



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING  
MECHANICAL DESIGN & AUTOMATIC CONTROL

Design and Development of an  
Underactuated, Anthropomorphic Robot  
Hand

DIPLOMA THESIS  
of  
**George P. Kontoudis**

**Advisor:** [Kostas J. Kyriakopoulos](#)  
Professor N.T.U.A.

**Co-Advisor:** [Minas V. Liarokapis](#)  
Postdoctoral Associate,  
Yale University, USA

CONTROL SYSTEMS LAB  
Athens, March 2016





Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών  
Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτομάτου Ελέγχου  
Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου

# Σχεδίαση και Κατασκευή Υποεπενεργούμενου, Ανθρωπομορφικού Ρομποτικού Χεριού

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

**ΓΕΩΡΓΙΟΥ Π. ΚΟΝΤΟΥΔΗ**

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Κυριακόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Συνεπιβλέπων: Μηνάς Λιαροκάπης  
Μεταδιδακτορικός Ερευνητής,  
Yale University, USA

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ... Μαρτίου 2016.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....

Κωνσταντίνος Κυριακόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Ευάγγελος Παπαδόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Ιωάννης Αντωνιάδης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2016

(Υπογραφή)

.....

**ΓΕΩΡΓΙΟΣ Π. ΚΟΝΤΟΥΔΗΣ**

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

[Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International License](#)



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών  
Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτομάτου Ελέγχου  
Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου



Η παρούσα διπλωματική εργασία βασίζεται στο [πρότυπο L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X](#) του Εργαστηρίου Συστημάτων Βάσεων Γνώσεων και Δεδομένων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. και το περιεχόμενο της διανέμεται με [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](#).



# Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα Καθηγητή Κώστα Κυριακόπουλο για την άπταιστη συνεργασία που είχαμε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας. Μου έδωσε την ευκαιρία να εργαστώ στο άρτια εξοπλισμένο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου (Control Systems Lab – CSL), με πολύπειρους ερευνητές στον τομέα της ρομποτικής και του ελέγχου. Η καθοδήγηση του ήταν πολύ κρίσιμη σε ερευνητικά, τεχνικά και προσωπικά ζητήματα. Η προσωπικότητα του και ο πολύπλευρος τρόπος του αντιμετώπισης των προβλημάτων, με ενέπνευσαν για την συνέχεια των σπουδών μου στον χώρο της ρομποτικής.

Επίσης, ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Δρ. Μηνά Λιαροκάπη για την αδιάκοπη καθοδήγηση και για την υπομονή που επέδειξε καθόλη την εργασία μου. Όταν ξεκίνησα την διπλωματική μου εργασία ο Μηνάς ήταν Υποψήφιος Διδάκτωρ στο CSL και έπειτα μεταδιδακτορικός ερευνητής στο GRAB Lab του Yale University (συνεργαστήκαμε στην Ελλάδα για 5 μήνες και τον υπόλοιπο 1.5 χρόνο μετακόμισε στις Η.Π.Α.). Η συνεργασία εξ'αποστάσεως είναι πολύ δύσκολη για αυτό απαιτήθηκε επιπλέον δουλειά, κόπος και πολλά ξενύχτια για να αντεπεξέλθουμε. Είμαστε μέλη της πρωτοβουλίας [OpenBionics](#), τον εκτιμώ αμέριστα και τον θεωρώ έμπιστο φίλο μου.

Στην συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της πρωτοβουλίας OpenBionics Άγη Ζησιμάτο και Χριστόφορο Μαυρογιάννη. Ουσιαστικά, η διπλωματική μου εργασία είναι συνέχεια της εργασίας των ρομποτικών χεριών που εξέλιξαν οι Άγης, Μηνάς και Χριστόφορος. Ο Άγης με βοήθησε αρκετά σε πάσης φύσεως τεχνικά ζητήματα και δεν θα ξεχάσω ποτέ τον ζήλο του κατά την περίοδο διεξαγωγής των πειραμάτων, προκειμένου να προλάβουμε την προθεσμία του IROS 2015. Με τον Χριστόφορο ξεκινήσαμε να συνεργαζόμαστε εξ'αποστάσεως, καθώς είναι Υποψήφιος Διδάκτωρ στο Cornell University. Εκτιμώ την εμπιστοσύνη που μου επέδειξε και θαυμάζω τον αναλυτικό τρόπο σκέψης του.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης, τα υπόλοιπα μέλη του CSL για το εξαιρετικό κλίμα που δημιουργήσαν και για την βοήθεια που μου παρείχαν.

Καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο Ε.Μ.Π. δούλευα παράλληλα στην [Sychem](#). Ευχαριστώ θερμά τον προϊστάμενο, φίλο και μέντορα μου Παναγιώτη Λιβανό για την υπομονή του και τις συμβουλές του. Δεν θα ξεχάσω ποτέ την εμπιστοσύνη που επέδειξε στο πρόσωπο μου και το ήθος του. Οι συνάδελφοι μου Γιώργος Τηλιακός, Λουκία Βεργίδου και Άγγελος Ζαφειρόπουλος με στήριξαν και με βοήθησαν σε αμέτρητα ζητήματα. Είναι εξαιρετικοί φίλοι και τους ευχαριστώ ιδιαίτερα. Ευχαριστώ επίσης την διοίκηση της εταιρείας, όλους τους εργαζομένους και την ομάδα της Motorola για την εμπιστοσύνη τους και την ανοχή τους με τις φοιτητικές μου άδειες.

Θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον νηπιακό μου φίλο Σεραφείμ Χασομέρη με τον οποίο τα τελευταία χρόνια ήμασταν συνάδελφοι στην Sychem. Ο Σεραφείμ με βοηθάει σε ότι πρόβλημα προκύπτει και μου συμπαραστέκεται σε όλα τα επίπεδα της ζωής μου.

Ευχαριστώ τους επιστήθιους φίλους μου Βαγγέλη Κοκοράκη, Θοδωρή Θεοτόκη, Λορέντζο Μικρούτσικο και Αποστόλη Τέττα που μου συμπαραστέκονται και με συμβουλεύουν την τελευταία δεκαετία.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου Παντελή και Ξανθή Κοντούδη για την απεριόριστη υποστήριξη και αγάπη που μου έχουν δείξει όλα αυτά τα χρόνια. Είναι εντυπωσιακό να ξέρεις πως ό,τι και αν συμβεί θα έχεις πάντα 2 ανθρώπους στην ζωή σου. Ευχαριστώ θερμά την αδερφή μου Μαίρη Κοντούδη που με βοηθάει σε όλα τα βήματα της ζωής μου και συμπαραστέκεται σε όλες τις δύσκολες στιγμές. Επίσης, ευχαριστώ τα ανίψια μου Σωτήρη και Ξανθίππη που με κάνουν χαρούμενο κάθε φορά που τους βλέπω.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω θερμά την κοπέλα μου Βάσια Αμπατζή για την αγάπη που μου έδωσε, την υπομονή που επέδειξε και την υποστήριξη που μου παρείχε σε όλο το διάστημα των σπουδών μου στο Ε.Μ.Π. και ιδιαίτερα κατά την δύσκολη περίοδο της διπλωματικής μου εργασίας. Είναι από τους πιο σημαντικούς ανθρώπους στην ζωή μου και νιώθω εξαιρετικά ευτυχής που την έχω δίπλα μου.



*Αφιερώνεται στους γονείς μου Παντελή, Ξανθή  
και στην κοπέλα μου Βάσια.*



# Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση και κατασκευή ενός ανθρωπομορφικού, υποεπενεργούμενου και παραμετροποιήσιμου ρομποτικού χεριού, χαμηλού κόστους και βάρους.

Το ανθρώπινο χέρι είναι το πιο επιδέξιο τελικό άκρο αρπάγης και χειρισμού αντικειμένων στην φύση, συνεπώς αναλύεται η ανθρωπομορφικότητα ως κριτήριο σχεδίασης του ρομποτικού χεριού. Για την εξασφάλιση της λειτουργικότητας του ρομποτικού χεριού χρησιμοποιήθηκαν ελαστικές αρθρώσεις που εισάγουν υποχωρητικότητα στην κατασκευή, απαιτούν απλούς νόμους ελέγχου και παρουσιάζουν εξαιρετική λειτουργικότητα σε μη δομημένα περιβάλλοντα. Στην συνέχεια, επιτυγχάνονται χαμηλό κόστος και βάρος της κατασκευής με την χρήση ελαφρών και ευρέως διαδεδομένων υλικών όπως το Plexiglas & το ABS. Ένας άλλος κρίσιμος παράγοντας μείωσης του κόστους και του βάρους είναι η επιλογή των ηλεκτρικών επενεργητών. Στην συγκεκριμένη εργασία, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί 1 ηλεκτρικός επενεργητής που συνεργάζεται με κατάλληλο διαφορικό μηχανισμό για την μεταφορά της κίνησης στα δάχτυλα του ρομποτικού χεριού.

Με τις απαιτήσεις που ορίστηκαν προέκυψαν συγκεκριμένοι περιορισμοί για την σχεδίαση και την κατασκευή του ρομποτικού χεριού. Οι περιορισμοί ξεπεράστηκαν με την επιλογή συγκεκριμένων αποφάσεων και παραδοχών. Στην συνέχεια, με γνώμονα τις αποφάσεις και τις παραδοχές, επιλέχθηκαν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά για την σχεδίαση του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ο ιατρικός έλεγχος του *Karandji* ως κριτήριο για τον ορισμό των θέσεων των αρθρώσεων του αντίχειρα, επιλέχθηκε η χρήση οδοντωτού μηχανισμού σύμπλεξης του αντίχειρα, για την διακριτοποίηση των θέσεων του οποίου μελετήθηκαν ταξινομήσεις αρπάγης του ανθρώπινου χεριού, και αναπτύχθηκε καινοτόμος διαφορικός μηχανισμός επιλεκτικής εμπλοκής των δαχτύλων βασιζόμενος στο Whiffletree.

Ακολούθως, υλοποιήθηκαν οι επιλογές των συγκεκριμένων χαρακτηριστικών για την σχεδίαση του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού. Η σχεδίαση είναι παραμετρική και επιτρέπει την αναπαραγωγή προσωποποιημένων ανθρωπομορφικών ρομποτικών χεριών. Το προτεινόμενο χέρι μπορεί να κατασκευαστεί είτε από μηχανή κοπής laser, είτε από μηχανή εναπόθεσης τήγματος (3D printer).

Στην συνέχεια, επαληθεύτηκε μέσω εκτενών πειραμάτων, η λειτουργικότητα του συνόλου της κατασκευής του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού. Τα πειράματα χωρίστηκαν σε 2 μέρη, όπου στο πρώτο μέρος δοκιμάστηκε η λειτουργικότητα του διαφορικού μηχανισμού επιλεκτικής εμπλοκής, ενώ στο δεύτερο μέρος εξετάστηκε η ικανότητα του χεριού να επιτυγχάνει αρπάγες καθημερινών αντικειμένων. Από τα παραπάνω, εξήχθησαν σημαντικά συμπεράσματα που αφορούν την συνεισφορά του διαφορικού μηχανισμού και την συνολική λειτουργικότητα της κατασκευής.

Το συγκεκριμένο ρομποτικό χέρι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πληθώρα εφαρμογών ρομποτικής καθώς και ως προσθετικό άκρο χαμηλού κόστους και βάρους.

## Λέξεις Κλειδιά

Σχεδίαση Ρομποτικών Χεριών, Ανθρωπομορφισμός, Διαφορικοί Μηχανισμοί, Κινηματική, Αρπάγη Αντικειμένων.

# Abstract

This thesis focuses on the design and development of an anthropomorphic, underactuated, personalized robot hand of low cost and weight.

Human hand is the most versatile and dexterous end-effector known, so in this thesis we argue that anthropomorphism is an important feature for hand design. Elastic joints were selected in order to introduce passive compliance in the hand structure, simplify the control problem and perform robust grasping in unstructured environments. Low weight and cost were achieved with the use of common, lightweight and off-the-self materials, like Plexiglas & ABS. Moreover, in this thesis we select to use a single actuator with a novel selectively differential mechanism that allows the execution of different grasping postures and gestures.

The aforementioned specifications led us to appropriate design choices for the anthropomorphic robot hand. More precisely, the *Kapandji* test was used to derive the exact positions of thumb joints, a toothed locking mechanism was implemented for the opposition of the thumb and a novel selectively lockable differential mechanism, based on the Whiffletree, was developed. The proposed design is parametric and allows the replication of personalized, anthropomorphic robotic and prosthetic hands. The proposed hands can be manufactured with either a laser cutter or a 3D printer.

In order to validate the efficiency of the proposed robot hand design we conducted two different sets of experiments. During the first set, the efficiency of the selectively lockable differential mechanism was assessed, while the second set assessed the ability of the hand to efficiently grasp a wide range of everyday life objects. The suggested robot hand can be used for a variety of robotic applications as well as the creation of an affordable, light-weight prosthesis.

## Keywords

Robot Hands Design, Anthropomorphism, Differential Mechanisms, Kinematics, Grasping.

# Περιεχόμενα

Ευχαριστίες . . . . .	1
Περίληψη . . . . .	5
Abstract . . . . .	7
<b>1 Εισαγωγή . . . . .</b>	<b>15</b>
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής . . . . .	15
1.2 Σχετικές εργασίες . . . . .	16
1.2.1 Ανθρωπομορφικά ρομποτικά χέρια . . . . .	19
1.2.2 Εμπορικά προσθετικά χέρια . . . . .	20
1.3 Δομή της διπλωματικής . . . . .	22
<b>2 Σχεδίαση . . . . .</b>	<b>23</b>
2.1 Απαιτήσεις . . . . .	23
2.1.1 Ανθρωπομορφισμός . . . . .	23
2.1.2 Ελαφρά κατασκευή . . . . .	25
2.1.3 Λειτουργικότητα . . . . .	26
2.2 Περιορισμοί . . . . .	27
2.2.1 Περιορισμοί αντίχειρα . . . . .	27
2.2.2 Επενεργητές και σύστημα περιέλιξης τένοντα . . . . .	28
2.3 Επιλογές . . . . .	30
2.3.1 Κινηματικό μοντέλο . . . . .	30
2.3.2 Επιλογές αντίχειρα . . . . .	31
2.3.3 Διαφορικός μηχανισμός . . . . .	35
2.3.4 Επιλογές υπόλοιπων δαχτύλων . . . . .	37
2.4 Τμήματα χεριού . . . . .	38
2.4.1 Σχεδίαση & κατασκευή παλάμης . . . . .	39
2.4.2 Σχεδίαση & κατασκευή δαχτύλων . . . . .	40
2.4.3 Σχεδίαση & κατασκευή περιφερειακών εξαρτημάτων . . . . .	42
<b>3 Πειράματα . . . . .</b>	<b>45</b>

3.1 Διαφορικός μηχανισμός . . . . .	45
3.1.1 Αύξηση μεταφερόμενης δύναμης . . . . .	45
3.1.2 Διαφορετικές επιλογές αρπάγης αντικειμένων & εκτέλεσης χειρο- νομιών . . . . .	50
3.2 Αρπαγή καθημερινών αντικειμένων . . . . .	52
<b>4 Συμπεράσματα . . . . .</b>	<b>55</b>
4.1 Επισκόπηση . . . . .	55
4.2 Συνεισφορά . . . . .	57
4.3 Μελλοντικές επεκτάσεις . . . . .	58
<b>A' OpenBionics . . . . .</b>	<b>59</b>
<b>B' Οδηγός Συναρμολόγησης . . . . .</b>	<b>61</b>
B'.1 Απαιτούμενα υλικά και εργαλεία . . . . .	61
B'.2 Τεμάχια . . . . .	61
B'.2.1 Τεμάχια δαχτύλων . . . . .	63
B'.2.2 Τεμάχια παλάμης . . . . .	65
B'.2.3 Τεμάχια περιφερειακού εξοπλισμού . . . . .	67
B'.2.4 Τεμάχια τριδιάστατου εκτυπωτή . . . . .	70
B'.3 Συναρμολόγηση . . . . .	72
B'.3.1 Ενσωμάτωση δαχτύλων στην παλάμη . . . . .	72
B'.3.2 Κατασκευή & ενσωμάτωση μηχανικών συζευκτών . . . . .	73
B'.3.3 Κατασκευή μηχανισμού αντίχειρα . . . . .	75
B'.3.4 Κατασκευή συστήματος περιέλιξης τένοντα & βάσης επενεργητή . . . . .	80
B'.3.5 Ενσωμάτωση αντίχειρα & συστήματος περιέλιξης τένοντα . . . . .	87
B'.3.6 Ενσωμάτωση φλάντζας . . . . .	92
B'.4 Συναρμολογημένη κατασκευή . . . . .	93
<b>Γλωσσάριο . . . . .</b>	<b>95</b>
<b>Bibliography . . . . .</b>	<b>96</b>

# Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Ανθρώπινο χέρι. . . . .	16
1.2	Μήκος ανθρώπινου χεριού (Hand Length), πλάτος ανθρώπινου χεριού (Hand Breadth). . . . .	17
1.3	Ανθρωπομορφικά ρομποτικά χέρια. α. Utah/MIT Hand, β. DLR Hand I, γ. Gifu Hand, δ. Vanderbilt Hand, ε. DLR/HIT Hand II, στ. SmartHand. . . . .	18
1.4	Ανθρωπομορφικά ρομποτικά χέρια με ένα ηλεκτρικό επενεργητή. α. Yale Prosthetic Hand, β. Pisa/IIT SoftHand, γ. U. Laval Prosthetic Gripper, δ. ISR-SoftHand. . . . .	19
1.5	Εμπορικά προσθετικά χέρια. α. BeBionic, β. iLimb, γ. Vincent Hand, δ. Michelangelo. . . . .	20
1.6	Προσθετικό χέρι BeBionic της Steeper. Πηγή: [20]. . . . .	21
1.7	Προσθετικό χέρι iLimb Ultra της TouchBionics. Πηγή: [21]. . . . .	21
2.1	Κόκαλα αντίχειρα. . . . .	28
2.2	Βαθμοί ελευθερίας αντίχειρα. . . . .	29
2.3	Αναπαράσταση μεγεθών για την κίνηση τροχαλίας. . . . .	30
2.4	Αναπαράσταση του αντίχειρα σε ηρεμία. . . . .	32
2.5	Αναπαράσταση του έλεγχου <i>Karandji</i> . α. Επαφή του ακροδάχτυλου του αντίχειρα με το ακροδάχτυλο του μικρού, β. Επαφή του ακροδάχτυλου του αντίχειρα με το ακροδάχτυλο του δείκτη, γ. Επαφή του ακροδάχτυλου του αντίχειρα με την μετακαρπιοφαλαγγική άρθρωση του μικρού, δ. Επαφή του ακροδάχτυλου του αντίχειρα με την μετακαρπιοφαλαγγική άρθρωση του δείκτη. . . . .	33
2.6	Αναπαράσταση όλων των δαχτύλων του ρομποτικού χεριού κατά την αρπάγη ενός κυλίνδρου. . . . .	34
2.7	Διαφορικοί μηχανισμοί. α. Seesaw μηχανισμός, β. Υβριδικός μηχανισμός. . . . .	36
2.8	Διαφορικός μηχανισμός επιλεκτικής εμπλοκής. . . . .	37
2.9	Αριστερό και δεξί ανθρωπομορφικό ρομποτικό χέρι. . . . .	38
2.10	Δύο διαφορετικά μεγέθη ανθρωπομορφικών ρομποτικών χεριών. α. HL = 185 mm, HB = 90 mm, β. HL = 200 mm, HB = 100 mm. . . . .	39



2.11 Μηχανές που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του χεριού. α. 3D Printer–Lulzbot TAZ4, β. Laser cutter–Universal Laser Systems VSL 3.5. . . . .	39
2.12 Αναπαράσταση διαφορικού μηχανισμού, όπου με κόκκινο τονίζεται το διαφορικό εσωτερικά της παλάμης καθώς και οι ενεργοποιημένοι, μηχανικοί συζεύκτες. . . . .	40
2.13 Κάτοψη τριδιάστατου σχεδίου. . . . .	41
2.14 Αναπαράσταση δαχτύλου με 2 φάλαγγες. Πηγή: [51]. . . . .	41
2.15 Κάτω μέρος παλάμης, όπου με κόκκινο τονίζεται το πρώτο μετακάρπιο κόκχαλο και με κίτρινο ο οδοντωτός μηχανισμός σύμπλεξης του αντίχειρα. . . . .	42
2.16 Άνω μέρος παλάμης όπου με κόκκινο τονίζεται η βάση του ηλεκτρικού επενεργητή. . . . .	42
2.17 Συνδεσμολογία Ηλεκτρικού επενεργητή με τον μικροελεγκτή. Μαύρο καλώδιο: Γείωση. Κόκκινο καλώδιο: Τροφοδοσία. Μπλε καλώδιο: TXD. Κίτρινο καλώδιο: RXD. Πηγή: [52]. . . . .	44
3.1 Σχέση δύναμης με ανηγμένη γραμμική μετατόπιση του διαφορικού μηχανισμού χωρίς εμπλοκή δαχτύλων. . . . .	46
3.2 Σχέση δύναμης με ανηγμένη γραμμική μετατόπιση του διαφορικού μηχανισμού με εμπλοκή του μικρού δαχτύλου. . . . .	47
3.3 Σχέση δύναμης με ανηγμένη γραμμική μετατόπιση του διαφορικού μηχανισμού με εμπλοκή των δαχτύλων παράμεσου και μικρού. . . . .	48
3.4 Σχέση δύναμης με ανηγμένη γραμμική μετατόπιση του διαφορικού μηχανισμού με εμπλοκή των δαχτύλων μέσου, παράμεσου και μικρού. . . . .	49
3.5 Σχέση δύναμης αντίχειρα με ανηγμένη γραμμική μετατόπιση του διαφορικού μηχανισμού. . . . .	50
3.6 Ανθρωπομορφικό ρομποτικό χέρι σε ηρεμία. . . . .	51
3.7 Περιορισμός κίνησης ενός δαχτύλου. α. Μικρός, β. Παράμεσος, γ. Μέσος, δ. Δείκτης. . . . .	52
3.8 Περιορισμός κίνησης διαφόρων δαχτύλων. α. Σύμβολο της ειρήνης, β. Devil’s Horns, γ. Προσκοπικός χαιρετισμός. . . . .	52
3.9 Αρπάγη διαφόρων αντικειμένων. α. Γυαλιά ηλίου, β. Κούπα, γ. Μαρκάδρος. . . . .	53
3.10 Αρπάγη διαφόρων αντικειμένων. α. Πλαστικό μπουκάλι νερού, β. Κουτάλι. . . . .	54
B’1 Εργαλεία κατασκευής ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού. . . . .	62
B’2 Υλικά κατασκευής ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού. . . . .	62
B’3 Αναπαραστάσεις τεμαχίων δαχτύλων. . . . .	64
B’4 Αναπαραστάσεις τεμαχίων παλάμης. . . . .	66

B'.5 Αναπαραστάσεις τεμαχίων περιφερειακού εξοπλισμού. . . . .	69
B'.6 Ενσωμάτωση δαχτύλων στην παλάμη. . . . .	72
B'.7 Ενσωμάτωση βάσεων μηχανικών συζευκτών στην παλάμη. . . . .	73
B'.8 Ενσωμάτωση μηχανικών συζευκτών στις βάσεις τους. . . . .	74
B'.9 Ενσωμάτωση βάσης μηχανισμού αντίχειρα στο κάτω μέρος της παλάμης. . . . .	75
B'.10 <sup>1</sup> βήμα κατασκευής κινούμενου μηχανισμού του αντίχειρα. . . . .	76
B'.11 <sup>2</sup> βήμα κατασκευής κινούμενου μηχανισμού του αντίχειρα. . . . .	77
B'.12 <sup>3</sup> βήμα κατασκευής κινούμενου μηχανισμού του αντίχειρα. . . . .	77
B'.13 <sup>4</sup> βήμα κατασκευής κινούμενου μηχανισμού του αντίχειρα. . . . .	78
B'.14 <sup>5</sup> βήμα κατασκευής κινούμενου μηχανισμού του αντίχειρα. . . . .	79
B'.15 <sup>1</sup> βήμα κατασκευής συστήματος περιέλιξης τένοντα. . . . .	80
B'.16 <sup>2</sup> βήμα κατασκευής συστήματος περιέλιξης τένοντα. . . . .	81
B'.17 Κατασκευή βάσης ηλεκτρικού επενεργητή. . . . .	82
B'.18 <sup>3</sup> βήμα κατασκευής συστήματος περιέλιξης τένοντα. . . . .	83
B'.19 <sup>4</sup> βήμα κατασκευής συστήματος περιέλιξης τένοντα. . . . .	84
B'.20 <sup>5</sup> βήμα κατασκευής συστήματος περιέλιξης τένοντα. . . . .	85
B'.21 <sup>6</sup> βήμα κατασκευής συστήματος περιέλιξης τένοντα. . . . .	86
B'.22 <sup>7</sup> βήμα κατασκευής συστήματος περιέλιξης τένοντα. . . . .	87
B'.23 Ενσωμάτωση αντίχειρα στην παλάμη. . . . .	88
B'.24 <sup>1</sup> βήμα ενσωμάτωσης συστήματος περιέλιξης τένοντα στην παλάμη. . . . .	89
B'.25 <sup>2</sup> βήμα ενσωμάτωσης συστήματος περιέλιξης τένοντα στην παλάμη. . . . .	90
B'.26 <sup>3</sup> βήμα ενσωμάτωσης συστήματος περιέλιξης τένοντα στην παλάμη. . . . .	91
B'.27 Ενσωμάτωση φλάντζας στην κατασκευή. . . . .	92
B'.28 Ανθρωπομορφικό ρομποτικό χέρι, συναρμολογημένη κατασκευή. . . . .	93
B'.29 Ανθρωπομορφικό ρομποτικό χέρι παχτωμένο στον βραχίονα Mitsubishi PA-10. . . . .	93

# Κατάλογος Πινάκων

2.1	Μήκη φαλαγγών αντίχειρα. . . . .	24
2.2	Μήκη φαλαγγών δείκτη. . . . .	24
2.3	Μήκη φαλαγγών μέσου. . . . .	24
2.4	Μήκη φαλαγγών παράμεσου. . . . .	24
2.5	Μήκη φαλαγγών μικρού. . . . .	24
2.6	Θέση (X,Z) βάσεων δαχτύλων. . . . .	25
2.7	Μηχανολογικές ιδιότητες ABS και Plexiglas. . . . .	26
2.8	Εύρη λειτουργίας ανθρώπινων δαχτύλων ανά άρθρωση. Το ‘Υ’ αναφέρεται ως υπερέκταση της άρθρωσης. . . . .	27
2.9	Στοιχεία D–H για τον δείκτη. . . . .	31
2.10	Εσωτερική θέση καρπομετακάρπιας άρθρωσης αντίχειρα. . . . .	32
2.11	Τεχνικά χαρακτηριστικά ηλεκτρικού επενεργητή HerkuleX DRS–0201. . . . .	43
3.1	Χαρακτηριστικά ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού. . . . .	50
3.2	Χαρακτηριστικά δαχτύλων ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού σύμφωνα με τις προϋποθέσεις του πίνακα 3.1. . . . .	51
B’1	Κατάλογος τεμαχίων δαχτύλων. . . . .	63
B’2	Κατάλογος τεμαχίων παλάμης. . . . .	65
B’3	Κατάλογος τεμαχίων περιφερειακού εξοπλισμού. . . . .	68
B’4	Ρυθμίσεις 3D εκτυπωτή. . . . .	70
B’5	Τεμάχια μηχανής εναπόθεσης τήγματος. . . . .	71
B’6	Τεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος B’6. . . . .	72
B’7	Τεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος B’7. . . . .	73
B’8	Τεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος B’8. . . . .	74
B’9	Τεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος B’9. . . . .	75
B’10	Τεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος B’10. . . . .	75
B’11	Τεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος B’11. . . . .	76
B’12	Τεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος B’12. . . . .	77
B’13	Τεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος B’13. . . . .	78
B’14	Τεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος B’14. . . . .	79
B’15	Τεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος B’15. . . . .	80

B'.16	Γεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος B'.16.	81
B'.17	Γεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος B'.17.	82
B'.18	Γεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος B'.18.	83
B'.19	Γεμάχια για την κατασκευή του σχήματος B'.19.	84
B'.20	Γεμάχια για την κατασκευή του σχήματος B'.20.	84
B'.21	Γεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος B'.21.	85
B'.22	Γεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος B'.22.	86
B'.23	Γεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος B'.23.	88
B'.24	Γεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος B'.24.	88
B'.25	Γεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος B'.25.	89
B'.26	Γεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος B'.26.	90
B'.27	Γεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος B'.27.	92

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής

Τα τελευταία χρόνια παρουσιάζεται μεγάλο ενδιαφέρον για την μελέτη και κατασκευή ανθρωπομορφικών, υποεπενεργούμενων ρομποτικών χεριών. Τα ανθρωπομορφικά ρομποτικά χέρια βρίσκουν εφαρμογή είτε ως τελικό άκρο σε συστήματα ρομποτικών βραχιόνων, είτε ως προσθετικά μέλη. Τα περισσότερα ανθρωπομορφικά χέρια είναι πλήρως επενεργούμενα, εξαιρετικά ακριβά, μεγάλου βάρους και απαιτούν πολύπλοκους νόμους ελέγχου για την λειτουργία τους.

