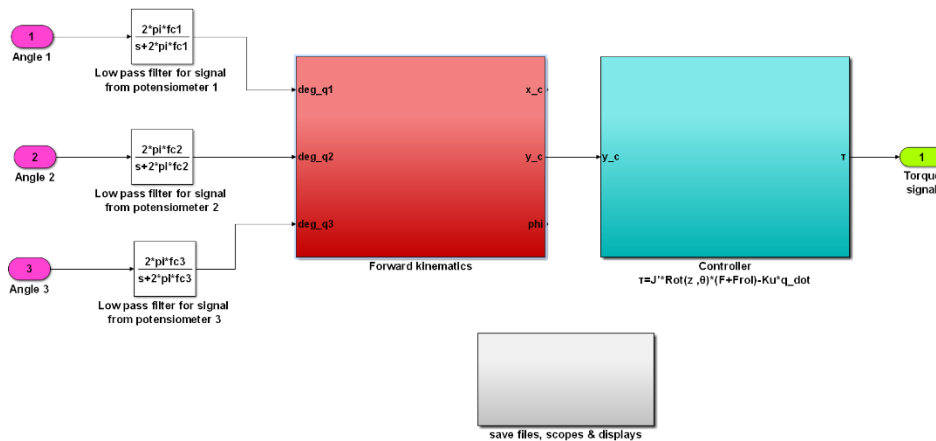


Εικόνα 4.25: P-D Controller for motor 1 subsystem

4.5.3 Μοντέλο ελεγκτή θέσης και δύναμης

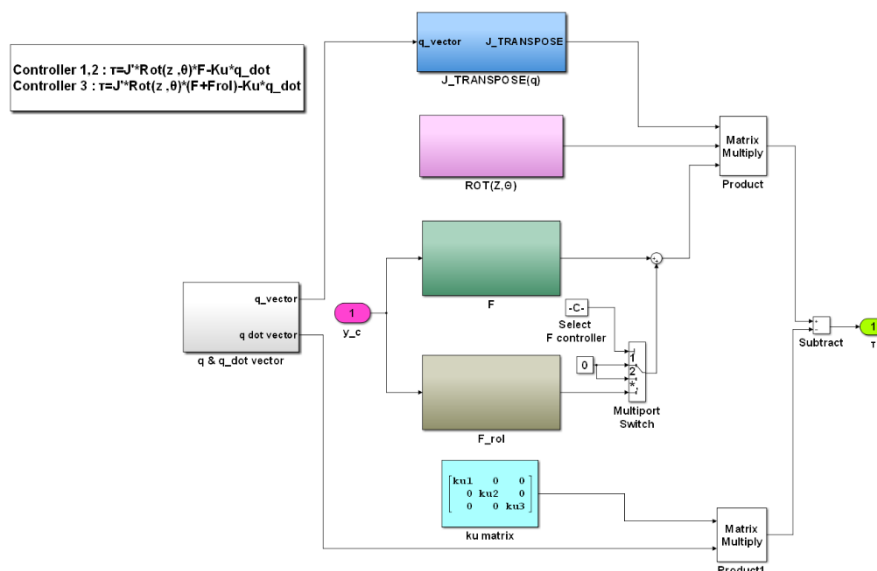
Τα βασικά πειράματα πραγματοποιούνται μέσω του υποσυστήματος του ελεγκτή θέσης και δύναμης (*Position & Force Controller subsystem*) το οποίο έχει ως εισόδους τις γωνίες των αρθρώσεων και έξοδο το παραγόμενο σήμα ροπής. Αυτό περιλαμβάνει ένα subsystem μέσω του οποίου επιλύεται το ευθύ κινηματικό πρόβλημα (*Forward Kinematics subsystem*), το subsystem που υλοποιεί τους τρεις ελεγκτές, ενώ παρέχεται η δυνατότητα οπτικής απεικόνισης της μεταβολής των επιθυμητών μεγεθών και αποθήκευσης των δεδομένων μέσω του υποσυστήματος *save files, scopes & displays* (εικόνα 4.26).

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.



