



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία
**ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗ, ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ
ΚΑΙ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΘΡΩΠΟΜΟΡΦΟΥ
ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΧΕΡΙΟΥ**

ΚΑΛΑΪΤΖΑΚΗΣ ΣΩΤΗΡΙΟΣ ΒΕΝΙΖΕΛΟΣ
ΤΜ6613

Επιβλέπων καθηγητής: Δρ. Φασουλάς Ιωάννης

ΗΡΑΚΛΕΙΟ 2023



**HELLENIC MEDITERRANEAN UNIVERSITY
DEPARTMENT of MECHANICAL ENGINEERING**

**THESIS
RECONSTRUCTION, EXPERIMENTAL
EVALUATION AND KINEMATIC ANALYSIS
OF ANTHROPOMORPHIC ROBOTIC HAND**

**KALAITZAKIS SOTIRIOS VENIZELOS
TM6613**

Supervisor: Dr. Fasoulas Ioannis

HERAKLION 2023



“Οι μόνοι ευτυχισμένοι άνθρωποι που ξέρω είναι εκείνοι που δουλεύουν καλά πάνω σε κάτι που θεωρούν σημαντικό.”

“Η καλύτερη μοίρα, η πιο υπέροχη καλοτυχία που μπορεί να έχει ένα ανθρώπινο πλάσμα είναι να πληρώνεται για να κάνει αυτό που αγαπά παθιασμένα να κάνει.”

Abraham Maslow, 1908-1970, Αμερικανός ψυχολόγος

[This page intentionally left blank]

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Μαρία και Αντώνη Καλαϊτζάκη για την στήριξη που μου έδειξαν, και συνεχίζουν να μου δείχνουν, καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου. Για την οικονομική στήριξη που μου παρείχαν αυτά τα χρόνια, αλλά κυρίως την πνευματική τους αρωγή, σε όλη την πορεία της ακαδημαϊκής μου διαδρομής. Εν συνεχεία, ευχαριστώ όλους τους φίλους, τους συνάδελφους και τους συμφοιτητές μου, που στάθηκαν δίπλα μου και πορευτήκαμε μαζί.

Καταλύτης στην ακαδημαϊκή μου πορεία στάθηκε η σύντροφος μου Άννα Ορφανουδάκη, όπου με την υπομονή, την αγάπη και το πείσμα της με βοηθάει να εξελίσσομαι καθημερινώς.

Σημαντικός παράγοντας στην εξέλιξη μου, στάθηκαν και οι μέντορες-καθηγητές μου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω κυρίως τον καθηγητή που μου εμπιστεύτηκε να φέρω εις πέρας την παρούσα διπλωματική εργασία, τον Δρ. Ιωάννη Φασουλά. Καθώς υπήρξαν σημαντικές οι συμβουλές του και η καθοδήγησή του καθ' όλη την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας μου, για την διεκπεραίωσή της, αλλά και των σπουδών μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Δρ. Εμμανουήλ Καββουσάνο, για την μετάδοση της λατρείας του για τα ρομποτικά συστήματα και τους αυτοματισμούς, με σκοπό να αποφασίσω για τον κλάδο που θέλω να ακολουθήσω στην μετέπειτα πορεία μου. Καθώς και τον καθηγητή Δρ. Μιχαήλ Σφακιωτάκη για τις γνώσεις που διαθέτει αλλά κυρίως την ευθύτητα του ως καθηγητής, και την άριστη συνεργασία μας.

Τον Δρ. Νικόλαο Παπαδάκη για τις απίστευτες γνώσεις που διαθέτει και που μου μετέδωσε, και την απίστευτη εκτίμηση που του έχω. Τον Δρ. Παναγιώτη Πολυγερινό για την άριστη συνεργασία μας, για τις σημαντικές συμβουλές και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε. Και όλους τους υπόλοιπους καθηγητές-μέντορες που στάθηκαν φάρος κατά την διάρκεια των σπουδών μου στις γνώσεις που μου παρείχαν.

Με γνώμονα την αγάπη που έχω για το επάγγελμα του Μηχανολόγου Μηχανικού και ιδιαίτερα στην ειδικότητα της Ρομποτικής-Μηχατρονικής, καθώς και την διάθεση μου να δημιουργώ θα πορευτώ στην επαγγελματική μου ζωή, με αρχή την διπλωματική μου εργασία.

ΣΒ Καλαϊτζάκης

For more information visit the website:

www.svkalaitzakis.com

Abstract

In the present thesis, the reconstruction, experimental evaluation, and kinematic analysis of the anthropomorphic robotic hand are studied. Initially a kinematic analysis is made of the movement of the human hand.

The existing anthropomorphic robotic arm is presented, and then the electronic and mechanical parts of the robotic arm are inspected. The reconstruction of parts and covers for the robotic arm is carried out. As well as the implementation of an improved control system, for the movement of the fingers of the robotic hand, using voice commands.

The experimental evaluation of the anthropomorphic robotic hand in the use of an autonomous handle for grabbing objects is studied, with the use of some pre-handles. As well as various gestures, it has the ability to perform the robotic hand, obeying the commands it receives through the voice recognition system.

The kinematic analysis of the robotic hand based on motion equations resulting from the use of computer vision is also studied. The equations of motion are approached by two methods, a linear relation, and a third-degree polynomial relation.

Then, by conducting experiments, certain characteristics of the robotic fingers are determined. The characteristics of the robotic fingers determined are the constant of the pair of springs that allow bending of the robotic fingers, the coefficient of friction of the tendon with the phalanges of the robotic fingers, but also the masses and moment of inertia of the robotic fingers.

Finally, using the Abaqus software, a simulation of the experimental set-up (to find the constant of the pair of springs) is carried out, so that in the place of the spring another solid material is placed that will bend and allow the bending of the robotic fingers, with similar behavior.

Keywords: robotic hand, voice commands, kinematic analysis, experimental evaluation, reconstruction, computer vision

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η ανακατασκευή, η πειραματική αποτίμηση και η κινηματική ανάλυση ενός ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού. Αρχικά γίνεται μια κινηματική ανάλυση για την κίνηση του ανθρώπινου χεριού.

Παρουσιάζεται το υπάρχων ανθρωπόμορφο ρομποτικό χέρι, και στην συνέχεια πραγματοποιείται ο έλεγχος των ηλεκτρονικών και μηχανικών μερών του ρομποτικού χεριού. Πραγματοποιείται η ανακατασκευή τμημάτων και καλυμμάτων για το ρομποτικό χέρι. Καθώς και η υλοποίηση βελτιωμένου συστήματος ελέγχου, για την κίνηση των δακτύλων του ρομποτικού χεριού, με την χρήση φωνητικών εντολών.

Μελετάται η πειραματική αποτίμηση του ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού στην χρήση αυτόνομης λαβής για την αρπαγή αντικείμενων, με την χρήση κάποιων προ-λαβών. Όπως και διαφόρων χειρονομιών, που έχει την δυνατότητα να πραγματοποιήσει το ρομποτικό χέρι, υπακούοντας τις εντολές που δέχεται μέσω του συστήματος των φωνητικών εντολών.

Επίσης μελετάται η κινηματική ανάλυση των ρομποτικών δακτύλων του χεριού με βάση εξισώσεις κίνησης, που προκύπτουν με την χρήση μηχανικής όρασης. Οι εξισώσεις κίνησης προσεγγίζονται με δύο μεθόδους μια γραμμική σχέση και μια πολυωνυμική σχέση τρίτου βαθμού.

Στην συνέχεια με την διεξαγωγή πειραμάτων καθορίζονται ορισμένα χαρακτηριστικά των ρομποτικών δακτύλων. Τα χαρακτηριστικά των ρομποτικών δακτύλων που καθορίζονται είναι η σταθερά του ζεύγους των ελατηρίων που επιτρέπουν την κάμψη των ρομποτικών δακτύλων, ο συντελεστής τριβής του τένοντα με τις φάλαγγες των ρομποτικών δακτύλων, αλλά και οι μάζες και οι ροπές αδράνειας των ρομποτικών δακτύλων.

Τέλος με την χρήση του λογισμικού Abaqus, πραγματοποιείται προσομοίωση της πειραματικής διάταξης (για την εύρεση της σταθεράς του ζεύγους των ελατηρίων), ώστε στην θέση του ελατηρίου να τοποθετηθεί ένα άλλο υλικό solid που θα κάμπτεται και θα επιτρέπει την κάμψη των ρομποτικών δακτύλων, με παρόμοια συμπεριφορά.

Λέξεις κλειδιά: ρομποτικό χέρι, φωνητικές εντολές, κινηματική ανάλυση, πειραματική αποτίμηση, ανακατασκευή, μηχανική όραση.

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	7
ABSTRACT	8
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	9
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	10
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	13
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	14
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΩΝ	17
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	20
1.1 ΓΕΝΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	20
1.2 ΑΝΘΡΩΠΟΜΟΡΦΑ ΡΟΜΠΟΤΙΚΑ ΧΕΡΙΑ	21
1.2.1 Ρομποτικά χέρια ως προσθετικά μέλη.....	21
1.3 ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΧΕΡΙΟΥ-ΚΥΡΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ HARDWARE	22
1.3.1 Μικροελεγχτές-controllers.....	22
1.3.2 Force Sensitive Resistor (FSR).....	24
1.3.3 Αναγνώριση φωνητικών εντολών.....	25
2 ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΧΕΡΙ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΔΑΚΤΥΛΩΝ	27
2.1 ΑΝΑΤΟΜΙΑ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΥ ΧΕΡΙΟΥ	27
2.2 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΚΙΝΗΣΗΣ ΑΝΘΡΩΠΙΝΩΝ ΔΑΚΤΥΛΩΝ.....	28
2.2.1 Στατικοί περιορισμοί	29
2.2.2 Δυναμικοί περιορισμοί.....	29
2.2.3 Επίδραση των αρθρώσεων στον προσανατολισμό	31
3 ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΝΘΡΩΠΟΜΟΡΦΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΧΕΡΙΟΥ	33
3.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΑΛΑΙΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΧΕΡΙΟΥ	33
3.1.1 Ανακατασκευή τρισδιάστατων μοντέλων δακτύλων ρομποτικού χεριού.....	35
3.2 Έλεγχος λειτουργίας αισθητήριων και επενεργητών	36
3.2.1 Έλεγχος FSR.....	37
3.2.2 Έλεγχος επενεργητών	37
3.3 ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ	38
3.4 ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ	40
3.4.1 Ηλεκτρικό κύκλωμα συστήματος ελέγχου	40
3.4.2 Προγραμματισμός συστήματος ελέγχου ρομποτικού χεριού	43
3.5 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΝΕΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΧΕΡΙΟΥ	45
4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ	46
4.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	46
4.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	47
4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	49
4.3.1 Διάφορα είδη χειρονομιών με την χρήση φωνητικών εντολών.....	49
4.3.2 Αυτόνομες λαβές με την χρήση προ-λαβών.....	51
4.3.2.1 Πειραματική δοκιμή αυτόνομης λαβής Power Grasp.....	53
4.3.2.2 Πειραματική δοκιμή αυτόνομης λαβής Three Finger Grip	62
4.3.2.3 Πειραματική δοκιμή αυτόνομης λαβής Precision Grip	65
4.3.2.4 Πειραματική δοκιμή αυτόνομης λαβής Lateral Prehension	69

4.3.2.5	Αποτελέσματα αυτόνομων λαβών	70
4.3.3	Πειραματική μέτρηση δύναμης δακτύλων.....	70
5	ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	72
5.1	ΓΕΝΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	72
5.2	ΕΠΙΛΥΣΗ ΕΥΘΥ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟΥ ΤΡΙΩΝ ΒΑΘΜΩΝ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ	73
5.3	ΕΠΙΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΕΥΡΕΣΗ ΓΩΝΙΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ	74
5.4	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ.....	76
5.5	ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	79
5.5.1	Περιγραφή του πρωτοκόλλου	79
5.5.1.1	Παραδοχές κινηματικής ανάλυσης.....	79
5.5.1.2	Τάνυση του νήματος	79
5.5.1.3	Μετατόπιση Δακτύλου.....	79
5.5.1.4	Κάμερα.....	80
5.5.1.5	Φωτισμός.....	80
5.5.1.6	Βαθμονόμηση της κάμερας	80
5.5.1.7	Πρόγραμμα Matlab	83
5.6	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	83
5.7	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	84
5.7.1	Ρομποτικό δάκτυλο Pinky (Μικρό).....	84
5.7.2	Ρομποτικό δάκτυλο Ring (Παράμεσος).....	88
5.7.3	Ρομποτικό δάκτυλο Thumb (Αντίχειρα)	93
5.7.4	Ρομποτικό δάκτυλο Middle (Μεσαίο).....	98
5.7.5	Ρομποτικό δάκτυλο Index (Δείκτη).....	105
5.8	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	111
6	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ ΔΑΚΤΥΛΩΝ	112
6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	112
6.2	ΜΕΤΡΗΣΗ ΖΕΥΓΟΥΣ ΕΛΑΤΗΡΙΩΝ ΣΕ ΚΑΜΨΗ	112
6.2.1	Γενική περιγραφή.....	112
6.2.2	Πειραματική διάταξη.....	112
6.2.3	Ανάλυση πειραμάτων.....	113
6.2.4	Αποτελέσματα πειραμάτων.....	116
6.3	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΤΑΘΕΡΑΣ ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ ΔΑΚΤΥΛΩΝ	116
6.3.1	Γενική περιγραφή.....	116
6.3.2	Πειραματική διάταξη.....	117
6.3.3	Ανάλυση πειραμάτων.....	118
6.3.4	Αποτελέσματα πειραμάτων.....	119
6.4	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΡΙΒΗΣ	120
6.4.1	Πειραματική διάταξη.....	121
6.4.2	Ανάλυση πειραμάτων.....	122
6.4.3	Αποτελέσματα πειραμάτων.....	123
6.5	ΜΑΖΕΣ ΚΑΙ ΡΟΠΕΣ ΑΔΡΑΝΕΙΑΣ ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ ΔΑΚΤΥΛΩΝ	123
6.5.1	Γενική περιγραφή.....	123
6.5.2	Διαστάσεις ρομποτικών δακτύλων	124
6.5.3	Μάζες και ροπές αδράνειας	126
6.6	ΣΥΝΟΠΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	126
7	SIMULATION ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ ΔΑΚΤΥΛΩΝ.....	128
7.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	128
7.2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΑΒΑQUS	128
7.3	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ	129
7.3.1	Μηχανικές ιδιότητες υλικών.....	129

7.4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	130
8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	132
8.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΕΡΕΥΝΑΣ	132
8.1.1	Συμπέρασμα πειραματικών δοκιμών.....	132
8.1.2	Συμπέρασμα κινηματικής μελέτης.....	133
8.2	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ-ΕΞΕΛΙΞΗ..... ΣΦΑΛΜΑ! ΔΕΝ ΕΧΕΙ ΟΡΙΣΤΕΙ ΣΕΛΙΔΟΔΕΙΚΤΗΣ.	
9	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	134
9.1	ΕΛΛΗΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	134
9.2	ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	134
9.3	ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ	136

Περιεχόμενα Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1: ΜΕΓΙΣΤΑ ΚΑΙ ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΟΡΙΑ ΨΕΥΔΟΑΝΑΛΟΓΙΚΟΥ ΠΑΛΜΟΥ ΤΟΥ ΕΛΕΓΚΤΗ SSC-32 ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΩΝ SERVO.....	40
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2: ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΣΕΙΣ ΘΥΡΩΝ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ ARDUINO NANO ΓΙΑ ΤΙΣ ΑΝΑΛΟΓΙΚΕΣ ΘΥΡΕΣ ΠΟΥ ΣΥΝΔΕΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΑ ΔΥΝΑΜΗΣ (FSR), ΚΑΙ ΤΙΣ ΘΥΡΕΣ ΤΟΥ ΕΛΕΓΚΤΗ SSC-32 ΓΙΑ ΤΑ ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΑ SERVO.....	41
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1: ΦΡΑΣΕΟΛΟΓΙΑ ΧΕΙΡΟΝΟΜΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΦΩΝΗΤΙΚΩΝ ΕΝΤΟΛΩΝ	51
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2: ΤΟ ΒΑΡΟΣ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΣΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΕΙΚΟΝΑ 5.6.....	52
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕ ΤΑ ΠΟΣΟΣΤΑ ΕΠΙΤΥΧΙΑΣ ΑΡΠΑΓΗΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΤΩΝ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΛΑΒΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΠΡΟ-ΛΑΒΩΝ.....	70
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1: ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ Δx ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΕΠΕΝΕΡΓΗΤΩΝ ΛΟΓΟ ΤΑΝΥΣΗΣ ΤΩΝ ΤΕΝΟΝΤΩΝ.	80
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟ ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕ ΤΙΣ ΒΑΣΙΚΕΣ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΔΑΚΤΥΛΩΝ	111
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕ ΤΙΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΠΟΥ ΑΣΚΕΙΤΑΙ ΣΤΟΝ ΤΕΝΟΝΤΑ ΟΤΑΝ ΤΟ ΜΕΤΑΤΟΠΙΖΟΥΜΕ.	120
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2: ΟΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΑ ΡΟΜΠΟΤΙΚΑ ΔΑΚΤΥΛΑ ΤΡΙΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ.	125
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.3: ΟΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΑ ΡΟΜΠΟΤΙΚΑ ΔΑΚΤΥΛΑ ΔΥΟ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ.	126
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.4: ΜΑΖΕΣ ΚΑΙ ΡΟΠΕΣ ΑΔΡΑΝΕΙΑΣ ΤΩΝ ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ ΔΑΚΤΥΛΩΝ ΤΡΙΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ.....	126
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.5: ΜΑΖΕΣ ΚΑΙ ΡΟΠΕΣ ΑΔΡΑΝΕΙΑΣ ΤΩΝ ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ ΔΑΚΤΥΛΩΝ ΔΥΟ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ.	126
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.6: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕ ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ ΔΑΚΤΥΛΩΝ ΔΥΟ ΚΑΙ ΤΡΙΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ.	127

Περιεχόμενα Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1.1: ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΚΑΙ ΘΥΡΩΝ ΤΟΥ ARDUINO NANO.	23
ΕΙΚΟΝΑ 1.2: ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΚΑΙ ΘΥΡΩΝ ΤΟΥ SERVO CONTROLLER SSC-32.	24
ΕΙΚΟΝΑ 1.3: ΤΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟ FSR ΚΑΙ ΤΑ ΜΕΛΗ ΠΟΥ ΤΟ ΑΠΟΤΕΛΟΥΝ.	24
ΕΙΚΟΝΑ 1.4: ΤΟ ΚΙΤ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ ΦΩΝΗΣ EASYVR ΜΕ ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΜΕΛΩΝ ΚΑΙ ΘΥΡΩΝ ΠΟΥ ΤΟ ΑΠΟΤΕΛΟΥΝ.	25
ΕΙΚΟΝΑ 2.1: Η ΑΝΑΤΟΜΙΑ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΥ ΧΕΡΙΟΥ ΜΕ ΤΙΣ ΟΝΟΜΑΣΙΕΣ ΤΩΝ ΦΑΛΑΓΓΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ.	27
ΕΙΚΟΝΑ 2.2: ΟΡΟΛΟΓΙΑ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΚΙΝΗΣΕΩΝ ΔΑΧΤΥΛΩΝ.	28
ΕΙΚΟΝΑ 2.3: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΕΣΩΔΑΚΤΥΛΙΩΝ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ, (Α)ΜΕΣΟΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΣΟΣ, (Β)ΜΕΣΟΣ, ΠΑΡΑΜΕΣΟΣ ΚΑΙ ΜΙΚΡΟ ΔΑΚΤΥΛΟ, (C)ΑΠΑΓΩΓΗ-ΠΡΟΣΑΓΩΓΗ ΜΕΤΑΞΥ ΠΑΡΑΜΕΣΟΥ ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΥ, (D)ΠΑΡΑΜΕΣΟΣ ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΣ, (Ε)ΔΕΙΚΤΗΣ ΚΑΙ ΜΕΣΟΣ.....	30
ΕΙΚΟΝΑ 3.1: ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ ΣΤΟ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟ ΧΕΡΙ.	33
ΕΙΚΟΝΑ 3.2: ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΚΥΡΙΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΑΝΘΡΩΠΟΜΟΡΦΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΧΕΡΙΟΥ, (Α) ΤΟ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟ ΧΕΡΙ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΛΑΒΗ ΤΟΥ, (Β) ΑΡΧΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΧΕΡΙΟΥ.	34
ΕΙΚΟΝΑ 3.3: ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΚΑΙ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΣΧΕΔΙΟ ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ ΔΑΚΤΥΛΩΝ, (Α) ΔΕΙΚΤΗ-ΜΕΣΑΙΟΥ, (Β) ΠΑΡΑΜΕΣΟΥ-ΜΙΚΡΟΥ, (C) ΑΝΤΙΧΕΙΡΑ.	36
ΕΙΚΟΝΑ 3.4: ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΧΕΡΙΟΥ, (Α) ΕΛΕΓΧΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΗΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΩΝ FSR, (Β) ΕΛΕΓΧΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΗΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΕΠΕΝΕΡΓΗΤΩΝ.....	37
ΕΙΚΟΝΑ 3.5: ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΕΠΕΝΕΡΓΗΤΗΣ (L-12 ΑCΤΥΟΝΙΧ) ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΩΝ ΤΕΝΟΝΤΩΝ (ΝΗΜΑΤΩΝ) ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΧΕΡΙΟΥ, (Α) ΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΕΠΕΝΕΡΓΗΤΗ ΑΝΟΙΓΜΕΝΟ ΓΙΑ ΕΠΙΣΚΕΥΗ, (Β) ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΕΠΕΝΕΡΓΗΤΗ.....	38
ΕΙΚΟΝΑ 3.6: ΤΑ ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΑ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟ ΧΕΡΙ, (Α) ΚΑΛΥΜΜΑ-ΚΑΠΑΚΙ ΓΙΑ ΤΟ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟ ΧΕΡΙ, (Β) ΑΡΘΡΩΣΗ ΣΤΕΡΕΩΣΗΣ ΤΕΝΟΝΤΩΝ ΣΤΟΥΣ ΕΠΕΝΕΡΓΗΤΕΣ, (C) ΚΟΥΖΙΝΕΤΟ ΑΡΘΡΩΣΗΣ CMC ΑΝΤΙΧΕΙΡΑ, (D) ΚΑΠΑΚΙ ΑΝΤΙΧΕΙΡΑ ΓΙΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟ FSR.	39
ΕΙΚΟΝΑ 3.7: ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΧΕΡΙΟΥ.....	41
ΕΙΚΟΝΑ 3.8: ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΚΥΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΧΕΡΙΟΥ.	42
ΕΙΚΟΝΑ 3.9: ΣΧΕΔΙΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΧΕΡΙΟΥ.....	42
ΕΙΚΟΝΑ 3.10: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΕΝΤΟΛΩΝ ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΧΕΡΙΟΥ.	44
ΕΙΚΟΝΑ 3.11: ΤΟ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟ ΧΕΡΙ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ.	45
ΕΙΚΟΝΑ 4.1: ΔΙΑΤΑΞΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΜΟΡΦΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΧΕΡΙΟΥ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ-ΜΗΧΑΤΡΟΝΙΚΗΣ.	47
ΕΙΚΟΝΑ 4.2: ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΧΕΡΙΟΥ.	48
ΕΙΚΟΝΑ 4.3: ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ MATLAB SIMULINK ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ WORKSPACE.....	48
ΕΙΚΟΝΑ 4.4: ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΙΔΗ ΧΕΙΡΟΝΟΜΙΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΑΝΘΡΩΠΟΜΟΡΦΟ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟ ΧΕΡΙ ΜΙΜΟΥΜΕΝΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΕΣ ΧΕΙΡΟΝΟΜΙΕΣ.....	49
ΕΙΚΟΝΑ 4.5: ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΙΔΗ ΧΕΙΡΟΝΟΜΙΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΑΝΘΡΩΠΟΜΟΡΦΟ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟ ΧΕΡΙ ΜΙΜΟΥΜΕΝΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΕΣ ΧΕΙΡΟΝΟΜΙΕΣ ΣΥΜΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΑΝΤΙΧΕΙΡΑ.	50
ΕΙΚΟΝΑ 4.6: ΤΑ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΑ ΚΑΙ ΤΟ ΒΑΡΟΣ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΣΤΙΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ. (Α) ΜΠΟΥΚΑΛΙ ΕΜΦΙΑΛΩΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, (Β) ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΤΡΥΠΑΝΙ, (C) ΠΛΑΣΤΙΚΟ ΠΟΤΗΡΙ ΚΑΦΕ ΜΕ ΝΕΡΟ, (D) AMBU BAG, (Ε) ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΠΙΠΕΡΙΑ, (F) ΚΑΤΣΑΒΙΔΙ ΧΕΡΙΟΥ, (G) ΜΙΚΡΟ ΔΟΧΕΙΟ ΜΕ ΑΝΤΙΣΗΠΤΙΚΟ, (H) ΜΑΡΚΑΔΟΡΟΣ, (I) ΦΟΙΤΗΤΙΚΟ ΠΑΣΟ, (J) ΓΥΑΛΙΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ, (K) ΜΙΚΡΗ ΜΠΑΛΑ, (L) ΟΡΘΟΓΩΝΙΟ ΚΟΜΜΑΤΙ ΛΑΜΑΡΙΝΑΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ.	52
ΕΙΚΟΝΑ 4.7: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΑΥΤΟΝΟΜΗΣ ΛΑΒΗΣ ΓΙΑ ΜΠΟΥΚΑΛΙ ΜΕ ΝΕΡΟ, (Α) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ, (Β) ΤΕΛΙΚΗ ΘΕΣΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΛΑΒΗ, (C) ΑΡΠΑΓΗ, (D) ΚΙΝΗΣΗ ΣΕ ΑΛΛΟ ΣΗΜΕΙΟ.	54
ΕΙΚΟΝΑ 4.8: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΑΥΤΟΝΟΜΗΣ ΛΑΒΗΣ ΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΤΡΥΠΑΝΙ, (Α) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ, (Β) ΤΕΛΙΚΗ ΘΕΣΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΛΑΒΗ, (C) ΑΡΠΑΓΗ, (D) ΚΙΝΗΣΗ ΣΕ ΑΛΛΟ ΣΗΜΕΙΟ.	55
ΕΙΚΟΝΑ 4.9: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΑΥΤΟΝΟΜΗΣ ΛΑΒΗΣ ΓΙΑ ΠΛΑΣΤΙΚΟ ΠΟΤΗΡΙ ΚΑΦΕ, (Α) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ, (Β) ΤΕΛΙΚΗ ΘΕΣΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΛΑΒΗ, (C) ΑΡΠΑΓΗ, (D) ΚΙΝΗΣΗ ΣΕ ΑΛΛΟ ΣΗΜΕΙΟ.	57
ΕΙΚΟΝΑ 4.10: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΑΥΤΟΝΟΜΗΣ ΛΑΒΗΣ ΓΙΑ AMBU BAG, (Α) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ, (Β) ΤΕΛΙΚΗ ΘΕΣΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΛΑΒΗ, (C) ΑΡΠΑΓΗ, (D) ΚΙΝΗΣΗ ΣΕ ΑΛΛΟ ΣΗΜΕΙΟ.	58
ΕΙΚΟΝΑ 4.11: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΑΥΤΟΝΟΜΗΣ ΛΑΒΗΣ ΓΙΑ ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΠΙΠΕΡΙΑ, (Α) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ, (Β) ΤΕΛΙΚΗ ΘΕΣΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΛΑΒΗ, (C) ΑΡΠΑΓΗ, (D) ΚΙΝΗΣΗ ΣΕ ΑΛΛΟ ΣΗΜΕΙΟ.	60
ΕΙΚΟΝΑ 4.12: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΑΥΤΟΝΟΜΗΣ ΛΑΒΗΣ ΓΙΑ ΚΑΤΣΑΒΙΔΙ ΧΕΡΙΟΥ, (Α) ΤΕΛΙΚΗ ΘΕΣΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΛΑΒΗ, (C) ΑΡΠΑΓΗ, (C) & (D) ΚΙΝΗΣΗ ΣΕ ΑΛΛΑ ΣΗΜΕΙΑ.	61
ΕΙΚΟΝΑ 4.13: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΑΥΤΟΝΟΜΗΣ ΛΑΒΗΣ ΓΙΑ ΜΙΚΡΟ ΔΟΧΕΙΟ ΜΕ ΑΝΤΙΣΗΠΤΙΚΟ, (Α) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ, (Β) ΤΕΛΙΚΗ ΘΕΣΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΛΑΒΗ, (C) ΑΡΠΑΓΗ, (D) ΚΙΝΗΣΗ ΣΕ ΑΛΛΟ ΣΗΜΕΙΟ.	63

ΕΙΚΟΝΑ 4.14: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΑΥΤΟΝΟΜΗΣ ΛΑΒΗΣ ΓΙΑ ΜΙΚΡΗ ΜΠΑΛΑ, (Α) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ, (Β) ΤΕΛΙΚΗ ΘΕΣΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΛΑΒΗ, (C) ΑΡΠΑΓΗ, (D) ΚΙΝΗΣΗ ΣΕ ΑΛΛΟ ΣΗΜΕΙΟ.	64
ΕΙΚΟΝΑ 4.15: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΑΥΤΟΝΟΜΗΣ ΛΑΒΗΣ ΓΙΑ ΜΑΡΚΑΔΟΡΟ, (Α) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ, (Β) ΤΕΛΙΚΗ ΘΕΣΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΛΑΒΗ, (C) ΑΡΠΑΓΗ, (D) ΚΙΝΗΣΗ ΣΕ ΑΛΛΟ ΣΗΜΕΙΟ.	66
ΕΙΚΟΝΑ 4.16: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΑΥΤΟΝΟΜΗΣ ΛΑΒΗΣ ΓΙΑ ΓΥΑΛΙΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ, (Α) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ, (Β) ΤΕΛΙΚΗ ΘΕΣΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΛΑΒΗ, (C) ΑΡΠΑΓΗ, (D) ΚΙΝΗΣΗ ΣΕ ΑΛΛΟ ΣΗΜΕΙΟ.	67
ΕΙΚΟΝΑ 4.17: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΑΥΤΟΝΟΜΗΣ ΛΑΒΗΣ ΓΙΑ ΦΟΙΤΗΤΙΚΟ ΠΑΣΟ, (Α) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ, (Β) ΤΕΛΙΚΗ ΘΕΣΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΛΑΒΗ, (C) ΑΡΠΑΓΗ, (D) ΚΙΝΗΣΗ ΣΕ ΑΛΛΟ ΣΗΜΕΙΟ.	68
ΕΙΚΟΝΑ 4.18: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΑΥΤΟΝΟΜΗΣ ΛΑΒΗΣ ΓΙΑ ΛΑΜΑΡΙΝΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ, (Α) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ, (Β) ΤΕΛΙΚΗ ΘΕΣΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΛΑΒΗ, (C) ΑΡΠΑΓΗ, (D) ΚΙΝΗΣΗ ΣΕ ΑΛΛΟ ΣΗΜΕΙΟ.	69
ΕΙΚΟΝΑ 4.19: ΜΕΤΡΗΣΗ ΔΥΝΑΜΗΣ ΔΑΚΤΥΛΩΝ ΔΕΙΚΤΗ ΚΑΙ ΜΕΖΑΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΜΟΡΦΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΧΕΡΙΟΥ. Ι) Ο ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΣΚΕΙ ΜΙΑ ΔΥΝΑΜΗ ΠΕΡΙΠΟΥ 2 ΝΤ ΣΤΗΝ ΖΥΓΑΡΙΑ. ΙΙ) Ο ΔΕΙΚΤΗΣ ΜΑΖΙ ΜΕ ΤΟΝ ΜΕΖΑΙΟ ΑΣΚΟΥΝΕ ΔΥΝΑΜΗ ΠΕΡΙΠΟΥ 4 ΝΤ ΣΤΗΝ ΖΥΓΑΡΙΑ.	70
ΕΙΚΟΝΑ 5.1: ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΙΟΝΑ ΤΡΙΩΝ ΒΑΘΜΩΝ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ.	73
ΕΙΚΟΝΑ 5.2: ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΑΚΤΥΛΟΥ ΔΥΟ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ (ΜΙΚΡΟΥ-ΠΑΡΑΜΕΣΟΥ).	75
ΕΙΚΟΝΑ 5.3: ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΑΚΤΥΛΟΥ ΤΡΙΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ (ΔΕΙΚΤΗ-ΠΑΡΑΜΕΣΟΥ).	76
ΕΙΚΟΝΑ 5.4: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΥΡΕΣΗΣ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟΥ ΤΩΝ ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ ΔΑΚΤΥΛΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΑΣ ΤΩΝ ΕΛΑΤΗΡΙΩΝ.	77
ΕΙΚΟΝΑ 5.5: ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ ΔΑΚΤΥΛΩΝ.	78
ΕΙΚΟΝΑ 5.6: Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΜΑΤΛΑΒ CAMERA CALIBRATOR, (Α) ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΤΟΥ CHECKBOARD PATTERN ΜΕ ΤΙΣ ΑΝΙΧΝΕΥΜΕΝΕΣ ΓΩΝΙΕΣ, (Β) ΤΑ REPROJECTION ERRORS ΤΗΣ ΚΑΜΕΡΑΣ, (C) ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕ CAMERA-CENTRIC VIEW ΤΙΣ ΘΕΣΕΙΣ ΤΟΥ PATTERN.	82
ΕΙΚΟΝΑ 5.7: ΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΔΑΚΤΥΛΟΥ ΜΙΚΡΟΥ ΓΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ ΔΧ ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΤΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ ΜΕΣΑ ΑΠΟ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΑΤΛΑΒ, (Α) ΓΙΑ ΔΧ=0 ΜΜ, (Β) ΓΙΑ ΔΧ=4 ΜΜ, (C) ΓΙΑ ΔΧ=8 ΜΜ, (D) ΓΙΑ ΔΧ=12 ΜΜ, (Ε) ΓΙΑ ΔΧ=16 ΜΜ, (F) ΓΙΑ ΔΧ=19 ΜΜ.	88
ΕΙΚΟΝΑ 5.8: ΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΔΑΚΤΥΛΟΥ ΠΑΡΑΜΕΣΟΥ ΓΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ ΔΧ ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΤΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ ΜΕΣΑ ΑΠΟ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΑΤΛΑΒ, (Α) ΓΙΑ ΔΧ=0 ΜΜ, (Β) ΓΙΑ ΔΧ=4 ΜΜ, (C) ΓΙΑ ΔΧ=8 ΜΜ, (D) ΓΙΑ ΔΧ=12 ΜΜ, (Ε) ΓΙΑ ΔΧ=16 ΜΜ, (F) ΓΙΑ ΔΧ=19 ΜΜ.	93
ΕΙΚΟΝΑ 5.9: ΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΔΑΚΤΥΛΟΥ ΑΝΤΙΧΕΙΡΑ ΓΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ ΔΧ ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΤΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ ΜΕΣΑ ΑΠΟ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΑΤΛΑΒ, (Α) ΓΙΑ ΔΧ=0 ΜΜ, (Β) ΓΙΑ ΔΧ=4 ΜΜ, (C) ΓΙΑ ΔΧ=8 ΜΜ, (D) ΓΙΑ ΔΧ=12 ΜΜ, (Ε) ΓΙΑ ΔΧ=16 ΜΜ, (F) ΓΙΑ ΔΧ=20 ΜΜ.	98
ΕΙΚΟΝΑ 5.10: ΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΔΑΚΤΥΛΟΥ ΠΑΡΑΜΕΣΟΥ ΓΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ ΔΧ ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΤΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ ΜΕΣΑ ΑΠΟ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΑΤΛΑΒ, (Α) ΓΙΑ ΔΧ=0 ΜΜ, (Β) ΓΙΑ ΔΧ=4 ΜΜ, (C) ΓΙΑ ΔΧ=8 ΜΜ, (D) ΓΙΑ ΔΧ=12 ΜΜ, (Ε) ΓΙΑ ΔΧ=16 ΜΜ, (F) ΓΙΑ ΔΧ=19 ΜΜ.	104
ΕΙΚΟΝΑ 5.11: ΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΔΑΚΤΥΛΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΓΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ ΔΧ ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΤΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ ΜΕΣΑ ΑΠΟ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΑΤΛΑΒ, (Α) ΓΙΑ ΔΧ=0 ΜΜ, (Β) ΓΙΑ ΔΧ=4 ΜΜ, (C) ΓΙΑ ΔΧ=8 ΜΜ, (D) ΓΙΑ ΔΧ=12 ΜΜ, (Ε) ΓΙΑ ΔΧ=16 ΜΜ, (F) ΓΙΑ ΔΧ=19 ΜΜ.	111
ΕΙΚΟΝΑ 6.1: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΑΣ ΤΟΥ ΕΛΑΤΗΡΙΟΥ ΣΕ ΚΑΜΨΗ.	113
ΕΙΚΟΝΑ 6.2: ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΡΕΣΗ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ C ΠΟΥ ΑΣΚΕΙΤΑΙ Η ΔΥΝΑΜΗ F.	114
ΕΙΚΟΝΑ 6.3: ΓΩΝΙΑ ΣΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ ΣΤΕΛΕΧΟΥΣ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΑΣΚΗΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΒΑΡΩΝ (Α) ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΒΑΡΟΥΣ, (Β) ΓΙΑ ΒΑΡΟΣ 20 GR, (C) ΓΙΑ ΒΑΡΟΣ 50 GR, (D) ΓΙΑ ΒΑΡΟΣ 70 GR.	115
ΕΙΚΟΝΑ 6.4: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΑΣ ΤΩΝ ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ ΔΑΚΤΥΛΩΝ.	117
ΕΙΚΟΝΑ 6.5: ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΗ ΤΟΥ ΤΕΝΟΝΤΑ ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΔΑΚΤΥΛΟΥ ΤΡΙΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΑΣΚΗΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΒΑΡΩΝ (Α) ΜΕ 0 ΝΤ ΕΧΟΥΜΕ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ 0 ΜΜ, (Β) ΜΕ 2 ΝΤ ΕΧΟΥΜΕ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ 4 ΜΜ, (C) ΜΕ 4 ΝΤ ΕΧΟΥΜΕ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ 8 ΜΜ, (D) ΜΕ 6 ΝΤ ΕΧΟΥΜΕ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ 14 ΜΜ.	118
ΕΙΚΟΝΑ 6.6: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΙΒΗΣ ΤΟΥ ΤΕΝΟΝΤΑ ΤΩΝ ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ ΔΑΚΤΥΛΩΝ.	122
ΕΙΚΟΝΑ 6.7: ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΡΕΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΤΡΙΒΗΣ ΤΟΥ ΤΕΝΟΝΤΑ ΜΕ ΤΙΣ ΦΑΛΑΓΓΕΣ ΤΩΝ ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ ΔΑΚΤΥΛΩΝ.	123
ΕΙΚΟΝΑ 6.8: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΤΩΝ ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ ΔΑΚΤΥΛΩΝ, ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΕ ΜΙΑ ΑΡΘΡΩΣΗ ΠΟΥ ΣΥΝΔΕΙ ΔΥΟ ΦΑΛΑΓΓΕΣ.	124
ΕΙΚΟΝΑ 6.9: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ ΔΑΚΤΥΛΩΝ ΤΡΙΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ.	125
ΕΙΚΟΝΑ 6.10: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ ΔΑΚΤΥΛΩΝ ΔΥΟ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ.	125
ΕΙΚΟΝΑ 7.1: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕΣΑ ΑΠΟ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΑΒΑQUΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΡΟΠΕΣ, (Α) ΑΣΚΗΣΗ ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ ΡΟΠΗΣ, (Β) ΑΣΚΗΣΗ ΡΟΠΗΣ 0.006 ΝΜ ΚΑΙ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ ΤΟΥ ΠΑΝΩ ΣΤΕΛΕΧΟΥΣ 0.57 RAD, (C) ΑΣΚΗΣΗ ΡΟΠΗΣ 0.019 ΝΜ ΚΑΙ	

ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ ΤΟΥ ΠΑΝΩ ΣΤΕΛΕΧΟΥΣ 1.09 RAD, (D) ΑΣΚΗΣΗ ΡΟΠΗΣ 0.022 NM ΚΑΙ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ ΤΟΥ ΠΑΝΩ ΣΤΕΛΕΧΟΥΣ 1.14
RAD.130

Περιεχόμενα Γραφικών Παραστάσεων

ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 2.1: ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΡΘΡΩΣΗ MCP, (Α) ΣΧΕΣΕΙΣ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗΝ Q ₁ ΓΙΑ ΤΑ ΔΑΚΤΥΛΑ IMRP (INDEX, MIDDLE, RING, RINKY), (Β) ΣΧΕΣΕΙΣ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗΝ Q _{1(THUMB)} ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΝΤΙΧΕΙΡΑ.	32
ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 4.1: ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟ FSR ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΧΡΟΝΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΥΤΟΝΟΜΗ ΛΑΒΗ ΕΜΦΙΑΛΩΜΕΝΟΥ ΝΕΡΟΥ.	54
ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 4.2: ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟ FSR ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΧΡΟΝΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΥΤΟΝΟΜΗ ΛΑΒΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΤΡΥΠΑΝΙΟΥ.	56
ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 4.3: ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟ FSR ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΧΡΟΝΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΥΤΟΝΟΜΗ ΛΑΒΗ ΠΛΑΣΤΙΚΟΥ ΠΟΤΗΡΙΟΥ ΚΑΦΕ.	57
ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 4.4: ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟ FSR ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΧΡΟΝΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΥΤΟΝΟΜΗ ΛΑΒΗ AMBU BAG.	59
ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 4.5: ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟ FSR ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΧΡΟΝΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΥΤΟΝΟΜΗ ΛΑΒΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΠΙΠΕΡΙΑΣ.	60
ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 4.6: ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟ FSR ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΧΡΟΝΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΥΤΟΝΟΜΗ ΛΑΒΗ ΚΑΤΣΑΒΙΔΙΟΥ ΧΕΡΙΟΥ.	62
ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 4.7: ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟ FSR ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΧΡΟΝΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΥΤΟΝΟΜΗ ΛΑΒΗ ΜΙΚΡΟΥ ΔΟΧΕΙΟΥ ΜΕ ΑΝΤΙΣΗΠΤΙΚΟ.	63
ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 4.8: ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟ FSR ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΧΡΟΝΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΥΤΟΝΟΜΗ ΛΑΒΗ ΜΙΚΡΗΣ ΜΠΑΛΑΣ.	65
ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 4.9: ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟ FSR ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΧΡΟΝΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΥΤΟΝΟΜΗ ΛΑΒΗ ΜΑΡΚΑΔΟΡΟΥ.	66
ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 5.1: ΕΠΙΛΥΣΗ ΕΥΘΥ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟΥ ΓΙΑ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΔΑΚΤΥΛΟ.	74
ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 5.2: ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΥ ΓΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ Δx, (Α) ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΟΛΟΥ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΟΥ ΚΑΘΩΣ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΕΤΑΙ, (Β) ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΟΥ ΤΟΥ ΑΚΡΟΥ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΟΥ ΚΑΘΩΣ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΕΤΑΙ.	84
ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 5.3: ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΡΘΡΩΣΗΣ MCP ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ Δx ΓΙΑ ΤΟΝ ΜΙΚΡΟ, (Α) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΕΥΘΕΙΑ, (Β) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΠΟΛΥΩΝΥΜΟ ΤΡΙΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ.	85
ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 5.4: ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΡΘΡΩΣΗΣ Q ₂ (DIP) ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ Δx ΓΙΑ ΤΟΝ ΜΙΚΡΟ, (Α) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΕΥΘΕΙΑ, (Β) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΠΟΛΥΩΝΥΜΟ ΤΡΙΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ.	85
ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 5.5: ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΡΘΡΩΣΗΣ DIP ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΡΘΡΩΣΗ MCP ΓΙΑ ΤΟΝ ΜΙΚΡΟ, (Α) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΕΥΘΕΙΑ, (Β) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΠΟΛΥΩΝΥΜΟ ΤΡΙΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ.	86
ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 5.6: ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ F ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ Δx ΓΙΑ ΤΟΝ ΜΙΚΡΟ, (Α) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΕΥΘΕΙΑ, (Β) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΠΟΛΥΩΝΥΜΟ ΤΡΙΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ.	87
ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 5.7: ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΜΙΚΡΟ, (Α) ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΘΕ ΑΡΘΡΩΣΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ F ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ Δx, (Β) ΣΦΑΛΜΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΑΚΡΟΥ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΟΥ ΑΠΟ ΤΙΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΤΩΝ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΕΥΘΥ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟΥ.	88
ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 5.8: ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΠΑΡΑΜΕΣΟΥ ΓΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ Δx, (Α) ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΟΛΟΥ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΟΥ ΚΑΘΩΣ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΕΤΑΙ, (Β) ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΟΥ ΤΟΥ ΑΚΡΟΥ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΟΥ ΚΑΘΩΣ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΕΤΑΙ.	89
ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 5.9: ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΡΘΡΩΣΗΣ MCP ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ Δx ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΑΡΑΜΕΣΟ, (Α) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΕΥΘΕΙΑ, (Β) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΠΟΛΥΩΝΥΜΟ ΤΡΙΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ.	89
ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 5.10: ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΡΘΡΩΣΗΣ DIP ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ Δx ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΑΡΑΜΕΣΟ, (Α) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΕΥΘΕΙΑ, (Β) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΠΟΛΥΩΝΥΜΟ ΤΡΙΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ.	90
ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 5.11: ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΡΘΡΩΣΗΣ DIP ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΡΘΡΩΣΗ MCP ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΑΡΑΜΕΣΟ, (Α) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΕΥΘΕΙΑ, (Β) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΠΟΛΥΩΝΥΜΟ ΤΡΙΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ.	91

ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 5.30: ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΡΘΡΩΣΗΣ MCP ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ Δx ΓΙΑ ΤΟΝ ΔΕΙΚΤΗ, (Α) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΕΥΘΕΙΑ, (Β) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΠΟΛΥΩΝΥΜΟ ΤΡΙΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ.	105
ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 5.31: ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΡΘΡΩΣΗΣ RIP ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ Δx ΓΙΑ ΤΟΝ ΔΕΙΚΤΗ, (Α) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΕΥΘΕΙΑ, (Β) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΠΟΛΥΩΝΥΜΟ ΤΡΙΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ.	106
ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 5.32: ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΡΘΡΩΣΗΣ DIP ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ Δx ΓΙΑ ΤΟΝ ΔΕΙΚΤΗ, (Α) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΕΥΘΕΙΑ, (Β) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΠΟΛΥΩΝΥΜΟ ΤΡΙΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ.	107
ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 5.33: ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΡΘΡΩΣΗΣ RIP ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΡΘΡΩΣΗ MCP ΓΙΑ ΤΟΝ ΔΕΙΚΤΗ, (Α) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΕΥΘΕΙΑ, (Β) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΠΟΛΥΩΝΥΜΟ ΤΡΙΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ.	107
ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 5.34: ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΡΘΡΩΣΗΣ DIP ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΡΘΡΩΣΗ MCP ΓΙΑ ΤΟΝ ΔΕΙΚΤΗ, (Α) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΕΥΘΕΙΑ, (Β) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΠΟΛΥΩΝΥΜΟ ΤΡΙΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ.	108
ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 5.35: ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΡΘΡΩΣΗΣ DIP ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΡΘΡΩΣΗ RIP ΓΙΑ ΤΟΝ ΔΕΙΚΤΗ, (Α) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΕΥΘΕΙΑ, (Β) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΠΟΛΥΩΝΥΜΟ ΤΡΙΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ.	109
ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 5.36: ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ F ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ Δx ΓΙΑ ΤΟΝ ΔΕΙΚΤΗ, (Α) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΕΥΘΕΙΑ, (Β) ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΠΟΛΥΩΝΥΜΟ ΤΡΙΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ.	109
ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 5.37: ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΔΕΙΚΤΗ, (Α) ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΘΕ ΑΡΘΡΩΣΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ F ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ Δx, (Β) ΣΦΑΛΜΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΑΚΡΟΥ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΟΥ ΑΠΟ ΤΙΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΤΩΝ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΕΥΘΥ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟΥ.	110
ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 6.1: ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗΣ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΑΣ ΤΟΥ ΕΛΑΤΗΡΙΟΥ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΤΗΣ ΡΟΠΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΓΩΝΙΑ ΠΟΥ ΕΧΕΙ ΣΤΡΑΦΕΙ.	116
ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 6.2: ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗΣ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΑΣ ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΔΑΚΤΥΛΟΥ ΤΡΙΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΟΥ ΤΕΝΟΝΤΑ.	119
ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ 6.3: ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗΣ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΑΣ ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΔΑΚΤΥΛΟΥ ΔΥΟ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΟΥ ΤΕΝΟΝΤΑ.	120

1 Εισαγωγή

1.1 Γενική εισαγωγή

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιείται εκτενέστερη μελέτη ενός υφιστάμενου ρομποτικού χεριού, από μια παλιότερη ερευνητική εργασία του του ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ (πρώην Τ.Ε.Ι. ΚΡΗΤΗΣ) (**J. Fasoulas et al., 2018 {1}**).

Ο λόγος που επιλέχθηκε το παρών θέμα είναι για να μελετηθεί η συμπεριφορά των ρομποτικών χεριών με τένοντες, με σκοπό να υπάρξει ένα μοντέλο που θα μπορεί να το προσομοιώσει. Καθώς και να φτιαχτεί ένα αξιόπιστο σύστημα, που θα είναι συμβατό και για χρήση ως προσθετικό μέλος, με χαμηλό κόστος.

Στην αρχή εφόσον πραγματοποιείται η εξοικείωση λειτουργίας με το υπάρχον ρομποτικό χέρι, η κατανόηση της δομής του, και του τρόπου λειτουργίας του. Τίθεται ένα πλαίσιο βελτιστοποίησης του ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού, το οποίο κινείται σε προδιαγραφές με βάση υφιστάμενα ρομποτικά χέρια.

Πραγματοποιήθηκε η ανακατασκευή του ρομποτικού χεριού με κύρια έμφαση στο σύστημα ελέγχου του. Επιλέχθηκε να προστεθεί διεπαφή του ρομποτικού χεριού με τον χρήστη με την χρήση συστήματος φωνητικών εντολών.

Εφόσον πραγματοποιήθηκε η ανακατασκευή χρειάζεται να μελετηθεί κατά πόσο αυτές οι βελτιστοποιήσεις βοήθησαν το σύστημα και το έκαναν πιο αποδοτικό. Ο τρόπος επίτευξης αυτής της μελέτης είναι η πειραματική αποτίμηση.

Για την πειραματική αποτίμηση οι πειραματικές δοκιμές που επιλέχθηκε να πραγματοποιήσει το ρομποτικό χέρι προήλθαν έπειτα από αρκετή σκέψη για να αξιολογηθούν οι δυνατότητές του. Γι' αυτό τον λόγο επιλέχθηκαν πειράματα που αξιολογούν αυτές τις δυνατότητες.

Στο τελευταίο κεφάλαιο μελετάται για πρώτη φορά μη κινηματική ανάλυση ενός ρομποτικού χεριού που κάνει την χρήση τενόντων για να κινήσει τα δάκτυλα του. Οι κινηματικές εξισώσεις που προκύπτουν μπορεί να περιγράψουν με μια καλή ακρίβεια την κίνηση αυτών των δακτύλων.

1.2 Ανθρωπόμορφα ρομποτικά χέρια

Από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που μπορεί να προκύψουν στο κόσμο των ανθρωποειδή ρομπότ, είναι να παρέχουν ένα ασφαλές αυτόνομο και επιδέξιο ρομποτικό σύστημα.

Η μεγαλύτερη θεμελιώδης σημασία αυτής της επίτευξης, είναι να προσφέρει επιδέξιες δυνατότητες, για την χειραγώγηση, την προσωπική εξυπηρέτηση του ρομπότ σε δύσβατα περιβάλλοντα προκειμένου να εκπληρώσουν καθήκοντα, όπως και τρόποι πραγματοποίησης μια ασφαλούς και σωστής συνεργασίας μεταξύ του ανθρώπου και του ανθρωποειδούς.

Στο ρομποτικό χέρι όπου γίνεται η μελέτη και η βελτιστοποίηση, έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί για την χρήση του ως προσθετικό μέλος.

1.2.1 Ρομποτικά χέρια ως προσθετικά μέλη

Η απώλεια ενός άκρου αποτελεί ένα από τα πιο σοβαρά ψυχολογικά, σωματικά και οικονομικά καταστροφικά γεγονότα, που μπορούν να συμβούν σε έναν άνθρωπο. Καθώς ένα τέτοιο γεγονός ακρωτηριασμού, μειώνει την κινητικότητα αλλά και την ποιότητα ζωής του ατόμου.

Σε γενικές γραμμές είναι δύσκολο να διακρίνουμε την κύρια αιτία απώλειας των άκρων παγκοσμίως, καθώς οι κύριες αιτίες ποικίλλουν σε διαφορετικές περιοχές ανά τον κόσμο. Ωστόσο, οι βασικότερες αιτίες απώλειας άκρων, μπορεί να είναι αποτέλεσμα τραύματος (μηχανική, ηλεκτρική, θερμική ή χημική), κακοήθεια, ασθένεια ή συγγενής ανωμαλία. Επιπλέον, διαφορετικές αιτίες της απώλειας των άκρων έχουν ως αποτέλεσμα διαφορετικά υπολειμματικά άκρα, που επηρεάζουν τον τύπο σχεδιασμού της πρόσθεσης καθώς και του ελέγχου.

Τα προσθετικά μέλη χεριών μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία τα προσθετικά μέλη χρησιμοποιούνται για κοσμητικές παρεμβάσεις. Είναι παθητικά λειτουργικά προθετικά μέλη, που αντιγράφουν την εμφάνιση του ακρωτηριασμένου χεριού. Ωστόσο, μπορούν μόνο να χρησιμοποιηθούν για απλές εργασίες, που περιλαμβάνουν παθητική μεταφορά και εξισορρόπηση αντικειμένων, αλλά απαιτούν ελάχιστη συντήρηση και δεν έχουν μεγάλο βάρος.

Στην δεύτερη κατηγορία βρίσκονται τα άκρα με την χρήση καλωδίων, που λειτουργούν συνδέοντας ένα λουρί και ένα καλώδιο γύρω από τον αντίθετο ώμο που βρίσκεται το ακρωτηριασμένο χέρι. Τα κύρια πλεονεκτήματά τους είναι η ανθεκτικότητα και το μικρό βάρος τους. Είναι επίσης φθηνότερα από τις άλλες πλατφόρμες, και δεν θα απαιτήσουν μεγάλη συντήρηση από τον χρήστη. Αντίθετα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για απλές και μη-περίπλοκες λαβές.

Η τρίτη και τελευταία κατηγορία περιλαμβάνει τα μυοηλεκτρικά προσθετικά χέρια, όπου αντί να χρησιμοποιούν κάποιο σύστημα καλωδίωσης, η συσκευή ελέγχεται χρησιμοποιώντας ηλεκτρικούς επενεργητές, που τροφοδοτούνται από μπαταρίες και ελέγχονται από μικροελεγκτές.

Λειτουργούν ανιχνεύοντας σήματα EMG από το δέρμα, όταν οι μύες του άνω βραχίονα κινούνται. Τα σήματα μετά μεταδίδονται σε έναν μικροελεγκτή, που ελέγχει τους επενεργητές που προκαλούν άνοιγμα ή κλείσιμο του προσθετικού χεριού.

Η τελευταία κατηγορία αποτελεί την εξέλιξη της τεχνολογίας στα προσθετικά άκρα, αλλά το τρέχον πρόβλημα με τα πιο προηγμένα διαθέσιμα στο εμπόριο προσθετικά χέρια, όπως το i-limb, το Ultra, το bebionic και το Michelangelo, είναι κόστος, το οποίο κυμαίνεται περίπου μεταξύ 35.000 και 75.000 \$.

Η ανάπτυξη ενός μηχανικού προσθετικού μέλους είναι μια πραγματική πρόκληση για τους μηχανικούς. Αυτό οφείλεται στην προσπάθεια, όχι μόνο για να ενσωματωθεί όλο το σύστημα στο μέγεθος ενός ανθρώπινου χεριού, όπου αποτελείται από έναν αριθμό επενεργητών, αισθητήρων, μπαταριών και ηλεκτρονικών στοιχείων για τον έλεγχο, αλλά και για εφαρμόζουν αξιόπιστους αλγόριθμους ελέγχου, και να είναι σε θέση να πιάσουν και να χειραγωγήσουν καθημερινά αντικείμενα.

1.3 Ανακατασκευή ρομποτικού χεριού-κύρια συστήματα hardware

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται η σύντομη ανάλυση των κυρίων τμημάτων hardware, που χρησιμοποιήθηκαν για την ανακατασκευή του ρομποτικού χεριού. Επειδή αυτά τα συστήματα χρησιμοποιήθηκαν και στις πειραματικές διατάξεις για την πειραματική αποτίμηση και την κινηματική ανάλυση πραγματοποιείται η αρχική ανάλυση τους στην εισαγωγή της πτυχιακής. Με σκοπό αυτά τα συστήματα να καταστούν κατανοητά.

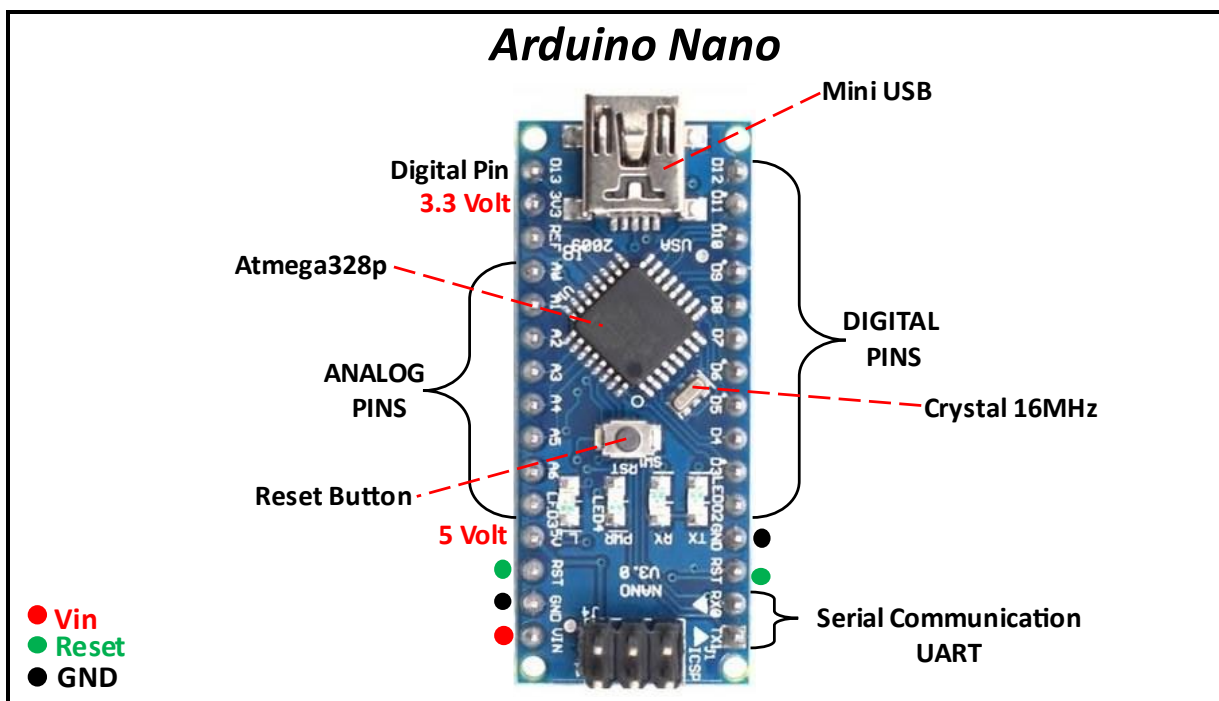
1.3.1 Μικροελεγκτές-controllers

Ένας μικροελεγκτής είναι ένα συμπαγές ολοκληρωμένο κύκλωμα, που έχει σχεδιαστεί για να είναι σε θέση να ρυθμίζει μια συγκεκριμένη λειτουργία σε ένα σύστημα. Ένας τυπικός μικροελεγκτής αποτελείται, από έναν μικροεπεξεργαστή, μια μνήμη και εισόδους/εξόδους (I/O) ενσωματωμένα σε ένα μόνο chip.

Το βρίσκουμε μέσα στις περισσότερες συσκευές, όπως για π.χ. οχήματα, ρομπότ, μηχανήματα γραφείου, ιατρικές συσκευές, ραδιόφωνα, οικιακές συσκευές και πολλά άλλα. Είναι ουσιαστικά μικροσκοπικοί προσωπικοί υπολογιστές, σχεδιασμένοι να ελέγχουν δυνατότητες ενός μεγαλύτερου συστήματος, χωρίς την χρήση περίπλοκων λειτουργικών συστημάτων.

➤ *Arduino NANO*

Τυπικό παράδειγμα μικροελεγκτή αποτελεί ο Arduino Nano, που είναι ευρέως διαδεδομένος ιδιαίτερα για αυτοσχέδια συστήματα [Εικόνα 1.1]. Ο μικροελεγκτής που χρησιμοποιεί είναι ο Atmega328p, όπου είναι και ο ίδιος που παρέχεται στην πλατφόρμα του Arduino Uno, αλλά το module που περιέχει όλα τα ηλεκτρονικά είναι πιο συμπιεσμένο σε μέγεθος. Όπως αναφέρθηκε ο συγκεκριμένος μικροελεγκτής έχει ένα μεγάλο φάσμα ευρείας χρήσης λόγω του μικρού μεγέθους του και της ευελιξίας του.



Εικόνα 1.1: Επεξήγηση των κυρίων σημείων και θυρών του Arduino Nano.

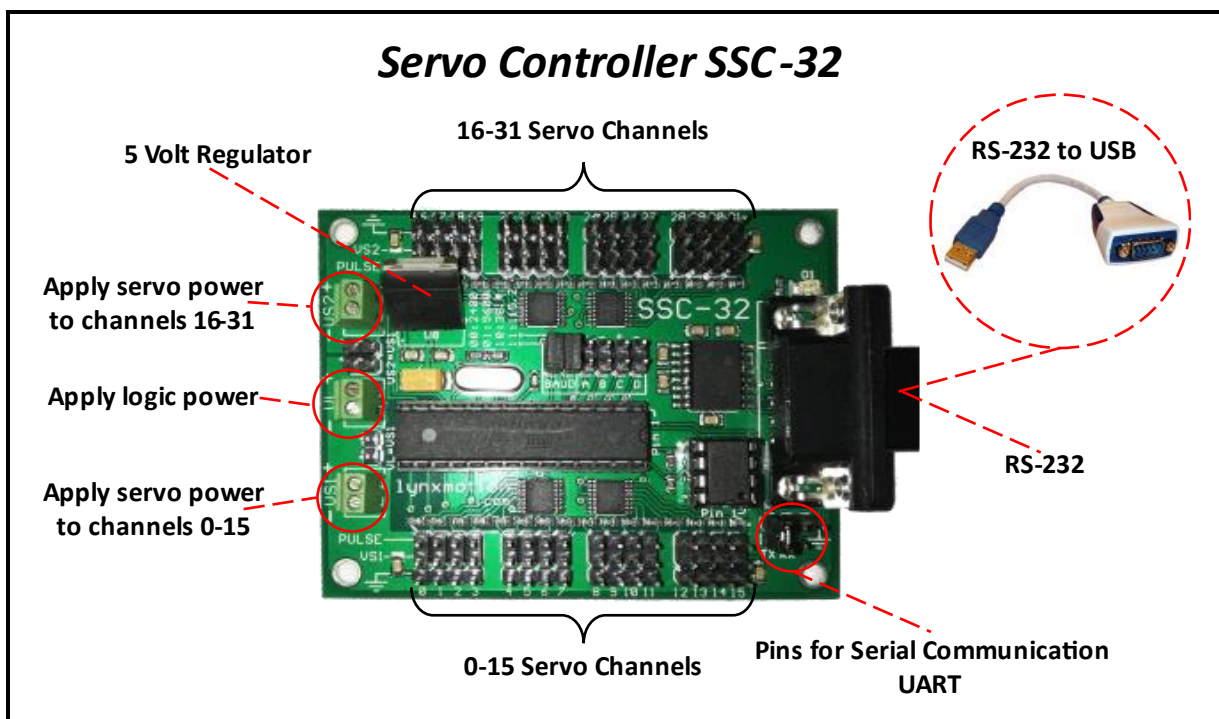
Κάποια βασικά χαρακτηριστικά αυτού του μικροελεγκτή, είναι ότι διαθέτει 22 θύρες εισόδου/εξόδου, όπου οι 14 από αυτές είναι ψηφιακές, με τις 6 να μπορούν να δημιουργήσουν ψευδοαναλογικό παλμό, και οι υπόλοιπες 8 είναι αναλογικοί είσοδοι. Επίσης ο κρυσταλλικός ταλαντωτής που διαθέτει είναι 16 MHz, και η τάση λειτουργίας του είναι από 5 έως 12 Volt. Ακόμη υποστηρίζει πρωτόκολλα επικοινωνίας όπως το σειριακό και I2C πρωτόκολλο, όπου θα γίνει η χρήση τους.

➤ *Servo Controller SSC-32*

Ο έλεγχος των κινητήρων rc-servo, επιτυγχάνεται στέλνοντας στην κατάλληλη θύρα του servo ένα κατάλληλο ψευδοαναλογικό παλμό, όπου ρυθμίζοντας το επαναλαμβανόμενο πλάτος του παλμού, επιτυγχάνεται η κίνηση του συστήματος στην κατάλληλη θέση. Ο παλμός αυτό μπορεί να προέρχεται από έναν μικροελεγκτή, ή από κάποιον servo controller όπως είναι ο SSC-32 [Εικόνα 1.2].

Ο SSC-32 είναι ένας προσυναρμολογημένος σερβοελεγκτής με αρκετά μεγάλες δυνατότητες. Έχει υψηλή ανάλυση της τάξης του 1 μ S, για την ακριβή τοποθέτηση του κινητήρα στην θέση που επιθυμούμε, και για να επιτυγχάνει εξαιρετικά ομαλές κινήσεις. Το εύρος του παλμού είναι από 0,5 mS έως 2,5 mS, το οποίο καλύπτει το μεγαλύτερο φάσμα των rc-servo.

Ο έλεγχος της κίνησης μπορεί να έχει άμεση απόκριση, ελεγχόμενη ταχύτητα, χρονικά προσδιορισμένη κίνηση ή συνδυασμός όλων αυτών. Επίσης διαθέτει μια εντολή που επιτρέπει για οποιοδήποτε συνδυασμό rc-servo, να ξεκινήσουν και να τελειώσουν ταυτόχρονα την κίνηση τους, ακόμα και εάν μετακινούνται σε διαφορετικές αποστάσεις.

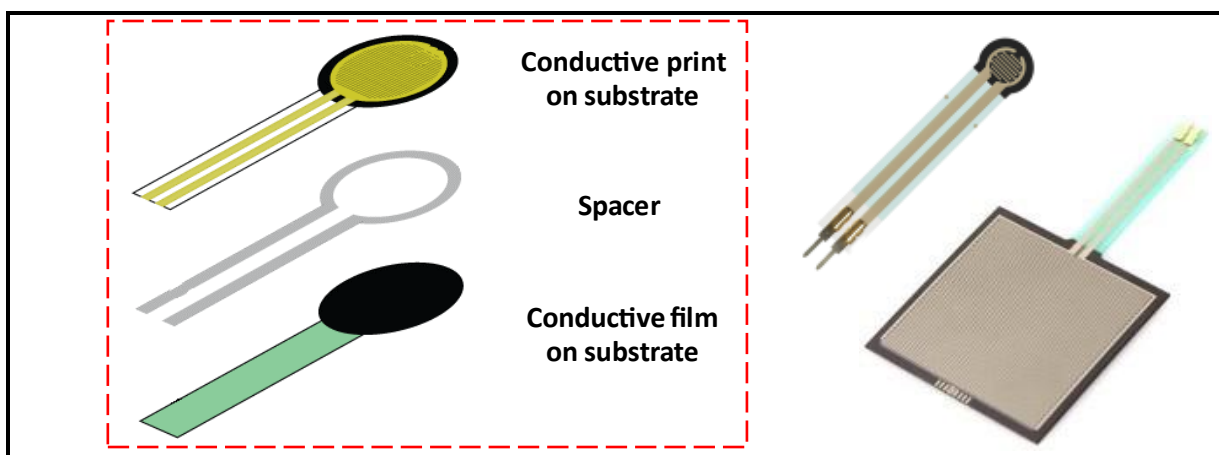


Εικόνα 1.2: Επεξήγηση των κυρίων σημείων και θυρών του servo controller SSC-32.

Μπορεί να κινήσει έως 32 διαφορετικά rc-servo, ενώ η τάση τροφοδοσίας του είναι 5-12 Volt. Διαθέτει πρωτόκολλο σειριακής επικοινωνίας, για την διασύνδεση του με τον μικροελεγκτή Arduino Nano.

1.3.2 Force Sensitive Resistor (FSR)

Ένα αισθητήριο force sensitive resistor (FSR), είναι ένα υλικό που αλλάζει την αντίστασή του όταν του εφαρμόζεται μια δύναμη ή πίεση. Με άλλα λόγια, το FSR είναι ένας αισθητήρας που σας επιτρέπει να εντοπίσετε τη φυσική πίεση, την συμπίεση και το βάρος.



Εικόνα 1.3: Το αισθητήριο FSR και τα μέλη που το αποτελούν.

Συνήθως, τα αισθητήρια FSR είναι πολύ απλά στην κατασκευή τους και έχουν χαμηλό κόστος, αν και δεν έχουν μεγάλη ακρίβεια στις μετρήσεις τους. Για αυτόν τον λόγο, βασικά όταν χρησιμοποιούνται FSR, θα πρέπει να έχουμε υπόψιν ότι λαμβάνουμε μόνο ένα εύρος της απόκρισης, αντί για τα ακριβή αποτελέσματα. Επομένως, ενώ τα FSR μπορούν να ανιχνεύσουν την ύπαρξη βάρους, δεν μπορούν να ανιχνεύσουν ακριβώς πόσα κιλά είναι.

Ωστόσο, ακόμη και αν δεν είναι εξαιρετικά ακριβείς, για τις περισσότερες εφαρμογές που χρειάζεται η ευαισθησία στην αφή, όπως στην συγκεκριμένη περίπτωση, αποτελεί μια πολύ καλή συμφωνία κόστους-ωφελείας.