Για τους παραπάνω λόγους, προτάθηκε πρόσφατα μια νέα κλάση ρομποτικών χεριών που απαιτούν λιγότερους επενεργητές από βαθμούς ελευθερίας τους και τα οποία ονομάζονται υποεπενεργούμενα. Οι λόγοι που οδήγησαν στην μείωση των ηλεκτρικών επενεργητών παρατίθενται παρακάτω:

- Αυξάνουν το κόστος ανάπτυξης και αγοράς ενός ρομποτικού χεριού.
- Αυξάνουν το συνολικό βάρος της κατασκευής.
- Αυξάνουν την πολυπλοκότητα των απαιτούμενων νόμων ελέγχου.

Συνεπώς, προέκυψαν ρομποτικά χέρια που χρησιμοποιούσαν ένα ηλεκτρικό επενεργητή, με την μεταφορά της κίνησης να γίνεται μέσω διαφορικών μηχανισμών με μπάρες, οδοντωτούς τροχούς και τροχαλίες. Παρόλο που υπήρξε σημαντική μείωση στο κόστος αγοράς, στο βάρος της κατασκευής και στην πολυπλοκότητα των νόμων ελέγχου το πρόβλημα δεν λύθηκε, καθώς προέκυψαν ζητήματα λειτουργικότητας.

Για να αντιμετωπίσουμε τα συγκεκριμένα προβλήματα λειτουργικότητας αναζητούμε έμπνευση στο ανθρώπινο χέρι, το πιο επιδέξιο τελικό άκρο στην φύση. Πολλά ανθρωπομορφικά ρομποτικά χέρια εμπνέονται από την επιδεξιότητα του ανθρώπινου χεριού, χωρίς να υπάρχει όμως ακόμη ρομποτικό χέρι που να έχει ικανοποιητικό βαθμό ανθρωπομορφικότητας [1].

Στην παρούσα διπλωματική εργασία σχεδιάζεται και κατασκευάζεται ανθρωπομορφικό, υποεπενεργούμενο ρομποτικό χέρι που υιοθετεί έξυπνες λύσεις για τα ζητήματα λειτουργικότητας και πληροί ικανοποιητικά τα κριτήρια ανθρωπομορφισμού.

## 1.2 Σχετικές εργασίες

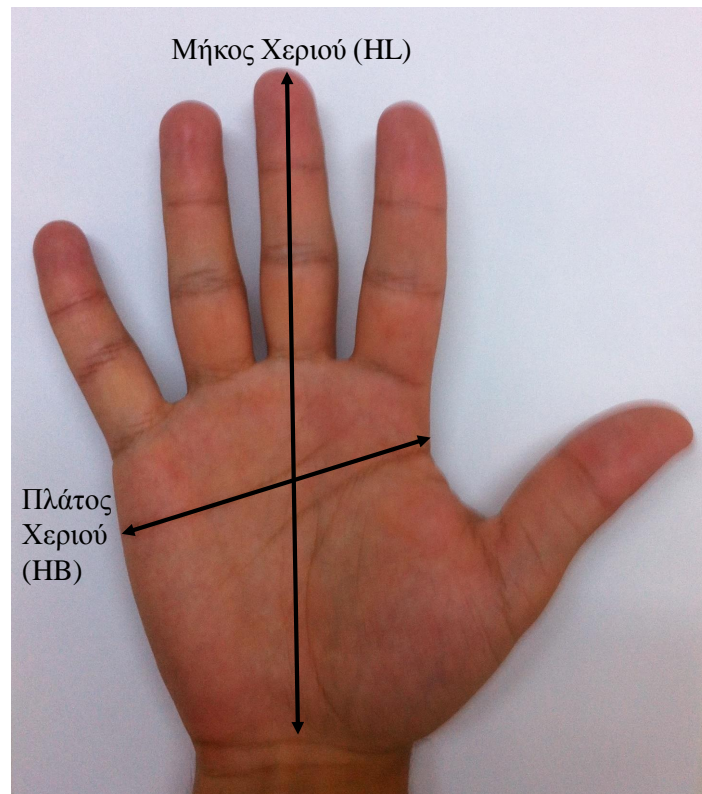
Είναι γνωστό ότι τα αντικείμενα που υπάρχουν τριγύρω μας είναι σχεδιασμένα προκειμένου να διευκολύνεται η αρπάγη τους από το ανθρώπινο χέρι. Επομένως, προκειμένου να επιτευχθεί μεγιστοποίηση της ικανότητας του ρομποτικού χεριού να επιτύχει αρπάγες καθημερινών αντικειμένων επιλέγεται ανθρωπομορφική σχεδίαση.

Πρόσφατα, σειρά μελετών επικεντρώθηκαν στην περιγραφή και ποσοτικοποίηση του ανθρωπομορφισμού παραδειγματικών ρομποτικών άκρων [1, 2]. Οι συγγραφείς χρησιμοποιούν μια μεθοδολογία σύγκρισης του ανθρώπου με ρομποτικά συστήματα, η οποία βασίζεται σε συγκρίσεις των χώρων εργασίας τους και εξάγει ένα βαθμό ανθρωπομορφικότητας που κυμαίνεται από το 0 έως το 1 (0–100%).



Σχήμα 1.1: Ανθρώπινο χέρι.

Στην παρούσα εργασία, αρχικά προσδιορίζεται το κινηματικό μοντέλο του ανθρώπινου χεριού χρησιμοποιώντας προϋπάρχουσες ανθρωπομετρικές μελέτες [3]. Οι συγκεκριμένες μελέτες αποδεικνύουν πως η ανατομία του ανθρώπινου χεριού ακολουθεί κανονική κατανομή βάσει δύο παραμέτρων. Οι παράμετροι αυτές είναι το μήκος (HL) και το πλάτος (HB) του ανθρώπινου χεριού, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2. Μετά την εξαγωγή του κινηματικού μοντέλου του ανθρώπινου χεριού, γίνεται σύγκριση με το κινηματικό μοντέλο του ρομποτικού χεριού. Για την σύγκριση χρησιμοποιείται η προαναφερθείσα μεθοδολογία ποσοτικοποίησης του ανθρωπομορφισμού των ρομποτικών χεριών.

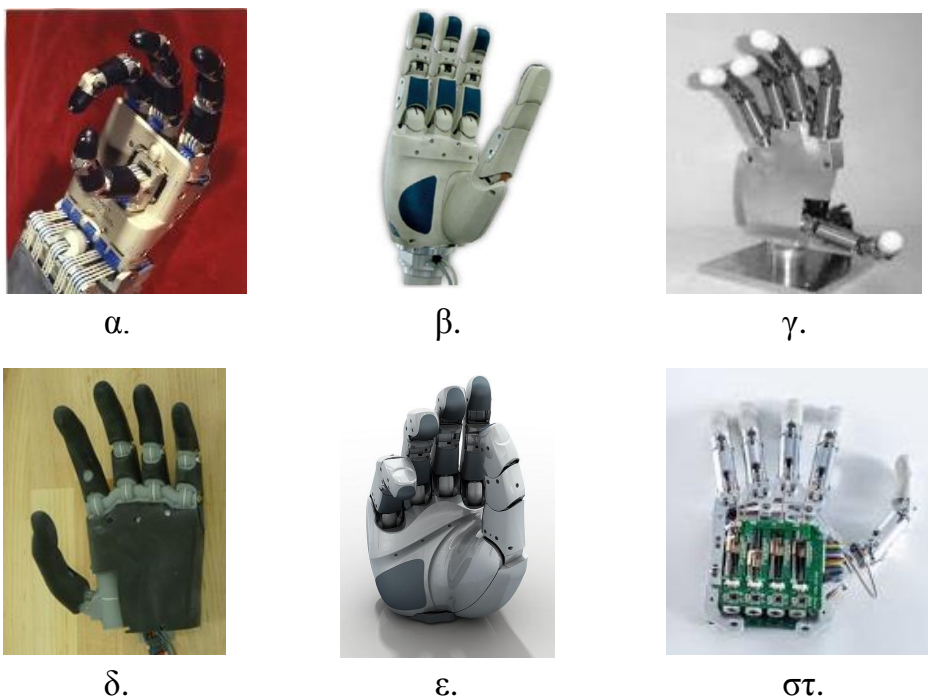


Σχήμα 1.2: Μήκος ανθρώπινου χεριού (Hand Length), πλάτος ανθρώπινου χεριού (Hand Breadth).

Πολλές έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί προκειμένου να ταξινομηθούν οι τύποι αρπαγών που πραγματοποιούν καθημερινά οι άνθρωποι [4-6]. Σε αυτές φαίνεται πως το ανθρώπινο χέρι δύναται να πραγματοποιεί μεγάλο αριθμό αρπαγών με εξαιρετική ευκολία, γεγονός που αποδεικνύει την πολυπλοκότητα και επιδεξιότητα του.

Τις τελευταίες δεκαετίες παρουσιάζεται ευρεία ερευνητική δραστηριότητα στον τομέα σχεδίασης ρομποτικών χεριών. Οι πρώτες κατευθύνσεις αφορούσαν τη δημιουργία ρομποτικών χεριών που είτε ήταν πλήρως επενεργούμενα, είτε χρησιμοποιούσαν αρκετούς ηλεκτρικούς επενεργητές, όπως το Utah/MIT Hand [7], DLR Hand I [8], Gifu Hand [9], Vanderbilt Hand [10], DLR/HIT Hand II [11] και SmartHand [12], τα οποία διακρίνονται στο σχήμα 1.3. Αυτές οι έρευνες οδήγησαν στην δημιουργία ανθρωπομορφικών ρομποτικών χεριών, όπου λόγω του αυξημένου αριθμού ηλεκτρικών επενεργητών, παρουσίαζαν πολύπλοκα σχήματα ελέγχου.

Επίσης, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ιδιαίτερη ερευνητική δραστηριότητα στον τομέα της εξέλιξης ανθρωπομορφικών, υποχωρητικών, υποεπενεργούμενων ρομποτικών χεριών, όπως το Yale Prosthetic Hand [13], U. Laval Prosthetic Gripper [14], ISR-SoftHand [15] και Pisa/IIT SoftHand [16], τα οποία διακρίνονται στο σχήμα 1.4. Μάλιστα κάποιες έρευνες οδήγησαν στην δημιουργία πρωτοβουλιών ανοιχτού κώδικα

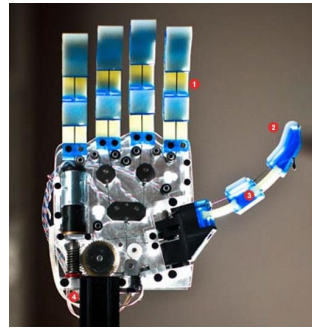


Σχήμα 1.3: Ανθρωπομορφικά ρομποτικά χέρια. α. Utah/MIT Hand, β. DLR Hand I, γ. Gifu Hand, δ. Vanderbilt Hand, ε. DLR/HIT Hand II, στ. SmartHand.

που διαθέτουν ελεύθερα τα σχέδια κατασκευής των χεριών και οδηγούς συναρμολόγησης, όπως το Yale OpenHand Project [17], η Natural Machine Motion Initiative [18] και η OpenBionics Initiative [19]. Σημειώνεται πως αυτές οι πρωτοβουλίες ανοιχτού κώδικα διαδίδουν ρομποτικά χέρια εξαιρετικά χαμηλού κόστους κατασκευής. Στην υποενότητα 1.2.1 θα αναλύσουμε την λειτουργία των [13,14].

Στην αγορά υπάρχουν επίσης αρκετές πιστοποιημένες επιλογές ρομποτικών χεριών, για ένα άτομο με αναπηρία στο άνω άκρο, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως προσθετικά μέλη. Τα πιο αντιπροσωπευτικά παραδείγματα είναι το BeBionic της Steeper [20], το iLimb της TouchBionics [21], το VincentHand της VincentSystems [22] και το Michelangelo της Ottobock [23], τα οποία διακρίνονται στο σχήμα 1.5. Το κόστος αγοράς αυτών των προσθετικών χεριών κυμαίνεται από 20\$K- 100\$K, γεγονός που καθιστά την αγορά τους, από μεγάλο ποσοστό αναπήρων, πολύ δύσκολη έως απαγορευτική. Στην υποενότητα 1.2.2 θα αναλύσουμε τα χαρακτηριστικά δύο εκ των πιο διαδεδομένων προσθετικών χεριών, του BeBionic της Steeper [20] και του iLimb της TouchBionics [21].

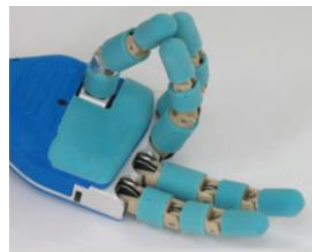




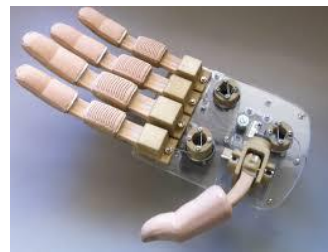
α.



β.



γ.



δ.

Σχήμα 1.4: Ανθρωπομορφικά ρομποτικά χέρια με ένα ηλεκτρικό επενεργητή. α. Yale Prosthetic Hand, β. Pisa/IIT SoftHand, γ. U. Laval Prosthetic Gripper, δ. ISR-SoftHand.

### 1.2.1 Ανθρωπομορφικά ρομποτικά χέρια

Πρόσφατα παρουσιάστηκε ένα ανθρωπομορφικό ρομποτικό χέρι που χρησιμοποιεί ένα ηλεκτρικό επενεργητή [13]. Το συγκεκριμένο χέρι είναι υποεπενεργούμενο και χρησιμοποιεί για την μετάδοση της κίνησης ένα διαφορικό μηχανισμό με μπάρες, που βασίζεται στο Whiffletree [24]. Η μεγαλύτερη συνεισφορά της συγκεκριμένης εργασίας είναι ένας καινοτόμος μηχανισμός για την κίνηση του αντίχειρα. Η εν λόγω μηχανολογική διάταξη μπορεί να επιτύχει έλεγχο 2 ανεξάρτητων βαθμών ελευθερίας από έναν ηλεκτρικό επενεργητή. Πιο συγκεκριμένα, δύναται να επιλεγεί η κάμψη-επέκταση όλων των δακτύλων του ρομποτικού χεριού αλλά και η αντίθεση του αντίχειρα. Η διαφοροποίηση της κίνησης βασίζεται στην φορά περιστροφής του ηλεκτρικού επενεργητή. Κατά την αντίθεση του αντίχειρα επιτυγχάνονται τέσσερις διακριτές θέσεις, καθώς θεωρήθηκε από τους συγγραφείς πως καλύπτουν τους συνηθέστερους τύπους αρπάγης αντικειμένων.

Μία άλλη ενδιαφέρουσα περίπτωση ρομποτικού χεριού παρουσιάζεται στο [14]. Το συγκεκριμένο χέρι είναι υποεπενεργούμενο και για την μετάδοση της κίνησης χρησιμοποιεί ένα διαφορικό μηχανισμό με μπάρες βασιζόμενο στο Whiffletree [24]. Η μεγαλύτερη συνεισφορά της συγκεκριμένης εργασίας είναι η εισαγωγή ενός μηχανικού



Σχήμα 1.5: Εμπορικά προσθετικά χέρια. α. BeBionic, β. iLimb, γ. Vincent Hand, δ. Michelangelo.

επιλογή που δίνει την δυνατότητα να επιλεγούν δύο διαφορετικοί τύποι αρπάγης και μια χειρονομία. Για τον περιορισμό της κίνησης των δαχτύλων αναπτύχθηκε ένας μηχανικός επιλογέας τριών θέσεων. Ο μηχανικός επιλογέας έχει κατάλληλη γεωμετρία ώστε να επιτρέπει ή να περιορίζει την κίνηση συγκεκριμένων δαχτύλων. Θεωρήθηκε από τους συγγραφείς πως με αυτό τον τρόπο καλύπτεται η πλειοψηφία των αρπαγών αντικειμένων που πραγματοποιούν οι άνθρωποι καθημερινά.

### 1.2.2 Εμπορικά προσθετικά χέρια

Το BeBionic κατασκευάζεται από την Steeper στο Leeds της Αγγλίας. Το συνολικό του βάρος του κυμαίνεται μεταξύ 495 έως 539 g. Οι διαστάσεις του κυμαίνονται για το μήκος του χεριού από 190 έως 200 mm, για το πλάτος του χεριού από 84 έως 92 mm και το πάχος του χεριού είναι 50 mm.

Η ύπαρξη διαφορετικών διαστάσεων οφείλεται στην προσπάθεια του κατασκευαστή να δημιουργήσει προσωποποιημένα προσθετικά μέλη. Ο αριθμός των αρθρώσεων του προσθετικού μέλους είναι 11, οι βαθμοί ελευθερίας του είναι 6 και χρησιμοποιεί 5 ηλεκτρικούς επενεργητές. Η εγγύς φάλαγγα κάθε δαχτύλου είναι ενιαία με την άπω φάλαγγα, συνεπώς για τα δάχτυλα δείκτης, μέσος, παράμεσος και μικρός οι αρθρώσεις του ρομποτικού χεριού μειώνονται σε 8 αντί για 15 που υιοθετεί το ανθρώπινο χέρι. Ο αντίχειρας επιτυγχάνει την αντίθεση του μηχανικά στην θέση που επιθυμεί ο χρήστης

και έχει 2 βαθμούς ελευθερίας στις αρθρώσεις άπω μεσοφαλαγγική και μετακαρπιοφαλαγγική. Έπειτα, δεδομένου ότι ο χρήστης μπορεί να ελέγξει μυστηλεκτρικά κάθε δάχτυλο ξεχωριστά καθώς και την αντίθεση του αντίχειρα, θεωρούμε πως το χέρι έχει συνολικά 6 βαθμούς ελευθερίας.



Σχήμα 1.6: Προσθετικό χέρι BeBionic της Steeper. Πηγή: [20].

Το iLimb Ultra κατασκευάζεται από την TouchBionics στο Livingston της Σκωτίας. Το συνολικό του βάρος του κυμαίνεται μεταξύ 460 έως 465 g. Οι διαστάσεις κυμαίνονται για το μήκος του χεριού από 180 έως 182 mm, για το πλάτος του χεριού από 75 έως 80 mm και το πάχος του χεριού από 35 έως 41 mm.



Σχήμα 1.7: Προσθετικό χέρι iLimb Ultra της TouchBionics. Πηγή: [21].

Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά των αρθρώσεων, των βαθμών ελευθερίας και των ηλεκτρικών επενεργητών του iLimb είναι παρόμοια με αυτά του BeBionic που περιγράφηκαν παραπάνω.

### 1.3 Δομή της διπλωματικής

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναλύεται η σχεδίαση και κατασκευή ενός ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού. Αρχικά, ορίζουμε τις απαιτήσεις του προβλήματος στην ενότητα 2.1. Στην συνέχεια, καθορίζουμε την επιθυμητή λειτουργικότητα, προκειμένου να επιτυγχάνεται πληθώρα καθημερινών αρπαγών σε μη δομημένα περιβάλλοντα. Έπειτα, μελετάμε την επιλογή των υλικών ώστε να έχει χαμηλό βάρος, να διατηρεί υψηλά επίπεδα στιβαρότητας και παράλληλα να είναι οικονομική κατασκευή.

Στην συνέχεια, στην ενότητα 2.2 ορίζουμε τους περιορισμούς κατασκευής του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού βάσει των απαιτήσεων που έχουν οριστεί. Αρχικά, γίνεται προσεκτική επιλογή των βαθμών ελευθερίας που έχει το ρομποτικό χέρι. Έπειτα, ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην μελέτη του αντίχειρα, καθώς είναι στο πιο σημαντικό και σύνθετο δάχτυλο στο ανθρώπινο χέρι. Έπειτα, ορίζουμε τους περιορισμούς σχεδίασης και κατασκευής του αντίχειρα στο ρομποτικό χέρι και γίνεται μελέτη μείωσης των τριβών στο σύστημα περιέλιξης τένοντα, που μεταφέρει την κίνηση από τον ηλεκτρικό επενεργητή στα δάχτυλα.

Στην ενότητα 2.3 λαμβάνουμε σχεδιαστικές αποφάσεις και ορίζουμε παραδοχές για το ανθρωπομορφικό ρομποτικό χέρι, βάσει των απαιτήσεων και των περιορισμών που προέκυψαν. Αρχικά, δημιουργούμε το πλήρες κινηματικό μοντέλο του ρομποτικού χεριού. Μετά, ορίζουμε την ακριβή θέση και τα χαρακτηριστικά του μηχανισμού του αντίχειρα χρησιμοποιώντας ιατρικούς ελέγχους, την αντίστροφη κινηματική και μελέτες ταξινόμησης αρπαγών αντικειμένων. Έπειτα, σχεδιάζουμε τον διαφορικό μηχανισμό μετάδοσης της κίνησης. Ακολουθεί, στην ενότητα 2.4 η σχεδίαση του τριδιάστατου μοντέλου του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού. Επίσης, παρουσιάζεται η παραμετροποίηση του σχεδίου καθώς και οι τρόποι κατασκευής του ρομποτικού χεριού.

Στο κεφάλαιο 3 εξασφαλίζεται μέσω πειραματικής διαδικασίας η λειτουργικότητα του συνόλου της κατασκευής του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού. Επίσης, εξετάζουμε την λειτουργικότητα του διαφορικού μηχανισμού επιλεκτικής εμπλοκής καθώς και την ικανότητα του χεριού να επιτυγχάνει αρπάγες καθημερινών αντικειμένων. Για την λειτουργικότητα του διαφορικού μηχανισμού, στην ενότητα 3.1, παρουσιάζονται διαγράμματα δύναμης των δαχτύλων σε σχέση με την ανηγμένη γραμμική μετατόπιση του διαφορικού μηχανισμού. Στην ενότητα 3.2 εξετάζεται η ικανότητα του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού να επιτυγχάνει αρπάγες διαφόρων, καθημερινών αντικειμένων.

Ακολουθούν δύο παραρτήματα. Στο Παράρτημα Α' παρουσιάζεται η πρωτοβουλία OpenBionics και στο Παράρτημα Β' παρατίθεται αναλυτικός οδηγός συναρμολόγησης του ρομποτικού χεριού.

# Κεφάλαιο 2

## Σχεδίαση

### 2.1 Απαιτήσεις

Οι απαιτήσεις που προκύπτουν για την δημιουργία του ρομποτικού χεριού είναι πολυδιάστατες. Αρχικά το ρομποτικό χέρι πρέπει να είναι παρεμφερές με το ανθρώπινο χέρι, δηλαδή να διακρίνεται από υψηλό δείκτη ανθρωπομορφικότητας. Έπειτα, η κατασκευή οφείλει να χαρακτηρίζεται από χαμηλό βάρος. Στην συνέχεια, θεωρήθηκε σκόπιμο το ρομποτικό χέρι να απαρτίζεται από υλικά που να μπορούν να βρεθούν εύκολα και με χαμηλό κόστος στην αγορά. Τέλος, η πιο σημαντική απαίτηση, είναι η λειτουργικότητα του ρομποτικού χεριού που θα το καθιστά ικανό να επιτύχει μέγιστο αριθμό αρπαγών αντικειμένων.