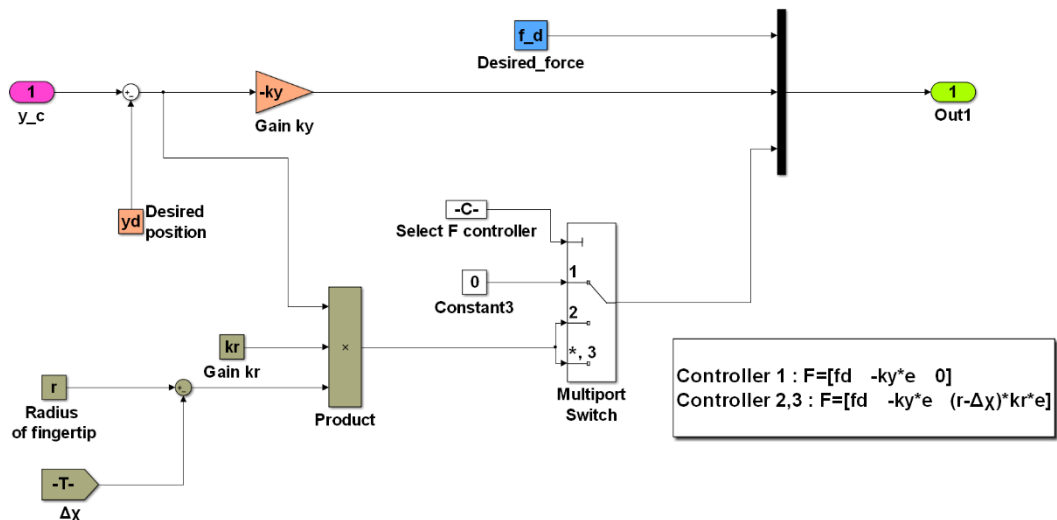
Εικόνα 4.26: Position & Force Controller subsystem

Στο subsystem *Controller* πραγματοποιείται η σύνθεση των τριών ελεγκτών. Για το σκοπό αυτό σχεδιάστηκαν μοντέλα για τον ανάστροφο πίνακα της Ιακωβιανής ($J_TRANSPOSE(q)$), τον πίνακα στροφής του πλαισίου της επιφάνειας σε σχέση με το αδρανειακό πλαίσιο ($ROT(z,\theta)$), το γενικευμένο διάνυσμα της δύναμης διόρθωσης (F) και του σήματος ελέγχου F_{rol} (εικόνα 4.27). Επίσης υπολογίζεται ο πίνακας k_u και τα διανύσματα θέσης και ταχύτητας των αρθρώσεων. Η επιλογή του επιθυμητού ελεγκτή γίνεται με Switch blocks που ελέγχονται από την τιμή της σταθεράς *Select F controller*. Στις εικόνες που ακολουθούν (4.28-4.30) παρουσιάζονται τα μοντέλα που σχεδιάστηκαν για τον υπολογισμό των τιμών των μεγεθών F, F_{rol}, y_{rol} .

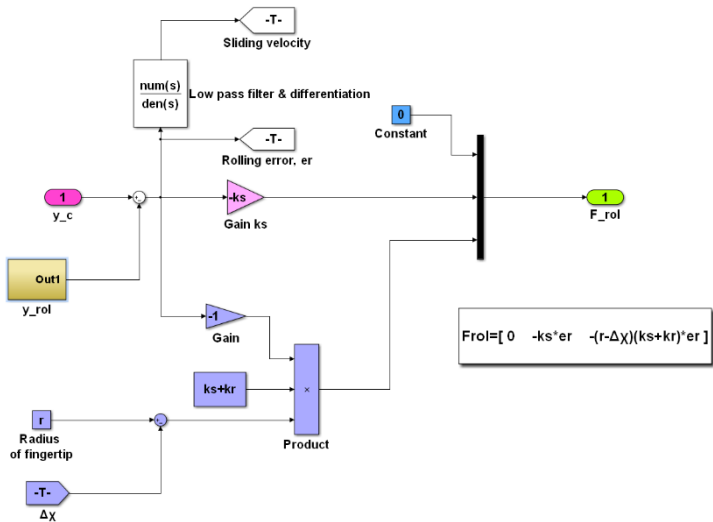


Εικόνα 4.27: Controller subsystem

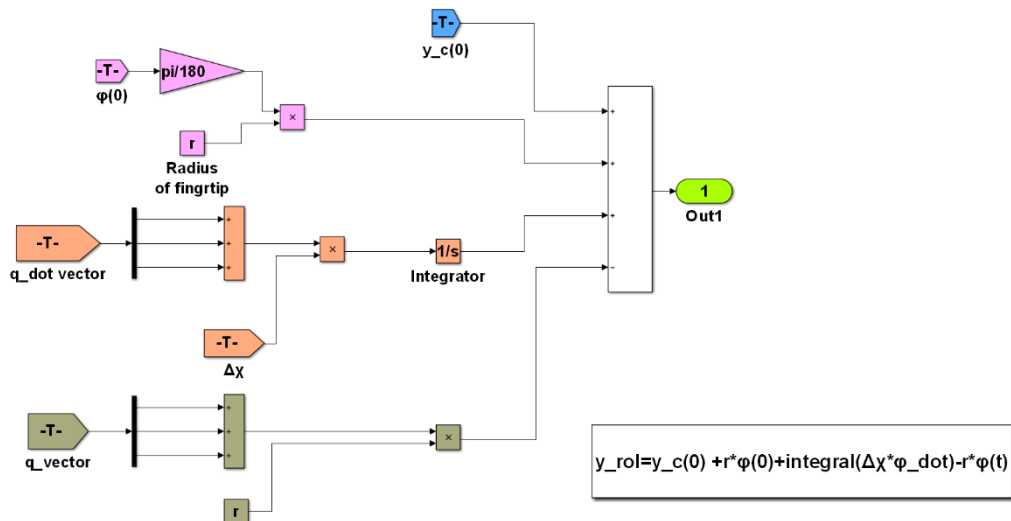
Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.