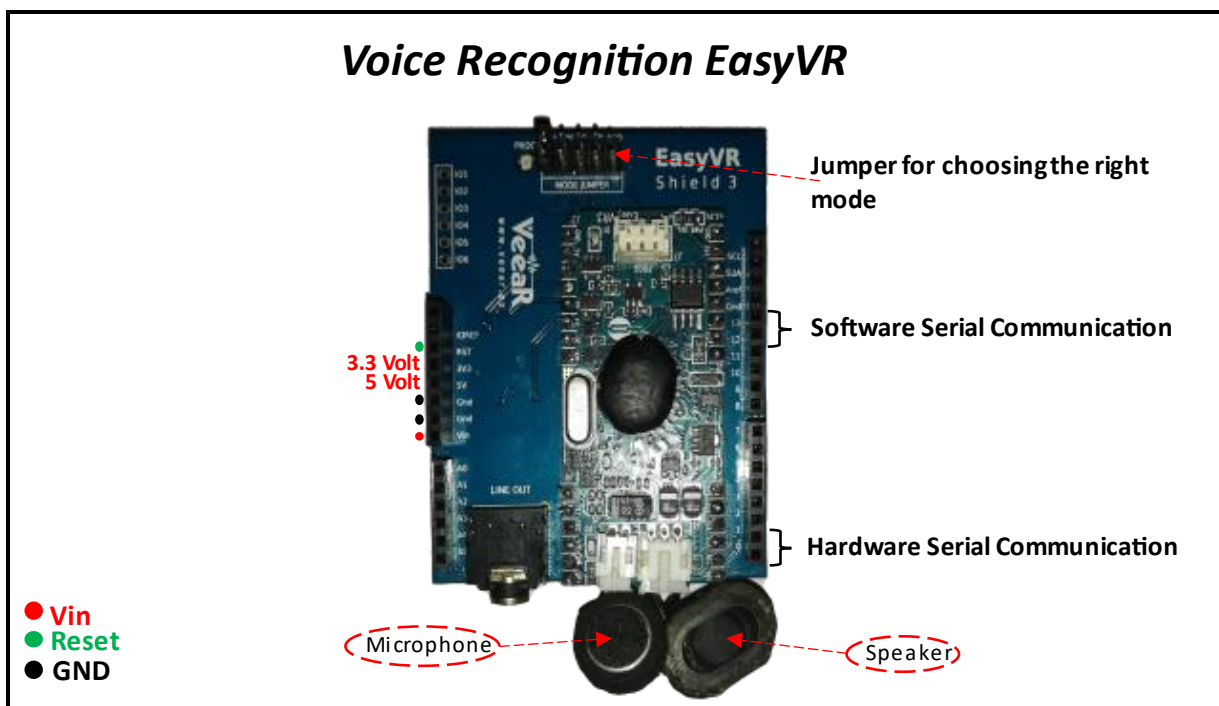
Τα FSR συνήθως αποτελούνται από δύο ενωμένα στρώματα. Ακολουθείται από το αγώγιμο φιλμ, και το πλαστικό διαχωριστικό, το οποίο δεν καλύπτει την ενεργή περιοχή του αγώγιμου φιλμ. Μετά το διαχωριστικό στρώμα, υπάρχει η αγώγιμη εκτύπωση στο τελικό υπόστρωμα.

Όταν ασκείται εξωτερική δύναμη στον αισθητήρα, το αγώγιμο φιλμ παραμορφώνεται πάνω στο υπόστρωμα. Ο αέρας από το άνοιγμα του αποστάτη ωθείται έξω μέσω του αεραγωγού, και το αγώγιμο φιλμ έρχεται σε επαφή με την αγώγιμη εκτύπωση. Όσο μεγαλύτερη αγώγιμη επιφάνεια μελανιού έρχεται σε επαφή με το αγώγιμο φιλμ, τόσο χαμηλότερη είναι η αντίσταση.

Επομένως, όσο περισσότερη πίεση ασκείται στον αισθητήρα, τόσο περισσότερο τα στρώματα αγγίζουν το αγώγιμο φιλμ και αυτό κάνει την αντίσταση να μειώνεται.

1.3.3 Αναγνώριση φωνητικών εντολών

Ένα κιτ αναγνώρισης φωνής, καθιστά δυνατή την προφορική ανθρώπινη αλληλεπίδραση με οποιοδήποτε είδους μηχανικό σύστημα, χρησιμοποιώντας την αναγνώριση ομιλίας για την κατανόηση προφορικών εντολών.



Εικόνα 1.4: Το κιτ αναγνώρισης φωνής EasyVR με επεξήγηση των κυρίων μελών και θυρών που το αποτελούν.

Οι φωνητικές εντολές έχουν πλέον προστεθεί σε αυτοκίνητα, συστήματα οικιακού αυτοματισμού, λειτουργικά συστήματα υπολογιστών, οικιακές συσκευές όπως πλυντήρια, φούρνους μικροκυμάτων και τηλεχειριστήρια. Είναι ο πρωταρχικός τρόπος αλληλεπίδρασης με εικονικούς βοηθούς σε έξυπνα τηλέφωνα.

Οι φωνητικές εντολές, είναι επίσης σε θέση να ανταποκρίνονται σε πολλές εντολές ταυτόχρονα, να διαχωρίζουν τα φωνητικά μηνύματα και να παρέχουν τα κατάλληλα σχόλια, μιμούμενα με ακρίβεια μια φυσική συνομιλία.

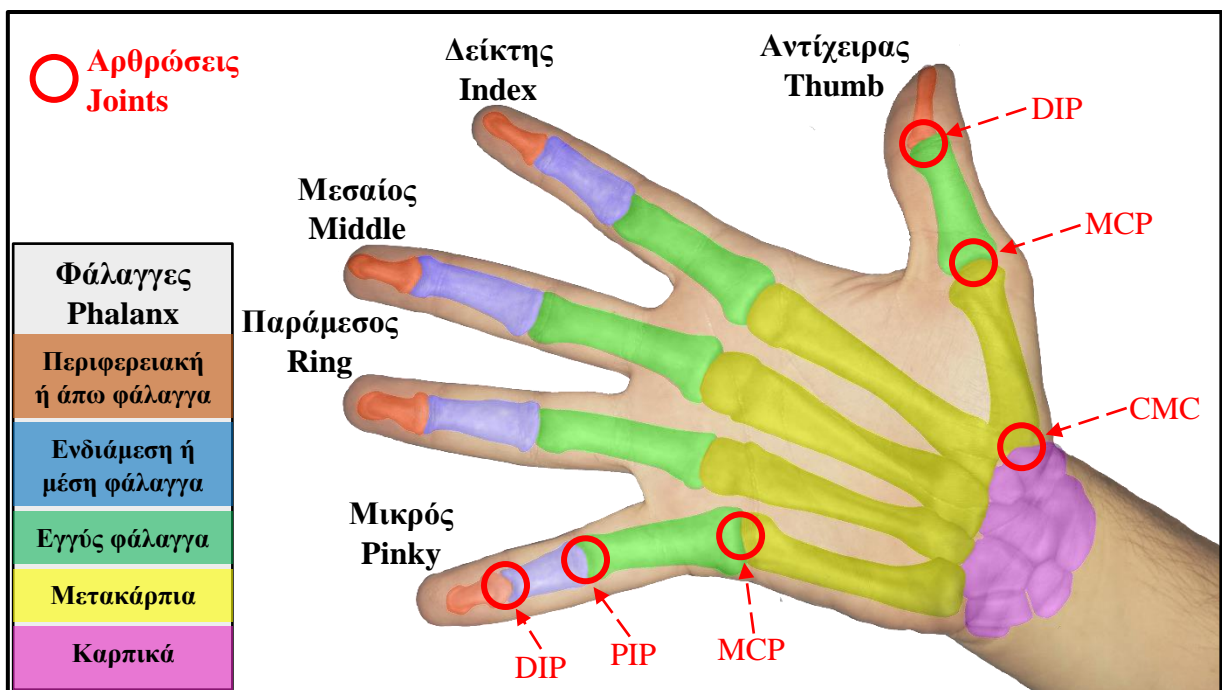
Το EasyVR, είναι μια μονάδα αναγνώρισης ομιλίας πολλαπλών χρήσεων, σχεδιασμένη για να είναι εύκολη, ευέλικτη, στιβαρή και χαμηλού κόστους, με αποτελεσματικές δυνατότητες αναγνώρισης ομιλίας, σε σχεδόν οποιαδήποτε εφαρμογή.

Η μονάδα EasyVR μπορεί να χρησιμοποιηθεί, με οποιονδήποτε μικροελεγκτή διαθέτει σειριακή επικοινωνία, τροφοδοτούμενη με τάση 3.3 έως 5 Volt, όπως μικροελεγκτές Arduino. Ορισμένα παραδείγματα εφαρμογών περιλαμβάνουν οικιακό αυτοματισμό, όπως φως με φωνητικό έλεγχο, διακόπτες, κλειδαριές ή ακόμη και προσθέτοντας «ακοή» στα πιο δημοφιλή ρομπότ της αγοράς.

2 Ανθρώπινο χέρι και περιορισμοί δακτύλων

2.1 Ανατομία ανθρώπινου χεριού

Το ανθρώπινο χέρι είναι το τελικό όργανο των άνω άκρων, το οποίο στον άνθρωπο εξυπηρετεί τη σημαντική λειτουργία της σύλληψης, καθώς είναι ένα σημαντικό όργανο για την αίσθηση και την επικοινωνία. Το ανθρώπινο χέρι αποτελείται από 5 δάκτυλα, το δείκτη (Index), το μέσο (Middle), τον παράμεσο (Ring), τον μικρό (Pinky) και τον αντίχειρα (Thumb). Συνθέτεται από 27 οστά, 8 καρπικά που σχηματίζουν τον καρπό, 5 μετακάρπια στην περιοχή της παλάμης και 14 που αποτελούν τις φάλαγγες των δακτύλων.



Εικόνα 2.1: Η ανατομία του ανθρώπινου χεριού με τις ονομασίες των φαλάγγων και των αρθρώσεων.

Κάθε ένα από τα 4 πρώτα δάχτυλα περιλαμβάνει 3 από τα 27 οστά, την εγγύς (Proximal phalanx), τη μέση (Middle phalanx) και την περιφερική ή άπω φάλαγγα (Distal phalanx). Ο αντίχειρας αποτελείται από δυο φάλαγγες, την περιφερική και την εγγύς.

Οι φάλαγγες συνδέονται μεταξύ τους μέσω των αρθρώσεων [Εικόνα 2.1]. Για τα τέσσερα πρώτα δάχτυλα ισχύει ότι η εγγύς με τη μέση φάλαγγα συνδέονται με την εγγύς μεσοφαλαγγική άρθρωση (Proximal InterPhalangeal, PIP), η μέση με την περιφερική συνδέονται με την

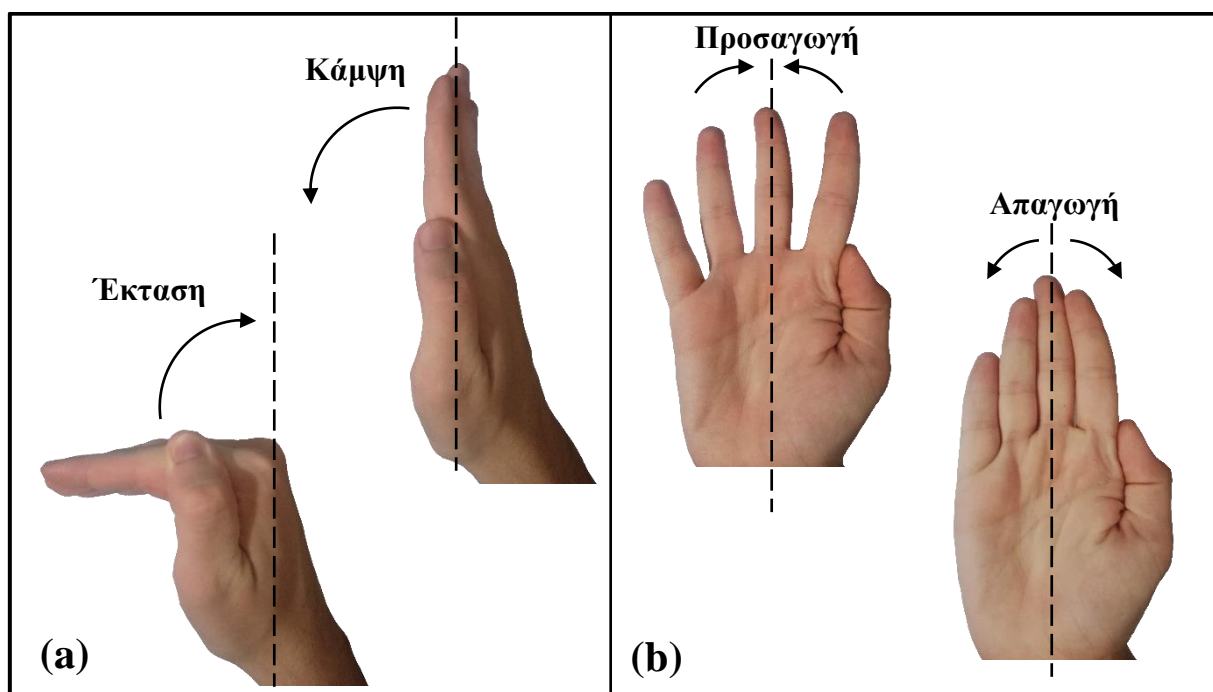
περιφερική μεσοφαλαγγική άρθρωση (Distal InterPhalangeal, DIP), ενώ η σύνδεση της εγγύς φάλαγγας με τα μετακάρπια γίνεται με την μετακαρποφαλαγγική άρθρωση (MetaCarpo Phalangeal, MCP).

Για τον αντίχειρα ισχύει ότι η περιφερική με την εγγύς φάλαγγα συνδέονται με την περιφερική μεσοφαλαγγική άρθρωση (Distal InterPhalangeal, DIP), η εγγύς με το μετακάρπιο με τη μετακαρποφαλαγγική άρθρωση (MetaCarpoPhalangeal, MCP), ενώ η το μετακάρπιο συνδέεται με τα οστά του καρπού με τη καρπομετακάρπια άρθρωση (CarpoMetaCarpal, CMC).

Οι αρθρώσεις προσθέτουν βαθμούς ελευθερίας στο ανθρώπινο χέρι. Πιο συγκεκριμένα η εγγύς μεσοφαλαγγική (PIP) και η περιφερική μεσοφαλαγγική (DIP) προσθέτουν από ένα βαθμό ελευθερίας, ενώ η μετακαρποφαλαγγική (MCP), εκτός της περίπτωσης του αντίχειρα, και η καρπομετακάρπια άρθρωση (CMC) προσθέτουν από δύο βαθμούς ελευθερίας. Συνεπώς, μόνο από τα δάχτυλα μπορούν να αποδοθούν στο ανθρώπινο χέρι 20 βαθμοί ελευθερίας, ενώ επιπλέον τρεις προστίθενται από τον καρπό για τον προσανατολισμό του στο χώρο.

2.2 Περιορισμοί κίνησης ανθρώπινων δακτύλων

Το ανθρώπινο χέρι χαρακτηρίζεται από μεγάλη ευελιξία λόγω της αρθρωτής κατασκευής του, ωστόσο υπάρχουν και περιορισμοί, αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των δακτύλων και των αρθρώσεων. Μπορούν να διακριθούν σε στατικούς και δυναμικούς.



Εικόνα 2.2: Ορολογία επιπέδων κινήσεων δακτύλων.

Οι στατικοί περιορισμοί αναφέρονται στα όρια του εύρους κίνησης των δακτύλων που προκύπτουν λόγω της ανατομίας του χεριού, ενώ οι δυναμικοί αναφέρονται στα όρια που επιβάλλονται στις αρθρώσεις κατά τη διάρκεια της κίνησης των δακτύλων.

2.2.1 Στατικοί περιορισμοί

Οι στατικοί περιορισμοί μπορούν να προσεγγιστούν αν εξεταστεί το εύρος της κίνησης των δακτύλων, χωρίς να εφαρμοστεί κάποια εξωτερική δύναμη. Οι παρακάτω σχέσεις περιγράφουν τα όρια κάθε άρθρωσης ανάλογα με την κίνηση που πραγματοποιεί, όπου **f/e κάμψη / έκταση και abd/add, απαγωγή / προσαγωγή** [Εικόνα 2.2].

$$0^\circ \leq \theta_{MCP(f/e)} \leq 90^\circ \quad (2.1)$$

$$0^\circ \leq \theta_{PIP(f/e)} \leq 110^\circ \quad (2.2)$$

$$0^\circ \leq \theta_{DIP(f/e)} \leq 90^\circ \quad (2.3)$$

$$-15^\circ \leq \theta_{MCP(abd/add)} \leq 15^\circ \quad (2.4)$$

Ένας ακόμη ευρέως υιοθετημένος περιορισμός αναφέρει ότι το μεσαίο δάχτυλο κατά την απαγωγή - προσαγωγή παρουσιάζει ελάχιστη κίνηση επομένως μπορεί να γίνει η ακόλουθη προσέγγιση.

$$\theta_{MCP(abd/add)} = 0 \quad (2.5)$$

2.2.2 Δυναμικοί περιορισμοί

Οι δυναμικοί περιορισμοί μπορούν να διακριθούν επίσης σε δύο κατηγορίες, τους ένδοδαχτύλιους (Intra finger) και τους έσω - δαχτύλιους (Inter finger). Οι ένδοδαχτύλιοι περιορισμοί αναφέρονται στους συσχετισμούς που προκύπτουν μεταξύ των αρθρώσεων του ίδιου δακτύλου, ενώ οι έσωδαχτύλιοι περιγράφουν τις αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των δακτύλων ενώ αυτά κινούνται.

➤ Intra finger περιορισμοί

Οι ένδοδαχτύλιοι περιορισμοί μελετώνται εξετάζοντας δύο ξεχωριστά μοντέλα του χεριού. Το πρώτο αποτελείται από τα δάχτυλα του δείκτη, μέσου, παράμεσου και μικρού και το δεύτερο από τον αντίχειρα. Με βάση την ανατομία του χεριού είναι κοινά αποδεκτό ότι προκειμένου να καμφθεί η DIP άρθρωση πρέπει επίσης να καμφθεί και η PIP άρθρωση για όλα τα δάχτυλα εκτός του αντίχειρα. Η συσχέτιση αυτή περιγράφεται από την παρακάτω σχέση.

$$\theta_{DIP(f/e)} \approx \frac{2}{3} \theta_{PIP(f/e)} \quad (2.6)$$

Επίσης κατά την ελεύθερη κίνηση του χεριού ισχύει η παρακάτω σχέση.

$$\theta_{PIP(f/e)} \approx \frac{3}{4} \theta_{MCP(f/e)} \quad (2.7)$$

Οι περιορισμοί που ισχύουν για τον αντίχειρα περιγράφονται από τις ακόλουθες σχέσεις.

$$\theta_{DIP(f/e)} \approx \frac{1}{2} \theta_{MCP(f/e)} \quad (2.8)$$

$$\theta_{MCP(f/e)} \approx \frac{5}{4} \theta_{CMC(f/e)} \quad (2.9)$$

➤ **Inter finger περιορισμοί**

Οι έσωδακτύλιοι περιορισμοί προέκυψαν από μελέτη συζευγμένων κινήσεων μεταξύ των δακτύλων του δείκτη, μέσου, παράμεσου και μικρού, όπως επίσης και της σχέσης μεταξύ των γωνιών των προαναφερθέντων δακτύλων εκτός του δείκτη [Εικόνα 2.3].

Στην περίπτωση που ο δείκτης και το μικρό δάχτυλο δεν κάμπτονται, κάμψη της MCP άρθρωσης του μέσου θα προκαλέσει αντίστοιχη κάμψη και στον παράμεσο [Εικόνα 2.3 (a)].

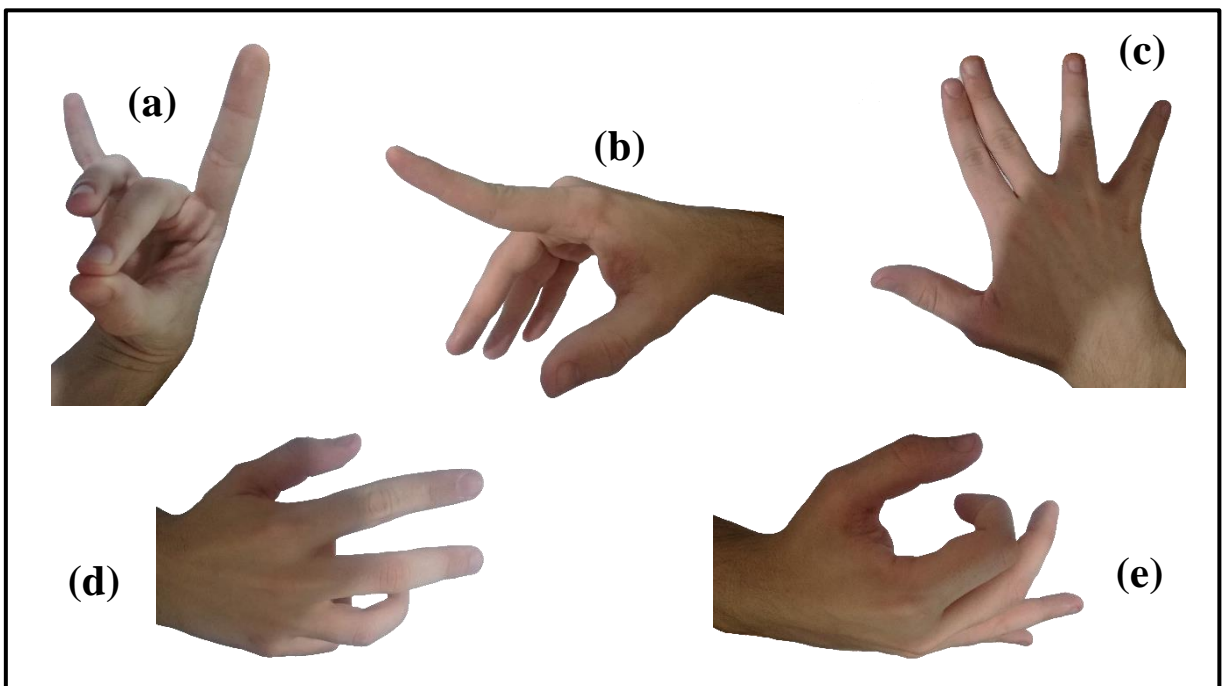
$$\theta_{MCP(f/e)Middle} \approx \theta_{MCP(f/e)Ring} \quad (2.10)$$

Κάμψη της MCP άρθρωσης μόνο του παράμεσου παράγει ακόμη μία συζευγμένη κίνηση, προκαλώντας την ίση κάμψη μέσου και μικρού δακτύλου [Εικόνα 2.3 (b)].

$$\theta_{MCP(f/e)Middle} \approx \theta_{MCP(f/e)Pinky} \quad (2.11)$$

Τέλος, στις περισσότερες περιπτώσεις η κίνηση απαγωγής - προσαγωγής μεταξύ παράμεσου και μικρού δακτύλου [Εικόνα 2.3 (c)] περιγράφεται από την παρακάτω σχέση.

$$\theta_{MCP(abd/add)Ring} \approx \theta_{MCP(abd/add)Pinky} \quad (2.12)$$



Εικόνα 2.3: Απεικόνιση εσωδακτύλιων περιορισμών, (a)Μέσος και παράμεσος, (b)Μέσος, παράμεσος και μικρό δάχτυλο, (c)Απαγωγή-Προσαγωγή μεταξύ παράμεσου και μικρού, (d)Παράμεσος και μικρός, (e)Δείκτης και μέσος.

Οι σχέσεις μεταξύ των γωνιών των δακτύλων συνοψίζονται σε δύο περιπτώσεις. Η πρώτη σχετίζεται με την ύπαρξη κάμψης της MCP άρθρωσης του μικρού δάκτυλου όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.3 (d)** και περιγράφεται από τις ακόλουθες σχέσεις

$$\theta_{MCP(f/e)Ring} \approx \frac{7}{12} \theta_{MCP(f/e)Pinky} \quad (3.13)$$

$$\theta_{MCP(f/e)Ring} \approx \frac{2}{3} \theta_{MCP(f/e)Middle} \quad (2.14)$$

$$\theta_{MCP(f/e)Ring} - \theta_{MCP(f/e)Middle} < 60^\circ \quad (2.15)$$

$$\theta_{MCP(f/e)Ring} - \theta_{MCP(f/e)Pinky} < 50^\circ \quad (2.16)$$

Η δεύτερη περίπτωση προκύπτει κατά την κάμψη της MCP άρθρωσης του δείκτη, η οποία και προκαλεί κάμψη του μέσου [**Εικόνα 2.3 (e)**].

$$\theta_{MCP(f/e)Ring} \approx \frac{1}{5} \theta_{MCP(f/e)Index} \quad (2.17)$$

Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι αν και οι περιορισμοί, στατικοί και δυναμικοί, μειώνουν την ευελιξία του χεριού σε συγκεκριμένες κινήσεις, δίνουν ωστόσο τη δυνατότητα υπολογισμού της κάμψης των αρθρώσεων από την καταγραφή μίας και μόνο γωνίας. Επομένως απαιτούνται λιγότεροι αισθητήρες και ηλεκτρονικά ελέγχου.

2.2.3 Επίδραση των αρθρώσεων στον προσανατολισμό

Η κάθε άρθρωση για τα βασικά δάκτυλα δείκτη, μεσαίο, παράμεσο και μικρό, μπορεί να λάβει την μεταβλητή q_i , για $i=1,2,3,\dots,n$, όπου n ο μέγιστος αριθμός των αρθρώσεων. Εφόσον έχουμε δάκτυλο με τρεις αρθρώσεις $\theta_{MCP}=q_1$, $\theta_{PIP}=q_2$, $\theta_{DIP}=q_3$.

Οπότε αντικαθιστώντας στην σχέση (3.7) προκύπτει η σχέση (3.18). Επίσης από τις εξισώσεις (3.6) και (3.7) προκύπτει η σχέση (3.19), όπου περιγράφει την σχέση μεταξύ των γωνιών κατά την διάρκεια της ελεύθερης κίνησης των δακτύλων.

$$q_2 = \frac{3}{4} q_1 \quad (2.18)$$

$$q_3 = \frac{1}{2} q_1 \quad (2.19)$$

Ενώ για τον αντίχειρα, οι αρθρώσεις των δακτύλων λαμβάνουν τις εξής μεταβλητές $\theta_{CMC}=q_0(\text{Thumb})$, $\theta_{MCP}=q_1(\text{Thumb})$, $\theta_{DIP}=q_2(\text{Thumb})$. Οπότε αντικαθιστώντας στην σχέση (3.8), προκύπτει η σχέση (3.20). Επίσης αντικαθιστώντας στην σχέση (3.9), προκύπτει η σχέση (3.21), όπου περιγράφει την σχέση μεταξύ των γωνιών κατά την διάρκεια της ελεύθερης κίνησης των δακτύλων.

$$q_2(\text{Thumb}) = \frac{1}{2} q_1(\text{Thumb}) \quad (2.20)$$

$$q_0(\text{Thumb}) = \frac{4}{5} q_1(\text{Thumb}) \quad (2.21)$$

Ο προσανατολισμός f του κάθε δακτύλου ορίζεται ως το άθροισμα όλων των αρθρώσεων του

κάθε δακτύλου, επομένως για τα δάκτυλα δείκτη, μεσαίο, παράμεσο, μικρό $\mathbf{f}=\mathbf{q}_1+\mathbf{q}_2+\mathbf{q}_3$. Για να βρούμε το ποσοστό επίδρασης της κάθε άρθρωσης στον προσανατολισμό για τα δάκτυλα δείκτη, μέσος, παράμεσο, μικρό διαιρούμε την κάθε άρθρωση ως προς τον προσανατολισμό όπου προκύπτει η σχέση (3.22).

$$R_{q_i/f} = \frac{q_i}{q_1 + q_2 + q_3} \cdot 100\% = \frac{q_i}{f} \cdot 100\% \quad (2.22)$$

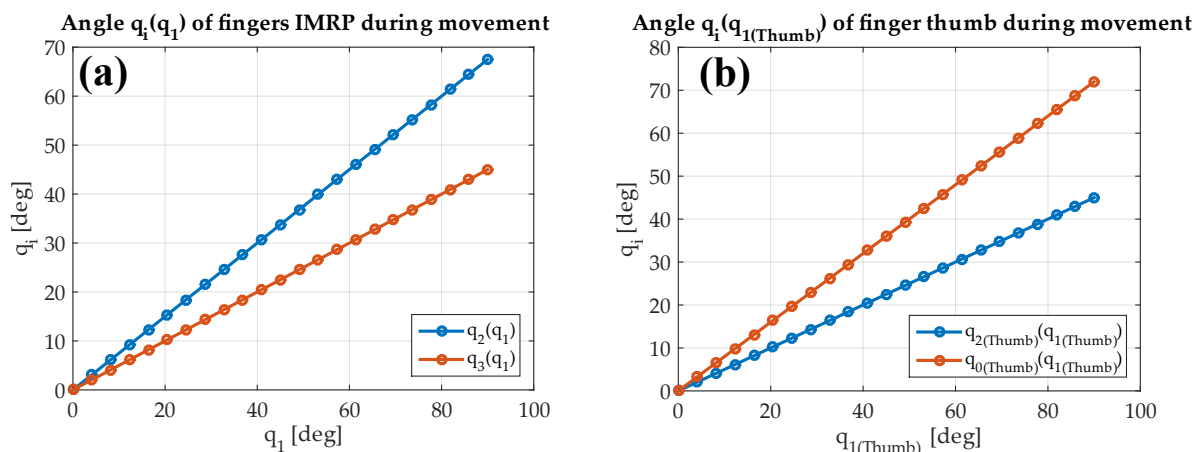
Αντίστοιχα για τον αντίχειρα ο προσανατολισμός του f_{Thumb} , ορίζεται ως το άθροισμα όλων των αρθρώσεων δηλαδή $\mathbf{f}_{\text{Thumb}}= \mathbf{q}_1(\text{Thumb})+\mathbf{q}_2(\text{Thumb})+\mathbf{q}_0(\text{Thumb})$. Για να βρούμε το ποσοστό επίδρασης της κάθε άρθρωσης στον προσανατολισμό διαιρούμε την κάθε άρθρωση ως προς τον προσανατολισμό όπου προκύπτει η σχέση (3.23).

$$R_{q_i/f(\text{Thumb})} = \frac{q_i}{q_1(\text{Thumb}) + q_2(\text{Thumb}) + q_0(\text{Thumb})} \cdot 100\% = \frac{q_i}{f_{\text{Thumb}}} \cdot 100\% \quad (2.23)$$

Οπότε από την σχέση (3.22) προκύπτει ότι η γωνία που επιδράει περισσότερο στο προσανατολισμό των δακτύλων δείκτη, μεσαίου, παράμεσου και μικρού είναι η q_1 δηλαδή η άρθρωση MCP με ποσοστό επίδρασης **45%**. Έπειτα ακολουθεί η q_2 δηλαδή η άρθρωση PIP με ποσοστό επίδρασης **33%**. Τέλος η q_3 δηλαδή η άρθρωση DIP με ποσοστό επίδρασης **22%**.

Ενώ για τον αντίχειρα προκύπτει από την σχέση (3.23) ότι η γωνία που επιδράει περισσότερο στο προσανατολισμό του δακτύλου είναι η $q_1(\text{Thumb})$ δηλαδή η άρθρωση MCP με ποσοστό επίδρασης **43%**. Έπειτα ακολουθεί η $q_0(\text{Thumb})$ δηλαδή η άρθρωση CMC με ποσοστό επίδρασης **35%** και τέλος η $q_2(\text{Thumb})$ δηλαδή η άρθρωση DIP με ποσοστό επίδρασης **22%**.

Αντικαθιστώντας στις σχέσεις (3.18) και (3.19) με $0^\circ \leq q_1 \leq 90^\circ$ βλέπουμε την σχέση μεταξύ των γωνιών κατά την διάρκεια της ελεύθερης κίνησης του χεριού για τα δάκτυλα δείκτη, μεσαίου, παράμεσου και μικρού [Γραφική Παράσταση 3.1 (a)]. Ενώ για τον αντίχειρα αντικαθιστώντας στις σχέσεις (3.20) και (3.21) με $0^\circ \leq q_1(\text{Thumb}) \leq 90^\circ$ βλέπουμε την σχέση μεταξύ των γωνιών κατά την διάρκεια της ελεύθερης κίνησης του χεριού [Γραφική Παράσταση 3.1 (b)].



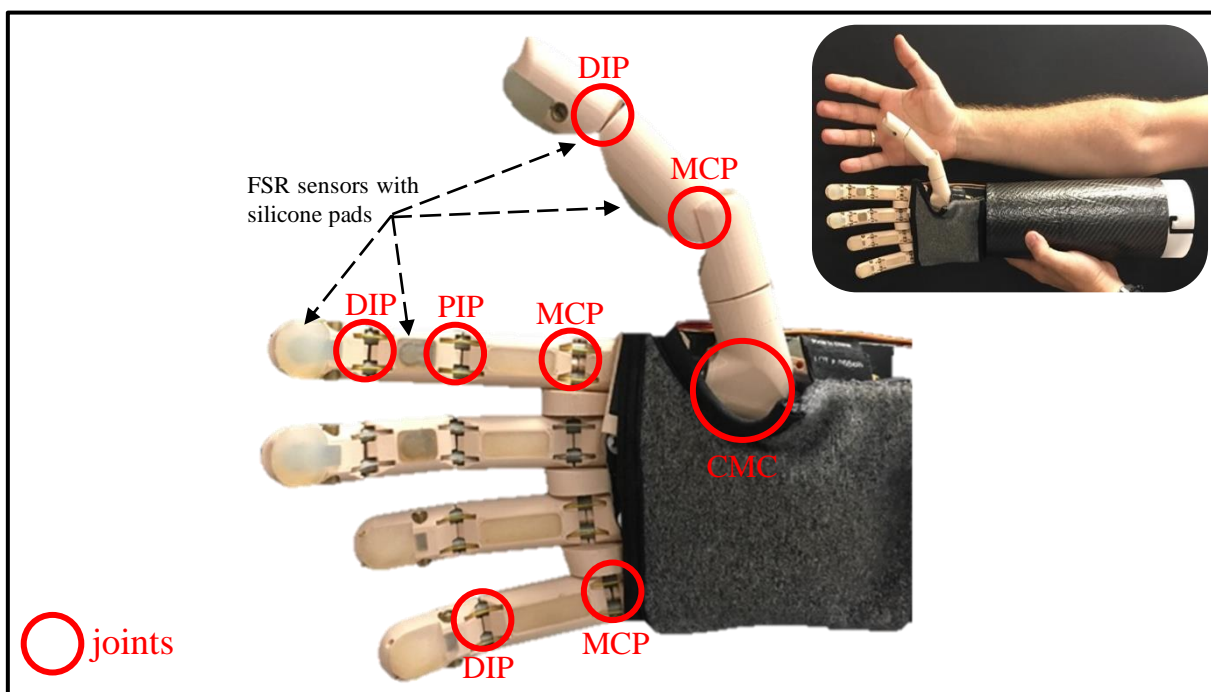
Γραφική Παράσταση 2.1: Γραφικές παραστάσεις αρθρώσεων σε σχέση με την άρθρωση MCP, (a) σχέσεις αρθρώσεων με την q_1 για τα δάκτυλα IMRP (Index, Middle, Ring, Pinky), (b) σχέσεις αρθρώσεων με την $q_1(\text{Thumb})$ για τον αντίχειρα.

3 Ανακατασκευή ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού

3.1 Παρουσίαση παλαιού ρομποτικού χεριού

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία γίνεται η βελτιστοποίηση λειτουργίας και η ανακατασκευή ενός υπάρχοντος ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού, από μια παλαιότερη ερευνητική εργασία του ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ (πρώην Τ.Ε.Ι. ΚΡΗΤΗΣ) (J. Fasoulas et al., 2018 {1}). Η ιδιαιτερότητα του συγκεκριμένου ρομποτικού χεριού ενδείκνυται στο ότι χρησιμοποιεί έναν γραμμικό επενεργητή, για κάθε δάκτυλο με την χρήση νήματος, προσομοιώνοντας τους τένοντες του ανθρώπινου χεριού για την κίνηση του δακτύλου.

Το ανθρωπόμορφο ρομποτικό χέρι αποτελείται από τέσσερά βασικά δάκτυλα, έναν αντίχειρα και μια παλάμη. Έχει συνολικά 13 βαθμούς ελευθερίας και η οδήγηση του γίνεται με την χρήση έξι επενεργητών. Η αρθρωτή δομή του ρομποτικού χεριού επιτρέπει να έχει δεκατρείς αρθρώσεις με την κάθε μία να αντιστοιχεί σε έναν βαθμό ελευθερίας.



Εικόνα 3.1: Ονομασία των αρθρώσεων στο ρομποτικό χέρι.

Οι ονομασίες των φαλάγγων των δακτύλων ονομάζονται ως περιφερειακή, ενδιάμεση και εγγύς φάλαγγα. Η άρθρωση που συνδέει την παλάμη με τα βασικά δάκτυλα ονομάζεται εγγύς

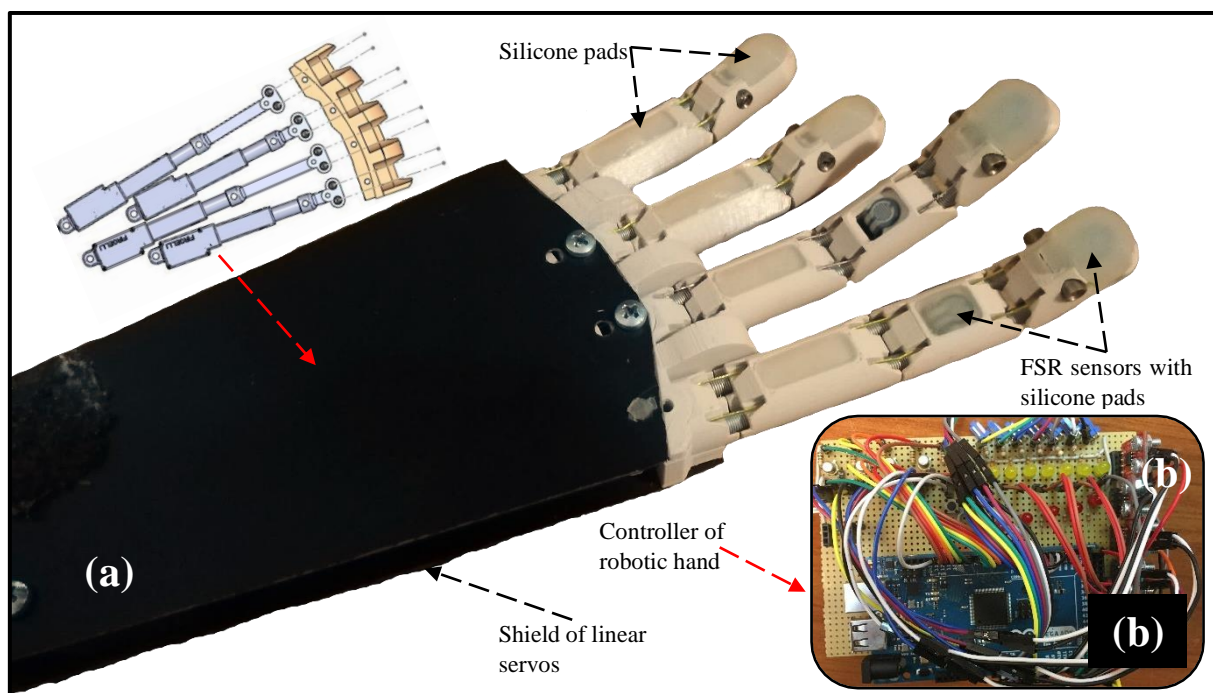
φάλαγγα MCP (MetaCarpoPhalangeal). Η άρθρωση που είναι στην μέση του δακτύλου ονομάζεται ενδιάμεση φάλαγγα PIP (Proximal InterPhalangeal), ενώ η άρθρωση που βρίσκεται κοντά στο άκρο του δακτύλου ονομάζεται εγγύς φάλαγγα DIP (Distal InterPhalangeal).

Λόγο της κατασκευής ο μικρός και ο παράμεσος έχουν μόνο δύο βαθμούς ελευθερίας και παρόμοια δομή. Οπότε αποτελούνται μόνο από δύο φάλαγγες που είναι διασυνδεδεμένες με τις αρθρώσεις DIP και MCP [**Εικόνα 3.1**]. Ωστόσο κανένα δάκτυλο δεν είναι ικανό για προσαγωγή/απαγωγή.

Ο αντίχειρας έχει και αυτός τρεις βαθμούς ελευθερίας και δεν φέρει καμία άλλη διαφορά σχεδιαστικά και κινηματικά από τα υπόλοιπα δάκτυλα. Η άρθρωση που βρίσκεται κοντά στην παλάμη ονομάζεται CMC (CarpoMetaCarpial) και επιτρέπει στο αντίχειρα μια κίνηση απαγωγή/προσαγωγή του δακτύλου. Οι άλλες δύο αρθρώσεις ονομάζονται MCP και DIP.

Όλες οι φάλαγγες των δακτύλων έχουν κατασκευαστεί με την χρήση τρισδιάστατου εκτυπωτή και με υλικό εκτύπωση το πολυγαλακτικό οξύ (PLA). Τα ελαστικά μέρη των φαλάγγων έχουν κατασκευαστεί με σιλικόνη. Για τους λόγους ότι πρέπει να έχουν μεγαλύτερη πρόσφυση κατά την λαβή αντικειμένων, να μην πληγώνουν τα αντικείμενα, και για τα δάκτυλα δείκτη-παράμεσο-αντίχειρα να μπορούν να μεταβάλουν τα αισθητήρια FSR.

Η αρθρωτή δομή των δακτύλων έχει σχεδιαστεί ως ένα περίπλοκος μηχανισμός βασισμένος σε σταθερές φάλαγγες συνδεδεμένες με ελικοειδή ελατήρια εφελκυσμού. Κάθε άρθρωση φέρει δύο ελατήρια τοποθετημένα παράλληλα ώστε να δημιουργεί μια περιστροφική άρθρωση ενός βαθμού ελευθερίας.



Εικόνα 3.2: Επεξήγηση κύριων μηχανισμών ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού, (a) το ρομποτικό χέρι κατά την παραλαβή του, (b) αρχικό σύστημα ελέγχου ρομποτικού χεριού.

Αυτά τα ελατήρια είναι ικανά να λυγίσουν κάτω από την δράση του τραβήγματος των τενόντων, ενώ ένας περιορισμένος αριθμός σπειρών αρκεί για να εκτελέσει μεγάλες

μετατοπίσεις και να αποφευχθεί μόνιμη παραμόρφωση του. Στην παρούσα πτυχιακή θα μελετηθεί η κινηματική συμπεριφορά των δακτύλων.

Η παλάμη είναι κατασκευασμένη από δύο παράλληλες τοποθετημένες λεπτές λαμαρίνες αλουμινίου. Επίσης όλα τα δάκτυλα είναι τοποθετημένα στην άκρη της παλάμης όπως φαίνεται στην **Εικόνα 3.2 (a)**, με μια μικρή διαφορά στην θέση. Αυτή η διαφορά στην τοποθέτηση κάνει τον μηχανισμό πιο ανθρωπόμορφο, και οποιοδήποτε μη λειτουργικό δάκτυλο μπορεί να αντικατασταθεί άμεσα και εύκολα.

Ο μηχανισμός κίνησης του ρομποτικού δακτύλου ενσωματώνεται εσωτερικά της παλάμης του δακτύλου, και επιτρέπει την ανεξάρτητη κάμψη/έκταση των δακτύλων, καθώς και της κατάλληλης προ-λαβής για την αρπαγή κάποιου αντικειμένου. Αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει την πολλαπλή επαφή κατά την λαβή αλλά και αυξημένη σταθερότητα του αντικειμένου.

Ο μηχανισμός κίνησης αποτελείται από τέσσερις μικρού κόστους γραμμικούς μηχανισμούς κίνησης (L-12 Actuonix) τα οποία είναι συνδεδεμένα με τους τένοντες των αντίστοιχων δακτύλων. Ως αποτέλεσμα η δύναμη δημιουργείται από το τράβηγμα των τενόντων απλοποιώντας την αλυσίδα κίνησης και προκαλώντας την ανεξάρτητη κίνηση των δακτύλων. Η μονάδα της παλάμης και του χεριού έχει δημιουργηθεί ώστε να επιτρέπει την πλήρη κάμψη/έκταση των δακτύλων σε περίπου 2 δευτερόλεπτα.

3.1.1 Ανακατασκευή τρισδιάστατων μοντέλων δακτύλων ρομποτικού χεριού

Η ανακατασκευή των τρισδιάστατων μοντέλων των δακτύλων κρίθηκε αναγκαία για την μελέτη των δακτύλων, την ανακατασκευή τμημάτων και την ανάλυση της αρχιτεκτονικής του.

Η διαδικασία της αντίστροφης μηχανικής για τα δάκτυλα πραγματοποιήθηκε με συμβατικές μεθόδους, με την χρήση ενός παχύμετρου ακριβείας 0,01 mm. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία του τρισδιάστατου σχεδίου είναι το Creo Parametric 7.0.

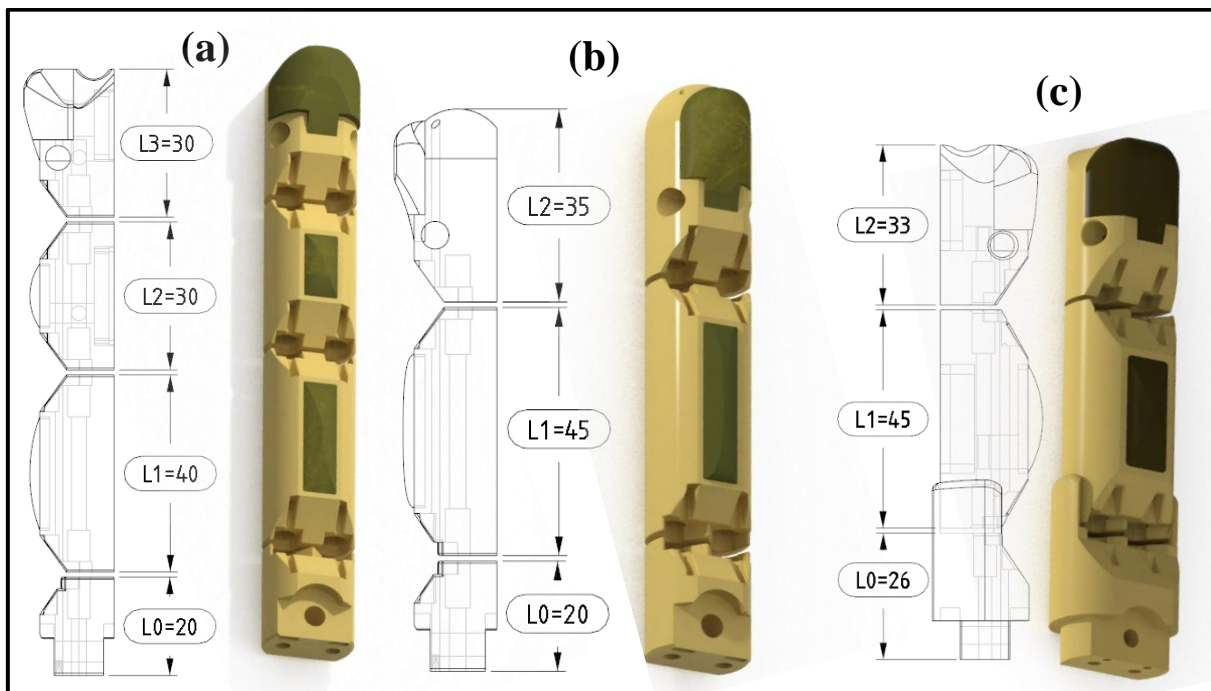
Οι διαστάσεις των δακτύλων είναι παρόμοιες με ανθρωπομετρικές διαθέσιμες πληροφορίες. Πιο συγκεκριμένα τα δάκτυλα μικρός-παράμεσος και δείκτης-μεσαίος έχουν κυλινδρικό σχήμα, με διάμετρο 18mm και με μήκος 80mm και 100mm αντίστοιχα [**Εικόνα 3.3**].

Στο εσωτερικό τους φέρουν δύο εσοχές για να τοποθετηθούν τα ελατήρια και να σχηματίσουν τις αρθρώσεις με την σύνδεση των γειτονικών φαλάγγων. Για παράδειγμα η μέση και η εγγύς φάλαγγες έχουν εσοχές για τα ελατήρια και στα δύο άκρα.

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό των δακτύλων δείκτη-μεσαίου είναι ότι στο άκρο των δακτύλων, φέρουν μια καμπύλη με σκοπό να επιτρέπονται κυλιόμενες κινήσεις που αυξάνουν τις δυνατότητες χειραγώγησης του αντικειμένου.

Περαιτέρω τραβώντας τους δύο τένοντες, που είναι σταθερά συνδεδεμένοι με την φάλαγγα του άκρου του κάθε δακτύλου, το δάκτυλο λυγίζει. Ενώ η επαναφορά του γίνεται χάρη στην ελαστικότητα του ελατηρίου. Στην πρόσθια επιφάνεια των δακτύλων δείκτη και μεσαίου υπάρχει ένα χαμηλού κόστους αισθητήριο δύναμης FSR, όπου ενσωματώνεται στην κάτω πλευρά, από το ελαστικό μέρος με την σιλικόνη στην περιφερειακή και μέση φάλαγγα.

Αυτό επιτρέπει να δέχεται απτική επίδραση, κατά την διάρκεια της επαφής. Τα καλώδια από τα αισθητήρια είναι περασμένα μέσα από τα ελατήρια χωρίς αυτό να επηρεάζει καθόλου την συμπεριφορά των ελατηρίων, και ακολουθούνε μια διαδρομή από την περιφερειακή φάλαγγα έως το τέλος του δακτύλου καταλήγοντας όλα μαζί στην παλάμη του ρομποτικού χεριού.



Εικόνα 3.3: Τρισδιάστατο και δισδιάστατο σχέδιο ρομποτικών δακτύλων, (α) δείκτη-μεσαίου, (β) παράμεσου-μικρού, (γ) αντίχειρα.

Δεν χρησιμοποιούνται αισθητήρια FSR για τα δάκτυλα μικρό και μεσαίο, εφόσον αυτά τα δάκτυλα χρησιμοποιούνται μόνο για την υποστήριξη αντικειμένων στις περισσότερες περιπτώσεις.

Ο αντίχειρας είναι το πιο ευέλικτο δάκτυλο από όλα. Έχει και αυτός τρεις βαθμούς ελευθερίας αλλά κάνει την χρήση δύο επενεργητών, ενός τυπικού περιστροφικού και ενός γραμμικού επενεργητή.

Λόγω της κινηματικής του δομής είναι ικανός να πραγματοποιήσει κάμψη/έκταση αλλά και προσαγωγή/απαγωγή. Προσθήκες που υποδηλώνουν την σημαντικότητα του αντίχειρα σε σχέση με τα υπόλοιπα δάκτυλα. Επίσης έχει και αυτό αισθητήρια μέτρησης δύναμης τοποθετημένα με παρόμοιο τρόπο όπως τα δάκτυλα του δείκτη και μεσαίου.

3.2 Έλεγχος λειτουργίας αισθητηρίων και επενεργητών

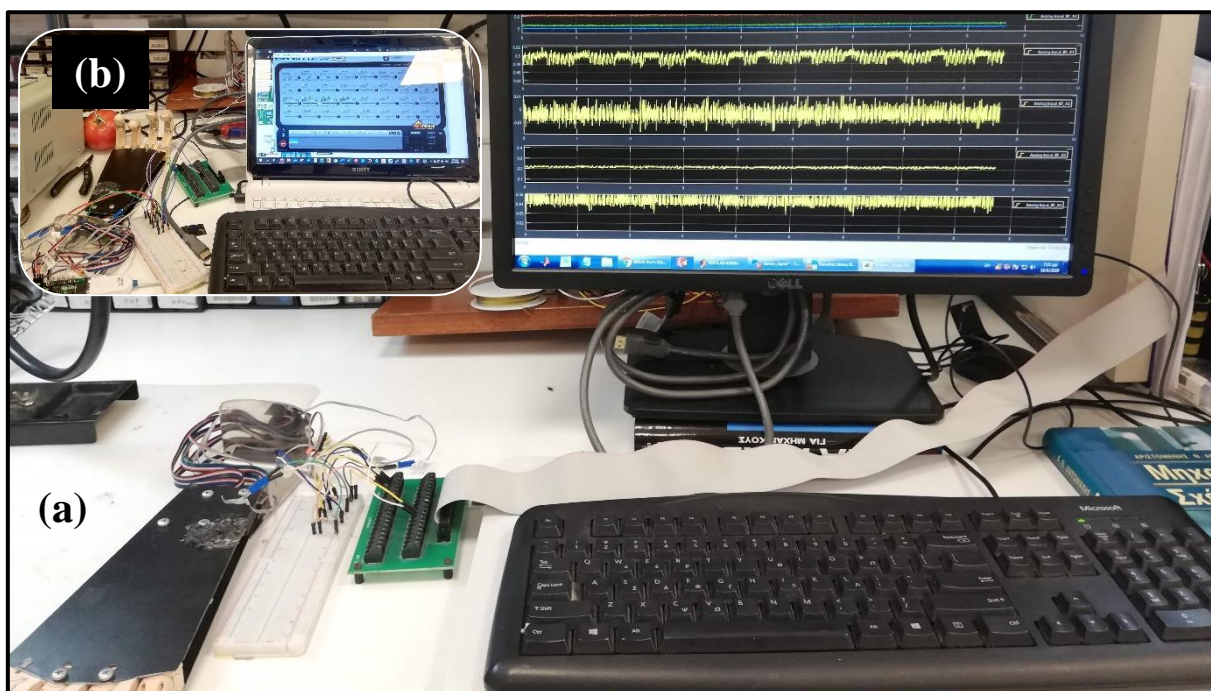
Για την ανακατασκευή του ρομποτικού χεριού, είναι απαραίτητο να γίνει ο έλεγχος λειτουργίας των συστημάτων που απαρτίζουν το ρομποτικό χέρι. Εφόσον το υφιστάμενο σύστημα ελέγχου δεν θα χρησιμοποιηθεί αλλά θα κατασκευαστεί καινούργιο, τα συστήματα που πρέπει να ελεγχθούν είναι οι επενεργητές και αισθητήρια FSR.

3.2.1 Έλεγχος FSR

Ο έλεγχος των αισθητηρίων FSR πραγματοποιήθηκε αρχικά με την χρήση ενός πολύμετρου για την ταυτοποίηση των καλωδίων, μετρώντας την αντίσταση των αισθητηρίων. Για να ληφθούν οι κατάλληλες πληροφορίες από τα αισθητήρια, πρέπει να υλοποιηθεί το κατάλληλο κύκλωμα.

Το αισθητήριο FSR είναι μια μεταβλητή αντίσταση που αλλάζει ανάλογα με την δύναμη που του ασκούμε. Ο τρόπος για την μέτρηση του είναι υλοποιώντας ένα διαιρέτη τάσης. Βρίσκοντας την κατάλληλη σταθερή αντίσταση και βάζοντας την σε σειρά με το αισθητήριο, εφαρμόζεται τάση στα άκρα του κυκλώματος. Έπειτα μετρώντας την τάση από την μεσαία λήψη υπολογίζεται κατά προσέγγιση η δύναμη που ασκείται στο αισθητήριο.

Για αυτόν τον λόγο υλοποιήθηκε το κατάλληλο κύκλωμα στο ράστερ, βάζοντας σταθερές αντιστάσεις σύμφωνα με το διάγραμμα δύναμης-τάσης που έχει ορίσει ο κατασκευαστής. Για να μετρηθεί η τάση στην μεσαία λήψη, χρησιμοποιήθηκε η κάρτα υπολογιστή Humosoft MF624 με την χρήση του προγράμματος Matlab, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 3.4 (a)**.



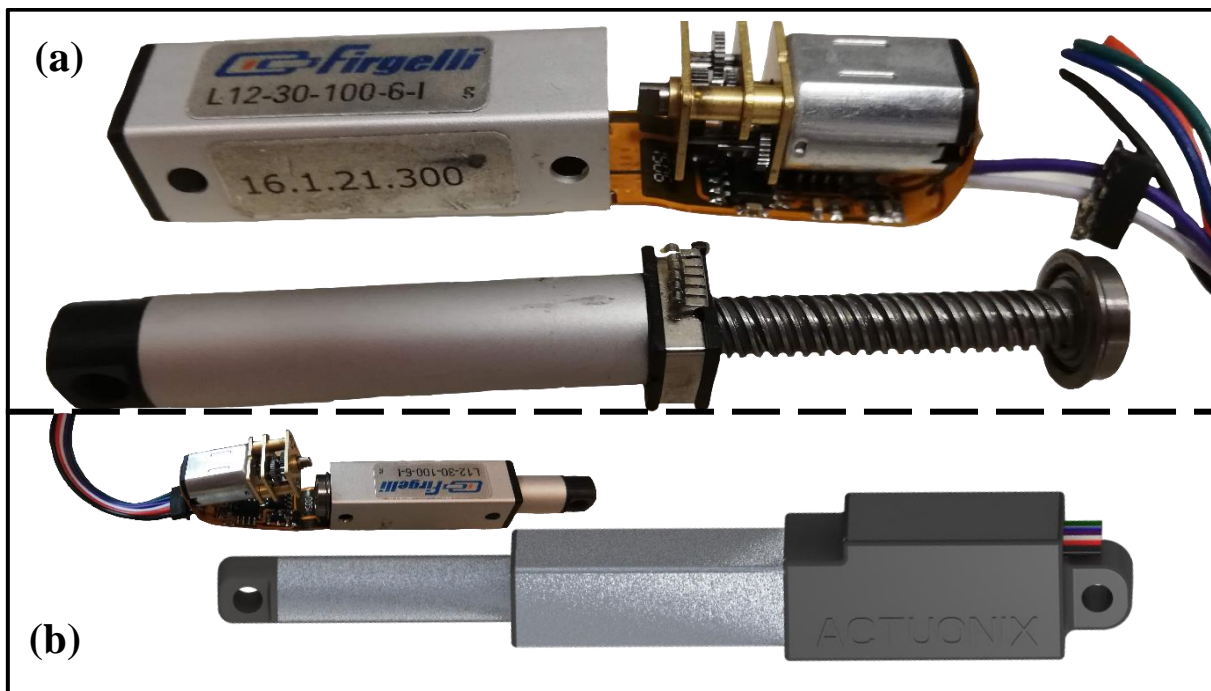
Εικόνα 3.4: Έλεγχος συστημάτων ρομποτικού χεριού, (a) έλεγχος λειτουργικότητας των αισθητηρίων FSR, (b) έλεγχος λειτουργικότητας των επενεργητών.

Εφόσον μετρήθηκαν οι τάσεις από όλα τα αισθητήρια, με την χρήση διαφόρων βαρών επιλέχθηκαν οι κατάλληλες εξατομικευμένες σταθερές αντιστάσεις. Διαπιστώθηκε η άριστη λειτουργία όλων των αισθητηρίων, εκτός από το αισθητήριο FSR που βρισκόταν στην εγγύς φάλαγγα του αντίχειρα. Όπου εξαιτίας της κατασκευής του ελαστικού μέρους της φάλαγγας, έπρεπε να ασκηθεί μια μεγαλύτερη δύναμη σε σχέση με τα υπόλοιπα για να ενεργοποιηθεί.

3.2.2 Έλεγχος επενεργητών

Επόμενο βήμα αποτελεί ο έλεγχος των επενεργητών. Οι επενεργητές που αποτελούν το σύστημα είναι έξι, πέντε γραμμικοί κινητήρες σέρβο, και ένας περιστροφικός κινητήρας σέρβο. Για τον έλεγχο της λειτουργίας τους χρησιμοποιήθηκε ο σερβοελεγκτής SSC-32, με την χρήση

του προγράμματος SSC-32 Servo Sequencer Utility. Όπου διαπιστώθηκε η επιτυχής λειτουργία όλων των επενεργητών, εκτός ενός γραμμικού κινητήρα σέρβο. Εφόσον αποσυναρμολογήθηκε η παλάμη για να αφαιρεθεί ο χαλασμένος κινητήρας διαπιστώθηκε οπτικά ότι είχαν κοπεί τα καλώδια από το κύκλωμα του κινητήρα [**Εικόνα 3.5 (a)**].



Εικόνα 3.5: Γραμμικός επενεργητής (L-12 Actuonix) για την μετατόπιση των τενόντων (νημάτων) του ρομποτικού χεριού, (a) το εσωτερικό του γραμμικού επενεργητή ανοιγμένο για επισκευή, (b) τρισδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο του γραμμικού επενεργητή.

Με την χρήση των κατάλληλων εργαλείων επισκευάστηκε ο επενεργητής. Καθώς και σχεδιάστηκε το τρισδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο του επενεργητή L-12 Actuonix, όπως φαίνονται στην **Εικόνα 3.5 (b)**.

3.3 Ανακατασκευή μηχανολογικών τμημάτων

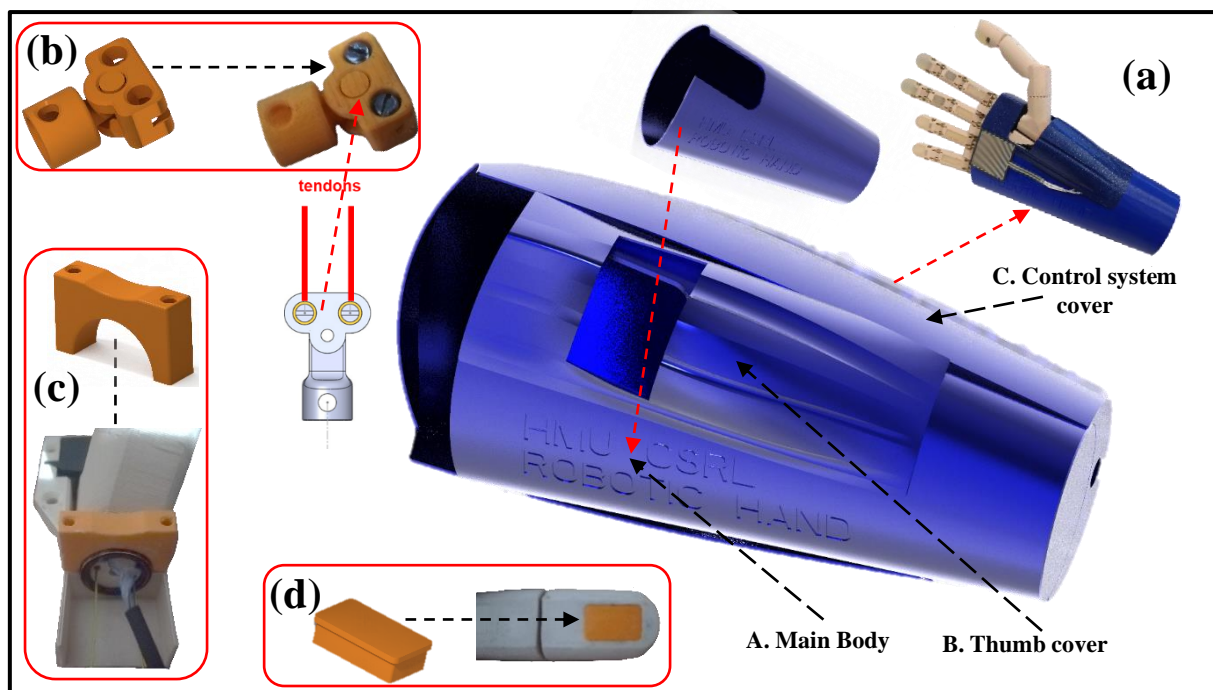
Κατά την διάρκεια του οπτικού ελέγχου διαπιστώθηκε η έλλειψη τριών βασικών τμημάτων του ρομποτικού χεριού. Πρώτη έλλειψη αποτελούσε ο σύνδεσμος T του γραμμικού επενεργητή που σύνδεε τους τένοντες του ρομποτικού χεριού.

Ο επανασχεδιασμός του έγινε βάση των υφιστάμενων συνδέσμων που υπήρχαν στα υπόλοιπα δάκτυλα. Επανασχεδιάστηκε για να εκτυπωθεί ως ένα ενιαίο κομμάτι αποτελούμενο από μια άρθρωση, αντί για δύο μέλη που αποτελούσε το παλιότερο μηχανολογικό τμήμα. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη αξιοπιστία του συνδέσμου, και η μείωση της πολυπλοκότητας [**Εικόνα 3.6 (b)**].

Στην συνέχεια έλειπε το πάνω μέρος του κουζινέτου, της άρθρωσης CMC του αντίχειρα. Επανασχεδιάστηκε με βάση τις διαστάσεις από το κάτω μέρος του κουζινέτου [**Εικόνα 3.6 (c)**]. Τέλος απουσίαζε το κάλυμμα του αντίχειρα για το αισθητήριο FSR. Επανασχεδιάστηκε με βάση τα τρισδιάστατα μοντέλα των δακτύλων, και φυσικά πραγματοποιήθηκε η βελτιστοποίησή του [**Εικόνα 3.6 (d)**].

Όλα τα μηχανολογικά μέρη εκτυπώθηκαν τρισδιάστατα με υλικό πολυγαλακτικό οξύ (PLA), σε τρισδιάστατο εκτυπωτή με εσωτερική πληρότητα 100%.

Εφόσον εκτυπώθηκαν και συναρμολογήθηκαν όλα τα μηχανολογικά μέρη που έλειπαν, επόμενο βήμα αποτέλεσε η σχεδίαση και η κατασκευή καλύμματος για το ρομποτικό χέρι αλλά και για το σύστημα ελέγχου του.



Εικόνα 3.6: Τα ανακατασκευασμένα τρισδιάστατα εκτυπωμένα εξαρτήματα για το ρομποτικό χέρι, (a) κάλυμμα-καπάκι για το ρομποτικό χέρι, (b) άρθρωση στερέωσης τενόντων στους επενεργητές, (c) κουζινοέτο άρθρωσης CMC αντίχειρα, (d) καπάκι αντίχειρα για αισθητήριο FSR.

Τα κάλυμμα που σχεδιάστηκε για το ρομποτικό χέρι αποτελείται από τρία μέλη. Το πρώτο μέλος αποτελεί το κύριο σώμα όπου ολόκληρο το ρομποτικό χέρι εισέρχεται μέσα εκτός από το σύστημα ελέγχου του. Στο κυρίως σώμα του καλύμματος επιλέχθηκε να σχεδιαστούν ανάγλυφα, το όνομα του πανεπιστήμιου και του εργαστηρίου (HMU CSRL) [**Εικόνα 3.6 (a)**].

Στο εμπρός μέρος του σώματος φέρει ένα άνοιγμα για να μπορεί να εισέλθει ο αντίχειρας. Καθώς και στο πίσω μέρος, φέρει τρεις οπές για να είναι εφικτή η συγκράτηση του αργότερα, στον ρομποτικό βραχίονα, με την χρήση της κατάλληλης βάσης.

Έπειτα πάνω στο κυρίως σώμα, εφαρμόζεται το καπάκι του αντίχειρα. Σχεδιάστηκε με μια μεγάλη καμύλη ώστε να είναι δυνατό να καλύπτει όλο τον μηχανισμό του αντίχειρα. Καθώς και με κυματώσεις για λόγους καλαισθησίας.

Για το σύστημα ελέγχου έχει προβλεφθεί χώρος στο πίσω μέρος του κυρίου σώματος του καλύμματος. Για αυτό τον λόγο σχεδιάστηκε το κάλυμμά όπου εφαρμόζει στο πίσω μέρος του κυρίου σώματος και καλύπτει-προστατεύει το σύστημα ελέγχου του ρομποτικού χεριού.

Επίσης και εδώ όλα τα καλύμματα εκτυπώθηκαν τρισδιάστατα με υλικό ένα ενισχυμένο πολυγαλακτικό οξύ (PLA+), για το λόγο ότι έχουν λεπτό πάχος και πρέπει να είναι πιο εύκαμπτα από τα υπόλοιπα μέλη, με εσωτερική πληρότητα 100%.

3.4 Ανακατασκευή συστήματος ελέγχου

Για την ανακατασκευή του συστήματος ελέγχου επιλέχθηκε να μην χρησιμοποιηθούν αισθητήρια για την μέτρηση του ρεύματος που καταναλώνει ο κάθε επενεργητής, αλλά μόνο τα αισθητήρια δύναμης FSR που βρίσκονται στα δάκτυλα του ρομποτικού χεριού. Επίσης επιλέχθηκε να ενσωματωθεί σύστημα αναγνώρισης φωνητικών εντολών.

Αρχικά πρέπει να βρεθούν τα μέγιστα όρια κίνησης για τον κάθε επενεργητή. Στην παρούσα φάση δεν χρειάζεται να βρεθούν τα όρια με βάση την μετατόπιση, αλλά τον ψευδοαναλογικό παλμό. Καθώς είναι αυτός που καθορίζει την θέση που θα κινηθεί ο κάθε επενεργητής. Για την εύρεση των ορίων χρησιμοποιήθηκε ο σερβοελεγκτής SSC-32 με την χρήση του προγράμματος SSC-32 Servo Sequencer Utility [Πίνακας 3.1].

	Linear Servo		Rotation Servo	
	Min. PWM	Max. PWM	Min. PWM	Max. PWM
Thumb	1190	1640	905	2045
Index	1285	1940	-	-
Middle	1330	1960	-	-
Ring	1400	1980	-	-
Pinky	1245	1925	-	-

Πίνακας 3.1: Μέγιστα και ελάχιστα όρια ψευδοαναλογικού παλμού του ελεγκτή SSC-32 για την κίνηση των γραμμικών και περιστροφικών servo.

3.4.1 Ηλεκτρικό κύκλωμα συστήματος ελέγχου

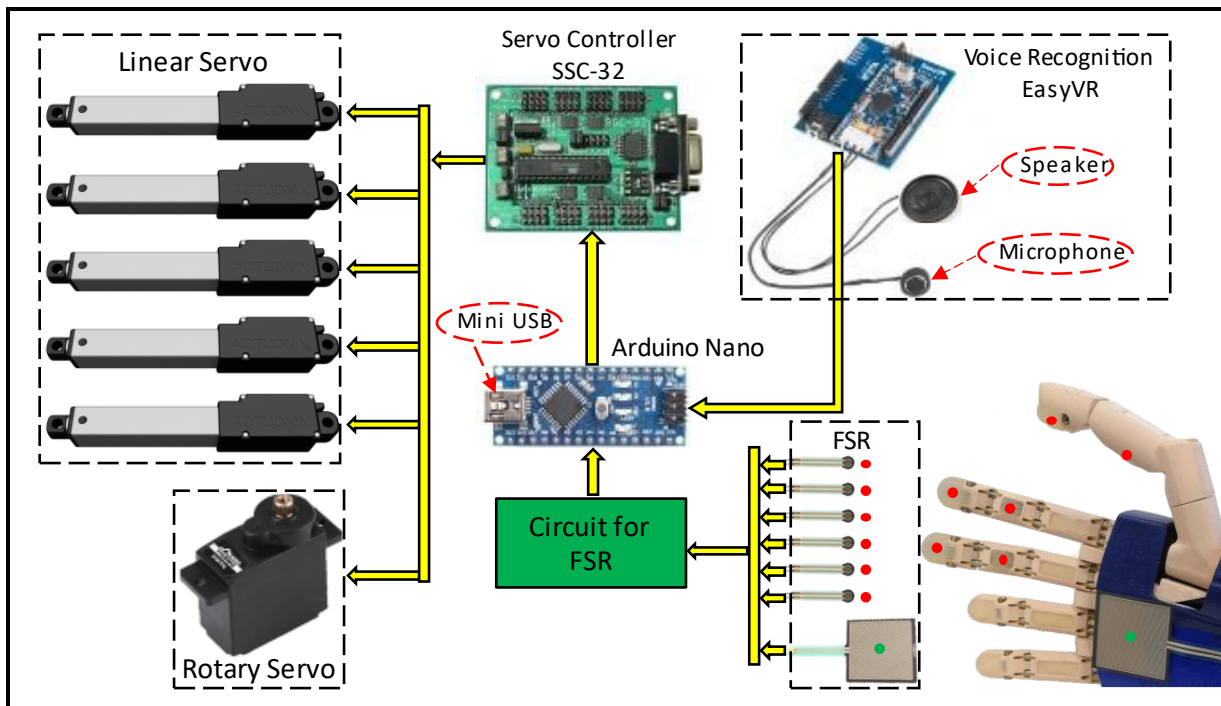
Ο μικροελεγκτής που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί είναι ο Arduino Nano. Λόγο του μικρού μεγέθους που διαθέτει, του χαμηλού κόστους και φυσικά ότι καλύπτει τις απαιτούμενες ανάγκες. Ενώ για την κίνηση των επενεργητών επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ο σερβοελεγκτής SSC-32 για πιο εύκολο και γρήγορο έλεγχο.