#### 2.1.1 Ανθρωπομορφισμός

Για να εξασφαλίσουμε τον βέλτιστο βαθμό ανθρωπομορφικότητας χρησιμοποιούμε τις σχέσεις που ορίζουν το θεωρητικό μοντέλο του χεριού [3]. Στην συνέχεια, εξασφαλίζουμε την ανθρωπομορφική σχεδίαση προσδιορίζοντας το μήκος των φαλαγγών των δαχτύλων καθώς και τις θέσεις και προσανατολισμούς των βάσεων των δαχτύλων.

Τα ανθρώπινα δάχτυλα δείκτης, μέσος, παράμεσος και μικρός έχουν 3 φάλαγγες το καθένα, ενώ ο αντίχειρας έχει 2 φάλαγγες. Επιπλέον, ο αντίχειρας διαθέτει 3 κόκκαλα εσωτερικά της παλάμης που συμμετέχουν στην λειτουργία του και δεν μπορούν να προσδιοριστούν ως προς την θέση τους. Παρακάτω παρατίθενται οι πίνακες 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 που περιγράφουν τα μήκη των φαλαγγών καθώς και τις θέσεις και προσανατολισμούς των βάσεων των δαχτύλων. Το αρχικό σύστημα συντεταγμένων του χεριού προσδιορίζεται στο μέσο της άρθρωσης του αγκώνα. Ο άξονας X ξεκινάει από το τρίτο μετακάρπιο και είναι συνευθειαχός με τον μέσο. Ο άξονας Z προεκτείνεται στον αγκώνα με κατεύθυνση την ωλένη.

Αντίχειρας	
Φάλαγγα	Μήκος (mm)
Πρώτη	$0.196 \times HL$
Δεύτερη	$0.158 \times HL$

Πίνακας 2.1: Μήκη φαλαγγών αντίχειρα.

Δείκτης	
Φάλαγγα	Μήκος (mm)
Πρώτη	$0.245 \times HL$
Δεύτερη	$0.143 \times HL$
Τρίτη	$0.097 \times HL$

Πίνακας 2.2: Μήκη φαλαγγών δείκτη.

Μέσος	
Φάλαγγα	Μήκος (mm)
Πρώτη	$0.266 \times HL$
Δεύτερη	$0.170 \times HL$
Τρίτη	$0.108 \times HL$

Πίνακας 2.3: Μήκη φαλαγγών μέσου.

Παράμεσος	
Φάλαγγα	Μήκος (mm)
Πρώτη	$0.244 \times HL$
Δεύτερη	$0.165 \times HL$
Τρίτη	$0.107 \times HL$

Πίνακας 2.4: Μήκη φαλαγγών παράμεσου.

Μικρός	
Φάλαγγα	Μήκος (mm)
Πρώτη	$0.204 \times HL$
Δεύτερη	$0.117 \times HL$
Τρίτη	$0.093 \times HL$

Πίνακας 2.5: Μήκη φαλαγγών μικρού.

Από τις ανθρωπομετρικές στατιστικές μελέτες προσδιορίζουμε την θέση των βάσεων των δαχτύλων δείκτης, μέσος, παράμεσος και μικρός. Η θέση του αντίχειρα δεν ακολουθεί κανονική κατανομή, για αυτό έγινε επιλογή με άλλα κριτήρια που θα αναπτυχθούν στην υποενότητα 2.3.2. Στον πίνακα 2.6 παρατίθενται οι θέσεις των τεσσάρων δαχτύλων στο καρτεσιανό χώρο.

Δάχτυλα	Άξονας X	Άξονας Y
Δείκτης	$0.447 \times HL$	$-0.251 \times HB$
Μέσος	$0.446 \times HL$	0
Παράμεσος	$0.409 \times HL$	$0.206 \times HB$
Μικρός	$0.368 \times HL$	$0.402 \times HB$

Πίνακας 2.6: Θέση (X,Z) βάσεων δαχτύλων.

Η φυσιολογία του ανθρώπινου χεριού αναλύεται στα [25, 26], όπου προσδιορίζεται η φυσική θέση των δαχτύλων όταν το χέρι βρίσκεται σε ηρεμία. Επίσης, από την φυσική θέση μπορεί να εξαχθεί ο αρχικός προσανατολισμός των δαχτύλων δείκτη, μέσου, παράμεσου και μικρού. Για λόγους πολυπλοκότητας, δεν αναλύεται η επιλογή προσανατολισμού του αντίχειρα καθώς θα αναφερθεί εκτενώς στην υποενότητα 2.3.2.

### 2.1.2 Ελαφρά κατασκευή

Το ανθρώπινο χέρι ζυγίζει κατά μέσο όρο, από τον καρπό και έπειτα, χωρίς να υπολογίζονται οι εκτεινόμενοι μυς του πήχης, 400 g [27]. Πολύ σημαντικός παράγοντας για την αίσθηση του βάρους είναι ο τρόπος πρόσδεσης των προσθετικών μελών στο άνω άκρο. Επίσης, το βάρος του προσθετικού μέλους επιβαρύνει αρκετά τους χρήστες, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να το χρησιμοποιήσουν καθόλη την διάρκεια της ημέρας. Παρόλο που οι ερευνητές κινούνται στην κατεύθυνση δημιουργίας ολοκληρωμένων λύσεων στον τρόπο πρόσδεσης των προσθετικών χεριών [28], θεωρήθηκε δεδομένο πως η ελαφρά κατασκευή του προσθετικού μέλους θα συνεισφέρει στην μείωση της κόπωσης του χρήστη.

Δεν υπάρχει συγκεκριμένος περιορισμός σχετικά με το μέγιστο βάρος που πρέπει να έχει ένα προσθετικό μέλος. Αξίζει να αναφερθεί πως κάποιες έρευνες προτείνουν μέγιστο βάρος χεριού τα 400 g, άλλες θέτουν ως προαπαιτούμενο το σύνολο του χεριού συμπεριλαμβανομένου του ανθρωπομορφικού γαντιού να μην υπερβαίνει τα 370 g και τέλος άλλες ομάδες ορίζουν ως επιτρεπτό όριο βάρους τα 500 g [29].

Για την μείωση του βάρους του ρομποτικού χεριού θα χρησιμοποιήσουμε τον μικρότερο δυνατό αριθμό ηλεκτρικών επενεργητών. Συνεπώς, το υποεπενεργούμενο χέρι θα λειτουργεί με ένα ηλεκτρικό επενεργητή ο οποίος θα μεταφέρει την κίνηση σε 14 αρθρώσεις. Για να επιτευχθεί η συγκεκριμένη απαίτηση, έγινε χρήση ενός διαφορικού μηχανισμού με μπάρες που μεταφέρει την κίνηση στα δάχτυλα δείκτη, μέσο, παράμεσο και μικρό. Ο διαφορικός μηχανισμός αναλύεται εκτενώς στην υποενότητα 2.3.3.

Επίσης, σημαντικός παράγοντας μείωσης του βάρους είναι το υλικό κατασκευής. Για αυτό τον λόγο επιλέξαμε υλικά που αφενός είναι ελαφριά, δηλαδή έχουν μικρή πυκνότητα, αλλά αφετέρου έχουν ικανοποιητικές μηχανολογικές ιδιότητες. Τα υλικά που

χρησιμοποιήθηκαν είναι θερμοπλαστικό ABS (ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο) ή/και διάφανο θερμοπλαστικό Plexiglas (πολυμεθακρυλικό μεθύλιο). Παρακάτω παρατίθενται ο πίνακας 2.7 με τις κύριες μηχανολογικές ιδιότητες των υλικών κατασκευής.

Ιδιότητες	Θερμοπλαστικό ABS	Plexiglas
Πυκνότητα ( $g/cm^3$ )	1.04	1.19
Σκληρότητα	P-110	M-94
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	2.3	2.8
Λόγος Poisson	0.39	0.35

Πίνακας 2.7: Μηχανολογικές ιδιότητες ABS και Plexiglas.

Σημαντικό πλεονέκτημα των παραπάνω υλικών είναι πως μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μεθόδους ταχείας κατασκευής προτύπων. Το θερμοπλαστικό ABS δύναται να χρησιμοποιηθεί σε τεχνολογίες τήγματος στερεού υλικού και πιο συγκεκριμένα κατασκευή με εναπόθεση τήγματος (3D printing). Σημειώνεται πως τα τελευταία χρόνια, η ευρεία εξέλιξη παρόμοιων τεχνολογιών ανοιχτού κώδικα [30] έχει μειώσει αρκετά το κόστος αγοράς ενός τριδιάστατου εκτυπωτή. Το θερμοπλαστικό Plexiglas μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε μηχανές κοπής με laser. Μειονέκτημα αυτής της κατεργασίας είναι πως η σχεδίαση θα πρέπει να είναι διδιάστατη, γεγονός που αυξάνει την πολυπλοκότητα συναρμολόγησης και μειώνει την στιβαρότητα της κατασκευής.

### 2.1.3 Λειτουργικότητα

Το ρομποτικό χέρι πρέπει να πραγματοποιεί επιτυχείς αρπάγες με σημαντικό αριθμό αντικειμένων που χρησιμοποιεί ο άνθρωπος στην καθημερινότητα του. Έπειτα, πρέπει αυτή η αλληλεπίδραση με το περιβάλλον να μην προκαλεί ζημιές ή φθορές στα αντικείμενα και στον ρομποτικό μηχανισμό. Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο είναι να διατηρείται η στιβαρότητα του χεριού όταν αλληλεπιδρά με το περιβάλλον.

Για τους παραπάνω λόγους, επιλέξαμε αρθρώσεις με παθητική υποχωρητικότητα [31, 32]. Η παθητική υποχωρητικότητα, που επιτυγχάνεται μέσω ελατηρίων, και όχι αισθητήρων, προσφέρει πάρα πολλά πλεονεκτήματα που δεν μπορούν να επιτευχθούν με έλεγχο της δυσκαμψίας τους. Η παθητική υποχωρητικότητα μας εξασφαλίζει την ανάπτυξη μικρών δυνάμεων επαφής καθώς επιτρέπει την ανάπτυξη μεγάλων παρεκκλίσεων των αρθρώσεων. Έτσι, μειώνονται αισθητά οι διαταραχές που μπορεί να προκαλέσουν, ακόμα και καταστροφή του αντικειμένου, όταν ο έλεγχος δυσκαμψίας αποτύχει. Η εξάλειψη των αισθητήρων που απαιτούνται στην ενεργητική υποχωρητικότητα μπορεί να οδηγήσει σε αισθητή μείωση του κόστους κατασκευής. Ιδεατά, ο αναλυτικός σχεδιασμός του ρομποτικού χεριού περιλαμβάνει βελτιστοποίηση της κατασκευής που μπορεί να οδηγήσει ακόμα και στην εξάλειψη του παραδοσιακού, βασισμένου σε αισθητήρες, ελέγχου.



Παράλληλα, με την χρήση ελαστικών αρθρώσεων διατηρείται χαμηλά το βάρος αλλά εξακολουθεί να παραμένει απλή και οικονομική η κατασκευή. Συνάμα, αυξάνεται σημαντικά η προσαρμοστικότητα του χεριού στις επιφάνειες των αντικειμένων που επιθυμούμε να αρπάξουμε.

Σημαντικός παράγοντας στην επιδεξιότητα του χεριού είναι η μεγιστοποίηση της επιφάνειας του χώρου εργασίας των αρθρώσεων κατά την επέκταση-κάμψη των δαχτύλων. Παρακάτω παρατίθενται τα εύρη λειτουργίας των ανθρώπινων αρθρώσεων άπω μεσοφαλαγγική, εγγύς μεσοφαλαγγική και μετακαρπιοφαλαγγική κατά την επέκταση-κάμψη [11]. Το προτεινόμενο ρομποτικό χέρι επιτυγχάνει παρόμοιους χώρους εργασίας των δαχτύλων με το ανθρώπινο χέρι.

Δάχτυλα	Μετακαρπιο- φαλαγγική	Εγγύς μεσοφαλαγγική	Άπω μεσοφαλαγγική
Δείκτης	0° – 80°	0° – 100°	Υ10° – 90°
Μέσος	0° – 80°	0° – 100°	Υ10° – 90°
Παράμεσος	0° – 80°	0° – 100°	Υ20° – 90°
Μικρός	0° – 80°	0° – 100°	Υ30° – 90°
Αντίχειρας	0° – 60°	–	Υ15° – 80°

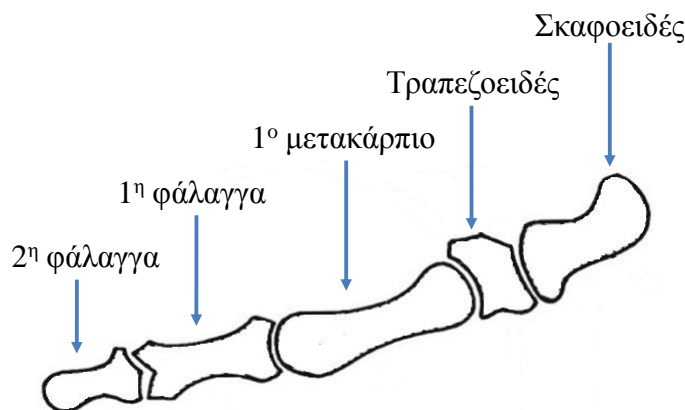
Πίνακας 2.8: Εύρη λειτουργίας ανθρώπινων δαχτύλων ανά άρθρωση. Το ‘Υ’ αναφέρεται ως υπερέκταση της άρθρωσης.

## 2.2 Περιορισμοί

Υπάρχουν διάφοροι περιορισμοί για την κατασκευή του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού που προκύπτουν από τις απαιτήσεις σχεδίασης. Αρχικά, πρέπει να περιοριστούν οι βαθμοί ελευθερίας του αντίχειρα χωρίς να μειωθεί η επιδεξιότητα του ρομποτικού χεριού. Έπειτα, απαιτείται να χρησιμοποιηθούν καινοτόμες διατάξεις προκειμένου να είναι λειτουργικό το ρομποτικό χέρι με ένα μόνο ηλεκτρικό επενεργητή.

### 2.2.1 Περιορισμοί αντίχειρα

Στην λειτουργία του αντίχειρα συμμετέχουν 5 κόκαλα, τα οποία είναι το σκαφοειδές, το τραπεζοειδές, το πρώτο μετακάρπιο, η εγγύς φάλαγγα και η άπω φάλαγγα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1. Επίσης, ο αντίχειρας χρησιμοποιεί 3 αρθρώσεις για την λειτουργία του, την καρπομετακάρπια, την εγγύς μεσοφαλαγγική και την άπω μεσοφαλαγγική. Από αυτές τις αρθρώσεις, οι δύο πραγματοποιούν περιστροφή σε δυο διαφορετικούς άξονες, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2, άρα έχουμε 5 βαθμούς ελευθερίας για την λειτουργία του αντίχειρα. Για την εύρεση των αξόνων περιστροφής του αντίχειρα έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα και μηχανισμοί [33–35].



Σχήμα 2.1: Κόκαλα αντίχειρα.

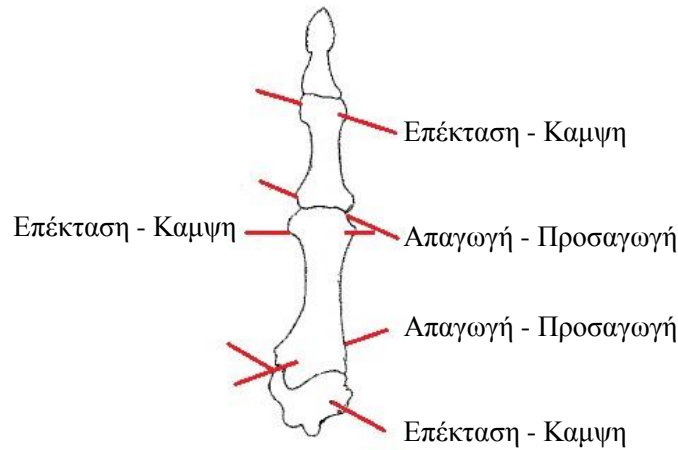
Οι δυνάμεις που ασκεί ο αντίχειρας ποικίλλουν [33, 36, 37]. Από αυτές τις μελέτες, προκύπτει πως η αντίδραση που ασκείται στην καρπομετακάρπια άρθρωση του αντίχειρα κυμαίνεται από 70 N έως 180 N. Παρόλο που οι δυνάμεις διαφέρουν αρκετά, η τάξη μεγέθους είναι πολύ μεγάλη. Συνεπώς, θεωρείται σίγουρο πως η καρπομετακάρπια άρθρωση παραλαμβάνει πολύ μεγάλα φορτία. Για αυτό τον λόγο, επιλέξαμε άρθρωση σταθερού άξονα περιστροφής σε σχέση με ελαστική άρθρωση για την καρπομετακάρπια άρθρωση.

Η λειτουργία του αντίχειρα είναι η πιο σημαντική από όλα τα υπόλοιπα δάχτυλα. Όμως, η πολυπλοκότητα λειτουργίας, η σύνθετη κατασκευή του και η ασάφεια των μηχανικών σχέσεων που τον διέπουν, καθιστούν αδύνατη την λειτουργία του ρομποτικού αντίχειρα με τον ίδιο τρόπο. Για τους παραπάνω λόγους, πραγματοποιήσαμε διάφορες παραδοχές προκειμένου να εξασφαλιστεί στο ακέραιο η εφαρμογή του στο ρομποτικό χέρι. Οι παραδοχές αναλύονται περαιτέρω στην υποενότητα 2.3.2.

### 2.2.2 Επενεργητές και σύστημα περιέλιξης τένοντα

Η χρήση ενός επενεργητή για 14 αρθρώσεις καθιστά την σχεδίαση εξαιρετικά πολύπλοκη καθώς πρέπει να περιοριστεί σημαντικά η απαιτούμενη ροπή. Δεν θα είχε νόημα να χρησιμοποιηθεί ένας πολύ μεγάλος επενεργητής που το βάρος και οι διαστάσεις του θα ήταν παρόμοιες με 3 ηλεκτρικούς επενεργητές. Για αυτούς τους λόγους, περιορίζουμε τις τριβές που δημιουργούνται από το σύστημα περιέλιξης τένοντα.

Επίσης, γίνεται χρήση δυο ξεχωριστών συστημάτων περιέλιξης καθώς κρίναμε αναγκαίο να υπάρχει διαφορετικός λόγος κίνησης των δαχτύλων δείκτη, μέσου, παράμεσου, μικρού σε σχέση με τον αντίχειρα για την ίδια περιστροφή του ηλεκτρικού επενεργητή. Οι λόγοι που μας οδήγησαν στην παραπάνω απόφαση αναλύονται στην υποενότητα 2.3.2.



Σχήμα 2.2: Βαθμοί ελευθερίας αντίχειρα.

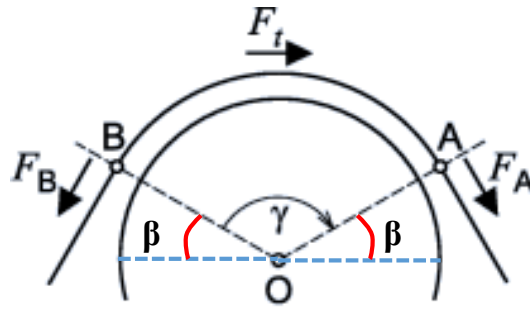
Η μετάδοση της κίνησης από τον επενεργητή στα δάχτυλα γίνεται με δύο συστήματα περιέλιξης τένοντα. Πιο συγκεκριμένα, ο ηλεκτρικός επενεργητής περιστρέφεται και τυλίγει ένα ενισχυμένο νήμα (Dyneema) που οι ιδιότητες του αναλύονται στην υποενότητα 2.4.3. Συνεπώς, η περιστροφή του ηλεκτρικού επενεργητή προκαλεί μια γραμμική μετατόπιση στο νήμα, η οποία μεταφέρεται στην κορυφή των δαχτύλων μέσω τροχαλιών, διαφορικού μηχανισμού και σωλήνων χαμηλής τριβής. Η γραμμική μετατόπιση με την σειρά της, προκαλεί δύναμη στο άνω άκρο του δαχτύλου που ωθεί τις ελαστικές αρθρώσεις να περιστραφούν. Η επαναφορά των αρθρώσεων στην αρχική τους θέση γίνεται μέσω ελαστικών μερών (που δρουν ως εκτατικοί τένοντες), εφόσον σταματήσουν να ασκούνται δυνάμεις, επαναφέροντας τον ηλεκτρικό επενεργητή στην αρχική του θέση [31, 38].

Για να εξασφαλίσουμε τις μικρότερες δυνατές απώλειες πραγματοποιήθηκε κατάλληλη μελέτη για την σχεδίαση του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού και την τοποθέτηση των τροχαλιών. Πιο συγκεκριμένα για μια τροχαλία ισχύει ο νόμος του Eytelwein:

$$F_A = F_B \cdot e^{\mu \cdot \gamma} \quad (2.1)$$

Τα μεγέθη τις σχέσης 2.1 που παρουσιάζονται στο σχήμα 2.3 είναι  $F_B$  η εφαρμοζόμενη δύναμη (N),  $F_A$  η δύναμη διέγερσης στην τροχαλία (N),  $\mu$  ο συντελεστής τριβής που προκύπτει εμπειρικά και  $\gamma$  η συνολική γωνία επαφής του νήματος με την τροχαλία (rad). Για να μεγιστοποιηθεί η  $F_B$  πρέπει να ελαχιστοποιηθεί ο εκθετικός όρος  $e^{\mu \cdot \gamma}$ , δηλαδή πρέπει ο εκθέτης να γίνει ελάχιστος.

$$\mu \cdot \gamma = [\mu \cdot (\pi \cdot \gamma)]_{min} \quad (2.2)$$



Σχήμα 2.3: Αναπαράσταση μεγεθών για την κίνηση τροχαλίας.

Άρα, πρέπει η γωνία  $\beta$  να μεγιστοποιηθεί σε όλες τις τροχαλίες, δεδομένου ότι ο συντελεστής τριβής παραμένει σταθερός. Συνεπώς, για να εξασφαλίσουμε την μέγιστη μεταφορά δύναμης μέσω των τροχαλιών θα πρέπει η συνολική γωνία επαφής του νήματος  $\gamma$  να είναι ελάχιστη.

## 2.3 Επιλογές

Από τις απαιτήσεις του ρομποτικού χεριού προέκυψαν κάποιοι κατασκευαστικοί περιορισμοί οι οποίοι πρέπει να αντιμετωπιστούν. Για αυτό τον λόγο, πραγματοποιήσαμε συγκεκριμένες παραδοχές και υιοθετήσαμε αντίστοιχες επιλογές ώστε να καταστεί η κατασκευή πλήρως λειτουργική. Αρχικά, δημιουργήθηκε το κινηματικό μοντέλο του χεριού, ορίσαμε την ακριβή θέση του αντίχειρα και σχεδιάσαμε ένα οδοντωτό μηχανισμό σύμπλεξης για την κίνηση της αντίθεσης. Έπειτα, σχεδιάσαμε ένα διαφορικό μηχανισμό επιλεκτικής εμπλοκής που βασίστηκε στον μηχανισμό του Whiffletree. Τέλος, επιλέξαμε κατάλληλα ελαστικά αρθρώσεων προκειμένου να ικανοποιείται το ιατρικό τεστ του *Karandji*.

### 2.3.1 Κινηματικό μοντέλο

Ο συνολικός κώδικας του κινηματικού μοντέλου της MATLAB [39] με οδηγίες χρήσης διατίθεται ελεύθερα στο [40]. Σημειώνεται πως για την εύρεση του κινηματικού μοντέλου έγινε χρήση του Robotics Toolbox [41]. Η αναπαράσταση του κινηματικού μοντέλου γίνεται σύμφωνα με τις οδηγίες που περιγράφονται στο [42].

Για λόγους αναπαράστασης επιλέξαμε μήκος χεριού  $HL = 185$  mm και πλάτος χεριού  $HB = 90$  mm καθώς αυτές είναι οι διαστάσεις του συγγραφέα. Για το δάχτυλο του δείκτη, σύμφωνα με τα στοιχεία που έχουμε, ο πίνακας *Denavit–Hartenberg* παρουσιάζεται στον πίνακα 2.9. Παρόμοια στοιχεία προκύπτουν για τα υπόλοιπα δάχτυλα μέσο, παράμεσο και μικρό.

Αρθρώσεις	$\theta_i$ (°)	$d_i$ (mm)	$a_i$ (mm)	$\alpha_i$ (°)
Μετακαρπιοφαλαγγική	$q_1$	0	45.325	0
Εγγύς μεσοφαλαγγική	$q_2$	0	26.455	0
Άνω μεσοφαλαγγική	$q_3$	0	17.945	0

Πίνακας 2.9: Στοιχεία D–H για τον δείκτη.

### 2.3.2 Επιλογές αντίχειρα

Όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 2.2.1 ο αντίχειρας είναι το πιο σημαντικό δάχτυλο του ανθρώπινου χεριού, για αυτό δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην σχεδίαση του. Αρχικά, ο ανθρώπινος αντίχειρας έχει πέντε βαθμούς ελευθερίας αλλά θα υλοποιηθούν μόνο οι τρεις, όσες δηλαδή είναι και οι αρθρώσεις.

Για την καρπομετακάρπια άρθρωση, δεδομένου ότι παραλαμβάνει πολύ μεγάλα φορτία, επιλέξαμε άρθρωση σταθερού άξονα περιστροφής αντί για ελαστική άρθρωση. Έπειτα, για λόγους στιβαρότητας επιλέξαμε διακριτό οδοντωτό μηχανισμό για την κίνηση αντίθεσης του αντίχειρα, ο οποίος απεμπλέκεται με την πίεση ενός μηχανισμού και εμπλέκεται μηχανικά με ελατήριο. Η άνω μεσοφαλαγγική άρθρωση θα εκτελεί την κίνηση επέκτασης–κάμψη με ελαστική άρθρωση. Για την εγγύς μεσοφαλαγγική επιλέξαμε να υλοποιηθεί η κίνηση επέκτασης–κάμψη με ελαστική άρθρωση, προκειμένου οι άξονες περιστροφής των ελαστικών αρθρώσεων να είναι παράλληλοι.