Εικόνα 4.28: Μοντέλο Simulink για τον υπολογισμό του διανύσματος F



Εικόνα 4.29: Μοντέλο Simulink για τον υπολογισμό του διανύσματος F_{rol}



Εικόνα 4.30: Μοντέλο Simulink για τον υπολογισμό του y_{rol}

Κεφάλαιο 5

5 Πειραματικά αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται γραφήματα με τα πειραματικά αποτελέσματα από τις δοκιμές των τριών νόμων ελέγχου στο ρομποτικό δάκτυλο και γίνεται αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν είχαν σκοπό να διερευνηθεί πειραματικά η επίδραση των προτεινόμενων ελεγκτών στην απόκριση του ρομποτικού δακτύλου όσο αφορά την επιβολή δύναμης και την μετακίνηση του ακροδακτύλου με κίνηση κύλισης πάνω στην επιφάνεια επαφής. Ο κάθε ελεγκτής αξιολογείται ως προς την ικανότητα να οδηγήσει το δάκτυλο προς συγκεκριμένο σημείο πάνω στην επιφάνεια, εκτελώντας κίνηση κύλισης και ασκώντας παράλληλα δεδομένη κάθετη δύναμη σε αυτήν. Τα κριτήρια αξιολόγησης είναι η δύναμη που επιβάλλει ο βραχίονας στην επιφάνεια, το σφάλμα θέσης, η ταχύτητα ολίσθησης του δακτύλου καθώς και ο προσανατολισμός του.

Οι αρχικές συνθήκες και οι επιθυμητές τιμές για το πείραμα του πρώτου ελεγκτή ήταν:

$$\begin{aligned}\varphi(0) &= 0^\circ & f(0) &= 5 \text{ N} \\ f_d &= 10 \text{ N} & y_d &= y_c(0) - 0.012 \text{ m},\end{aligned}$$

Τα πειράματα για το δεύτερο και τρίτο ελεγκτή έγιναν για $\varphi(0) = -15^\circ$. Τα κέρδη των ελεγκτών είναι:

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. **Σφάλμα!** Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

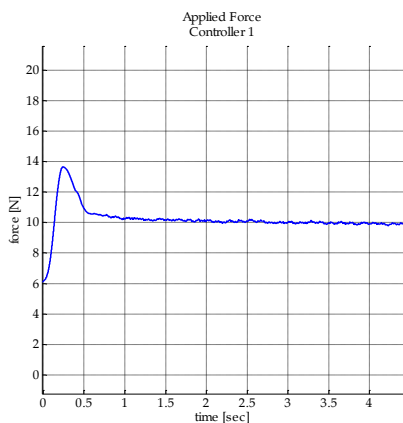
$$k_y = 500, k_r = 1290, k_s = 100000$$

5.1 Πειραματικά αποτελέσματα ελεγκτή για τη δύναμη και τη θέση

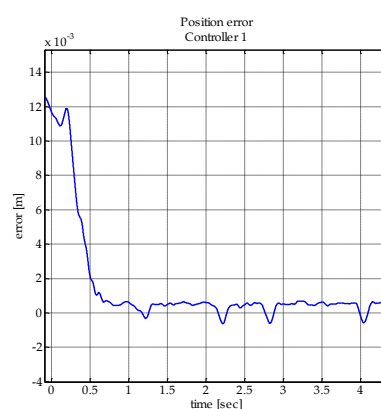
Τα αποτελέσματα των πειραμάτων για τον πρώτο ελεγκτή έδειξαν ότι επιτυγχάνει τους βασικούς στόχους που είχαν τεθεί. Η εικόνα (5.1) δείχνει την απόκριση του συστήματος στην επιβολή κάθετης δύναμης στην επιφάνεια και όπως προκύπτει από το διάγραμμα προσεγγίζει ικανοποιητικά την επιθυμητή δύναμη των 10 N. Επίσης από την εικόνα (5.2) προκύπτει ότι το σφάλμα θέσης συγκλίνει στο μηδέν με ένα μικρό σφάλμα της τάξης του 0.5 mm. Να σημειωθεί ότι η κυμάτωση που εμφανίζεται στα διαγράμματα οφείλεται στον ηλεκτρικό θόρυβο που εισάγουν στα σήματα ελέγχου τα ποτενσιόμετρα από τους κινητήρες. Επίσης πραγματοποιήθηκαν πειράματα και για διαφορετικές τιμές, όσο αφορά την επιθυμητή δύναμη και θέση του δακτύλου, με τα ίδια ικανοποιητικά αποτελέσματα όπως φαίνεται στα διαγράμματα των εικόνων (5.3 και 5.4).