Ο σερβοελεγκτής αν και διαθέτει 32 κανάλια, θα χρησιμοποιηθούν μόνο 6 κανάλια, όσοι είναι και οι επενεργητές του συστήματος. Η διασύνδεση του μικροελεγκτή με τον σερβοελεγκτή γίνεται μέσω σειριακής επικοινωνίας και την χρήση τριών θυρών συνδέσεων TX, RX και GND. Η σύνδεση των θυρών του μικροελεγκτή TX και RX με του σερβοελεγκτή με παρόμοιες θύρες γίνεται με την αναστροφή αυτό τον δύο καλωδίων και φυσικά με κοινή γείωση.

Επίσης επιλέχθηκε να ενσωματωθεί σύστημα φωνητικών εντολών για την αλληλεπίδραση του χρήστη με το χέρι. Η επικοινωνία του μικροελεγκτή με το σύστημα φωνητικών εντολών γίνεται με την χρήση λογισμικής επικοινωνίας, με την διασύνδεση των θυρών 12 και 13 του μικροελεγκτή με το σύστημα των φωνητικών εντολών, και φυσικά την κοινή γείωση.

Στην **Εικόνα 3.7** διακρίνεται η αρχιτεκτονική του συστήματος ελέγχου του ρομποτικού χεριού. Είναι αρκετά απλή στην κατασκευή και φτηνή στο κόστος. Και ο λόγος είναι ότι επιλέχθηκαν

συστήματα που θα ήταν ικανά να φέρουν την διεργασία εις πέρας με την μικρότερη δυνατή διεργασία.



Εικόνα 3.7: Αρχιτεκτονική του συστήματος ελέγχου του ρομποτικού χεριού.

Οι αναλογικές θύρες που έχουμε χρησιμοποιήσει στον Arduino Nano για να συνδέσουμε την μεσαία λήψη από τα κυκλώματα των αισθητηρίων των FSR είναι επτά, και διακρίνονται στον Πίνακα 3.1. Εκτός από το αισθητήριο της παλάμης που είναι συνδεδεμένο στην αναλογική θύρα A7 του μικροελεγκτή. Επίσης στον ίδιο πίνακα διακρίνονται και τα νούμερα των καναλιών, που είναι συνδεδεμένοι οι επενεργητές με τον σερβοελεγκτή SSC-32.

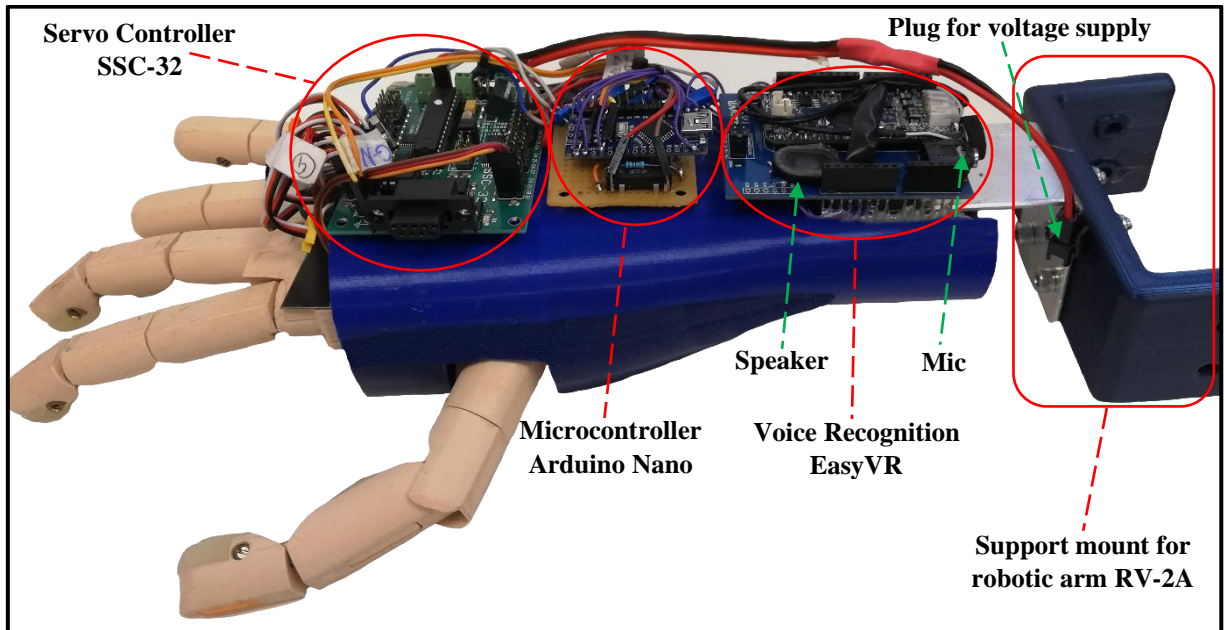
Robotic Hand Pins

	Pin Linear Servo	Pin Servo	Distal FSR Pin Sensor	Intermediate FSR Pin Sensor
Thumb	11	31	A4	A5
Index	15	-	A0	A1
Middle	14	-	A2	A3
Ring	13	-	-	-
Pinky	12	-	-	-

Πίνακας 3.2: Αντιστοιχίσεις θυρών μικροελεγκτή Arduino Nano για τις αναλογικές θύρες που συνδέονται με τα αισθητήρια δύναμης (FSR), και τις θύρες του ελεγκτή SSC-32 για τα γραμμικά και περιστροφικά servo.

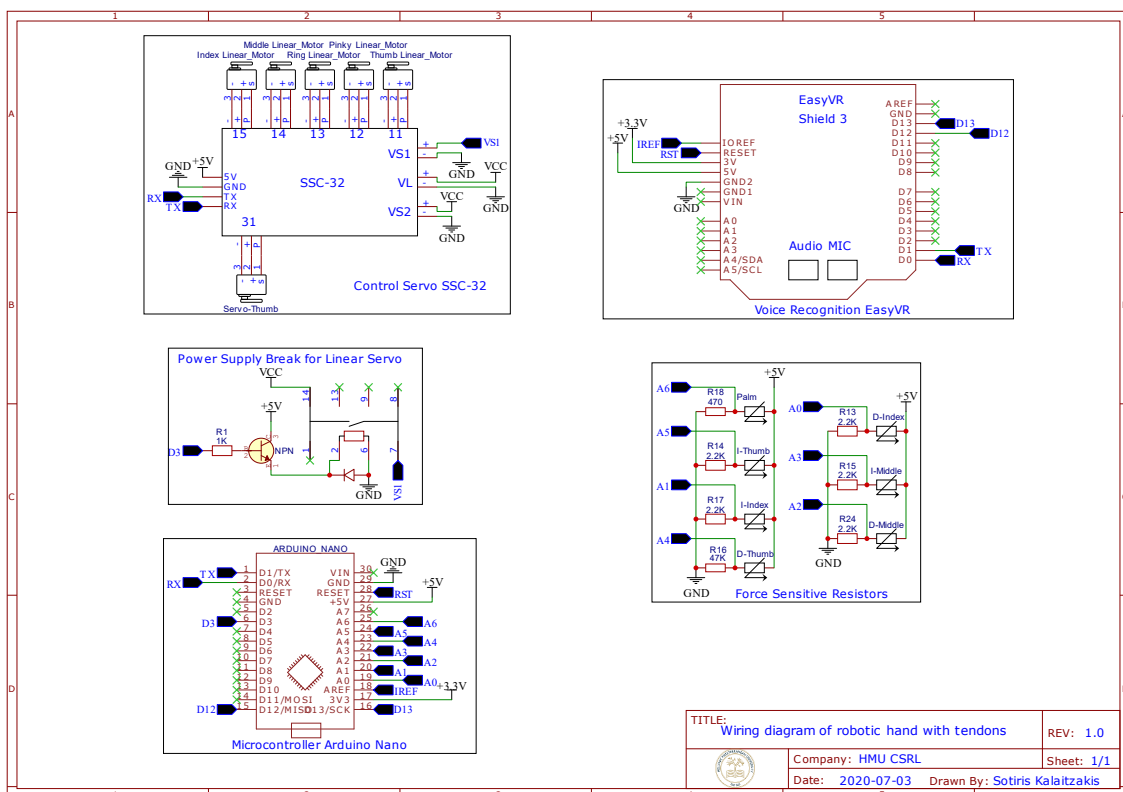
Στην Εικόνα 3.8 διακρίνεται το τελικό σύστημα ελέγχου, μετά την κατασκευή και την τοποθέτηση του, στο πίσω μέρος του κυρίως σώματος, του ρομποτικού χεριού. Βλέπουμε ότι το σύστημα ελέγχου έχει σχεδιαστεί αρκετά συμπαγές, ώστε να είναι δυνατό να ενσωματωθεί πάνω στο ρομποτικό χέρι. Επίσης στο δεξί μέρος της εικόνας, διακρίνεται και η βάση που θα χρησιμοποιηθεί για την σύνδεση του ρομποτικού χεριού με τον ρομποτικό βραχίονα.

Όλο το σύστημα είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να δέχεται ως πηγή εισόδου μια σταθερή τάση $V_{in}=+5\text{ Volt}$. Στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν έχει ενσωματωθεί κάποια μπαταρία μέσα στο σύστημα, καθώς στην παρούσα φάση δεν κρίθηκε αναγκαίο. Μετέπειτα έχει προβλεφθεί χώρος που θα μπορεί να ενσωματώσει μια μπαταρία λιθίου έως 10Ah.



Εικόνα 3.8: Επεξήγηση κυρίων σημείων ηλεκτρονικού κυκλώματος του ρομποτικού χεριού.

Στην Εικόνα 3.9 διακρίνεται το πλήρες σχέδιο του ηλεκτρονικού κυκλώματος για το σύστημα ελέγχου του ρομποτικού χεριού.



Εικόνα 3.9: Σχέδιο ηλεκτρικού κυκλώματος συστήματος ελέγχου του ρομποτικού χεριού.

3.4.2 Προγραμματισμός συστήματος ελέγχου ρομποτικού χεριού

Η κύρια δομή του προγραμματισμού του συστήματος ελέγχου αποτελείται από δύο κατηγορίες. Η πρώτη είναι οι χειρονομίες, και η δεύτερη, η αυτόνομη λαβή με την χρήση κάποιων προ-λαβών.

Η επικοινωνία με το ρομποτικό χέρι γίνεται με δύο τρόπους. Είτε μέσω της σειριακής επικοινωνίας, είτε μέσω των φωνητικών εντολών. Η προκαθορισμένη baud rate της σειριακής επικοινωνίας του μικροελεγκτή με κάποια συσκευή, ορίζεται στα 115200. Ενώ η προκαθορισμένη baud rate, της software ψηφιακής επικοινωνίας του μικροελεγκτή με το σύστημα των φωνητικών εντολών, ορίζεται στα 9600. Ο χρήστης είτε μέσω των φωνητικών εντολών, είτε μέσω της σειριακής επικοινωνίας, επιλέγει εάν επιθυμεί το ρομποτικό χέρι να πραγματοποιήσει κάποια χειρονομία, ή να πιάσει κάποιο αντικείμενο.

Για τις φωνητικές εντολές, για να πραγματοποιηθεί κάποια χειρονομία ο χρήστης πρέπει να πει την λέξη “χειρονομία”. Έπειτα από τον χαρακτηριστικό ήχο που θα παράξει το ηχείο του συστήματος των φωνητικών εντολών, να εκφωνήσει την κατάλληλη λέξη της χειρονομίας που θέλει το ρομποτικό χέρι να πραγματοποιήσει.

Το σύστημα είναι προγραμματισμένο να μπορεί να εκτελέσει 8 βασικές χειρονομίες που θα αναλυθούν περαιτέρω στο κεφάλαιο της πειραματικής αποτίμησης. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα να προστεθούν επιπλέον χειρονομίες, μέσω του επαναπρογραμματισμού του μικροελεγκτή αλλά και του συστήματος των φωνητικών εντολών.

Εφόσον ο μικροελεγκτής λάβει την εντολή της επιθυμητής χειρονομίας, την πραγματοποιεί με την μέγιστη ταχύτητα κίνησης των επενεργητών, και παραμένει στην ίδια θέση μέχρι να του δοθεί επόμενη εντολή. Κατά την διάρκεια της χειρονομίας, δεν λαμβάνει καθόλου τα δεδομένα από τα αισθητήρια, παρά μόνο κινεί τους κινητήρες στα όρια τους. Καθώς στην χειρονομία το κάθε δάκτυλο βρίσκεται είτε σε πλήρη έκταση είτε σε πλήρη κάμψη.

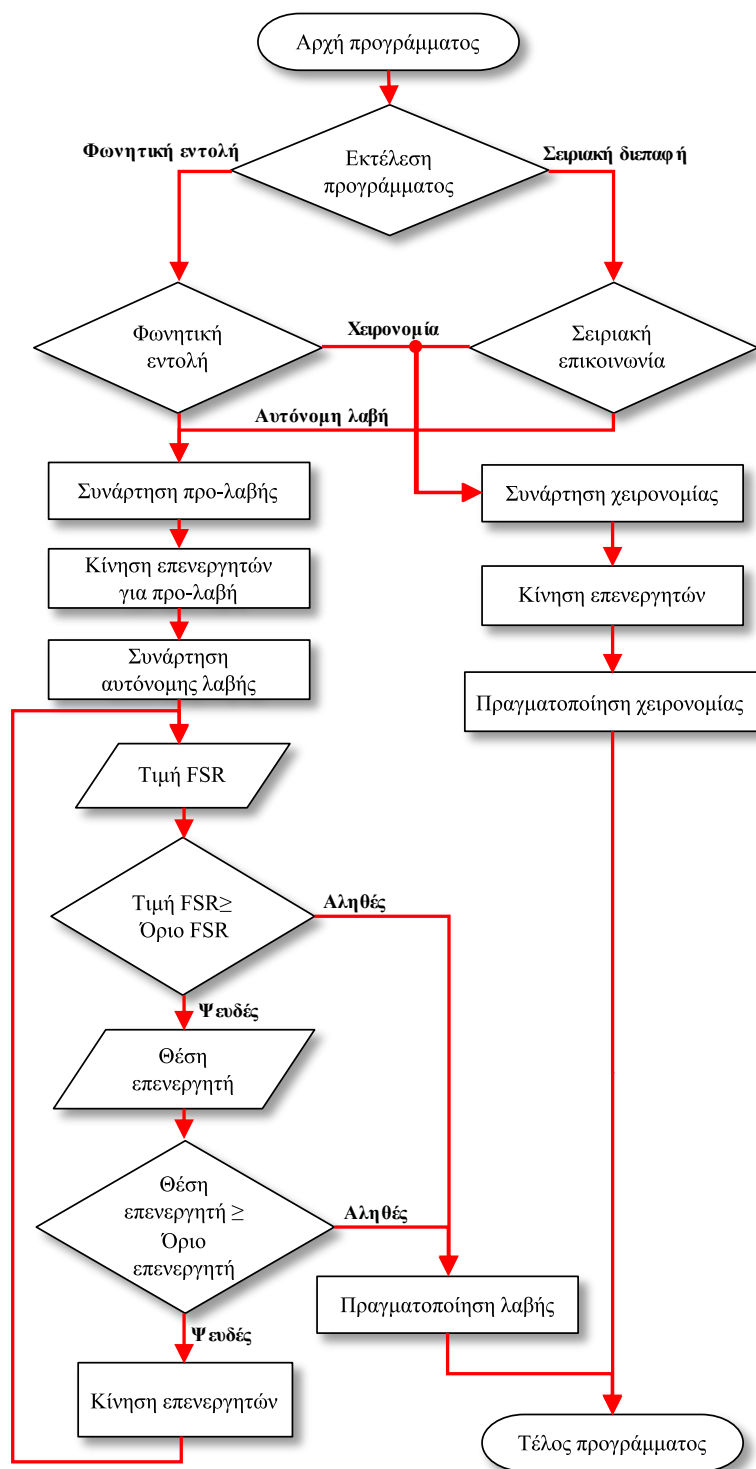
Στην περίπτωση που ο μικροελεγκτής μέσω των φωνητικών εντολών λάβει την εντολή “λαβή” από τον χρήστη. Πρέπει έπειτα από τον χαρακτηριστικό ήχο, που θα παράξει το ηχείο του συστήματος των φωνητικών εντολών, να εκφωνήσει την κατάλληλη λέξη της προ-λαβής που θέλει το ρομποτικό χέρι να πραγματοποιήσει.

Μόλις ο χρήστης επιλέξει την προ-λαβή που επιθυμεί, οι επενεργητές του ρομποτικού χεριού κινούνται με την μέγιστη ταχύτητα, στις θέσεις που έχουν οριστεί για τον κάθε επενεργητή. Στην συνέχεια ο χρήστης έχει να επιλέξει τρεις επιλογές. Τις εξής “άνοιξε”, “κλείσε” ή “τέλος”. Εάν ο χρήστης επιλέξει την εντολή “κλείσε” το σύστημα ελέγχου κινεί τους επενεργητές ανά μία μικρή μονάδα μετατόπισης, λαμβάνοντας ταυτόχρονα τα δεδομένα των αισθητηρίων FSR και τα μέγιστα όρια κίνησης των επενεργητών.

Εάν τα δεδομένα από τα αισθητήρια FSR ξεπεράσουν το όριο που του έχουμε ορίσει, ή αν ο επενεργητής φτάσει στο μέγιστο όριο κίνησης του, τότε διακόπτει την λειτουργία του επενεργητή και η λαβή έχει ολοκληρωθεί. Εάν μετά την ολοκλήρωση ο χρήστης επιλέξει την εντολή “άνοιξε” τότε τα δάκτυλα από το ρομποτικό χέρι ανοίγουν και κινούνται με την μέγιστη δυνατή ταχύτητα στις θέσεις που βρίσκονταν για την προ-λαβή.

Μπορούμε να ξαναεπαναλάβουμε την αυτόνομη λαβή, με την συγκεκριμένη προ-λαβή ή να επιλέξουμε την εντολή τέλος ώστε να πραγματοποιήσουμε κάποια χειρονομία ή κάποια αυτόνομη λαβή με άλλη προ-λαβή.

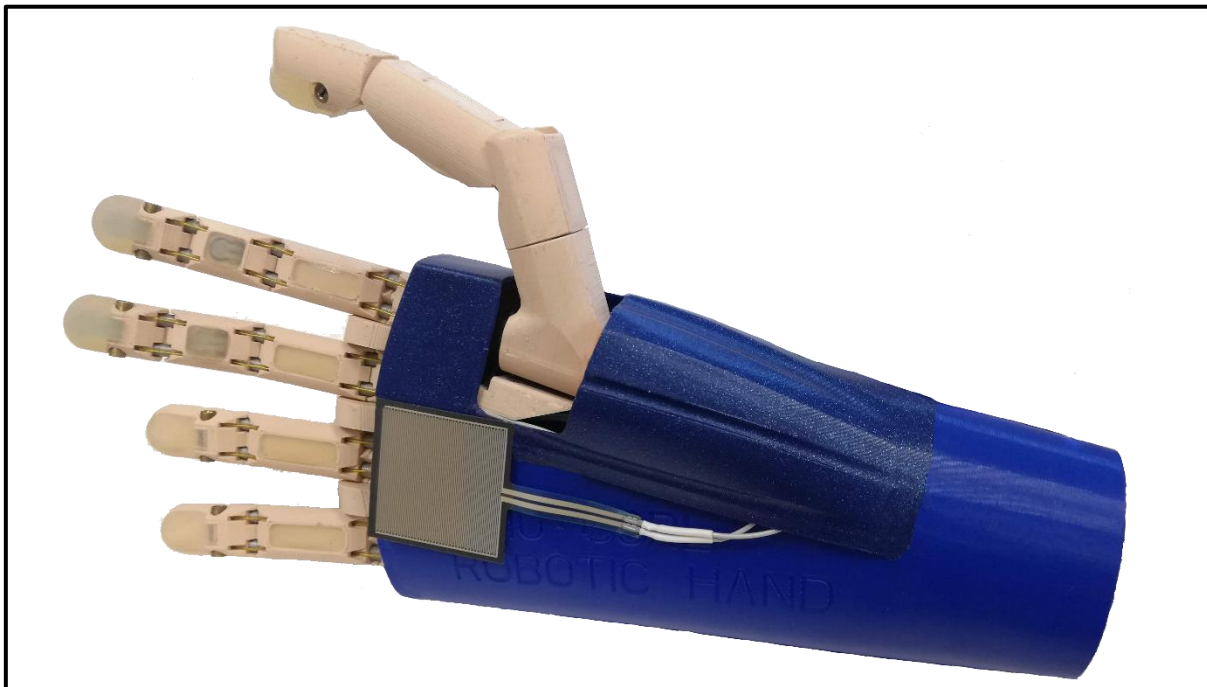
Στην **Εικόνα 3.10** διακρίνεται το διάγραμμα ροής του προγράμματος για το σύστημα ελέγχου του ρομποτικού χεριού.



Εικόνα 3.10: Διάγραμμα ροής εκτέλεσης εντολών του ρομποτικού χεριού.

3.5 Παρουσίαση νέου ρομποτικού χεριού

Στην **Εικόνα 3.11** διακρίνεται το τελικό ρομποτικό χέρι μετά την ανακατασκευή του. Είναι ικανό να εκτελέσει διάφορα είδη χειρονομιών που του έχουμε ορίσει, και θα αναλυθούν στο παρακάτω κεφάλαιο. Επίσης έχει την δυνατότητα να πιάνει αντικείμενα με την χρήση της αυτόνομης λαβής. Ως τρόπος επικοινωνίας του ανθρώπου με το ρομποτικό χέρι ορίζεται η ομιλία, δηλαδή η χρήση φωνητικών εντολών.



Εικόνα 3.11: Το ρομποτικό χέρι μετά την ανακατασκευή του.

Οι τένοντες του ρομποτικού χεριού είναι από νήμα ψαρέματος με διάμετρο 0.4 mm και έχει μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό 45 kg. Το οποίο είναι υπεραρκετό για να καλύψει τις ανάγκες του ρομποτικού χεριού. Επίσης σημαντικό είναι ότι το νήμα δεν επιμηκύνεται, διαφορετικά θα αποτελούσε ακατάλληλη επιλογή για το ρομποτικό χέρι.

Οι βαθμοί ελευθερίας και ο τρόπος κίνησης δεν έχει αλλάξει σε σχέση με το αρχικό, αλλά έχει βελτιωθεί. Επίσης ο επανασχεδιασμός του συστήματος ελέγχου επέτρεψε να ενσωματωθεί πάνω στο ρομποτικό χέρι. Ο σχεδιασμός του έχει γίνει ώστε να αποτελεί ένα συμπαγές αυτόνομο χέρι με ενσωματωμένα όλα τα συστήματα ελέγχου του.

Δόθηκε έμφαση στην σχεδίαση του ώστε εκτός από λειτουργικό να είναι και αισθητικά όμορφο εφόσον παραλληλίζει ένα ανθρωπόμορφο χέρι.

Επίσης έχει ενσωματωθεί ένα επιπλέον αισθητήριο FSR στην παλάμη του ρομποτικού χεριού.

4 Πειραματική αποτίμηση

4.1 Γενική περιγραφή πειραμάτων

Για να αξιολογηθεί και να ερευνηθούν οι δυνατότητες του συγκεκριμένου ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού, είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθεί η πειραματική αποτίμηση του. Δηλαδή να δημιουργηθεί το πειραματικό πλαίσιο, για την ανάλυση των δυνατοτήτων του. Αυτό θα πραγματοποιηθεί μέσα από τρία πειράματα.

Το πρώτο πείραμα είναι η εκτέλεση διαφόρων χειρονομιών, με την χρήση φωνητικών εντολών. Το δεύτερο πείραμα είναι η πραγματοποίηση αυτόνομης λαβής αντικειμένων, με την χρήση προ-λαβών, και η καταγραφή των δεδομένων της τάσης από τα αισθητήρια FSR. Η χρήση της αυτόνομης λαβής πραγματοποιείται με βάση το διάγραμμα ροής στην Εικόνα 3.10. Και το τελευταίο πείραμα είναι η μέτρηση της δύναμης των δακτύλων του ρομποτικού χεριού.

➤ Χειρονομίες

Στο πρώτο πείραμα γίνεται η επίδειξη των χειρονομιών, που είναι προγραμματισμένο να εκτελεί το ρομποτικό χέρι. Επίσης αξιολογείται η ανταπόκριση του συστήματος των φωνητικών εντολών, στην εκτέλεση αυτών των χειρονομιών.

➤ Αυτόνομες λαβές

Στο δεύτερο πείραμα γίνεται η αυτόνομη λαβή διάφορων αντικειμένων και η μετακίνηση τους σε προκαθορισμένες θέσεις στο χώρο, επάνω από το σημείο αρπαγής του. Επίσης για την εκτέλεση της αυτόνομης λαβής, χρησιμοποιούνται τέσσερα διαφορετικά είδη προ-λαβών. Η πρώτη προ-λαβή είναι με όλα τα δάκτυλα, Power Grasp. Η δεύτερη προ-λαβή είναι με τρία δάκτυλα, Three Finger Grip (δείκτης-μεσαίος-αντίχειρας). Η τρίτη προ-λαβή είναι με δύο δάκτυλα, Precision Grip (δείκτης-αντίχειρας). Η τέταρτη και τελευταία προ-λαβή είναι με τον αντίχειρα, Lateral Prehension.

Η πειραματική μελέτη της αυτόνομης λαβής για κάθε πείραμα πραγματοποιείται για προκαθορισμένες επαναλήψεις. Στην συνέχεια γίνεται η καταγραφή των δεδομένων από τα αισθητήρια FSR, για την αξιολόγηση της επίδρασης τους στην επιτυχημένη αρπαγή των αντικειμένων. Σε κάθε πείραμα πραγματοποιήθηκε η αυτόνομη λαβή για δέκα επαναλήψεις. Από εκεί ανάλογα με τον εάν κατάφερε το ρομποτικό χέρι να σηκώσει το αντικείμενο θεωρούνταν επιτυχές, όπως και προκύπτουν τα ποσοστά επιτυχίας που περιγράφονται παρακάτω.

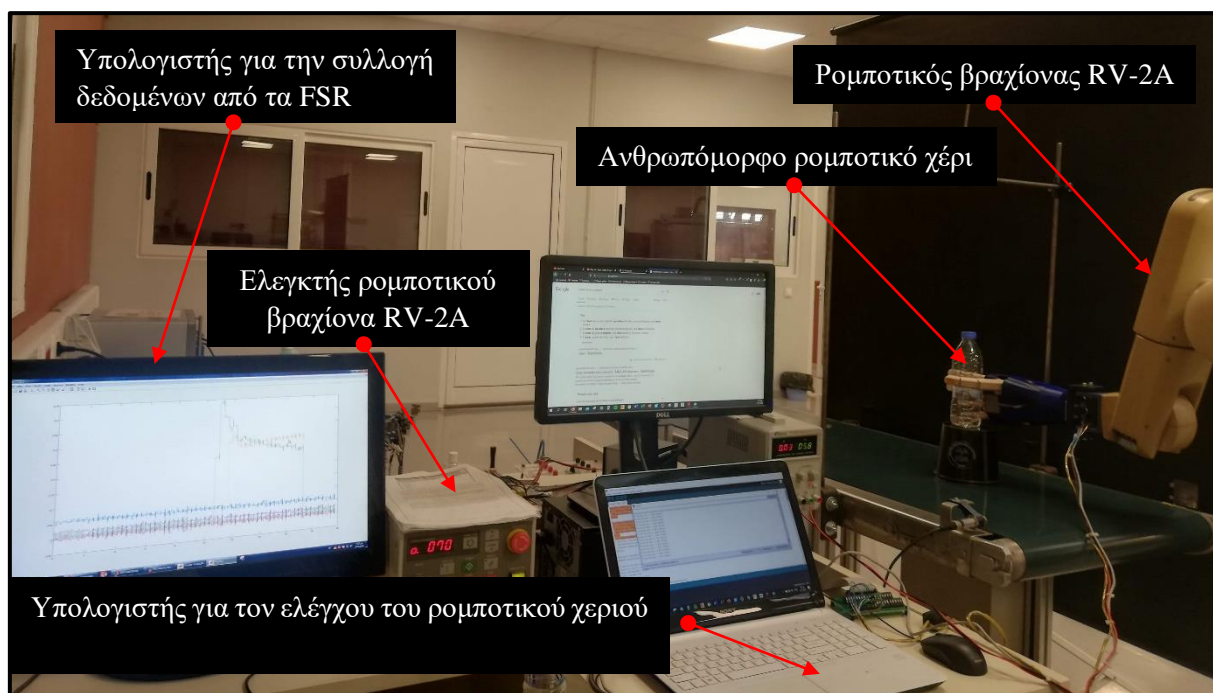
➤ Μέτρηση δύναμης

Στο τελευταίο πείραμα μετριέται η μέγιστη δύναμη, που είναι δυνατό να ασκήσουν τα ρομποτικά δάκτυλα δείκτη και μεσαίου, μόνο με την χρήση των τενόντων. Δηλαδή χωρίς να επιδράει το βάρος, η κάποια εξωτερική δύναμη στο σημείο που ασκούνε την δύναμη.

4.2 Πειραματική διάταξη

Για την πραγματοποίηση των πειραματικών δοκιμών έγινε η χρήση δύο ηλεκτρονικών υπολογιστών. Με τον πρώτο να χρησιμοποιείται για την συλλογή δεδομένων από τα αισθητήρια FSR, και τον δεύτερο για την σειριακή επικοινωνία του υπολογιστή με το ρομποτικό χέρι [Εικόνα 4.1].

Το ρομποτικό χέρι τοποθετήθηκε στον ρομποτικό βραχίονα RV-2A που διαθέτει το εργαστήριο CSRL. Η συγκράτηση του έγινε με την κατάλληλη προσαρμογή βάσης, στην φλάντζα του ρομποτικού βραχίονα. Ενώ η κίνηση του ρομποτικού βραχίονα εκτελείται χειροκίνητα με την χρήση του teach pendant.

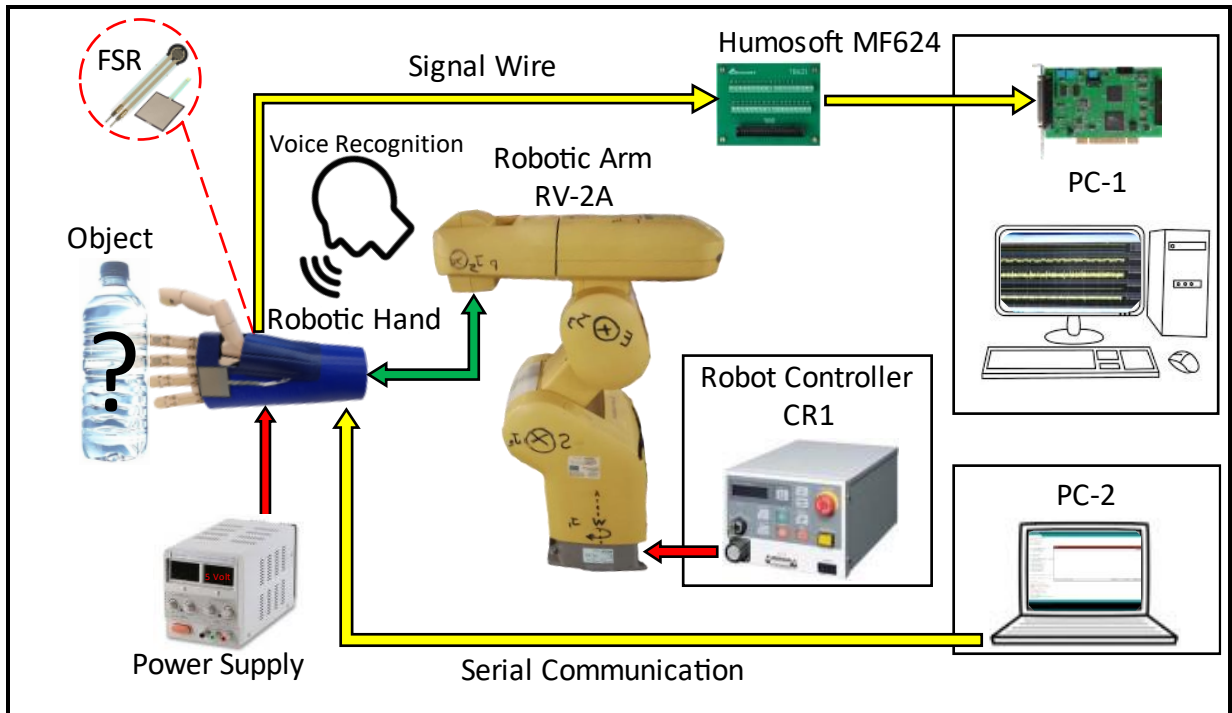


Εικόνα 4.1: Διάταξη πειραματικών δοκιμών του ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού στο εργαστήριο Ρομποτικής-Μηχατρονικής.

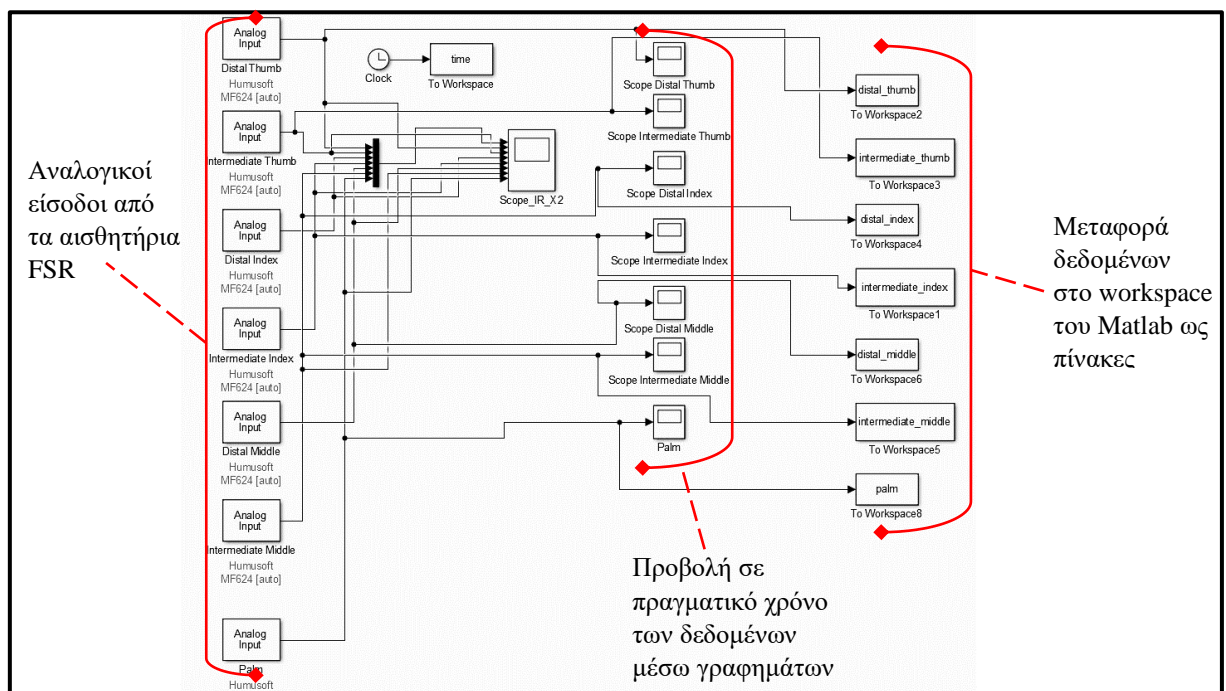
Στην **Εικόνα 4.2** διακρίνεται η αρχιτεκτονική όλου του συστήματος της πειραματικής διάταξης. Η τροφοδοσία του ρομποτικού χεριού πραγματοποιήθηκε με την χρήση σταθερής πηγής τάσης, διότι στο στάδιο των πειραματικών δοκιμών δεν είναι αναγκαία η ενσωμάτωση κάποιου είδους μπαταρίας, επάνω στο ρομποτικό χέρι.

Τα δεδομένα από τα αισθητήρια FSR μετρούνται απευθείας χωρίς την παρεμβολή ενδιάμεσων κυκλωμάτων για την μέγιστη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Για την εξαγωγή των δεδομένων των FSR έγινε η χρήση της κάρτας Humusoft MF624.

Η σύνδεση με την εσωτερική κάρτα υπολογιστή, MF624 επιτρέπει στον Η/Υ, να δέχεται απευθείας τα σήματα που του στέλνουμε. Στην συγκεκριμένη περίπτωση αναλογικά σήματα, και να τα εμφανίζει στο λογισμικό Matlab για περαιτέρω τροποποίηση, οπτικοποίηση ή αποθήκευση.



Εικόνα 4.2: Αρχιτεκτονική της πειραματικής διάταξης για την πειραματική αποτίμηση του ρομποτικού χεριού.



Εικόνα 4.3: Πρόγραμμα Matlab Simulink για την μεταφορά δεδομένων στο workspace.

Στην **Εικόνα 4.3** διακρίνεται το πρόγραμμα της εφαρμογής Simulink του Matlab, που έχει ως σκοπό την συλλογή των δεδομένων από τα αισθητήρια FSR. Αριστερά στην ίδια εικόνα

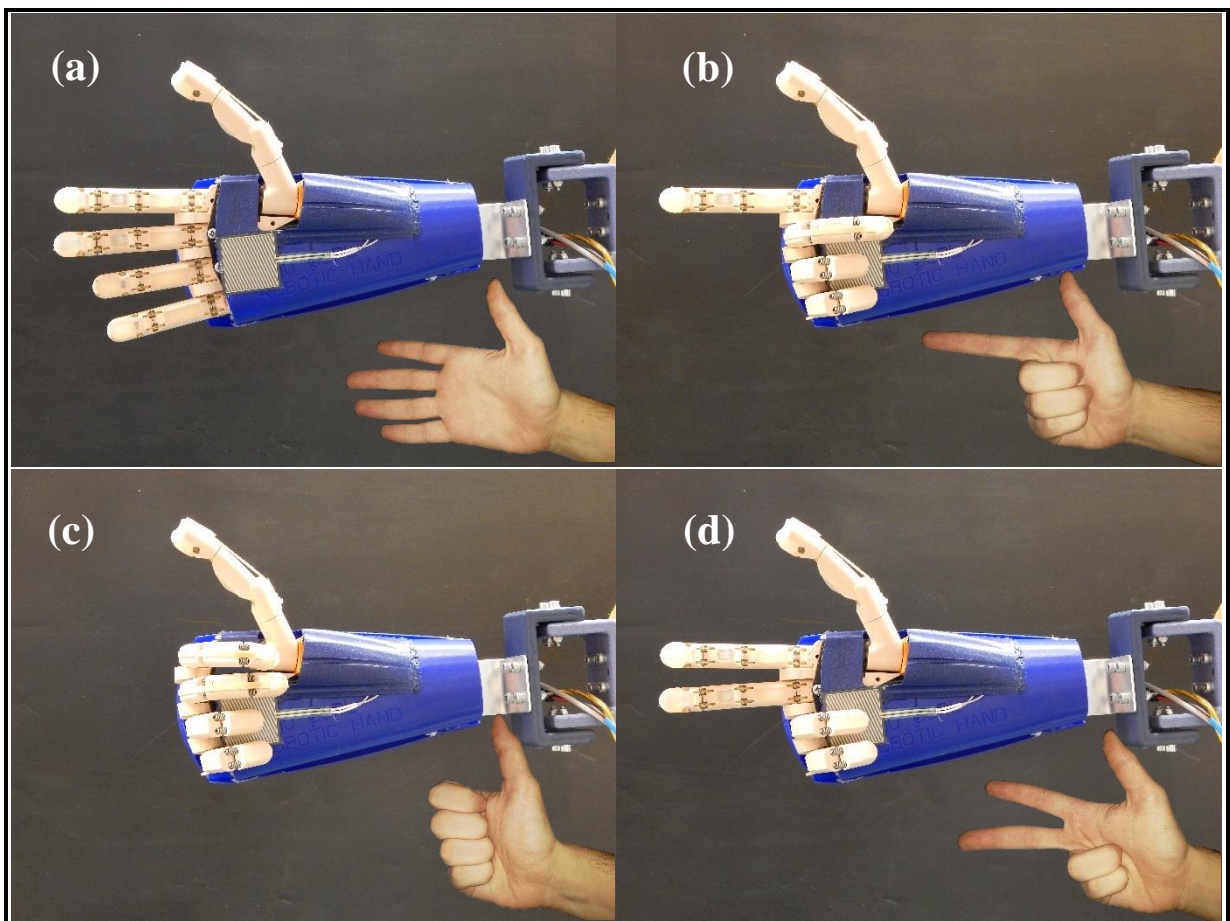
διακρίνονται οι αναλογικές είσοδοι από την κάρτα της Humosoft, όπου κάθε είσοδος ενώνεται με δύο βελάκια. Το ένα είναι για την οπτικοποίηση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο μέσω του plot, και το δεύτερο για την αποθήκευση των τιμών σε συγκεκριμένες μεταβλητές με την μορφή μονοδιάστατων πινάκων. Καθώς και την αποθήκευση του χρόνου στο περιβάλλον workspace του Matlab.

4.3 Ανάλυση πειραμάτων

4.3.1 Διάφορα είδη χειρονομιών με την χρήση φωνητικών εντολών

Στον καθημερινό τρόπο ζωής, είναι πολύ κοινό οι άνθρωποι να χρησιμοποιούν τα χέρια τους με τις χειρονομίες που κάνουν, για γρήγορη και απλή επικοινωνία μεταξύ τους. Οι χειρονομίες αυτές μπορούν να περιγράψουν για το τι πράγμα λένε, όπως για παράδειγμα να δείξεις άλλους ανθρώπους, θέσεις ή πράγματα στο περίγυρο. Καθώς και να δώσουν έμφαση και στοιχεία για την συναισθηματική τους κατάσταση.

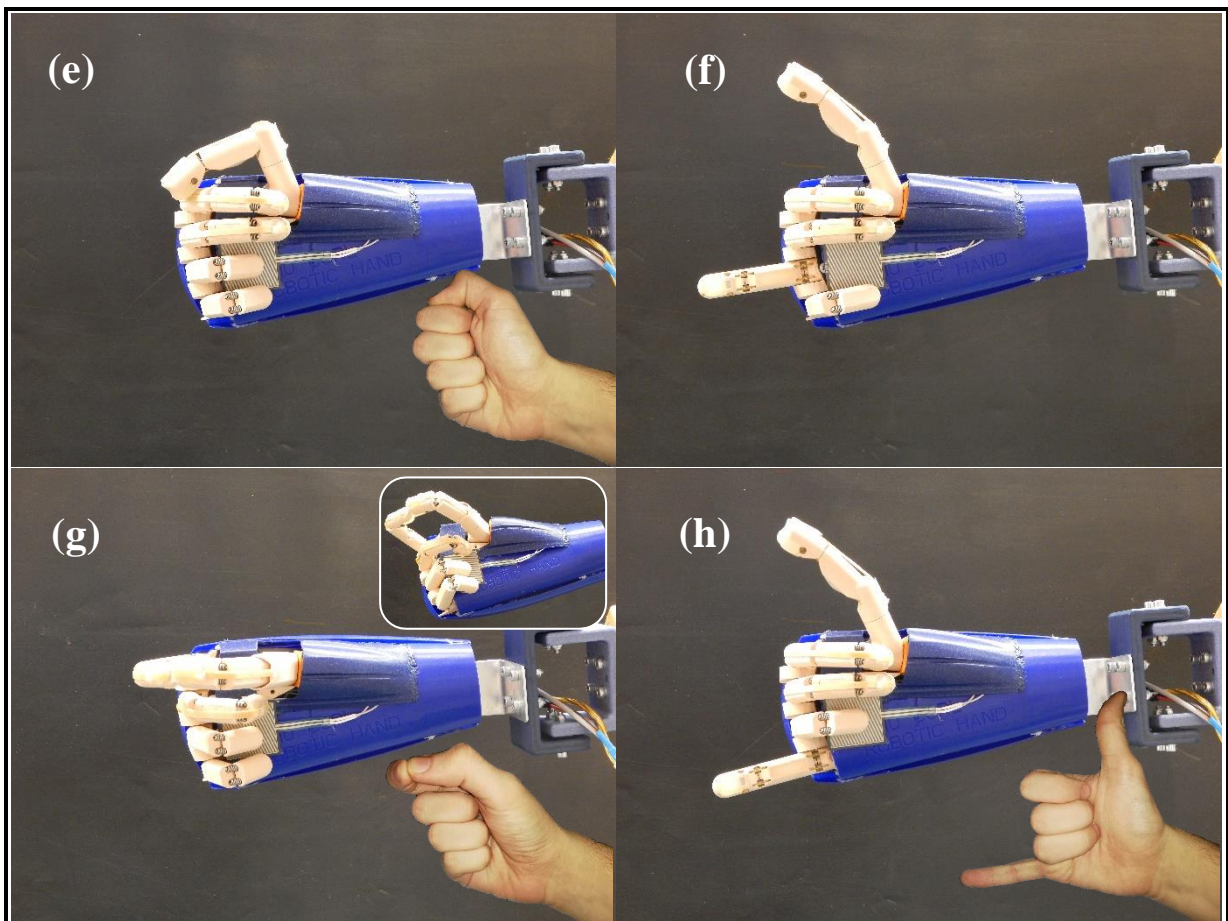
Το ρομποτικό χέρι έχει προγραμματιστεί ώστε να εκτελεί οκτώ βασικές χειρονομίες με την χρήση του συστήματος των φωνητικών εντολών. Αυτές οι βασικές χειρονομίες είναι σε θέση να πραγματοποιηθούν και από το ανθρώπινο χέρι, εξαιρουμένου της χειρονομίας στην **Εικόνα 4.5 (b)**. Καθώς αποτελεί ένα νέο είδος χειρονομίας, διότι δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί από το ανθρώπινο χέρι.



Εικόνα 4.4: Διάφορα είδη χειρονομιών από το ανθρωπόμορφο ρομποτικό χέρι μιμούμενο ανθρώπινες χειρονομίες

Στις **Εικόνα 4.4** και **Εικόνα 4.5** διακρίνονται όλες οι χειρονομίες που πραγματοποιήθηκαν. Στις ίδιες εικόνες γίνεται και η σύγκριση των χειρονομιών του ανθρώπινου χεριού με τις ίδιες χειρονομίες, εκτελεσμένες από ανθρώπινο χέρι. Η ομοιομορφία σε όλες τις περιπτώσεις είναι αρκετά κοντά στην πραγματική. Το ρομποτικό χέρι είναι σε θέση να πραγματοποιήσει οποιαδήποτε χειρονομία επιθυμούμε, με τον κατάλληλο επαναπρογραμματισμού του, μέσω της σειριακής επικοινωνίας για να χρησιμοποιηθεί ως μια νέα χειρονομία.

Λόγου του μικρού μήκους κίνησης των γραμμικών επενεργητών, που χρειάζεται η κάθε χειρονομία για να πραγματοποιηθεί, προκύπτει ένας μέσος χρόνος κίνησης περίπου 1.5 sec. Ωστε να ολοκληρωθεί η κίνηση για την εκτέλεση της κάθε χειρονομίας, από την αρχική κατάσταση που βρισκόταν.



Εικόνα 4.5: Διάφορα είδη χειρονομιών από το ανθρωπόμορφο ρομποτικό χέρι μιμούμενο ανθρώπινες χειρονομίες συμπεριλαμβανομένου και την κίνηση του αντίχειρα.

Στον **Πίνακα 4.1** παρουσιάζεται η φρασεολογία που είναι προγραμματισμένο το ρομποτικό χέρι να υπακούει, για να εκτελεί την αντίστοιχη χειρονομία. Δηλαδή η λέξη κλειδί που πρέπει να πει ο χρήστης μέσω της ομιλίας, για να πραγματοποιηθεί η επιθυμητή χειρονομία.

Gestures phraseology			
<i>Gesture</i>	<i>Phraseology</i>	<i>Gesture</i>	<i>Phraseology</i>
a	“Παλάμη”	e	“Μπουνιά”
b	“Δείκτης”	f	“Νέο”
c	“Μπράβο”	g	“Λογαριασμός”

d	“Όπλο”	h	“Τηλέφωνο”
---	--------	---	------------

Πίνακας 4.1: Φρασεολογία χειρονομιών για την χρήση των φωνητικών εντολών

Η αξιολόγηση του ποσοστού επιτυχίας των φωνητικών εντολών έγινε με βάση την άμεση εκτέλεση της χειρονομίας με την εκφώνηση μόνο μιας φοράς της κατάλληλης λέξης. Συνολικά επιτυγχάνεται κατά **70%** η εκτέλεση των χειρονομιών με την χρήση των φωνητικών εντολών. Χωρίς αυτό να αποτελεί πρόβλημα, διότι η λέξη-φράση μπορεί να επαναληφθεί ώστε να εκτελεσθεί η κατάλληλη χειρονομία.

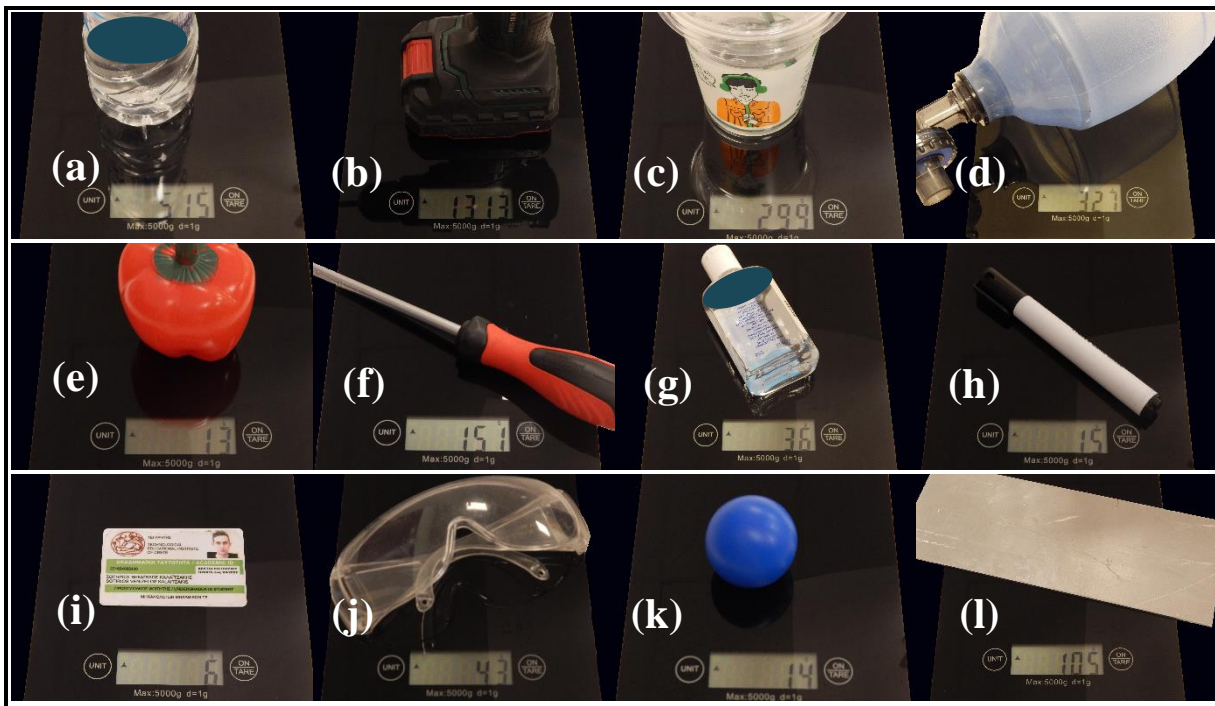
4.3.2 Αυτόνομες λαβές με την χρήση προ-λαβών

Σε κάθε πείραμα πραγματοποιήθηκαν δύο επιμέρους πειράματα. Στο πρώτο σκέλος πραγματοποιήθηκε η αυτόνομη αρπαγή των αντικειμένων με την χρήση τεσσάρων διαφορετικών προ-λαβών, και η κίνησή τους σε καθορισμένη τροχιά.

Το κάθε πείραμα πραγματοποιήθηκε από δέκα φορές και έπειτα βγήκε το ποσοστό επιτυχίας του κάθε πειράματος. Για να θεωρηθεί επιτυχημένο ένα πείραμα πρέπει το ρομποτικό χέρι να καταφέρει να αρπάξει το αντικείμενο με επιτυχία, και να το μεταφέρει στην προκαθορισμένη θέση, χωρίς εκείνο να γλιστρήσει και να πέσει κατά την διάρκεια της κίνησης, αλλά και του τερματισμού.

Στο δεύτερο σκέλος πραγματοποιήθηκε η αυτόνομη λαβή πάλι με την χρήση των κατάλληλων προ-λαβών ανά αντικείμενο από το ρομποτικό χέρι. Αυτήν την φορά λαμβάνοντας τα δεδομένα από τα αισθητήρια FSR. Τα δεδομένα από τα αισθητήρια λήφθηκαν κατά την διαδικασία μιας επιτυχημένης λαβής όπου πραγματοποιούσε την διαδικασία της λαβής-αρπαγής και του ανοίγματος της.

Με αυτό τον τρόπο αναλύουμε τα δεδομένα από τα αισθητήρια και αξιολογούμε κατά πόσο επιδρούνε αυτά τα αισθητήρια στην εύρεση της κατάλληλης δύναμης-επαφής για να κινηθούν οι επενεργητές και να πιάσουν τα αντικείμενα.



Εικόνα 4.6: Τα αντικείμενα και το βάρος του κάθε αντικειμένου που χρησιμοποιήθηκε στις πειραματικές δοκιμές. (a) Μπουκάλι εμφιαλωμένο νερό, (b) ηλεκτρικό τρυπάνι, (c) πλαστικό ποτήρι καφέ με νερό, (d) *ambu bag*, (e) πλαστική πιπεριά, (f) κατσαβίδι χεριού, (g) μικρό δοχείο με αντισηπτικό, (h) μαρκαδόρος, (i) φοιτητικό πάσο, (j) γυαλιά προστασίας, (k) μικρή μπάλα, (l) ορθογώνιο κομμάτι λαμαρίνας αλουμινίου.

Για τις πειραματικές δοκιμές επιλέχθηκαν δεκατρία χαρακτηριστικά αντικείμενα με διαφορετικές αναλογίες στο σχήμα, το μέγεθος και το βάρος. Έτσι ώστε οι δοκιμές να εμπεριέχουν ένα μεγάλο φάσμα από διαφορετικά αντικείμενα που είναι ικανό το ρομποτικό χέρι να αρπάξει [Εικόνα 4.6]. Δεν επιλέχθηκαν αντικείμενα πολύ μικρά σε μέγεθος λόγω της αδυναμίας του ρομποτικού χεριού να ανταπεξέλθει σε αυτά.

Οι αυτόνομες λαβές που πραγματοποιεί το ρομποτικό χέρι χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες. Η πρώτη λαβή είναι η αυτόνομη λαβή με όλα τα δάκτυλα *Power Grasp*. Η *Power grasp* κάνει την χρήση όλων των δακτύλων για την αρπαγή του αντικειμένου. Χρησιμοποιείτε για βαριά αντικείμενα και αντικείμενα με μεγάλο όγκο.

Η δεύτερη λαβή είναι η αυτόνομη λαβή με τρία δάκτυλα *Three Finger Grip* (δείκτης-μεσαίος-αντίχειρας). Η λαβή *Three Finger Grip* χρησιμοποιεί τρία δάκτυλα για την αρπαγή του αντικειμένου. Χρησιμοποιείτε σε μεσαίου όγκου αντικείμενα, και εκεί που χρειάζομαστε το τρίτο δάκτυλο για επιπλέον στήριξη, όπως είναι η αρπαγή μιας μικρή μπάλας. Καθώς θα είναι πολύ δύσκολο να εκτελεστεί μόνο με δύο δάκτυλα.

Weight of Objects					
Object	Weight [gr]	Object	Weight [gr]	Object	Weight [gr]
a	515	e	13	i	6
b	1313	f	151	j	43
c	299	g	36	k	14
d	327	h	15	l	105

Πίνακας 4.2: Το βάρος του κάθε αντικειμένου που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα με βάση την Εικόνα 5.6.

Η τρίτη λαβή είναι η αυτόνομη λαβή με δύο δάκτυλα Precision Grip. Η λαβή Precision Grip χρησιμοποιεί δύο δάκτυλα (δείκτης-αντίχειρας) για την αρπαγή του αντικειμένου. Χρησιμοποιείται σε μικρού όγκο αντικείμενου ειδικά εκεί που χρειαζόμαστε περισσότερο έλεγχο στον μικροχειρισμό των αντικειμένων.

Η τέταρτη και τελευταία λαβή είναι η αυτόνομη λαβή με τον αντίχειρα Lateral Prehension. Η λαβή Lateral Prehension χρησιμοποιεί μόνο τον αντίχειρα για την συγκράτηση του αντικείμενου σπρώχνοντας το κάτω προς την πλευρική πλευρά του δείκτη.

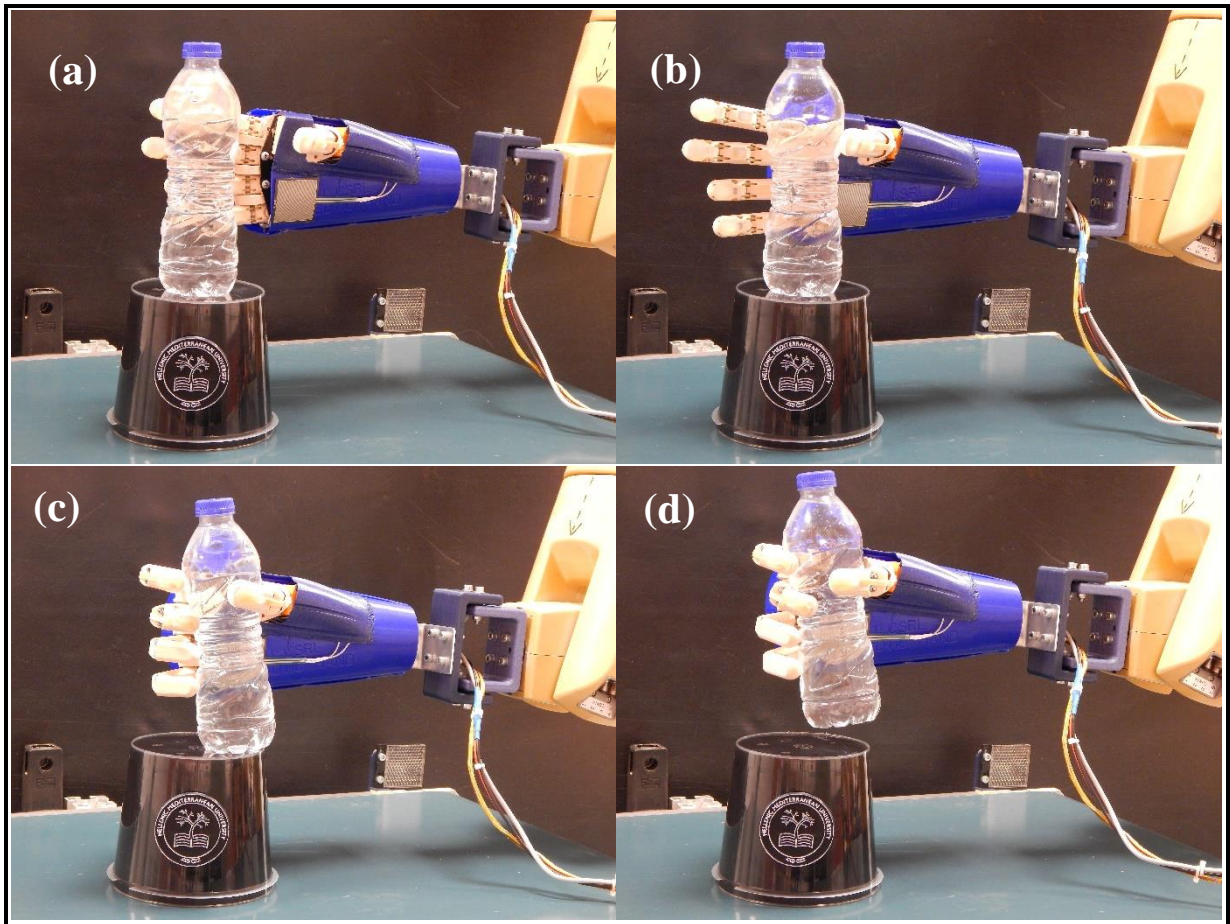
4.3.2.1 Πειραματική δοκιμή αυτόνομης λαβής Power Grasp

➤ Πειραματική δοκιμή με αντικείμενο «Μπουκάλι Νερό»

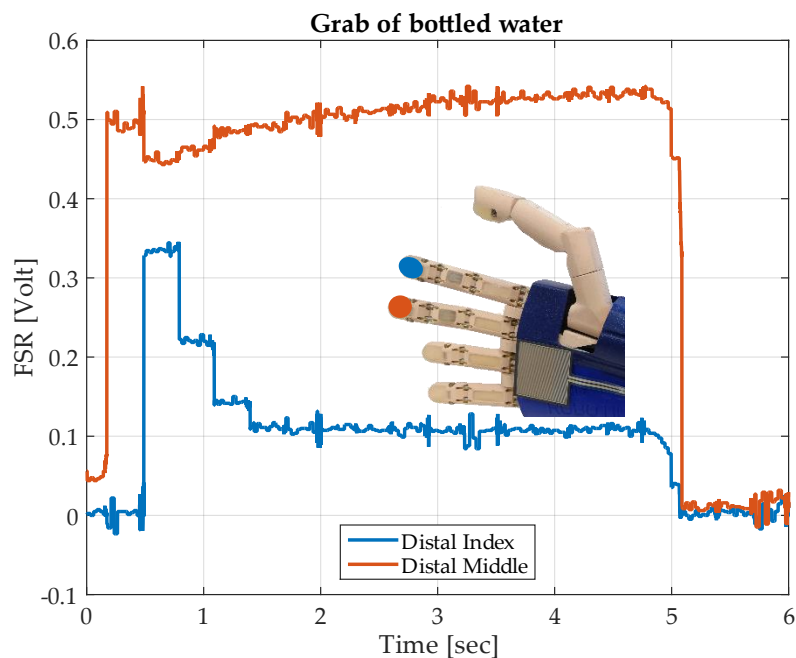
Η πρώτη πειραματική εκτελέστηκε με την προ-λαβή Power Grasp και με αντικείμενο ένα μπουκάλι νερό βάρους 515 gr.

Εξαιτίας του όγκο και του κυλινδρικού σχήματος που διαθέτει το μπουκάλι το ρομποτικό χέρι ήταν ικανό να ανταπεξέλθει μεγάλη επιτυχία στην επιτυχημένη αρπαγή του σε ποσοστό **80%**. Με το μόνο μειονέκτημα ότι εάν το ρομποτικό χέρι έπιανε το μπουκάλι από ψηλά εκείνο γλιστρούσε. Για μια πιο επιτυχημένη λαβή πρέπει τα δάκτυλα του ρομποτικού χεριού να είναι στην μέση του μπουκαλιού.

Στην **Εικόνα 4.7** παρατηρούμε την προσέγγιση του ρομποτικού χεριού στο μέσο του μπουκαλιού. Έπειτα κατά την διαδικασία της αρπαγής διακρίνεται ότι το μπουκάλι σπρώχνεται προς την παλάμη του ρομποτικού χεριού και κατά την διαδικασία της κίνησης τα ρομποτικά δάκτυλα παίρνουν μια κλίση προς τα κάτω εξαιτίας του βάρους του μπουκαλιού.



Εικόνα 4.7: Πειραματική δοκιμή αυτόνομης λαβής για μπουκάλι με νερό, (a) προσέγγιση, (b) τελική θέση προσέγγισης πριν την λαβή, (c) αρπαγή, (d) κίνηση σε άλλο σημείο.



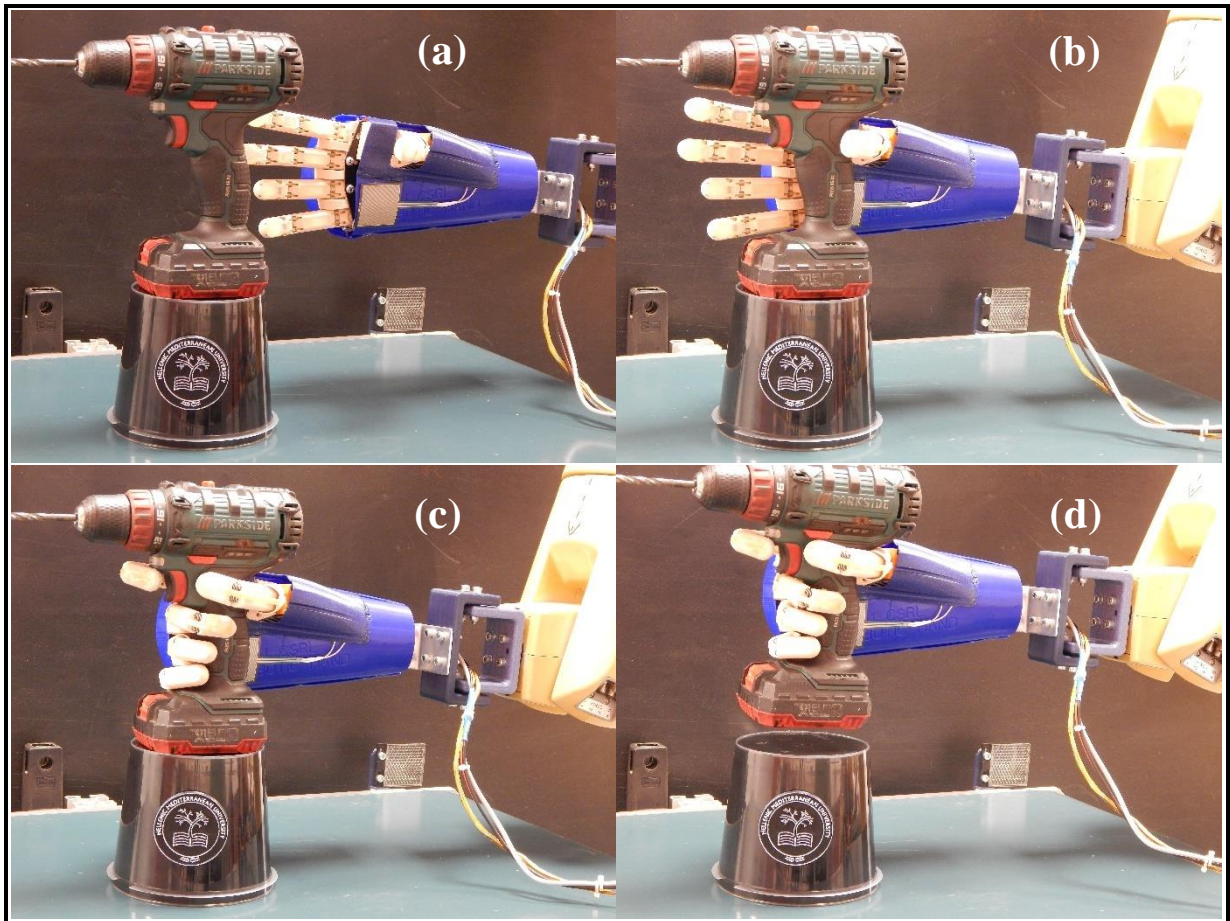
Γραφική Παράσταση 4.1: Γραφική παράσταση της τάσης από το αισθητήριο FSR ως προς τον χρόνο για την αυτόνομη λαβή εμφιαλωμένου νερού.

Τα δεδομένα που λαμβάνουμε από τα αισθητήρια FSR είναι από τις περιφερειακές φάλαγγες του δείκτη και του μέσου. Παρατηρούμε ότι το πρώτο αισθητήριο που έρχεται σε επαφή με το

μπουκάλι είναι του μέσου και μετά του δείκτη. Την στιγμή που έρχεται σε επαφή το αισθητήριο του δείκτη με το μπουκάλι, η τάση του μέσου πέφτει έως ότου χάσει ελαχιστοποιηθεί η δύναμη που ασκεί ο δείκτης και επανέλθει η δύναμη που ασκεί ο μεσαίος [**Γραφική Παράσταση 4.1**].

➤ **Πειραματική δοκιμή με αντικείμενο «Ηλεκτρικό Τρυπάνι»**

Στην επόμενη πειραματική δοκιμή με παρόμοια προ-λαβή πιάνουμε το μεγαλύτερο σε βάρος αντικείμενο. Το οποίο είναι ένα ηλεκτρικό τρυπάνι με βάρος 1313 gr.



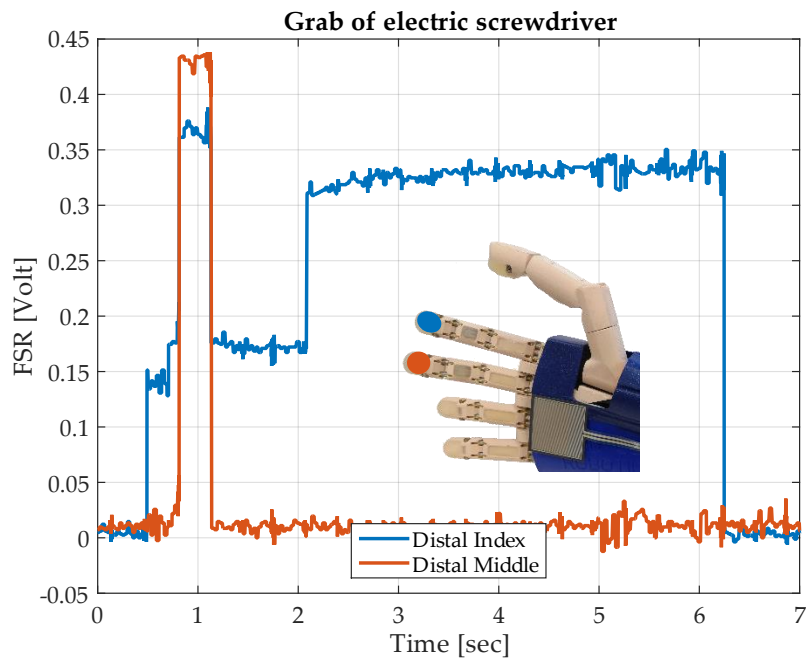
Εικόνα 4.8: Πειραματική δοκιμή αυτόνομης λαβής για ηλεκτρικό τρυπάνι, (a) προσέγγιση, (b) τελική θέση προσέγγισης πριν την λαβή, (c) αρπαγή, (d) κίνηση σε άλλο σημείο.

Δεδομένου ότι αποτελεί εργαλείο και είναι απόλυτα σχεδιασμένο με εργονομικό τρόπο για το ανθρώπινο χέρι έχουμε ένα πολύ μεγάλο ποσοστό επιτυχίας **90%**. Παρατηρούμε ότι το έχει προσεγγίσει και αρπάζει με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατό το πάτημα του κουμπιού του τρυπανιού [**Εικόνα 4.8**].