Επιλέξαμε τα δάχτυλα μας να εκτελούν μόνο κινήσεις επέκτασης–κάμψης καθώς οι σχετικές αρθρώσεις περιγράφονται ως οι πιο σημαντικές για την καθημερινή αρπάγη αντικειμένων [43]. Πιο συγκεκριμένα, αποδεικνύεται πως για το 80% των αντικειμένων που επιχειρούμε να αρπάξουμε καθημερινά το ανθρώπινο χέρι χρησιμοποιεί μόνο 2 συνέργειες. Σε αυτές τις συνέργειες η συνεισφορά των αρθρώσεων επέκτασης–κάμψης είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτές της απαγωγής–προσαγωγής του αντίχειρα.

Αφού επιλέχθηκαν οι τύποι των αρθρώσεων, προσδιορίσαμε κατάλληλες διαστάσεις και προσανατολισμό των φαλαγγών και των αρθρώσεων. Για την εύρεση τους, ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται στο [44]. Σύμφωνα με αυτή την μεθοδολογία, σε περίπτωση που μειωθούν οι βαθμοί ελευθερίας του ανθρώπινου χεριού, πρέπει να ακολουθηθεί συγκεκριμένη διαδικασία προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι οι σχεδιαστικές επιλογές δεν προκαλούν μείωση της λειτουργικότητας του ρομποτικού χεριού. Για την εύρεση της θέσης της καρπομετακάρπιας άρθρωσης αντλήθηκαν πληροφορίες από το [3], όπου οι αποστάσεις από το αρχικό σύστημα συντεταγμένων, όπως αυτές ορίστηκαν στην υποενότητα 2.1.1, παρουσιάζονται στον πίνακα 2.10.

Ο αρχικός προσανατολισμός του αντίχειρα αντικατοπτρίζει το ανθρώπινο χέρι σε ηρεμία, όπως περιγράφεται στο [25] και φαίνεται στο σχήμα 2.4. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκε η εγγύς μεσοφαλαγγική άρθρωση να έχει αρχική κλίση 40°.



Σχήμα 2.4: Αναπαράσταση του αντίχειρα σε ηρεμία.

Δάχτυλα	Άξονας X	Άξονας Y
Αντίχειρας	$0.073 \times HL$	$0.196 \times HB$

Πίνακας 2.10: Εσωτερική θέση καρπομετακάρπιας άρθρωσης αντίχειρα.

### 2.3.2.1 Έλεγχος του Karandji

Στον κλάδο της χειρουργικής ιατρικής, για το ανθρώπινο χέρι, έχουν αναπτυχθεί γρήγοροι και αξιόπιστοι έλεγχοι προκειμένου να επαληθεύεται η επιτυχία των επεμβάσεων αναπλήρωσης επιδεξιότητας και κατά συνέπεια η ικανότητα για επιτυχή αρπάγη αντικειμένων. Αυτοί οι έλεγχοι μπορούν να εφαρμοστούν και σε ρομποτικά χέρια.

Ένας ευρέως διαδεδομένος έλεγχος, για αυτές τις περιπτώσεις, είναι ο έλεγχος του *Karandji* [25]. Ο έλεγχος *Karandji* είναι μια διαδικασία που επαληθεύει την προσβασιμότητα των στοιχείων των δαχτύλων με αυτά της παλάμης. Ο έλεγχος περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- Επαφή του ακροδάχτυλου του αντίχειρα με τις βάσεις των μετακαρπιοφαλαγγικών αρθρώσεων των δαχτύλων δείκτη, μέσου, παράμεσου και μικρού.
- Επαφή του ακροδαχτύλου του αντίχειρα με τα ακροδάχτυλα των δείκτη και μικρού χωρίς να κινείται καμία εκ των άπω μεσοφαλαγγικής και εγγύς μεσοφαλαγγικής άρθρωσης.

Στο σχήμα 2.5 γίνεται αναπαράσταση του έλεγχου Karandji.



α.



β.



γ.



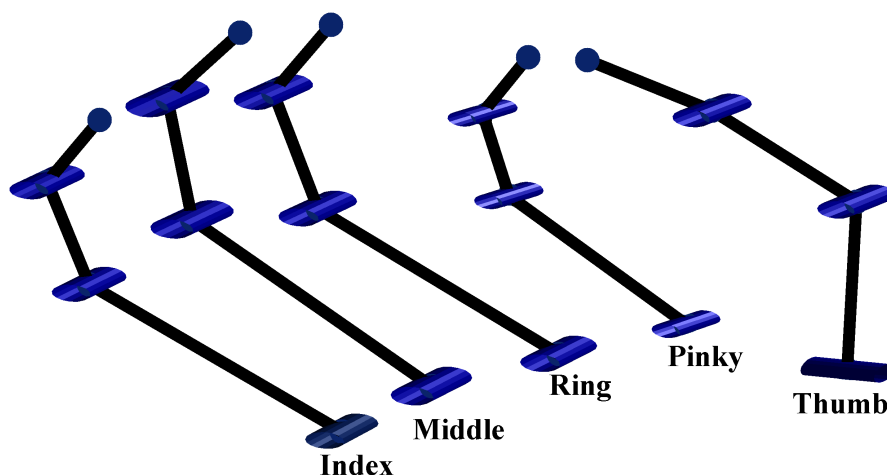
δ.

Σχήμα 2.5: Αναπαράσταση του έλεγχου *Karandji*. α. Επαφή του ακροδάχτυλου του αντίχειρα με το ακροδάχτυλο του μικρού, β. Επαφή του ακροδάχτυλου του αντίχειρα με το ακροδάχτυλο του δείκτη, γ. Επαφή του ακροδάχτυλου του αντίχειρα με την μετακαρπιοφαλαγγική άρθρωση του μικρού, δ. Επαφή του ακροδάχτυλου του αντίχειρα με την μετακαρπιοφαλαγγική άρθρωση του δείκτη.

Για την υλοποίηση του ελέγχου *Karandji* στο ανθρωπομορφικό ρομποτικό χέρι χρησιμοποιήσαμε το κινηματικό μοντέλο του χεριού. Αρχικά, προσθέσαμε στο κινηματικό μοντέλο τα στοιχεία του αντίχειρα που ήδη γνωρίζουμε, δηλαδή τα μήκη της εγγύς και άπω φάλαγγας. Στην συνέχεια, συμπεριλάβαμε την θέση της καρπομετακάρπιας άρθρωσης. Έπειτα, ορίσαμε την αρχική κλίση της εγγύς μεσοφαλαγγικής άρθρωσης.

Η εύρεση των υπόλοιπων στοιχείων του αντίχειρα, δηλαδή το μήκος του 1ου μετακαρπιαίου κόκαλου, προέκυψε από την αντίστροφη κινηματική εφαρμόζοντας τον έλεγχο του *Karandji*. Για την αντίστροφη κινηματική χρησιμοποιήθηκε το Robotics Toolbox [41] σε περιβάλλον MATLAB [39]. Η αναπαράσταση του αντίστροφου κινηματικού μοντέλου έγινε σύμφωνα με τις οδηγίες που περιγράφονται στο [42].

Στο σχήμα 2.6 θα τοποθετηθούν όλες οι αρθρώσεις κατάλληλα προκειμένου να επιτευχθεί στιβαρή αρπάγη κυλίνδρου. Σημειώνεται, πως ο άξονας περιστροφής της καρπομετακάρπιας άρθρωσης του αντίχειρα δεν βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με το επίπεδο των υπόλοιπων τεσσάρων δαχτύλων. Επίσης, προέκυψε πως το εύρος της καρπομετακάρπιας άρθρωσης, προκειμένου να επιτευχθεί πλήρως ο έλεγχος του *Karandji* είναι  $130^\circ$ .



Σχήμα 2.6: Αναπαράσταση όλων των δαχτύλων του ρομποτικού χεριού κατά την αρπάγη ενός κυλίνδρου.

### 2.3.2.2 Κλίση αξόνων περιστροφής αρθρώσεων

Όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 2.3.2.1, ο αντίχειρας του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού, διαθέτει 3 βαθμούς ελευθερίας σε σχέση με τους 5 βαθμούς ελευθερίας του ανθρώπινου χεριού. Η μείωση των βαθμών ελευθερίας του ρομποτικού χεριού σε σχέση με το ανθρώπινο ενδέχεται να προκαλέσει φαινόμενα επικάλυψης δαχτύλων κατά την αρπάγη αντικειμένων. Τα συγκεκριμένα φαινόμενα παρουσιάζονται όταν τα δάχτυλα δείκτης, μέσος, παράμεσος και μικρός επικαλύπτονται μεταξύ τους κατά την αρπάγη αντικειμένων, ενώ για τον αντίχειρα όταν το ακροδάχτυλο του δεν ασκεί κάθετα δυνάμεις κατά την ισχυρή αρπάγη κυλινδρικών αντικειμένων. Για να περιορίσουμε τα φαινόμενα επικάλυψης μεταξύ των δαχτύλων, πραγματοποιήσαμε δοκιμές αρπάγης στο κινηματικό μοντέλο όπως περιγράφονται στο [44]. Οι δοκιμές έγιναν για δύο συγκεκριμένους τύπους αρπάγης:

- Αρπάγη λεπτών αντικειμένων με τον αντίχειρα και τον δείκτη.
- Ισχυρή αρπάγη κυλινδρικών αντικειμένων.



Το φαινόμενο της επικάλυψης δαχτύλων εξαλείφθηκε πλήρως προσθέτοντας αρχική κλίση στην καρπομετακάρπια άρθρωση 7°. Επίσης, με την αρχική κλίση παρατηρήθηκε καλύτερη τοποθέτηση δαχτύλων κατά την ισχυρή αρπάγη κυλινδρικών αντικειμένων.

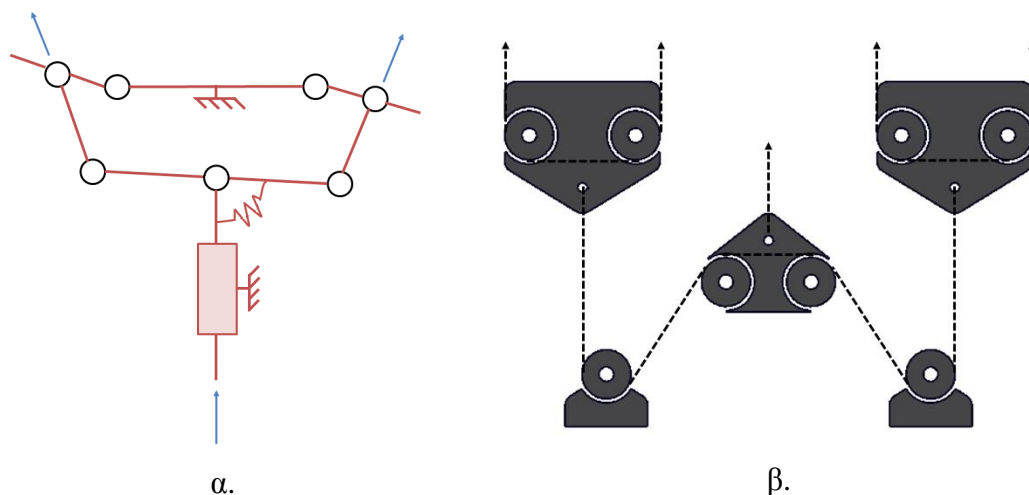
### 2.3.2.3 Ταξινόμηση τύπων αρπαγών

Όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 2.2.1, η αντίδραση που ασκείται στην καρπομετακάρπια άρθρωση κυμαίνεται από 70 N έως 180 N. Παρόλο που οι δυνάμεις παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση ανά μελέτη, είναι σίγουρο πως η καρπομετακάρπια άρθρωση παραλαμβάνει μεγάλα φορτία. Για αυτό τον λόγο, επιλέξαμε άρθρωση σταθερού άξονα περιστροφής, αντί για ελαστική άρθρωση. Επίσης, για λόγους στιβαρότητας επιλέχθηκε διακριτός οδοντωτός μηχανισμός σύμπλεξης. Ο οδοντωτός μηχανισμός εμπλέκεται μηχανικά με ελατήριο και απεμπλέκεται με την πίεση ενός μοχλού. Η επιλογή του αριθμού των διακριτών θέσεων του οδοντωτού μηχανισμού της καρπομετακάρπιας άρθρωσης έγινε βάσει μελετών ταξινόμησης αρπαγών αντικειμένων που εκτελούν καθημερινά οι άνθρωποι. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε ταξινόμηση αρπαγών αντικειμένων που βασίζεται, στο πιο σημαντικό δάχτυλο του ανθρώπινου χεριού, στον αντίχειρα [6]. Συνεπώς, προκρίθηκε η διακριτοποίηση του οδοντωτού μηχανισμού εμπλοκής του αντίχειρα με εννέα θέσεις. Οι εννέα διαφορετικές θέσεις εξασφαλίζουν πως το ρομποτικό χέρι επιτυγχάνει τον μέγιστο αριθμό αρπαγών αντικειμένων που εκτελεί καθημερινά το ανθρώπινο χέρι.

### 2.3.3 Διαφορικός μηχανισμός

Μετά από χρόνια ερευνών πάνω σε σύνθετα, πλήρως-αρθρωτά ανθρωπομορφικά χέρια οι ερευνητές κινούνται στην κατεύθυνση απλοποίησης κατασκευών με προσεκτική επιλογή συστημάτων ζεύξης αρθρώσεων, ώστε να μειωθεί ο συνολικός αριθμός των επενεργητών και της συνολικής πολυπλοκότητας του ρομποτικού χεριού. Έτσι, έχουν κατασκευαστεί πολλά υποεπενεργούμενα ρομποτικά χέρια, τα οποία έχουν λιγότερους κινητήρες από βαθμούς ελευθερίας και χαρακτηρίζονται ως ιδιο-προσαρμοστικά. Σε ένα υποεπενεργούμενο χέρι η κίνηση της άπω φάλαγγας μπορεί να συνεχιστεί ακόμα και μετά την επαφή των προηγούμενων φαλαγγών του δαχτύλου, έως ότου το δάχτυλο προσαρμοστεί παθητικά στο αντικείμενο.

Οι παραπάνω κλάσεις χεριών είναι πιο οικονομικές στην κατασκευή τους και πιο ελαφρές, δεδομένου πως έχουν λιγότερους επενεργητές. Ένα ρομποτικό χέρι με μειωμένο αριθμό επενεργητών είναι ευκολότερο στην χρήση και καταλληλότερο για αρπάγη αντικειμένων σε μη-δομημένα περιβάλλοντα. Η υποεπενεργητικότητα επιτυγχάνεται με την χρήση διαφορικών μηχανισμών οι οποίοι προσαρμόζονται στις παραπάνω προδιαγραφές. Οι διαφορικοί μηχανισμοί αποτελούνται από μπάρες, όπως το Whiffletree [45], από τροχαλίες ή από τον συνδυασμό τους που αναφέρονται ως υβριδικά συστήματα [32].

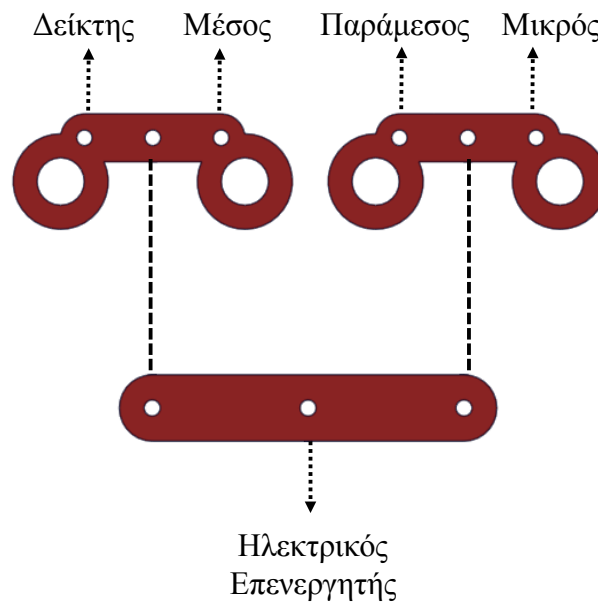


Σχήμα 2.7: Διαφορικοί μηχανισμοί. α. Seesaw μηχανισμός, β. Υβριδικός μηχανισμός.

Σε αρκετά ανθρωπομορφικά ρομποτικά χέρια χρησιμοποιούνται διαφορικοί μηχανισμοί για να κινήσουν τα δάχτυλα που βασίζονται στο Whiffletree [13, 14]. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται τρεις μπάρες. Η μπάρα 1, για την μεταφορά της κίνησης στα δάχτυλα δείκτη & μέσου, η μπάρα 2, για την μεταφορά της κίνησης στα δάχτυλα παράμεσου & μικρού και η μπάρα 3, που συνδέει τις μπάρες 1 & 2 με τον ηλεκτρικό επενεργητή.

Στο σχήμα 2.7 παρατίθενται μηχανισμοί κίνησης ρομποτικών χεριών που χρησιμοποιούνται ευρέως [13-16, 32, 45]. Ο διαφορικός μηχανισμός επιλεκτικής εμπλοκής που προτείνουμε περιορίζει την κίνηση των δαχτύλων δείκτης, μέσος, παράμεσος και μικρός με την επιλογή ενός μηχανικού συζεύκτη. Αυτό επιτυγχάνεται με την δημιουργία οπών στις μπάρες 1 & 2 προκειμένου να εμπλέκεται ο μηχανικός συζεύκτης στον διαφορικό μηχανισμό, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8. Συνεπώς, μπορεί να επιτευχθεί επιλεκτικά, δέσμευση της κίνησης του δαχτύλου που επιθυμείται. Με αυτή την τροποποίηση δύναται να επιλεγούν  $2^4 = 16$  διαφορετικοί συνδυασμοί κίνησης δαχτύλων με την χρήση ενός ηλεκτρικού επενεργητή και τεσσάρων μηχανικών συζευκτών.

Λαμβάνοντας υπόψη τις 9 διακριτές θέσεις που μπορεί να τοποθετηθεί ο αντίχειρας και σε συνδυασμό με τους 16 διαφορετικούς συνδυασμούς των υπόλοιπων δαχτύλων, καταλήγουμε σε 144 αρπάγες που μπορούν να καλύψουν ευρεία γκάμα καθημερινών αναγκών.



Σχήμα 2.8: Διαφορικός μηχανισμός επιλεκτικής εμπλοκής.

#### 2.3.4 Επιλογές υπόλοιπων δαχτύλων

Το ανθρωπομορφικό ρομποτικό χέρι διαθέτει 15 βαθμούς ελευθερίας, όπου 3 βαθμοί ελευθερίας αντιστοιχούν για κάθε δάχτυλο. Εκτός από την καρπομετακάρπια άρθρωση του αντίχειρα, που ορίστηκε ως άρθρωση σταθερού άξονα περιστροφής, όλες οι υπόλοιπες είναι ελαστικές αρθρώσεις. Για την σχεδίαση των ελαστικών αρθρώσεων χρησιμοποιούνται ελαστικά σιλικόνης διαφορετικού πάχους [31, 38, 46]. Για τον προσδιορισμό του πάχους κάθε άρθρωσης εφαρμόστηκε πειραματικά ο έλεγχος του *Karandji* στο πρωτότυπο ανθρωπομορφικό χέρι. Άλλη μια παράμετρος που λάβαμε υπόψη ήταν το πάχος των ελαστικών να είναι αρκετό για να μεταφέρει ικανοποιητικές δυνάμεις, ώστε να ανταπεξέρχεται το ρομποτικό χέρι σε καθημερινές αρπάγες αντικειμένων.

Κατά την επαφή του ανθρώπινου χεριού με τα αντικείμενα παρουσιάζεται παραμόρφωση στα αχροδάχτυλα. Αυτή η παραμόρφωση αυξάνει την επιφάνεια επαφής με τα αντικείμενα και εξασφαλίζει βελτίωση στην επιτυχία αρπάγης αντικειμένων. Για να υλοποιήσουμε το παραπάνω χαρακτηριστικό στα ρομποτικά χέρια έγινε χρήση παραμορφώσιμων υλικών [47, 48].

## 2.4 Τμήματα χεριού

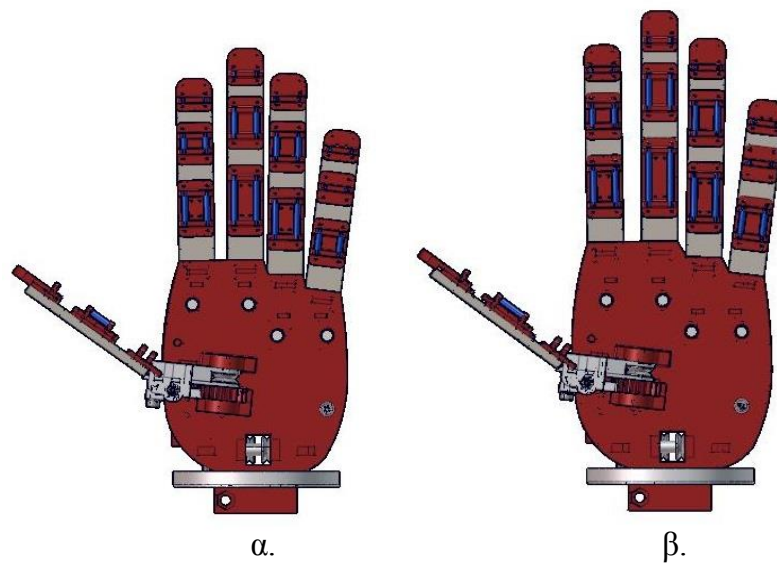
Σε αυτή την ενότητα αναλύουμε την σχεδίαση και την κατασκευή του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού το οποίο αποτελείται από την παλάμη, τα δάχτυλα, τον αντίχειρα και τα περιφερειακά εξαρτήματα. Στην παλάμη ενσωματώνεται ο διαφορικός μηχανισμός, ο οποίος κινείται εσωτερικά της παλάμης. Στην συνέχεια, αναλύουμε την διαδικασία σχεδίασης όλων των δαχτύλων και του οδοντωτού μηχανισμού του αντίχειρα. Στα περιφερειακά εξαρτήματα ανήκουν ο ηλεκτρικός επενεργητής, οι μηχανικοί συζεύκτες, το σύστημα περιέλιξης τένοντα και η βάση στερέωσης του χεριού.



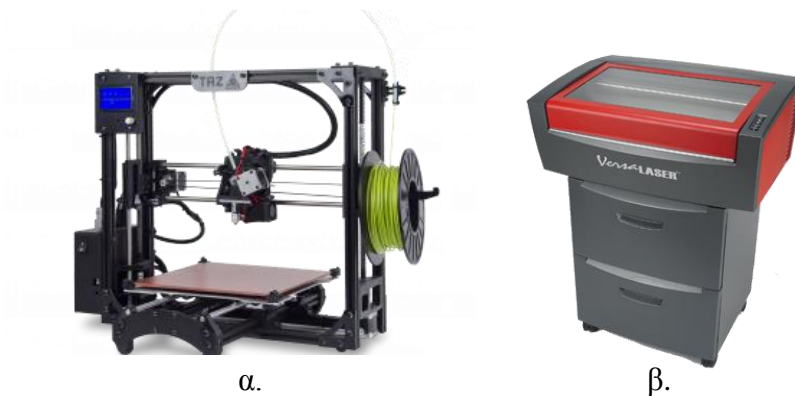
Σχήμα 2.9: Αριστερό και δεξί ανθρωπομορφικό ρομποτικό χέρι.

Οι μοναδικές παράμετροι που απαιτούνται προκειμένου να παραμετροποιηθεί ο σχεδιασμός είναι το μήκος (HL) και το πλάτος (HB) του χεριού, όπως φαίνονται στο σχήμα 1.2. Στο σχήμα 2.9 παρουσιάζεται το τριδιάστατο μοντέλο για το αριστερό και δεξί, ανθρωπομορφικό ρομποτικό χέρι. Στο σχήμα 2.10 παρουσιάζονται 2 τριδιάστατα μοντέλα ανθρωπομορφικών ρομποτικών χεριών με διαφορετικές παραμέτρους. Πιο συγκεκριμένα απεικονίζεται τριδιάστατο σχέδιο ρομποτικού χεριού διαστάσεων  $HL = 185 \text{ mm}$ ,  $HB = 90 \text{ mm}$  και άλλο ένα τριδιάστατο σχέδιο ρομποτικού χεριού διαστάσεων  $HL = 200 \text{ mm}$ ,  $HB = 100 \text{ mm}$ .

Σχεδιάστηκαν 2 εκδόσεις κατασκευής του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού, διδιάστατες (2D) και τριδιάστατες (3D). Η διδιάστατη έκδοση αφορά κατασκευή σε μηχανή κοπής laser, με θερμοπλαστικό Plexiglas. Η τριδιάστατη έκδοση διευκολύνει την κατασκευή σε μηχανή εναπόθεσης τήγματος, με θερμοπλαστικό ABS. Σημειώνεται πως η σχεδίαση πραγματοποιήθηκε στο Solidworks 2014 της Dassault Systems [49].



Σχήμα 2.10: Δύο διαφορετικά μεγέθη ανθρωπομορφικών ρομποτικών χεριών.  
 α. HL = 185 mm, HB = 90 mm, β. HL = 200 mm, HB = 100 mm.

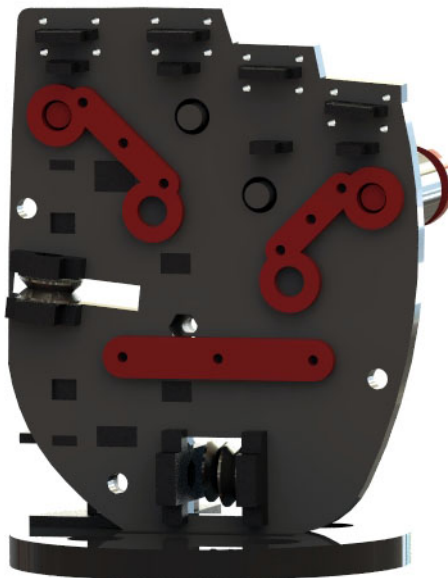


Σχήμα 2.11: Μηχανές που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του χεριού. α. 3D Printer–Lulzbot TAZ4, β. Laser cutter–Universal Laser Systems VSL 3.5.