Η απόκριση του συστήματος για την κίνηση κύλισης είναι η αναμενόμενη, δηλαδή το δάκτυλο μετακινείται προς την τελική θέση ολισθαίνοντας χωρίς να καταφέρει να εκτελέσει κύλιση. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει από το διάγραμμα της ταχύτητας ολίσθησης (εικόνα 5.5) που αναπτύσσει το άκρο του βραχίονα, όπου φαίνεται ότι κατά την εκκίνηση εμφανίζεται μια σημαντική ταχύτητα της τάξης των 0.25 m/sec. Η ολίσθηση του δακτύλου προκύπτει και από τη μεταβολή του προσανατολισμού του άκρου (εικόνα 5.6). Η πολύ μικρή μεταβολή της γωνίας ϕ κατά 6° περίπου και ειδικά προς τα αρνητικά υποδηλώνει ολίσθηση του δακτύλου, δεδομένου ότι αν εκτελούσε κίνηση κύλισης ο τελικός προσανατολισμός θα έπρεπε να έχει θετική τιμή. Στην εικόνα (5.7) αναπαρίσταται η αρχή και τελική θέση του δακτύλου όπου φαίνεται ότι το δάκτυλο μετακινήθηκε προς την τελική θέση ουσιαστικά ολισθαίνοντας.

1

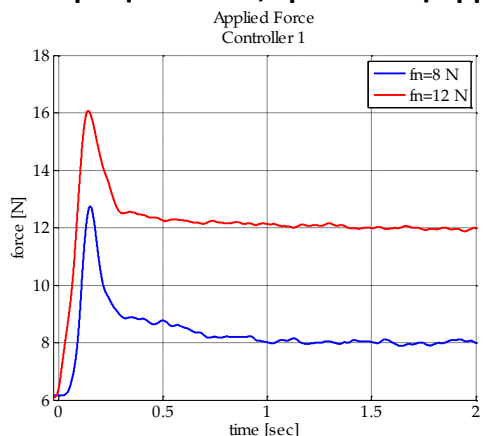


Εικόνα 5.1: Κάθετη δύναμη

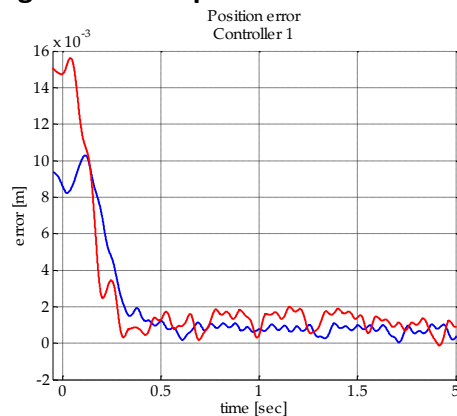


Εικόνα 5.2: Σφάλμα θέσης

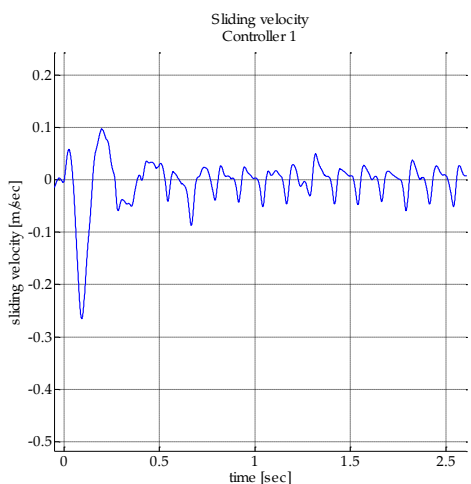
Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να



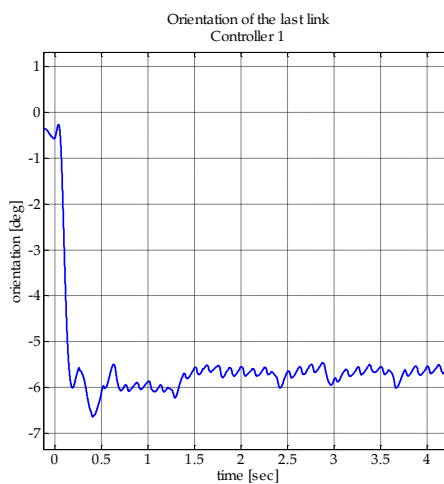
Εικόνα 5.3: Απόκριση του συστήματος για διάφορες δυνάμεις