Αν και το τρυπάνι έχει μεγάλο βάρος καθώς κλείνουν τα δάκτυλα και σηκώνεται στο αέρα το τρυπάνι το μεγαλύτερο βάρος του στηρίζεται στην πλάγια μεριά του δείκτη και αντίχειρα. Έτσι επιτυγχάνουμε μια πολύ δυνατή λαβή και εξαιτίας της γεωμετρίας του τρυπανιού είναι αδύνατο να γλιστρήσει από το χέρι χωρίς να του ασκηθεί κάποια εξωτερική δύναμη.

Τα δεδομένα που λαμβάνουμε από τα αισθητήρια FSR είναι και στην συγκεκριμένη περίπτωση από τις περιφερειακές φάλαγγες του δείκτη και μεσαίου. Παρατηρούμε ότι ενώ έρχονται

ταυτόχρονα σε επαφή, ο μεσαίος χάνει την επαφή με το τρυπάνι και μεγαλώνει η δύναμη της επαφής με τον δείκτη. Δηλαδή παρατηρούμε όπως και στο προηγούμενο πείραμα όταν χάνει η ελαττώνει την επαφή ένα δάκτυλο, το άλλο δέχεται μεγαλύτερη δύναμη [**Γραφική Παράσταση 4.2**].



Γραφική Παράσταση 4.2: Γραφική παράστασης τάσης από το αισθητήριο FSR ως προς τον χρόνο για την αυτόνομη λαβή ηλεκτρικού τρυπανιού.

➤ Πειραματική δοκιμή με αντικείμενο «Πλαστικό Ποτήρι Καφέ»

Το επόμενο αντικείμενο είναι ένα πλαστικό ποτήρι καφέ. Αντί για καφέ περιέχει νερό όμως με παρόμοια ποσότητα και έχεις βάρος 299 gr.

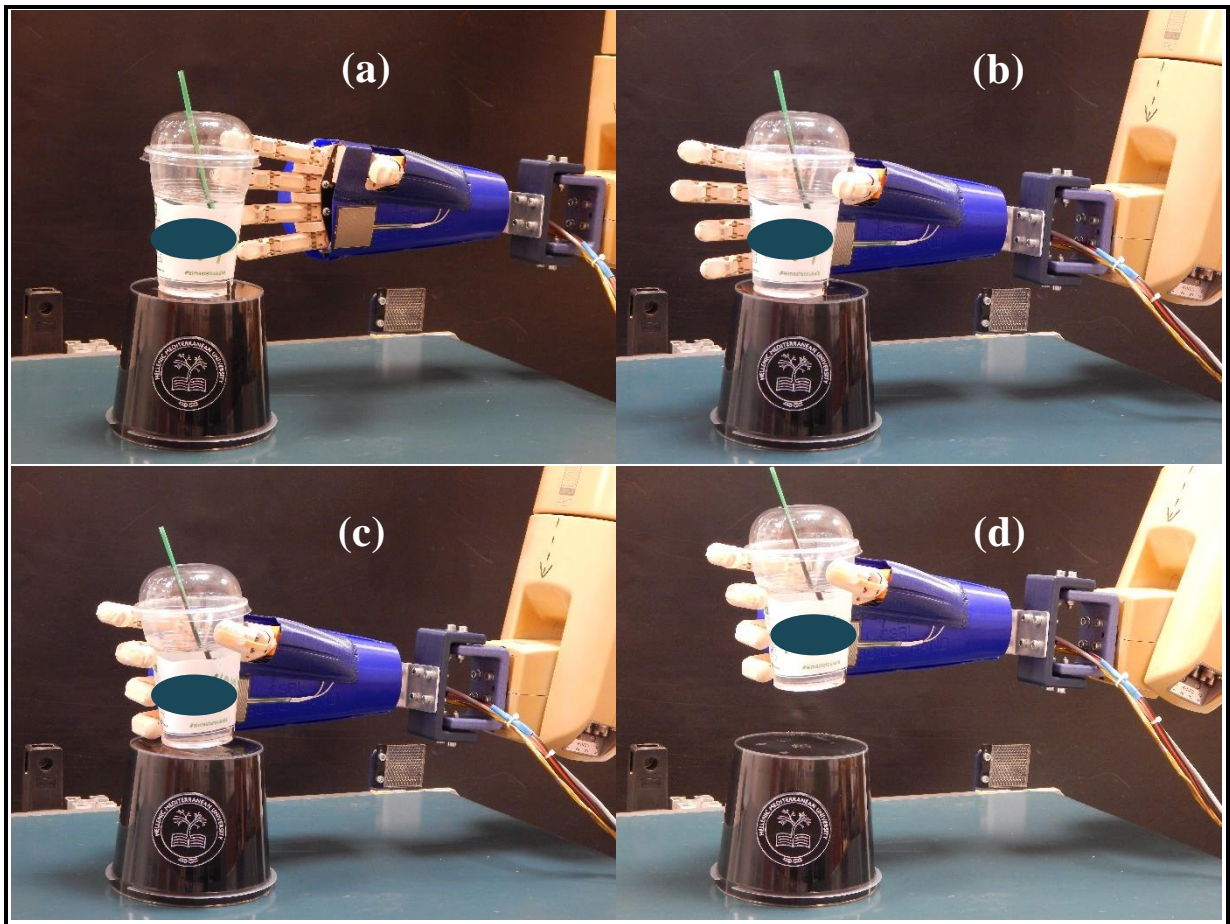
Αν και η γεωμετρία του αντικειμένου μας βοηθάει αρκετά επειδή είναι κυλινδρικό και μεγαλώνει η διάμετρος του ανάλογα με το ύψος του κυπέλου. Υπάρχει κίνδυνος να χυθεί το υγρό που φέρει το πλαστικό ποτήρι εάν του ασκηθεί μεγάλη δύναμη.

Το συγκεκριμένο πείραμα είχε ποσοστό επιτυχίας **80%**, αλλά σε κανένα πείραμα δεν χύθηκε καθόλου νερό και δεν συμπίεσε το ποτήρι παραπάνω από όσο έπρεπε. Ο καλύτερος τρόπος προσέγγισης για την αρπαγή του αντικειμένου είναι από τα πλάγια και όσο πιο χαμηλά μπορεί να το πιάσει.

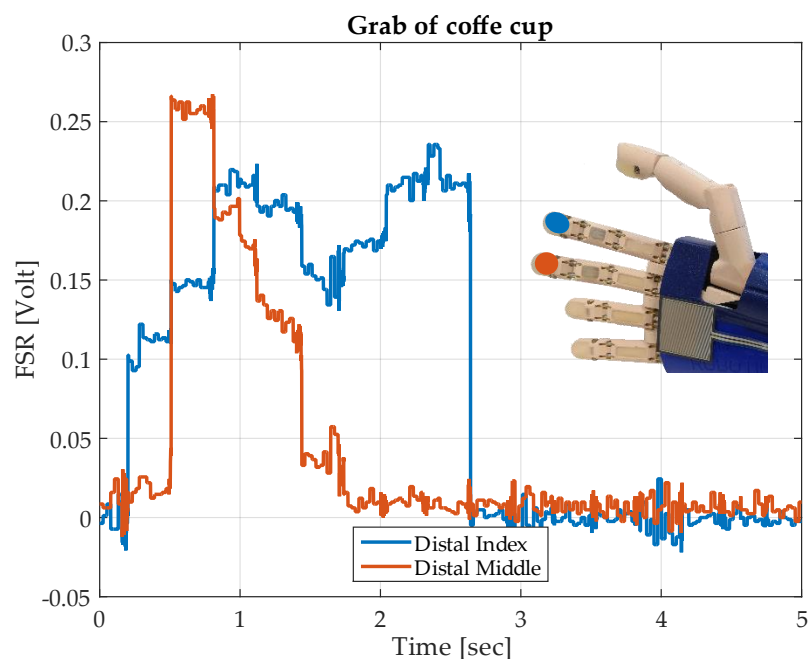
Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται μια αρκετά επιτυχημένη λαβή και υπάρχουν περιθώρια μετατόπισης του ποτηριού αν σε περίπτωση γλιστρήσει προς τα κάτω λόγω του βάρους του ή εξαιτίας της συμπίκνωσης των υδρατμών του αέρα, που δημιουργούνται εξωτερικά του ποτηριού σε παγωμένα υγρά [**Εικόνα 4.9**].

Τα δεδομένα που λαμβάνουμε από τα αισθητήρια FSR είναι και στην συγκεκριμένη περίπτωση από τις περιφερειακές φάλαγγες του δείκτη και μεσαίου. Παρατηρούμε παρόμοια συμπεριφορά με τα προηγούμενα πειράματα. Και τα δύο δάκτυλα έρχονται σχεδόν την ίδια χρονική στιγμή

σε επαφή, ο μεσαίος ενώ του ασκεί μεγαλύτερη δύναμη χάνει εντελώς την επαφή με το ποτήρι. Μεγαλώνοντας έτσι η δύναμη που ασκείται στον δείκτη [**Γραφική Παράσταση 4.3**].



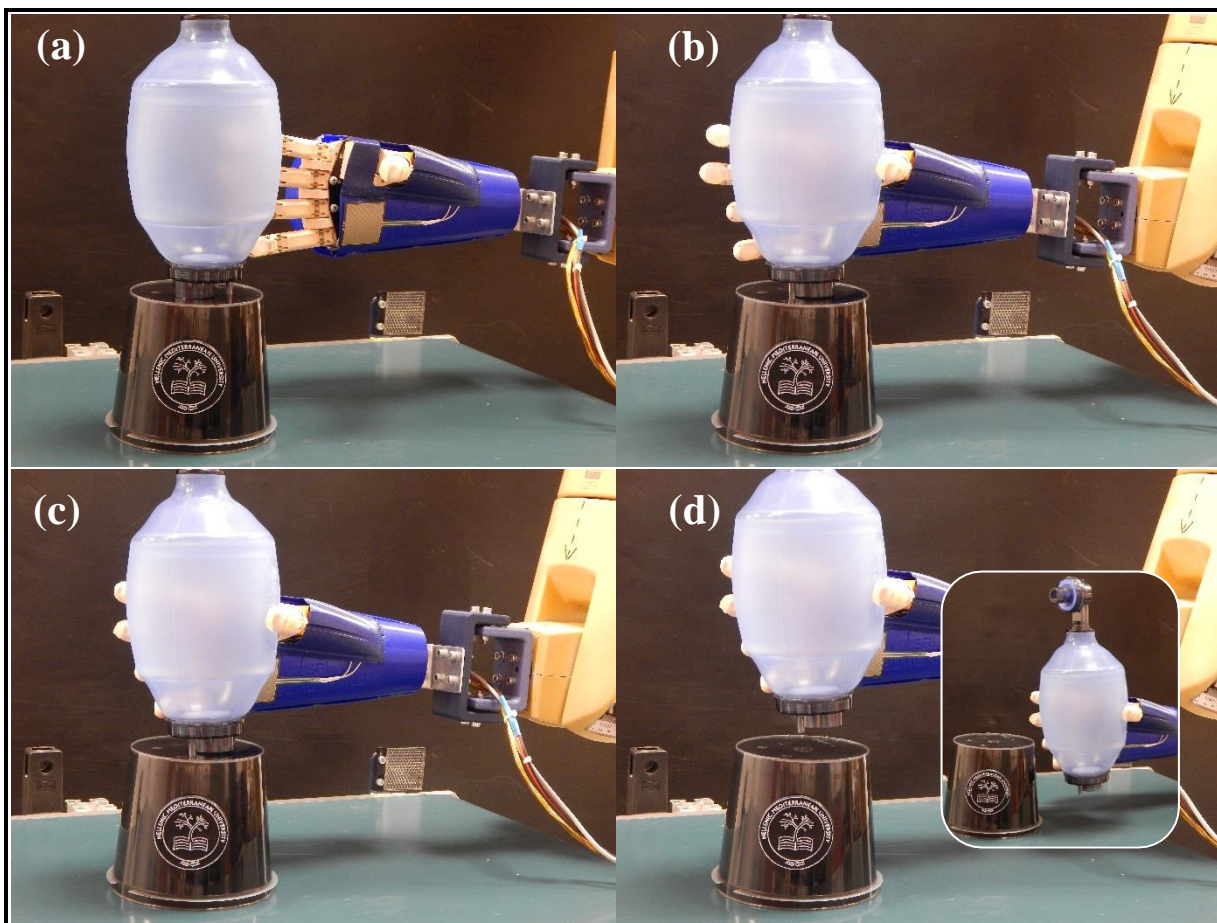
Εικόνα 4.9: Πειραματική δοκιμή αυτόνομης λαβής για πλαστικό ποτήρι καφέ, (a) προσέγγιση, (b) τελική θέση προσέγγισης πριν την λαβή, (c) αρπαγή, (d) κίνηση σε άλλο σημείο.



Γραφική Παράσταση 4.3: Γραφική παράσταση τάσης από το αισθητήριο FSR ως προς τον χρόνο για την αυτόνομη λαβή πλαστικού ποτηριού καφέ.

➤ **Πειραματική δοκιμή με αντικείμενο «Ambu bag»**

Το επόμενο αντικείμενο είναι το μεγαλύτερο σε όγκο. Πρόκειται για μια ambu bag ενηλίκων και το βάρος της είναι 327 gr.



Εικόνα 4.10: Πειραματική δοκιμή αυτόνομης λαβής για ambu bag, (a) προσέγγιση, (b) τελική θέση προσέγγισης πριν την λαβή, (c) αρπαγή, (d) κίνηση σε άλλο σημείο.

Αποτελεί πρόκληση ακόμα και για το ανθρώπινο χέρι λόγω του όγκου της και της γεωμετρίας του να το πιάσει από τη μέση. Η ambu bag χρησιμοποιείται για CPR (Καρδιοπνευμονική αναζωογόνηση) συμπιέζοντας ανά διαστήματα το μέσο της φούσκας [**Εικόνα 4.10**].

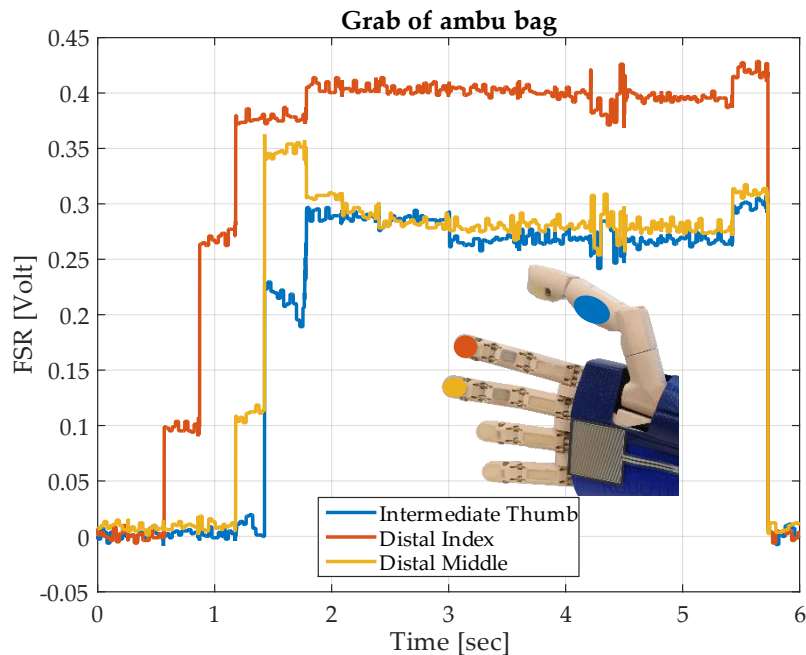
Στην συγκεκριμένη περίπτωση το ρομποτικό χέρι έχει ποσοστό επιτυχίας **100%** αφού φυσικά γίνει πρώτα η επιτυχημένη προσέγγισή του αντικειμένου. Η αρπαγή του αντικειμένου είναι αρκετή καλή χωρίς να γλιστράει.

Φυσικά τα δάκτυλα δεν έχουν την δύναμη να συμπιέσουν την ambu bag αλλά μπορούν να την κρατήσουν με μεγαλύτερη επιτυχία από το ανθρώπινο χέρι.

Τα δεδομένα που λαμβάνουμε από τα αισθητήρια FSR στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι και από τα τρία δάκτυλα. Από τις περιφερειακές φάλαγγες του δείκτη και του μεσαίου αλλά και την εγγύς φάλαγγα του αντίχειρα.

Και τα τρία δάκτυλα εμφανίζουν μια ομοιομορφία στην επαφή με το αντικείμενο με τον αντίχειρα να έρχεται πρώτο σε επαφή. Η επαφή όταν αφήνεται το αντικείμενο χάνεται την ίδια

χρονική στιγμή ενώ παρουσιάζουν και μία ομοιομορφία στην δύναμη που δέχονται [**Γραφική Παράσταση 4.4**].



Γραφική Παράσταση 4.4: Γραφική παράστασης τάσης από το αισθητήριο FSR ως προς τον χρόνο για την αυτόνομη λαβή ambu bag.

➤ Πειραματική δοκιμή με αντικείμενο «Πλαστική Πιπεριά»

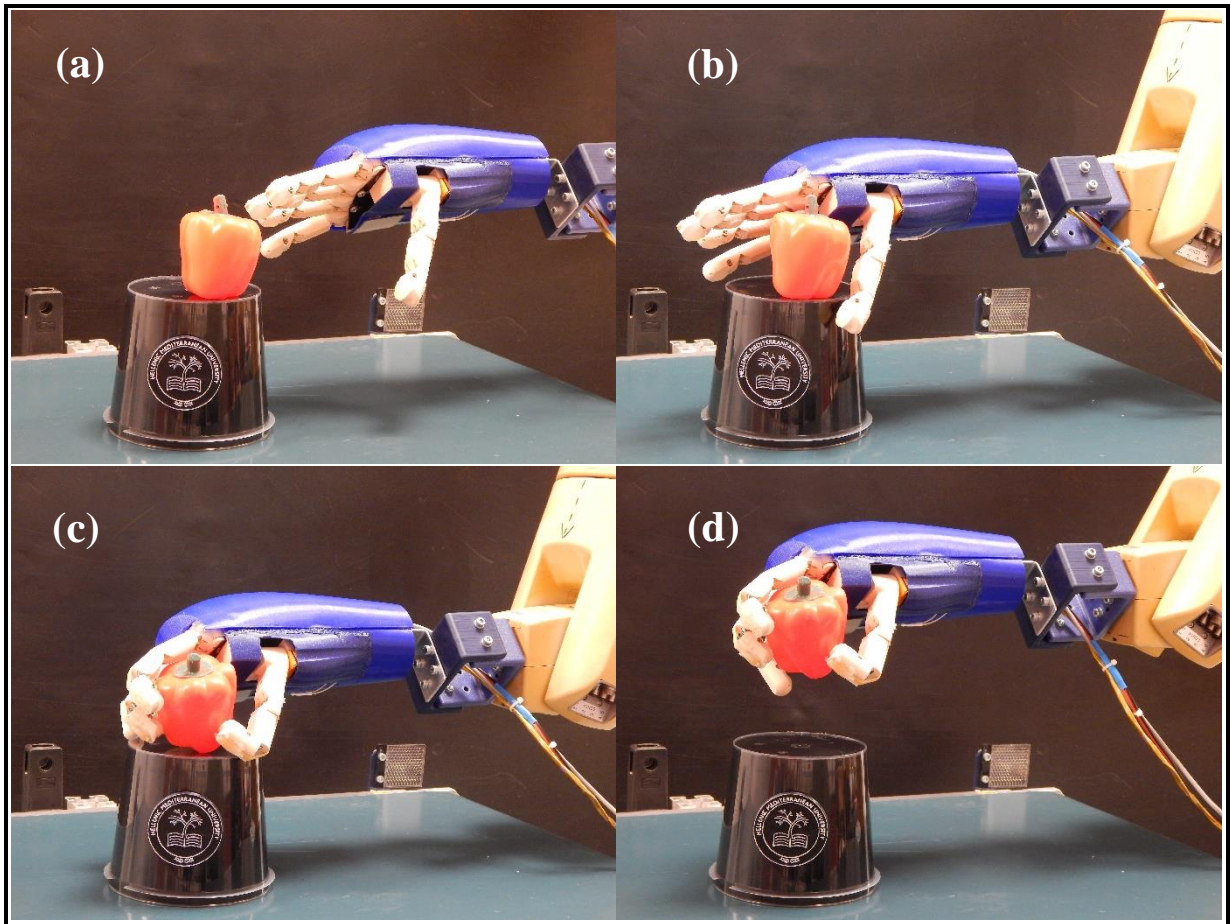
Το επόμενο αντικείμενο πρόκειται για μία πλαστική πιπεριά με μικρό βάρος στα 13 gr.

Εξαιτίας του σφαιρικού σχήματος που διαθέτει και του μικρού βάρους μπορεί να προσεγγιστεί και να προσεγγιστεί από διαφορετικές γωνίες και να γίνει η αρπαγή του.

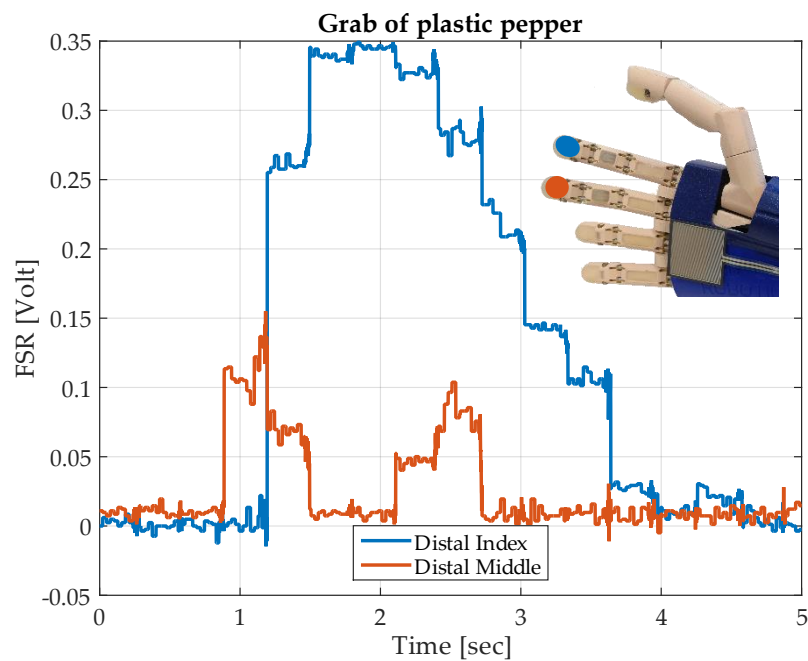
Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται ένα ποσοστό επιτυχίας **80%** [**Εικόνα 4.11**].

Επίσης παρατηρείται ότι ενώ όλα τα δάκτυλα έχουν αγκαλιάσει το αντικείμενο ο αντίχειρας δεν είναι σε κατάλληλη θέση καθώς μόνο το άκρο του ακουμπάει πάνω στο αντικείμενο. Κάτι που κάνει την λαβή ασταθής όταν κινείται, με αποτέλεσμα να μπορεί εύκολα να χάσει την επαφή με το χέρι.

Τα δεδομένα που λαμβάνουμε από τα αισθητήρια FSR είναι από τις περιφερειακές φάλαγγες του δείκτη και του μεσαίου. Την μεγαλύτερη δύναμη στο αντικείμενο την ασκεί ο δείκτης [**Γραφική Παράσταση 4.5**].



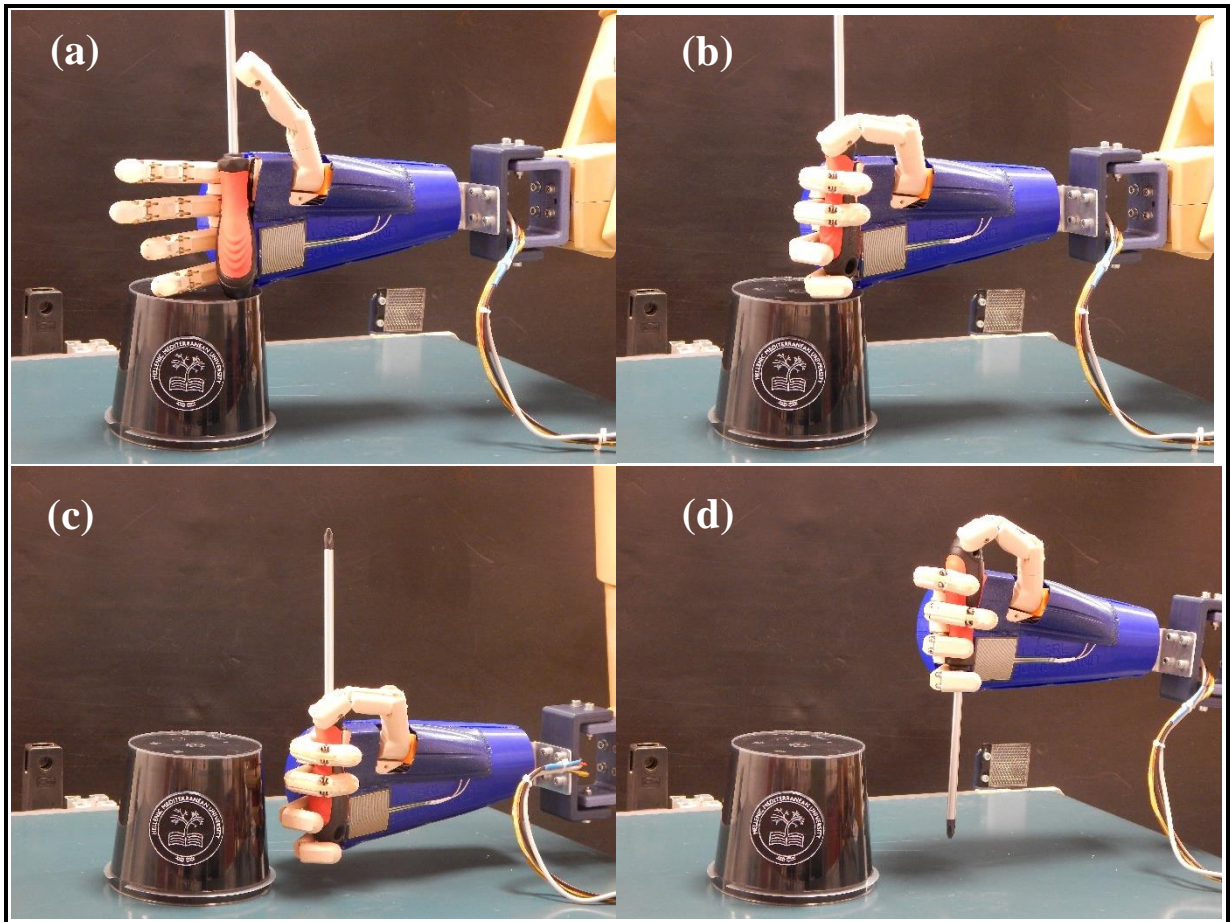
Εικόνα 4.11: Πειραματική δοκιμή αυτόνομης λαβής για πλαστική πιπεριά, (a) προσέγγιση, (b) τελική θέση προσέγγισης πριν την λαβή, (c) αρπαγή, (d) κίνηση σε άλλο σημείο.



Γραφική Παράσταση 4.5: Γραφική παράσταση τάσης από το αισθητήριο FSR ως προς τον χρόνο για την αυτόνομη λαβή πλαστικής πιπεριάς.

➤ Πειραματική δοκιμή με αντικείμενο «Κατσαβίδι»

Στην τελευταία πειραματική δοκιμή με τη προ-λαβή Power Grasp πραγματοποιήθηκε η αρπαγή ενός κατσαβιδιού με βάρος 150 gr.



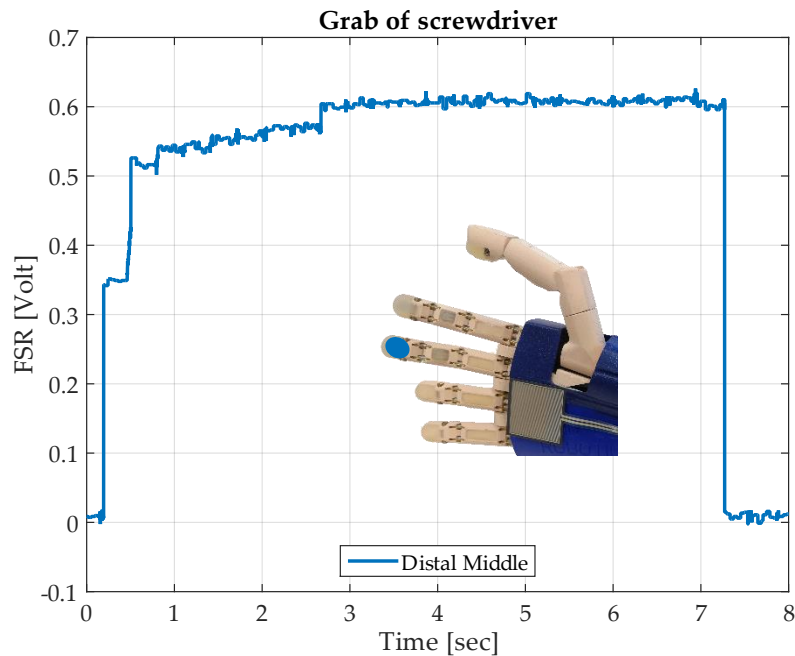
Εικόνα 4.12: Πειραματική δοκιμή αυτόνομης λαβής για κατσαβίδι χεριού, (a) τελική θέση προσέγγισης πριν την λαβή, (c) αρπαγή, (c) & (d) κίνηση σε άλλα σημεία.

Για το συγκεκριμένο αντικείμενο δεν έγινε προσέγγιση του ρομποτικού χεριού αλλά τοποθετήθηκε το αντικείμενο στην παλάμη του ρομποτικού χεριού. Δοκιμάστηκαν και άλλοι μέθοδοι προσέγγισης του αντικειμένου χωρίς επιτυχία όμως. Το ποσοστό επιτυχίας με αυτή την προσέγγιση κυμαίνεται στο **70%**. Ενώ μια παρόμοια προσέγγιση με ανεστραμμένο το κατσαβίδι διακρίνεται στην **Εικόνα 4.12 (d)**.

Στην παρούσα λαβή σημαντικό ρόλο παίζει το μικρό δάκτυλο το οποίο στηρίζει το κάτω μέρος του κατσαβιδιού με αποτέλεσμα να μην το αφήνει να γλιστρήσει από το χέρι προς τα κάτω.

Τα δεδομένα που λαμβάνουμε από τα αισθητήρια FSR είναι μόνο από τη περιφερειακή φάλαγγα του μεσαίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η περιφερειακή φάλαγγα του δείκτη δεν έρχεται σε επαφή με το αντικείμενο [**Γραφική Παράσταση 4.6**].

Παρόλα αυτά η επαφή με το αντικείμενο χαρακτηρίζεται συνεχής χωρίς διακυμάνσεις και εφόσον επιτυγχάνεται μια σταθερή λαβή θεωρείται επιτυχημένη.



Γραφική Παράσταση 4.6: Γραφική παράσταση τάσης από το αισθητήριο FSR ως προς τον χρόνο για την αυτόνομη λαβή κατασβιδιού χεριού.

4.3.2.2 Πειραματική δοκιμή αυτόνομης λαβής Three Finger Grip

➤ Πειραματική δοκιμή με αντικείμενο «Αντισηπτικό»

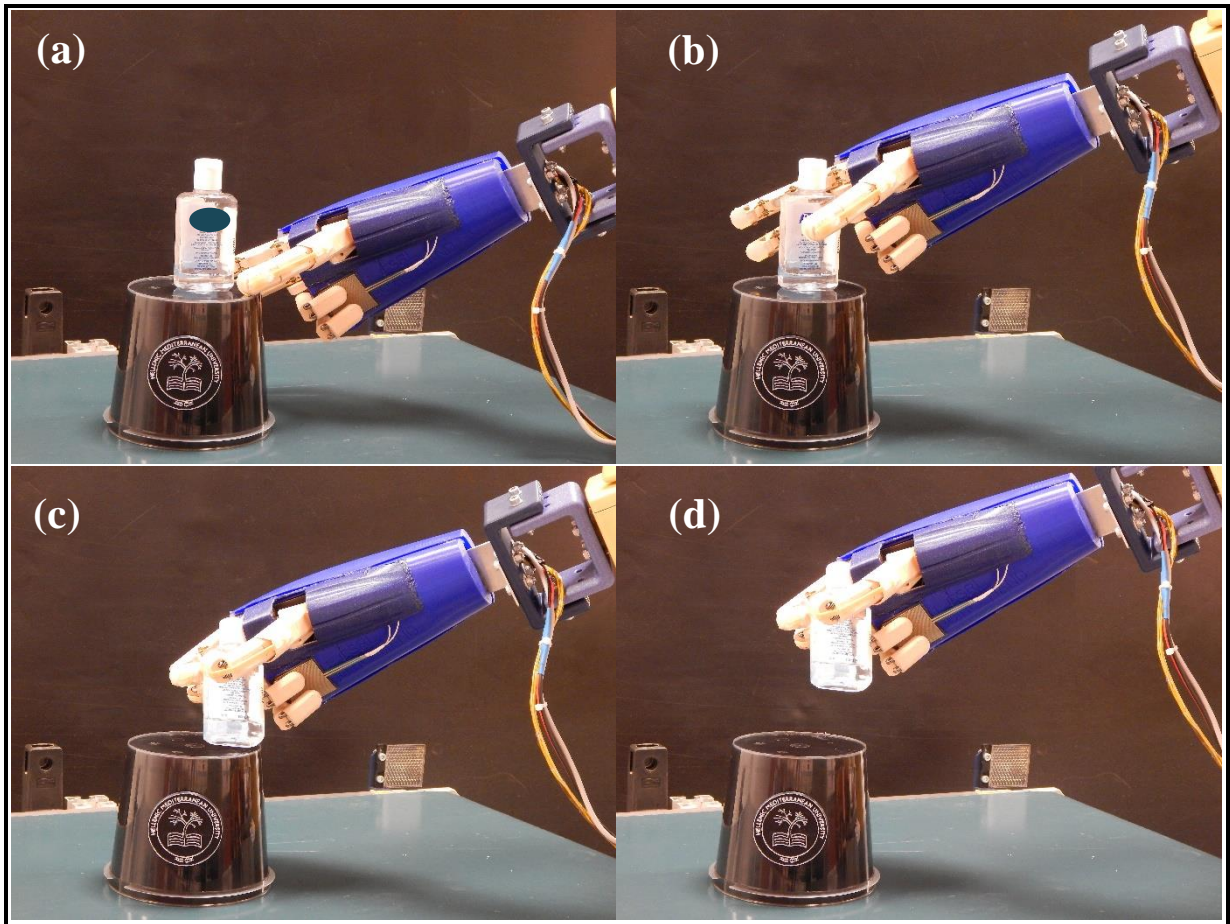
Η επόμενη κατηγορία προ-λαβής είναι η Three finger grip και πραγματοποιείται με τα τρία δάκτυλα δείκτη, μεσαίος, αντίχειρας. Το αντικείμενο που πιάνει σε αυτό το πείραμα είναι ένα δοχείο με αντισηπτικό βάρους 31 gr.

Εξαιτίας του μικρού όγκου που έχει και αλλά και του μικρού βάρους επιλέχθηκε αυτή η λαβή. Οι προσεγγίσεις που δοκιμάστηκαν είναι δύο. Και στις δύο περιπτώσεις το δοχείο βρισκόταν ακουμπισμένο κανονικά όπως φαίνεται και στη **Εικόνα 4.13**. Η διαφορά των δύο προσεγγίσεων είναι προς τα ποια μεριά θα έρθουν σε επαφή τα δάκτυλα του ρομποτικού χεριού με το αντικείμενο. Η μεριά που επιτυγχάνουμε την καλύτερη προσέγγιση είναι με την μεγαλύτερη επιφάνεια.

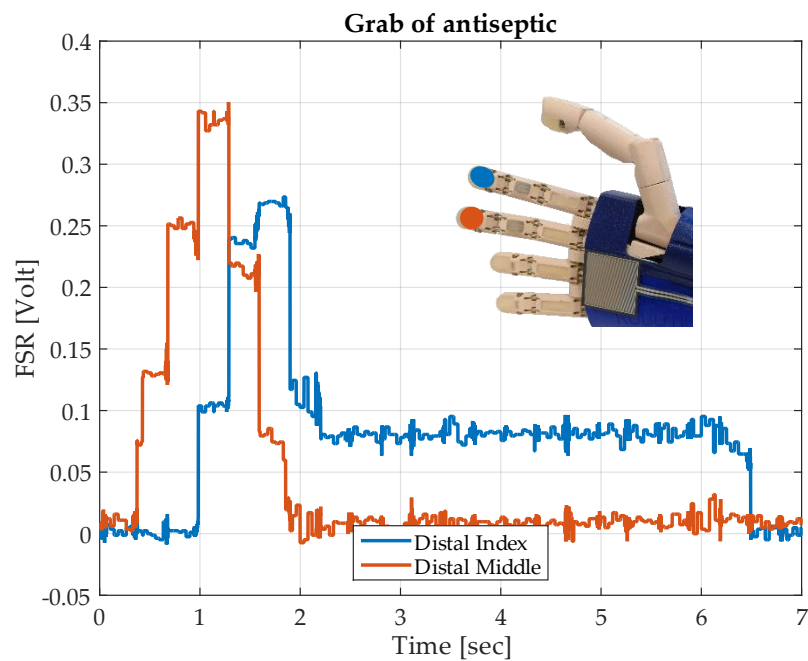
Με την συγκεκριμένη προσέγγιση και πάλι δεν καταφέραμε να έχουμε ένα μεγάλο ποσοστό επιτυχίας αλλά μόνο **50%** και αυτό οφείλεται κυρίως στον αντίχειρα. Εξαιτίας της κατασκευής του δεν δέχεται σήματα από τα αισθητήρια FSR οπότε συνεχίζει να περιστρέφεται έως ότου φτάσει στο όριο της μέγιστης μετατόπισης.

Τα δεδομένα που λαμβάνουμε από τα αισθητήρια FSR είναι από τις περιφερειακές φάλαγγες του δείκτη και του μεσαίου. Παρατηρούμε ότι από 1 s που έχουν έρθει σε επαφή τα αντικείμενα χάνουμε την μεγαλύτερη επαφή με τα αισθητήρια. Αυτό οφείλεται όπως αναφέρθηκε στον αντίχειρα [**Γραφική Παράσταση 4.7**].

Εξαιτίας του ότι ο αντίχειρας δεν λαμβάνει κάποιο σήμα από το αισθητήριο του εξαιτίας της κακής κατασκευής του συνεχίζει να κινείται ο επενεργητής με αποτέλεσμα να περιστρέφεται το δάκτυλο και να μετατοπίζεται το αντικείμενο. Επομένως δικαιολογείται και το χαμηλό ποσοστό επιτυχίας της λαβής.



Εικόνα 4.13: Πειραματική δοκιμή αυτόνομης λαβής για μικρό δοχείο με αντισηπτικό, (a) προσέγγιση, (b) τελική θέση προσέγγισης πριν την λαβή, (c) αρπαγή, (d) κίνηση σε άλλο σημείο.

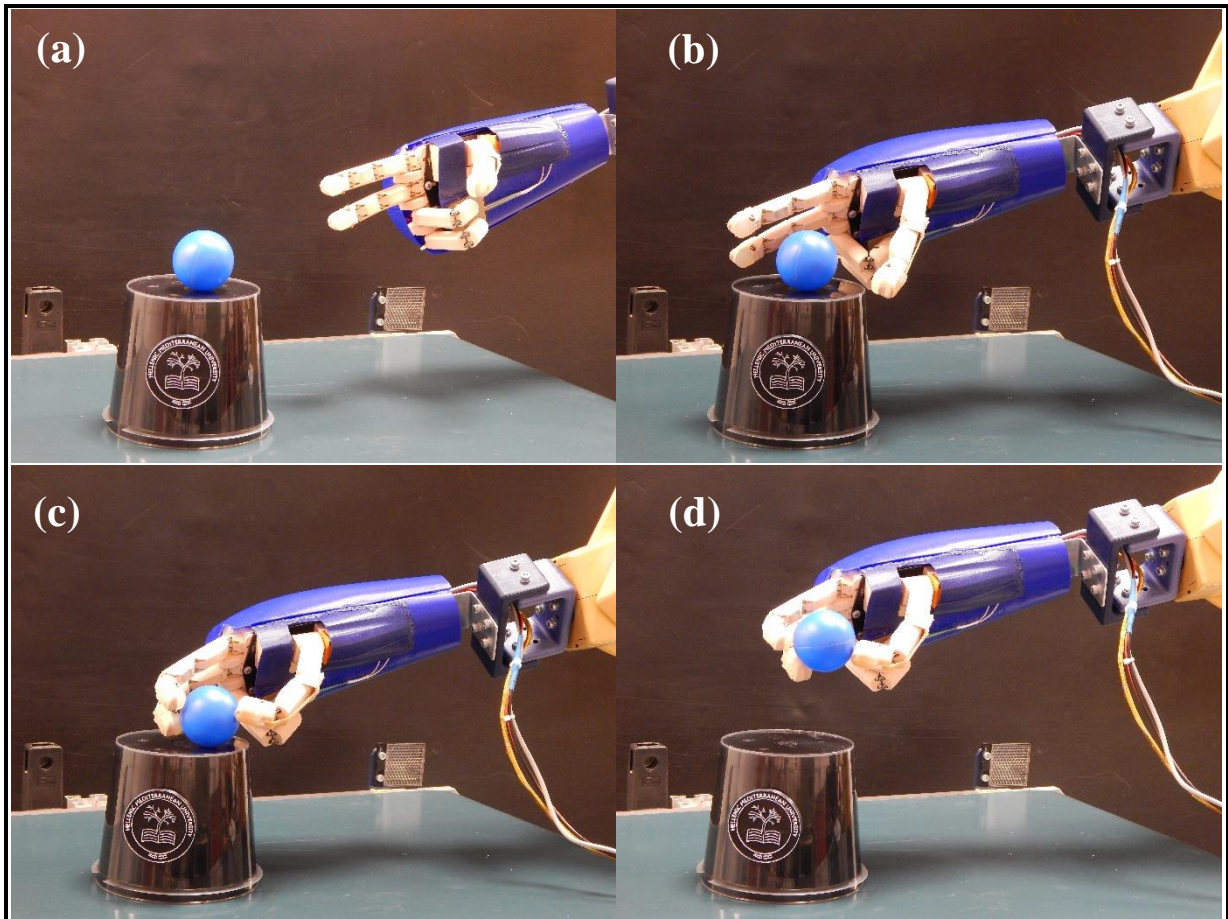


Γραφική Παράσταση 4.7: Γραφική παράσταση τάσης από το αισθητήριο FSR ως προς τον χρόνο για την αυτόνομη λαβή μικρού δοχείου με αντισηπτικό.

➤ **Πειραματική δοκιμή με αντικείμενο «Μικρή Μπάλα»**

Με παρόμοια προ-λαβή Three finger grasp επιλέγεται να γίνει και η αρπάγη της μικρής μπάλας. Λόγου του ότι είναι μικρή σε όγκος και βάρος 14 gr.

Καθώς επίσης ότι το παραπάνω δάκτυλο βοηθάει στην καλύτερη συγκράτηση της μπάλας εξαιτίας της γεωμετρίας, αντί για δύο δάκτυλα.

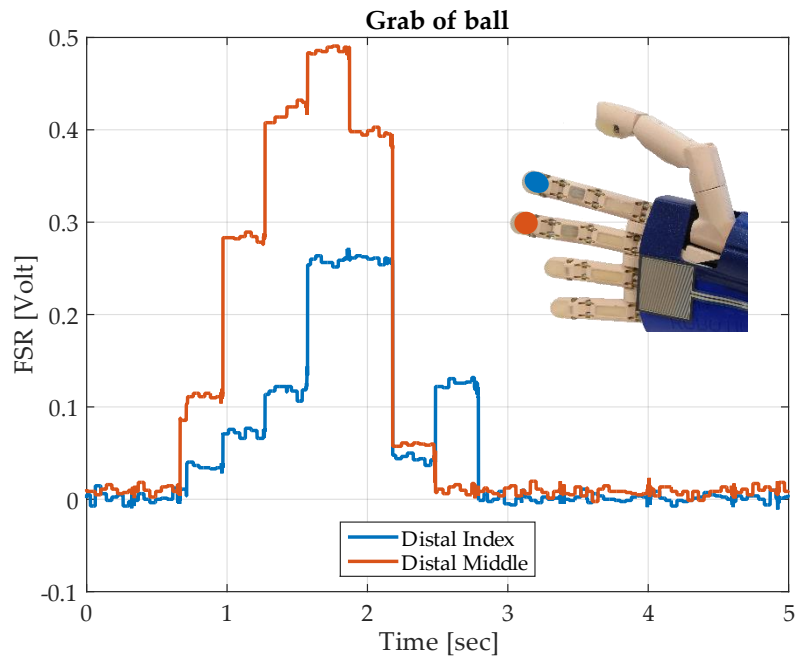


Εικόνα 4.14: Πειραματική δοκιμή αυτόνομης λαβής για μικρή μπάλα, (a) προσέγγιση, (b) τελική θέση προσέγγισης πριν την λαβή, (c) αρπάγη, (d) κίνηση σε άλλο σημείο.

Λόγο της σφαιρικής γεωμετρίας της μπάλας ο τρόπος προσέγγισης της είναι παρόμοιος από όλα τα σημεία. Και στην συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε χαμηλό ποσοστό επιτυχίας της τάξης του **30%**. Εξαιτίας του αντίχειρα όπως και διακρίνεται στην **Εικόνα 4.14**.

Επίσης η λαβή όταν σηκώνει το αντικείμενο πάνω από το έδαφος είναι αρκετά ασταθής με αποτέλεσμα ενώ έχει αρπάξει το αντικείμενο με επιτυχία εκείνο να γλιστράει και να πέφτει κάτω.

Από τα δεδομένα των αισθητηρίων FSR παρατηρούμε ότι ενώ έρχονται ταυτόχρονα σε επαφή τα αισθητήρια των περιφερειακών φαλάγγων μετά από ένα μικρό χρονικό διάστημα χάνουν την επαφή εξαιτίας του αντίχειρα [**Γραφική Παράσταση 4.8**].



Γραφική Παράσταση 4.8: Γραφική παράσταση τάσης από το αισθητήριο FSR ως προς τον χρόνο για την αυτόνομη λαβή μικρής μπάλας.

4.3.2.3 Πειραματική δοκιμή αυτόνομης λαβής Precision Grip

➤ Πειραματική δοκιμή με αντικείμενο «Μαρκαδόρος»

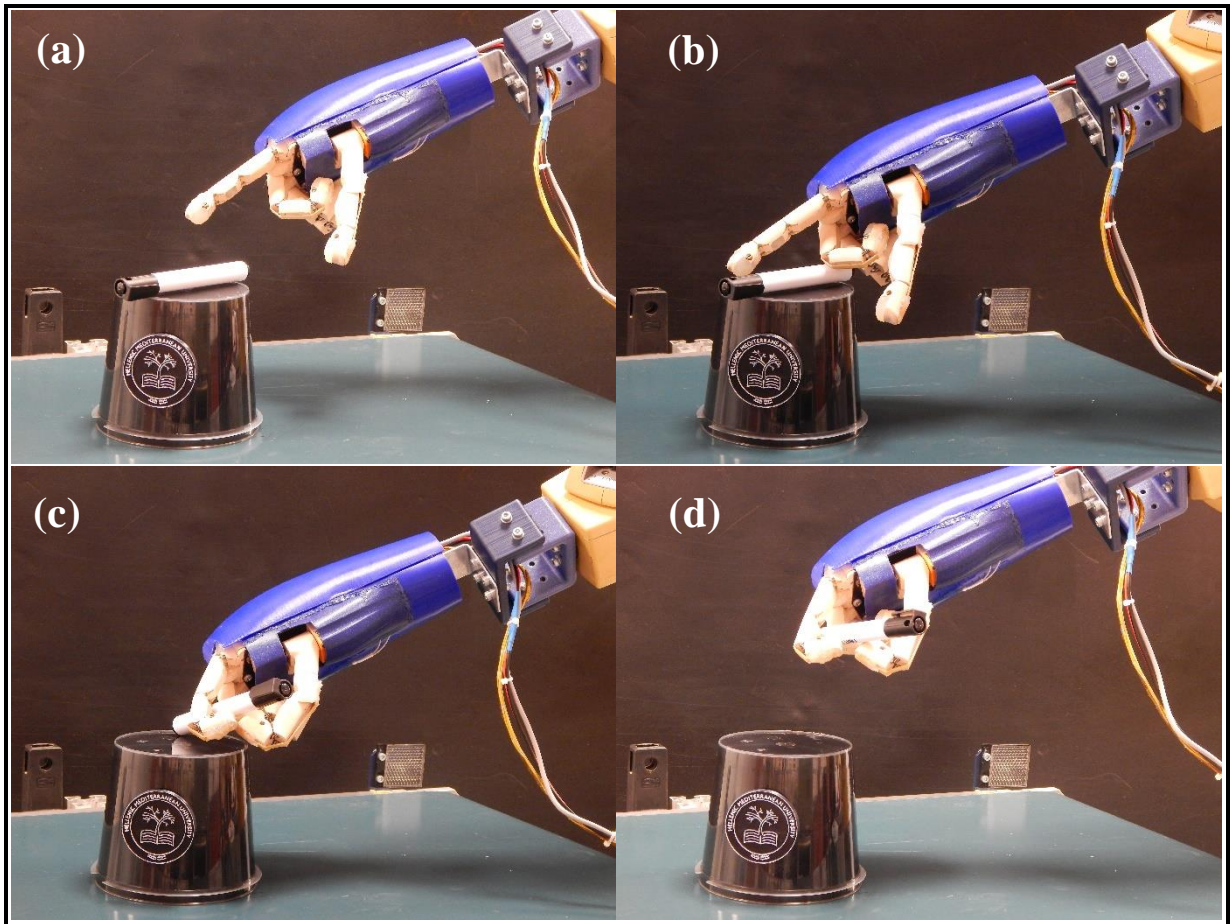
Η επόμενη προ-λαβή που θα χρησιμοποιηθεί είναι η Precision Grasp. Η συγκεκριμένη προ-λαβή χρησιμοποιεί δύο δάκτυλα για να αρπάξει το αντικείμενο το δείκτη και τον αντίχειρα. Το επόμενο αντικείμενο που δοκιμάστηκε είναι ένα μαρκαδόρος με βάρος 15 gr.

Η προσέγγιση που επιλέχθηκε είναι με τον μαρκαδόρο να βρίσκεται οριζόντια με το δάπεδο. Το συγκεκριμένο πείραμα είχε πολύ μικρό ποσοστό επιτυχίας **30%** εφόσον χρειάστηκαν αρκετές επαναλήψεις για να καταφέρει το χέρι να πιάσει επιτυχώς τον μαρκαδόρο [**Εικόνα 4.15**].

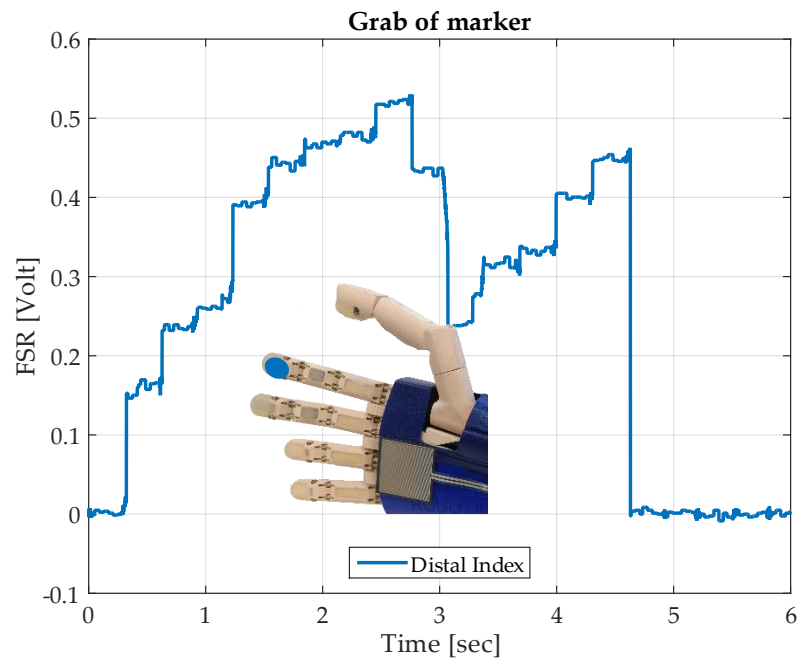
Συμπεραίνεται ότι το χέρι έχει μεγάλη δυσκολία στο να χειριστεί μικρά αντικείμενα τα οποία τα οποία βρίσκονται ξαπλωμένα.

Τα δεδομένα που παίρνουμε από τα αισθητήρια FSR είναι μόνο από την περιφερειακή φάλαγγα. Διακρίνουμε ότι υπάρχει μια διαταραχή κατά την επαφή του με το αντικείμενο. Ενώ στην αρχή έχει μια καλή επαφή στην συνέχεια την μειώνει και μετά επανέρχεται.

Πιθανόν και αυτό να οφείλεται στην κίνηση του αντίχειρα που δεν σταματάει παρά μόνο όταν φτάσει στο μέγιστο όριο [**Εικόνα 4.9**].



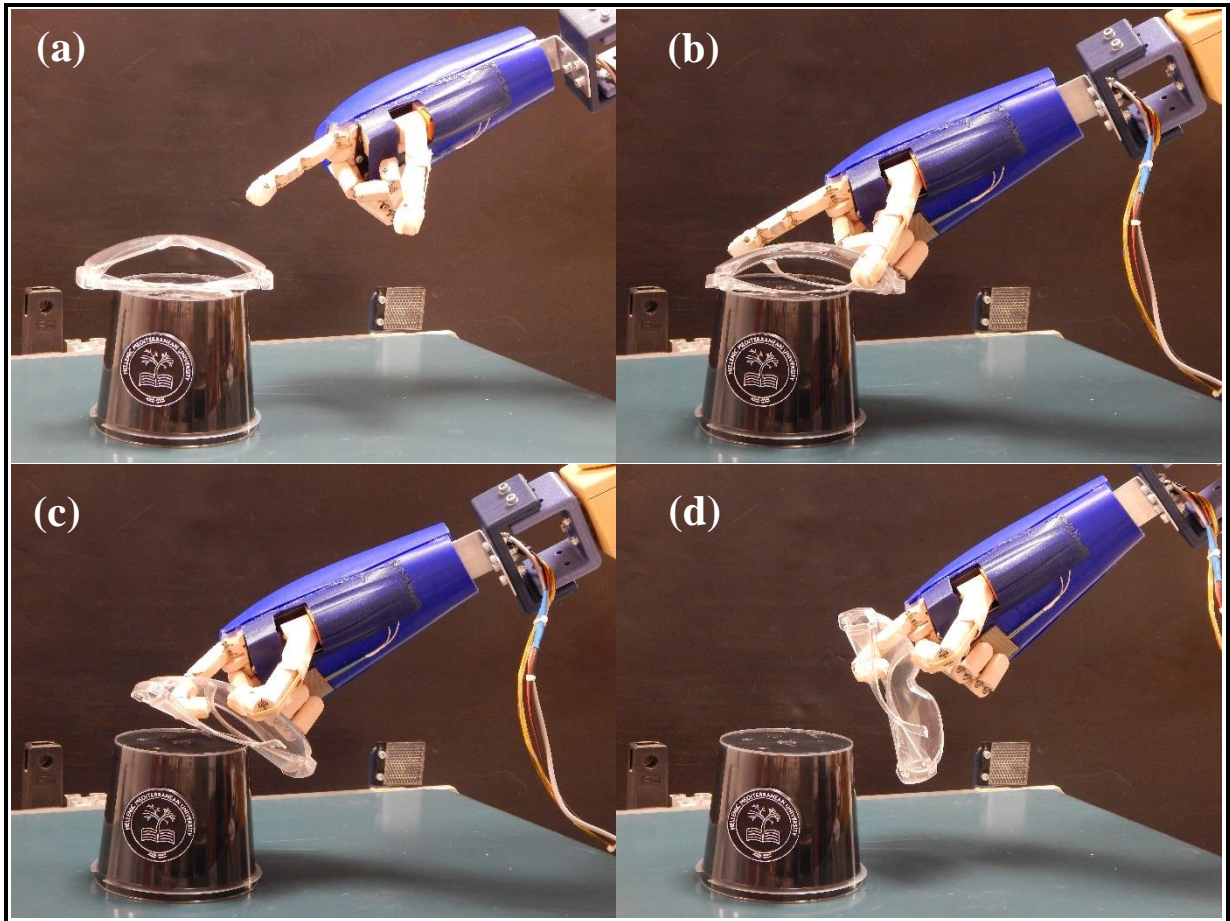
Εικόνα 4.15: Πειραματική δοκιμή αυτόνομης λαβής για μαρκαδόρο, (a) προσέγγιση, (b) τελική θέση προσέγγισης πριν την λαβή, (c) αρπαγή, (d) κίνηση σε άλλο σημείο.



Γραφική Παράσταση 4.9: Γραφική παράστασης τάσης από το αισθητήριο FSR ως προς τον χρόνο για την αυτόνομη λαβή μαρκαδόρου.

➤ Πειραματική δοκιμή με αντικείμενο «Γυαλιά Ασφαλείας»

Η επόμενη πειραματική δοκιμή πραγματοποιήθηκε με την χρήση ενός ζευγαριού γυαλιού ασφαλείας. Το βάρος του ανέρχεται στα 43 gr. Ενώ οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με κλειστό τον σκελετό του.



Εικόνα 4.16: Πειραματική δοκιμή αυτόνομης λαβής για γυαλιά ασφαλείας, (a) προσέγγιση, (b) τελική θέση προσέγγισης πριν την λαβή, (c) αρπαγή, (d) κίνηση σε άλλο σημείο.

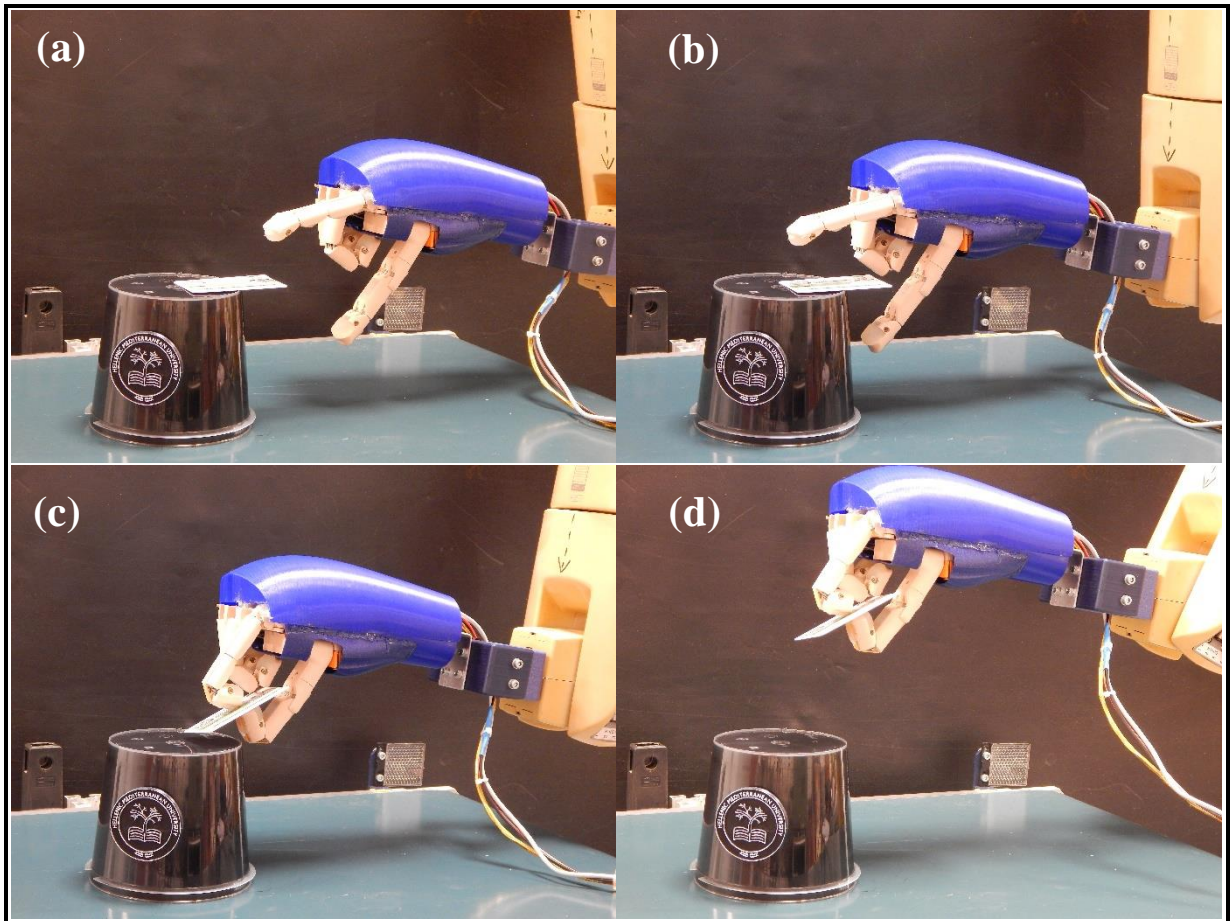
Ο τρόπος προσέγγισης του ζευγαριού γυαλιού ασφαλείας έγινε διαγώνια με τα γυαλιά να κοιτάνε προς τα πάνω. Επιλέχθηκε ένας τρόπος προσέγγισης ώστε τα γυαλιά να απαγκιστρωθούν πάνω στα ρομποτικά δάκτυλα [Εικόνα 4.16].

Η συγκεκριμένη λαβή είχε ποσοστό επιτυχίας **40%** . Ενώ τα δεδομένα που παίρνουμε από το αισθητήριο FSR στην περιφερειακή φάλαγγα του δείκτη δεν είναι χρήσιμα στο παρών πείραμα.

➤ **Πειραματική δοκιμή με αντικείμενο «Φοιτητικό Πάσο»**

Επόμενο πείραμα που πραγματοποιήθηκε είναι με μια κάρτα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση πρόκειται για ένα φοιτητικό πάσο βάρους 6 gr.

Για να είναι σε θέση το ρομποτικό χέρι να το πιάσει το αντικείμενο τοποθετήθηκε ώστε το μισό του μέρος να βρίσκεται στον αέρα με σκοπό να είναι εύκολο στο ρομποτικό δάκτυλο να το πιάσει. Η συγκεκριμένη λαβή είχε ποσοστό επιτυχίας **20%**.



Εικόνα 4.17: Πειραματική δοκιμή αυτόνομης λαβής για φοιτητικό πάσο, (a) προσέγγιση, (b) τελική θέση προσέγγισης πριν την λαβή, (c) αρπαγή, (d) κίνηση σε άλλο σημείο.

Στο συγκεκριμένο πείραμα δεν λάβαμε κανένα δεδομένο από τα αισθητήρια FSR καθώς δεν έρχονται σε επαφή με τα κατάλληλα σημεία ούτε ο δείκτης αλλά ούτε ο αντίχειρας. Αυτό μπορούμε να το διακρίνουμε και από την **Εικόνα 4.17 (c) και (d)**.

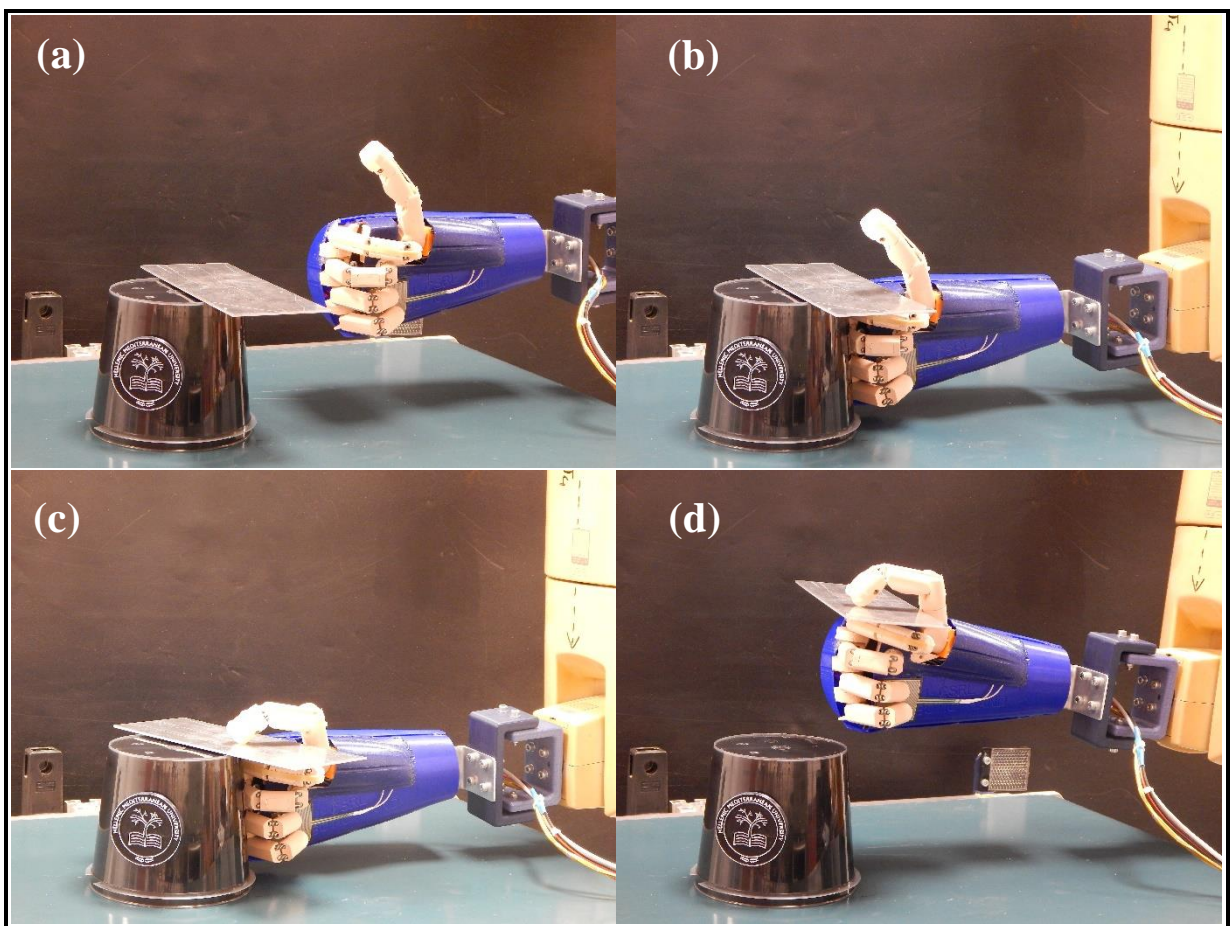
4.3.2.4 Πειραματική δοκιμή αυτόνομης λαβής *Lateral Prehension*

➤ Πειραματική δοκιμή με αντικείμενο «Λαμαρίνα αλουμινίου»

Στην τελευταία λαβή χρησιμοποιείται η προ-λαβή *Lateral Prehension*. Το αντικείμενο που θα χρησιμοποιηθεί για την συγκεκριμένη είναι μια λαμαρίνα αλουμινίου βάρους 105 gr.

Για να πραγματοποιηθεί η συγκεκριμένη λαβή πρέπει ένα κομμάτι της λαμαρίνας του αλουμινίου να βρίσκεται στον αέρα. Με αυτό τον τρόπο η κάτω πλευρά της λαμαρίνας ακουμπάει στην πάνω πλευρά του δείκτη και κινώντας τον αντίχειρα συγκρατείται.

Εξαιτίας της κακής κατασκευής του αντίχειρα αν και πραγματοποιείται η λαβή δεν λαμβάνουμε υπόψιν το ποσοστό επιτυχίας εφόσον η κίνηση του αντίχειρα γίνεται αποκλειστικά φτάνοντας στο όριο της κίνησης.



Εικόνα 4.18: Πειραματική δοκιμή αυτόνομης λαβής για λαμαρίνα αλουμινίου, (a) προσέγγιση, (b) τελική θέση προσέγγισης πριν την λαβή, (c) αρπαγή, (d) κίνηση σε άλλο σημείο.

Επίσης και στο συγκεκριμένο πείραμα δεν λάβαμε κανένα δεδομένο από τα αισθητήρια FSR καθώς το μοναδικό δάκτυλο που έρχεται σε επαφή με το αισθητήριο FSR είναι ο αντίχειρας. Που όπως έχει αναφερθεί λόγω του πάχους του ελαστικού πέλματος χρειάζεται μεγάλη δύναμη για να δουλέψει το αισθητήριο. Αυτό μπορούμε να το διακρίνουμε και από την **Εικόνα 4.18 (d)**.

4.3.2.5 Αποτελέσματα αυτόνομων λαβών

Στον παρακάτω πίνακα διακρίνονται τα ποσοστά επιτυχίας που προέκυψαν από τα παραπάνω πειράματα. Η αυτόνομη λαβή πραγματοποιήθηκε με την χρήση προ-λαβών. Η προ-λαβή που είχε το μεγαλύτερο ποσοστό επιτυχίας είναι η Power Grasp, η οποία πραγματοποιείται με όλη τα δάκτυλα και την παλάμη του ρομποτικού χεριού, και αφορά κυρίως μεσαίου όγκου αντικείμενα.

Το ποσοστό επιτυχίας της Power Grasp είναι 83%. Για τις άλλες δύο προ-λαβές τα ποσοστά επιτυχίας ήταν πολύ χαμηλότερα, καθώς αφορούσαν πιο μικρά αντικείμενα. Όπως διακρίνεται και από τα πειράματα ήταν αρκετά δύσκολο στο να έχουμε μια επιτυχή αρπάγη των μικρών αντικειμένων. Το συνολικό ποσοστό επιτυχίας των αυτόνομων λαβών με την χρήση διάφορων προ-λαβών είναι περίπου 61%

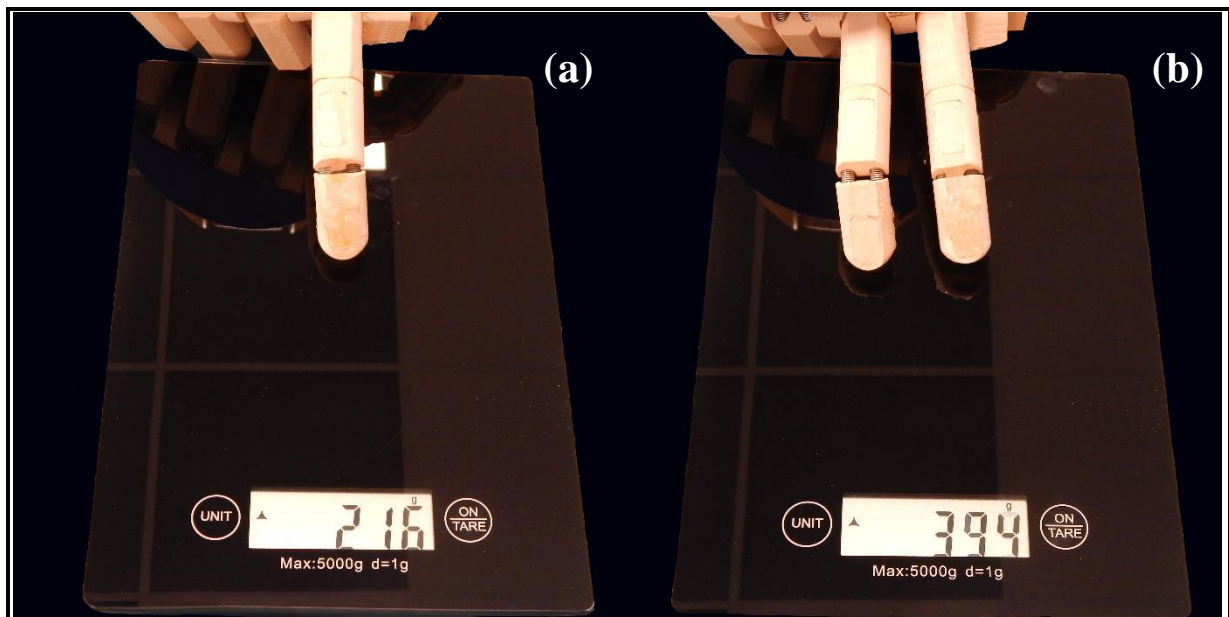
Autonomous grasps using pre-grips

Grasp	Power Grasp						Three Finger		Precision Grip		
	a	b	c	d	e	f	g	k	h	j	i
Success rate	80	90	80	100	80	70	50	30	30	40	20
Average	83%						40%		30%		
Overall Average	61%										

Πίνακας 4.3: Συγκεντρωτικός πίνακας με τα ποσοστά επιτυχίας αρπαγής αντικειμένων τον αυτόνομων λαβών με την χρήση προ-λαβών.