### 2.4.1 Σχεδίαση & κατασκευή παλάμης

Η παλάμη αποτελείται από 2 μέρη, το άνω και το κάτω μέρος. Στο άνω μέρος της παλάμης φιλοξενούνται οι μηχανικοί συζεύκτες, η βάση του ηλεκτρικού επενεργητή και το σύστημα περιέλιξης τένοντα για τα δάχτυλα δείκτης, μέσος, παράμεσος και μικρός. Στο κάτω μέρος της παλάμης φιλοξενείται η βάση του σταθερού άξονα περιστροφής της καρπομετακάρπιας άρθρωσης και το σταθερό μέρος του διακριτού οδοντωτού μηχανισμού του αντίχειρα. Εσωτερικά της παλάμης κινείται ο διαφορικός μηχανισμός

επιλεκτικής εμπλοκής. Παρακάτω, ακολουθούν επεξηγηματικές εικόνες της σχεδίασης του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού, όπως αυτή προέκυψε από τις αρχικές απαιτήσεις, τους κατασκευαστικούς περιορισμούς και τις επιλογές που πραγματοποιήθηκαν. Στο σχήμα 2.12 περιορίζουμε την κίνηση των δαχτύλων δείκτη, μικρού μέσω σύμπλεξης του διαφορικού μηχανισμού ενώ τα δάχτυλα μέσος, παράμεσος κινούνται κανονικά.

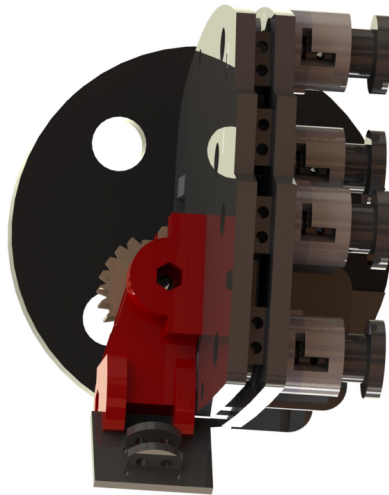


Σχήμα 2.12: Αναπαράσταση διαφορικού μηχανισμού, όπου με κόκκινο τονίζεται το διαφορικό εσωτερικά της παλάμης καθώς και οι ενεργοποιημένοι, μηχανικοί συζεύκτες.

Η διάταξη με τα δυο μέρη της παλάμης, όπου εσωτερικά κινείται ο διαφορικός μηχανισμός, θεωρείται ότι είναι εργονομική και συμπαγής. Αρχικά, η παλάμη καταλαμβάνει πολύ μικρό χώρο καθώς το συνολικό πάχος είναι 12 mm. Έπειτα, με έγκυρες τροποποιήσεις επιτεύχθηκε να συμπεριληφθεί όλος ο περιφερειακός εξοπλισμός. Στο σχήμα 2.13, παρουσιάζεται το συνολικό πάχος της παλάμης, οι 4 μηχανικοί συζεύκτες και ο οδοντωτός μηχανισμός του αντίχειρα.

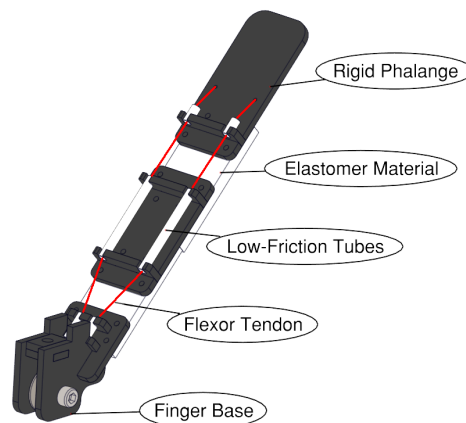
#### 2.4.2 Σχεδίαση & κατασκευή δαχτύλων

Όλα τα δάχτυλα αποτελούνται από 3 φάλαγγες και 3 αρθρώσεις. Κάθε δάχτυλο εκ των δείκτη, μέσου, παράμεσου και μικρού χρησιμοποιεί 3 ελαστικές αρθρώσεις, ενώ ο αντίχειρας χρησιμοποιεί 2 ελαστικές αρθρώσεις και μια άρθρωση σταθερού άξονα. Η αναλυτική σχεδίαση και κατασκευή των δαχτύλων περιγράφεται στα [31,38,50]. Επίσης, για την ανθρωπομορφική κίνηση των δαχτύλων απαιτούνται 2 ξεχωριστά συστήματα περιέλιξης τένοντα, με διαφορετικούς λόγους ανηγμένης γραμμικής μετατόπισης, για δεδομένη γωνιακή θέση του ηλεκτρικού επενεργητή.



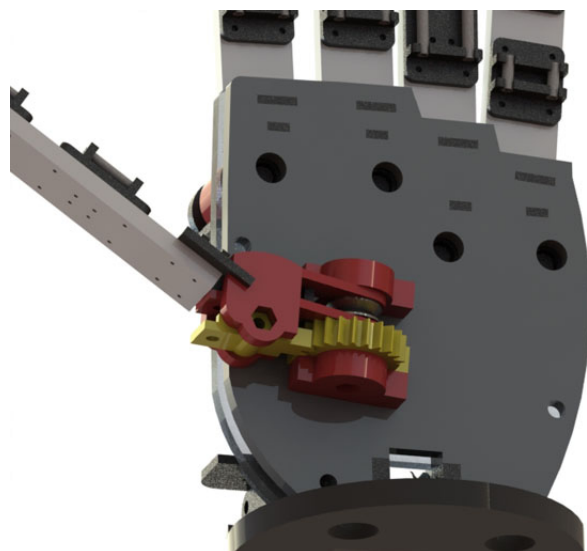
Σχήμα 2.13: Κάτοψη τριδιάστατου σχεδίου.

Ο οδοντωτός μηχανισμός σύμπλεξης του αντίχειρα έχει 9 διακριτές θέσεις, όπως αυτές προέκυψαν από την ταξινόμηση καθημερινών αρπαγών του ανθρώπινου χεριού στην υποενότητα 2.3.2. Για την αποσύμπλεξη του μηχανισμού και την επιλογή νέας θέσης απαιτείται η πίεση ενός μηχανισμού. Η εμπλοκή του οδοντωτού μηχανισμού στην επιθυμητή θέση πραγματοποιείται μηχανικά με ελατήριο.



Σχήμα 2.14: Αναπαράσταση δαχτύλου με 2 φάλαγγες. Πηγή: [51].

Ουσιαστικά ο κινούμενος μηχανισμός αποτελεί το πρώτο μετακάρπιο κόκκαλο. Το σύστημα περιέλιξης τένοντα του αντίχειρα κινείται εσωτερικά του πρώτου μετακαρπίου για να προστατεύεται κατά την αλληλεπίδραση του ρομποτικού χεριού με αντικείμενα ή γενικότερα το περιβάλλον. Στα σχήματα 2.14 και 2.15 παρουσιάζεται η σχεδίαση του αντίχειρα όπως προέκυψε από τις απαιτήσεις, τους περιορισμούς και τις επιλογές που πραγματοποιήθηκαν.



Σχήμα 2.15: Κάτω μέρος παλάμης, όπου με κόκκινο τονίζεται το πρώτο μετακάρπιο κόκκαλο και με κίτρινο ο οδοντωτός μηχανισμός σύμπλεξης του αντίχειρα.

### 2.4.3 Σχεδίαση & κατασκευή περιφερειακών εξαρτημάτων

Τα περιφερειακά εξαρτήματα που συμπληρώνουν την λειτουργία του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού είναι η βάση στερέωσης του χεριού, οι μηχανικοί συζεύκτες, η βάση του ηλεκτρικού επενεργητή, ο ηλεκτρικός επενεργητής, ο μικροελεγκτής και το σύστημα περιέλιξης τένοντα.



Σχήμα 2.16: Άνω μέρος παλάμης όπου με κόκκινο τονίζεται η βάση του ηλεκτρικού επενεργητή.



Για την βάση στερέωσης του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού χρησιμοποιήσαμε φλάντζα που λειτουργεί σαν διεπαφή του χεριού με εξωτερικά μηχανικά σύνολα. Το μηχανικό σύνολο μπορεί να είναι ένας ρομποτικός βραχίονας, μια υποδοχή για προσθετικό χέρι αναπήρων, η βάση στερέωσης σε ένα μη επανδρωμένο αεριωθούμενο όχημα και πολλά άλλα. Για λόγους ταύτισης με αντίστοιχα ρομποτικά χέρια επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε την φλάντζα των ρομποτικών χεριών της πρωτοβουλίας ανοιχτού κώδικα Yale OpenHand [17].

Για τους μηχανικούς συζεύκτες σχεδιάσαμε 2 εκδόσεις. Στην πρώτη έκδοση, ο μηχανικός συζεύκτης εμπλέκεται με τον διαφορικό μηχανισμό όταν πιέζεται στην άνω πλευρά. Η απεμπλοκή του γίνεται με την επαναλαμβανόμενη πίεση του. Παρόλο, που η λειτουργία αυτής της έκδοσης ήταν πολύ απλή, η σχεδίαση ήταν σύνθετη και συνεπώς απαιτούσε διαδικασία χύτευσης υψηλής ακρίβειας που δεν ήταν διαθέσιμη. Για τον παραπάνω λόγο, σχεδιάσαμε εναλλακτική δεύτερη έκδοση που απαιτούσε πίεση και περιστροφή του μηχανικού συζεύκτη για την εμπλοκή του. Σε αυτή την περίπτωση, η απεμπλοκή πραγματοποιείται με την περιστροφή του συζεύκτη. Σημειώνεται, πως για να μπορέσει να επιτευχθεί εμπλοκή και απεμπλοκή του μηχανικού συζεύκτη θα πρέπει το ανθρωπομορφικό ρομποτικό χέρι να βρίσκονται σε ηρεμία, δηλαδή να βρίσκεται στην αρχική του θέση ο ηλεκτρικός επενεργητής. Αυτό συμβαίνει, καθώς επιθυμούμε ο διαφορικός μηχανισμός να βρίσκεται στην άνω θέση κατά την διαδικασία εμπλοκής και απεμπλοκής.

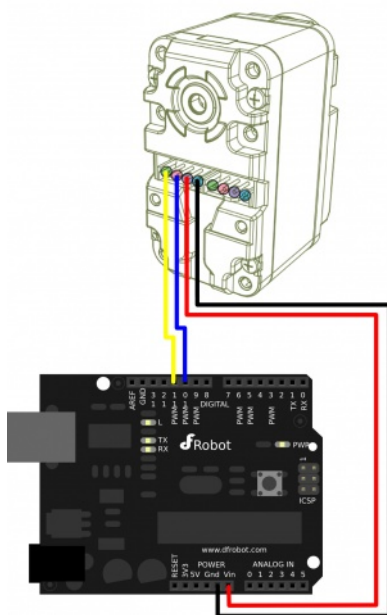
<b>Ηλεκτρικός επενεργητής HerkuleX DRS-0201</b>	
<b>Διαστάσεις</b>	45 mm × 24 mm × 31 mm
<b>Βάρος</b>	60 g
<b>Σχέση μετάδοσης</b>	1 : 266
<b>Ένταση ρεύματος εισόδου</b>	7 – 12VDC (βέλτιστο 7.4 V)
<b>Μέγιστη Ροπή</b>	24 kgf.cm στα 7.4 V
<b>Μέγιστη Ταχύτητα</b>	0.147 s / 60° στα 7.4 V
<b>Διακριτικότητα</b>	0.325°
<b>Γωνία περιστροφής</b>	320°
<b>Ανατροφοδότηση</b>	Θέσης, Ταχύτητας, Θερμοκρασίας, Φορτίου, Ρεύματος

Πίνακας 2.11: Τεχνικά χαρακτηριστικά ηλεκτρικού επενεργητή HerkuleX DRS-0201.

Η βάση του ηλεκτρικού επενεργητή καταλαμβάνει χώρο εντός του άνω μέρους της παλάμης για να είναι συμπαγής και ενιαία η κατασκευή. Η επιλογή της κατάλληλης θέσης έγινε με κριτήριο την ελαχιστοποίηση των τριβών στις τροχαλίες που συνεργάζονται με το σύστημα περιέλιξης τένοντα. Στο σχήμα 2.16, σημειώνεται με κόκκινο η βάση του ηλεκτρικού επενεργητή στο άνω μέρος της παλάμης. Επίσης, διακρίνεται το

σύστημα περιέλιξης τένοντα του αντίχειρα καθώς και των υπόλοιπων δαχτύλων μέσω του διαφορικού μηχανισμού.

Ο ηλεκτρικός επενεργητής που επιλέχτηκε είναι ο HerkuleX DRS-0201 της DST Robot. Επιδιώχτηκε να βρεθεί επενεργητής με τις μικρότερες δυνατές διαστάσεις και την μεγαλύτερη ροπή αλλά παράλληλα να διατηρηθεί χαμηλά το κόστος αγοράς. Στον πίνακα 2.11 παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά του HerkuleX DRS-0201. Ο μικροελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε είναι ο Arduino Micro [51] καθώς παρουσιάζει πληθώρα πλεονεκτημάτων. Στο σχήμα 2.17 παρουσιάζεται η συνδεσμολογία του ηλεκτρικού επενεργητή με τον μικροελεγκτή. Επίσης, παρατίθεται η βιβλιοθήκη του Arduino για το HerkuleX DRS-0201 [52].



Σχήμα 2.17: Συνδεσμολογία Ηλεκτρικού επενεργητή με τον μικροελεγκτή. Μαύρο καλώδιο: Γείωση. Κόκκινο καλώδιο: Τροφοδοσία. Μπλε καλώδιο: TXD. Κίτρινο καλώδιο: RXD. Πηγή: [52].

Για τα συστήματα περιέλιξης τένοντα χρησιμοποιήσαμε Dyneema Fishing Line που παρουσιάζει επιμήκυνση κατά την θραύση 3.5%, αντοχή σε εφελκυσμό 3.4 GPa και δύναμη θραύσης 610 N.

# Κεφάλαιο 3

## Πειράματα

Η πειραματική διαδικασία χωρίστηκε σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος των πειραμάτων δοκιμάσαμε την αντοχή και την λειτουργικότητα του διαφορικού μηχανισμού επιλεκτικής εμπλοκής. Στο δεύτερο μέρος των πειραμάτων εξετάσαμε την ικανότητα του χεριού να επιτυγχάνει αρπάγες καθημερινών αντικειμένων και καθορίστηκαν οι περιορισμοί βάρους.

### 3.1 Διαφορικός μηχανισμός

Για την διακρίβωση της λειτουργικότητας του διαφορικού μηχανισμού επιλεκτικής εμπλοκής πραγματοποιήθηκαν δύο ξεχωριστά πειράματα. Στο πρώτο μέρος των πειραμάτων ελέγξαμε την δυνατότητα μεταφοράς δύναμης στα δάχτυλα μέσω του διαφορικού μηχανισμού κατά την εμπλοκή του. Στο δεύτερο μέρος των πειραμάτων εξετάσαμε την δυνατότητα επιτυχίας όλων των δυνατών συνδυασμών εμπλοκής, που ορίστηκαν κατά την σχεδίαση του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού.

#### 3.1.1 Αύξηση μεταφερόμενης δύναμης

Η επιλογή χρήσης ενός τροποποιημένου διαφορικού μηχανισμού με μπάρες επιλεκτικής εμπλοκής μας δίνει την δυνατότητα να επιλέξουμε τα δάχτυλα που επιθυμούμε να κινηθούν. Σε αυτή την υποενότητα εξετάζουμε την αντοχή αλλά και η λειτουργικότητα του διαφορικού μηχανισμού, σε διάφορους πιθανούς συνδυασμούς εμπλοκής, με μια σειρά πειραμάτων. Ουσιαστικά μετράμε τις δυνάμεις που ασκούν τα δάχτυλα του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού χωρίς εμπλοκή, σε σύγκριση με όλους τους συνδυασμούς εμπλοκής δαχτύλων του διαφορικού μηχανισμού.

Για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήσαμε το Hand Dynamometer HD-BTA της Vernier [53]. Με το δυναμόμετρο χειρός μετρήσαμε την δύναμη που ασκούν τα δάχτυλα σε σχέση με την γωνιακή θέση του ηλεκτρικού επενεργητή. Η μετατόπιση

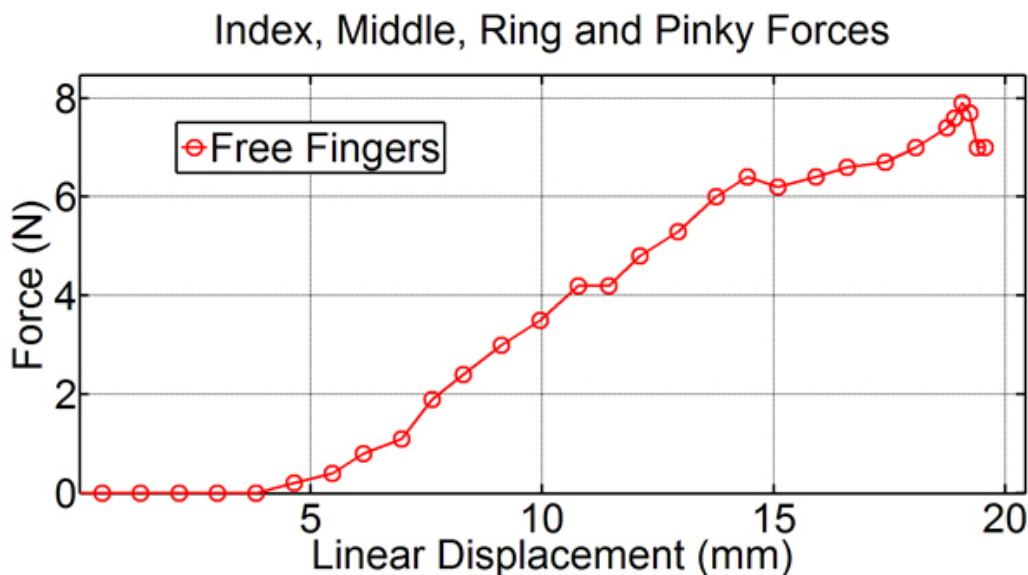
του διαφορικού μηχανισμού εντός της παλάμης θεωρείται το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό σε σχέση με την γωνιακή θέση του ηλεκτρικού επενεργητή. Ο λόγος έγκειται στο γεγονός, ότι επιθυμούμε να εξετάσουμε την συμπεριφορά του διαφορικού μηχανισμού επιλεκτικής εμπλοκής. Η γωνιακή θέση του ηλεκτρικού επενεργητή μετατρέπεται εύκολα σε ανηγμένη γραμμική μετατόπιση του διαφορικού μηχανισμού ως εξής:

$$L = 2 \cdot \pi \cdot R_i \cdot \frac{\phi}{360} \quad (3.1)$$

- $L$ : Ανηγμένη γραμμική μετατόπιση του διαφορικού μηχανισμού.
- $2 \cdot \pi \cdot R_i$ : Περίμετρος των τροχαλιών του ηλεκτρικού επενεργητή.
- $\phi$ : Υφιστάμενη γωνιακή θέση του ηλεκτρικού επενεργητή.

Η γωνιακή θέση ορίζεται σε σχέση με την αρχική θέση του ηλεκτρικού επενεργητή, όπου το ανθρωπομορφικό ρομποτικό χέρι βρίσκεται σε ηρεμία. Οι διάμετροι των τροχαλιών του ηλεκτρικού επενεργητή είναι διαφορετικές για κάθε σύστημα περιέλιξης τένοντα, για λόγους που διευκρινίστηκαν στην υποενότητα 2.3.2.1.

Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα δυνάμεων του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού, χωρίς εμπλοκή δαχτύλων από το διαφορικό μηχανισμό, σε σχέση με την ανηγμένη γραμμική μετατόπιση του διαφορικού μηχανισμού. Η μέγιστη δύναμη που επιτυγχάνεται από τα τέσσερα δάχτυλα είναι 8 N με 20 mm μετατόπιση του διαφορικού μηχανισμού εσωτερικά της παλάμης. Παρατηρείται, πως αρχικά η δύναμη αυξάνεται γραμμικά έως ότου προσεγγίσει την μέγιστη τιμή και έπειτα μειώνεται και

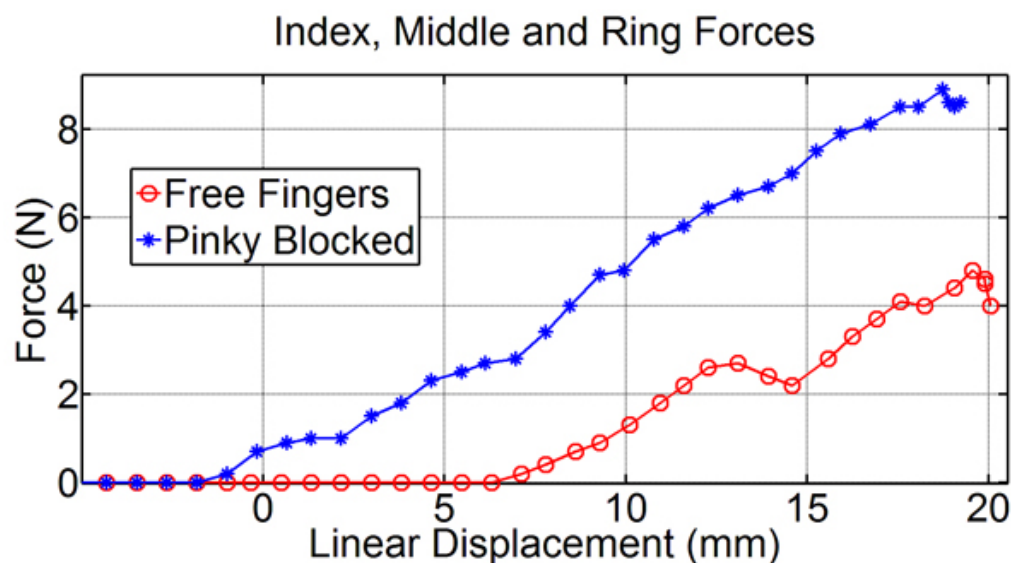


Σχήμα 3.1: Σχέση δύναμης με ανηγμένη γραμμική μετατόπιση του διαφορικού μηχανισμού χωρίς εμπλοκή δαχτύλων.

σταθεροποιείται στα 7 N. Αυτή η μείωση οφείλεται στην συμπεριφορά των ελαστικών των αρθρώσεων και στην ελαστική παραμόρφωση του τένοντα (Dyneema) που χρησιμοποιούμε. Σημειώνεται πως η αρχική υστέρηση της δύναμης οφείλεται στην κίνηση των δαχτύλων στο ελεύθερο χώρο έως ότου συναντήσουν το δυναμόμετρο χειρός.

Στην συνέχεια, εξετάζουμε την συμπεριφορά του διαφορικού μηχανισμού όταν το μικρό δάχτυλο δεν συμμετέχει στον υπολογισμό της δύναμης. Υπάρχουν δύο διαφορετικές περιπτώσεις υπολογισμού της δύναμης. Αρχικά, δεσμεύουμε την κίνηση του μικρού δαχτύλου μέσω εμπλοκής του μηχανικού συζεύκτη στο διαφορικό μηχανισμό και μετράται η δύναμη που ασκούν τα υπόλοιπα τρία δάχτυλα. Έπειτα, αφήνουμε το μικρό δάχτυλο να κινείται στον ελεύθερο χώρο, χωρίς όμως να ακουμπήσει το δυναμόμετρο χειρός και μετράται εκ νέου η δύναμη που ασκούν τα υπόλοιπα τρία δάχτυλα. Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα δυνάμεων των τριών δαχτύλων σε σχέση με την ανηγμένη γραμμική μετατόπιση του διαφορικού μηχανισμού.

Παρατηρείται, πως η δύναμη που ασκούν τα δάχτυλα δείκτη, μέσου και παράμεσου είναι σχεδόν διπλάσια στην περίπτωση που δεσμευτεί η κίνηση του μικρού δαχτύλου με το διαφορικό επιλεκτικής εμπλοκής. Ωστόσο, παρατηρείται μικρή μείωση στην γραμμική μετατόπιση που οφείλεται στον περιορισμό κίνησης του διαφορικού μηχανισμού.

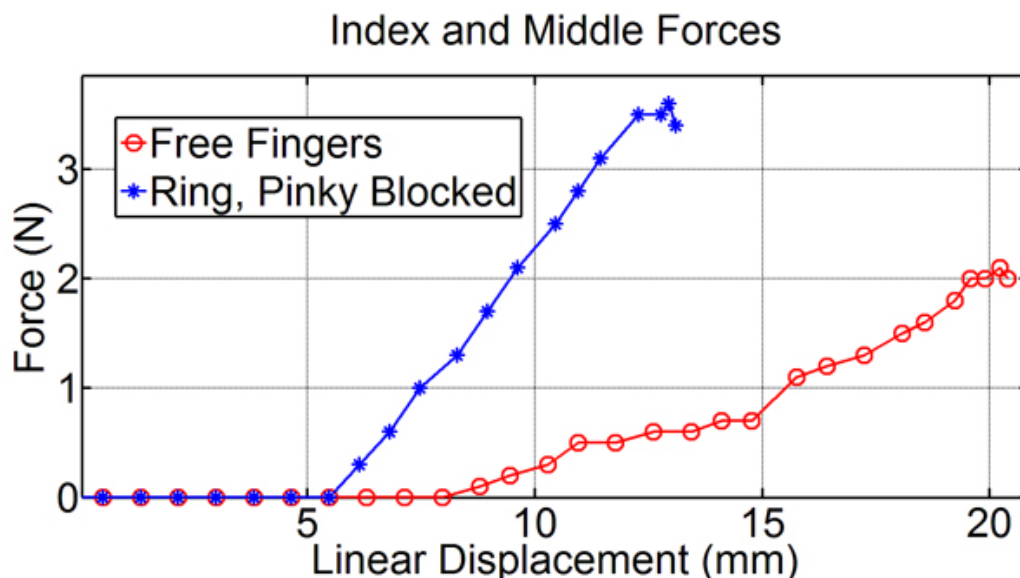


Σχήμα 3.2: Σχέση δύναμης με ανηγμένη γραμμική μετατόπιση του διαφορικού μηχανισμού με εμπλοκή του μικρού δαχτύλου.