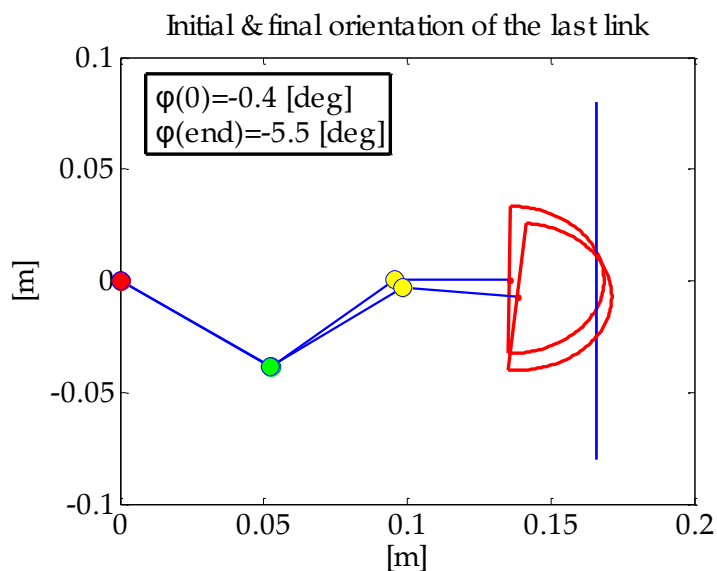
Εικόνα 5.4: Απόκριση του συστήματος για διάφορες θέσεις



Εικόνα 5.5: Ταχύτητα ολίσθησης



Εικόνα 5.6: Προσανατολισμός του άκρου

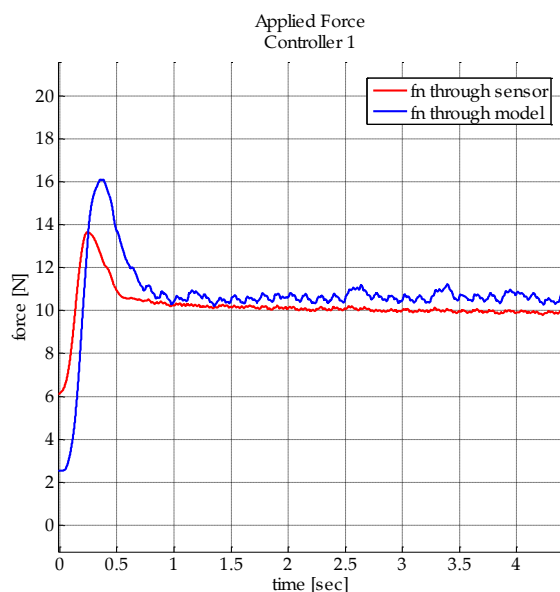


Εικόνα 5.7: Αρχική και τελική θέση του δακτύλου για το πείραμα του πρώτου ελεγκτή

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

Παρατήρηση

Στη προσομοίωση του συστήματος για την κάθετη δύναμη υιοθετήθηκε μοντέλο της μορφής $f_x = k\Delta\chi^2$. Συγκρίνοντας το διάγραμμα της δύναμης που προκύπτει από τον αισθητήρα δύναμης με το αντίστοιχο του μοντέλου για την προσομοίωση παρατηρείται ότι οι μεταβολές της δύναμης που ασκεί το δάκτυλο στην επιφάνεια συγκλίνουν με τις αντίστοιχες του θεωρητικού μοντέλου (εικόνα 5.8). Οι όποιες αποκλίσεις οφείλονται στους υπολογισμούς του $\Delta\chi$ μέσω των κινηματικών εξισώσεων καθώς υπεισέρχεται το πρόβλημα του θορύβου από τα ποτενσιόμετρα των κινητήρων καθώς επίσης και του συντελεστή παραμόρφωσης του υλικού του ακροδακτύλου.



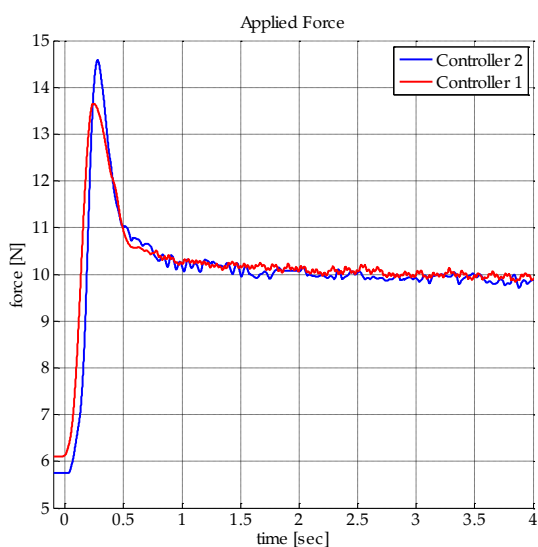
Εικόνα 5.8: Σύγκριση της πραγματικής δύναμης με αυτή που προκύπτει από το μοντέλο

5.2 Πειραματικά αποτελέσματα ελεγκτή για τη δύναμη και τη θέση με βελτιωμένες συνθήκες κίνησης