4.3.3 Πειραματική μέτρηση δύναμης δακτύλων

Για την μέτρηση της δύναμης που είναι ικανά να ασκήσουν τα δάκτυλα δείκτης και παράμεσος, χρησιμοποιήθηκε μια κοινή ζυγαριά μέτρησης βάρους του εμπορίου.



Εικόνα 4.19: Μέτρηση δύναμης δακτύλων δείκτη και μεσαίον του ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού. i)Ο δείκτης ασκεί μια δύναμη περίπου 2 Nt στην ζυγαριά. ii)Ο δείκτης μαζί με τον μεσαίο ασκούνε δύναμη περίπου 4 Nt στην ζυγαριά.

Το ρομποτικό χέρι κατά την διάρκεια της μέτρησης ήταν τοποθετημένο στον ρομποτικό βραχίονα RV-2A, όπου δεχόταν όλο το βάρος του ρομποτικού χεριού. Με αποτέλεσμα να μην επηρεάζεται καθόλου η μέτρηση της δύναμης, εξαιτίας του βάρους του ρομποτικού χεριού. Η μέγιστη δύναμη που είναι δυνατό να ασκήσουν τα δάκτυλα μετριέται υπό την πλήρη έκταση των δακτύλων.

Για τον δείκτη όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 4.19 (a)**, μετρήθηκε ότι το βάρος που ασκεί το δάκτυλο στην ζυγαριά είναι 216 gr, αυτό αντιστοιχεί σε μία δύναμη περίπου 2Nt. Για το ζεύγος των δακτύλων δείκτη-μεσαίου, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 4.19 (b)** μετρήθηκε ότι το βάρος που ασκούν τα δάκτυλα στην ζυγαριά είναι 394 gr, που αντιστοιχεί σε μία δύναμη περίπου 4Nt. Όποτε κάθε ένα από τα δύο δάκτυλα δείκτη και μεσαίου μπορεί να εφαρμόσει στο σύστημα μια μέγιστη δύναμη 2Nt.

5 Κινηματική ανάλυση

5.1 Γενική εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει η κινηματική μελέτη των ρομποτικών δακτύλων δύο και τριών αρθρώσεων. Θα αναλυθεί η κάθε άρθρωση του δακτύλου ως ένα σταθερό σημείο περιστροφής και όχι μεταβαλλόμενο.

Η κινηματική ανάλυση των ρομποτικών δακτύλων, δεν είναι δυνατό να υπολογιστεί με συνήθεις μεθόδους επίλυσης κινηματικού προβλήματος. Έτσι επιλέχθηκε να γίνει η χρήση της μηχανικής όρασης. Με αυτό τον τρόπο παίρνουμε εικόνες ανά ίσα διαστήματα γραμμικής μετατόπισης του επενεργητή, και υπολογίζουμε την γωνία της κάθε άρθρωσης σε αυτά τα διαστήματα.

Η μηχανική όραση χρησιμεύει στο γεγονός ότι μας δείχνει την γωνία που έχει περιστραφεί η κάθε άρθρωση με την χρήση markers που τοποθετούμε επάνω στο δάκτυλο. Όπως αναφέρθηκε η πρώτη παραδοχή που γίνεται, είναι ότι η άρθρωση με την χρήση ελατηρίου θεωρείται σταθερή (rigid). Δηλαδή περιστρέφεται γύρω από άξονα που βρίσκεται στο κέντρο της κάθε άρθρωσης και δεν μετατοπίζεται.

Οπότε είναι δυνατό να υπολογιστεί η γωνία της κάθε άρθρωσης εάν τοποθετήσουμε markers επάνω στις αρθρώσεις. Για να υπολογιστούν οι γωνίες της κάθε άρθρωσης, και εφόσον έχει γίνει η παραδοχή, ότι οι αρθρώσεις είναι σταθερές (rigid). Πρέπει να γίνει η επίλυση συστήματος, για την εύρεση των γωνιών με την βοήθεια των markers.

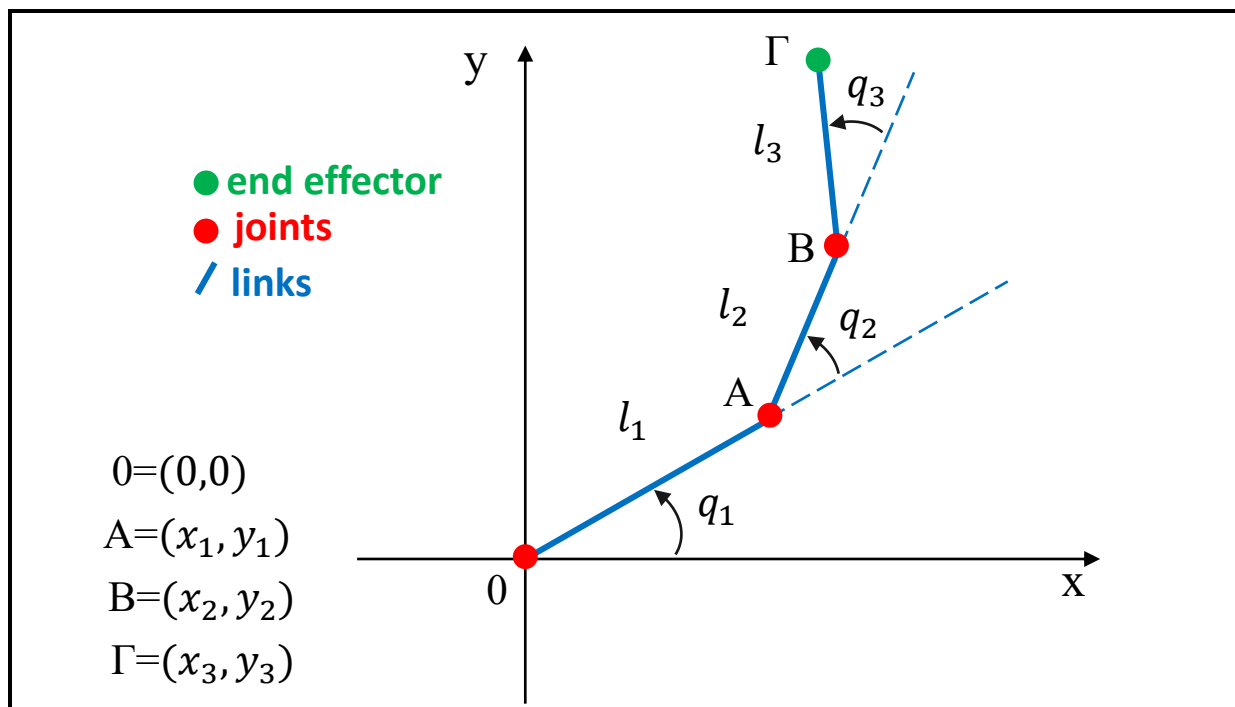
Επίσης γίνεται η επίλυση του ευθύ κινηματικού που θα χρησιμοποιηθεί για τη αξιοπιστία των μετρήσεων. Δηλαδή εφόσον έχουμε υπολογίσει τις γωνίες με την χρήση των εικόνων θα επιλύσουμε το ευθύ κινηματικό, για να βρούμε κατά πόσο αποκλίνουν από τις πραγματικές τιμές.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως είναι σημαντικό να υπάρξει μια συσχέτιση μεταξύ της μετατόπισης του τένοντα και την γωνία περιστροφής των αρθρώσεων. Καθώς κρίθηκε αναγκαία η χρήση κάποιων προ-λαβών για την αρπαγή αντικειμένων. Για αυτό τον λόγο πρέπει να προσδιοριστεί η γωνία που θα κινηθεί η κάθε άρθρωση σε συνάρτηση με την γραμμική μετατόπιση του επενεργητή.

Καθώς πρέπει να μπορούμε να μετακινούμε το χέρι στην επιθυμητή θέση που θέλουμε χωρίς να το ελέγχουμε οπτικά αλλά με την χρήση κινηματικών εξισώσεων. Επίσης είναι δυνατό να συσχετισθεί η κάθε άρθρωση με την χρήση περιστροφικών ελατηρίων αντί για εφελκυσμού.

5.2 Επίλυση ευθύ κινηματικού τριών βαθμών ελευθερίας

Αρχικά θα επιλύσουμε το ευθύ κινηματικό πρόβλημα για ένα βραχίονα τριών βαθμών ελευθερίας. Αυτό ο βραχίονας μπορεί να συσχετισθεί με ένα ανθρώπινο δάκτυλο.



Εικόνα 5.1: Κινηματική ανάλυση βραχίονα τριών βαθμών ελευθερίας.

Σύμφωνα με το σχήμα στην **Εικόνα 5.1** έχοντας ως δεδομένα τις γωνίες που έχει περιστραφεί η κάθε άρθρωση του βραχίονα, και γνωρίζοντας τα μήκη των φαλάγγων, μπορούν να υπολογιστούν οι εξισώσεις για το ευθύ κινηματικό και να δώσουν τις συντεταγμένες των αρθρώσεων. Για το σημείο $A(x_1, y_1)$ θα ισχύουν οι εξισώσεις (5.1) και (5.2). Για το σημείο $B(x_2, y_2)$ θα ισχύουν οι εξισώσεις (5.3) και (5.4). Ενώ για το σημείο $\Gamma(x_3, y_3)$ θα ισχύουν οι εξισώσεις (5.5) και (5.6).

$$x_1 = l_1 \cos(q_1) \quad (5.1) \quad y_1 = l_1 \sin(q_1) \quad (5.2)$$

$$x_2 = l_2 \cos(q_1 + q_2) + x_1 \quad (5.3) \quad y_2 = l_2 \sin(q_1 + q_2) + y_1 \quad (5.4)$$

$$x_3 = l_3 \cos(q_1 + q_2 + q_3) + x_2 \quad (5.5) \quad y_3 = l_3 \sin(q_1 + q_2 + q_3) + y_2 \quad (5.6)$$

Επομένως οι γενικές εξισώσεις που επιλύουν το ευθύ κινηματικό μπορεί να περιγραφούν στην γενική τους μορφή ως (5.7) και (5.8).

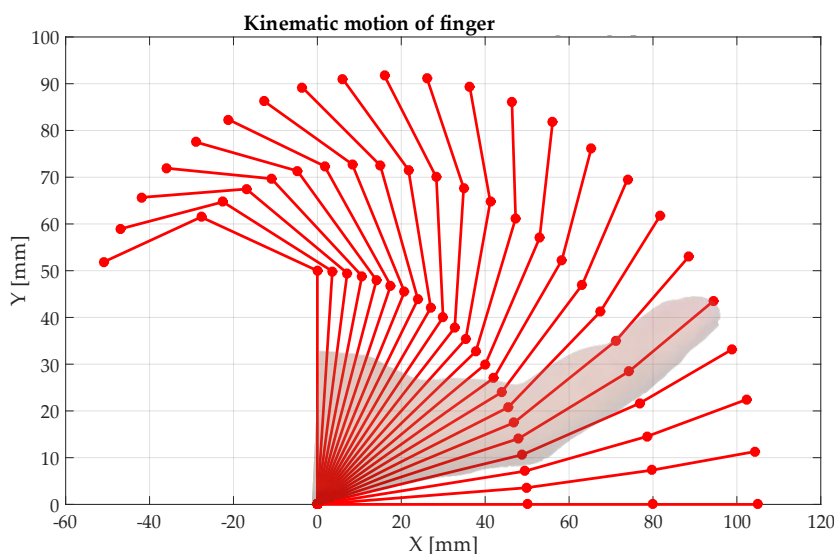
$$x_n = l_n \cos\left(\sum_{i=1}^n q_i\right) + x_{n-1} \quad (5.7) \quad y_n = l_n \sin\left(\sum_{i=1}^n q_i\right) + y_{n-1} \quad (5.8)$$

Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις μπορούμε να επιλύσουμε το ανθρώπινο δάκτυλο αντικαθιστώντας στις γωνίες τις σχέσεις που υπάρχουν από το προηγούμενο κεφάλαιο για το ανθρώπινο χέρι [2.2.3].

Εφόσον οι στατικοί περιορισμοί για την γωνία κίνησης της άρθρωσης q_1 είναι $0^\circ \leq q_1 \leq 90^\circ$, αντικαθιστώντας στις εξισώσεις (2.18) και (2.19) εξάγουμε τις γωνίες για τις υπόλοιπες δύο αρθρώσεις.

Εφόσον έχουν υπολογιστεί οι γωνίες της κάθε άρθρωσης κατά την ελεύθερη κίνηση του δακτύλου. Λύνοντας το ευθύ κινηματικό, και θέτοντας ως μήκη φαλάγγων του δακτύλου τα εξής, $l_1=50$ mm, $l_2=30$ mm, $l_3=25$ mm, που αντιστοιχούν σε μήκη πραγματικού δακτύλου.

Προκύπτει η οπτικοποίηση της κίνησης του δακτύλου, κατά την διάρκεια της ελεύθερης κίνησης του χεριού με βάση τις εξισώσεις κίνησης [**Γραφική Παράσταση 5.1**]. Με αυτό τον τρόπο προσεγγίζουμε κινηματικά το ανθρώπινο χέρι και οπτικοποιούμε την κίνηση που πραγματοποιεί κατά την ελεύθερη κίνηση της κάμψης των δακτύλων.



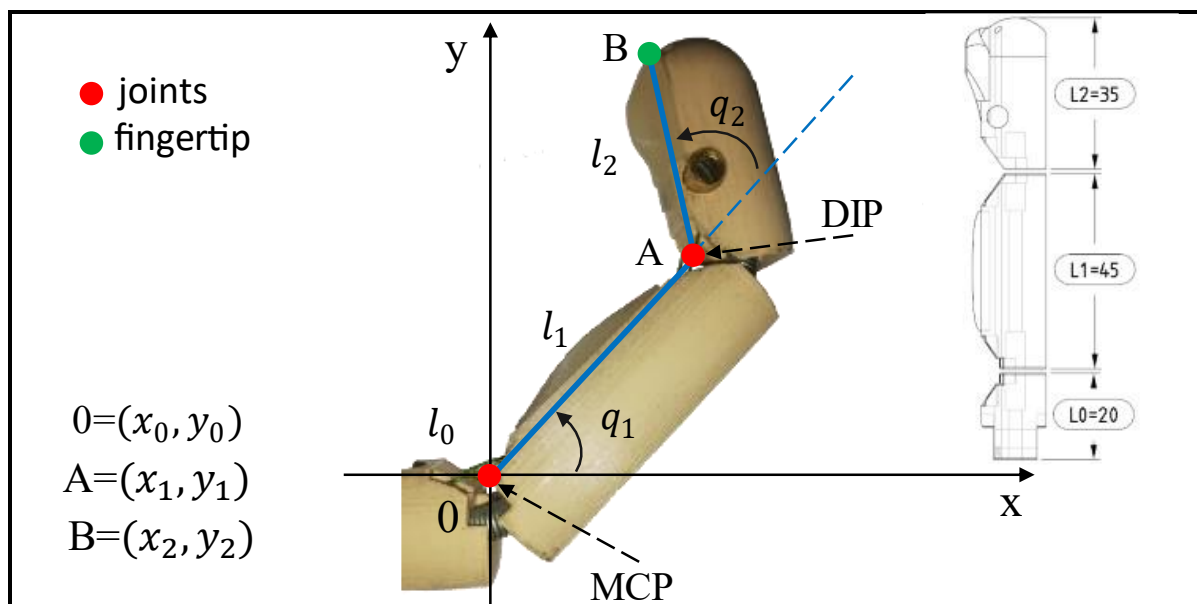
Γραφική Παράσταση 5.1: Επίλυση ευθύ κινηματικού για ανθρώπινο δάκτυλο.

5.3 Επίλυση συστήματος για εύρεση γωνιών αρθρώσεων

Τα δεδομένα που θα λαμβάνουμε από την κάμερα με την κατάλληλη επεξεργασία της εικόνας, θα είναι οι συντεταγμένες που βρίσκονται τα markers. Τα markers τοποθετούνται στον υποτιθέμενο άξονα της κάθε άρθρωσης. Δηλαδή περιστρέφουμε το δάκτυλο για να εντοπίσουμε κατά προσέγγιση που βρίσκεται η κάθε άρθρωση και εκεί τοποθετούμε τον marker. Επίσης marker τοποθετούμε και στο άκρο του δακτύλου (fingertip).

Εδώ να αναφερθεί ότι η συσχέτιση της διάστασης του pixel της εικόνας για κάθε πειραματική δοκιμή, γίνεται με βάση την πρώτη εικόνα. Όταν το χέρι βρίσκεται σε πλήρη έκταση μετράμε την απόσταση μεταξύ του πρώτου και του τελευταίου marker. Από την πρώτη εικόνα που θα τραβήξει το πρόγραμμα του Matlab εφόσον η μετατόπιση του δακτύλου δεν έχει αλλάξει συσχετίζεται η απόσταση των pixel με την πραγματική απόσταση. Με αυτό τον τρόπο προκύπτει η διάσταση του κάθε pixel για την εύρεση των συντεταγμένων της κάθε άρθρωσης.

Για να υπολογίσουμε τις γωνίες των αρθρώσεων, θεωρούμε τις συντεταγμένες της πρώτης άρθρωσης ως το σημείο 0 και την αρχή των αξόνων. Με αυτό τον τρόπο υπολογίζονται ξανά οι νέες συντεταγμένες που προκύπτουν με βάση την νέα αρχή των αξόνων όπως διακρίνεται και στην **Εικόνα 5.2**.



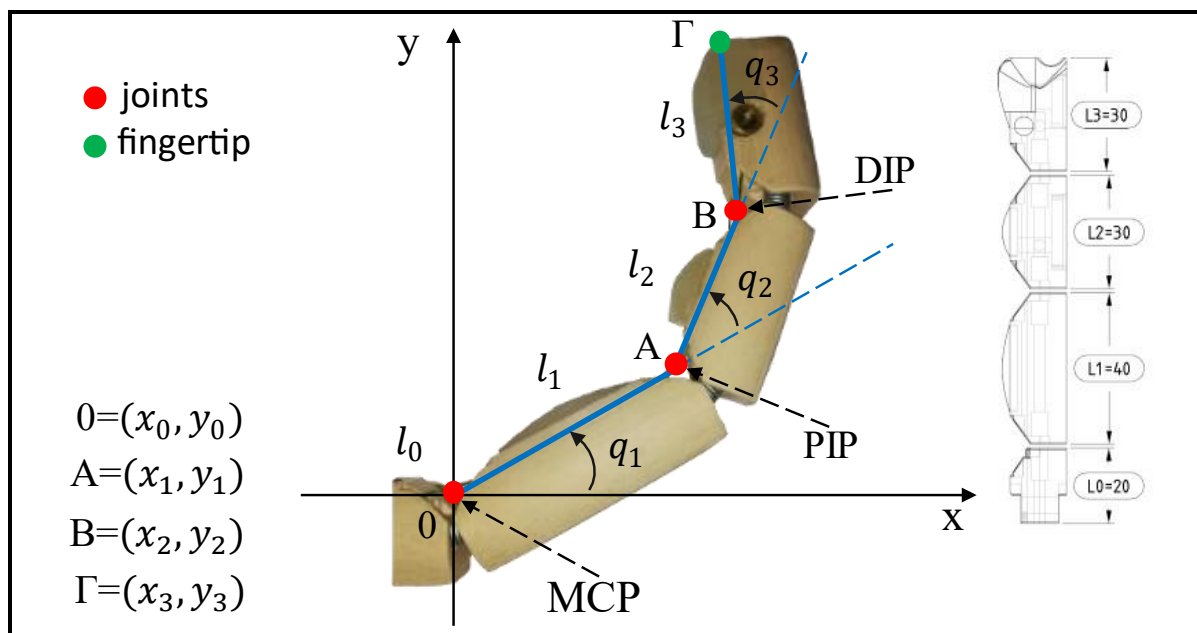
Εικόνα 5.2: Κινηματική ανάλυση δακτύλου δύο αρθρώσεων (μικρού-παράμεσου).

Εφόσον έχουν υπολογιστεί οι νέες συντεταγμένες στα σημεία 0,A,B τότε για βρεθούν οι γωνίες των αρθρώσεων θα ισχύουν οι σχέσεις (5.9) και (5.10) για τα δάκτυλα του μικρού και του παράμεσου. Που όμως εφαρμόζεται για οποιοδήποτε δάκτυλο με δύο αρθρώσεις.

$$q_1 = \tan^{-1} \left(\frac{y_2 - y_0}{x_2 - x_0} \right) \quad (5.9)$$

$$q_2 = \tan^{-1} \left(\frac{y_3 - y_0}{x_3 - x_0} \right) - q_1 \quad (5.10)$$

Επομένως οι εξισώσεις (5.9) και (5.10) θα ισχύουν και στην περίπτωση του ρομποτικού αντίχειρα.



Εικόνα 5.3: Κινηματική ανάλυση δακτύλου τριών αρθρώσεων (δείκτη-παράμεσου).

Για τα ρομποτικά δάκτυλα των τριών αρθρώσεων ισχύουν οι παραπάνω σχέσεις (5.9) και (5.10). Επίσης όπως φαίνεται στο σχήμα στην **Εικόνα 5.3** το σημείο Γ για να επιλυθεί η γωνία της τρίτης άρθρωσης θα ισχύει η σχέση (5.11).

$$q_3 = \tan^{-1} \left(\frac{y_4 - y_3}{x_4 - x_3} \right) - q_1 - q_2 \quad (5.11)$$

Επομένως η γενική εξίσωση που επιλύει το σύστημα για την εύρεση των γωνιών με βάση τις συντεταγμένες είναι η (5.12).

$$q_n = \tan^{-1} \left(\frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n} \right) - \sum_{i=1}^{n-1} q_i \quad n > 1 \quad (5.12)$$

5.4 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Η συγκεκριμένη πειραματική διάταξη έχει σχεδιαστεί ώστε να μπορεί να αναλύει την κινηματική των ρομποτικών δακτύλων, με την χρήση κάμερας για την εύρεση των γωνιών των αρθρώσεων, και την κίνηση του γραμμικού επενεργητή. Καθώς και την σταθερά των ελατηρίων του ζεύγους της κάθε άρθρωσης, χωρίς όμως να χρησιμοποιηθεί στο παρών κεφάλαιο.

Η τελική πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε διακρίνεται στην **Εικόνα 5.4**. Ενώ τα μέρη που την αποτελούν και η αρχιτεκτονική όλου του συστήματος διακρίνεται στην **Εικόνα 5.5**. Είναι τα εξής μέλη:

- **Πλαίσιο βάσης**

Το κύριο πλαίσιο της βάσης έχει σχεδιαστεί ώστε να ενσωματώνει όλα τα συστήματα της πειραματικής διάταξης. Αποτελείται από μελαμίνες κάθετα μεταξύ τους, στηριγμένες στο πίσω μέρος με γωνίες. Επίσης στην κάτω μελαμίνη είναι τοποθετημένες ντιζες στήριξης με την

βοήθεια εκτυπωμένων βάσεων, όπου συνδέουν στο άκρο τους μία γωνία αλουμινίου για την στήριξη του φωτισμού και της κάμερας.

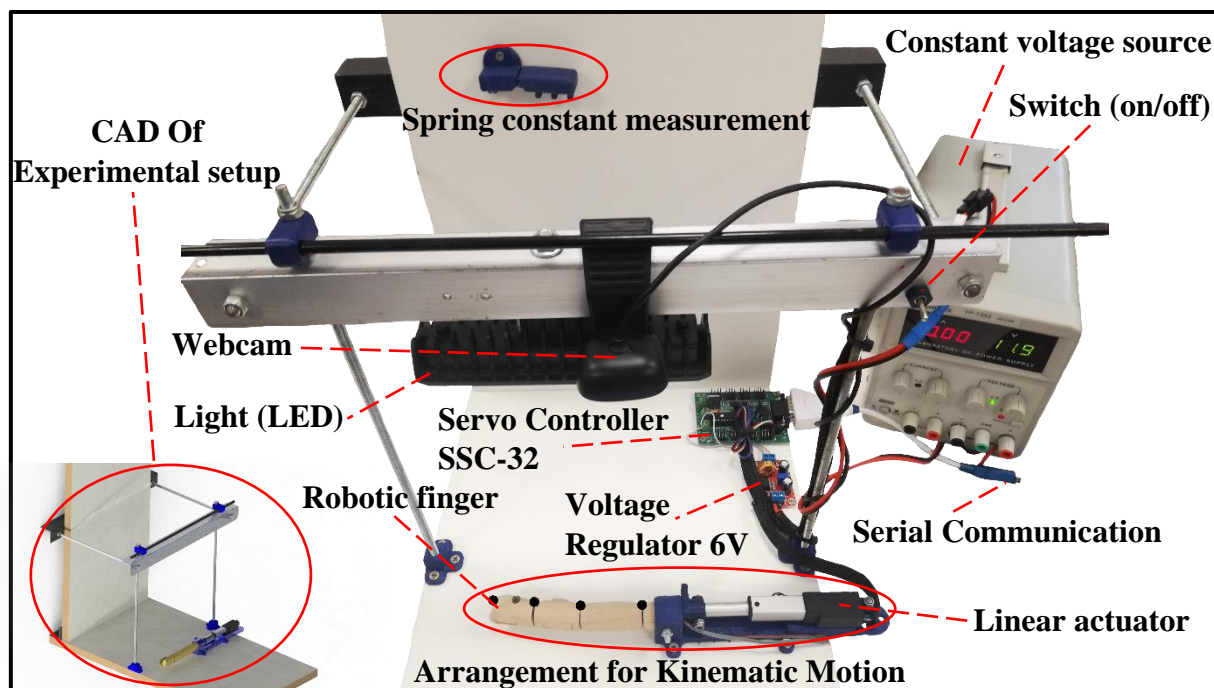
- **Ηλεκτρονικός υπολογιστής**

Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής είναι εκείνος που ελέγχει την λειτουργία όλης της πειραματικής διάταξης μέσω του προγράμματος Matlab. Στέλνει εντολή μέσω σειριακής επικοινωνίας στον σερβοελεγκτή, για να κινήσει τον επενεργητή στην επιθυμητή θέση.

Λαμβάνει φωτογραφία από την κάμερα την κατάλληλη χρονική στιγμή, αφού έχει ολοκληρωθεί η κίνηση. Επίσης εμφανίζει στην επιφάνεια εργασίας του υπολογιστή τις εικόνες με την εύρεση των αρθρώσεων, για τον οπτικό έλεγχο από τον χρήστη.

- **Κάμερα υπολογιστή**

Χρησιμοποιήθηκε μια απλή κάμερα υπολογιστή που είναι συνδεδεμένη με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή για την λήψη των φωτογραφιών. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η κάμερα να είναι τοποθετημένη ακριβώς παράλληλα με την κάτω μελαμίνη και σε κατάλληλο ύψος. Όστε να είναι σε θέση ο φακός της, να βλέπει όλο το δάκτυλο καθ' όλη την μετατόπιση που του ασκούμε. Επίσης σημαντική είναι και η σωστή βαθμονόμηση της κάμερας για να αποφευχθούν διαστρεβλώσεις εξαιτίας του φακού.



Εικόνα 5.4: Πειραματική διάταξη εύρεσης κινηματικού των ρομποτικών δακτύλων και της σταθεράς των ελατηρίων.

- **Φωτισμός**

Ο φωτισμός της πειραματικής διάταξης πρέπει να είναι σταθερός ώστε να μην υπάρχουν παρεμβολές στο πρόγραμμα που εντοπίζει τα markers. Για αυτό τον λόγο επιλέχθηκε και χρησιμοποιήθηκε ένα μικρός προβολέας LED. Τοποθετημένος δίπλα στην κάμερα με παρόμοιο προσανατολισμό.

- **Επενεργητής**

Ο επενεργητής που χρησιμοποιήθηκε για την μετατόπιση των δακτύλων του ρομποτικού χεριού είναι παρόμοιος με αυτούς που χρησιμοποιούνται στο ρομποτικό χέρι για την κίνηση των δακτύλων. Ο γραμμικός επενεργητής τοποθετείται και βιδώνεται πάνω στην βάση που έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί για την μετατόπιση του δακτύλου.

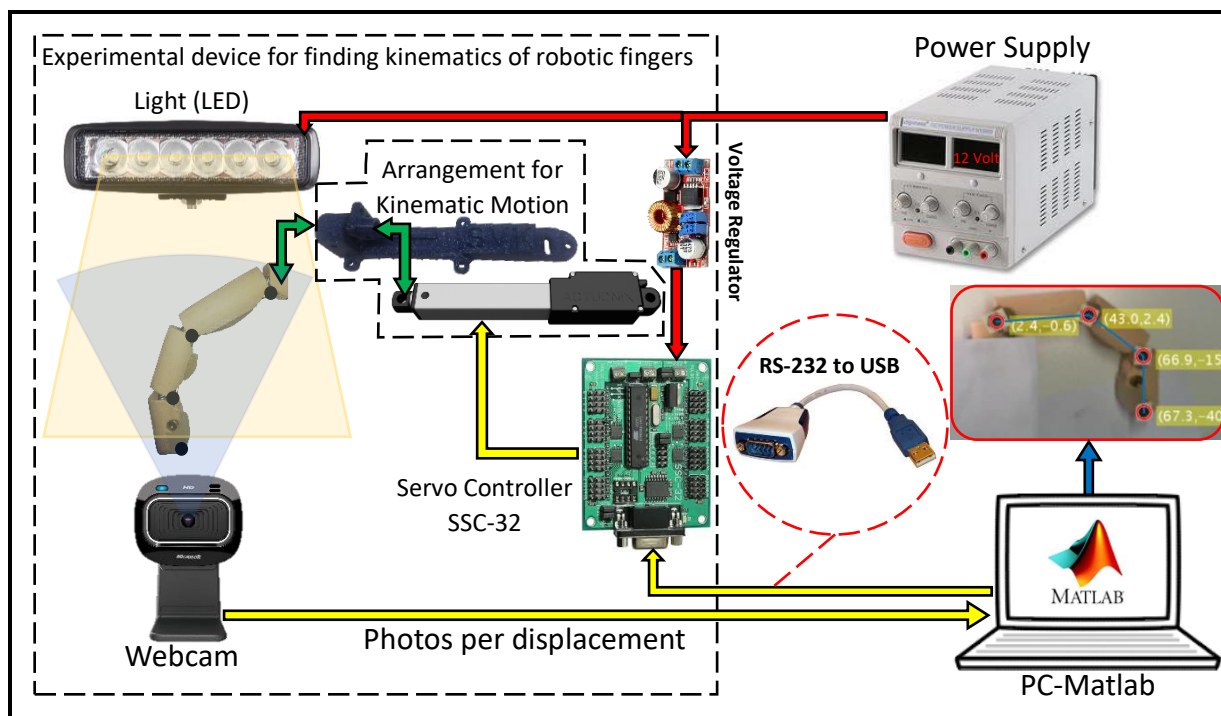
- **Σερβοελεγκτής**

Ο σερβοελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε είναι ο SSC-32. Διότι οι εντολές κίνησης που δέχεται μέσω της σειριακής επικοινωνίας είναι αρκετά εύχρηστες και απλοϊκές στην υλοποίησή τους.

- **Βάση μετατόπισης δακτύλου**

Η βάση της μετατόπισης του δακτύλου αποτελείται από δύο μέλη. Το πρώτο μέλος είναι σταθερό και ασφαρίζεται με βίδες στο πάνω μέρος της κάτω μελαμίνης. Πάνω σε αυτό το μέλος της βάσης εφαρμόζεται το δάκτυλο και στερεώνεται. Πριν τοποθετηθεί ο επενεργητής πρέπει να τοποθετηθεί το δεύτερο μέλος της βάσης, το οποίο κινείται γραμμικά στην ειδική εσοχή που διαθέτει, με την βοήθεια του επενεργητή. Στην συνέχεια βιδώνεται πάνω στο σταθερό μέρος ο επενεργητής, και το άκρο του πάνω στο κινητό μέλος.

Εφόσον ολοκληρωθεί η διαδικασία της συναρμολόγησης τοποθετούνται οι τένοντες (νήματα) στις ειδικές εσοχές που υπάρχουν. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η στροφή του δακτύλου με βάση την μετατόπιση του επενεργητή.



Εικόνα 5.5: Αρχιτεκτονική της πειραματικής διάταξης για την κινηματική ανάλυση των ρομποτικών δακτύλων.

- **Markers**

Τα markers τοποθετούνται πάνω στις υποτιθέμενες αρθρώσεις των δακτύλων. Αν και δεν μας ενδιαφέρει το σχήμα αλλά το κέντρο του, έχουν κυκλικό σχήμα. Όστε να είναι πιο εύκολο οπτικά να τοποθετηθεί το κέντρο του κύκλου στο κέντρο της κάθε άρθρωσης. Η διάμετρος του μπορεί να κυμαίνεται από 4 με 8 mm.

Η τοποθέτηση των markers στο κέντρο των υποτιθέμενων αρθρώσεων γίνεται με την χρήση κολλητικής πλαστελίνης καθώς η άρθρωση είναι μετατοπισμένη από τα άκρα των φαλάγγων.

- **Τροφοδοσία πειραματικής διάταξης**

Η τροφοδοσία της πειραματικής διάταξης γίνεται αποκλειστικά με την χρήση σταθερής πηγής τάσης ρυθμισμένη στα 12 Volt. Επίσης στο σύστημα υπάρχει και διακόπτης on/off για την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση του φωτισμού.

Για την τροφοδοσία του σερβοελεγκτή χρησιμοποιείται ένας ρυθμιστής για τον υποβιβασμό της τάσης στα 6 Volt.

5.5 Πρωτόκολλο των Πειραμάτων

Για την τήρηση της επαναληψιμότητας και ακεραιότητας των πειραμάτων δημιουργήθηκε ένα πρωτόκολλο πειραμάτων, όπου ακολουθήθηκε πιστά κατά την διαδικασία όλο των πειραμάτων. Περιγράφονται αναλυτικά όλες οι παραδοχές και οι διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν κατά την διαδικασία των πειραμάτων.

5.5.1 Περιγραφή του πρωτοκόλλου

Η περιγραφή του πρωτοκόλλου που πραγματοποιήθηκε περιγράφεται σε βήματα ανά σειρά προτεραιότητας.

5.5.1.1 Παραδοχές κινηματικής ανάλυσης

Η πρώτη παραδοχή που έγινε για να είναι δυνατό να μελετηθεί το κάθε δάκτυλο είναι να θεωρήσουμε τις αρθρώσεις σταθερές. Δηλαδή να προσομοιώσουμε την κίνηση που κάνουν τα ελατήρια του εφελκυσμού, με περιστροφικά ελατήρια.

5.5.1.2 Τάνυση του νήματος

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι ο τένοντας, δηλαδή το νήμα. Είναι πολύ σημαντικό το νήμα όταν τοποθετείται στο ρομποτικό δάκτυλο και συγκρατείται να μην υπάρχει καθόλου τάνυση στο νήμα. Καθώς αυτό θα δημιουργεί ψευδείς μετρήσεις στο σύστημα. Διότι ενώ μετατοπίζεται ο επενεργητής το ρομποτικό δάκτυλο παραμένει στην ίδια θέση. Γι' αυτό τον λόγο τα νήματα πρέπει τα τοποθετηθούν πολύ καλά και να μην έχουν καθόλου μπόσικα.

5.5.1.3 Μετατόπιση Δακτύλου

Επίσης όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, εξαιτίας της τάνυσης του νήματος, δημιουργούνται ψευδείς μετατοπίσεις. Δηλαδή κινείται ο επενεργητής και δεν κινείται το ρομποτικό δάκτυλο. Αυτές οι ψευδές μετατοπίσεις μετρούνται και αφαιρούνται από την τελική μετατόπιση που χρησιμοποιούν τα διαγράμματα. Επίσης αφαιρείται και μια μετατόπιση από το τέλος εξαιτίας των ορίων της πειραματικής διάταξης. Δηλαδή ο επενεργητής μετατοπίζεται αλλά το δάκτυλο δεν κινείται εξαιτίας, του γεγονός ότι έχει φτάσει στην μέγιστη δυνατή θέση.

Στον Πίνακα 5.1 διακρίνονται τα offset που πραγματοποιήθηκαν για την κινηματική ανάλυση των ρομποτικών δακτύλων. Στην δεύτερη στήλη του πίνακα διακρίνεται η αρχική συνολική μετατόπιση για κάθε δάκτυλο. Ενώ στην τελευταία το βήμα για την κάθε μετατόπιση.

Ενώ στην τρίτη και τέταρτη στήλη διακρίνεται το αρχικό και τελικό offset αντίστοιχα, που αφαιρέθηκαν από την αρχική μετατόπιση. Τέλος στην πέμπτη στήλη διακρίνεται η τελική μετατόπιση των πειραμάτων μετά την αφαίρεση των offset.

Offset of displacement due to tensile strength					
<i>Finger</i>	<i>Initial Displacement (mm)</i>	<i>Start Offset (mm)</i>	<i>End Offset (mm)</i>	<i>Final Displacement (mm)</i>	<i>Step of Displacement (mm)</i>
Pinky Finger 1	19	2.5	0	16.5	0.5
Ring Finger 2	19	2.5	0	16.5	0.5
Middle Finger 3	20	2	0	18	0.5
Index Finger 4	20	2.5	2	15.5	0.5
Thumb Finger 5	20	4	0	16	0.5

Πίνακας 5.1: Μετατοπίσεις της μετατόπισης Δx των γραμμικών επενεργητών λόγω τάνσης των τενόντων.

5.5.1.4 Κάμερα

Η κάμερα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι μια απλή κάμερα υπολογιστή. Δεν χρειάζεται να είναι υψηλής ανάλυσης διότι δεν θα προσφέρει τίποτα στο σύστημα αντίθετα, θα χρειαστεί μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ για την εύρεση των markers.

Σημαντικό είναι η κάμερα να βρίσκεται εντελώς παράλληλα με το δάκτυλο και όχι σε κλίση για την σωστή εύρεση των συντεταγμένων. Και φυσικά πρέπει να γίνει σωστή βαθμονόμηση που θα περιγραφεί αναλυτικότερα παρακάτω.

5.5.1.5 Φωτισμός

Είναι πολύ σημαντικό φωτισμός στην πειραματική διάταξη να είναι σταθερός ώστε να μην υπάρχουν καθόλου παρεμβολές στην εικόνα της κάμερας και στην αναγνώριση των χαρακτηριστικών markers.

5.5.1.6 Βαθμονόμηση της κάμερας

Για την βαθμονόμηση της κάμερας χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή του Matlab Camera Calibrator η οποία υπολογίζει τις παραμέτρους παραποίησης της εικόνας (distortion) του φακού της κάμερας. Χρησιμοποιώντας αυτή την παράμετρο αφαιρείται η επίδραση της παραμόρφωσης του φακού της κάμερα για την σωστή μέτρηση των συντεταγμένων των δακτύλων.

Για την εφαρμογή της επέκτασης Camera Calibrator του Matlab είναι απαραίτητη η χρήση ενός checkboard pattern [**Εικόνα 5.6 (α)**]. Το pattern που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να μην είναι τετράγωνο καθώς η μια πλευρά θα πρέπει να περιέχει ζυγό αριθμό τετραγώνων και η άλλη περιττό αριθμό τετραγώνων.

Για αυτό τον λόγο το pattern έχει δύο μαύρες γωνίες κατά μήκος της μια πλευράς και δύο άσπρες γωνίες στην απέναντι πλευρά. Αυτή η μορφολογία επιτρέπει στην εφαρμογή να προσδιορίσει τον προσανατολισμό του pattern. Η εφαρμογή ορίζει την μεγαλύτερη πλευρά ως

x άξονα. Επίσης το Matlab παρέχει έτοιμο το checkboard pattern γράφοντας στο command window την εντολή `open checkerboardPattern.pdf`

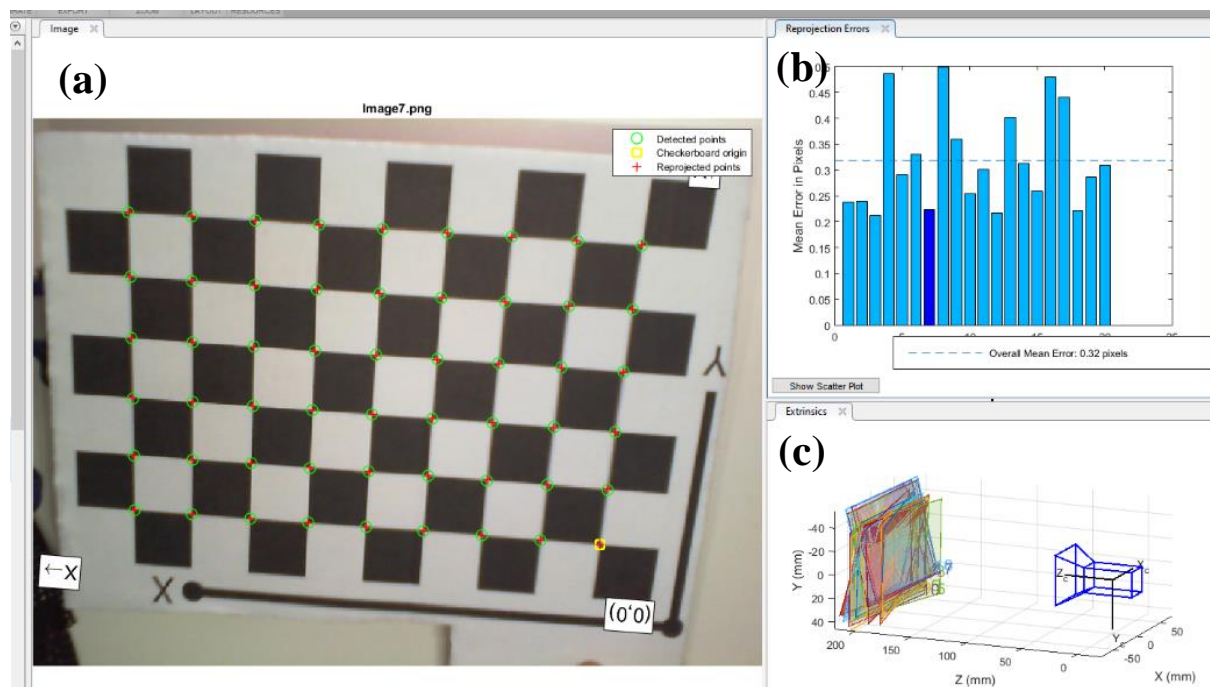
Εφόσον εκτυπωθεί το pattern τοποθετείται σε μια σκληρή επίπεδη επιφάνεια για την αποφυγή ατελειών παραμορφώσεων που μπορεί να επηρεάσουν την ακρίβεια βαθμονόμησης της κάμερας. Κατόπιν γίνεται ακριβής μέτρηση της μιας πλευράς ενός τετραγώνου του pattern, καθώς αυτή η μέτρηση είναι απαραίτητη και πρέπει να εισαχθεί μέσα στο πρόγραμμα.

Η εφαρμογή απαιτεί τουλάχιστον 3 εικόνες, όμως για καλύτερα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν 20 εικόνες με το pattern. Η απόσταση μεταξύ της κάμερας και του pattern στις εικόνες που τραβήχτηκαν από την εφαρμογή, είναι η ίση με την απόσταση που θα τραβάει τις φωτογραφίες για την εύρεση των συντεταγμένων.

Ακόμα ο προσανατολισμός των εικόνων θα πρέπει να είναι διαφορετικός για κάθε εικόνα και με γωνία μικρότερη των 45° , σε σχέση με το επίπεδο της κάμερας. Η παραμόρφωση του φακού αυξάνει ακτινικά από το κέντρο της εικόνας και μερικές φορές δεν είναι ομοιόμορφη σε όλη την κορνίζα της εικόνας, έτσι για να συμπεριληφθεί η παραμόρφωση του φακού, το pattern θα πρέπει να εμφανίζεται και κοντά στις άκρες της εικόνας.

Για να ξεκινήσει η διαδικασία της βαθμονόμησης μπορεί να εισαχθούν στην εφαρμογή εικόνες που έχουν ήδη τραβηχτεί, ή να ληφθούν καινούριες μέσω της εφαρμογής. Αφού επιλεγθούν οι εικόνες και έχει εισαχθεί το μήκος της μιας πλευράς ενός τετραγώνου του pattern, η εφαρμογή επιχειρεί να ανιχνεύσει το pattern σε κάθε μία από τις εικόνες.

Σε κάθε εικόνα εμφανίζονται με πράσινους κύκλους οι ανιχνευμένες γωνίες του pattern, με κίτρινο τετράγωνο υποδεικνύεται το σημείο $(0,0)$, και τα βέλη x, y που υποδηλώνουν τον προσανατολισμό των αξόνων του pattern [**Εικόνα 5.6 (α)**].



Εικόνα 5.6: Η εφαρμογή επέκτασης του Matlab Camera Calibrator, (a) φωτογραφία του checkerboard pattern με τις ανιχνευμένες γωνίες, (b) τα reprojection errors της κάμερας, (c) απεικόνιση με camera-centric view τις θέσεις του pattern.

Στη συνέχεια αφού έχει εκτελεσθεί η εντολή Calibrate μπορεί πλέον ο χρήστης να ελέγξει την ακρίβεια της βαθμονόμησης εξετάζοντας τα reprojection errors, τα extrinsics της κάμερας, ή ελέγχοντας την undistorted εικόνα. Για βέλτιστα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται και οι τρεις μέθοδοι αξιολόγησης. Τα reprojection errors είναι οι αποστάσεις σε pixel μεταξύ των detected και των reprojected points.

Η εφαρμογή Camera Calibrator υπολογίζει τα reprojection errors προβάλλοντας τα σημεία του pattern από το σύστημα συντεταγμένων του κόσμου που ορίζονται από το pattern, στις συντεταγμένες τις εικόνας. Σαν γενικός κανόνας reprojection errors μικρότερα του ενός pixel είναι αποδεχτά.

Στην **Εικόνα 5.6 (b)** απεικονίζονται τα μέση reprojection errors ανά εικόνα, μαζί με το συνολικό μέσο σφάλμα. Ενώ στην **Εικόνα 5.6 (c)** απεικονίζονται τα extrinsic parameters όπου παρέχουν μια camera-centric view του κάθε pattern. Η camera-centric view είναι χρήσιμη στη περίπτωση που η κάμερα είναι στατική. Με αυτό τον τρόπο μπορεί ο χρήστης να ελέγξει αν η κάμερα του είναι σωστά βαθμονομημένη. Για παράδειγμα, ένα pattern που εμφανίζεται πίσω από τη κάμερα υποδεικνύει σφάλμα βαθμονόμησης.

Ο έλεγχος των undistorted εικόνων είναι απαραίτητος ακόμα και αν τα reprojection errors είναι χαμηλά. Εάν το pattern καλύπτει μόνο ένα μικρό ποσοστό της εικόνας η εκτίμηση της παραμόρφωσης μπορεί να είναι λανθασμένη παρόλο που η βαθμονόμηση μπορεί να είχε ως αποτέλεσμα λίγα reprojection errors.

Τέλος, αφού γίνουν όλα τα παραπάνω ο χρήστης μπορεί να εξάγει τα δεδομένα όπου δημιουργήθηκαν από την εφαρμογή ως ένα struct με την ονομασία **cameraParameters** στο

workspace του Matlab. Το αντικείμενο περιέχει τις παραμέτρους intrinsic και extrinsic τις κάμερας, καθώς επίσης, και τους συντελεστές παραμόρφωσης.

Παρατηρείτε ότι εξαιτίας της μικρής απόστασης που βρίσκεται η κάμερα σε σχέση με την φωτογραφία που λαμβάνει, ο μέσος όρος του reprojection error είναι πάρα πολύ μικρός σχεδόν αμελητέος. Επομένως δεν είναι αναγκαία η βαθμονόμηση της κάμερας για τόσο μικρή απόσταση αν και πραγματοποιήθηκε.

5.5.1.7 Πρόγραμμα Matlab

Ο έλεγχος όλης της πειραματικής διάταξης πραγματοποιείται εξολοκλήρου μέσα από το λογισμικό του Matlab. Το λογισμικό στέλνει μέσω της σειριακής επικοινωνίας την κατάλληλη εντολή στον σερβοελεγκτή ώστε εκείνος να κινηθεί στην επιθυμητή μετατόπιση. Καθυστερεί ένα μικρό χρονικό διάστημα ώστε να βεβαιωθούμε ότι ο επενεργητής έχει μεταβεί στην κατάλληλη θέση. Έπειτα τραβάει φωτογραφία μέσα από το πρόγραμμα και την επεξεργάζεται στο λογισμικό.

Την πρώτη εικόνα που τραβάει, θέτει στην πρώτη άρθρωση την αρχή των αξόνων. Και εφόσον υπολογίσει την απόσταση του κάθε pixel εξάγει τις συντεταγμένες για κάθε άρθρωση. Στην λήψη κάθε φωτογραφίας οι εικόνες με τα σημεία που έχουν βρεθεί, εμφανίζονται στην οθόνη για να εκτελεί ο χρήστης οπτικό έλεγχο.

Στην συνέχεια εφόσον ολοκληρωθούν όλες οι μετατοπίσεις και ληφθούν όλες οι συντεταγμένες για τα σημεία λύνονται οι εξισώσεις για την εύρεση των γωνιών των αρθρώσεων. Εφόσον ολοκληρωθεί το πείραμα εξάγονται οι γραφικές παραστάσεις με τις κινηματικές εξισώσεις.

5.6 Περιγραφή των πειραμάτων

Όλα τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν από τρεις επαναλήψεις το καθένα. Για τις εξισώσεις κίνησης έχει γίνει η προσπάθεια προσέγγισης των κινήσεων με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι με ευθείες όπου είναι πολύ σημαντικό να επιτευχθεί αυτή η προσέγγιση, διότι οι πράξεις που θα απαιτούνται για τον υπολογισμό της γωνίας, θα είναι πολύ λιγότερες σε σχέση με μια άλλη προσέγγιση.

Ο χρόνος που απαιτείται για να πραγματοποιηθούν αυτές οι πράξεις παίζει σημαντικό ρόλο, εφόσον οι εξισώσεις θα λύνονται μέσα σε μικροελεγκτές, που δεν διαθέτουν τεράστια υπολογιστική ικανότητα. Εάν απαιτείται μεγαλύτερη υπολογιστική ικανότητα συνεπάγεται ότι ανεβαίνει και το κόστος.

Ο δεύτερος τρόπος προσέγγισης γίνεται με πολυώνυμο τρίτου βαθμού, για να επιτευχθεί μεγαλύτερη προσέγγιση στην πραγματική θέση, όμως χρειάζεται και μεγαλύτερη υπολογιστική ικανότητα. Δεν επιλέχθηκε προσέγγιση με πολυώνυμου μεγαλύτερου βαθμού, γιατί θα ήταν ανούσια.

Διότι όσο ακριβής και αν είναι η εξίσωση κίνησης, δεν θα καταφέρει ποτέ να περιγράψει πλήρως την κίνηση των δακτύλων, λόγου του ότι η άρθρωση δεν είναι σταθερή. Για αυτό τον λόγο έγινε και η παραδοχή που θεωρούμε την άρθρωση σταθερή, για να καταφέρουμε να το μελετήσουμε με περισσότερη ευκολία.

5.7 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων

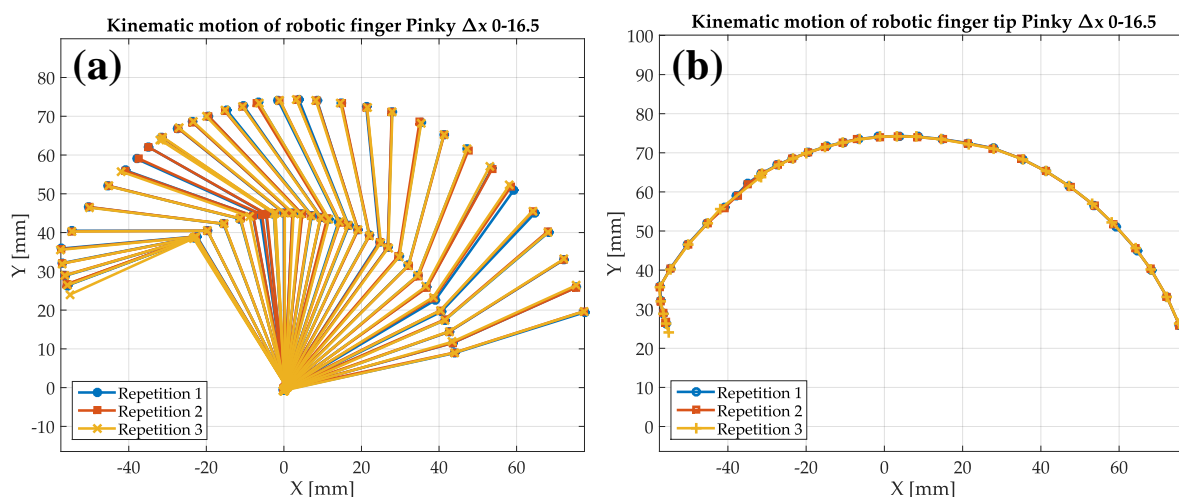
Αυτό που θα παρατηρήσουμε σε όλα τα πειράματα είναι ότι οι αρθρώσεις δεν ξεκινάνε από το μηδέν, αλλά έχουν ένα αρχικό offset. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα ελατήρια έχουν παραμορφωθεί με την χρήση τους και έχουν αποκτήσει αυτό το offset.

Στα δάκτυλα που φέρουν μόνο δύο αρθρώσεις παρατηρήθηκε ότι η πρώτη άρθρωση q_1 κλείδωνε, διότι έφτανε στο μέγιστο όριο περιστροφής της. Ενώ τα δάκτυλα με τρεις αρθρώσεις καθ' όλη την κίνηση τους εμφάνιζαν γραμμική συμπεριφορά, και καμία άρθρωση τους δεν κλείδωνε.

Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στο γεγονός, ότι η κάθε άρθρωση έχει μέγιστο όριο περιστροφής και κάθε δάκτυλο ένα μέγιστο όριο στροφής προσανατολισμού. Εφόσον τα δάκτυλα με τις τρεις αρθρώσεις διαθέτουν μια παραπάνω άρθρωση από τα υπόλοιπα είναι λογικό αυτό το αποτέλεσμα. Σε όλα τα πειράματα η επαναληψιμότητα ήταν αρκετά καλή εφόσον και οι τρεις επαναλήψεις ταυτίζονταν σε μεγάλο βαθμό.

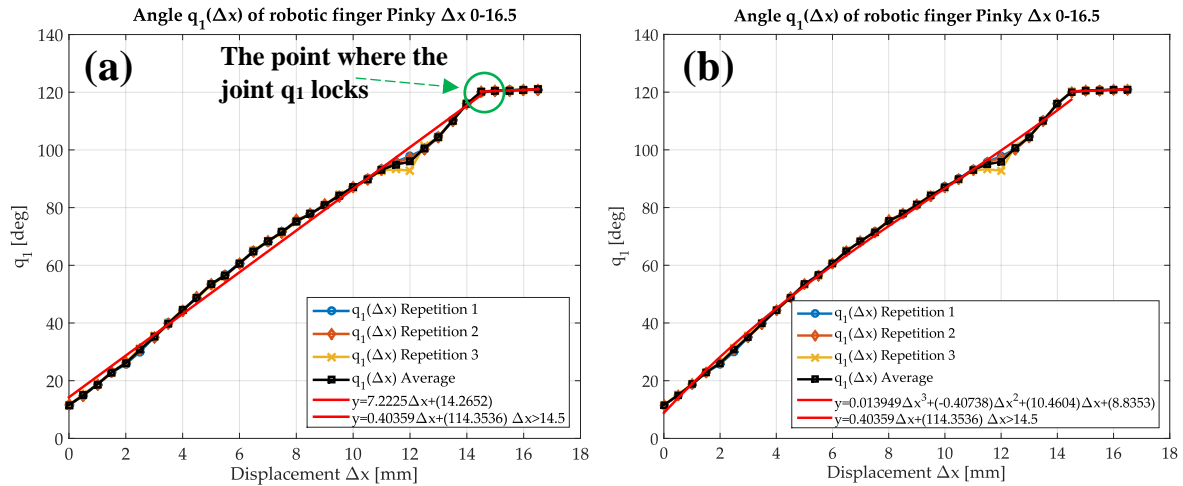
5.7.1 Ρομποτικό δάκτυλο Pinky (Μικρό)

Το πρώτο δάκτυλο που μελετήθηκε είναι το μικρό δάκτυλο του ρομποτικού χεριού. Παρατηρείται ότι η κίνηση του δακτύλου εμφανίζεται συνεχής και γραμμική μέχρι και για μετατόπιση $\Delta x \leq 14.5$ mm [Γραφική Παράσταση 5.2]. Έπειτα εμφανίζεται μια διαταραχή στην κίνηση του δακτύλου, αυτό οφείλεται ότι κλειδώνει η πρώτη άρθρωση q_1 για μετατόπιση μεγαλύτερη του $\Delta x > 14.5$ mm. Αυτή η αλλαγή παρατηρείται και καταγράφεται καλύτερα στις επόμενες γραφικές παραστάσεις.



Γραφική Παράσταση 5.2: Γραφικές παραστάσεις κίνησης του μικρού για μετατόπιση Δx , (a) κινηματική όλου του δακτύλου καθώς περιστρέφεται, (b) κινηματική μόνου του άκρου του δακτύλου καθώς περιστρέφεται.

Παρατηρούμε ότι με βάση την Γραφική Παράσταση 5.2 η επαναληψιμότητα των πειραμάτων είναι αρκετά καλή καθώς οι τρεις επαναλήψεις ταυτίζονται σε μεγάλο ποσοστό. Στην Γραφική Παράσταση 5.2 (a) παρατηρείται η κίνηση που εκτελεί το δάκτυλο για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 16.5$ mm. Ενώ στην Γραφική Παράσταση 5.2 (b) παρατηρείται καλύτερα η κίνηση που εκτελεί το άκρο του δακτύλου (fingertip) για παρόμοια μετατόπιση.



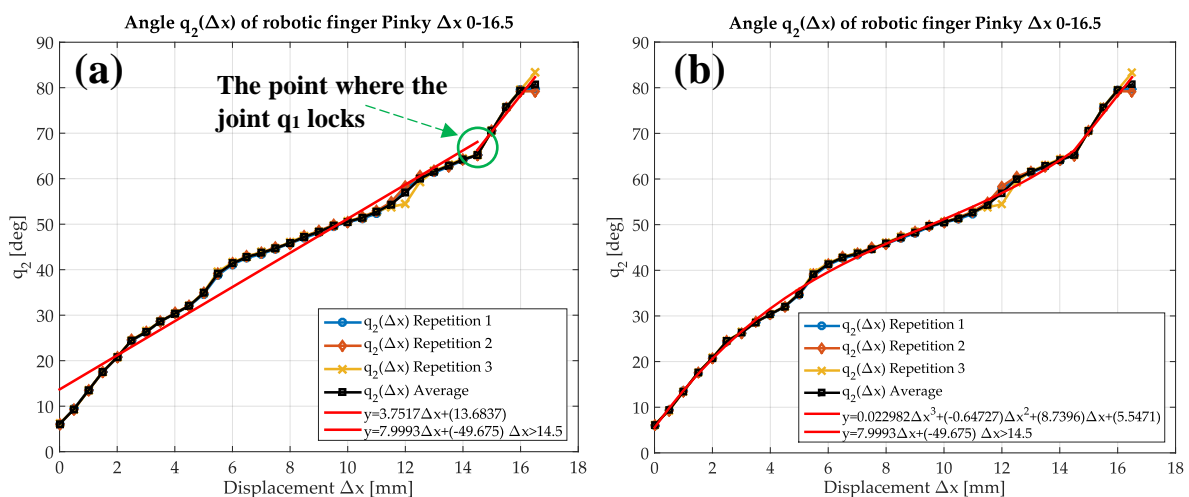
Γραφική Παράσταση 5.3: Γραφικές παραστάσεις άρθρωσης MCP σε συνάρτηση με την μετατόπιση Δx για τον μικρό, (α) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με ευθεία, (β) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με πολυώνυμο τρίτου βαθμού.

Παρατηρούμε ότι στην Γραφική Παράσταση 5.3 (α) υπάρχει μια γραμμική σχέση που συνδέει το q_1 με το Δx για $0 \leq \Delta x \leq 14.5$ η εξίσωση (5.13). Για μετατόπιση $\Delta x > 14.5$ παρατηρείται ότι η q_1 παραμένει σχεδόν αμετάβλητη. Οπότε δεν υπάρχει λόγος να περιγραφεί με εξίσωση κίνησης και την θεωρούμε ως σταθερή $q_1 = \text{σταθ.}$ για $\Delta x > 14.5$.

$$q_{1L}(\text{Pinky})(\Delta x) = 7.22\Delta x + 14.26 \quad 0 \leq \Delta x \leq 14.5 \quad (5.13)$$

Σύμφωνα με την Γραφική Παράσταση 5.3 (β) εάν επιθυμούμε να προσεγγίσουμε ακόμα καλύτερα την $q_1(\Delta x)$, αυτή μπορεί να περιγραφεί από ένα πολυώνυμο τρίτου βαθμού (5.14).

$$q_{1P}(\text{Pinky})(\Delta x) = 0.01\Delta x^3 - 0.41\Delta x^2 + 10.46\Delta x + 8.8 \quad 0 \leq \Delta x \leq 14.5 \quad (5.14)$$



Γραφική Παράσταση 5.4: Γραφικές παραστάσεις άρθρωσης q_2 (DIP) σε συνάρτηση με την μετατόπιση Δx για τον μικρό, (α) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με ευθεία, (β) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με πολυώνυμο τρίτου βαθμού.

Η εξίσωση που συνδέει την q_2 και το Δx μπορεί να περιγραφεί με δύο εξισώσεις κίνησης. Παρατηρούμε ότι το q_2 εμφανίζει μια γραμμική συμπεριφορά μέχρι να κλειδώσει η πρώτη άρθρωση, από εκεί και πέρα συνεχίζει να έχει μια γραμμική συμπεριφορά αλλά με διαφορετική κλίση. Η πρώτη εξίσωση κίνησης για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 14.5$ είναι η (5.15) ενώ η δεύτερη εξίσωση κίνησης για μετατόπιση $14.5 < \Delta x \leq 16.5$ είναι η (5.16) [Γραφική Παράσταση 5.4 (a)].

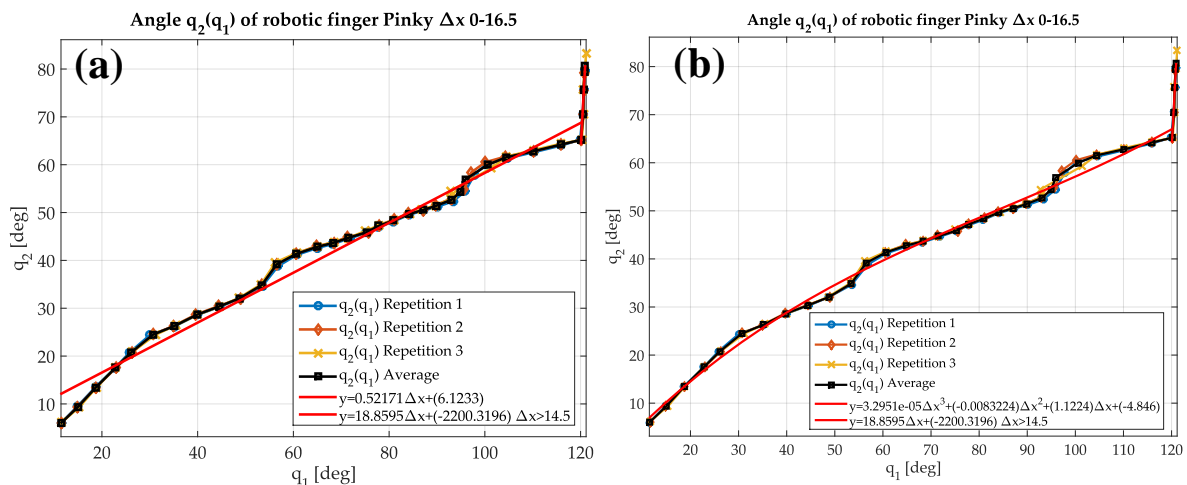
$$q_{2L(Pinky)}(\Delta x) = 3.75\Delta x + 13.68 \quad 0 \leq \Delta x \leq 14.5 \quad (5.15)$$

$$q_{2L(Pinky)}(\Delta x) = 8\Delta x - 49.68 \quad 14.5 < \Delta x \leq 16.5 \quad (5.16)$$

Επίσης η $q_2(\Delta x)$ μπορεί να προσεγγιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια και να εκφραστεί ακόμη καλύτερα με μια πολυωνυμική εξίσωση τρίτου βαθμού. Οπότε για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 14.5$ θα ισχύει η σχέση (5.17). Για μετατόπιση $14.5 < \Delta x \leq 16.5$ είναι γραμμική και ίδια με την (5.16) [Γραφική Παράσταση 5.4 (b)].

$$q_{2P(Pinky)}(\Delta x) = 0.02\Delta x^3 - 0.65\Delta x^2 + 8.74\Delta x + 5.55 \quad 0 \leq \Delta x \leq 14.5 \quad (5.17)$$

Επίσης η εξίσωση κίνησης που συνδέει τις γωνίες μεταξύ τους είναι συνεχής και περίπου γραμμική ισχύει για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 14.5$ και μπορεί να εκφραστεί ως γραμμική (5.18). Για μετατόπιση $14.5 < \Delta x \leq 16.5$ δεν μπορούμε να εξάγουμε σχέση κίνησης μεταξύ των γωνιών αφού η άρθρωση q_1 παραμένει σταθερή και μεταβάλλεται μόνο η q_2 [Γραφική Παράσταση 5.5 (a)].



Γραφική Παράσταση 5.5: Γραφικές παραστάσεις άρθρωσης DIP σε συνάρτηση με την άρθρωση MCP για τον μικρό, (a) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με ευθεία, (b) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με πολυώνυμο τρίτου βαθμού.

$$q_{2L(Pinky)}(q_1) = 0.52q_1 + 6.12 \quad 0 \leq \Delta x \leq 14.5 \quad (5.18)$$

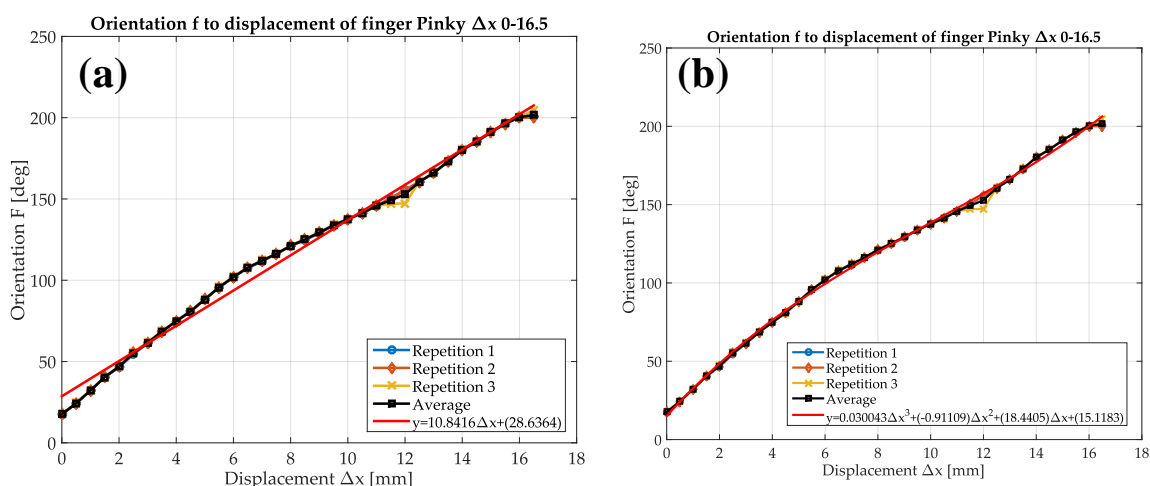
Επίσης η $q_2(q_1)$ γίνεται να προσεγγιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια και να εκφραστεί ακόμη καλύτερα με μια πολυωνυμική εξίσωση δευτέρου βαθμού. Οπότε για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 14.5$ θα ισχύει η σχέση (5.19). Για μετατόπιση $14.5 < \Delta x \leq 16.5$ δεν μπορούμε να εξάγουμε σχέση

κίνησης μεταξύ των γωνιών αφού η άρθρωση q_1 παραμένει σταθερή και μεταβάλλεται μόνο η q_2 [**Γραφική Παράσταση 5.5 (b)**]

$$q_{2P(Pinky)}(q_1) = -0.01q_1^2 + 1.12q_1 - 4.85 \quad 0 \leq \Delta x \leq 14.5 \quad (5.19)$$

Για τι εξισώσεις κίνησης του ολικού προσανατολισμού f ως προς Δx είναι αρκετά γραμμικές και συνεχείς καθώς επίσης μπορούν να εκφραστούν ενιαία για όλη τη μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 16.5$. Επομένως η γραμμική εξίσωση κίνησης θα είναι η (5.20) [**Γραφική Παράσταση 5.6 (a)**].

$$f_{L(Pinky)}(\Delta x) = 10.84\Delta x + 28.63 \quad 0 \leq \Delta x \leq 16.5 \quad (5.20)$$



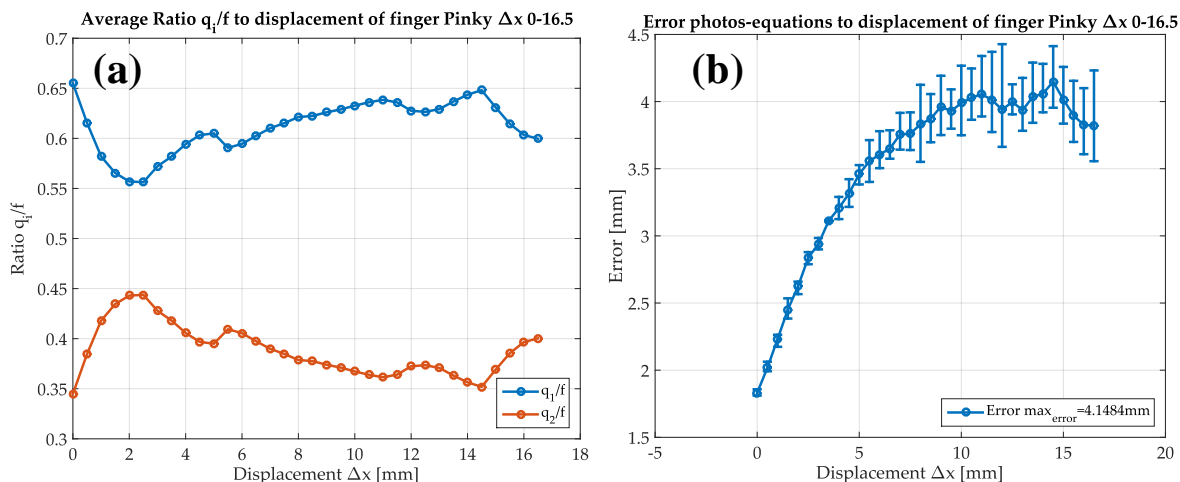
Γραφική Παράσταση 5.6: Γραφικές παραστάσεις προσανατολισμού f συνάρτηση με την μετατόπιση Δx για τον μικρό, (a) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με ευθεία, (b) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με πολυώνυμο τρίτου βαθμού.