Έπειτα, εξετάζουμε την συμπεριφορά του διαφορικού μηχανισμού όταν τα δάχτυλα παράμεσου και μικρού δεν συμμετέχουν στον υπολογισμό της δύναμης. Υπάρχουν δύο διαφορετικές περιπτώσεις υπολογισμού της δύναμης. Αρχικά, δεσμεύουμε την κίνηση των δαχτύλων παράμεσου και μικρού μέσω εμπλοκής του μηχανικού συζεύκτη στο διαφορικό μηχανισμό και μετράται η δύναμη που ασκούν τα υπόλοιπα δάχτυλα.

Ύστερα, αφήνουμε τα δάχτυλα παράμεσο και μικρό να κινούνται στον ελεύθερο χώρο, χωρίς όμως να ακουμπήσουν το δυναμόμετρο χειρός και μετράται εκ νέου η δύναμη που ασκούν τα υπόλοιπα δύο δάχτυλα. Στο σχήμα 3.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα δυνάμεων σε σχέση με την ανηγμένη γραμμική μετατόπιση του διαφορικού μηχανισμού.

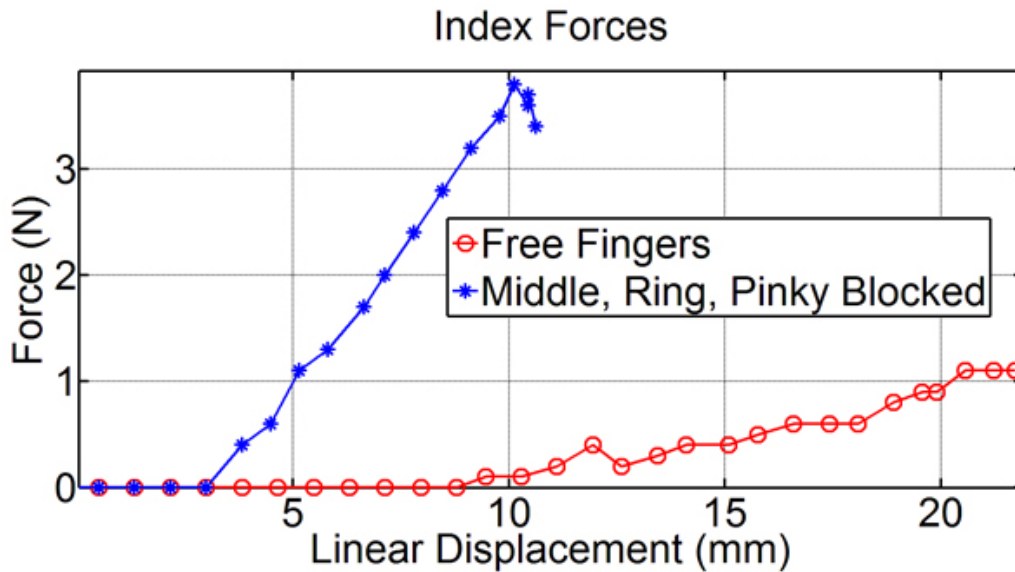
Παρατηρείται, πως η δύναμη που ασκούν τα δάχτυλα δείκτης και μέσος είναι σχεδόν διπλάσια στην περίπτωση που δεσμευτεί η κίνηση των δαχτύλων παράμεσου και μικρού με το διαφορικό επιλεκτικής εμπλοκής. Ωστόσο, παρατηρείται μείωση στην γραμμική μετατόπιση που οφείλεται στον περιορισμό κίνησης του διαφορικού μηχανισμού.



Σχήμα 3.3: Σχέση δύναμης με ανηγμένη γραμμική μετατόπιση του διαφορικού μηχανισμού με εμπλοκή των δαχτύλων παράμεσου και μικρού.

Στην συνέχεια, εξετάζουμε την συμπεριφορά του διαφορικού μηχανισμού όταν τα δάχτυλα μέσος, παράμεσος και μικρός δεν συμμετέχουν στον υπολογισμό της δύναμης. Υπάρχουν δύο διαφορετικές περιπτώσεις υπολογισμού της δύναμης. Αρχικά, δεσμεύουμε την κίνηση των δαχτύλων μέσου, παράμεσου και μικρού μέσω της εμπλοκής του μηχανικού συζεύκτη στο διαφορικό μηχανισμό και μετράται η δύναμη που ασκεί ο δείκτης. Έπειτα, αφήνουμε τα δάχτυλα μέσου, παράμεσου και μικρού να κινούνται στον ελεύθερο χώρο, χωρίς όμως να ακουμπήσουν το δυναμόμετρο χειρός και μετράται εκ νέου η δύναμη που ασκεί ο δείκτης. Στο σχήμα 3.4 παρουσιάζεται το διάγραμμα δυνάμεων σε σχέση με την ανηγμένη γραμμική μετατόπιση του διαφορικού μηχανισμού.

Παρατηρείται, πως η δύναμη που ασκεί ο δείκτης είναι σχεδόν τέσσερις φορές μεγαλύτερη στην περίπτωση που δεσμευτεί η κίνηση των δαχτύλων μέσου, παράμεσου και μικρού με το διαφορικό επιλεκτικής εμπλοκής. Ωστόσο, παρατηρείται σημαντική μείωση στην γραμμική μετατόπιση που οφείλεται στον περιορισμό κίνησης του διαφορικού μηχανισμού.

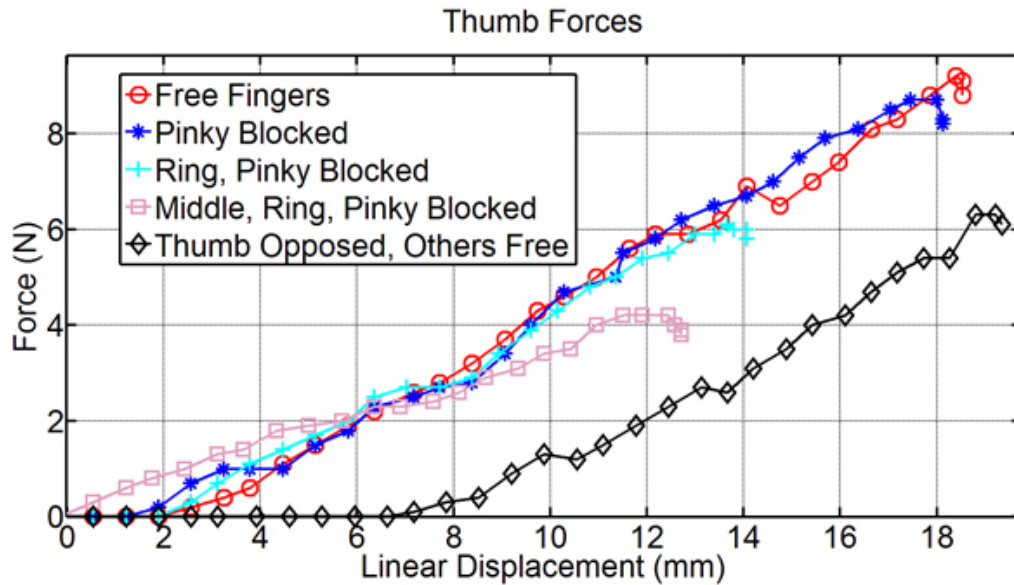


Σχήμα 3.4: Σχέση δύναμης με ανηγμένη γραμμική μετατόπιση του διαφορικού μηχανισμού με εμπλοκή των δαχτύλων μέσου, παράμεσου και μικρού.

Έπειτα, εξετάζουμε την συμπεριφορά του αντίχειρα σε σχέση με όλες τις παραπάνω περιπτώσεις μετρήσεων δύναμης. Υπάρχουν πέντε διαφορετικές περιπτώσεις υπολογισμού της δύναμης. Αρχικά, δεν δεσμεύεται η κίνηση κανενός δαχτύλου και μετράται η δύναμη που ασκεί ο αντίχειρας σε αντίθεση. Ύστερα, δεσμεύουμε την κίνηση των δαχτύλων μέσου, παράμεσου και μικρού, όπως στις παραπάνω τέσσερις περιπτώσεις αλλά αυτή την φορά μετράται η δύναμη που ασκεί ο αντίχειρας. Στο σχήμα 3.5 παρουσιάζεται το διάγραμμα δυνάμεων σε σχέση με την ανηγμένη γραμμική μετατόπιση του διαφορικού μηχανισμού.

Η δύναμη που ασκεί ο αντίχειρας σε όλες τις περιπτώσεις είναι ίδια και γραμμική καθώς η κλίση είναι όμοια σε όλες τις καμπύλες του διαγράμματος. Αυτό σημαίνει πως η άσκηση δύναμης του αντίχειρα περιορίζεται μόνο από την ανηγμένη γραμμική μετατόπιση. Συνεπώς, η εξάρτηση από τον διαφορικό μηχανισμό δεν είναι άμεση καθώς δεν μεταφέρεται δύναμη στον αντίχειρα αλλά έμμεση διότι η εμπλοκή δαχτύλων περιορίζει την γραμμική μετατόπιση. Η γραμμική μετατόπιση προκύπτει από την γωνιακή θέση του ηλεκτρικού επενεργητή και για τα δύο συστήματα περιέλιξης τένοντα. Σε περίπτωση που διακοπεί η κίνηση από κάποιο σύστημα περιέλιξης, ταυτόχρονα περιορίζεται η κίνηση και στο άλλο σύστημα περιέλιξης, καθώς κινούνται από το ενιαίο σύστημα τροχαλιών, διαφορετικών διαμέτρων, που εδράζεται στον ηλεκτρικό επενεργητή.

Παρατηρείται, πως για τις περιπτώσεις εμπλοκής των δαχτύλων παράμεσου, μικρού και μέσου, παράμεσου, μικρού υπάρχει σημαντική μείωση στην γραμμική μετατόπιση που οφείλεται στον περιορισμό κίνησης του διαφορικού μηχανισμού. Επίσης, στην περίπτωση αντίθεσης του αντίχειρα δημιουργείται χαλάρωση (slack) στο σύστημα περιέλι-



Σχήμα 3.5: Σχέση δύναμης αντίχειρα με ανηγμένη γραμμική μετατόπιση του διαφορικού μηχανισμού.

ξής τένοντα του αντίχειρα, με αποτέλεσμα να περιορίζεται η γραμμική μετατόπιση του αντίχειρα. Αυτός ο περιορισμός μειώνει σημαντικά την δύναμη που ασκεί ο αντίχειρας όταν εφαρμόζεται κίνηση αντίθεσης.

Συνολικά, κρίνεται πως ο διαφορικός μηχανισμός επιλεκτικής εμπλοκής έχει θετική συνεισφορά στην μεταφορά δύναμης σε περίπτωση που θέλουμε να επιτύχουμε αρπάγη με λιγότερα από τα διαθέσιμα δάχτυλα. Ωστόσο, υπάρχουν κάποια μειονεκτήματα που οφείλονται στον περιορισμό κίνησης του διαφορικού μηχανισμού και στην χαλαρότητα που δημιουργείται στο σύστημα περιέλιξης τένοντα του αντίχειρα, όταν τοποθετείται σε θέση αντίθεσης στα υπόλοιπα δάχτυλα.

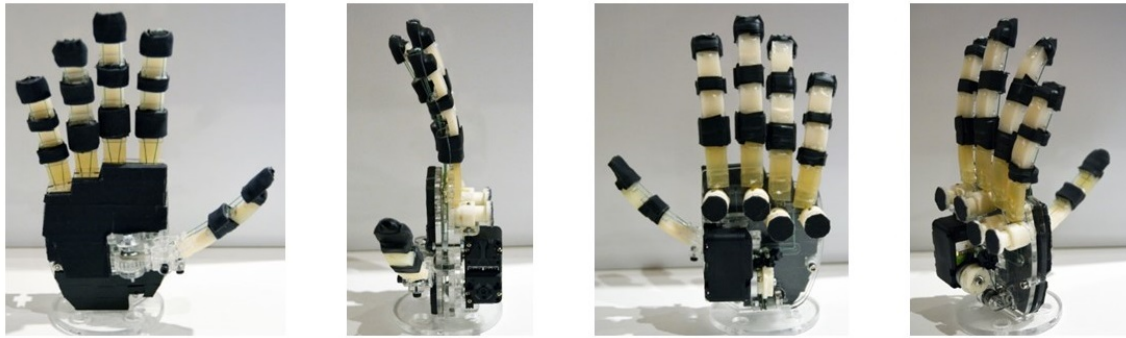
### 3.1.2 Διαφορετικές επιλογές αρπάγης αντικειμένων & εκτέλεσης χειρονομιών

Το ανθρωπομορφικό ρομποτικό χέρι με το διαφορικό μηχανισμό περιορισμένης εμπλοκής σχεδιάστηκε με σκοπό να επιτυγχάνει 144 διαφορετικούς τύπους αρπάγης. Σε αυτή την υποενότητα εξετάζουμε πειραματικά την δυνατότητα του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού να επιτύχει αυτές τις διαφορετικές αρπάγες και χειρονομίες.

Βάρος (g)	Μήκος Χεριού (mm)	Πλάτος Χεριού (mm)	Πάχος Χεριού (mm)	Κόστος (\$)
300	190	90	62.5 (σταθερό)	200

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού.





Σχήμα 3.6: Ανθρωπομορφικό ρομποτικό χέρι σε ηρεμία.

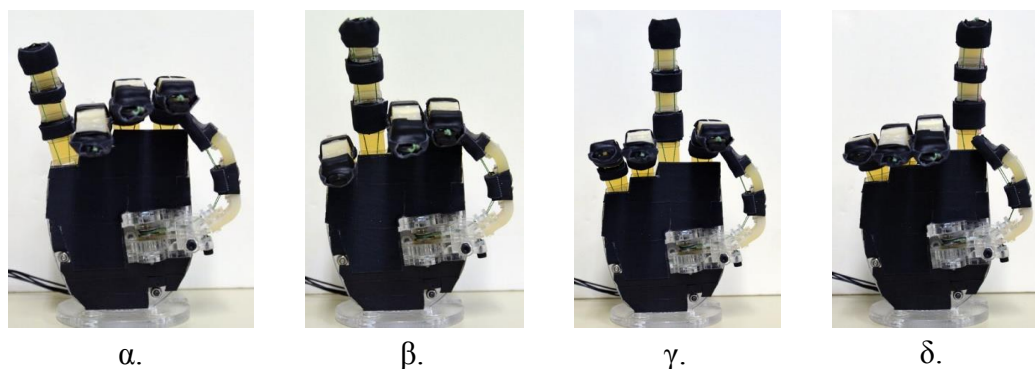
Στο σχήμα 3.6 παρουσιάζεται το ανθρωπομορφικό ρομποτικό χέρι σε ηρεμία σε όλες τις όψεις του. Το χέρι υλοποιήθηκε βάση της διδιάστατης σχεδίασης, που όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.4 κατασκευάστηκε από Plexiglas σε μηχανή κοπής laser.

Τα χαρακτηριστικά του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού που απεικονίζεται στο σχήμα 3.6 παρουσιάζονται στους πίνακες 3.1 και 3.2. Το συνολικό κόστος κατασκευής του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού ανήλθε μόλις στα 200 \$. Επίσης, το συνολικό βάρος του χεριού είναι 300 g και οι υπόλοιπες διαστάσεις είναι εντός της κανονικής κατανομής του ανθρώπινου χεριού και ταυτίζονται με αυτές του συγγραφέα.

Δάχτυλα	Βάρος (g)	Μήκος Δαχτύλων (mm)	Πλάτος Δαχτύλων (mm)	Πάχος Δαχτύλων (mm)
Αντίχειρας	20.0	68.0	16.2	15.0
Δείκτης	30.0	88.0	16.2	15.0
Μέσος	30.0	98.0	16.2	15.0
Παράμεσος	30.0	95.0	16.2	15.0
Μικρός	25.0	76.0	16.2	15.0

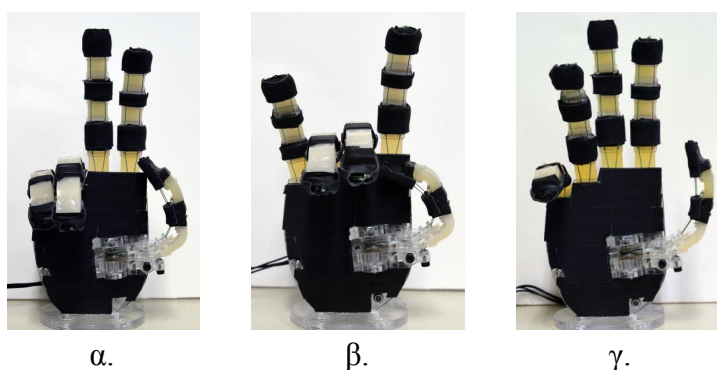
Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά δαχτύλων ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού σύμφωνα με τις προϋποθέσεις του πίνακα 3.1.

Σημειώνεται, πως το πάχος των δαχτύλων δεν μπορεί να μεταβληθεί καθώς περιλαμβάνει σταθερές διαστάσεις και συγκεκριμένα υλικά για την κατασκευή του. Αντίθετα, το πλάτος των δαχτύλων είναι παραμετροποιήσιμο μέγεθος κατά τον σχεδιασμό και η συγκεκριμένη διάσταση ταυτίζεται με αυτή του χεριού του συγγραφέα. Στην συνέχεια δεσμεύουμε την κίνηση ενός δαχτύλου και παρουσιάζονται οι τέσσερις πιθανές περιπτώσεις του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού στο σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7: Περιορισμός κίνησης ενός δαχτύλου. α. Μικρός, β. Παράμεσος, γ. Μέσος, δ. Δείκτης.

Επίσης σημειώνεται, πως δεν μπορούμε να δεσμεύσουμε την κίνηση του αντίχειρα στο ανθρωπομορφικό ρομποτικό χέρι, άλλωστε κάτι τέτοιο δεν θα είχε νόημα καθώς ο αντίχειρας συνεισφέρει πάντοτε και σε όλες τις αρπάγες. Έπειτα, δεσμεύουμε την κίνηση διαφόρων δαχτύλων με διάφορους συνδυασμούς και παρουσιάζουμε μερικές εφικτές χειρονομίες του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού στο σχήμα 3.8



Σχήμα 3.8: Περιορισμός κίνησης διαφόρων δαχτύλων. α. Σύμβολο της ειρήνης, β. Devil's Horns, γ. Προσκοπικός χαιρετισμός.

## 3.2 Αρπαγή καθημερινών αντικειμένων

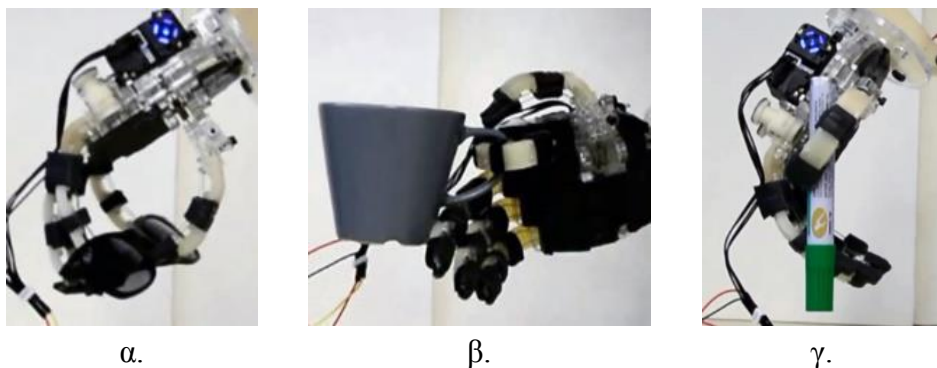
Για να εξετάσουμε την λειτουργικότητα του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού, πραγματοποιήσαμε σειρά πειραμάτων αρπάγης καθημερινών αντικειμένων. Επιλέξαμε αντικείμενα που έχουν διαφορετικά μεγέθη, γεωμετρία, δυσκαμψία και βάρος. Επίσης, για τα αντικείμενα που επιλέξαμε απαιτούνται οι παρακάτω τύποι αρπάγης, όπως ορίζονται στο [6], πλευρική αρπάγη, τρίποδη αρπάγη, τρίποδη αρπάγη γραφής, ακριβής σφαιροειδή αρπάγη, αρπάγη δύναμης δίσκου αρπάγη μεγάλης διαμέτρου, αρπάγη μεσαίας διαμέτρου και πλευρική τρίποδη αρπάγη.

Αρχικά, επιτεύχθηκε επιτυχής αρπάγη σε άδεια πλαστική κούπα, σε σαπούνι σε συσκευασία, σε μπλοκ σημειώσεων A5, σε μαρκαδόρο και σε κοχάλινα γυαλιά ηλίου. Το ανθρωπομορφικό ρομποτικό χέρι έδειξε εξαιρετική προσαρμοστικότητα σε όλα τα αντικείμενα και όλες οι αρπάγες ήταν επιτυχείς διατηρώντας την ακεραιότητα των αντικειμένων. Για την αρπάγη των παραπάνω αντικειμένων απαιτείται επιδεξιότητα από το ρομποτικό χέρι καθώς καλύπτουν μεγάλη ποικιλία απαιτήσεων. Πιο συγκεκριμένα, τα αντικείμενα είναι μικρού μεγέθους, αποτελούνται από υλικά διαφορετικής δυσκαμψίας και φέρουν πολύπλοκες γεωμετρίες. Στο σχήμα 3.9 παρουσιάζονται οι αρπάγες μερικών αντικειμένων που αναφέρθηκαν.

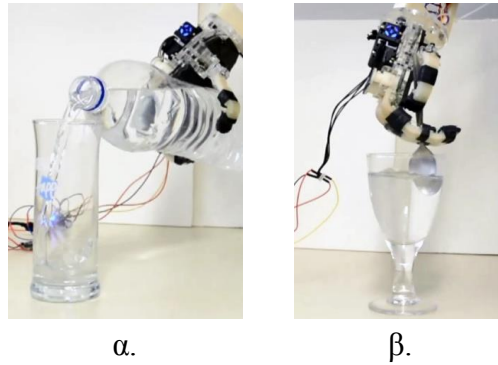
Στην συνέχεια, επιτεύχθηκε επιτυχής αρπάγη συσκευασίας πολύμετρου από χαρτόνι και αφαίρεση πολύμετρου από την συσκευασία, μερικώς γεμισμένου καθαριστικού χώρου, μικρής διαμέτρου κινούμενης μπάλας, γεμάτου πλαστικού μπουκαλιού νερού 1.5 L και γέμισμα ποτηριού, γυάλινου κυλινδρικού ποτηριού και μεταλλικού κουταλιού.

Στο σχήμα 3.10 παρουσιάζονται οι αρπάγες μερικών αντικειμένων που αναφέρθηκαν. Σημειώνεται πως το ανθρωπομορφικό ρομποτικό χέρι επέδειξε επιδεξιότητα στην δοκιμασία αφαίρεσης του πολύμετρου από την συσκευασία του. Αυτός ο συνδυασμός αρπαγών είναι εξαιρετικά σύνθετος αλλά βρίσκει εφαρμογή σε πληθώρα καθημερινών λειτουργιών του ανθρώπινου χεριού. Έπειτα, το μέγιστο βάρος που κατάφερε να υποστηρίξει το ρομποτικό χέρι είναι 1.5 Kg. Αυτό το βάρος είναι ικανοποιητικό προκειμένου να επιτυγχάνεται η πλειοψηφία των καθημερινών αρπαγών που επιχειρεί ο άνθρωπος.

Συμπερασματικά, το ανθρωπομορφικό ρομποτικό χέρι επέδειξε εξαιρετικά χαρακτηριστικά και κατά το δεύτερο μέρος της πειραματικής διαδικασίας. Για την επιτυχή αρπάγη των αντικειμένων απαιτούνται 9 διαφορετικοί τύποι αρπάγης, όπως ορίζονται στο [6]. Για όλα σχεδόν τα αντικείμενα απαιτήθηκε μόνο μια προσπάθεια για την αρπάγη τους. Παρατηρήθηκε, πως το πιο δύσκολο στάδιο ήταν να εκπαιδευτούν οι



Σχήμα 3.9: Αρπάγη διαφόρων αντικειμένων. α. Γυαλιά ηλίου, β. Κούπα, γ. Μαρκαδόρος.



Σχήμα 3.10: Αρπάγη διαφόρων αντικειμένων. α. Πλαστικό μπουκάλι νερού, β. Κουτάλι.

συμμετέχοντες στην πειραματική διαδικασία και στον τρόπο λειτουργίας του ρομποτικού χεριού. Τέλος, όλη η πειραματική διαδικασία μαγνητοσκοπήθηκε και παρατίθεται σε βίντεο υψηλής ανάλυσης [54].

# Κεφάλαιο 4

## Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της σχεδίασης και κατασκευής ενός ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού. Στην συνέχεια, προτείνονται πιθανές μελλοντικές κατευθύνσεις για την βελτίωση του ρομποτικού χεριού είτε στο επίπεδο σχεδίασης, είτε στο επίπεδο κατασκευής.

### 4.1 Επισκόπηση

Η εργασία αυτή αφορά την σχεδίαση και κατασκευή ενός ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού. Αρχικά, ορίσαμε τις απαιτήσεις του προβλήματος στην ενότητα 2.1. Προκειμένου να ενισχύσουμε την επιδεξιότητα του χεριού μελετήσαμε την έννοια του ανθρωπομορφισμού και εμπνευστήκαμε από τον τρόπο λειτουργίας και τα χαρακτηριστικά του ανθρώπινου χεριού. Έπειτα, η πιο σημαντική απαίτηση ήταν το ρομποτικό χέρι να είναι ιδιαίτερος λειτουργικό ώστε να πραγματοποιεί καθημερινές αρπάγες αντικειμένων με ευκολία και χωρίς να χρειάζεται πολύπλοκους νόμους ελέγχου. Με γνώμονα αυτή την απαίτηση επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε ελαστικές αρθρώσεις με υποχωρητικότητα, ώστε να λειτουργεί αποτελεσματικά και σε μη δομημένα περιβάλλοντα. Στην συνέχεια, απαραίτητη προϋπόθεση ήταν το ρομποτικό χέρι να έχει χαμηλό βάρος και κόστος κατασκευής. Συνεπώς, ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στην επιλογή των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν ώστε να επιτυγχάνονται χαμηλό βάρος και κόστος, αλλά παράλληλα να διατηρείται υψηλός δείκτης στιβαρότητας. Επίσης, σημαντικός παράγοντας που μειώνει το βάρος και το κόστος της κατασκευής είναι η μείωση του αριθμού των ηλεκτρικών επενεργητών. Για τον λόγο αυτό, αλλά και για λόγους προσαρμοστικότητας του χεριού, κρίναμε σκόπιμο το ρομποτικό χέρι να είναι υποεπενεργούμενο (χρήση 1 μόνο ηλεκτρικού επενεργητή).