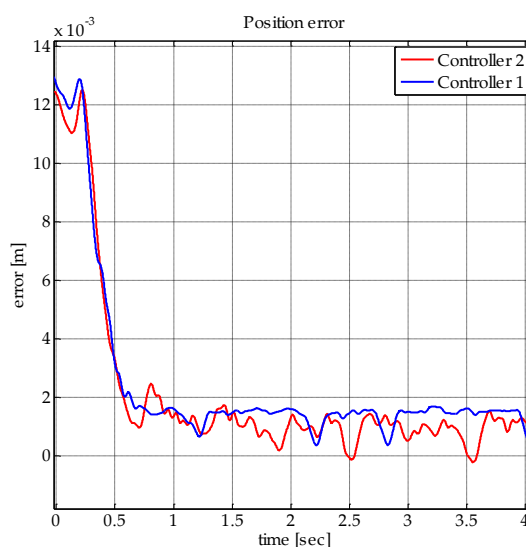
Το πείραμα για την αξιολόγηση της απόκρισης του δεύτερου ελεγκτή έγιναν με διαφορετική αρχική γωνία ($\phi(0)=-15^\circ$, ωστόσο η συμπεριφορά του συστήματος παρέμεινε η ίδια συγκρινόμενη με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Επίσης επιλέχθηκε $kr = 1290$. Παρατηρείται ότι η δύναμη συγκλίνει στα 10 N αρκετά γρήγορα, σε χρόνο

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

παραπλήσιο με αυτό της προσομοίωσης (περίπου 1 sec) (εικόνα 5.9). Επιπλέον η απόκριση ως προς το σφάλμα θέσης και ο χρόνος αποκατάστασης θεωρούνται ικανοποιητικά και συμβαδίζουν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της προσομοίωσης (περίπου 0.5 sec) (εικόνα 5.10). Από το διάγραμμα της ταχύτητας ολίσθησης (εικόνα 5.11) εξάγεται το συμπέρασμα ότι το δάκτυλο κατά την εκκίνηση περιστρέφεται ελαφρά γεγονός που το υποδηλώνει η θετική τιμή της. Η μέγιστη τιμή που λαμβάνει η ταχύτητα είναι σημαντικά μικρότερη από την αντίστοιχη του πρώτου ελεγκτή και μηδενίζεται σε μικρότερο χρονικό διάστημα, οπότε προκύπτει και πειραματικά ότι ο δεύτερος ελεγκτής βελτιώνει της συνθήκες κύλισης για το δάκτυλο. Ο τελικός προσανατολισμός του δακτύλου είναι αποτέλεσμα της αρχικής περιστροφής και στη συνέχεια κύλισης του δακτύλου προς την επιθυμητή τελική θέση και αυτό φαίνεται και στο αντίστοιχο διάγραμμα (εικόνα 5.12) όπου η τιμή της γωνίας του τελικού προσανατολισμού υπερβαίνει τη θεωρητική, η οποία είναι $\phi=5.23^\circ$. Η αρχική και τελική θέση του δακτύλου με τη εφαρμογή του δεύτερου ελεγκτή φαίνεται στην εικόνα (5.13)