Επίσης η $f(\Delta x)$ γίνεται να προσεγγιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια και να εκφραστεί ακόμη καλύτερα με μια πολυωνυμική εξίσωση τρίτου βαθμού. Οπότε για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 16.5$ θα ισχύει η σχέση (5.21) [**Γραφική Παράσταση 5.6 (b)**].

$$f_{L(Pinky)}(\Delta x) = 0.03\Delta x^3 - 0.91\Delta x^2 + 18.4\Delta x + 15.12 \quad 0 \leq \Delta x \leq 16.5 \quad (5.21)$$

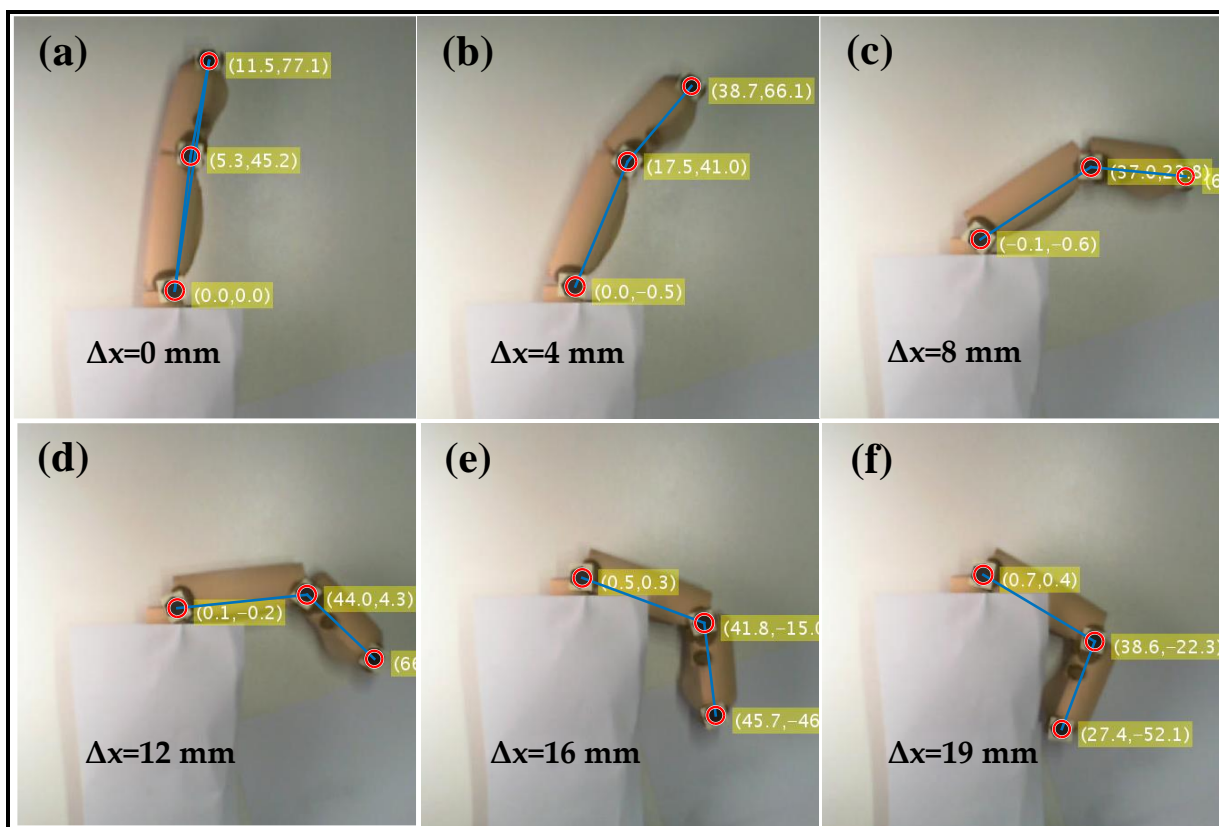
Επίσης διακρίνουμε στην **Γραφική Παράσταση 5.7 (a)** η άρθρωση q_1 μεταβάλλει περισσότερο το προσανατολισμό του δακτύλου σε σχέση με την q_2 .

Σύμφωνα με την **Γραφική Παράσταση 5.7 (b)** παρουσιάζεται ένα γραμμικό σφάλμα ανάλογο της μετατόπισης με μέγιστο 4.2 mm. Εφόσον το μήκος του δακτύλου είναι 80 mm. Ότι το ποσοστό του σφάλματος στην ακρίβεια των μετρήσεων συσχετισμού των κινηματικών εξισώσεων είναι το μέγιστο σφάλμα ως προς την μετατόπιση. Δηλαδή έχουμε ένα **σφάλμα στην ακρίβεια κινηματικών εξισώσεων της τάξης του 5,3%**.



Γραφική Παράσταση 5.7: Γραφικές παραστάσεις για τον μικρό, (a) ποσοστό επίδρασης της κάθε άρθρωσης ως προς τον προσανατολισμό f σε συνάρτηση της μετατόπισης Δx , (b) σφάλμα απόστασης του άκρου του δακτύλου από τις συντεταγμένες των φωτογραφιών ως προς την επίλυση του ευθύ κινηματικού.

Στην **Εικόνα 5.7** διακρίνονται οι εικόνες μέσα από το λογισμικό Matlab για διάφορες μετατοπίσεις του ρομποτικού δακτύλου με τον εντοπισμό των αρθρώσεων και την σύνδεση των φαλάγγων για την εύρεση των γωνιών.

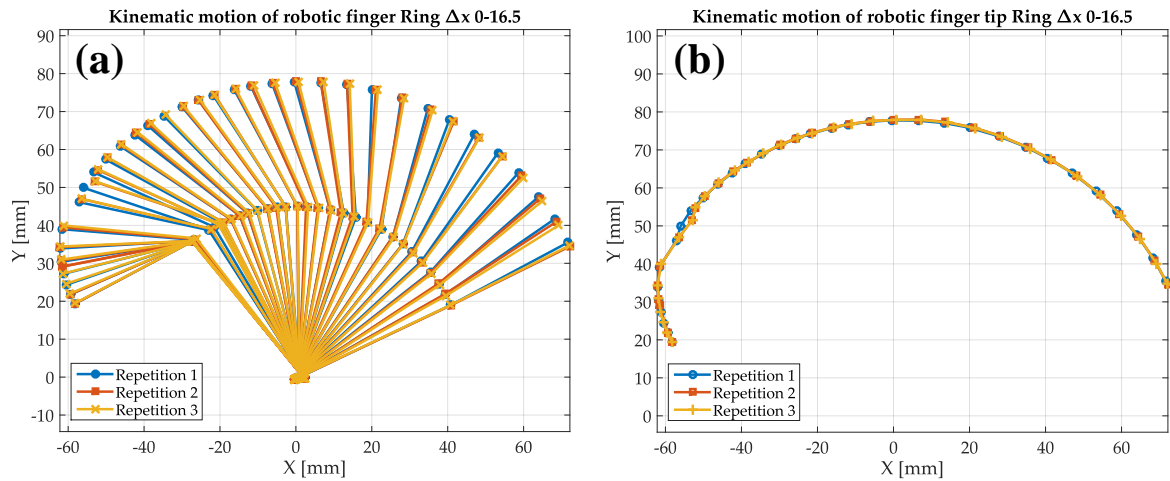


Εικόνα 5.7: Κίνηση του ρομποτικού δακτύλου Μικρού για μετατοπίσεις Δx και καταγραφή των θέσεων των αρθρώσεων μέσα από το πρόγραμμα Matlab, (a) για $\Delta x = 0$ mm, (b) για $\Delta x = 4$ mm, (c) για $\Delta x = 8$ mm, (d) για $\Delta x = 12$ mm, (e) για $\Delta x = 16$ mm, (f) για $\Delta x = 19$ mm.

5.7.2 Ρομποτικό δάκτυλο Ring (Παράμεσος)

Παρατηρούμε ότι με βάση την **Γραφική Παράσταση 5.8** η επαναληψιμότητα των πειραμάτων είναι αρκετά καλή καθώς οι τρεις επαναλήψεις ταυτίζονται σε μεγάλο ποσοστό. Στην **Γραφική**

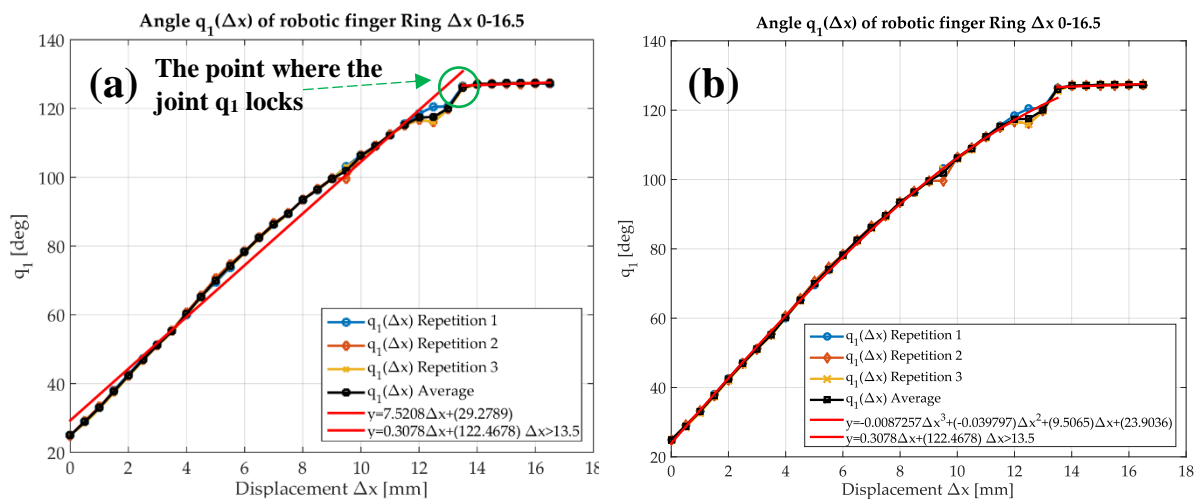
Παράσταση 5.8 (a) παρατηρείται η κίνηση που εκτελεί το δάκτυλο για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 16.5$ mm. Ενώ στην **Γραφική Παράσταση 5.8 (b)** παρατηρείται καλύτερα η κίνηση που εκτελεί το άκρο του δακτύλου (fingertip) για παρόμοια μετατόπιση.



Γραφική Παράσταση 5.8: Γραφικές παραστάσεις κίνησης του παράμεσου για μετατόπιση Δx , (a) κινηματική όλου του δακτύλου καθώς περιστρέφεται, (b) κινηματική μόνου του άκρου του δακτύλου καθώς περιστρέφεται.

Παρατηρούμε ότι στην **Γραφική Παράσταση 5.9 (a)** υπάρχει μια γραμμική σχέση που συνδέει το q_1 και το Δx για $0 \leq \Delta x \leq 13.5$ η εξίσωση (5.22). Για μετατόπιση $\Delta x > 13.5$ παρατηρείται ότι η q_1 παραμένει σχεδόν αμετάβλητη. Οπότε δεν υπάρχει λόγος να περιγραφεί με εξίσωση κίνησης και την θεωρούμε ως σταθερή $q_1 = \text{σταθ.}$ για $\Delta x > 13.5$.

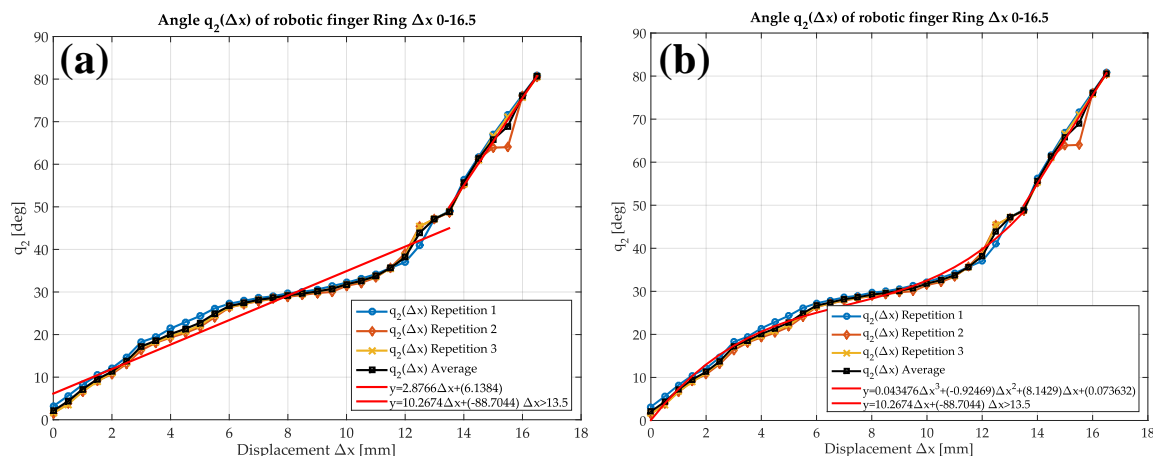
$$q_{1L(Ring)}(\Delta x) = 7.52\Delta x + 29.27 \quad 0 \leq \Delta x \leq 13.5 \quad (5.22)$$



Γραφική Παράσταση 5.9: Γραφικές παραστάσεις άρθρωσης MCP σε συνάρτηση με την μετατόπιση Δx για τον παράμεσο, (a) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με ευθεία, (b) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με πολυώνυμο τρίτου βαθμού.

Σύμφωνα με την **Γραφική Παράσταση 5.9 (b)** εάν επιθυμούμε να προσεγγίσουμε ακόμα καλύτερα την γραφική παράσταση μπορεί να περιγραφεί από ένα πολυώνυμο τρίτου βαθμού (5.23).

$$q_{1P(Ring)}(\Delta x) = 0.31\Delta x^3 - 0.04\Delta x^2 + 9.51\Delta x + 23.9 \quad 0 \leq \Delta x \leq 13.5 \quad (5.23)$$



Γραφική Παράσταση 5.10: Γραφικές παραστάσεις άρθρωσης DIP σε συνάρτηση με την μετατόπιση Δx για τον παράμεσο, (α) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με ευθεία, (β) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με πολυώνυμο τρίτου βαθμού.

Η εξίσωση που συνδέει την q_2 και το Δx μπορεί να περιγραφεί με δύο εξισώσεις κίνησης. Παρατηρούμε ότι το q_2 εμφανίζει μια γραμμική συμπεριφορά μέχρι να κλειδώσει η πρώτη άρθρωση από εκεί και πέρα συνεχίζει να έχει μια γραμμική συμπεριφορά αλλά με διαφορετική κλίση. Η πρώτη εξίσωση κίνησης για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 13.5$ είναι η (5.24) ενώ η δεύτερη εξίσωση κίνησης για μετατόπιση $13.5 < \Delta x \leq 16.5$ είναι η (5.25) [Γραφική Παράσταση 5.10 (α)].

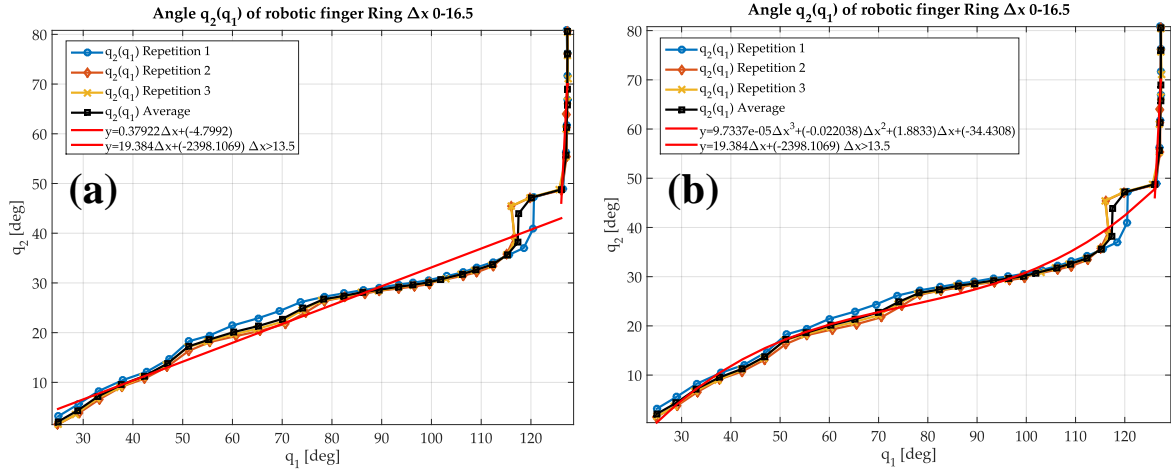
$$q_{2L(Ring)}(\Delta x) = 2.88\Delta x + 6.13 \quad 0 \leq \Delta x \leq 13.5 \quad (5.24)$$

$$q_{2L(Ring)}(\Delta x) = 10.27\Delta x - 88.7 \quad 13.5 < \Delta x \leq 16.5 \quad (5.25)$$

Επίσης η $q_2(\Delta x)$ για να προσεγγιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια και να εκφραστεί ακόμη καλύτερα με μια πολυωνμική εξίσωση τρίτου βαθμού. Οπότε για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 13.5$ θα ισχύει η σχέση (5.26). Για μετατόπιση $13.5 < \Delta x \leq 16.5$ είναι γραμμική και ίδια με την (5.25) [Γραφική Παράσταση 5.10 (β)].

$$q_{2P(Ring)}(\Delta x) = 0.04\Delta x^3 - 0.92\Delta x^2 + 8.14\Delta x + 0.07 \quad 0 \leq \Delta x \leq 13.5 \quad (5.26)$$

Επίσης η εξίσωση κίνησης που συνδέει τις γωνίες μεταξύ τους είναι συνεχής και περίπου γραμμική ισχύει για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 13.5$ και μπορεί να εκφραστεί ως γραμμική (6.27). Για μετατόπιση $13.5 < \Delta x \leq 16.5$ δεν μπορούμε να εξάγουμε σχέση κίνησης μεταξύ των γωνιών αφού η άρθρωση q_1 παραμένει σταθερή και μεταβάλλεται μόνο η q_2 [Γραφική Παράσταση 5.11 (α)].

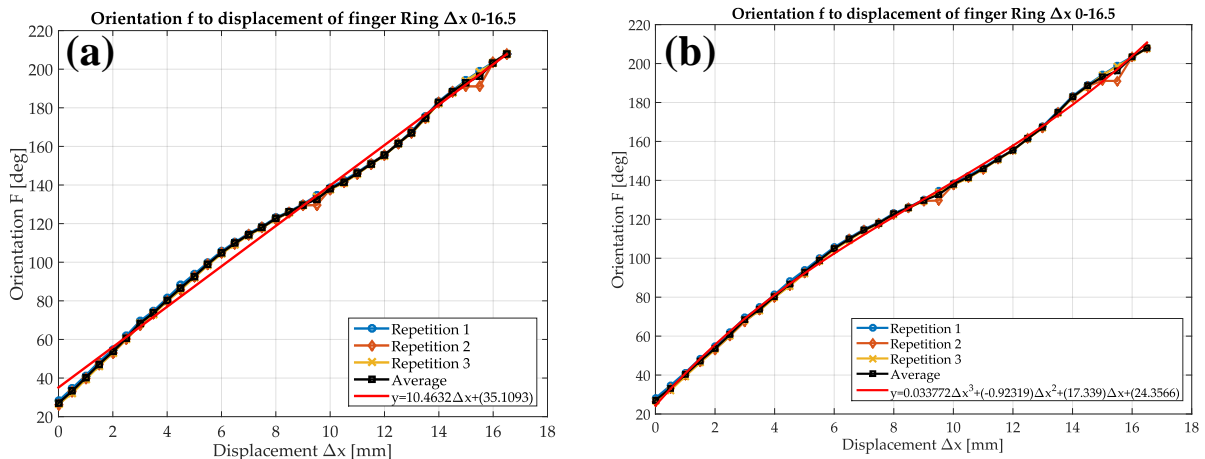


Γραφική Παράσταση 5.11: Γραφικές παραστάσεις άρθρωσης DIP σε συνάρτηση με την άρθρωση MCP για τον παράμεσο, (α) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με ευθεία, (β) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με πολυώνυμο τρίτου βαθμού.

$$q_{2L(Ring)}(q_1) = 0.39q_1 - 4,8 \quad 0 \leq \Delta x \leq 13,5 \quad (5.27)$$

Επίσης η $q_2(q_1)$ γίνεται να προσεγγιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια και να εκφραστεί ακόμη καλύτερα με μια πολυωνυμική εξίσωση τρίτου βαθμού. Οπότε για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 13.5$ θα ισχύει η σχέση (5.28). Για μετατόπιση $13.5 < \Delta x \leq 16.5$ δεν μπορούμε να εξάγουμε σχέση κίνησης μεταξύ των γωνιών αφού η άρθρωση q_1 παραμένει σταθερή και μεταβάλλεται μόνο η q_2 [Γραφική Παράσταση 5.11 (b)]

$$q_{2P(Pinky)}(q_1) = 9.73q_1^3 - 0.02q_1^2 + 1.88q_1 - 34.33 \quad 0 \leq \Delta x \leq 13.5 \quad (5.28)$$



Γραφική Παράσταση 5.12: Γραφικές παραστάσεις προσανατολισμού f συνάρτηση με την μετατόπιση Δx για τον παράμεσο, (α) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με ευθεία, (β) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με πολυώνυμο τρίτου βαθμού.

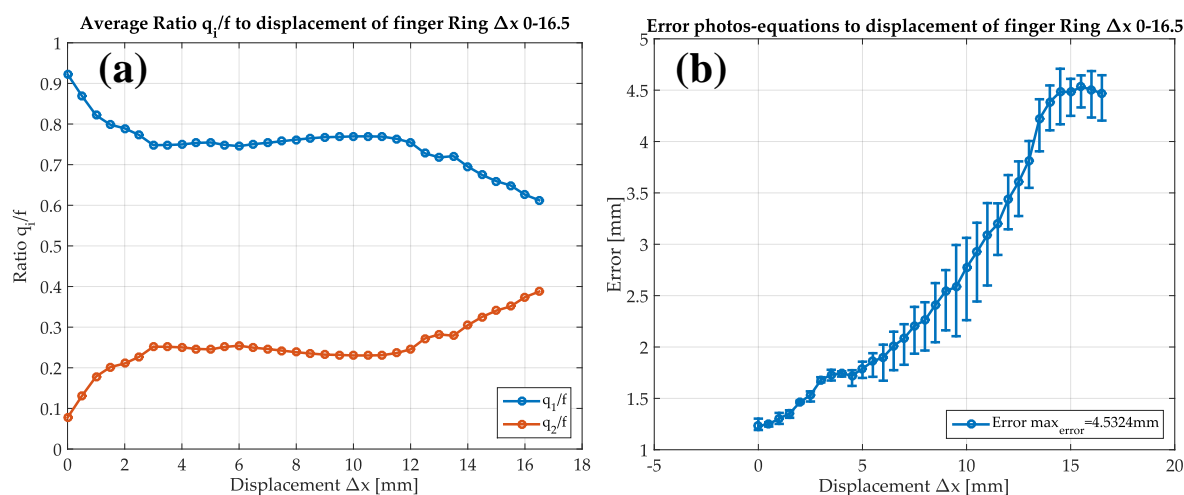
Για τις εξισώσεις κίνησης του ολικού προσανατολισμού f ως προς Δx είναι αρκετά γραμμικές και συνεχείς καθώς επίσης μπορούν να εκφραστούν ενιαία για όλη τη μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 16.5$. Επομένως η γραμμική εξίσωση κίνησης θα είναι η (5.29) [Γραφική Παράσταση 5.12 (a)].

$$f_{L(Ring)}(\Delta x) = 10.46\Delta x + 35.11 \quad 0 \leq \Delta x \leq 16.5 \quad (5.29)$$

Επίσης η $f(\Delta x)$ γίνεται να προσεγγιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια και να εκφραστεί ακόμη καλύτερα με μια πολυωνυμική εξίσωση τρίτου βαθμού. Οπότε για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 16.5$ θα ισχύει η σχέση (5.30) [Γραφική Παράσταση 5.12 (b)].

$$f_{L(Ring)}(\Delta x) = 0.03\Delta x^3 - 0.92\Delta x^2 + 17.34\Delta x + 24.36 \quad 0 \leq \Delta \leq 16.5 \quad (5.30)$$

Επίσης διακρίνουμε στην Γραφική Παράσταση 5.13 (a) η άρθρωση q_1 μεταβάλλει περισσότερο το προσανατολισμό του δακτύλου σε σχέση με την q_2 .

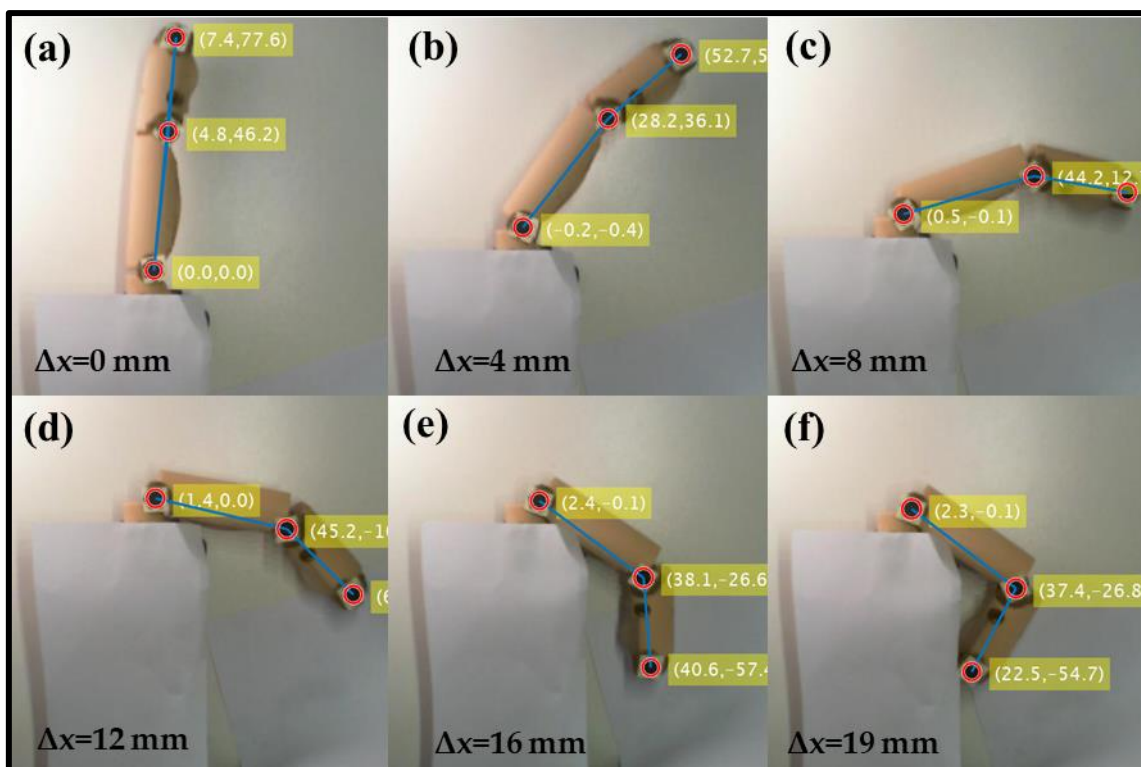


Γραφική Παράσταση 5.13: Γραφικές παραστάσεις για τον παράμεσο, (a) ποσοστό επίδρασης της κάθε άρθρωσης ως προς τον προσανατολισμό f σε συνάρτηση της μετατόπισης Δx , (b) σφάλμα απόστασης του άκρου του δακτύλου από τις συντεταγμένες των φωτογραφίες ως προς την επίλυση του ευθύ κινηματικού.

Σύμφωνα με την Γραφική Παράσταση 5.13 (b) παρουσιάζεται ένα γραμμικό σφάλμα ανάλογο της μετατόπισης με μέγιστο 4.5 mm. Εφόσον το μήκος του δακτύλου είναι 80 mm. Ότι το ποσοστό του σφάλματος στην ακρίβεια των μετρήσεων συσχέτισμού των κινηματικών εξισώσεων είναι το μέγιστο σφάλμα ως προς την μετατόπιση.

Δηλαδή έχουμε ένα **σφάλμα στην ακρίβεια κινηματικών εξισώσεων** της τάξης του **5,6%**.

Στην **Εικόνα 5.8** διακρίνονται οι εικόνες μέσα από το λογισμικό Matlab για διάφορες μετατοπίσεις του ρομποτικού δακτύλου με τον εντοπισμό των αρθρώσεων και την σύνδεση των φαλάγγων για την εύρεση των γωνιών.

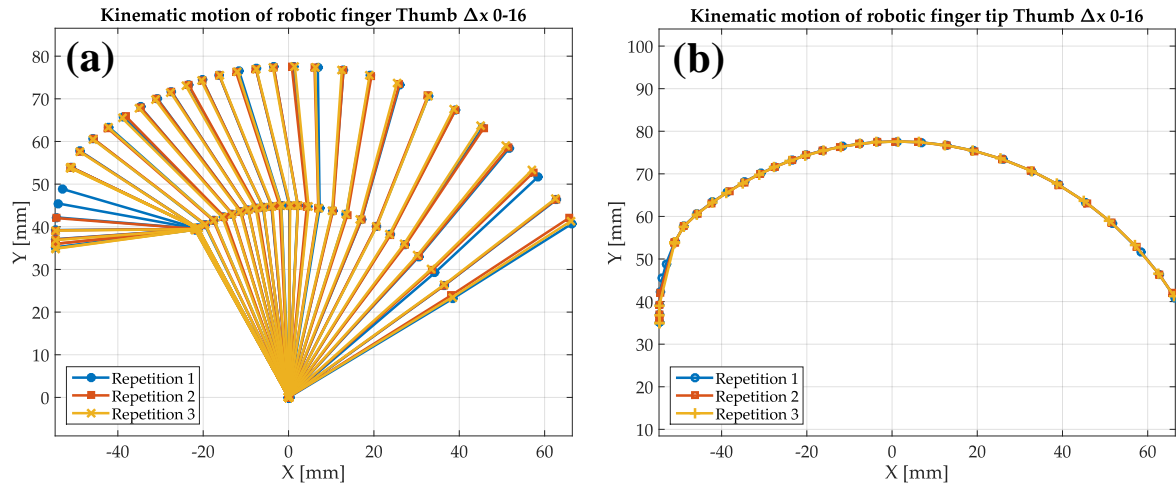


Εικόνα 5.8: Κίνηση του ρομποτικού δακτύλου Παράμεσον για μετατοπίσεις Δx και καταγραφή των θέσεων των αρθρώσεων μέσα από το πρόγραμμα Matlab, (a) για $\Delta x=0$ mm, (b) για $\Delta x=4$ mm, (c) για $\Delta x=8$ mm, (d) για $\Delta x=12$ mm, (e) για $\Delta x=16$ mm, (f) για $\Delta x=19$ mm.

5.7.3 Ρομποτικό δάκτυλο Thumb (Αντίχειρα)

Παρατηρούμε ότι με βάση την **Γραφική Παράσταση 5.14** η επαναληψιμότητα των πειραμάτων είναι αρκετά καλή καθώς οι τρεις επαναλήψεις ταυτίζονται σε μεγάλο ποσοστό. Στην **Γραφική Παράσταση 5.14 (a)** παρατηρείται η κίνηση που εκτελεί το δάκτυλο για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 16$ mm.

Ενώ στην **Γραφική Παράσταση 5.14 (b)** παρατηρείται καλύτερα η κίνηση που εκτελεί το άκρο του δακτύλου (fingertip) για παρόμοια μετατόπιση. Όμως παρατηρείται μια διαφορά στις επαναλήψεις για $12.5 \leq \Delta x \leq 16$ mm λόγω της μικρής διαφοράς στο σημείο που κλειδώνει η q_1 .



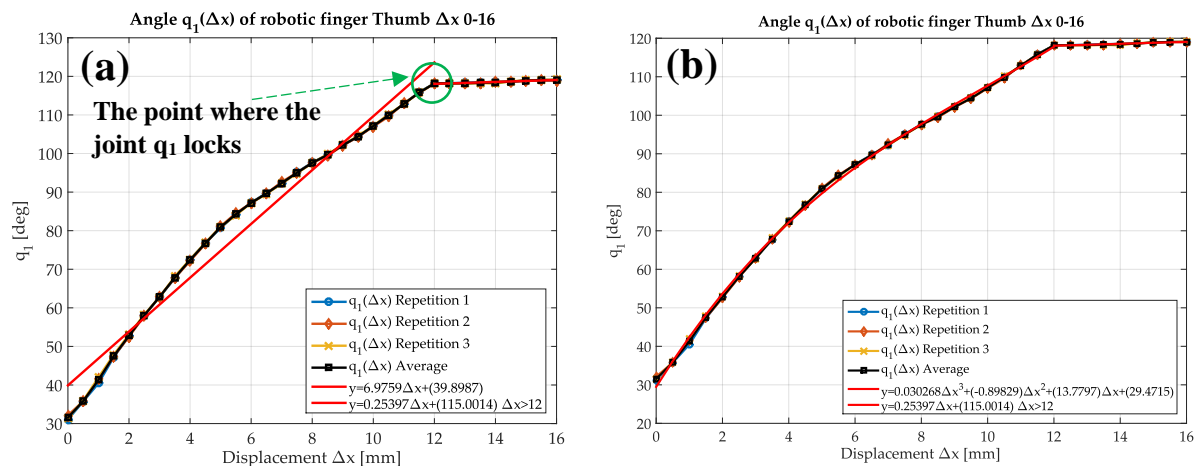
Γραφική Παράσταση 5.14: Γραφικές παραστάσεις κίνησης του αντίχειρα για μετατόπιση Δx , (α) κινηματική όλου του δακτύλου καθώς περιστρέφεται, (β) κινηματική μόνου του άκρου του δακτύλου καθώς περιστρέφεται.

Παρατηρούμε ότι στην **Γραφική Παράσταση 5.15 (α)** υπάρχει μια γραμμική σχέση που συνδέει το q_1 και το Δx για $0 \leq \Delta x \leq 12$ η εξίσωση (5.31). Για μετατόπιση $\Delta x > 12$ παρατηρείται ότι η q_1 παραμένει σχεδόν αμετάβλητη. Οπότε δεν υπάρχει λόγος να περιγραφεί με εξίσωση κίνησης και την θεωρούμε ως σταθερή $q_1 = \text{σταθ. για } \Delta x > 12$.

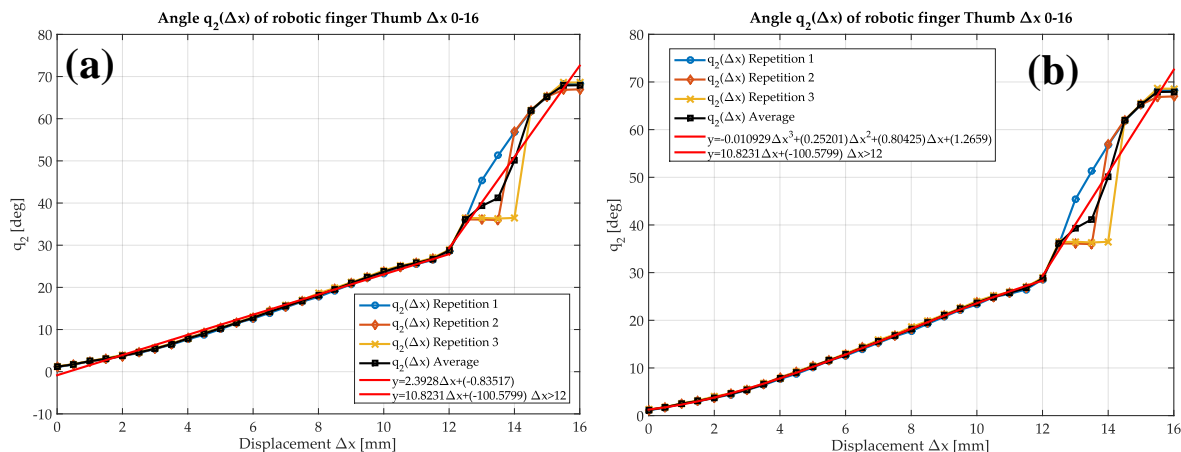
$$q_{1L(Thumb)}(\Delta x) = 6.98\Delta x + 39.9 \quad 0 \leq \Delta x \leq 12 \quad (5.31)$$

Σύμφωνα με την **Γραφική Παράσταση 5.15 (β)** εάν επιθυμούμε να προσεγγίσουμε ακόμα καλύτερα την γραφική παράσταση μπορεί να περιγραφεί από ένα πολυώνυμο τρίτου βαθμού (5.32).

$$q_{1P(Thumb)}(\Delta x) = 0.034\Delta x^3 - 0.94\Delta x^2 + 13.78\Delta x + 29.47 \quad 0 \leq \Delta x \leq 12 \quad (5.32)$$



Γραφική Παράσταση 5.15: Γραφικές παραστάσεις άρθρωσης MCP σε συνάρτηση με την μετατόπιση Δx για τον αντίχειρα, (α) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με ευθεία, (β) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με πολυώνυμο τρίτου βαθμού.



Γραφική Παράσταση 5.16: Γραφικές παραστάσεις άρθρωσης DIP σε συνάρτηση με την μετατόπιση Δx για τον αντίχειρα, (α) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με ευθεία, (β) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με πολυώνυμο τρίτου βαθμού.

Η εξίσωση που συνδέει την q_2 και το Δx μπορεί να περιγραφεί με δύο εξισώσεις κίνησης. Παρατηρούμε ότι το q_2 εμφανίζει μια γραμμική συμπεριφορά μέχρι να κλειδώσει η πρώτη άρθρωση από εκεί και πέρα συνεχίζει να έχει μια γραμμική συμπεριφορά αλλά με διαφορετική κλίση. Η πρώτη εξίσωση κίνησης για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 12$ είναι η (5.33) ενώ η δεύτερη εξίσωση κίνησης για μετατόπιση $12 < \Delta x \leq 16$ είναι η (5.34) [Γραφική Παράσταση 5.16 (α)].

$$q_{2L(Thumb)}(\Delta x) = 2.39\Delta x - 0.83 \quad 0 \leq \Delta x \leq 12 \quad (5.33)$$

$$q_{2L(Thumb)}(\Delta x) = 10.82\Delta x - 100.58 \quad 12 < \Delta x \leq 16 \quad (5.34)$$

Επίσης η $q_2(\Delta x)$ για να προσεγγιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια και να εκφραστεί ακόμη καλύτερα με μια πολυωνυμική εξίσωση τρίτου βαθμού. Οπότε για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 12$ θα ισχύει η σχέση (5.35). Για μετατόπιση $12 < \Delta x \leq 16$ είναι γραμμική και ίδια με την (5.34) [Γραφική Παράσταση 5.16 (β)].

$$q_{2P(Thumb)}(\Delta x) = 0.01\Delta x^3 - 0.25\Delta x^2 + 0.8\Delta x + 1.26 \quad 0 \leq \Delta x \leq 12 \quad (5.35)$$

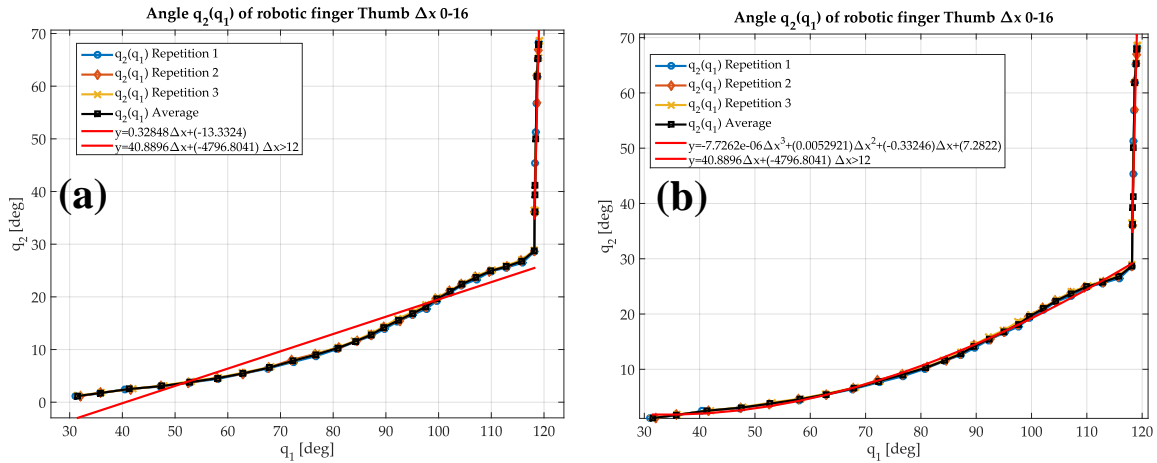
Επίσης η εξίσωση κίνησης που συνδέει τις γωνίες μεταξύ τους είναι συνεχής και περίπου γραμμική ισχύει για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 12$ και μπορεί να εκφραστεί ως γραμμική (5.36). Για μετατόπιση $12 < \Delta x \leq 16$ δεν μπορούμε να εξαγάγουμε σχέση κίνησης μεταξύ των γωνιών αφού η άρθρωση q_1 παραμένει σταθερή και μεταβάλλεται μόνο η q_2 [Γραφική Παράσταση 5.17 (α)].

$$q_{2L(Thumb)}(q_1) = 0.33q_1 - 13,33 \quad 0 \leq \Delta x \leq 12 \quad (5.36)$$

Επίσης η $q_2(q_1)$ γίνεται να προσεγγιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια και να εκφραστεί ακόμη καλύτερα με μια πολυωνυμική εξίσωση δευτέρου βαθμού. Οπότε για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 12$ θα ισχύει η σχέση (5.37).

Για μετατόπιση $12 < \Delta x \leq 16$ δεν μπορούμε να εξάγουμε σχέση κίνησης μεταξύ των γωνιών αφού η άρθρωση q_1 παραμένει σταθερή και μεταβάλλεται μόνο η q_2 [**Γραφική Παράσταση 5.17 (b)**]

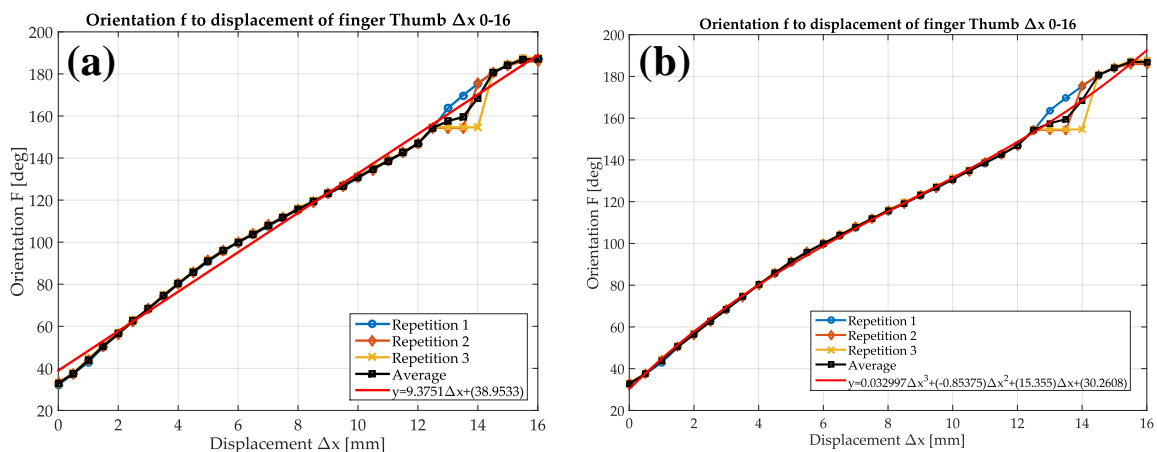
$$q_{2P(Thumb)}(q_1) = 0.01q_1^2 - 0.33q_1 - 7.28 \quad 0 \leq \Delta x \leq 12 \quad (5.37)$$



Γραφική Παράσταση 5.17: Γραφικές παραστάσεις άρθρωσης DIP σε συνάρτηση με την άρθρωση MCP για τον αντίχειρα, (a) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με ευθεία, (b) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με πολυώνυμο τρίτου βαθμού.

Για τις εξισώσεις κίνησης του ολικού προσανατολισμού f ως προς Δx είναι αρκετά γραμμικές και συνεχείς καθώς επίσης μπορούν να εκφραστούν ενιαία για όλη τη μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 16$.

Επομένως η γραμμική εξίσωση κίνησης θα είναι η (5.38) [**Γραφική Παράσταση 5.18 (a)**].



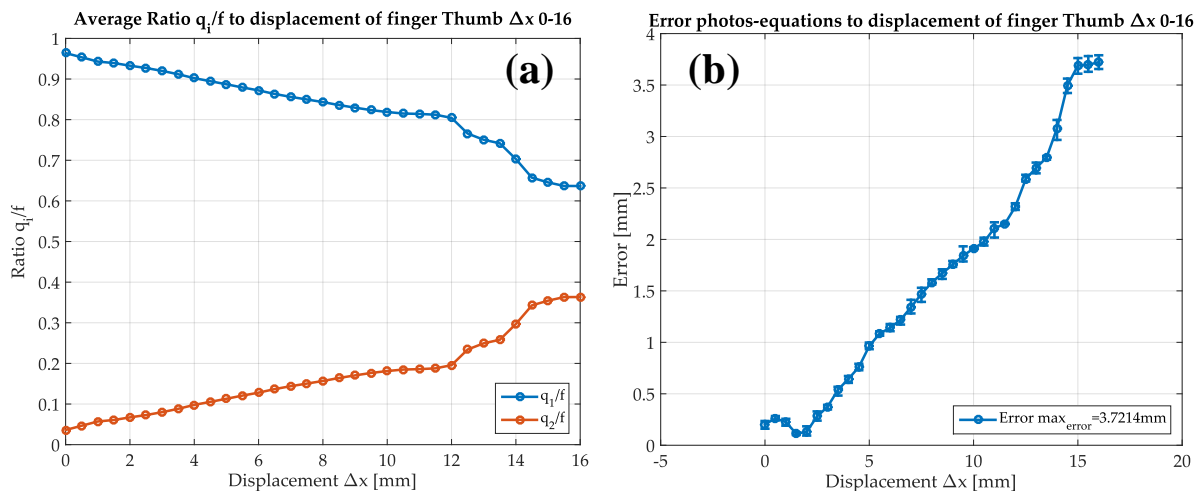
Γραφική Παράσταση 5.18: Γραφικές παραστάσεις προσανατολισμού f συνάρτηση με την μετατόπιση Δx για τον αντίχειρα, (a) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με ευθεία, (b) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με πολυώνυμο τρίτου βαθμού.

$$f_{L(Thumb)}(\Delta x) = 9.38\Delta x + 38.95 \quad 0 \leq \Delta x \leq 16 \quad (5.38)$$

Επίσης η $f(\Delta x)$ γίνεται να προσεγγιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια και να εκφραστεί ακόμη καλύτερα με μια πολωνυμική εξίσωση τρίτου βαθμού. Οπότε για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 16$ θα ισχύει η σχέση (5.39) [Γραφική Παράσταση 5.18 (b)].

$$f_{L(Thumb)}(\Delta x) = 0.03\Delta x^3 - 0.85\Delta x^2 + 15.36\Delta x + 30.26 \quad 0 \leq \Delta x \leq 16 \quad (5.39)$$

Επίσης διακρίνουμε στην Γραφική Παράσταση 5.19 (a) η άρθρωση q_1 μεταβάλλει περισσότερο το προσανατολισμό του δακτύλου σε σχέση με την q_2 .

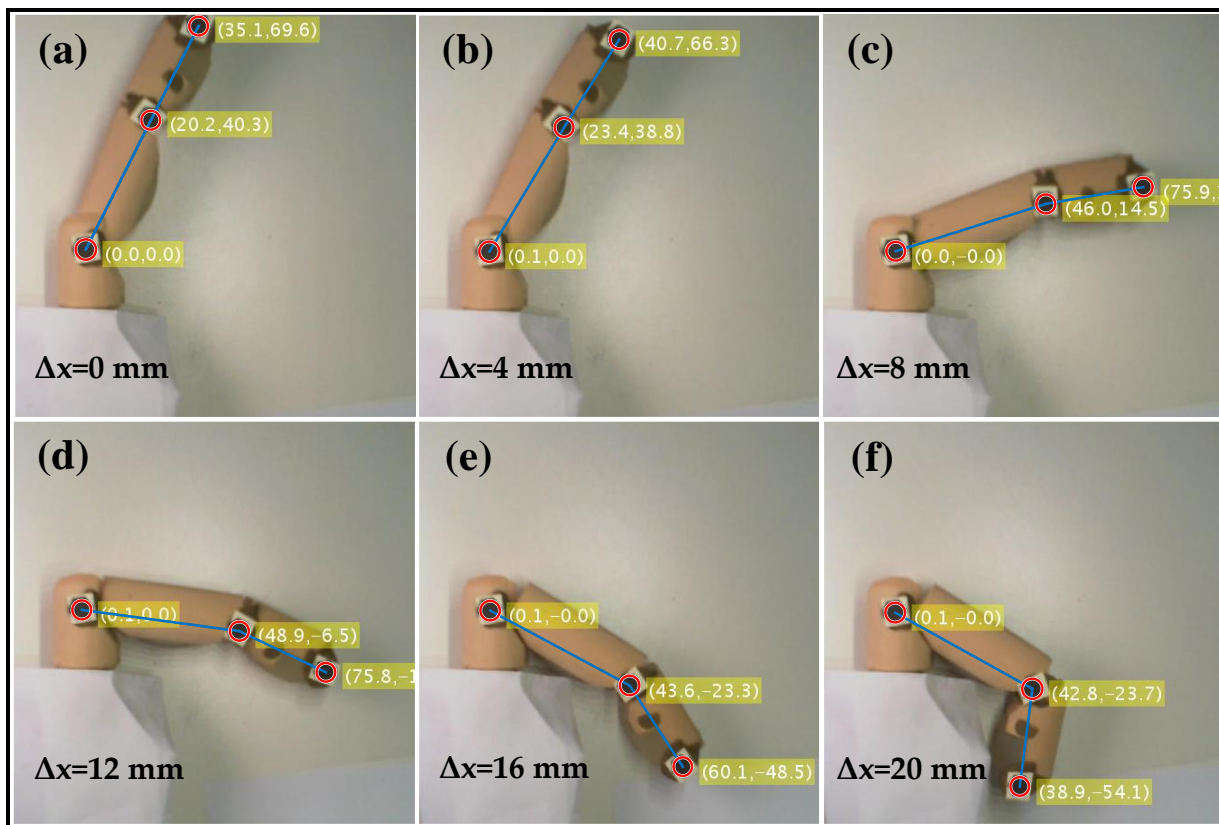


Γραφική Παράσταση 5.19: Γραφικές παραστάσεις για τον αντίχειρα, (a) ποσοστό επίδρασης της κάθε άρθρωσης ως προς τον προσανατολισμό f σε συνάρτηση της μετατόπισης Δx , (b) σφάλμα απόστασης του άκρου του δακτύλου από τις συντεταγμένες των φωτογραφιών ως προς την επίλυση του ευθύ κινηματικού.

Σύμφωνα με την Γραφική Παράσταση 5.19 (b) παρουσιάζεται ένα γραμμικό σφάλμα ανάλογο της μετατόπισης με μέγιστο 3.7 mm. Εφόσον το μήκος του δακτύλου είναι 78 mm. Ότι το ποσοστό του σφάλματος στην ακρίβεια των μετρήσεων συσχέτισμού των κινηματικών εξισώσεων είναι το μέγιστο σφάλμα ως προς την μετατόπιση.

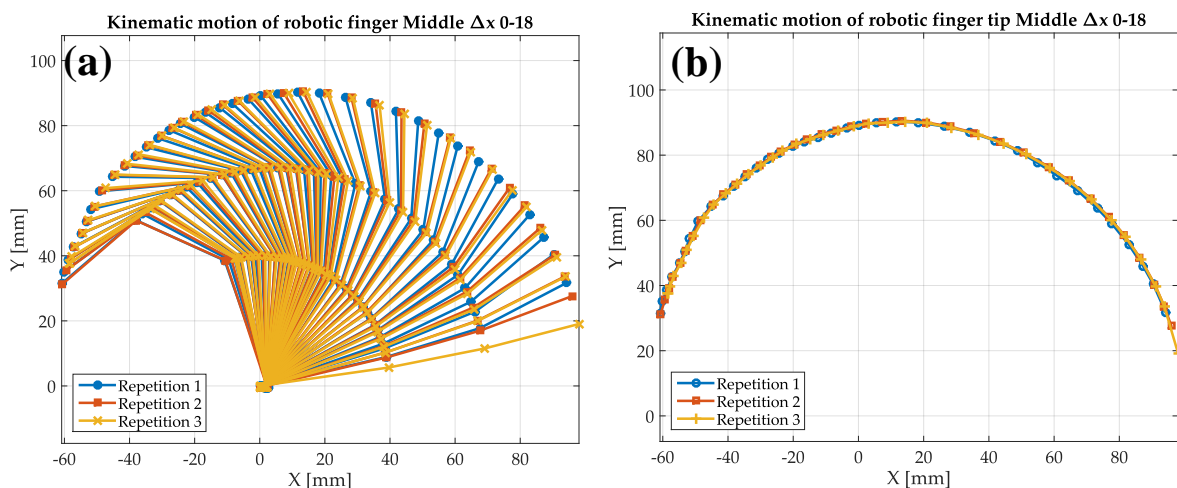
Δηλαδή έχουμε ένα **σφάλμα στην ακρίβεια των κινηματικών εξισώσεων της τάξης του 4.7%**.

Στην **Εικόνα 5.9** διακρίνονται οι εικόνες μέσα από το λογισμικό Matlab για διάφορες μετατοπίσεις του ρομποτικού δακτύλου με τον εντοπισμό των αρθρώσεων και την σύνδεση των φαλάγγων για την εύρεση των γωνιών.



Εικόνα 5.9: Κίνηση του ρομποτικού δακτύλου Αντίχειρα για μετατοπίσεις Δx και καταγραφή των θέσεων των αρθρώσεων μέσα από το πρόγραμμα Matlab, (a) για $\Delta x=0$ mm, (b) για $\Delta x=4$ mm, (c) για $\Delta x=8$ mm, (d) για $\Delta x=12$ mm, (e) για $\Delta x=16$ mm, (f) για $\Delta x=20$ mm.

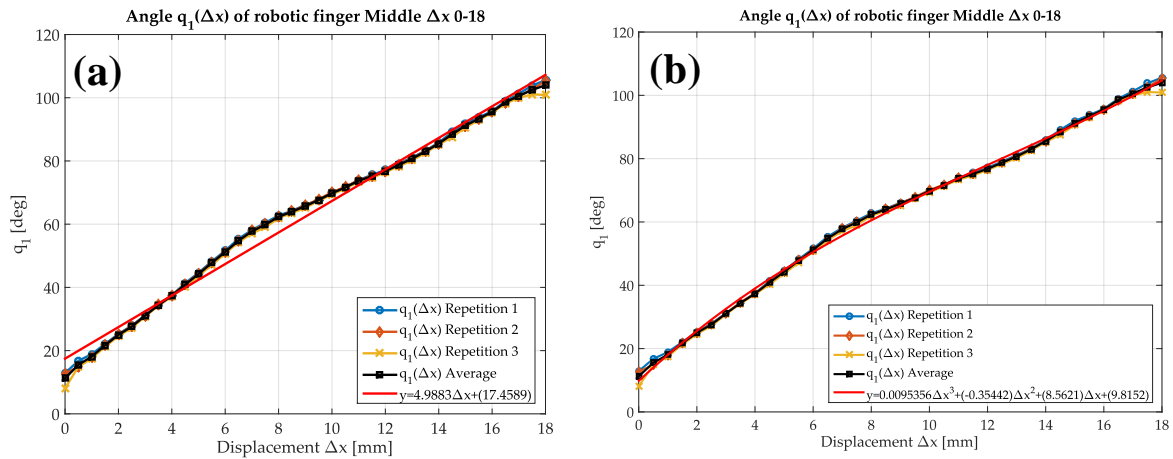
5.7.4 Ρομποτικό δάκτυλο Middle (Μεσαίο)



Γραφική Παράσταση 5.20: Γραφικές παραστάσεις κίνησης του μεσαίου για μετατόπιση Δx , (a) κινηματική όλου του δακτύλου καθώς περιστρέφεται, (b) κινηματική μόνου του άκρου του δακτύλου καθώς περιστρέφεται.

Παρατηρούμε ότι με βάση την **Γραφική Παράσταση 5.20** η επαναληψιμότητα των πειραμάτων είναι αρκετά καλή καθώς οι τρεις επαναλήψεις ταυτίζονται σε μεγάλο ποσοστό. Εκτός όμως της αρχής εξαιτίας των διαφορετικών offset που παίρνει η κάθε άρθρωση. Για μετατόπιση $\Delta x \geq 4$ mm όμως παρατηρείται ότι και οι τρεις επαναλήψεις ταυτίζονται απόλυτα

Στην **Γραφική Παράσταση 5.20 (a)** παρατηρείται η κίνηση που εκτελεί το δάκτυλο για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 18$ mm. Ενώ στην **Γραφική Παράσταση 5.20 (b)** παρατηρείται καλύτερα η κίνηση που εκτελεί το άκρο του δακτύλου (fingertip) για παρόμοια μετατόπιση.



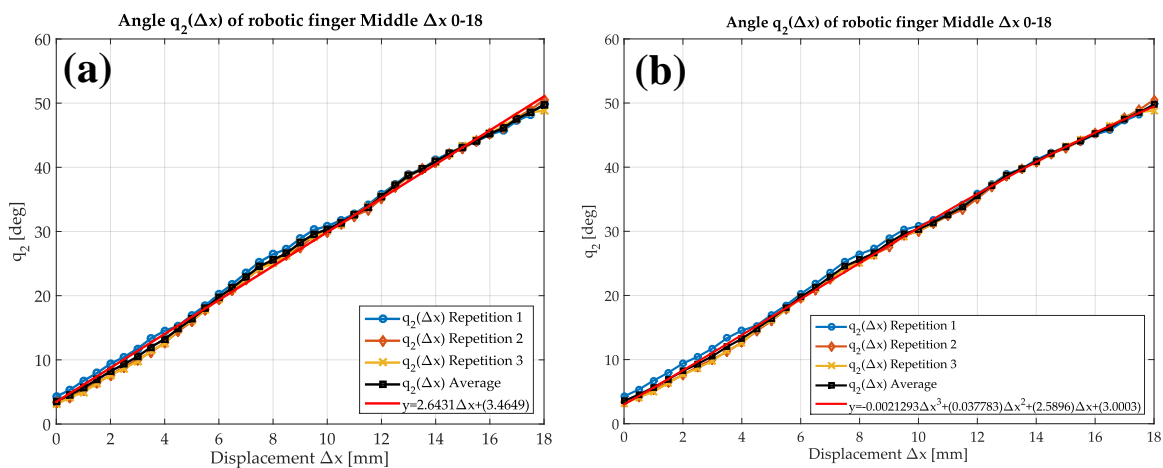
Γραφική Παράσταση 5.21: Γραφικές παραστάσεις άρθρωσης MCP σε συνάρτηση με την μετατόπιση Δx για τον μεσαίο, (a) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με ευθεία, (b) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με πολυώνυμο τρίτου βαθμού.

Παρατηρούμε ότι στην **Γραφική Παράσταση 5.21 (a)** υπάρχει μια γραμμική σχέση που συνδέει το q_1 και το Δx για $0 \leq \Delta x \leq 18$ η εξίσωση (5.40).

$$q_{1L(Middle)}(\Delta x) = 4.98\Delta x + 17.46 \quad 0 \leq \Delta x \leq 18 \quad (5.40)$$

Σύμφωνα με την **Γραφική Παράσταση 5.21 (b)** εάν επιθυμούμε να προσεγγίσουμε ακόμα καλύτερα την γραφική παράσταση μπορεί να περιγραφεί από ένα πολυώνυμο τρίτου βαθμού (5.41).

$$q_{1P(Middle)}(\Delta x) = 0.01\Delta x^3 - 0.35\Delta x^2 + 8.56\Delta x + 9.82 \quad 0 \leq \Delta x \leq 18 \quad (5.41)$$



Γραφική Παράσταση 5.22: Γραφικές παραστάσεις άρθρωσης PIP σε συνάρτηση με την μετατόπιση Δx για τον μεσαίο, (a) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με ευθεία, (b) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με πολυώνυμο τρίτου βαθμού.

Παρατηρούμε ότι στην **Γραφική Παράσταση 5.22 (a)** υπάρχει μια γραμμική σχέση που συνδέει το q_2 και το Δx για $0 \leq \Delta x \leq 18$ η εξίσωση (5.42).

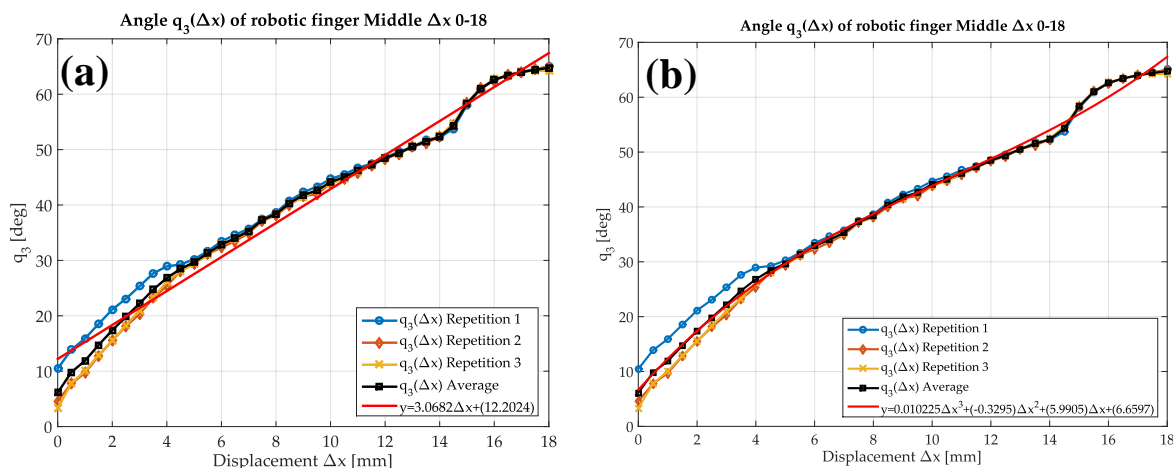
$$q_{2L(Middle)}(\Delta x) = 2.64\Delta x + 3.46 \quad 0 \leq \Delta x \leq 18 \quad (5.42)$$

Σύμφωνα με την **Γραφική Παράσταση 5.22 (b)** εάν επιθυμούμε να προσεγγίσουμε ακόμα καλύτερα την γραφική παράσταση μπορεί να περιγραφεί από ένα πολυώνυμο τρίτου βαθμού (5.43).

$$q_{2P(Middle)}(\Delta x) = 0.01\Delta x^3 - 0.04\Delta x^2 + 2.59\Delta x + 3 \quad 0 \leq \Delta x \leq 18 \quad (5.43)$$

Παρατηρούμε ότι στην **Γραφική Παράσταση 5.23 (a)** υπάρχει μια γραμμική σχέση που συνδέει το q_3 και το Δx για $0 \leq \Delta x \leq 18$ η εξίσωση (5.44).

$$q_{3L(Middle)}(\Delta x) = 3.07\Delta x + 12.2 \quad 0 \leq \Delta x \leq 18 \quad (5.44)$$



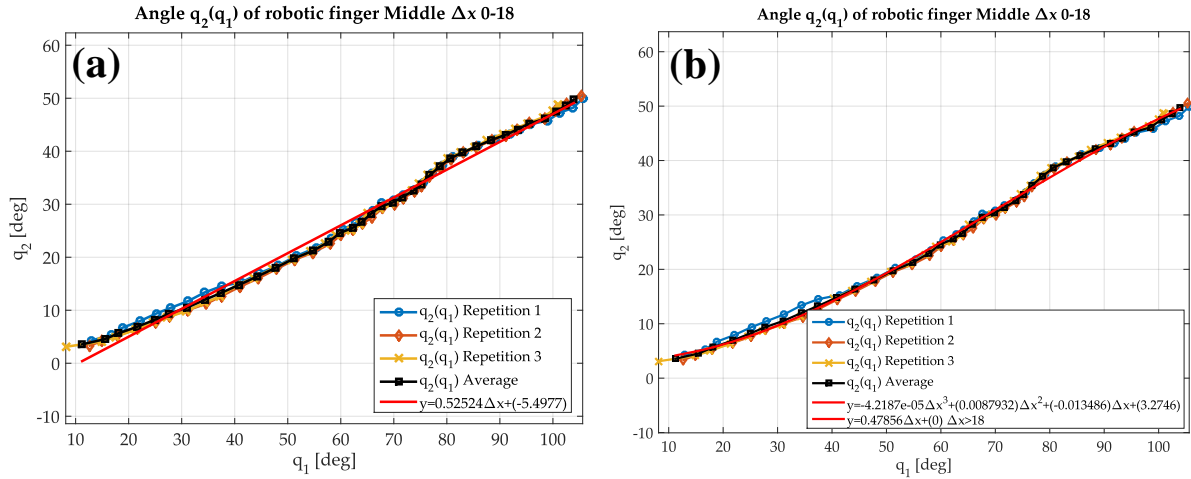
Γραφική Παράσταση 5.23: Γραφικές παραστάσεις άρθρωσης DIP σε συνάρτηση με την μετατόπιση Δx για τον μεσαίο, (a) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με ευθεία, (b) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με πολυώνυμο τρίτου βαθμού.

Σύμφωνα με την **Γραφική Παράσταση 5.23 (b)** εάν επιθυμούμε να προσεγγίσουμε ακόμα καλύτερα την γραφική παράσταση μπορεί να περιγραφεί από ένα πολυώνυμο τρίτου βαθμού (5.45).

$$q_{3P(Middle)}(\Delta x) = 0.01\Delta x^3 - 0.3\Delta x^2 + 5.99\Delta x + 6.66 \quad 0 \leq \Delta x \leq 18 \quad (5.45)$$

Επίσης η εξίσωση κίνησης που συνδέει τις γωνίες $q_2(q_1)$ είναι συνεχής και περίπου γραμμική ισχύει για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 18$ και μπορεί να εκφραστεί ως γραμμική (5.46) [**Γραφική Παράσταση 5.24 (a)**].

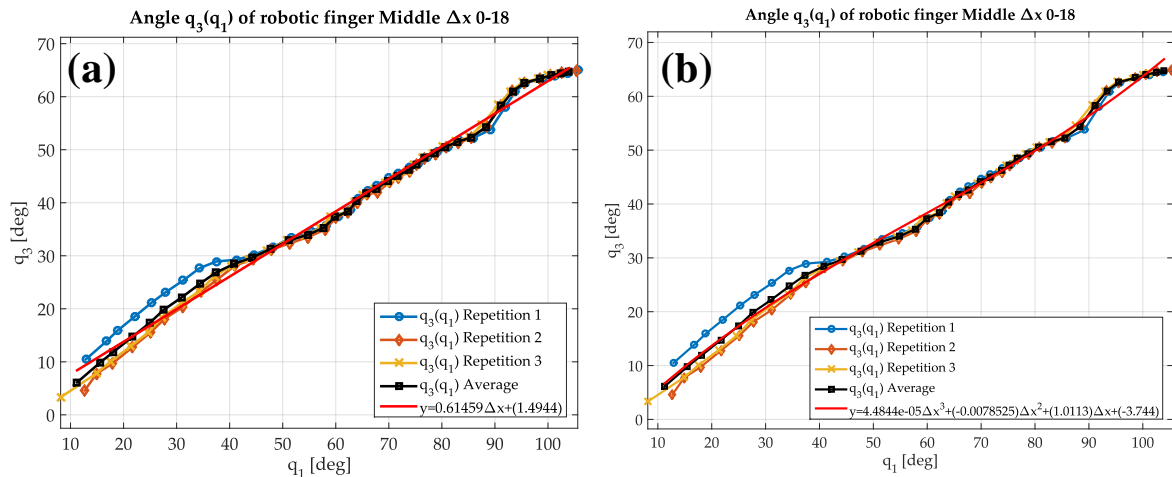
$$q_{2L(Index)}(q_1) = 0.53q_1 - 5,5 \quad 0 \leq \Delta x \leq 18 \quad (5.46)$$



Γραφική Παράσταση 5.24: Γραφικές παραστάσεις άρθρωσης PIP σε συνάρτηση με την άρθρωση MCP για τον μεσαίο, (α) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με ευθεία, (β) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με πολυώνυμο τρίτου βαθμού.

Επίσης η $q_2(q_1)$ γίνεται να προσεγγιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια και να εκφραστεί ακόμη καλύτερα με μια πολυωνυμική εξίσωση δευτέρου βαθμού. Οπότε για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 18$ θα ισχύει η σχέση (5.47). [Γραφική Παράσταση 5.24 (b)]

$$q_{2P(Middle)}(q_1) = 0.01q_1^2 - 0.01q_1 - 3.27 \quad 0 \leq \Delta x \leq 18 \quad (5.47)$$



Γραφική Παράσταση 5.25: Γραφικές παραστάσεις άρθρωσης DIP σε συνάρτηση με την άρθρωση MCP για τον μεσαίο, (α) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με ευθεία, (β) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με πολυώνυμο τρίτου βαθμού.

Επίσης η εξίσωση κίνησης που συνδέει τις γωνίες $q_3(q_1)$ είναι συνεχής και περίπου γραμμική ισχύει για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 18$ και μπορεί να εκφραστεί ως γραμμική (5.48) [Γραφική Παράσταση 5.24 (a)].