Στην συνέχεια, στην ενότητα 2.2 ορίσαμε τους περιορισμούς κατασκευής του ρομποτικού χεριού βάση των απαιτήσεων που είχαν οριστεί. Αρχικά, ήταν αδύνατο να υλοποιηθούν όλοι οι βαθμοί ελευθερίας που διαθέτει το ανθρώπινο χέρι. Έπειτα, μελετήσαμε

τον τρόπο λειτουργίας, του πιο σημαντικού και σύνθετου δαχτύλου στο ανθρώπινο χέρι, του αντίχειρα. Κρίθηκε αδύνατο να υλοποιηθεί η λειτουργία του αντίχειρα όπως πραγματοποιείται στο ανθρώπινο χέρι, για αυτό περιορίστηκαν οι βαθμοί ελευθερίας του. Ύστερα, η απαίτηση της χρήσης μόνο ενός ηλεκτρικού επενεργητή δημιούργησε περιορισμούς ως προς το βάρος και τη ροπή που θα απαιτούνταν. Μελετήσαμε λοιπόν, τρόπους μείωσης των τριβών στο σύστημα περιέλιξης τένοντα που μεταφέρει την κίνηση από τον ηλεκτρικό επενεργητή στα δάχτυλα.

Στην ενότητα 2.3 παρουσιάζουμε το κινηματικό μοντέλο του ρομποτικού χεριού με βάση την ανάλυση *Denavit–Hartenberg*. Έπειτα, ορίζουμε την ακριβή θέση του αντίχειρα μέσα από ένα ιατρικό τεστ που εφαρμόζεται μετά από εγχειρητικές διαδικασίες στο ανθρώπινο χέρι, τον έλεγχο του *Kapandji*. Ύστερα, επιλέγουμε κατάλληλη κλίση του αντίχειρα για να αποφευχθούν φαινόμενα επικάλυψης δαχτύλων. Για την ολοκλήρωση του σχεδιασμού του αντίχειρα χρησιμοποιήσαμε μελέτες ταξινόμησης αρπαγών του ανθρώπινου χεριού προκειμένου να εξαχθεί η διακριτοποίηση του οδοντωτού μηχανισμού σύμπλεξης. Στην συνέχεια, σχεδιάσαμε ένα διαφορικό μηχανισμό επιλεκτικής εμπλοκής, που βασίστηκε στον μηχανισμό του *Whiffletree*.

Ακολούθως, στην ενότητα 2.4 σχεδιάσαμε το τριδιάστατο μοντέλο του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού. Για λόγους διαχείρισης το ρομποτικό χέρι χωρίστηκε σε τρία μέλη, στην παλάμη, στα δάχτυλα και τα υπόλοιπα περιφερειακά εξαρτήματα. Η σχεδίαση είναι παραμετρική, δηλαδή μπορεί να μεταβάλλεται με βάση το μήκος και το πλάτος του ανθρώπινου χεριού. Συνεπώς, προέκυψαν προσωποποιημένα ανθρωπομορφικά ρομποτικά χέρια που μπορούν να αναπαράγουν το 95% των ανθρώπινων χεριών του ανδρικού πληθυσμού. Τα σχέδια του ρομποτικού χεριού είναι διαθέσιμα σε δύο εκδόσεις (2D, 3D), οι οποίες επιτρέπουν την κατασκευή του είτε σε μηχανές κοπής laser, είτε σε μηχανές εναπόθεσης τήγματος (3D printers).

Στο κεφάλαιο 3 εξοικονομήσαμε, μέσω πειραματικής διαδικασίας, την λειτουργικότητα του συνόλου της κατασκευής του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού. Τα πειράματα χωρίστηκαν σε 2 μέρη, όπου στο πρώτο δοκιμάσαμε την λειτουργικότητα του διαφορικού μηχανισμού επιλεκτικής εμπλοκής, ενώ στο δεύτερο εξετάσαμε την ικανότητα του χεριού να επιτυγχάνει αρπάγες καθημερινών αντικειμένων.

Στο πρώτο μέρος των πειραμάτων της ενότητας 3.1 παρουσιάσαμε, μέσω διαγραμμάτων την σχέση μεταξύ ανηγμένης γραμμικής μετατόπισης του διαφορικού μηχανισμού και συνεισφοράς του διαφορικού μηχανισμού επιλεκτικής εμπλοκής στην μεταφορά δύναμης από τον ηλεκτρικό επενεργητή στα δάχτυλα κατά την χρήση του. Ωστόσο, υπάρχουν κάποια μειονεκτήματα που οφείλονται στον περιορισμό κίνησης του διαφορικού μηχανισμού και στην χαλαρότητα που δημιουργείται στο σύστημα περιέλιξης τένοντα του αντίχειρα, όταν τοποθετείται σε θέση αντίθεσης από τα υπόλοιπα δάχτυλα.

Στο επόμενο μέρος των πειραμάτων της ενότητας 3.2 το ανθρωπομορφικό ρομποτικό

χέρι επέδειξε εξαιρετικά χαρακτηριστικά. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποίησε επιτυχείς αρπάγες διαφόρων καθημερινών αντικειμένων που έχουν διαφορετικά μεγέθη, γεωμετρίες, δυσκαμψία και βάρος. Συνάμα, το ρομποτικό χέρι επέδειξε εξαιρετική ευκολία κατά την χρήση του και οι μηχανικοί συζεύκτες καθώς και ο οδοντωτός μηχανισμός αντίθεσης του αντίχειρα ήταν εύκολοι στην χρήση. Εκτενή πειράματα αρπάγης καθημερινών αντικειμένων και εκτέλεσης χειρονομιών περιέχονται στο σχετικό βίντεο [54].

## 4.2 Συνεισφορά

Η συνεισφορά της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση και η κατασκευή ενός ρομποτικού χεριού που χρησιμοποιεί ένα καινοτόμο διαφορικό μηχανισμό επιλεκτικής εμπλοκής. Τα χαρακτηριστικά του προτεινόμενου χεριού είναι τα ακόλουθα:

1. Ανθρωπομορφισμός: Το ρομποτικό χέρι είναι εμπνευσμένο από ανθρωπομετρικές μελέτες του χεριού και ο σχεδιασμός του βασίζεται σε ιατρικά τεστ που εφαρμόζονται σε ανθρώπινα χέρια μετά από εγχειρητικές διαδικασίες.
2. Χαμηλό βάρος: Τα υλικά που χρησιμοποιήσαμε για την κατασκευή του χεριού είναι ελαφρά αλλά παράλληλα εξασφαλίζουν στιβαρότητα στην κατασκευή. Το συνολικό βάρος του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού είναι 300 g.
3. Χαμηλό κόστος: Επιλέξαμε οικονομικά υλικά που είναι εύκολο να βρεθούν στην αγορά. Το μεγαλύτερο μέρος του κόστους οφείλεται στους ηλεκτρικούς επενεργητές και για αυτό χρησιμοποιήθηκε μόνο ένας. Το συνολικό κόστος της κατασκευής είναι 200 \$.
4. Παραμετρικός σχεδιασμός: Το ανθρωπομορφικό ρομποτικό χέρι είναι πλήρως παραμετρικό ως προς το μήκος και το πλάτος του ανθρώπινου χεριού προκειμένου να παράγεται με προσωποποιημένο τρόπο.
5. Λειτουργικότητα: Ο διαφορικός μηχανισμός επιλεκτικής εμπλοκής είναι η κυριότερη συνεισφορά της διπλωματικής εργασίας καθώς εξασφαλίζει υψηλά επίπεδα λειτουργικότητας. Πιο συγκεκριμένα επιτρέπει την επιλογή 144 διαφορετικών τύπων αρπάγης και κατά την χρήση του παρουσιάζεται σημαντική μεταφορά δύναμης στα δάχτυλα που συμμετέχουν στην αρπάγη.
6. Σχεδίαση ανοιχτού κώδικα και οδηγός συναρμολόγησης: Ολόκληρη η σχεδίαση διατίθεται μέσω του [55] ελεύθερα στο διαδίκτυο υπό την άδεια Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License της πρωτοβουλίας OpenBionics, που περιγράφεται στο Παράρτημα Α'. Επίσης, διατίθεται οδηγός

συναρμολόγησης του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού που παρουσιάζεται στο Παράρτημα Β'.

7. Χρήση ως προσθετικό μέλος: Κρίνεται εξαιρετικά καίρια η χρήση του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού ως προσθετικό μέλος.
8. Η παρούσα διπλωματική εργασία οδήγησε σε δύο δημοσιεύσεις [56, 57].

### 4.3 Μελλοντικές επεκτάσεις

Με την πρώτη αυτή προσπάθεια κατασκευής ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού εξήχθησαν κάποια σημαντικά συμπεράσματα. Θεωρείται σκόπιμο να συνεχιστεί η έρευνα στο ανθρωπομορφικό ρομποτικό χέρι που μπορεί να οδηγήσει είτε σε βελτιώσεις, είτε σε περαιτέρω εξέλιξη του. Αυτές οι προτάσεις παρουσιάζονται παρακάτω:

- Μυοηλεκτρικός έλεγχος του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού.
- Σχεδιασμός και κατασκευή κατάλληλης πλατφόρμας προκειμένου να πραγματοποιηθούν πειράματα σε ανθρώπους με αναπηρία του άνω άκρου.
- Μοντελοποίηση και έλεγχος του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού για επίτευξη χειρισμού αντικειμένων.
- Τροποποίηση κατασκευής για χρήση ως αυτόνομο ρομποτικό χέρι.



# Παράρτημα Α΄

## OpenBionics

Η OpenBionics είναι μια πρωτοβουλία ανοιχτού κώδικα που προορίζεται για την εξέλιξη οικονομικά προσιτών, χαμηλού βάρους ρομποτικών και προσθετικών χεριών. Τα χέρια μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας μηχανές προτυποποίησης και υλικά που μπορούμε να βρούμε εύκολα στην αγορά. Τα ρομποτικά χέρια κοστίζουν 100\$ και ζυγίζουν 200g, ενώ τα προσθετικά χέρια κοστίζουν 200\$ και ζυγίζουν 300g. Τα απαιτούμενα αρχεία, κώδικες και οδηγοί συναρμολόγησης για την κατασκευή των χεριών βρίσκονται στην ιστοσελίδα της πρωτοβουλίας [55].

Η OpenBionics ιδρύθηκε από μέλη του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου του κ.Κυριακόπουλου, της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Πιο συγκεκριμένα η ομάδα αποτελείται από τους:

- Δρ. Μηνάς Λιαροκάπης–Μεταδιδακτορικός ερευνητής–Yale University.
- Αγισήςλαος Ζησιμάτος–Προπτυχιακός φοιτητής σχολής Η.Μ.Μ.Υ.–Ε.Μ.Π..
- Γεώργιος Κοντούδης–Προπτυχιακός φοιτητής σχολής Μ.Μ.–Ε.Μ.Π..
- Χριστόφορος Μαυρογιάννης–Υποψήφιος Διδάκτωρ–Cornell University.
- Καθηγητής Κώστας Κυριακόπουλος–Διευθυντής Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου σχολής Μ.Μ.–Ε.Μ.Π..

Βραβεία με τα οποία διακρίθηκε το ανθρωπομορφικό ρομποτικό χέρι της πρωτοβουλίας OpenBionics:

- 1° βραβείο στον διεθνή διαγωνισμό ρομποτικής ‘2015 Robotdalen Innovation Award’ στην Σουηδία, τον Σεπτέμβριο του 2015.
- 2° βραβείο στον διεθνή διαγωνισμό ‘2015 Hackaday Prize’, στις Η.Π.Α τον Νοέμβριο του 2015.

Η συμμετοχή μου στην πρωτοβουλία OpenBionics οδήγησε στις ακόλουθες δημοσιεύσεις:

- [1] Agisilaos G. Zisimatos, Minas V. Liarokapis, Christoforos I. Mavrogiannis, **George P. Kontoudis** and Kostas J. Kyriakopoulos, “How to Create Affordable, Modular, Light-Weight, Underactuated, Compliant Robot Hands”, Control Systems Lab, School of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens, Technical Report, January 2015.
- [2] **George P. Kontoudis**, Minas V. Liarokapis, Agisilaos G. Zisimatos, Christoforos I. Mavrogiannis and Kostas J. Kyriakopoulos, “Open-Source, Anthropomorphic, Underactuated Robot Hands with a Selectively Lockable Differential Mechanism: Towards Affordable Prostheses”, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2015, pp. 5857–5862.
- [3] **George P. Kontoudis**, Minas V. Liarokapis, Agisilaos G. Zisimatos, Christoforos I. Mavrogiannis and Kostas J. Kyriakopoulos, “How to Create Affordable, Anthropomorphic, Light-Weight Prosthetic Hands”, Control Systems Lab, School of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens, Technical Report, October 2015.

# Παράρτημα Β΄

## Οδηγός Συναρμολόγησης

Σε αυτό το παράρτημα θα παρουσιαστούν αναλυτικές οδηγίες συναρμολόγησης του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού. Οι οδηγίες αφορούν την τριδιάστατη έκδοση. Αρχικά, θα παρουσιαστούν τα απαραίτητα υλικά και εργαλεία που απαιτούνται για την κατασκευή του ρομποτικού χεριού. Έπειτα, θα παρουσιαστούν τα τριδιάστατα τεμάχια της μηχανής εναπόθεσης τήγματος και όλος ο μηχανολογικός εξοπλισμός που χρειάζεται για την κατασκευή του ρομποτικού χεριού. Τέλος, θα παρατεθούν με σχήματα όλα τα βήματα συναρμολόγησης της κατασκευής.

### Β΄.1 Απαιτούμενα υλικά και εργαλεία

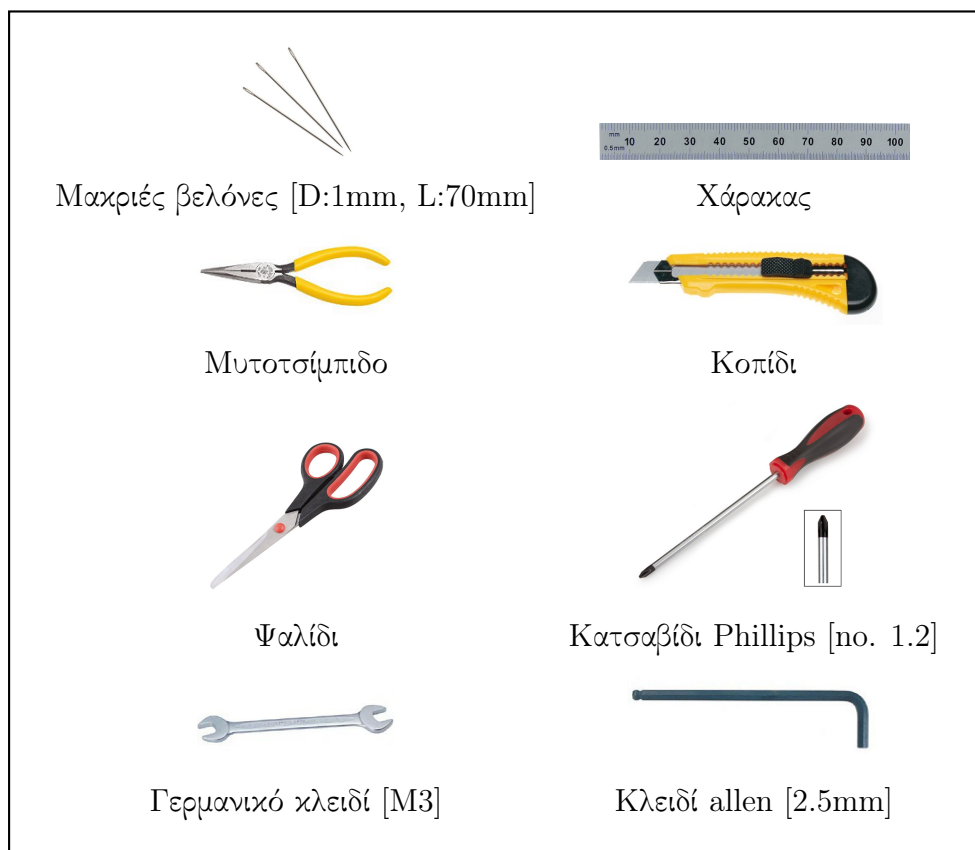
Το ανθρωπομορφικό ρομποτικό χέρι μπορεί να κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας υλικά και εργαλεία που βρίσκονται εύκολα στην αγορά, όπως φαίνεται στις εικόνες Β΄.1 και Β΄.2.

### Β΄.2 Τεμάχια

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται όλα τα απαραίτητα τεμάχια που απαιτούνται για την συναρμολόγηση του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού. Για λόγους διαχείρισης θα χωρίσουμε τα τεμάχια σε τρεις κατηγορίες:

1. Τεμάχια δαχτύλων.
2. Τεμάχια παλάμης.
3. Τεμάχια περιφερειακού εξοπλισμού.

Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τα απαραίτητα τεμάχια για την κατασκευή των πέντε δαχτύλων. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τα απαραίτητα τεμάχια για την κατασκευή της παλάμης και του διαφορικού μηχανισμού επιλεκτικής εμπλοκής καθώς



Σχήμα Β'.1: Εργαλεία κατασκευής ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού.



Σχήμα Β'.2: Υλικά κατασκευής ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού.

κινείται εσωτερικά της παλάμης. Η τρίτη κατηγορία περιλαμβάνει τα απαραίτητα τεμάχια για την κατασκευή της βάσης του ηλεκτρικού επενεργητή, του μηχανισμού του αντίχειρα, του συστήματος περιέλιξης τένοντα και των μηχανικών συζευκτών.

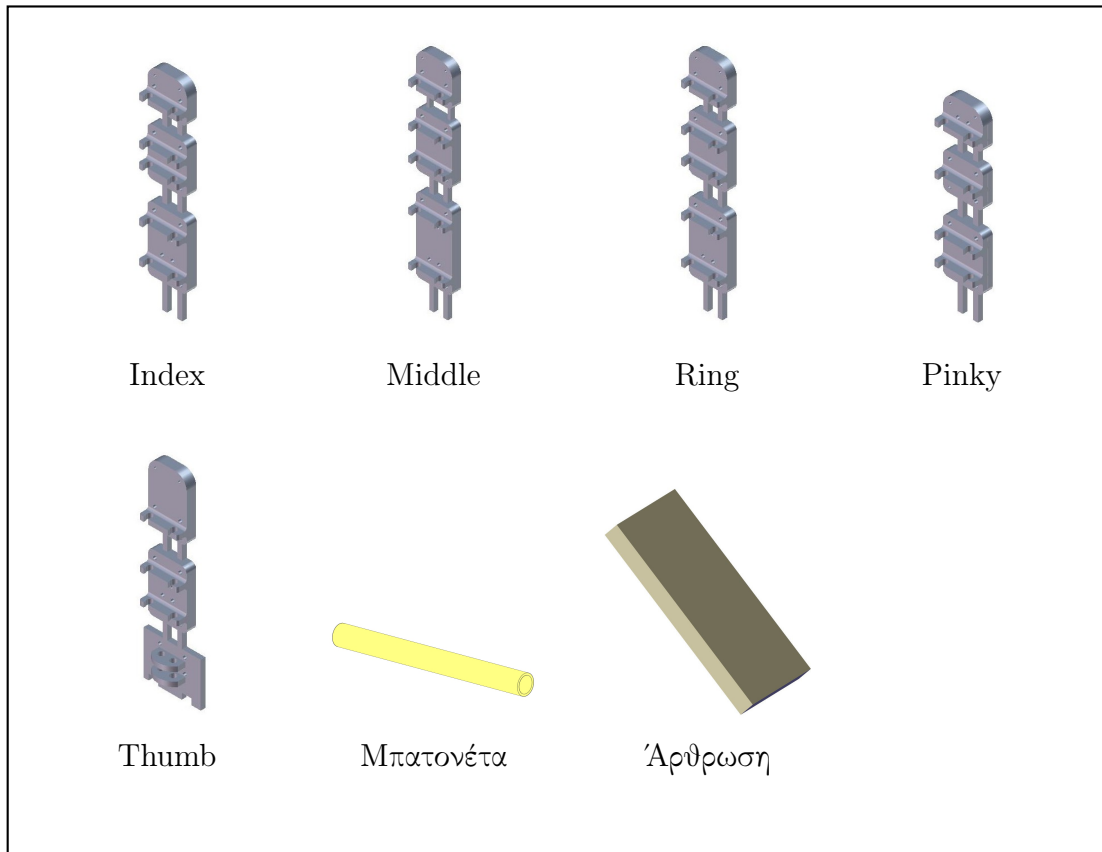
Στις επόμενες ενότητες παρατίθενται πίνακες τεμαχίων για κάθε κατηγορία. Τα ονόματα των τεμαχίων είναι ίδια με αυτά των αρχείων που υπάρχουν στο [55]. Τέλος, για να είναι εύκολος ο προσδιορισμός των τεμαχίων παρατίθενται σχήματα των τριδιάστατων μοντέλων.

### Β'.2.1 Τεμάχια δαχτύλων

Στον πίνακα Β'.1 παρατίθενται τα τεμάχια των δαχτύλων και στο σχήμα Β'.3 παρουσιάζονται οι τριδιάστατες αναπαραστάσεις τους.

Όνομα Τεμαχίου	Ποσ.	Περιγραφή
index	1	Δείκτης [3D printer]
middle	1	Μέσος [3D printer]
ring	1	Παράμεσος [3D printer]
pinky	1	Μικρός [3D printer]
thumb	1	Αντίχειρας [3D printer]
tubePIP	10	Μπατονέτα για την εγγύς φάλαγγα [d:2mm, D:2.5mm, L:εξαρτάται από το δάχτυλο]
tubeMIP	10	Μπατονέτα για την μεσαία φάλαγγα [d:2mm, D:2.5mm, L:εξαρτάται από το δάχτυλο]
tubeDIP	10	Μπατονέτα για την άπω φάλαγγα [d:2mm, D:2.5mm, L:εξαρτάται από το δάχτυλο]
Αρθρώσεις άπω & εγγύς	5	Φύλο σιλικόνης, 60A Durometer [(Διάσταση άρθρωσης×16.2×4)mm]
Μετακαρπιοφ. άρθρωση	5	Φύλο σιλικόνης, 60A Durometer [(Διάσταση άρθρωσης×16.2×5)mm]
Σειρά ψαρέματος Dyneema	1	Περιέλιξη τένοντα [D:0.4mm, Αντοχή:41.5kg]
Παραμορφώσιμη ταινία	1	[Πλάτος:10mm, Πάχος:5mm]
Αντι-ολισθητική ταινία	1	3M Gripping Material [Πλάτος:25mm]
Αυτό-βουλκανιζόμενη ταινία	1	3M Scotch 23 [Πλάτος:20mm]

Πίνακας Β'.1: Κατάλογος τεμαχίων δαχτύλων.



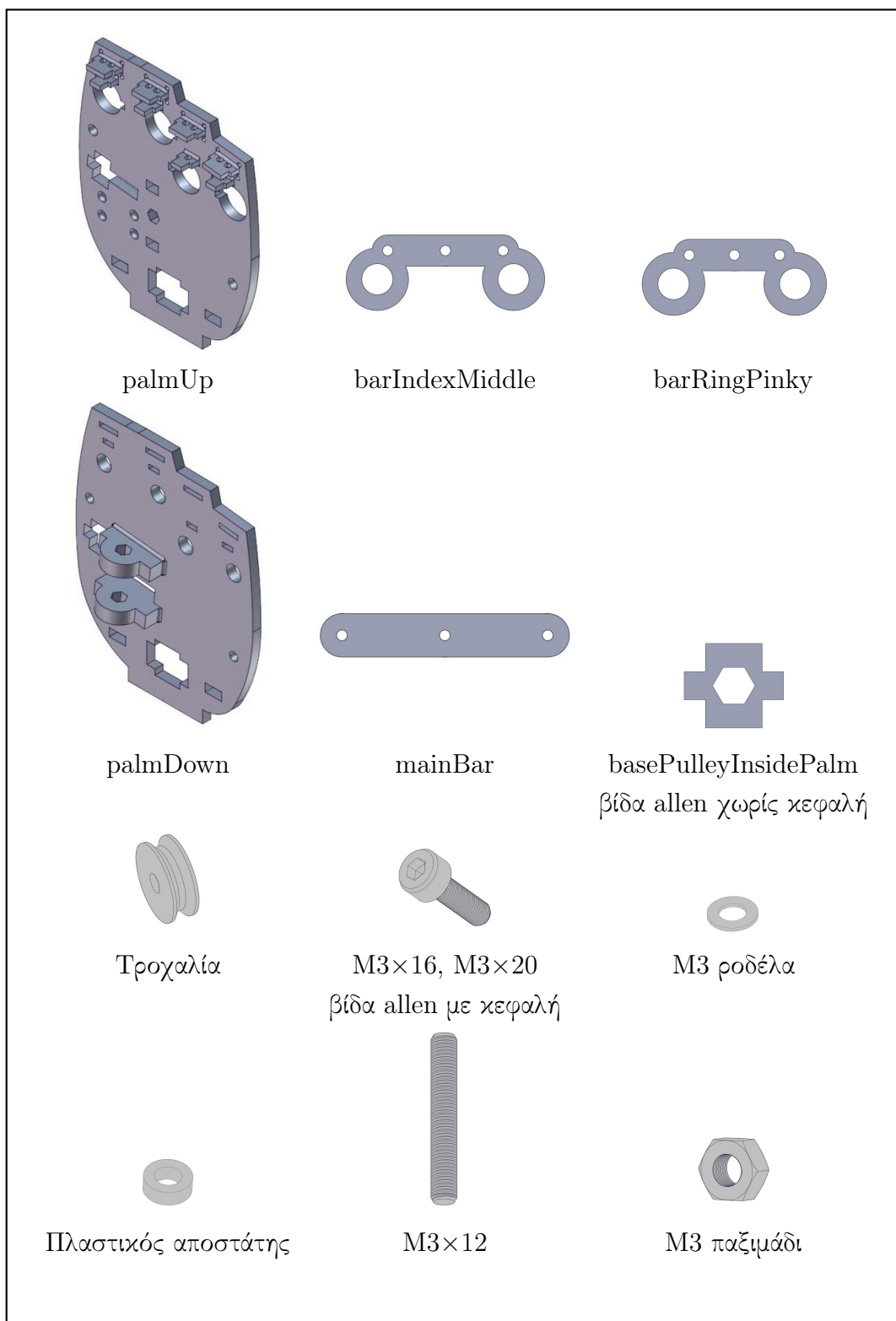
Σχήμα Β'.3: Αναπαραστάσεις τεμαχίων δαχτύλων.