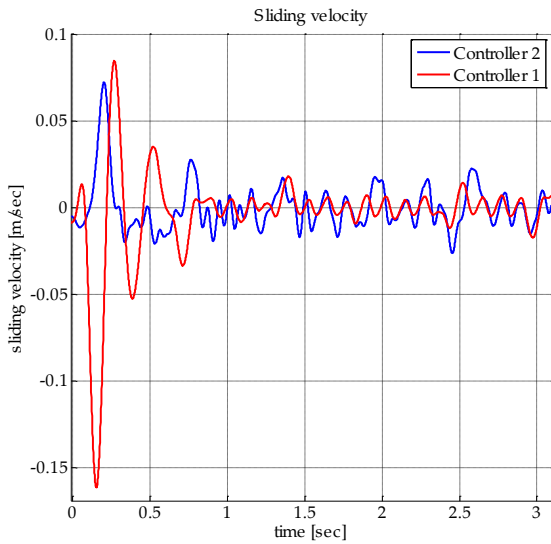


Εικόνα 5.9: Κάθετη δύναμη

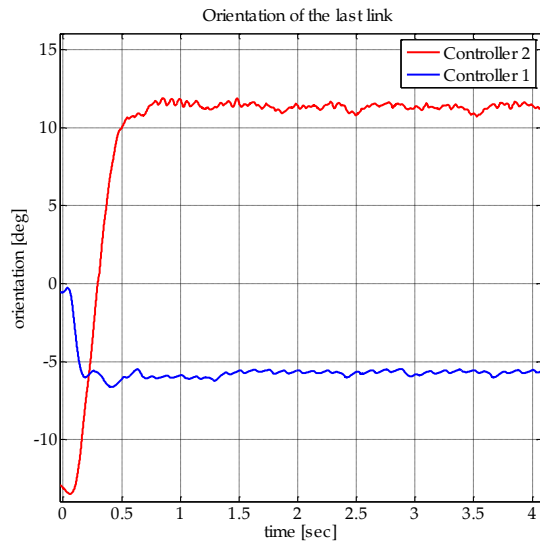


Εικόνα 5.10: Σφάλμα θέσης

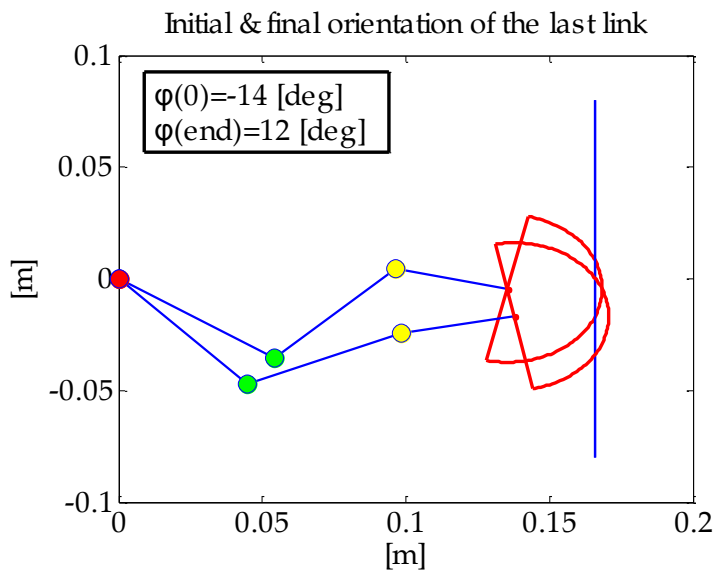
Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.



Εικόνα 5.11: Ταχύτητα ολίσθησης



Εικόνα 5.12: Προσανατολισμός του άκρου



Εικόνα 5.13: Αρχική και τελική θέση του δακτύλου για το πείραμα του δεύτερου ελεγκτή

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

5.3 Πειραματικά αποτελέσματα ελεγκτή για τη δύναμη και τη θέση και την κύλιση

Τα αποτελέσματα για τον τρίτο ελεγκτή δεν ήταν τα αναμενόμενα. Συγκεκριμένα το σύστημα γίνεται ασταθές από την αρχή του πειράματος και το δάκτυλο εκτελεί ταλαντώσεις. Η θεωρητική ανάλυση της λειτουργίας του ελεγκτή προϋποθέτει ότι το σφάλμα που αφορά την κίνηση κύλισης e_r (σχέση 3.8) είναι μηδέν κατά την εκκίνηση, δεδομένου ότι η αρχική γωνιακή ταχύτητα $\dot{\varphi}(0)$ θεωρείται 0 και $y_c \equiv y_c(0)$. Ο θόρυβος όμως που υπάρχει στα σήματα από τα ποτενσιόμετρα λαμβάνεται από το σύστημα ως μεταβολή στην θέση των αρθρώσεων του δακτύλου οπότε, παραγωγίζοντας τα σήματα αυτά για να υπολογιστεί η γωνιακή ταχύτητα, προκύπτει ένα σημαντικό σήμα $\dot{\varphi}(0) \neq 0$. Το παραπάνω φαινόμενο εντείνεται κι από το γεγονός ότι για τις ανάγκες του πειράματος απαιτείται το δάκτυλο να ασκεί μια αρχική δύναμη στην επιφάνεια πριν ξεκινήσει την κίνηση. Η απαίτηση αυτή ωθεί τους κινητήρες να εκτελούν μικρές κινήσεις διόρθωσης για να διατηρήσουν τη δύναμη.

Τα παραπάνω φαινόμενα δημιουργούν μια αυξημένη ροπή στο άκρο του δακτύλου. Οι συνθήκες τριβής ανάμεσα στο υλικό του ακροδακτύλου και την επιφάνεια δεν είναι ικανές να διατηρήσουν σε επαφή τα δύο μέρη με αποτέλεσμα το σύστημα να οδηγείται σε αστάθεια.

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

6 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε ο έλεγχος δύναμης και θέσης ενός ρομποτικού δακτύλου με παραμορφώσιμο άκρο καθώς κινείται πάνω σε επίπεδη και άκαμπτη επιφάνεια. Εξετάστηκε το κατά πόσο είναι εφικτό, η εφαρμογή συγκεκριμένων νόμων ελέγχου να επιτύχουν την άσκηση συγκεκριμένης δύναμης από το δάκτυλο προς την επιφάνεια και ταυτόχρονα εκτελώντας κίνηση κύλισης να μεταφερθεί σε μια τελική επιθυμητή θέση. Επίσης αξιολογήθηκε η απαίτηση, ο παραπάνω έλεγχος να πραγματοποιείται χωρίς την χρήση αισθητηρίων δύναμης ή συστημάτων μηχανικής όρασης, αλλά με μόνες παραμέτρους τις μεταβλητές των αρθρώσεων.