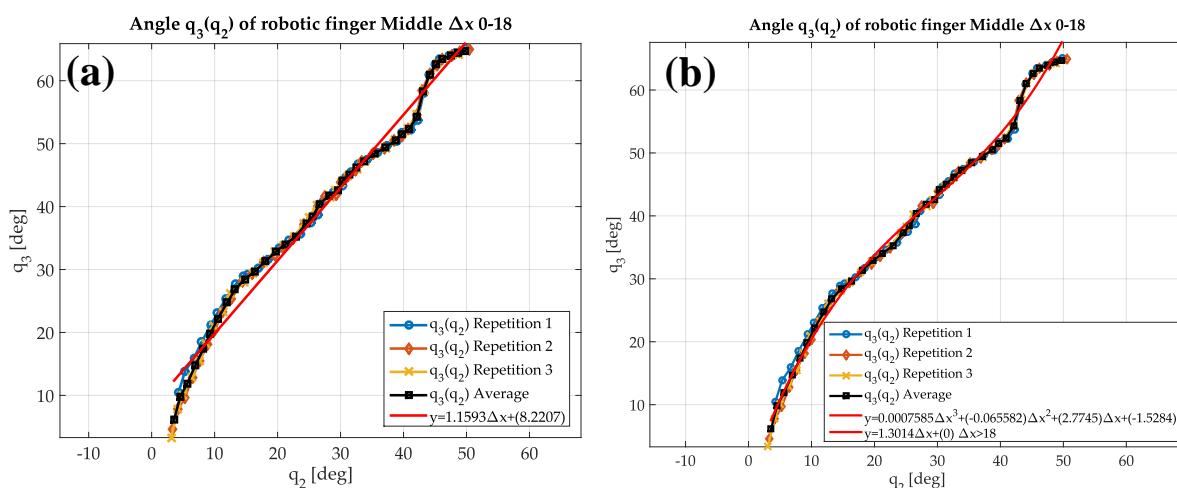
$$q_{3L(Index)}(q_1) = 0.61q_1 + 1.49 \quad 0 \leq \Delta x \leq 18 \quad (5.48)$$

Επίσης η $q_3(q_1)$ γίνεται να προσεγγιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια και να εκφραστεί ακόμη καλύτερα με μια πολυωνυμική εξίσωση δευτέρου βαθμού. Οπότε για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 18$ θα ισχύει η σχέση (5.49). [Γραφική Παράσταση 5.24 (b)]

$$q_{3P(Middle)}(q_1) = 0.01q_1^2 - 1.01q_1 - 3.74 \quad 0 \leq \Delta x \leq 18 \quad (5.49)$$

Επίσης η εξίσωση κίνησης που συνδέει τις γωνίες $q_3(q_2)$ είναι συνεχής και περίπου γραμμική ισχύει για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 18$ και μπορεί να εκφραστεί ως γραμμική (5.50) [Γραφική Παράσταση 5.26 (a)].

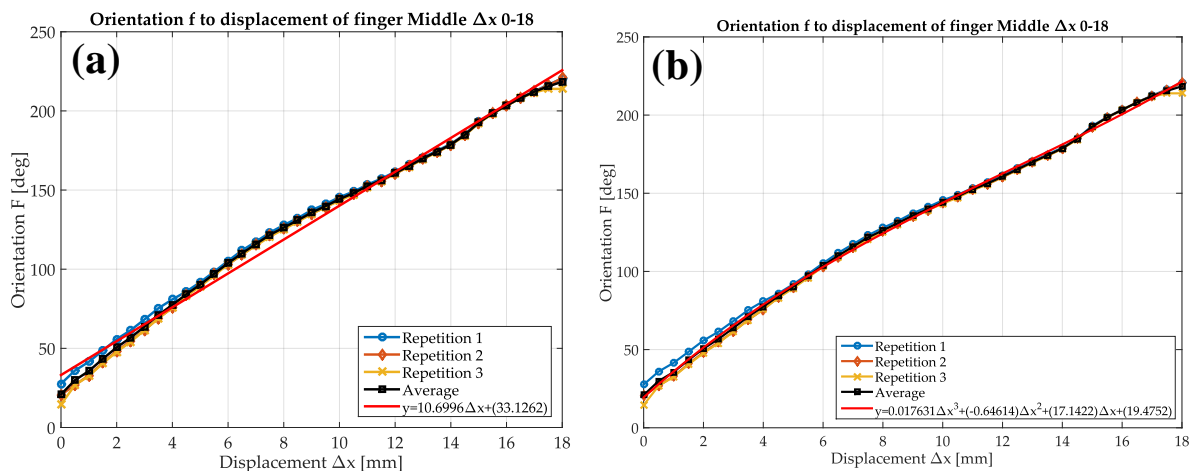
$$q_{3L(Middle)}(q_2) = 1.59q_2 + 8.22 \quad 0 \leq \Delta x \leq 18 \quad (5.50)$$



Γραφική Παράσταση 5.26: Γραφικές παραστάσεις άρθρωσης DIP σε συνάρτηση με την άρθρωση PIP για τον μεσαίο, (a) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με ευθεία, (b) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με πολώνυμο τρίτου βαθμού.

Επίσης η $q_3(q_2)$ γίνεται να προσεγγιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια και να εκφραστεί ακόμη καλύτερα με μια πολυωνυμική εξίσωση δευτέρου βαθμού. Οπότε για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 18$ θα ισχύει η σχέση (5.51). [Γραφική Παράσταση 5.26 (b)]

$$q_{3P(Middle)}(q_2) = -0.07q_2^2 + 2.77q_2 - 1.53 \quad 0 \leq \Delta x \leq 18 \quad (5.51)$$



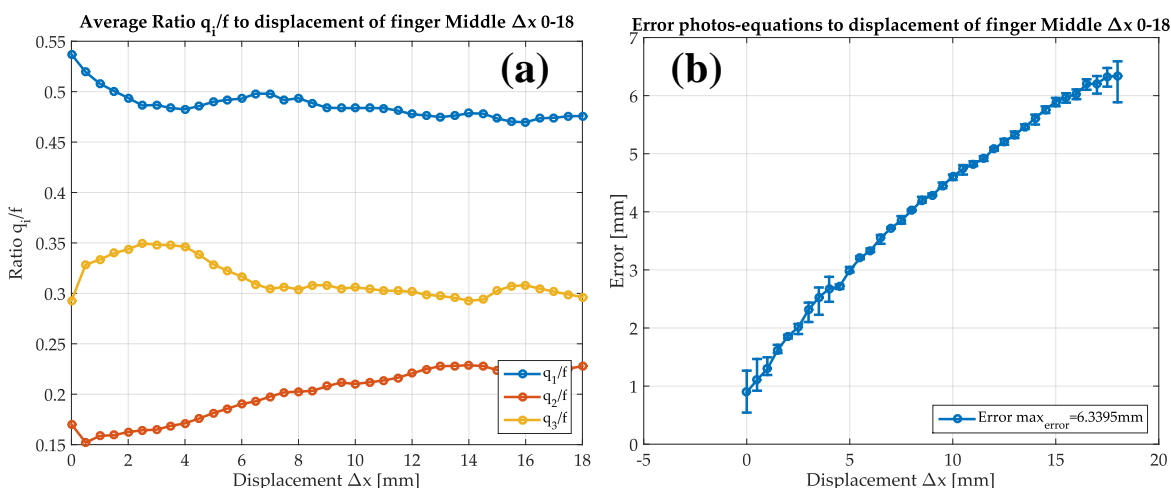
Γραφική Παράσταση 5.27: Γραφικές παραστάσεις προσανατολισμού f συνάρτηση με την μετατόπιση Δx για τον μεσαίο, (α) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με ευθεία, (β) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με πολυώνυμο τρίτου βαθμού.

Για τις εξισώσεις κίνησης του ολικού προσανατολισμού f ως προς Δx είναι αρκετά γραμμικές και συνεχείς καθώς επίσης μπορούν να εκφραστούν ενιαία για όλη τη μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 18$. Επομένως η γραμμική εξίσωση κίνησης θα είναι η (5.52) [Γραφική Παράσταση 5.27 (α)].

$$f_{L(Middle)}(\Delta x) = 10.7\Delta x + 33.13 \quad 0 \leq \Delta x \leq 18 \tag{5.52}$$

Επίσης η $f(\Delta x)$ γίνεται να προσεγγιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια και να εκφραστεί ακόμη καλύτερα με μια πολυωνυμική εξίσωση τρίτου βαθμού. Οπότε για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 18$ θα ισχύει η σχέση (5.53) [Γραφική Παράσταση 5.27 (β)].

$$f_{P(Middle)}(\Delta x) = 0.17\Delta x^3 - 0.64\Delta x^2 + 17.14\Delta x + 19.48 \quad 0 \leq \Delta x \leq 18 \tag{5.53}$$

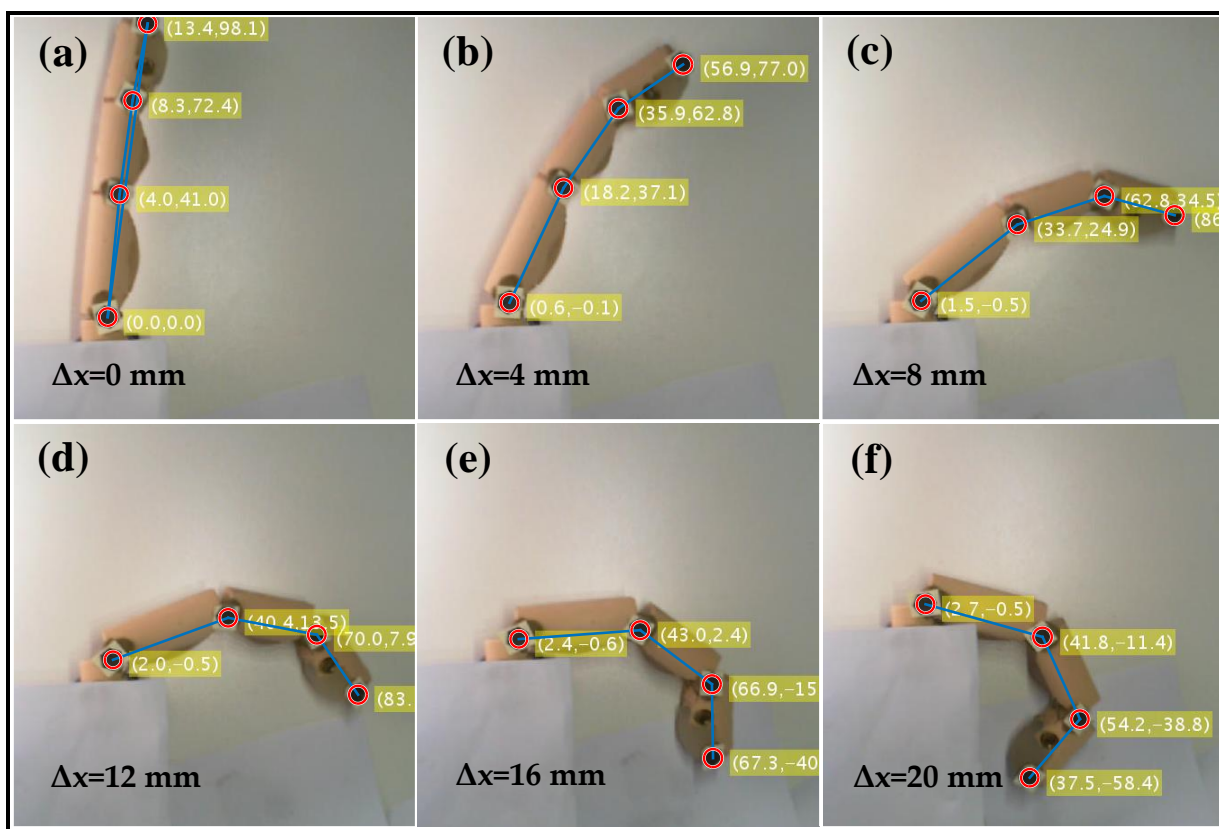


Γραφική Παράσταση 5.28: Γραφικές παραστάσεις για τον μεσαίο, (α) ποσοστό επίδρασης της κάθε άρθρωσης ως προς τον προσανατολισμό f σε συνάρτηση της μετατόπισης Δx , (β) σφάλμα απόστασης του άκρου του δακτύλου από τις συντεταγμένες των φωτογραφίες ως προς την επίλυση του ευθύ κινηματικού.

Επίσης διακρίνουμε στην **Γραφική Παράσταση 5.28 (a)** η άρθρωση q_1 μεταβάλλει περισσότερο το προσανατολισμό του δακτύλου ενώ ακολουθεί η q_2 και στην συνέχεια η q_3 .

Σύμφωνα με την **Γραφική Παράσταση 5.28 (b)** παρουσιάζεται ένα γραμμικό σφάλμα ανάλογο της μετατόπισης με μέγιστο 6.3 mm. Εφόσον το μήκος του δακτύλου είναι 100 mm. Ότι το ποσοστό του σφάλματος στην ακρίβεια των μετρήσεων συσχέτισμού των κινηματικών εξισώσεων είναι το μέγιστο σφάλμα ως προς την μετατόπιση. Δηλαδή έχουμε ένα **σφάλμα στην ακρίβεια των κινηματικών εξισώσεων** της τάξης του **6.3%**.

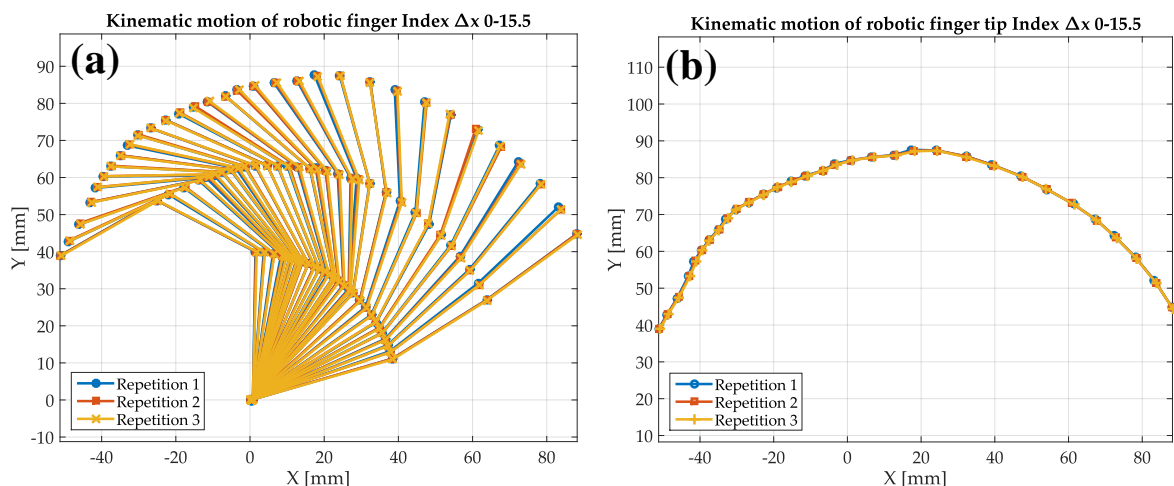
Στην **Εικόνα 5.10** διακρίνονται οι εικόνες μέσα από το λογισμικό Matlab για διάφορες μετατοπίσεις του ρομποτικού δακτύλου με τον εντοπισμό των αρθρώσεων και την σύνδεση των φαλάγγων για την εύρεση των γωνιών.



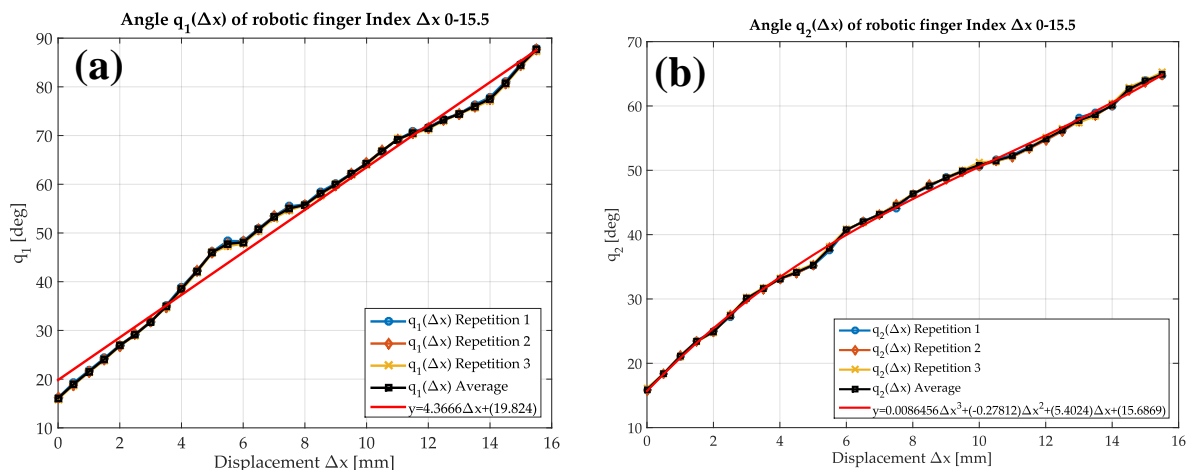
Εικόνα 5.10: Κίνηση του ρομποτικού δακτύλου Παράμεσου για μετατοπίσεις Δx και καταγραφή των θέσεων των αρθρώσεων μέσα από το πρόγραμμα Matlab, (a) για $\Delta x=0$ mm, (b) για $\Delta x=4$ mm, (c) για $\Delta x=8$ mm, (d) για $\Delta x=12$ mm, (e) για $\Delta x=16$ mm, (f) για $\Delta x=19$ mm.

5.7.5 Ρομποτικό δάκτυλο Index (Δείκτη)

Παρατηρούμε ότι με βάση την **Γραφική Παράσταση 5.29** η επαναληψιμότητα των πειραμάτων είναι αρκετά καλή καθώς οι τρεις επαναλήψεις ταυτίζονται σε μεγάλο ποσοστό. Εκτός όμως της αρχής εξαιτίας των διαφορετικών offset που παίρνει η κάθε άρθρωση. Στην **Γραφική Παράσταση 5.20 (a)** παρατηρείται η κίνηση που εκτελεί το δάκτυλο για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 15.5$ mm. Ενώ στην **Γραφική Παράσταση 5.29 (b)** παρατηρείται καλύτερα η κίνηση που εκτελεί το άκρο του δακτύλου (fingertip) για παρόμοια μετατόπιση.



Γραφική Παράσταση 5.29: Γραφικές παραστάσεις κίνησης του δείκτη για μετατόπιση Δx , (a) κινηματική όλου του δακτύλου καθώς περιστρέφεται, (b) κινηματική μόνου του άκρου του δακτύλου καθώς περιστρέφεται.



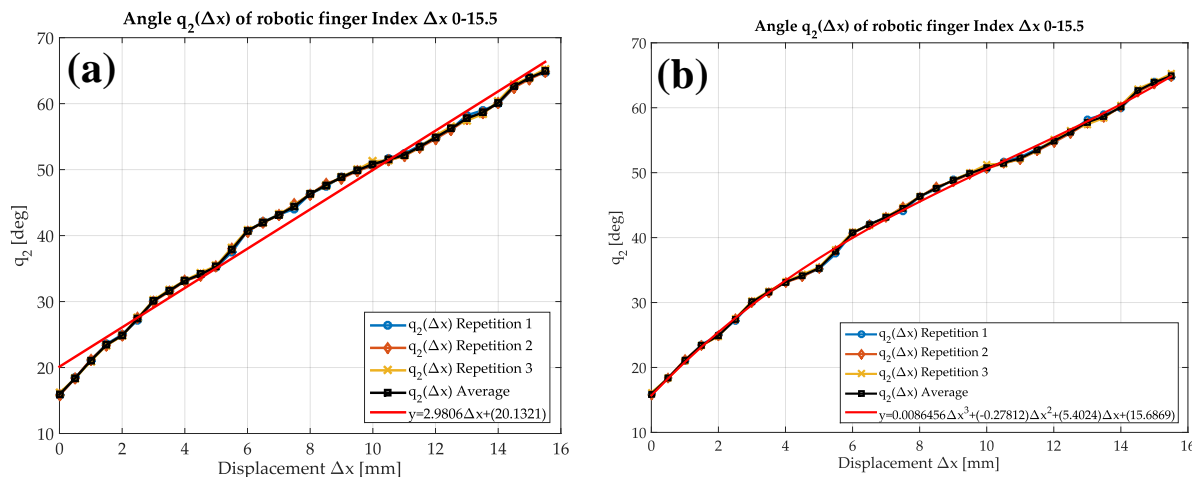
Γραφική Παράσταση 5.30: Γραφικές παραστάσεις άρθρωσης MCP σε συνάρτηση με την μετατόπιση Δx για τον δείκτη, (a) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με ευθεία, (b) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με πολυώνυμο τρίτου βαθμού.

Παρατηρούμε ότι στην **Γραφική Παράσταση 5.30 (a)** υπάρχει μια γραμμική σχέση που συνδέει το q_1 και το Δx για $0 \leq \Delta x \leq 15.5$ η εξίσωση (5.54).

$$q_{1L(Index)}(\Delta x) = 4.37\Delta x + 19.82 \quad 0 \leq \Delta x \leq 15.5 \quad (5.54)$$

Σύμφωνα με την **Γραφική Παράσταση 5.30 (b)** εάν επιθυμούμε να προσεγγίσουμε ακόμα καλύτερα την γραφική παράσταση μπορεί να περιγραφεί από ένα πολυώνυμο τρίτου βαθμού (5.55).

$$q_{1P}(Index)(\Delta x) = 0.014\Delta x^3 - 0.28\Delta x^2 + 5.4\Delta x + 15.69 \quad 0 \leq \Delta x \leq 15.5 \quad (5.55)$$



Γραφική Παράσταση 5.31: Γραφικές παραστάσεις άρθρωσης PIP σε συνάρτηση με την μετατόπιση Δx για τον δείκτη, (a) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με ευθεία, (b) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με πολυώνυμο τρίτου βαθμού.

Παρατηρούμε ότι στην **Γραφική Παράσταση 5.31 (a)** υπάρχει μια γραμμική σχέση που συνδέει το q_2 και το Δx για $0 \leq \Delta x \leq 15.5$ η εξίσωση (5.56).

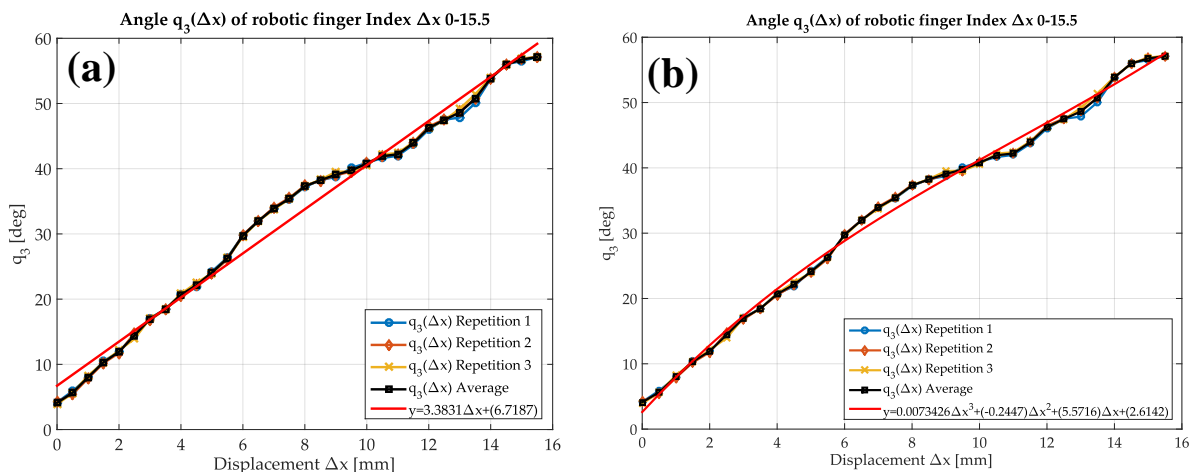
$$q_{2L}(Index)(\Delta x) = 2.98\Delta x + 20.13 \quad 0 \leq \Delta x \leq 15.5 \quad (5.56)$$

Σύμφωνα με την **Γραφική Παράσταση 5.31 (b)** εάν επιθυμούμε να προσεγγίσουμε ακόμα καλύτερα την γραφική παράσταση μπορεί να περιγραφεί από ένα πολυώνυμο τρίτου βαθμού (5.57).

$$q_{2P}(Index)(\Delta x) = 0.014\Delta x^3 - 0.27\Delta x^2 + 5.4\Delta x + 15.69 \quad 0 \leq \Delta x \leq 15.5 \quad (5.57)$$

Παρατηρούμε ότι στην **Γραφική Παράσταση 5.32 (a)** υπάρχει μια γραμμική σχέση που συνδέει το q_3 και το Δx για $0 \leq \Delta x \leq 15.5$ η εξίσωση (5.58).

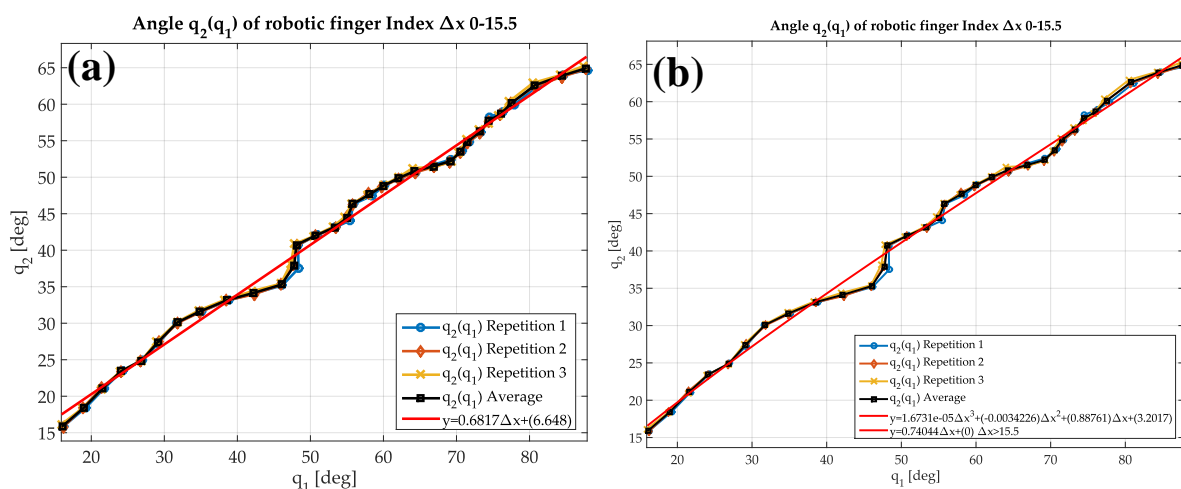
$$q_{3L}(Index)(\Delta x) = 3.38\Delta x + 6.72 \quad 0 \leq \Delta x \leq 15.5 \quad (5.58)$$



Γραφική Παράσταση 5.32: Γραφικές παραστάσεις άρθρωσης DIP σε συνάρτηση με την μετατόπιση Δx για τον δείκτη, (α) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με ευθεία, (β) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με πολυώνυμο τρίτου βαθμού.

Σύμφωνα με την Γραφική Παράσταση 5.32 (b) εάν επιθυμούμε να προσεγγίσουμε ακόμα καλύτερα την γραφική παράσταση μπορεί να περιγραφεί από ένα πολυώνυμο τρίτου βαθμού (5.59).

$$q_{3P}(\text{Index})(\Delta x) = 0.01\Delta x^3 - 0.24\Delta x^2 + 5.57\Delta x + 2.61 \quad 0 \leq \Delta x \leq 15.5 \quad (5.59)$$



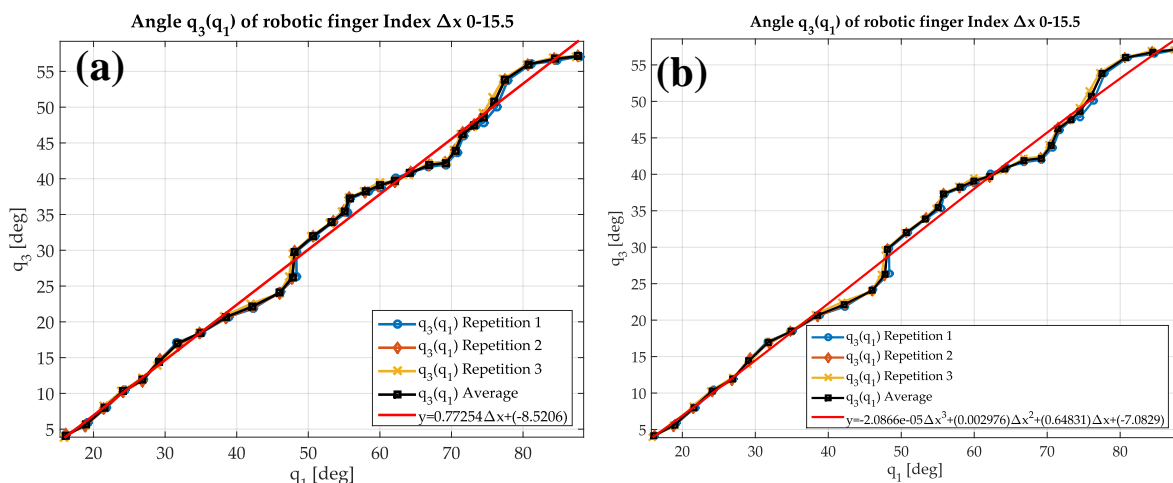
Γραφική Παράσταση 5.33: Γραφικές παραστάσεις άρθρωσης PIP σε συνάρτηση με την άρθρωση MCP για τον δείκτη, (α) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με ευθεία, (β) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με πολυώνυμο τρίτου βαθμού.

Επίσης η εξίσωση κίνησης που συνδέει τις γωνίες $q_2(q_1)$ είναι συνεχής και περίπου γραμμική ισχύει για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 15.5$ και μπορεί να εκφραστεί ως γραμμική (5.60) [Γραφική Παράσταση 5.33 (a)].

$$q_{2L}(\text{Index})(q_1) = 0.68q_1 + 6,65 \quad 0 \leq \Delta x \leq 15.5 \quad (5.60)$$

Επίσης η $q_2(q_1)$ γίνεται να προσεγγιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια και να εκφραστεί ακόμη καλύτερα με μια πολυωνυμική εξίσωση δευτέρου βαθμού. Οπότε για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 15.5$ θα ισχύει η σχέση (5.61). [Γραφική Παράσταση 5.33 (b)]

$$q_{2P(Index)}(q_1) = 0.01q_1^2 - 0.89q_1 - 3.2 \quad 0 \leq \Delta x \leq 15.5 \quad (5.61)$$



Γραφική Παράσταση 5.34: Γραφικές παραστάσεις άρθρωσης DIP σε συνάρτηση με την άρθρωση MCP για τον δείκτη, (α) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με ευθεία, (β) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με πολυώνυμο τρίτου βαθμού.

Επίσης η εξίσωση κίνησης που συνδέει τις γωνίες $q_3(q_1)$ είναι συνεχής και περίπου γραμμική ισχύει για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 15.5$ και μπορεί να εκφραστεί ως γραμμική (5.62) [Γραφική Παράσταση 5.34 (a)].

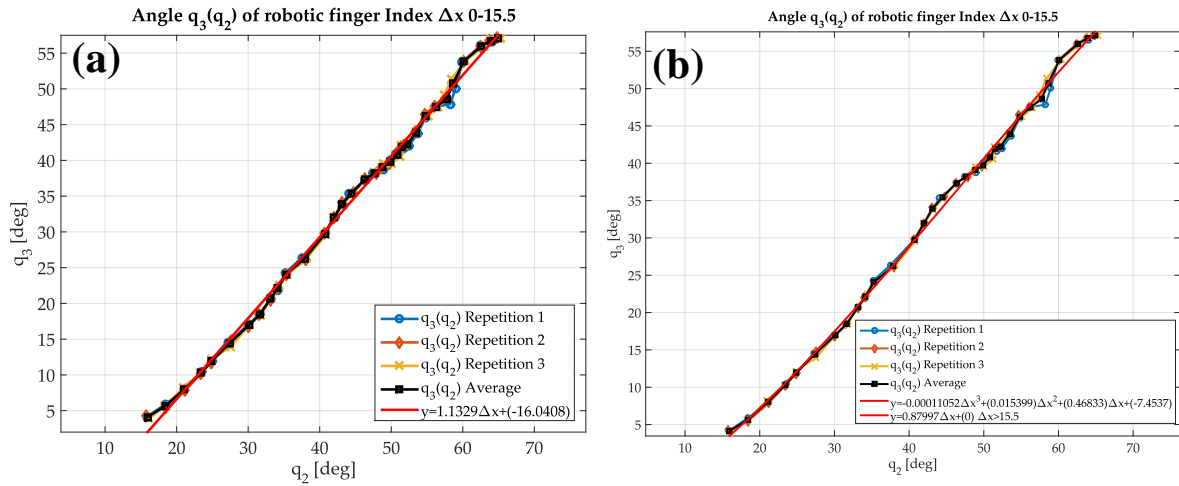
$$q_{3L(Index)}(q_1) = 0.77q_1 - 8.52 \quad 0 \leq \Delta x \leq 15.5 \quad (5.62)$$

Επίσης η $q_3(q_1)$ γίνεται να προσεγγιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια και να εκφραστεί ακόμη καλύτερα με μια πολυωνυμική εξίσωση δευτέρου βαθμού. Οπότε για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 15.5$ θα ισχύει η σχέση (5.63). [Γραφική Παράσταση 5.34 (b)]

$$q_{3P(Index)}(q_1) = 0.01q_1^2 + 0.64q_1 - 7.08 \quad 0 \leq \Delta x \leq 15.5 \quad (5.63)$$

Επίσης η εξίσωση κίνησης που συνδέει τις γωνίες $q_3(q_2)$ είναι συνεχής και περίπου γραμμική ισχύει για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 15.5$ και μπορεί να εκφραστεί ως γραμμική (5.64) [Γραφική Παράσταση 5.35 (a)].

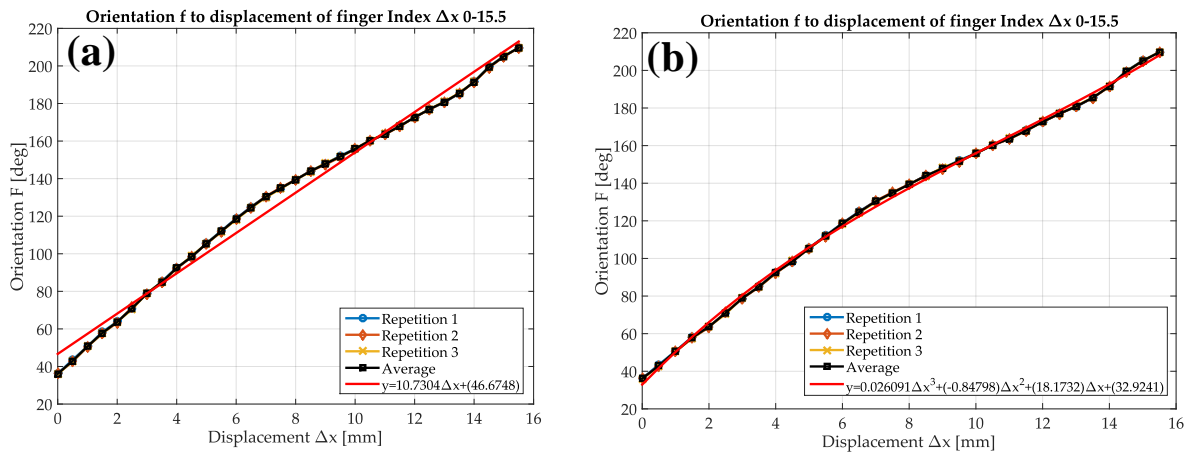
$$q_{3L(Index)}(q_2) = 1.13q_1 - 16.04 \quad 0 \leq \Delta x \leq 15.5 \quad (5.64)$$



Γραφική Παράσταση 5.35: Γραφικές παραστάσεις άρθρωσης DIP σε συνάρτηση με την άρθρωση PIP για τον δείκτη, (α) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με ευθεία, (β) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με πολυώνυμο τρίτου βαθμού.

Επίσης η $q_3(q_2)$ γίνεται να προσεγγιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια και να εκφραστεί ακόμη καλύτερα με μια πολυωνυμική εξίσωση δευτέρου βαθμού. Οπότε για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 15.5$ θα ισχύει η σχέση (5.65). [Γραφική Παράσταση 5.35 (β)]

$$q_{3P(Index)}(q_2) = -0.02q_1^2 + 0.47q_1 - 7.45 \quad 0 \leq \Delta x \leq 15.5 \quad (5.65)$$



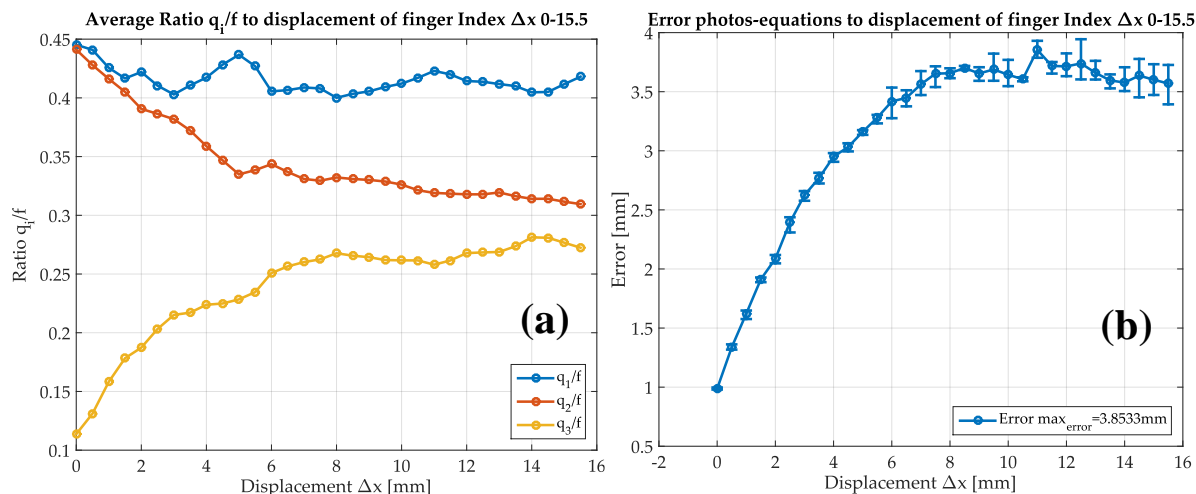
Γραφική Παράσταση 5.36: Γραφικές παραστάσεις προσανατολισμού f συνάρτηση με την μετατόπιση Δx για τον δείκτη, (α) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με ευθεία, (β) προσέγγιση της γραφικής παράστασης με πολυώνυμο τρίτου βαθμού.

Για την εξισώσεις κίνησης του ολικού προσανατολισμού f ως προς Δx εμφανίζεται αρκετά γραμμική και συνεχής επομένως μπορεί να εκφραστεί ενιαία για όλη τη μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 15.5$. Η γραμμική εξίσωση κίνησης θα είναι η (5.66) [Γραφική Παράσταση 5.36 (α)].

$$f_{L(Index)}(\Delta x) = 10.73\Delta x + 46.67 \quad 0 \leq \Delta x \leq 15.5 \quad (5.66)$$

Επίσης η $f(\Delta x)$ γίνεται να προσεγγιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια και να εκφραστεί ακόμη καλύτερα με μια πολυωνυμική εξίσωση τρίτου βαθμού. Οπότε για μετατόπιση $0 \leq \Delta x \leq 15.5$ θα ισχύει η σχέση (5.67) [Γραφική Παράσταση 5.36 (b)].

$$f_{P(Index)}(\Delta x) = 0.02\Delta x^3 - 0.85\Delta x^2 + 18.17\Delta x + 32.9 \quad 0 \leq \Delta x \leq 15.5 \quad (5.67)$$

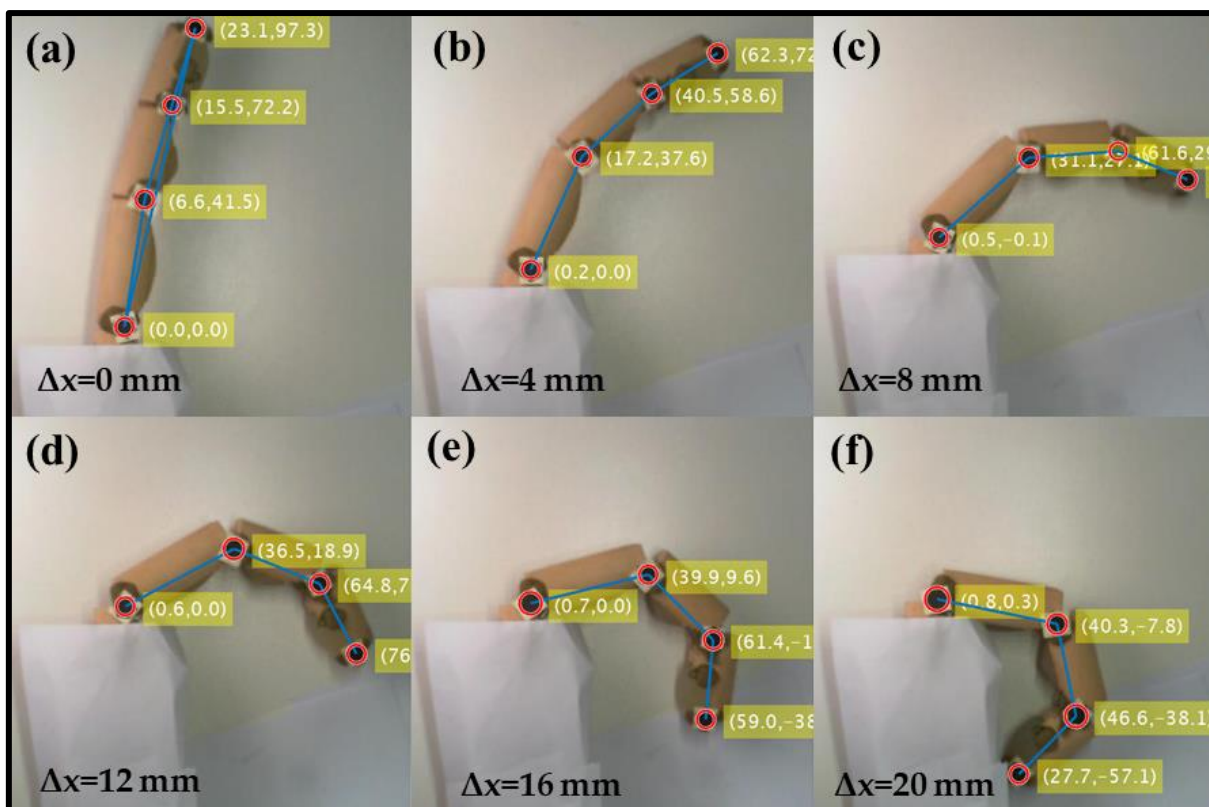


Γραφική Παράσταση 5.37: Γραφικές παραστάσεις για τον δείκτη, (a) ποσοστό επίδρασης της κάθε άρθρωσης ως προς τον προσανατολισμό f σε συνάρτηση της μετατόπισης Δx , (b) σφάλμα απόστασης του άκρου του δακτύλου από τις συντεταγμένες των φωτογραφίες ως προς την επίλυση του ευθύ κινηματικού.

Επίσης διακρίνουμε στην Γραφική Παράσταση 5.37 (a) η άρθρωση q_1 μεταβάλλει περισσότερο το προσανατολισμό f του δακτύλου ενώ ακολουθεί η q_2 και στην συνέχεια η q_3 .

Σύμφωνα με την Γραφική Παράσταση 5.37 (b) παρουσιάζεται ένα γραμμικό σφάλμα ανάλογο της μετατόπισης με μέγιστο 3.8 mm. Εφόσον το μήκος του δακτύλου είναι 100 mm. Το ποσοστό του σφάλματος στην ακρίβεια των μετρήσεων συσχέτισμού των κινηματικών εξισώσεων είναι το μέγιστο σφάλμα ως προς την μετατόπιση. Δηλαδή έχουμε ένα **σφάλμα στην ακρίβεια των κινηματικών εξισώσεων της τάξης του 3.8%**.

Στην Εικόνα 5.11 διακρίνονται οι εικόνες μέσα από το λογισμικό Matlab για διάφορες μετατοπίσεις του ρομποτικού δακτύλου με τον εντοπισμό των αρθρώσεων και την σύνδεση των φαλάγγων για την εύρεση των γωνιών.



Εικόνα 5.11: Κίνηση του ρομποτικού δακτύλου Δείκτη για μετατοπίσεις Δx και καταγραφή των θέσεων των αρθρώσεων μέσα από το πρόγραμμα Matlab, (a) για $\Delta x=0$ mm, (b) για $\Delta x=4$ mm, (c) για $\Delta x=8$ mm, (d) για $\Delta x=12$ mm, (e) για $\Delta x=16$ mm, (f) για $\Delta x=19$ mm.

5.8 Αποτελέσματα κινηματικής ανάλυσης

Στον παρακάτω πίνακα διακρίνονται κάποιες βασικές κινηματικές εξισώσεις πρώτου βαθμού που περιγράφουν την κίνηση των αρθρώσεων για όλα τα δάκτυλα. Επίσης αναφέρεται και το μέγιστο σφάλμα που προκύπτει από την πραγματική θέση σε σχέση τις λυμένες εξισώσεις των κινηματικών.

Οι εξισώσεις που επιλέχθηκαν να παρουσιαστούν στον παρακάτω πίνακα είναι οι βασικές ώστε να μπορούμε να υπολογίσουμε την γωνία κάθε άρθρωσης σε σχέση με την μετατόπιση. Αυτές είναι η $q_1(\Delta x)$, $q_2(q_1)$, $q_3(q_1)$. Επίσης διακρίνεται και η εξίσωση του συνολικού προσανατολισμού του δακτύλου f . Με βάση τις παρακάτω εξισώσεις μπορούμε να γνωρίζουμε πλήρως την κίνηση των ρομποτικών δακτύλων του χεριού όταν αυτά κινούνται ελεύθερα, χωρίς κάποιο εμπόδιο.

<i>Finger</i>	$q_1(\Delta x)$	$q_2(q_1)$	$q_3(q_1)$	f	<i>Error</i> [mm]
<i>Index</i>	$4.4\Delta x+19.8$	$0.7q_1+6.7$	$0.8q_1-8.5$	$10.7\Delta x+46.7$	3.9
<i>Middle</i>	$5\Delta x+17.4$	$0.5q_1-5.4$	$0.6q_1+1.5$	$10.7\Delta x+33.1$	6.3
<i>Ring</i>	$7.5\Delta x+29$	$0.3q_1-4.8$	-	$10.5\Delta x+35$	4.5
<i>Pinky</i>	$7.2\Delta x+14.3$	$0.5q_1-6.1$	-	$10.8\Delta x+28.6$	4.1
<i>Thumb</i>	$7\Delta x+40$	$0.3q_1-13.3$	-	$9.3\Delta x+39$	3.7

Πίνακας 5.2: Συγκεντρωτικό πίνακας με τις βασικές κινηματικές εξισώσεις των δακτύλων

6 Χαρακτηρισμός ρομποτικών δακτύλων

6.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε πειραματική μέτρηση ορισμένων χαρακτηριστικών των ρομποτικών δακτύλων, ώστε τα δεδομένα που συλλέχθηκαν να αξιοποιηθούν σε μελλοντική έρευνα, για την δημιουργία δυναμικών εξισώσεων στην κινηματική των ρομποτικών δακτύλων. Πιο συγκεκριμένα μετρήθηκε πειραματικά η σταθερά του ζεύγους των ελατηρίων που βρίσκεται σε κάθε σύνδεσμο των φαλάγγων, και επιτρέπει την κάμψη τους. Στην συνέχεια μετρήθηκε πειραματικά η σταθερά όλου του ρομποτικού δακτύλου ως ένα ελατήριο.

6.2 Μέτρηση ζεύγους ελατηρίων σε κάμψη

6.2.1 Γενική περιγραφή

Στο παρόν υποκεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί η μέτρηση της σταθεράς των ελατηρίων, που βρίσκονται στους συνδέσμους των ρομποτικών δακτύλων, και επιτρέπουν την κάμψη των δακτύλων. Η εύρεση της σταθεράς του ελατηρίου σε κάμψη θα πραγματοποιηθεί πειραματικά.

Ο υπολογισμός της σταθεράς του ελατηρίου θα γίνει με βάση την εξίσωση (6.1), όπου η ροπή ισούται με το γινόμενο της σταθεράς επί την γωνία που έχει στραφεί. Οπότε για να υπολογιστεί η σταθερά του ελατηρίου αρκεί σε μια συγκεκριμένη ροπή που ασκείται στην διάταξη να μετρηθεί η γωνία περιστροφής.

$$T = K \cdot \varphi \quad (6.1)$$

6.2.2 Πειραματική διάταξη

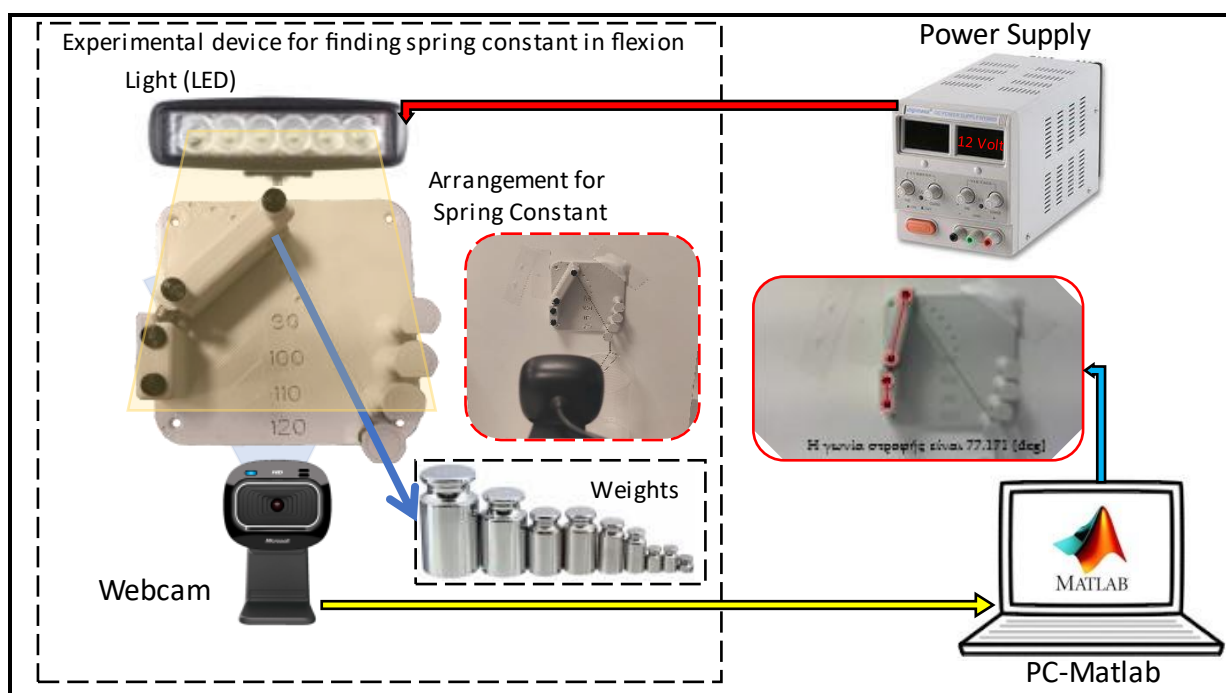
Η μέτρηση της σταθεράς του ελατηρίου θα πραγματοποιηθεί με την χρήση της πειραματικής διάταξης που διακρίνεται στην **Εικόνα 6.1**. Έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί με την χρήση τρισδιάστατου εκτυπωτή, ειδική πειραματική διάταξη για την μέτρηση των ελατηρίων σε κάμψη.

Η πειραματική διάταξη στερεώνεται σε σταθερή βάση, όπου πάνω σε αυτή εισέρχεται το ζεύγος των ελατηρίων, και στην συνέχεια συνδέεται και το στέλεχος όπου θα περιστρέφεται. Σε συγκεκριμένο μήκος στο στέλεχος είναι στερεωμένο σχοινί όπου στο άκρο του κρεμιούνται βαρίδια γνωστού βάρους για την εφαρμογή ροπής στο σύστημα.

Στην συνέχεια με την χρήση κάμερας που είναι τοποθετημένη σε κατάλληλο μήκος απέναντι από την πειραματική διάταξη, αναγνωρίζει με την χρήση κώδικα στο λογισμικό Matlab τα markers, που είναι πάνω στην πειραματική διάταξη. Με αποτέλεσμα να μας εμφανίζει την γωνία που έχει στραφεί το στέλεχος, σε σχέση με το σταθερό σημείο της πειραματικής διάταξης.

Επίσης στην πειραματική διάταξη εφαρμόζεται σταθερός φωτισμός για να μην επηρεάζεται η αναγνώριση των markers. Συγκεκριμένα ο φωτισμός παρέχεται από λάμπες Led και τροφοδοτείται από σταθερή πηγή τάσης.

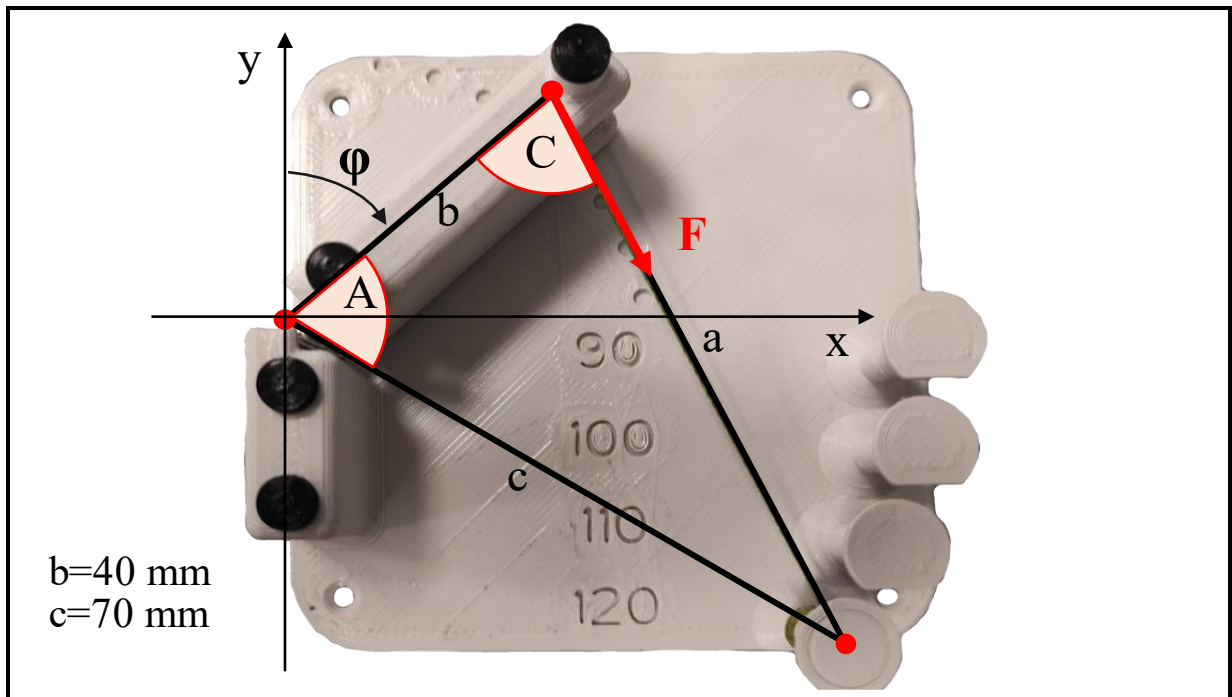
Τέλος με την κατάλληλη επεξεργασία που θα περιγραφεί στο παρακάτω κεφάλαιο και ορίζοντας την δύναμη που εξασκούμε στο σύστημα στην κάθε μέτρηση, το πρόγραμμα υπολογίζει την σταθερά του ελατηρίου σε κάμψη.



Εικόνα 6.1: Πειραματική διάταξη για την μέτρηση της σταθεράς του ελατηρίου σε κάμψη.

6.2.3 Ανάλυση πειραμάτων

Σε συγκεκριμένο μήκος στον σύνδεσμο θα δεθεί σχοινί όπου στο άκρο του θα βρίσκεται μεταβαλλόμενο γνωστό βάρος. Με σκοπό όσο αυξάνεται αυτό το βάρος να περιστρέφεται και το στέλεχος της πειραματικής διάταξης.



Εικόνα 6.2: Ανάλυση της πειραματικής διάταξης για την εύρεση της γωνίας C που ασκείται η δύναμη F .

Όπως διακρίνεται και από την **Εικόνα 6.2** η δύναμη F που ασκούμε στο σύστημα βρίσκεται υπό γωνία C . Όμως η πειραματική διάταξη έχει σχεδιαστεί ώστε να μας παρέχει δεδομένα για την **γωνία φ που είναι η γωνία στροφής**. Με βάση την γωνία φ μπορούμε να υπολογίσουμε την γωνία A ως $A=120-\varphi$ σε μοίρες.

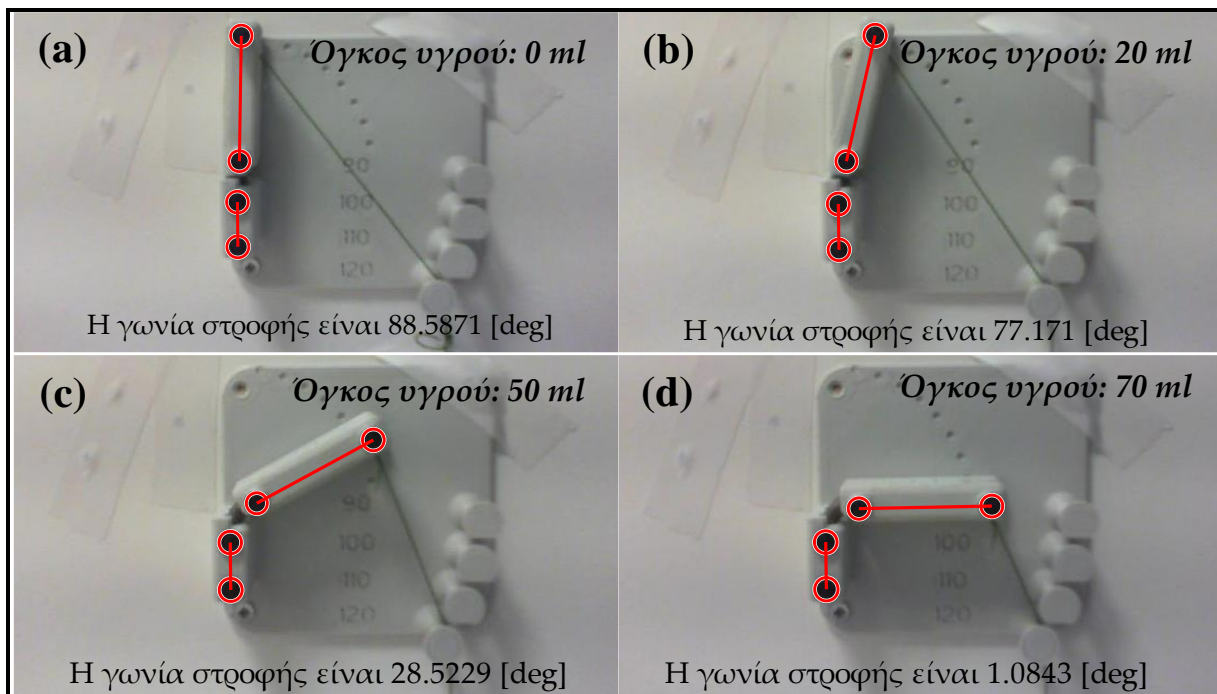
Για να υπολογίσουμε την ροπή χρειάζεται να υπολογιστεί και η γωνία C . Για να επιλυθεί η ζητούμενη γωνία θα χρησιμοποιηθεί η εξίσωση **(6.3)**, αφού πρώτα υπολογιστεί το μήκος της πλευράς a από την εξίσωση **(6.2)**, έχοντας ως δεδομένα τις πλευρές b και c που είναι σταθερές.

$$a = \sqrt{b^2 + c^2 - 2bc \cos A} \quad (6.2) \quad C = \cos^{-1} \left(\frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ba} \right) \quad (6.3)$$

Ο γενικός τύπος της ροπής περιγράφεται από την εξίσωση **(6.4)**. Για να υπολογιστεί η ροπή στην παρούσα μελέτη θα χρησιμοποιηθεί η εξίσωση **(6.5)**. Η εξίσωση **(6.5)** περιγράφει την ροπή που ασκεί το η δύναμη F στην πειραματική διάταξη εξαιτίας των βαριδιών που προστίθενται. Όπου η ροπή ισούται με το γινόμενο της δύναμης που ασκείται στην κατασκευή, το ημίτονο της γωνίας που εφαρμόζεται η δύναμη στην κατασκευή εφόσον δεν είναι κάθετη και το μήκος από το σημείο που εφαρμόζεται η δύναμη έως το σημείο περιστροφής.

Η ροπή που ασκεί η δύναμη F στην πειραματική διάταξη θα ισούται και την αντίθετη ροπή που ασκεί το ελατήριο για να ισορροπεί το σύστημα. Όπου η ροπή που ασκεί το ελατήριο προκύπτει από την σχέση **(6.1)**.

$$\vec{T} = \vec{r} \times \vec{F} \quad (6.4) \quad T = bF \sin C \quad (6.5)$$



Εικόνα 6.3: Γωνία στροφής του στελέχους της πειραματικής διάταξης με την άσκησης διαφόρων βαρών (a) χωρίς την εφαρμογή βάρους, (b) για βάρος 20 gr, (c) για βάρος 50 gr, (d) για βάρος 70 gr.

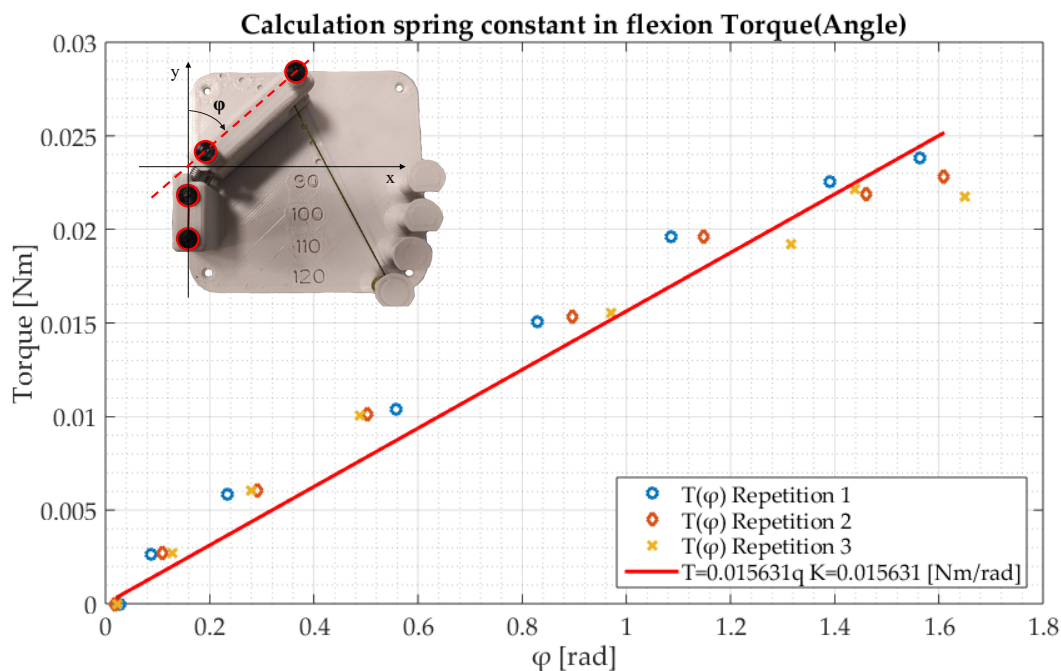
Στην Εικόνα 6.3 διακρίνονται οι επεξεργασμένες φωτογραφίες που τραβήχτηκαν μέσα από πρόγραμμα, για την εύρεση της γωνίας στροφής για διάφορα βάρη. Το βάρος που χρησιμοποιήθηκε είναι νερό για να μπορεί να μετρηθεί σε ml. Επειδή η πυκνότητα του νερού ισούται με $\rho=1000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ ο λόγος ml/gr θα είναι 1:1. Δηλαδή τα 20 ml νερού θα ισούνται με 20 gr.

Το πρόγραμμα που έχει σχεδιαστεί στο λογισμικό Matlab λαμβάνει εικόνα από την κάμερα την στιγμή που επιθυμεί ο χρήστης. Πριν ληφθεί η εικόνα ο χρήστης πρέπει να εισάγει πόσο βάρος έχει προσθέσει στην πειραματική διάταξη ώστε να δημιουργηθεί η ροπή που επιθυμούμε. Το πρόγραμμα αναγνωρίζει τους markers που είναι τοποθετημένοι στην πειραματική διάταξη. Εφόσον τους αναγνωρίσει υπολογίζει την γωνία στροφής φ που έχει περιστραφεί το στέλεχος της πειραματικής διάταξης.

Στο επόμενο βήμα υπολογίζει την ροπή που ασκείται στο σύστημα με βάση τα βάρη που του έχουμε ορίσει. Και στο τέλος εξάγει γραφική παράσταση που συσχετίζει την ροπή του ελατηρίου T με την γωνία στροφής φ και την προσεγγίζει με μία ευθεία. Από την ευθεία που την έχει προσεγγίσει υπολογίζουμε την σταθερά του ελατηρίου σε κάμψη K .

Συνολικά μετρήθηκαν οι σταθερές των ελατηρίων σε κάμψη από 8 ζεύγη ελατηρίων που ήταν τοποθετημένα στα ρομποτικά δάκτυλα. Το εύρος της εφαρμογής των βαριδίων ήταν από 0 μέχρι 80 gr με βήμα 10 gr. Οπότε για κάθε από τα 8 ζεύγη ελατηρίων έχουμε 9 μετρήσεις επί 3 επαναλήψεις.

6.2.4 Αποτελέσματα πειραμάτων



Γραφική Παράσταση 6.1: Γραφική παράσταση αποτύπωσης της σταθεράς του ελατηρίου σε σχέση της ροπής ως προς την γωνία που έχει στραφεί.

Στην **Γραφική Παράσταση 6.1** διακρίνονται για ένα ζεύγος ελατηρίων οι μετρήσεις για τις τρεις επαναλήψεις που πραγματοποιήθηκαν. Εμφανίζεται η εξίσωση της ροπής ως προς την γωνία στρόφησης, και με βάση τον μέσο όρο των τριών επαναλήψεων προκύπτει η ευθεία $T=0,015\varphi$, όπου ο σταθερός όρος στον συντελεστή της γωνίας φ αποτελεί την σταθερά του ελατηρίου σε κάμψη. Δηλαδή για το συγκεκριμένο παράδειγμα η σταθερά του ελατηρίου σε κάμψη ισούται με $K=0,015$ [Nm/rad].

Στα παραπάνω πειράματα μετρήθηκε η ελάχιστη σταθερά του ελατηρίου ως $0,014$ [Nm/rad] και η μέγιστη σταθερά που είχαν συνολικά τα ελατήρια ως $0,016$ [Nm/rad].

Με βάση τον μέσο όρο των σταθερών των 8 ζευγών ελατηρίων προκύπτει ότι:

$$K=0,015 \text{ [Nm/rad]}$$

6.3 Πειραματική μέτρηση σταθεράς ρομποτικών δακτύλων

6.3.1 Γενική περιγραφή

Στην παρούσα πειραματική μέτρηση θα πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός της σταθεράς των ρομποτικών δακτύλων ως ελατήριο. Η σταθερά K των ελατηρίων, γνωστή και ως σταθερά ελαστικότητας ή σταθερά ελατηρίου, αναφέρεται στην αντίδραση ενός ελατηρίου όταν του ασκείται μια δύναμη που το επιμηκώνει ή το συμπιέζει. Η σταθερά K είναι μια μέτρηση της σκληρότητας ή της ακαμψίας του ελατηρίου και καθορίζει το πόσο εύκολα ή δύσκολα μπορεί το ελατήριο να αλλοιώσει το μήκος του όταν του ασκείται μια εξωτερική δύναμη.

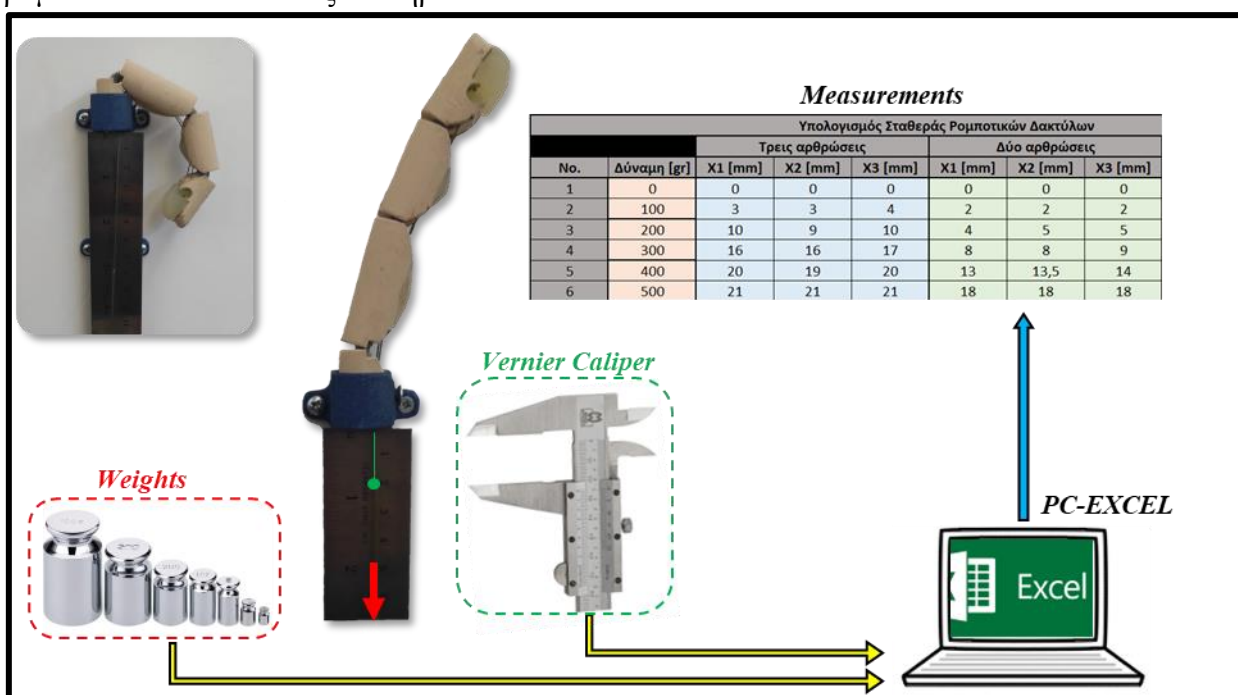
Η σταθερά K ορίζεται ως η αναλογία μεταξύ της δύναμης που ασκείται στο ελατήριο και της απόστασης που μετακινείται το ελατήριο από την ισορροπία του. Μαθηματικά, αυτή η σχέση μπορεί να εκφραστεί ως

$$F = K \cdot \Delta x \quad (6.6)$$

Στην συγκεκριμένη περίπτωση που μελετάμε θα θεωρήσουμε όλο το **ρομποτικό δάκτυλο ως ένα ελατήριο**. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να συνδέσουμε την δύναμη που εφαρμόζουμε στον τένοντα με την επιμήκυνση του τένοντα. Δηλαδή όσο περισσότερη δύναμη ασκούμε στον τένοντα του ρομποτικού δακτύλου, κάμπτεται το ρομποτικό δάκτυλο, με αποτέλεσμα να επιμηκύνεται ο τένοντας.

6.3.2 Πειραματική διάταξη

Στο συγκεκριμένο πείραμα η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε είναι αρκετά απλή, καθώς δεν έγινε χρήση μηχανικής όρασης όπως στα προηγούμενα πειράματα. Στην παρακάτω εικόνα διακρίνεται μια σχηματική αναπαράσταση του πειράματος, για την μέτρηση της σταθεράς των ρομποτικών δακτύλων ως ελατήριο.



Εικόνα 6.4: Πειραματική διάταξη για την μέτρηση της σταθεράς των ρομποτικών δακτύλων.

Αρχικά το ρομποτικό δάκτυλο που θα μετρηθεί τοποθετείται σε κατακόρυφη θέση πάνω σε ειδικά σχεδιασμένη βάση που επιτρέπει στον τένοντα την ελεύθερη κίνηση, καθώς και δεν περιορίζει καθόλου την κίνηση του ρομποτικού δακτύλου. Στην συνέχεια τοποθετείται ένας μάρκερ πάνω στον τένοντα ώστε να γνωρίζουμε την αρχική θέση, έτσι θα μπορούσαμε να υπολογίσουμε την μετατόπιση του τένοντα.

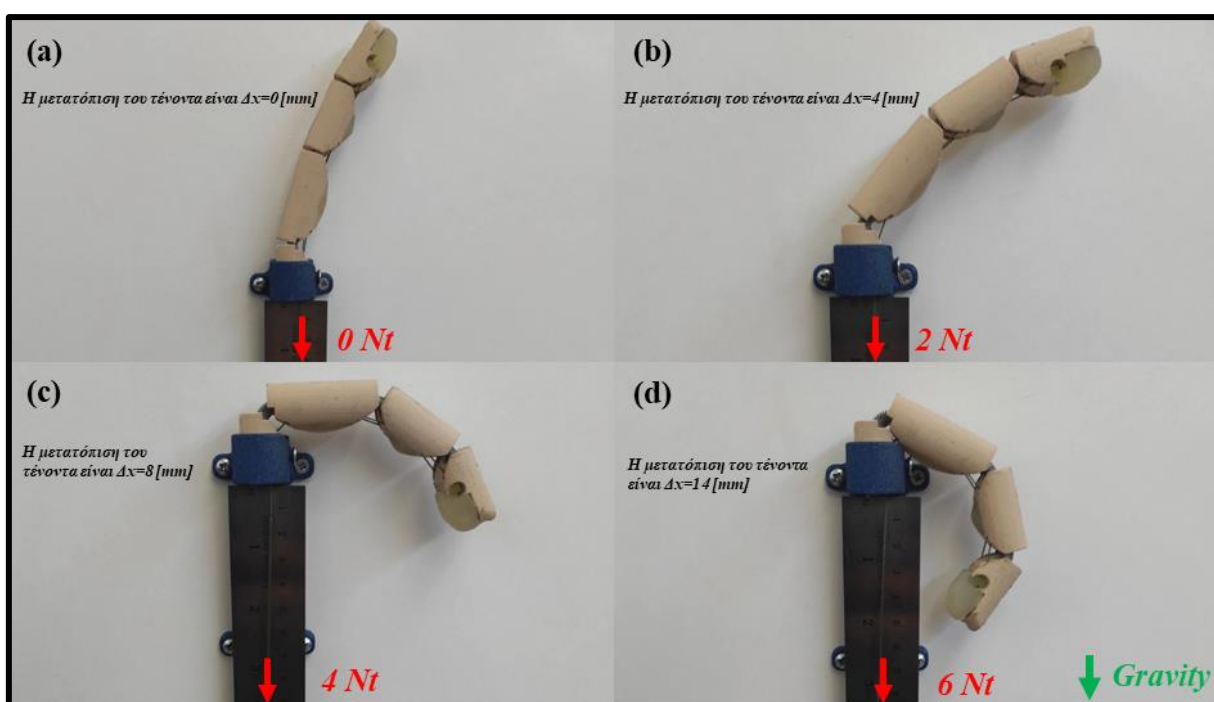
Στο κάτω μέρος του τένοντα σταθεροποιούνται τα βαρίδια με εύρος από 0-600 gr. Για κάθε βαρίδι που τοποθετείται στον τένοντα, μετρίεται με την χρήση παχύμετρου και η μετατόπιση του μάρκερ που είναι τοποθετημένο στο τένοντα. Σε κάθε μέτρηση καταγράφουμε την

μετατόπιση και το βάρος που ασκείται στον τένοντα. Οι μετρήσεις για κάθε δάκτυλο πραγματοποιούνται από τρεις επαναλήψεις, ώστε να διασφαλιστεί η εγγύτητα των αποτελεσμάτων.

Όλα τα αποτελέσματα καταγράφονται με την χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή σε ένα ειδικό αρχείο excel, όπου αργότερα θα γίνει η κατάλληλη επεξεργασία για να υπολογιστεί η σταθερά των ρομποτικών δακτύλων ως ελατήριο.

6.3.3 Ανάλυση πειραμάτων

Εφόσον τα δεδομένα από το πείραμα έχουν ληφθεί πρέπει να επεξεργαστούν κατάλληλα ώστε να λάβουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα. Τα δεδομένα που έχουμε συλλέξει και καταγράψαμε σε ένα αρχείο excel, μεταφέρθηκαν στο λογισμικό Matlab, ώστε να γίνει η κατάλληλη επεξεργασία και να ληφθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα μαζί με τις γραφικές παραστάσεις.



Εικόνα 6.5: Επιμήκυνση του τένοντα του ρομποτικού δακτύλου τριών αρθρώσεων με την άσκηση διάφορων βαρών (a) με 0 Nt έχουμε μετατόπιση 0 mm, (b) με 2 Nt έχουμε μετατόπιση 4 mm, (c) με 4 Nt έχουμε μετατόπιση 8 mm, (d) με 6 Nt έχουμε μετατόπιση 14 mm.

Μέσα από το λογισμικό Matlab πραγματοποιήθηκαν οι κατάλληλες αλλαγές στις μονάδες από gr σε Nt, και στην συνέχεια υπολογίστηκαν οι σταθερές K των ρομποτικών δακτύλων με την συνάρτηση ευθείας. Επίσης έγινε προσπάθεια να προσεγγιστεί και με πολυωνυμική συνάρτηση δευτέρου βαθμού. Επειδή τα αποτελέσματα έχουν μια προσεγγιστική γραμμικότητα δεν έγινε περαιτέρω ανάλυση με την χρήση πολυωνυμικών συναρτήσεων.

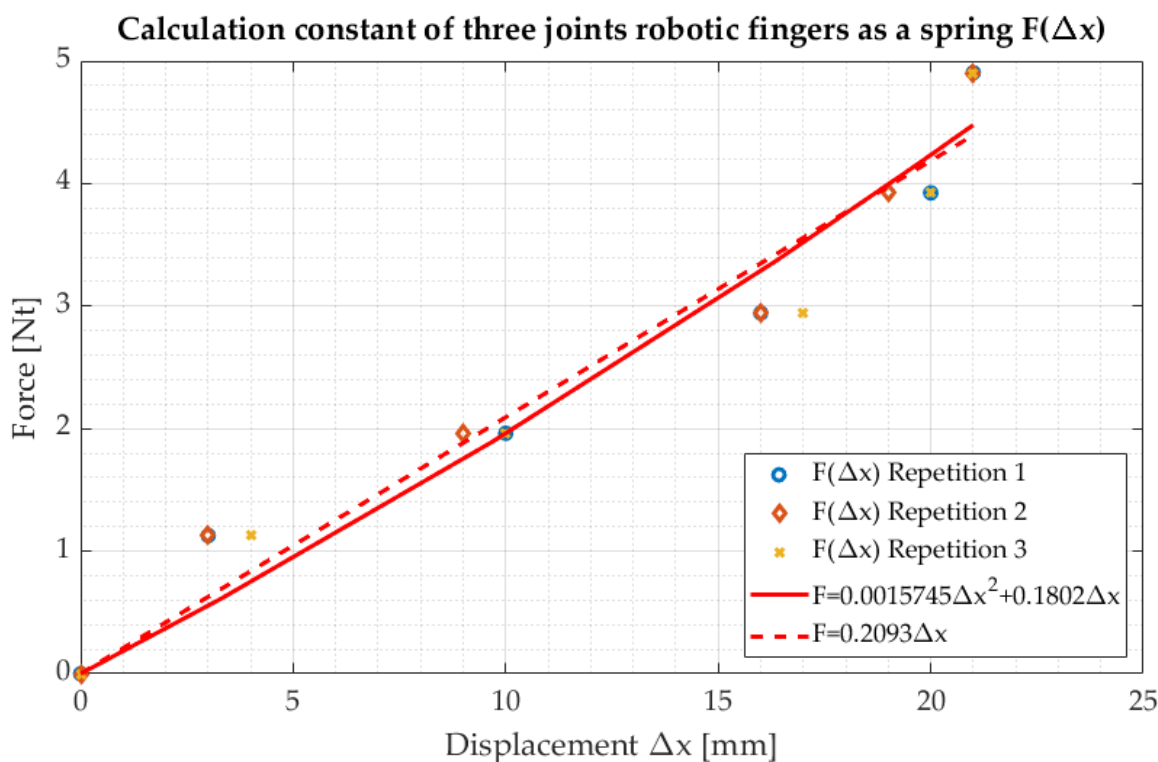
Στην παρακάτω εικόνα διακρίνεται τέσσερα στιγμιότυπα από την πειραματική μέτρηση της σταθεράς του ρομποτικού δακτύλου τριών βαθμών ελευθερίας. Στην πρώτη εικόνα (a) δεν ασκείται δύναμη στον τένοντα, συνεπώς η μετατόπιση είναι μηδέν, παρατηρούμε βέβαια μια κάμψη στο ρομποτικό δάκτυλο. Αυτή οφείλεται σε πλαστική παραμόρφωση των συνδέσμων των ρομποτικών δακτύλων εξαιτίας της συνεχόμενης χρήσης, καθώς και στο βάρος του δακτύλου. Σε όλα τα πειράματα έχει ληφθεί υπόψιν.

Στις υπόλοιπες εικόνες (b),(c),(d), παρατηρούμε ότι όσο μεγαλύτερη δύναμη ασκούμε στον τένοντα, τόσο περισσότερο κάμπτεται το ρομποτικό δάκτυλο, με αποτέλεσμα να επιμηκύνεται ο τένοντας που βρίσκεται εκτός των φαλάγγων.

6.3.4 Αποτελέσματα πειραμάτων

Παρακάτω διακρίνονται τα αποτελέσματα των παραπάνω πειραμάτων για τον υπολογισμό των σταθερών των ρομποτικών δακτύλων για δύο και για τρεις αρθρώσεις. Αυτό που παρατηρείται είναι ότι και στις δύο γραφικές παραστάσεις δεν έχουμε πλήρη γραμμικότητα παρόλα αυτά μπορούμε να προσδιορίσουμε τα K για δύο και τρεις αρθρώσεις. Παρατηρείται επίσης και μεγαλύτερη γραμμικότητα στα ρομποτικά δάκτυλα των τριών αρθρώσεων παρά των δύο αρθρώσεων.

Επομένως στην παρακάτω γραφική παράσταση εμφανίζεται η σχέση δύναμης ως προς την μετατόπιση του τένοντα και με βάση την συνάρτηση της ευθείας που περνάει από το σημείο 0, μπορούμε να υπολογίσουμε προσεγγιστικά το K .

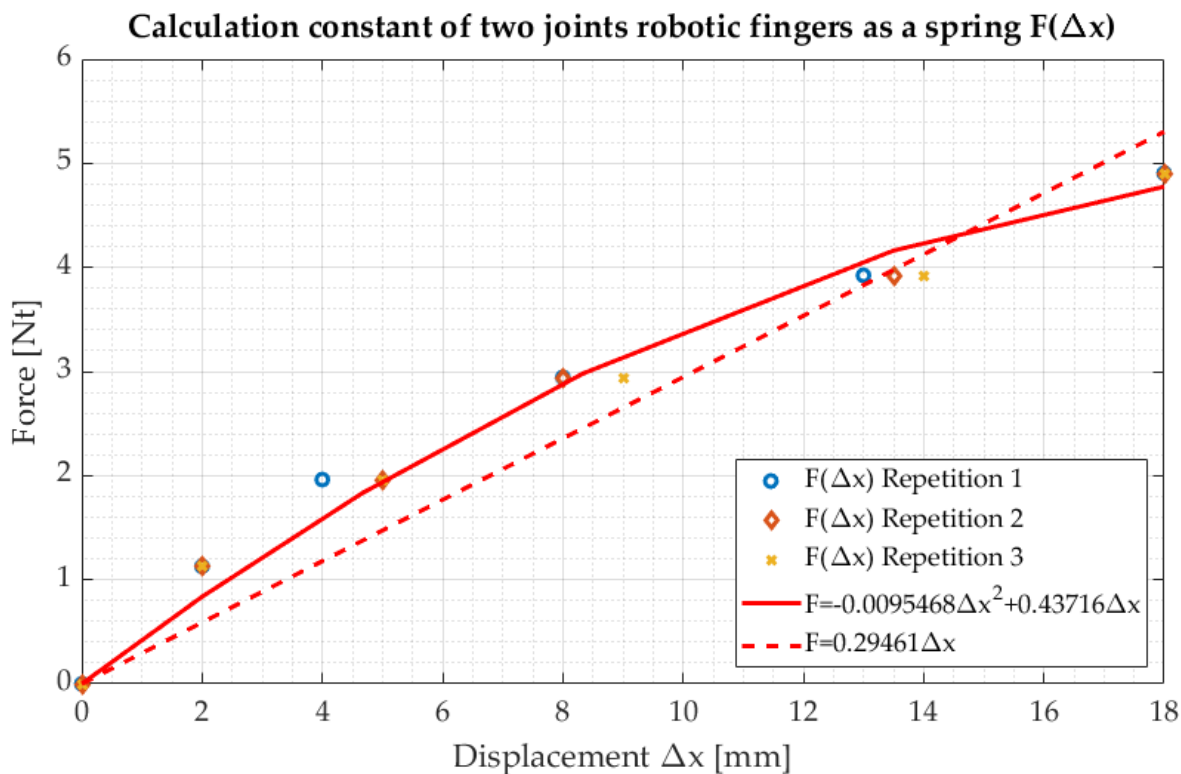


Γραφική Παράσταση 6.2: Γραφική παράσταση αποτύπωσης της σταθεράς του ρομποτικού δακτύλου τριών αρθρώσεων σε σχέση της δύναμης ως προς την μετατόπιση του τένοντα.

Συνεπώς η σταθερά του ρομποτικού δακτύλου τριών βαθμών ελευθερίας είναι:

$$K_{three_joints}=0,21 \text{ [Nt/mm]}$$

Στην συνέχεια στην παρακάτω γραφική παράσταση εμφανίζεται η σχέση δύναμης ως προς την μετατόπιση του τένοντα και με βάση την συνάρτηση της ευθείας που περνάει από το σημείο 0, μπορούμε να υπολογίσουμε προσεγγιστικά το K , για τα ρομποτικά δάκτυλα δύο αρθρώσεων.



Γραφική Παράσταση 6.3: Γραφική παράσταση αποτύπωσης της σταθεράς του ρομποτικού δακτύλου δύο αρθρώσεων σε σχέση της δύναμης ως προς την μετατόπιση του τένοντα.

Συνεπώς η σταθερά του ρομποτικού δακτύλου δύο βαθμών ελευθερίας είναι:

$$K_{two_joints}=0,29 \text{ [Nt/mm]}$$

Τα αποτελέσματα για την σταθερά δακτύλων των ρομποτικών δακτύλων δύο αρθρώσεων ήταν τα ίδια για τα δάκτυλα pinky και ring, για αυτό τον λόγο δεν έγινε περαιτέρω ξεχωριστή ανάλυση. Αντίστοιχα για τα ρομποτικά δάκτυλα τριών αρθρώσεων index και middle η σταθερά του ρομποτικού δακτύλου σαν ελατήριο ήταν παρόμοια.

Robotic Fingers	F_L	F_P
Two joints	$0.29 \cdot \Delta x$	$0.01 \cdot \Delta x^2 + 0.44 \Delta x$
Three Joints	$0.21 \cdot \Delta x$	$0.002 \cdot \Delta x^2 + 0.18 \Delta x$

Πίνακας 6.1: Συγκεντρωτικός πίνακας με τις εξισώσεις υπολογισμού της δύναμης που ασκείται στον τένοντα όταν το μετατοπίζουμε.

6.4 Πειραματική μέτρηση τριβής

Στο παρών κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί η μέτρηση του συντελεστή τριβής. Η τριβή δημιουργείται ανάμεσα στον τένοντα και τα σημεία που εφάπτεται πάνω στις φάλαγγες των ρομποτικών δακτύλων. Η μέτρηση του συντελεστή τριβής των ρομποτικών δακτύλων θα πραγματοποιηθεί πειραματικά.

Ο υπολογισμός του συντελεστή τριβής θα γίνει με βάση την εξίσωση capstan. Η εξίσωση capstan αναφέρεται σε μια σχέση που περιγράφει τη σχέση μεταξύ της δύναμης που ασκείται

σε έναν τένοντα ή ένα σχοινί που περιπλέκεται γύρω από έναν σταθερό κύλινδρο (capstan) και της τάσης που δημιουργείται στο σχοινί. Αυτή η εξίσωση είναι πολύ χρήσιμη στη μηχανική, ειδικά σε εφαρμογές που σχετίζονται με τη μετάδοση κίνησης και δύναμης μεταξύ δύο στοιχείων μέσω ενός σχοινιού ή ενός τένοντα.

$$F' = Fe^{\mu\varphi} \quad (6.7)$$

όπου:

- F' : είναι η τάση που δημιουργείται στο ένα άκρο του σχοινιού ή του τένοντα
- F : είναι η τάση που ασκείται στο άλλο άκρο του σχοινιού ή του τένοντα
- μ : είναι ο συντελεστής τριβής μεταξύ του σχοινιού ή του τένοντα και της επιφάνειας του κυλίνδρου
- φ : είναι η γωνία περιστροφής του κυλίνδρου

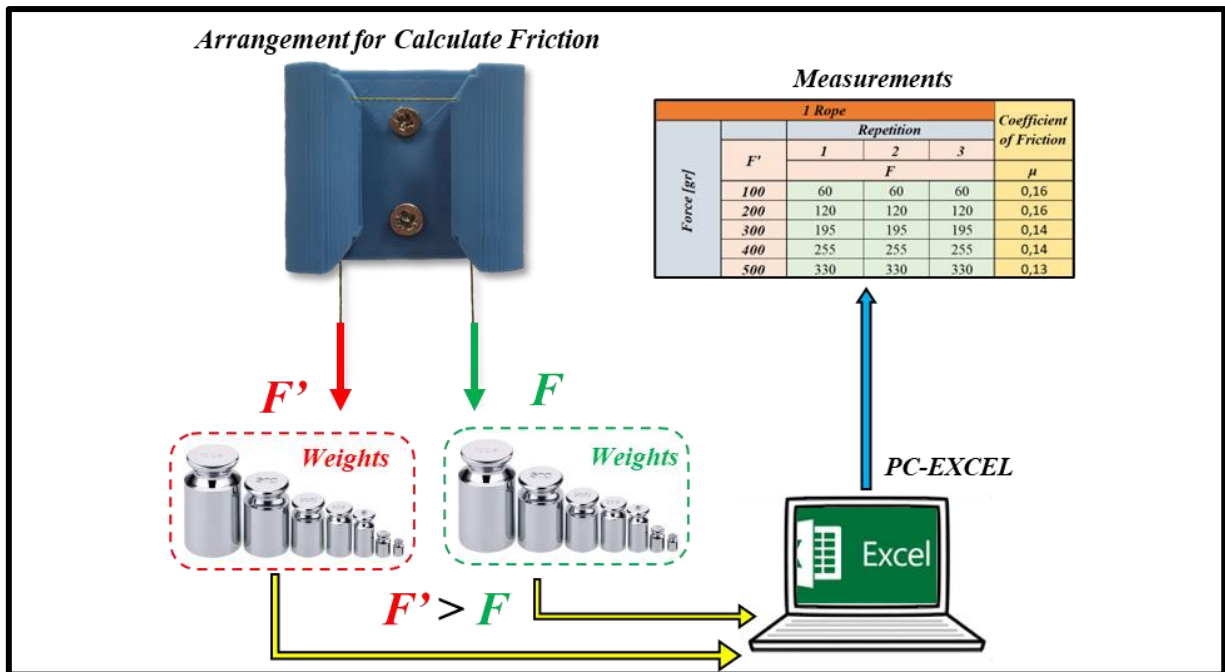
Η εξίσωση δηλώνει ότι η τάση στο ένα άκρο του σχοινιού ή του τένοντα είναι ανάλογη της τάσης στο άλλο άκρο, με ένα παράγοντα που εξαρτάται από τον συντελεστή τριβής και τη γωνία περιστροφής του κυλίνδρου. Ο συντελεστής τριβής μπορεί να εξαρτάται από τα υλικά που χρησιμοποιούνται, την επιφάνεια επαφής και άλλες παραμέτρους που επηρεάζουν την τριβή.

Η εξίσωση του καπσάνου είναι χρήσιμη σε πολλές εφαρμογές, όπως στις μεταδόσεις με σχοινιά, στα συστήματα ελέγχου τένοντα και στη σχεδίαση μηχανισμών που χρησιμοποιούν τένοντες για τη μεταφορά κίνησης και δύναμης. Μέσω της εξίσωσης του καπσάνου, μπορούμε να αναλύσουμε και να προβλέψουμε τις δυνάμεις και τις τάσεις που ασκούνται στα σχοινιά ή τους τένοντες κατά την κίνηση και τη μετάδοση φορτίου σε αυτές τις εφαρμογές.

6.4.1 Πειραματική διάταξη

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω στην παρούσα πειραματική μέτρηση μελετάται ο συντελεστής τριβής του τένοντα με τις φάλαγγες των ρομποτικών δακτύλων. Εξαιτίας της γεωμετρίας των ρομποτικών δακτύλων είναι δύσκολο να υπολογιστεί ο συντελεστής τριβής πάνω στα ρομποτικά δάκτυλα, για αυτό τον λόγο κατασκευάστηκε μια πειραματική διάταξη, από το ίδιο υλικό με τα ρομποτικά δάκτυλα που θα προσομοιώσει τα ρομποτικά δάκτυλα για να υπολογιστεί ο συντελεστής τριβής.

Για να υπολογίσουμε τον συντελεστή τριβής θα χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση capstan. Με βάση αυτή την εξίσωση αυτό που θα κάνουμε στην πράξη, είναι να δέσουμε στις δύο άκρες του σχοινιού δύο βαρίδια με το ίδιο βάρος. Θα μεταβάλουμε το βάρος του ενός βαριδίου μικραίνοντας το, μέχρι να μην βρίσκεται πλέον σε κατάσταση ισορροπίας. Μόλις αρχίζει και μετακινείται ελάχιστα σημειώνουμε το βάρος που έχουμε μεταβάλει.



Εικόνα 6.6: Πειραματική διάταξη για την μέτρηση της τριβής του τένοντα των ρομποτικών δακτύλων.

Στην ουσία εξαιτίας της τριβής που αναπτύσσεται η δύναμη που χρειάζεται η μία πλευρά για να σταθεροποιηθεί με την άλλη είναι μικρότερη. Αρκεί να βρούμε την διαφορά και έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή τριβής.

Εφόσον έχουμε καταγράψει τα δεδομένα σε ένα υπολογιστικό φύλλο excel, μπορούμε εφαρμόζοντας την εξίσωση capstan να υπολογίσουμε τον συντελεστή τριβής

6.4.2 Ανάλυση πειραμάτων

Για την πειραματική μέτρηση της τριβής χρησιμοποιήθηκε η πειραματική διάταξη που διακρίνεται στην **Εικόνα 6.7**, με την βοήθεια της εξίσωσης capstan [Εξίσωση 6.8]. Η πειραματική διάταξη έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να προσομοιώνει δύο φάλαγγες οι οποίες βρίσκονται σε γωνία 180 μοίρες μεταξύ τους, ώστε να έχουμε την μέγιστη τριβή που θα μπορούσαμε.

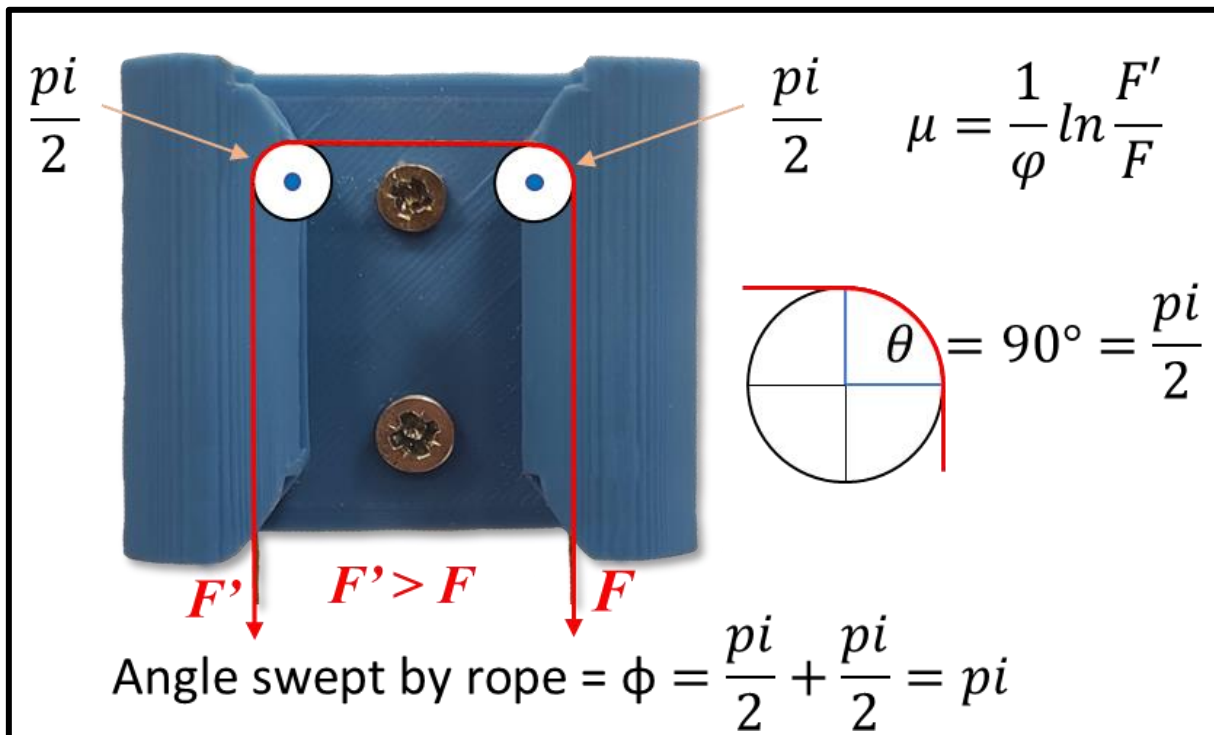
Ο τένοντας που περνάει μέσα από τις φάλαγγες, επειδή ακουμπάει στην άκρες δημιουργεί μια συνολική γωνία 180 μοίρες, όπου είναι η γωνία επαφής. Σε κάθε φάλαγγα έχουμε μια γωνία επαφής 90 μοίρες, προσθέτοντας την γωνία επαφής και των δύο φαλάγγων προκύπτει η συνολική γωνία [Εξίσωση 6.9].

Παρακάτω διακρίνεται η εξίσωση capstan λυμένη ως προς τον συντελεστή τριβής, καθώς και η συνολική γωνία επαφής του τένοντα με την φάλαγγα

$$\mu = \frac{1}{\varphi} \ln \frac{F'}{F} \quad (6.8)$$

$$\varphi = \frac{\pi i}{2} + \frac{\pi i}{2} = \pi i \quad (6.9)$$

Την συνολική γωνία επαφής την χρειαζόμαστε για να εφαρμοστεί στην τελική εξίσωση, και έτσι προκύπτει η [Εξίσωση 6.10]. Εφαρμόζοντας τα δεδομένα που λήφθηκαν πειραματικά, μπορούμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή τριβής των ρομποτικών δακτύλων.



Εικόνα 6.7: Ανάλυση των δυνάμεων της πειραματικής διάταξης για την εύρεση του συντελεστή τριβής του τένοντα με τις φάλαγγες των ρομποτικών δακτύλων.

Τέλος προκύπτει η τελική εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής των ρομποτικών δακτύλων.

$$\mu = \frac{1}{\pi} \ln \frac{F'}{F} \quad (6.10)$$

6.4.3 Αποτελέσματα πειραμάτων

Στα παραπάνω πειράματα, μετρήθηκε ο ελάχιστος συντελεστής τριβής ως 0,13 και ο μέγιστος συντελεστής τριβής ως 0,16.

Με βάση τον μέσο όρο των συντελεστών τριβής, που έχει προκύψει από τα πειράματα με διαφορετικά βάρη προκύπτει ότι:

$$\mu=0,15$$

6.5 Μάζες και ροπές αδράνειας ρομποτικών δακτύλων

6.5.1 Γενική περιγραφή

Στην τελευταία πειραματική μέτρηση που πραγματοποιήθηκε για τα ρομποτικά δάκτυλα υπολογίστηκαν οι μάζες και οι ροπές αδράνειας των φαλάγγων των ρομποτικών δακτύλων, δύο και τριών αρθρώσεων. Οι μάζες των φαλάγγων με την χρήση μια απλής ζυγαριάς οικιακής χρήσης και ακριβείας 1 gr.

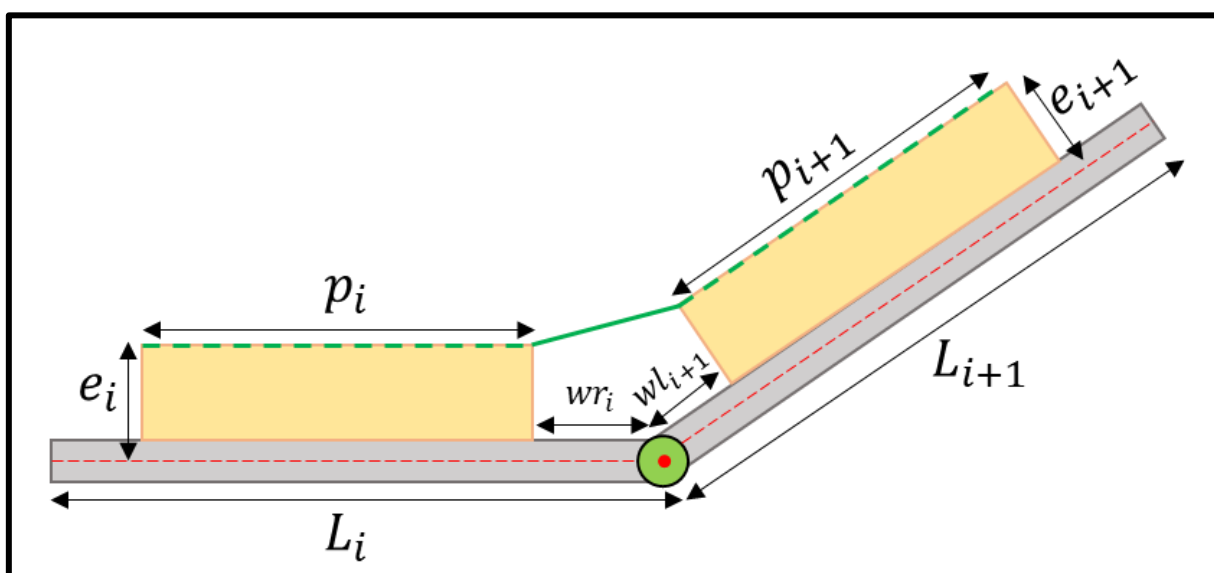
Ενώ οι ροπές αδράνειας υπολογίστηκαν αυτόματα μέσα από λογισμικό τρισδιάστατης σχεδίασης που έχουν σχεδιαστεί τα ρομποτικά δάκτυλα. Το λογισμικό τρισδιάστατης

σχεδίασης που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των ροπών αδρανείας των φαλάγγων είναι το PTC Creo Parametric 7.

Επίσης αναλύθηκαν και κάποιες βασικές διαστάσεις των ρομποτικών δακτύλων, οι οποίες είναι απαραίτητες να τις γνωρίζουμε για να μπορούμε να μελετήσουμε τα ρομποτικά δάκτυλα.

6.5.2 Διαστάσεις ρομποτικών δακτύλων

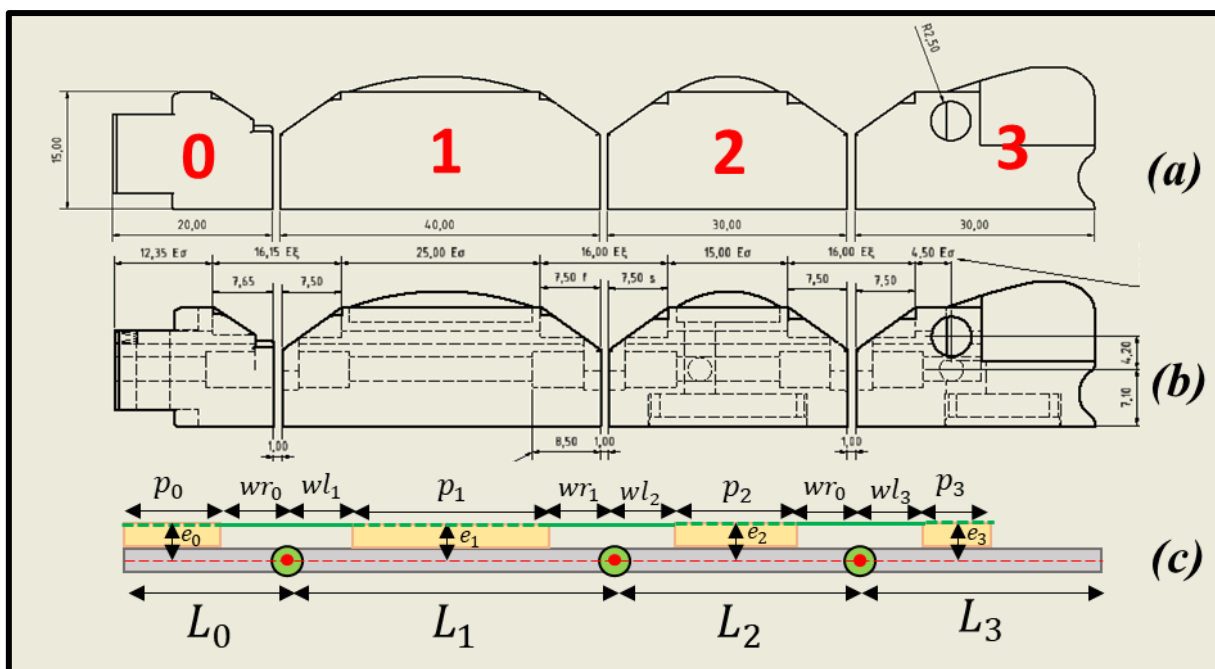
Παρακάτω γίνεται μια ανάλυση για τις διαστάσεις των ρομποτικών δακτύλων δύο και τριών δακτύλων. Τα ρομποτικά δάκτυλα που αφορούν είναι ο δείκτης, ο μεσαίος, ο παράμεσος και ο μικρός. Στην **Εικόνα 6.8** αναπαρίσταται σχηματικά οι βασικές διαστάσεις που χρειάζεται να γνωρίζουμε για μία άρθρωση. Εάν γνωρίζουμε αυτές τις διαστάσεις, μπορούμε να τις χρησιμοποιήσουμε για να το αναπαράγουμε με την χρήση προσομοίωσης.



Εικόνα 6.8: Σχηματική ανάλυση των βασικών διαστάσεων των ρομποτικών δακτύλων, ανάμεσα σε μια άρθρωση που συνδέει δύο φαλάγγες.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω θα μελετηθούν οι βασικές διαστάσεις των ρομποτικών δακτύλων δύο και τριών αρθρώσεων. Για κάθε άρθρωση χρειάζεται να γνωρίζουμε επτά βασικές διαστάσεις, όπως αναπαρίσταται σχηματικά στην Εικόνα 6.8.

Οι διαστάσεις που πρέπει να γνωρίζουμε είναι το μήκος κάθε φαλάγγας, η κάθετη απόσταση του τένοντα από το σημείο μηδέν της φαλάγγας, το μήκος που είναι ο τένοντας εσωτερικά της φαλάγγας καθώς και το μήκος που είναι ο τένοντας εξωτερικά της φαλάγγας.

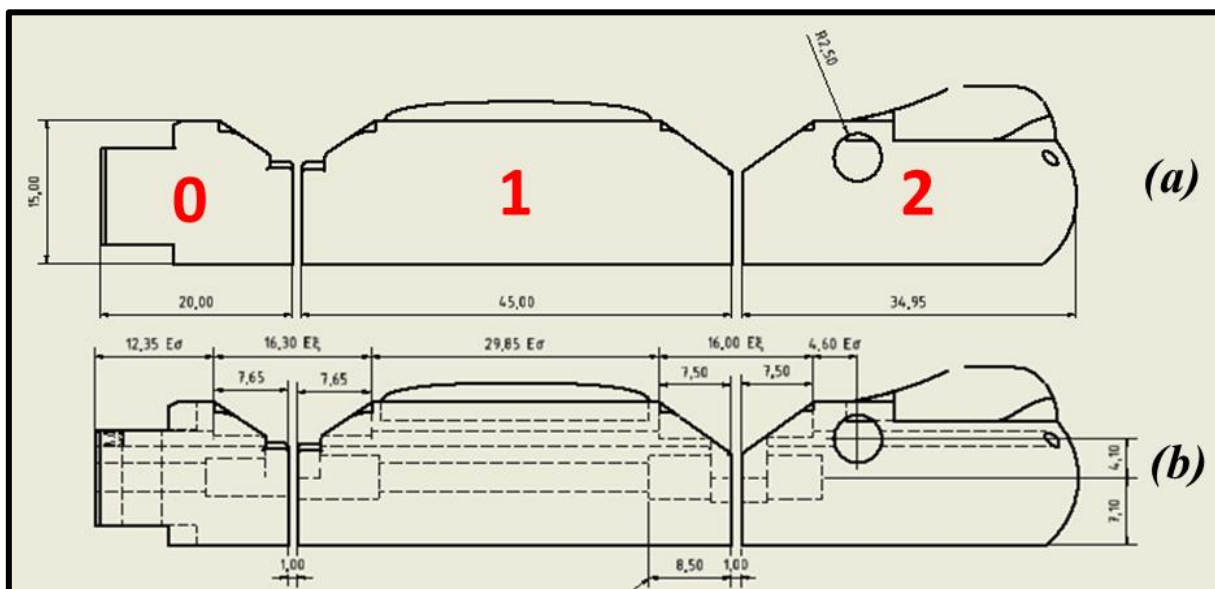


Εικόνα 6.9: Σχηματική αναπαράσταση βασικών διαστάσεων ρομποτικών δακτύλων τριών αρθρώσεων.

Στον Πίνακα 6.2 διακρίνουμε τις βασικές διαστάσεις για τα ρομποτικά δάκτυλα τριών αρθρώσεων όπως αναπαρίσταται σχηματικά στην Εικόνα 6.9. Αυτές είναι οι ελάχιστες διαστάσεις που χρειάζεται για να προσομοιώσουμε την συμπεριφορά των δακτύλων.

Links	p_i	e_i	wr_i	wl_i	L_i
0	12.3	4.2	8	-	20.5
1	25	4.2	8	8	41
2	15	4.2	8	8	31
3	4.5	4.2	-	8	30.5

Πίνακας 6.2: Οι βασικές διαστάσεις για τα ρομποτικά δάκτυλα τριών αρθρώσεων.



Εικόνα 6.10: Σχηματική αναπαράσταση βασικών διαστάσεων ρομποτικών δακτύλων δύο αρθρώσεων.

Παρομοίως στον Πίνακα 6.3 διακρίνουμε τις βασικές διαστάσεις για τα ρομποτικά δάκτυλα δύο αρθρώσεων όπως αναπαρίσταται σχηματικά στην Εικόνα 6.10. Αυτές είναι οι ελάχιστες διαστάσεις που χρειάζεται για να προσομοιώσουμε την συμπεριφορά των δακτύλων.

<i>Links</i>	<i>pf_i</i>	<i>e_i</i>	<i>wr_i</i>	<i>wl_i</i>	<i>L_i</i>
0	12.3	4.1	8	-	20.5
1	30	4.1	8	8	46
2	4.6	4.1	-	8	35.5

Πίνακας 6.3: Οι βασικές διαστάσεις για τα ρομποτικά δάκτυλα δύο αρθρώσεων.

6.5.3 Μάζες και ροπές αδράνειας

Παρακάτω εμφανίζονται οι μάζες και οι ροπές αδράνειας που μετρήθηκαν για τα ρομποτικά δάκτυλα δύο και τριών αρθρώσεων. Οι μάζες των φαλάγγων μετρήθηκαν με την χρήση μιας οικιακής ζυγαριάς ακριβείας 1 gr. Ενώ οι ροπές αδράνειας των φαλάγγων υπολογίστηκαν αυτόματα με την χρήση λογισμικού τρισδιάστατης σχεδίασης.

➤ Ρομποτικό δάκτυλο τριών αρθρώσεων

Στον Πίνακα 6.4 εμφανίζονται οι μάζες και οι ροπές αδράνειας για τις φάλαγγες των ρομποτικών δακτύλων τριών αρθρώσεων.

<i>Link</i>	<i>Μάζα [kg]</i>	<i>Ροπή Αδράνειας [kg·m²]</i>
1	0,010	1.26e-9
2	0,006	5.16e-10
3	0,007	6.2e-10

Πίνακας 6.4: Μάζες και ροπές αδράνειας των ρομποτικών δακτύλων τριών αρθρώσεων.

➤ Ρομποτικό δάκτυλο δύο αρθρώσεων

Στον Πίνακα 6.4 εμφανίζονται οι μάζες και οι ροπές αδράνειας για τις φάλαγγες των ρομποτικών δακτύλων δύο αρθρώσεων.

<i>Link</i>	<i>Μάζα [kg]</i>	<i>Ροπή Αδράνειας [kg·m²]</i>
1	0,011	1,79e-9
2	0,009	8,73e-10

Πίνακας 6.5: Μάζες και ροπές αδράνειας των ρομποτικών δακτύλων δύο αρθρώσεων.

6.6 Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Στον παρακάτω πίνακα περιγράφονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν. Πιο συγκεκριμένα μετρήθηκε:

- i. Η τριβή του σχοινού, που κάμπτεται τα ρομποτικά δάκτυλα, στις φάλαγγες των ρομποτικών δακτύλων.
- ii. Η σταθερά του ζεύγους των ελατηρίων εφελκυσμού που επιτρέπει την κάμψη των δακτύλων σε [Nm/rad].
- iii. Η σταθερά των ρομποτικών δακτύλων θεωρώντας το ως σύστημα ελατηρίου σε [Nt/mm].
- iv. Η μάζα της πρώτης φάλαγγας σε [kg].
- v. Η μάζα της δεύτερης φάλαγγας σε [kg].
- vi. Η μάζα της τρίτης φάλαγγας σε [kg].
- vii. Το μήκος της πρώτης φάλαγγας σε [mm].

- viii. Το μήκος της δεύτερης φάλαγγας σε [mm].
- ix. Το μήκος της τρίτης φάλαγγας σε [mm].
- x. Η ροπή αδράνειας της πρώτης φάλαγγας σε [kg·m²].
- xi. Η ροπή αδράνειας της δεύτερης φάλαγγας σε [kg·m²].
- xii. Η ροπή αδράνειας της τρίτης φάλαγγας σε [kg·m²].

Characteristics of robotic fingers

Kinematic parameters						
	μ	K_{spring} [Nm/rad]	K_{finger} [N/mm]	L_1 [mm]	L_2 [mm]	L_3 [mm]
Two joints	0.15	0.015	0.29	46	35.5	-
Three Joints	0.15	0.015	0.21	41	31	30.5
Dynamic parameters						
	m_1 [kg]	m_2 [kg]	m_3 [kg]	I_1 [kg·m ²]	I_2 [kg·m ²]	I_3 [kg·m ²]
Two joints	0.01	0.009	-	1.79e ⁻⁹	8.73e ⁻¹⁰	-
Three Joints	0.01	0.006	0.007	1.26e ⁻⁹	5.16e ⁻¹⁰	6.2e ⁻¹⁰

Πίνακας 6.6: Συγκεντρωτικός πίνακας με τα χαρακτηριστικά των ρομποτικών δακτύλων δύο και τριών αρθρώσεων.

7 Simulation ρομποτικών δακτύλων

7.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί με την χρήση του λογισμικού Abaqus προσομοίωση της πειραματικής διάταξης (για την εύρεση της σταθεράς του ζεύγους των ελατηρίων), ώστε στην θέση του ελατηρίου να τοποθετηθεί ένα άλλο υλικό solid που θα κάμπτεται και θα επιτρέπει την κάμψη των ρομποτικών δακτύλων, με παρόμοια συμπεριφορά.

Με αυτό το τρόπο θέλουμε να ανακαλύψουμε και άλλα υλικά τα οποία είναι συμπαγή, που θα επιτρέπουν στα ρομποτικά δάκτυλα να κάμπτονται με παρόμοια συμπεριφορά με το ζεύγος των ελατηρίων. Η τεχνική που θα ακολουθήσουμε είναι να διατηρήσουμε τις εξωτερικές διαστάσεις που έχει το ελατήριο, και στην θέση του να το αντικαταστήσουμε με ένα άλλο συμπαγές υλικό.

7.2 Περιγραφή λογισμικό Abaqus

Το ABAQUS είναι ένα εξειδικευμένο λογισμικό που ανήκει στην κατηγορία των πακέτων γενικής χρήσης για την ανάλυση της συμπεριφοράς δομικών συστημάτων. Προσφέρει μια ευέλικτη και ισχυρή πλατφόρμα για τη διεξαγωγή διαφόρων τύπων αναλύσεων, συμπεριλαμβανομένων των στατικών, δυναμικών, θερμικών, ηλεκτρομαγνητικών, γεωτεχνικών και βιομηχανικών.

Ο τρόπος λειτουργίας του ABAQUS συνίσταται σε μια σειρά βήματα:

✓ Προετοιμασία του μοντέλου:

Η προετοιμασία του μοντέλου συμπεριλαμβάνει την κατασκευή της γεωμετρίας του συστήματος που θα μελετηθεί, είτε μέσω δημιουργίας από το μηδέν είτε μέσω εισαγωγής από άλλα προγράμματα σχεδίασης. Στη συνέχεια, καθορίζονται οι όροι οριοθέτησης, όπως οι συνοριακές συνθήκες και οι συνθήκες δέσμευσης, καθώς και οι υλικοτεχνικές ιδιότητες των υλικών που απαρτίζουν το σύστημα.

✓ Δημιουργία του δικτύου στοιχείων:

Το ABAQUS χρησιμοποιεί ένα δικτυωτό σύστημα για την αναπαράσταση του μοντέλου. Το δίκτυο περιλαμβάνει στοιχεία, τα οποία είναι υπεύθυνα για την περιγραφή της συμπεριφοράς του συστήματος. Το ABAQUS προσφέρει μια ποικιλία από στοιχεία, όπως γραμμικά, μη γραμμικά, στοιχεία ακτινικής δύναμης, στοιχεία με μεγάλες παραμορφώσεις και άλλα, που μπορούν να προσαρμοστούν στις ανάγκες της συγκεκριμένης ανάλυσης.

✓ **Ορισμός των φορτίων και των συνοριακών συνθηκών:**

Σε αυτό το στάδιο, καθορίζονται τα φορτία που θα εφαρμοστούν στο μοντέλο, όπως μηχανικά φορτία, θερμικές πηγές, φορτία εξωτερικής δύναμης, αλληλεπιδράσεις με άλλα στοιχεία κ.λπ. Επίσης, καθορίζονται οι συνοριακές συνθήκες, που αντιπροσωπεύουν τις συνθήκες στα άκρα του μοντέλου, όπως συνθήκες συγκράτησης, συνθήκες συμπλήρωσης, εφαρμογή σταθερών περιστροφών ή μετατοπίσεων κ.λπ.

✓ **Επίλυση του προβλήματος:**

Μετά την προετοιμασία του μοντέλου και την εφαρμογή των φορτίων, το ABAQUS λύνει τις εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά του συστήματος. Η επίλυση γίνεται μέσω αριθμητικών μεθόδων, όπως η μέθοδος στοιχείων πεπερασμένων (FEM), η οποία διαιρεί το μοντέλο σε μικρά υποσύνολα γνωστά ως στοιχεία και επιλύει τις εξισώσεις για κάθε στοιχείο ξεχωριστά.

✓ **Ανάλυση των αποτελεσμάτων:**

Το ABAQUS παρέχει δυνατότητες ανάλυσης και οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων. Οι χρήστες μπορούν να παρακολουθήσουν τις αντιδράσεις του μοντέλου σε πραγματικό χρόνο, να εξάγουν γραφήματα και πίνακες μεταβολής παραμέτρων, να μελετήσουν τον αντίκτυπο των διάφορων παραμέτρων και να αξιολογήσουν την απόδοση και την ασφάλεια του συστήματος.

Το ABAQUS είναι ένα πανίσχυρο εργαλείο που χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς της μηχανικής, όπως οικοδομική, αυτοκινητοβιομηχανία, αεροναυπηγική, πετρελαιοχημική, ηλεκτρονική κ.λπ. Οι αναλύσεις που εκτελεί το ABAQUS μπορούν να βοηθήσουν τους μηχανικούς να κατανοήσουν τη συμπεριφορά των δομικών συστημάτων, να βελτιώσουν τη σχεδίαση και την απόδοση των προϊόντων και να μειώσουν τον χρόνο και το κόστος που σχετίζονται με τις πρωτότυπες δοκιμές.

7.3 Προσομοίωση

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, θα πραγματοποιηθεί με την χρήση του λογισμικού Abaqus η προσομοίωση της πειραματικής διάταξης για την μέτρηση της σταθεράς ελατηρίου. Στην θέση του ζεύγους των ελατηρίων θα τοποθετηθεί συμπαγές υλικό από λάστιχο με τις ίδιες εξωτερικές διαστάσεις. Επειδή στο Κεφάλαιο 6, στον υπολογισμό της σταθεράς του ζεύγους ελατηρίων έχει μετρηθεί η σταθερά τους σε κάμψη, μπορεί να γίνει η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με την προσομοίωση, με αποτέλεσμα να παρατηρήσουμε την συμπεριφορά τους.

Το υλικό που επιλέχθηκε είναι το λάστιχο, καθώς είναι εύκαμπτο και επιτρέπει την κάμψη των ρομποτικών δακτύλων χωρίς να υπόκειται σε πλαστική παραμόρφωση. Επίσης για να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση θα οριστούν οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών.

7.3.1 Μηχανικές ιδιότητες υλικών

Για να καταστεί εφικτό το simulation για τα ρομποτικά δάκτυλα μία από τις παραμέτρους που θα χρειαστεί να ορίσουμε είναι οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Και ειδικότερα η πυκνότητα, το Young Modulus, και το Poisson's Ratio.

Το υλικό που έχουμε επιλέξει είναι το λάστιχο. Επειδή υπάρχουν αρκετές κατηγορίες λάστιχων, όπου έχουν Young Modulus 0.5-5 MPa, πραγματοποιήθηκε αρχικά μια σειρά από προσομοιώσεις ώστε να καταλήξουμε σε ένα Young Modulus που θα έχει πολύ κοντινή συμπεριφορά με το ζεύγος των ελατηρίων.

Έτσι το Young Modulus ορίστηκε στα 2.6 MPa, με Poisson's Ratio 0.4, και πυκνότητα 1300 kg/m³, Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε στην υπόλοιπη διάταξη είναι το πολυγαλακτικό οξύ (PLA), όπου λήφθηκαν υπόψιν οι βασικές μηχανικές ιδιότητες του υλικού όπως διακρίνονται και στον Πίνακα 7.1.

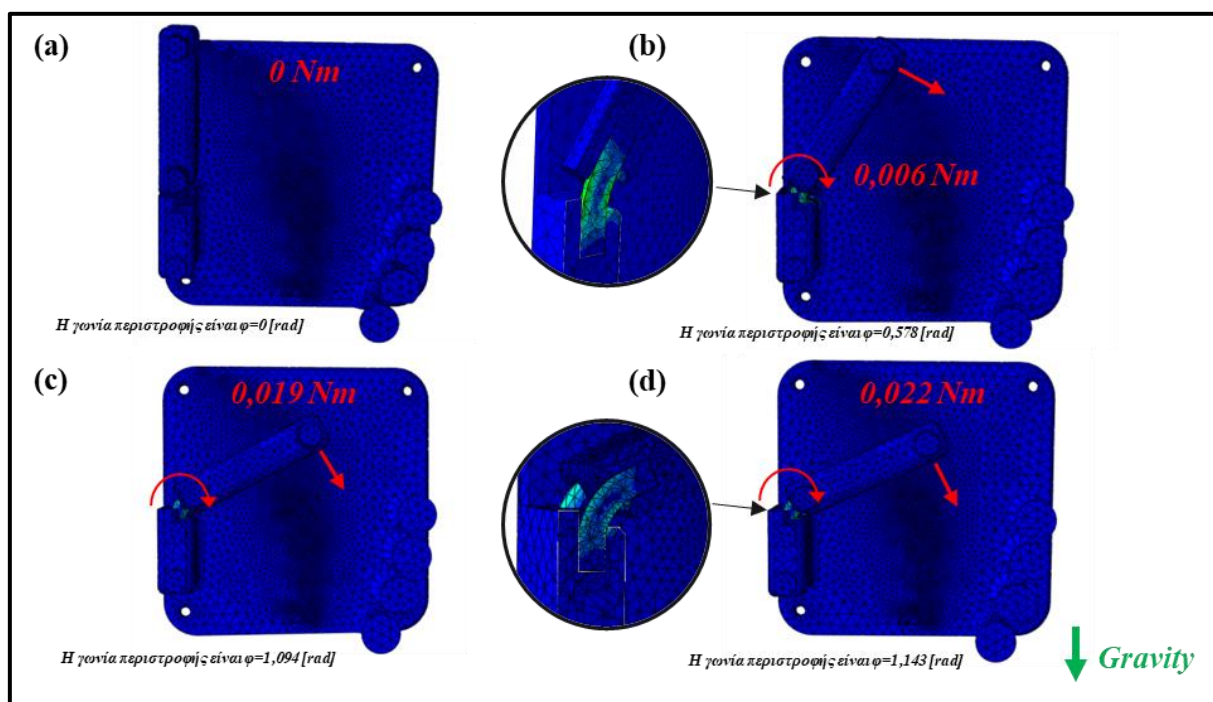
Υλικό	Young Modulus [MPa]	Poisson's Ratio	Density [kg/m ³]
PLA	3000	0.35	1250
Rubber	2.6	0.4	1300

Πίνακας 7.1: Πίνακας των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση.

Επίσης στα δεδομένα που καταχωρήθηκαν μέσα από το λογισμικό Abaqus είναι και ο συντελεστής τριβής ανάμεσα στον αυλάκι που τοποθετείται το λάστιχο με το πολυγαλακτικό οξύ. Ο συντελεστής τριβής που ορίστηκε είναι ο ίδιος με αυτόν που είχαμε προσδιορίσει από τα πειράματα για τους τένοντες $\mu=0.015$.

7.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης

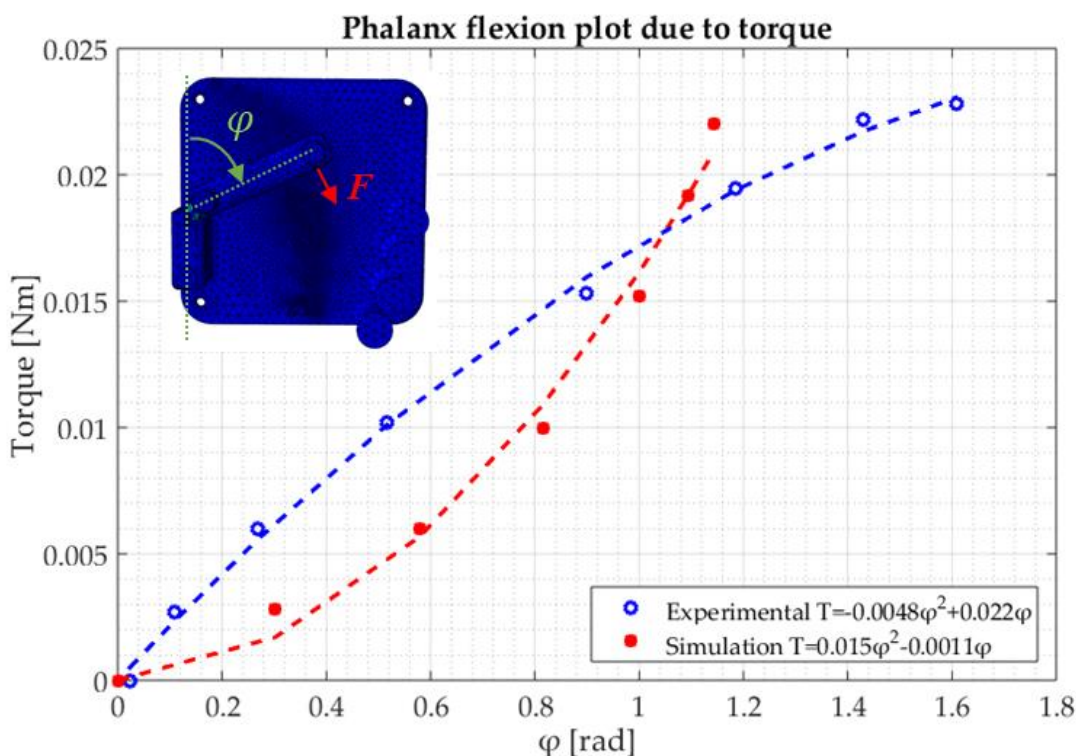
Η προσομοίωση της πειραματική διάταξης πραγματοποιήθηκε για έξι διαφορετικές δυνάμεις ώστε να έχουμε ένα μεγάλο εύρος κίνησης του στελέχους που κάμπτεται. Στην Εικόνα 7.1 διακρίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για διαφορετικές δυνάμεις που ασκούνται στο πάνω μέρος του στελέχους που κάμπτεται.



Εικόνα 7.1: Αποτελέσματα προσομοίωσης μέσα από το λογισμικό Abaqus για διάφορες ροπές, (a) άσκηση μηδενικής ροπής, (b) άσκηση ροπής 0.006 Nm και περιστροφή του πάνω στελέχους 0.57 rad, (c) άσκηση ροπής 0.019 Nm και περιστροφή του πάνω στελέχους 1.09 rad, (d) άσκηση ροπής 0.022 Nm και περιστροφή του πάνω στελέχους 1.14 rad.

Πρέπει να τονίσουμε ότι αν και ασκούμε δύναμη στο στέλεχος της πειραματικής διάταξης, αυτή μετατρέπεται σε ροπή, η οποία επιτρέπει την κάμψη του. Αυτή η ροπή είναι που μας ενδιαφέρει και αναλύουμε στην γραφική παράσταση σε σχέση με την γωνία στροφής του στελέχους. Οι δυνάμεις που ασκήθηκαν, και κατά συνέπεια η ροπή που ασκήθηκε στα πειράματα της προσομοίωσης ήταν ίσου μέτρου με αυτή των πειραμάτων.

Στην παρακάτω γραφική παράσταση με κόκκινο χρώμα διακρίνονται τα σημεία που πάρθηκαν από την προσομοίωση ενώ με μπλε χρώμα τα πειραματικά. Με παρόμοιο χρωματισμό προσεγγίζουμε αυτά τα σημεία με πολυωνυμικές εξισώσεις δευτέρου βαθμού όπως διακρίνονται στο γράφημα.



Γραφική Παράσταση 7.1: Γραφική παράσταση αποτύπωσης της κάμψης του στελέχους της πειραματικής διάταξης από την εφαρμογή ροπής, με κόκκινο χρώμα τα δεδομένα της προσομοίωσης και με μπλε τα πειραματικά δεδομένα. Οι διακεκομμένες ευθείες είναι η προσέγγιση αυτών των σημείων με πολυωνυμική εξίσωση δευτέρου βαθμού.

Οπότε η συμπεριφορά του λάστιχου σε σχέση με το πόσο κάμπτεται ανάλογα την ροπή που θα εφαρμόσουμε μπορεί να περιγραφεί σύμφωνα με την εξίσωση (7.1).

$$T = 0.015\varphi^2 - 0.0011\varphi \quad (7.1)$$

Μια σημαντική παρατήρηση που διακρίνουμε στην Γραφική Παράσταση 7.1, είναι αν και όταν ασκούμε ροπή περίπου 0.018 Nm έχουμε παρόμοια συμπεριφορά στην κάμψη. Η τελική κάμψη του δακτύλου είναι μεγαλύτερη με τα ελατήρια από ότι με το λάστιχο, εφόσον ασκήσουμε μια μέγιστη ροπή περίπου 0.023Nm. Σε μελλοντική έρευνα μπορούν να προσομοιωθούν και άλλα υλικά με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες, αλλά και σχήμα-διαστάσεις, ώστε να μπορούμε να επιτύχουμε την εκάστοτε συμπεριφορά που επιθυμούμε να έχουν τα ρομποτικά δάκτυλα.

8 Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα

8.1 Συμπεράσματα έρευνας

Το ρομποτικό χέρι μετά την ανακατασκευή έγινε πιο συμπαγές και αυτόνομο. Η ανακατασκευή του και το σύστημα ελέγχου που υλοποιήθηκε θεωρούνται επιτυχημένα καθώς βελτίωσαν τις δυνατότητες του. Επίσης οι παράμετροι που βρέθηκαν θα χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω έρευνα πάνω στα ρομποτικά ανθρωπόμορφα χέρια με τένοντες, με απώτερο στόχο η παραμετροποίηση των ρομποτικών χεριών.

8.1.1 Συμπέρασμα πειραματικών δοκιμών

Το ρομποτικό χέρι είναι ικανό να πιάσει αυτόνομα με μεγάλη επιτυχία αντικείμενα κυλινδρικού σχήματος και μεγάλου όγκου. Με την προ-λαβή Power grasp επιτυγχάνεται ποσοστό επιτυχίας 83%. Με την λαβή Three finger grasp επιτυγχάνεται ποσοστό επιτυχίας 40%. Ενώ με την λαβή Precision grasp μειώνεται το ποσοστό επιτυχίας στο 30%. Τέλος με την λαβή Lateral Precision εάν βελτιωθεί ο αντίχειρας τα αποτελέσματα θα είναι ενθαρρυντικά.

Επομένως με τις τρεις λαβές εκτός από την Lateral Precision ο μέσος όρος επιτυχίας της αυτόνομης λαβής είναι 61%. Ένα ποσοστό ικανοποιητικό για την αυτόνομη λαβή λόγω και του μεγάλου εύρους αντικειμένων που χρησιμοποιήθηκαν.

Η πρόσφυση των δακτύλων με το αντικείμενο μπορεί επίσης να βελτιωθεί ώστε να έρχεται σε επαφή μεγαλύτερο ελαστικό πέλμα με το αντικείμενο. Αυτό μπορεί να γίνει είτε με την χρήση κάποιου ελαστικού καλύμματος πάνω στο χέρι, είτε μεγαλώνοντας την επιφάνεια του ελαστικού πέλματος που έρχεται σε επαφή.

Τα αισθητήρια FSR είναι χρήσιμα μόνο όταν υπάρχει επαφή. Τα αισθητήρια που βρίσκονταν στις ενδιάμεσες φάλαγγες δεν ενεργοποιήθηκαν σε κανένα πείραμα καθώς δεν ήρθαν σε επαφή με κανένα αντικείμενο. Επομένως δεν υπάρχει λόγος να χρησιμοποιούνται. Επίσης και το αισθητήριο που βρίσκεται στην εγγύς φάλαγγα του αντίχειρα δεν έλαβε καμία πληροφορία εξαιτίας του παχύ ελαστικού πέλματος που έχει η εγγύς φάλαγγα αντίχειρα. Οπότε αποτελεί κατασκευαστικό σφάλμα.

Επίσης η τοποθέτηση του αισθητηρίου της παλάμης δεν θεωρείται επιτυχημένη εξαιτίας της τοποθέτησης του καλύμματος πάνω στην παλάμη. Μια λύση θα αποτελούσε να

επανασχεδιαστεί η παλάμη με μια εσωτερική κλίση και να τοποθετηθεί εκεί. Προσομοιώνοντας την παλάμη ενός κανονικού χεριού.

Ο αντίχειρας του ρομποτικού χεριού δεν αποτελεί επιτυχημένο μηχανολογικό τμήμα και θα μπορούσε να αντικατασταθεί με κάποιο καλύτερο σχεδιαστικά. Το οποίο θα πρόσδιδε στο ρομποτικό χέρι την ικανότητα για μικροχειρισμό αντικειμένων που δεν είναι ικανό να κάνει σε αυτό το στάδιο

8.1.2 Συμπέρασμα κινηματικής μελέτης

Όλα τα δάκτυλα εμφανίζουν μια γραμμική σχέση ανάμεσα στις γωνίες των αρθρώσεων. Επομένως μπορούν όλες οι γωνίες να εκφραστούν σε σχέση είτε με την μετατόπιση είτε μεταξύ τους, από γραμμικές κινηματικές εξισώσεις ή πολυωνυμικές έως τρίτου βαθμού.

Προκύπτει ότι έχουμε ένα μέσο όρο σφάλματος **5.1%** για τις μετρήσεις των γωνιών του ρομποτικού χεριού. Είναι σημαντικό ότι το σφάλμα εμφανίζεται γραμμικό ανάλογα με την μετατόπιση με αυτόν τον τρόπο θα μπορούσε να ελαχιστοποιηθεί, εάν το λαμβάναμε υπόψιν.

8.1.3 Συμπεράσματα προσομοίωσης

Στην προσομοίωση αντί για τα ζεύγη ελατηρίων που επιτρέπουν την κάμψη των ρομποτικών δακτύλων χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά ζεύγη συμπαγούς υλικού από λάστιχο. Παρατηρήθηκε, αν και βρίσκονται κοντά στη συμπεριφορά που κάμπτουν τα δάκτυλα έχουν μια μικρή απόκλιση από τα ελατήρια.

Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να προσομοιώσουμε και άλλα υλικά διαφορετικών μηχανικών ιδιοτήτων αλλά και σχημάτων ώστε να καταφέρουμε τα ρομποτικά δάκτυλα να κάμπτονται με βάση προκαθορισμένο τρόπο που επιθυμούμε.

Όλη η εργασία πραγματοποιήθηκε με στόχο την αξιολόγηση, την κινηματική μελέτη αλλά και την παραμετροποίηση των ανθρωπόμορφων ρομποτικών χεριών με τένοντες, που επιφέρουν ως αποτέλεσμα την βελτίωση των ρομποτικών χεριών.

9 Βιβλιογραφία

9.1 Ελληνόγλωσση Βιβλιογραφία

1. Πετρόπουλος, Δ. (2016) “Υλοποίηση συναρτήσεων ελέγχου ρομποτικού συστήματος αποτελούμενου από βιομηχανικού τύπου ρομποτικό χειριστή και ανθρωπόμορφη αρπάγη λαβής αντικειμένων μέσω του προγράμματος *MATLAB*”. (Πτυχιακή Εργασία). Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης.
2. Κολοβού, Α.(2012) “Εισαγωγή στην επεξεργασία εικόνας-Παραδείγματα με χρήση *Matlab*. Πανεπιστήμιο Αθηνών”

9.2 Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

1. J. Fasoulas, M. Sfakiotakis, M. Petousis, S. Kalantzis, G. Kampourakis “*Design and Development of a Mechatronic Transradial Prosthesis*” *Conference: International Symposium on Ambient Intelligence and Embedded Systems, September 2018, Germany.*
2. Mahdi Elsayed Hussein. (2014) “*3D Printed Myoelectric Prosthetic Arm*”. (Thesis). Australian Centre for Field Robotics (ACFR).
3. S. Cobos, M. Ferre, M. A. Sánchez-Urán, and J. Ortego (2007), “*Constraints for realistic hand manipulation,*” *Proc. Presence 2007, pp. 369–370.*
4. Carbone, G., Cappello, A., Micera, S., & Edin, B. B. (2000). An anthropomorphic robotic finger with intrinsic tactile sensing. *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.*
5. Hirose, S., & Umetani, Y. (1978). The development of soft gripper for the versatile robot hand. *Proceedings of the 1978 IEEE International Conference on Robotics and Automation.*
6. Hogan, N. (1985). Impedance control: An approach to manipulation: Part I—Theory. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 107(1), 1-7.
7. Wimbock, T., & Hirzinger, G. (2009). DLR hand II: Next generation of a dexterous robot hand. *Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.*

8. Ma, R., Dollar, A. M., & Burdet, E. (2014). Synthesizing anatomically correct hand models. *IEEE Transactions on Robotics*, 30(1), 138-146.
9. Kryger, M. A., & Srinivasan, M. A. (2007). Human-inspired robotic grasp control with tactile sensing. *IEEE Transactions on Robotics*, 23(2), 251-262.
10. Prattichizzo, D., & Trinkle, J. C. (2008). Grasp synthesis algorithms: A survey. *IEEE Transactions on Robotics*, 24(2), 282-297.
11. Bhattacharjee, T., & Agrawal, S. K. (2006). Optimal tendon routing for tendon-driven robotic systems. *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*.
12. de Santos, P. G. (2005). *Tendon-driven robot hands: Design and control strategies*. Springer.
13. Nakanishi, Y., & Ikeuchi, K. (2001). Anthropomorphic robotic finger with three phalanges driven by linear actuators. *Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*.
14. Liu, Y., Hsu, W., & Chiu, T. (2017). Modeling and control of a tendon-driven robotic hand for grasping and manipulation tasks. *Robotics and Autonomous Systems*, 95, 1-12.
15. Bianchi, M., Rizzello, G., & Serio, A. (2005). Design of an anthropomorphic robotic hand for dexterous grasping and manipulation tasks. *Mechanism and Machine Theory*, 40(12), 1435-1449.
16. Prattichizzo, D., & Malvezzi, M. (2004). On the manipulability ellipsoids of underactuated robotic hands with passive joints. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 20(1), 169-175.
17. Zhang, Y., Lu, G., Xie, H., & Zhang, W. (2018). Tendon-driven robotic fingers: Design, sensing and control. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 23(1), 249-260.
18. Bonilla, M., Melchiorri, C., & Caro, S. (2016). Underactuated robotic hands with mechanically adjustable stiffness for adaptive grasping. *Robotics and Autonomous Systems*, 75, 240-250.
19. Wimbock, T., & Hirzinger, G. (2008). The DLR hand arm system. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 15(1), 16-23.
20. Bianchi, M., & Kumar, V. (2007). Manipulability ellipsoids of multibody systems with nonholonomic constraints. *IEEE Transactions on Robotics*, 23(3), 572-581.
21. Li, Q., Zhang, W., & Yu, H. (2014). Tendon-driven robotic hand with tendon locking mechanism for forceful grasping. *Journal of Bionic Engineering*, 11(3), 453-461.

22. Yamane, K., & Nakamura, Y. (2006). Dynamic modeling of tendon-driven robot hands considering tendon compliance and joint friction. *IEEE Transactions on Robotics*, 22(5), 987-999.
23. Hsu, W., Liu, Y., & Chiu, T. (2014). Adaptive synergy control for tendon-driven robotic hands. *IEEE Transactions on Robotics*, 30(5), 1166-1177.

9.3 Ηλεκτρονικές πηγές

1. Open Bionics (2020). Hero Arm. Διαθέσιμο στο: <https://openbionics.com/>
2. Touch Bionics Inc., i-Limb prosthetic hand. Διαθέσιμο στο: <http://www.touchbionics.com>
3. Ottobock Inc., Bebionic prosthetic hand. Διαθέσιμο στο: <https://www.ottobockus.com>
4. Ottobock Inc., Michelangelo prosthetic hand. Διαθέσιμο στο: <https://www.ottobockus.com>