Από τη μελέτη της δυναμικής ανάλυσης του συστήματος εξάγεται το συμπέρασμα ότι, προκειμένου να μελετηθεί η κίνηση ενός ρομποτικού δακτύλου πάνω σε μια επιφάνεια όπου οι συνθήκες επαφής που επικρατούν είναι άγνωστες, πρέπει να υιοθετηθεί κατάλληλο δυναμικό μοντέλο στο οποίο δεν περιλαμβάνονται κινηματικοί περιορισμοί. Εφόσον κατά τη δυναμική ανάλυση τέτοιων συστημάτων θεωρηθεί εκ των προτέρων εξασφαλισμένη η κίνηση κύλισης, ενδέχεται οι προσομοιώσεις να οδηγήσουν σε εσφαλμένα αποτελέσματα.

Τα πειράματα των προσομοιώσεων έδειξαν ότι και οι τρεις ελεγκτές επιτυγχάνουν τους βασικούς στόχους, δηλαδή την επιβολή της επιθυμητής δύναμης και της σύγκλισης του σφάλματος θέσης στο μηδέν. Επίσης παρουσιάζουν την ίδια απόδοση για ένα εύρος τιμών των επιθυμητών παραμέτρων χωρίς την επιπλέον ρύθμιση των κερδών των ελεγκτών.

Αναφορικά με τις τιμές των κερδών φαίνεται να επηρεάζουν την απόκριση του συστήματος. Μικρές τιμές για το κέρδος k_y μειώνουν την ταχύτητα απόκρισης του συστήματος, ωστόσο, όσο αφορά τους δύο πρώτους ελεγκτές, αυξάνουν την πιθανότητα το δάκτυλο να εκτελέσει κίνηση κύλισης. Επίσης μεγάλες τιμές του k_r ενδέχεται να οδηγήσουν το δάκτυλο να περιστραφεί κατά την εκκίνηση. Συμπερασματικά μπορεί να ειπωθεί ότι το είδος της κίνησης, εφαρμόζοντας τους δύο πρώτους ελεγκτές, εξαρτάται από τη ρύθμιση των κερδών και τις συνθήκες επαφής που επικρατούν.

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

Ο τρίτος ελεγκτής παρατηρείται ότι βελτιώνει την ποιότητα της κίνησης ακόμα και στην περίπτωση όπου ο συντελεστή τριβής της επιφάνειας είναι μικρός γεγονός που ευνοεί την ολίσθηση. Με το πρόσθετο σήμα ελέγχου F_{rol} οδηγεί το δάκτυλο να εκτελέσει κίνηση κύλισης σχεδόν από την εκκίνηση.

Τα πειραματικά αποτελέσματα όπως παρουσιάστηκαν επιβεβαιώνουν σε ένα ικανοποιητικό βαθμό τα αντίστοιχα των προσομοιώσεων. Παρόλο τον θόρυβο στα σήματα ελέγχου που επηρεάζει την απόκριση του συστήματος, παρατηρείται ότι ο τρόπος που μεταβάλλονται οι εξεταζόμενες παράμετροι καθώς και οι τελικές τιμές που επιτυγχάνονται συγκλίνουν με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Η αδυναμία πραγματοποίησης πειραμάτων για τον τρίτο νόμο ελέγχου οφείλεται στο γεγονός ότι το σύστημα γινόταν ασταθές. Ο λόγος της αστάθειας έγκειται στον ηλεκτρικό θόρυβο από τα ποτενσιόμετρα των κινητήρων, ο οποίος δημιουργεί λανθασμένα σήματα ελέγχου και τα οποία, με βάση τη θεωρία, πρέπει να είναι μηδέν κατά την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας.

Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.. Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

Βιβλιογραφία

- [1] Fasoulas J., Doulgeri Z.: “Active Control of Rolling Manoeuvres of a Robotic Finger with Hemispherical Tip”, *International Journal of Humanoid Robotics*, Vol7, No 1 pp183-212, (2010)
- [2] Fasoulas J., Doulgeri Z.: “A Controller to Achieve Robotic Soft Fingertip Rolling and Position/Force Regulation Using Motion Variables”, *European Control Conference*, (2007)
- [3] Δουλγέρη Ζ.: “Ρομποτική: Κινηματική, Δυναμική και Έλεγχος Αρθρωτών Βραχιόνων”, Εκδόσεις Κριτική, 2007
- [4] Craig J. J.: “Introduction to Robotics: Mechanics and Control Third Edition”, Pearson Prentice Hall, 2005
- [5] Fu K. S., Gonzalez R. C., Lee C. S. G.: “Robotics: Control, Sensing, Vision and Intelligence”, McGraw-Hill, 1987
- [6] Σφακιωτάκης Μ.: “Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου ΙΙ, Διαλέξεις Θεωρίας”, ΤΕΙ Κρήτης, Τμήμα Ηλεκτρολογίας, 2011
- [7] Χαριζοπούλου Χ.: “Έλεγχος Κύλισης Ρομποτικού Παραμορφώσιμου Ακροδακτύλου”, Διπλωματική Εργασία ΑΠΘ, 2005