### Β'.2.2 Τεμάχια παλάμης

Στον πίνακα Β'.2 παρατίθενται τα τεμάχια της παλάμης και στο σχήμα Β'.4 παρουσιάζονται οι τριδιάστατες αναπαραστάσεις τους.

Όνομα Τεμαχίου	Ποσ.	Περιγραφή
palmUp	1	Άνω πλευρά παλάμης [3D printer]
palmDown	1	Κάτω πλευρά παλάμης [3D printer]
barIndexMiddle	1	Μπάρα δείκτη και μέσου Whiffletree [3D printer]
barRingPinky	1	Μπάρα παράμεσου και μικρού Whiffletree [3D printer]
mainBar	1	Κύρια μπάρα Whiffletree [3D printer]
basePulleyInsidePalm	4	Σύστημα περιέλιξης αντίχειρα & βάση στερέωσης φλάντζας [3D printer]
Σειρά φαρέματος Dyneema	1	Περιέλιξη τένοντα [D:0.4mm, Αντοχή:41.5kg]
Παραμορφώσιμη ταινία	1	[Πλάτος:10mm, Πάχος:5mm]
Αντι-ολισθητική ταινία	1	3M Gripping Material [Πλάτος:25mm]
Τροχαλία	1	V-Groove Sealed Ball Bearing [d:3mm, D:12mm, B:4mm, Deepness:1.2mm]
Πλαστικός αποστάτης	2	[d:3.1mm, D:6mm, L:4mm]
M3×12 βίδα allen χωρίς κεφαλή	1	Βίδα allen χωρίς κεφαλή μετρικό M3 [L:12mm]
M3×16 βίδα allen με κεφαλή	1	Βίδα allen με κεφαλή μετρικό M3 [L:16mm]
M3×20 βίδα allen με κεφαλή	2	Βίδα allen με κεφαλή μετρικό M3 [L:20mm]
M3 ροδέλα	5	M3 [D:7.5mm, L:0.5mm]
M3 παξιμάδι	5	–

Πίνακας Β'.2: Κατάλογος τεμαχίων παλάμης.



Σχήμα Β'.4: Αναπαραστάσεις τεμαχίων παλάμης.



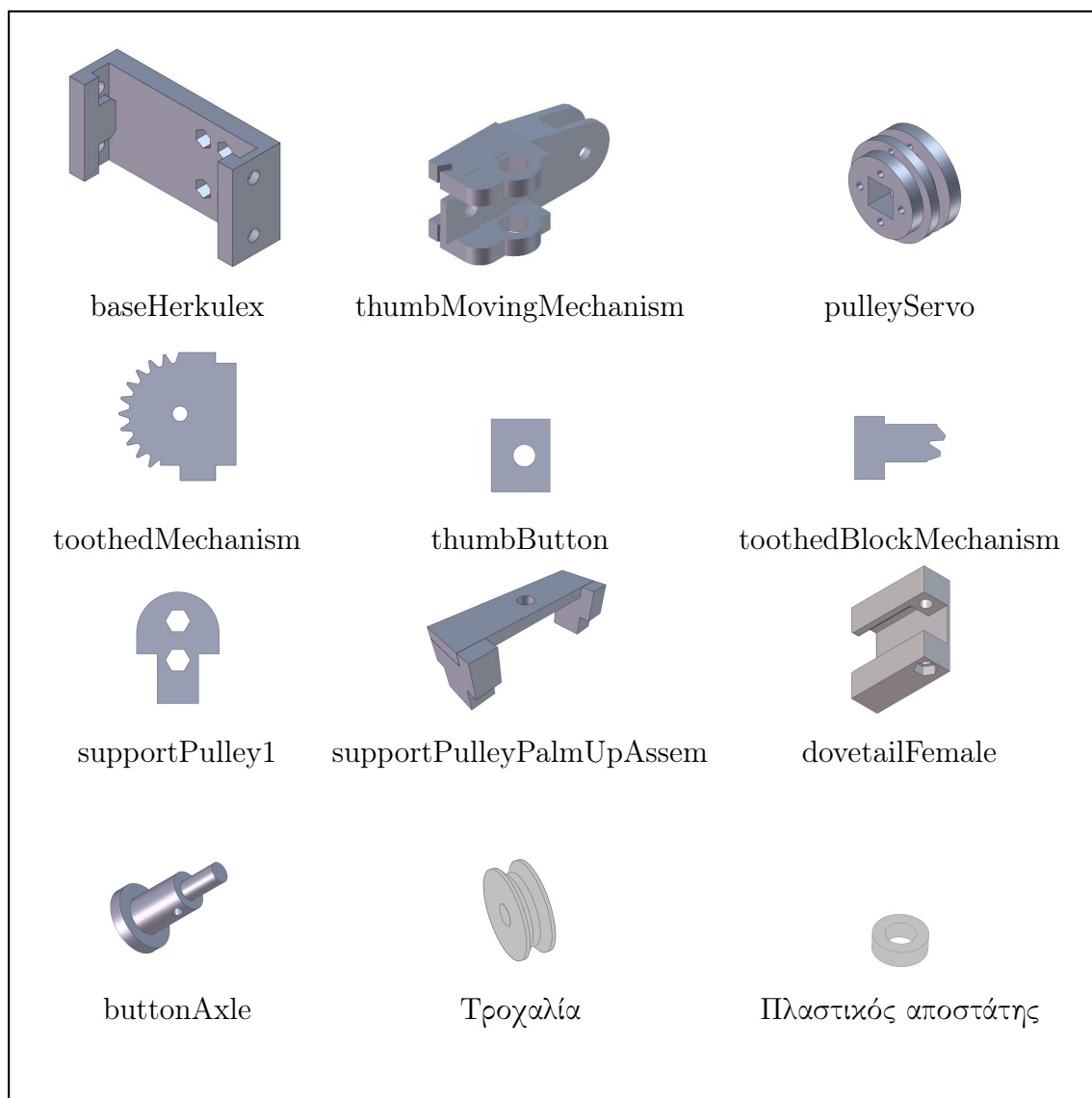
### Β'.2.3 Τεμάχια περιφερειακού εξοπλισμού

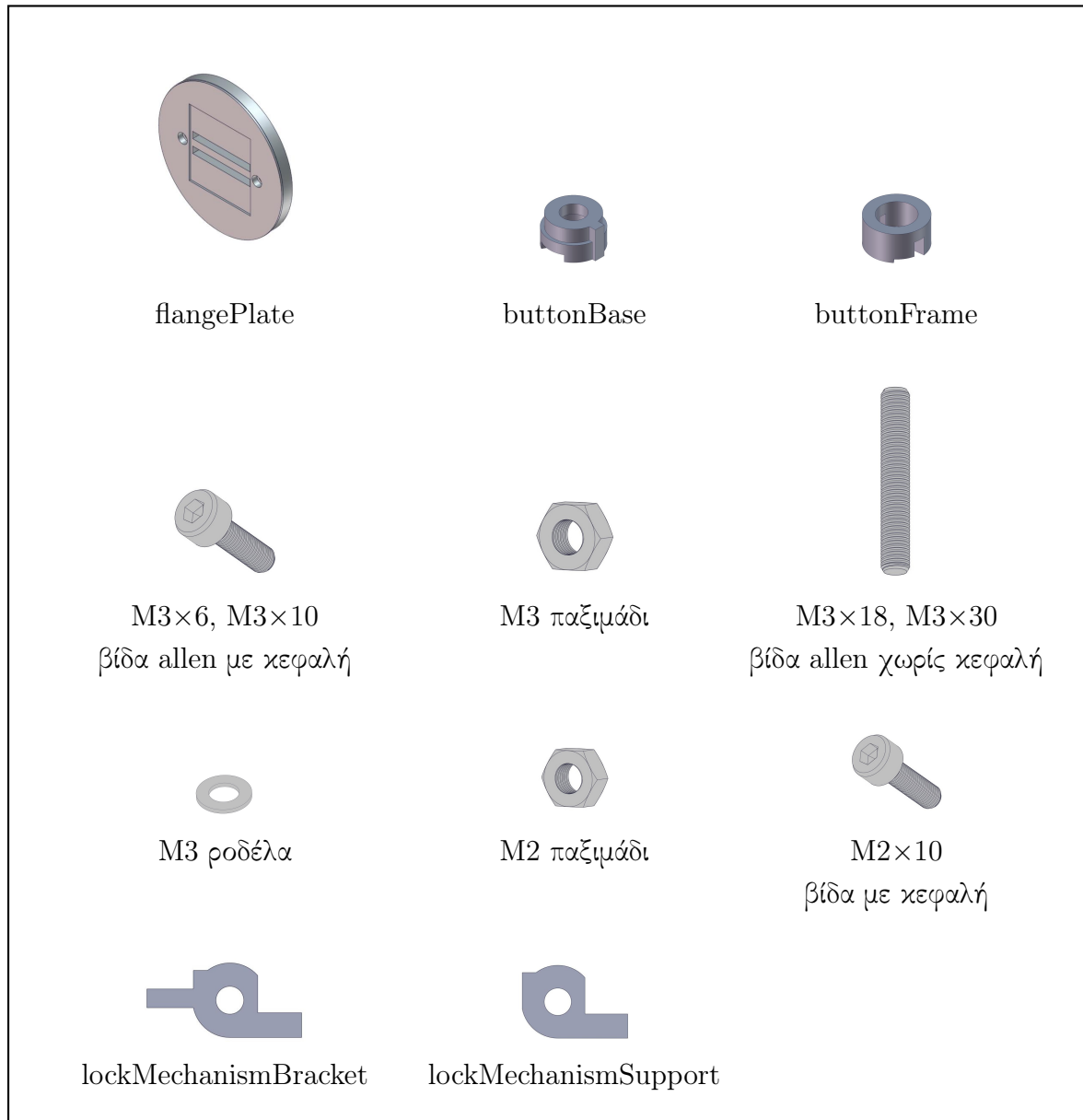
Στον πίνακα Β'.3 παρατίθενται τα τεμάχια του περιφερειακού εξοπλισμού και στο σχήμα Β'.4 παρουσιάζονται οι τριδιάστατες αναπαραστάσεις τους.

Όνομα Τεμαχίου	Ποσ.	Περιγραφή
baseHerkulex	1	Βάση HerkuleX DRS-0201 [3D printer]
toothedMechanism	1	Οδοντωτός μηχανισμός αντίχειρα [3D printer]
toothedBlockMechanism	1	Οδοντωτός μηχανισμός σύμπλεξης βάσης αντίχειρα [3D printer]
thumbMovingMechanism	1	Κινούμενος μηχανισμός αντίχειρα [3D printer]
thumbButton	1	Βάση μηχανικού συζεύκτη [3D printer]
lockMechanismSupport	1	Στήριξη μηχ. σύμπλεξης αντίχειρα [3D printer]
lockMechanismBracket	2	Υποστύλωμα μηχανισμού σύμπλεξης αντίχειρα [3D printer]
pulleyServo	1	Τροχαλία του Herkulex DRS-0201 [3D printer]
supportPulley1	2	Στήριξη τροχαλιών συστήματος περιέλιξης τένοντα [3D printer]
supportPulleyPalmUpAssem	1	Στήριξη τροχαλιών συστήματος περιέλιξης τένοντα [3D printer]
dovetailFemale	1	Θηλυκό κομμάτι φλάντζας [3D printer]
flangePlate	1	Τυποποιημένη φλάντζα [3D printer]
buttonBase	4	Βάση μηχανικού συζεύκτη [3D printer]
buttonFrame	4	Πλαίσιο μηχανικού συζεύκτη [3D printer]
buttonAxle	4	Άξονας μηχανικού συζεύκτη [3D printer]
Σειρά φαρέματος Dyneema	1	Περιέλιξη τένοντα [D:0.4mm, Αντοχή:41.5kg]
HerkuleXDRS-0201	1	Ηλεκτρικός επενεργητής
Τροχαλία	4	V-Groove Sealed Ball Bearing [d:3mm, D:12mm, B:4mm, Deepness:1.2mm]
Πλαστικός αποστάτης	4	[d:3.1mm, D:6mm, L:4mm]
M3×18 βίδα allen χωρ. κεφαλή	3	Βίδα allen με κεφαλή, μετρικό M3 [L:18mm]
M3×30 βίδα allen χωρ. κεφαλή	1	Βίδα allen χωρίς κεφαλή, μετρικό M3 [L:30mm]
M3×6 βίδα allen με κεφαλή	1	Βίδα allen με κεφαλή, μετρικό M3 [L:6mm]
M3×10 βίδα allen με κεφαλή	1	Βίδα allen με κεφαλή, μετρικό M3 [L:10mm]
M3 παξιμάδι	10	–
M3 ροδέλα	4	M3 [D:7.5mm, L:0.5mm]
M2×10 βίδα με κεφαλή	4	Βίδα με κεφαλή μετρικό M2 [L:10mm]

M2 παξιμάδι	4	-
M2×16 πείρος	4	M2 πείρος [L:16mm]
Ελατήριο πίεσεως 6mm L, 9mm OD, 1mm WD	4	9mm Εξωτερική διάμετρος, 1mm Διάμετρος Σύρματος [L:6mm]
Ελατήριο πίεσεως 3mm L, 3.5mm OD, 0.5mm WD	1	3.5mm Εξωτερική διάμετρος, 0.5mm Διάμετρος Σύρματος [L:3mm]

Πίνακας Β'.3: Κατάλογος τεμαχίων περιφερειακού εξοπλισμού.





Σχήμα Β'.5: Αναπαραστάσεις τεμαγίων περιφερειακού εξοπλισμού.

### Β'.2.4 Τεμάχια τριδιάστατου εκτυπωτή

Στον πίνακα Β'.5 περιλαμβάνονται όλα τα τεμάχια που κατασκευάστηκαν από την μηχανή εναπόθεσης τήγματος.

Παράμετρος	Τιμή
Infill, Fill Density	20%
Infill, Fill Pattern	Honeycomb
Seam Position	Random
Brim, Brim Width	2mm

Πίνακας Β'.4: Ρυθμίσεις 3D εκτυπωτή.

Όνομα Τεμαχίου	Ποσ.	Περιγραφή	Προφίλ TAZ ABS
index	1	Δείκτης	Medium, Sup. Off
middle	1	Μέσος	Medium, Sup. Off
ring	1	Παράμεσος	Medium, Sup. Off
pinky	1	Μικρός	Medium, Sup. Off
thumb	1	Αντίχειρας	Medium, Sup. Off
palmUp	1	Άνω πλευρά παλάμης	Medium, Sup. On
palmDown	1	Κάτω πλευρά παλάμης	Medium, Sup. On
barIndexMiddle	1	Μπάρα δείκτη και μέσου	Medium, Sup. Off
barRingPinky	1	Μπάρα παράμεσου και μικρού	Medium, Sup. Off
mainBar	1	4 Κύρια μπάρα Whiffletree	Medium, Sup. Off
basePulleyInsidePalm	4	Σύστημα περιέλιξης	Medium, Sup. Off
baseHerkulex	1	Βάση HerkuleX DRS-0201	Medium, Sup. On
toothedMechanism	1	Οδοντωτός μηχ. αντίχειρα	Medium, Sup. Off
toothedBlockMechanism	1	Οδοντωτός μηχανισμός σύμπλεξης βάσης αντίχειρα	Medium, Sup. Off
thumbMovingMechanism	1	Κινούμενος μηχ. αντίχειρα	Medium, Sup. On
thumbButton	1	Βάση μηχανικού συζεύκτη	Medium, Sup. Off
lockMechanismSupport	1	Στήριξη μηχανισμού σύμπλεξης αντίχειρα	Medium, Sup. Off
lockMechanismBracket	2	Υποστύλωμα μηχανισμού σύμπλεξης αντίχειρα	Medium, Sup. Off

pulleyServo	1	Τροχαλία Herkulex	Medium, Sup. On
supportPulley1	2	Στήριξη τροχαλιών συστ. περιέλιξης τένοντα	Medium, Sup. Off
supportPulleyPalmUpAssem	1	Στήριξη τροχαλιών συστ. περιέλιξης τένοντα	Medium, Sup. On
dovetailFemale	1	Θηλυκό κομμάτι φλάντζας	Medium, Sup. On
flangePlate	1	Τυποποιημένη φλάντζα	Medium, Sup. On
buttonBase	4	Βάση μηχανικού συζεύκτη	Medium, Sup. On
buttonFrame	4	Πλαίσιο μηχαν. συζεύκτη	Medium, Sup. On
buttonAxle	4	Άξονας μηχανικού συζεύκτη	Medium, Sup. On

Πίνακας Β'.5: Τεμάχια μηχανής εναπόθεσης τήγματος.

Για την κατασκευή των ανθρωπομορφικών ρομποτικών χεριών χρησιμοποιήθηκε η μηχανή εναπόθεσης τήγματος Lulzbot TAZ 4 της Aleph Objects [58] με θερμοπλαστικό ABS. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν τα προφίλ των ρυθμίσεων που προτείνει ο κατασκευαστής για το Slic3r [59], που είναι λογισμικό αναπαραγωγής G-code. Η επιλογή των προφίλ για κάθε τεμάχιο φαίνεται στον πίνακα Β'.5. Σε αυτά τα προφίλ πραγματοποιήθηκαν μικρές αλλαγές που παρουσιάζονται στον πίνακα Β'.4.

## Β'.3 Συναρμολόγηση

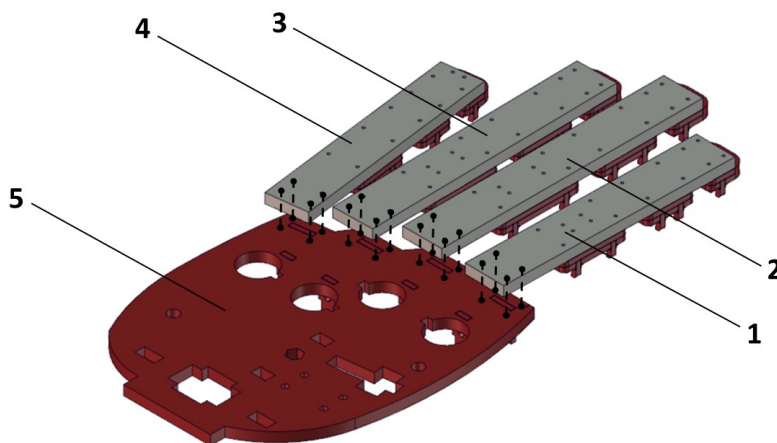
Οι οδηγίες για την κατασκευή των δαχτύλων αναλύεται στο [31]. Μετά την συναρμολόγηση των δαχτύλων ακολουθεί η συναρμολόγηση του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού. Σε κάθε βήμα παρουσιάζεται ένας πίνακας τεμαχίων & υλικών, ένας πίνακας εργαλείων, μια επεξηγηματική εικόνα και αναλυτικές οδηγίες.

### Β'.3.1 Ενσωμάτωση δαχτύλων στην παλάμη

A/A	Όνομα Τεμαχίου	Ποσ.
1	index	1
2	middle	1
3	ring	1
4	pinky	1
5	palmUp	1
<b>Υλικά και εργαλεία</b>		
Μακριές βελόνες		
Πετονιά		
Κοπίδι		
Μυτοσίμπιδο		
Ψαλίδι		

Πίνακας Β'.6: Τεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος Β'.6.

Οδηγίες κατασκευής σχήματος Β'.6.



Σχήμα Β'.6: Ενσωμάτωση δαχτύλων στην παλάμη.

1. Ράψιμο των δαχτύλων στην παλάμη στα που φαίνονται στο σχήμα Β'.6 ακολουθώντας την διαδικασία που περιγράφεται στο [31].

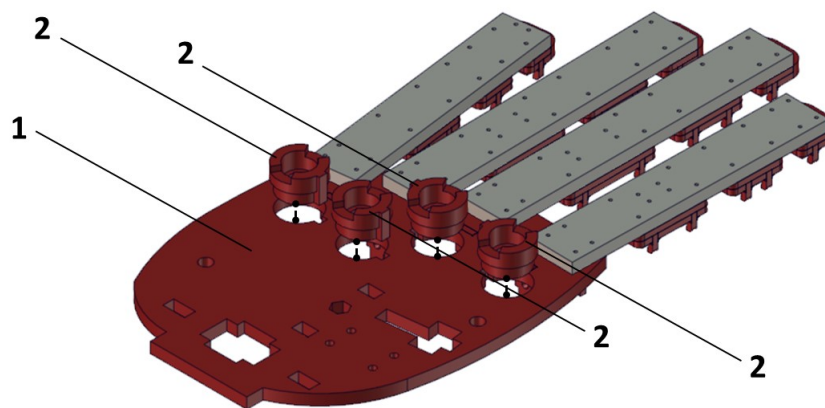
### Β'.3.2 Κατασκευή & ενσωμάτωση μηχανικών συζευκτών

A/A	Όνομα Τεμαχίου	Ποσ.
1	palmUp	1
2	buttonBase	4
<b>Υλικά και εργαλεία</b>		
Κόλλα ABS		

Πίνακας Β'.7: Τεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος Β'.7.

#### Οδηγίες κατασκευής σχήματος Β'.7.

1. Κόλληση των buttonBase των μηχανικών συζευκτών στο άνω μέρος της παλάμης όπως φαίνεται στο σχήμα Β'.7.



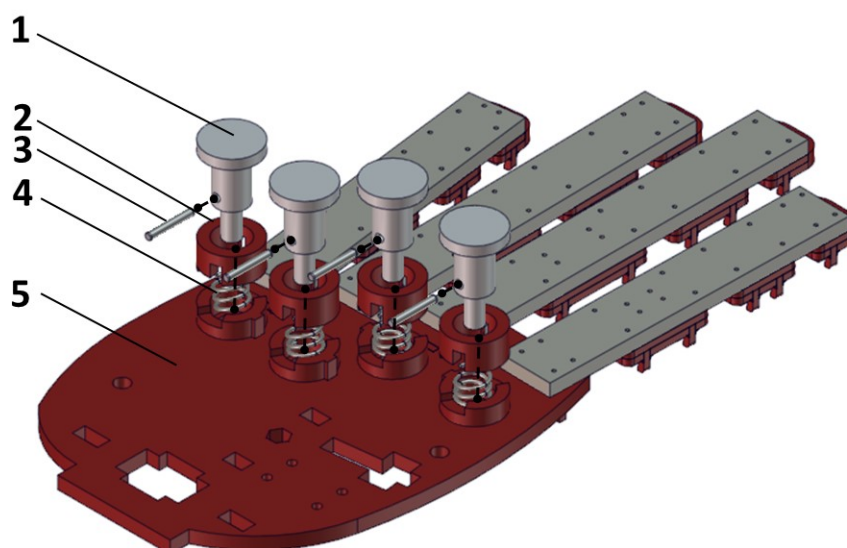
Σχήμα Β'.7: Ενσωμάτωση βάσεων μηχανικών συζευκτών στην παλάμη.

A/A	Όνομα Τεμαχίου	Ποσ.
1	buttonAxle	4
2	buttonFrame	4
3	M2×16 πείρος	4
4	Ελατήριο πίεσεως 6mm L, 9mm OD, 1mm WD	4
5	Κατασκευή σχήματος B'.7	1
<b>Υλικά και εργαλεία</b>		
Κόλλα ABS		
Μυτοσίμπιδο		

Πίνακας Β'.8: Τεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος Β'.8.

### Οδηγίες κατασκευής σχήματος Β'.8.

1. Κόλληση των τεμαχίων buttonFrame στα αντίστοιχα τεμάχια των buttonBase του σχήματος Β'.7.
2. Εισαγωγή των ελατηρίων στις υποδοχές των buttonFrame.
3. Εισαγωγή των τεμαχίων buttonAxle στις υποδοχές των buttonFrame.
4. Εισαγωγή των πείρων M2×16 στις υποδοχές των buttonAxle.



Σχήμα Β'.8: Ενσωμάτωση μηχανικών συζευκτών στις βάσεις τους.



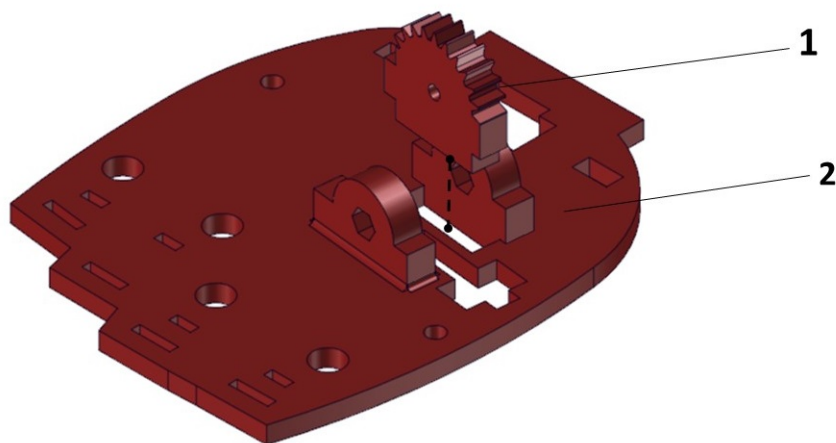
### B'.3.3 Κατασκευή μηχανισμού αντίχειρα

A/A	Όνομα Τεμαχίου	Ποσ.
1	toothedMechanism	1
2	palmDown	1
<b>Υλικά και εργαλεία</b>		
Κόλλα ABS		

Πίνακας B'.9: Τεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος B'.9.

#### Οδηγίες κατασκευής σχήματος B'.9.

1. Κόλληση του toothedMechanism του μηχανισμού του αντίχειρα στο κάτω μέρος της παλάμης όπως φαίνεται στο σχήμα B'.9.



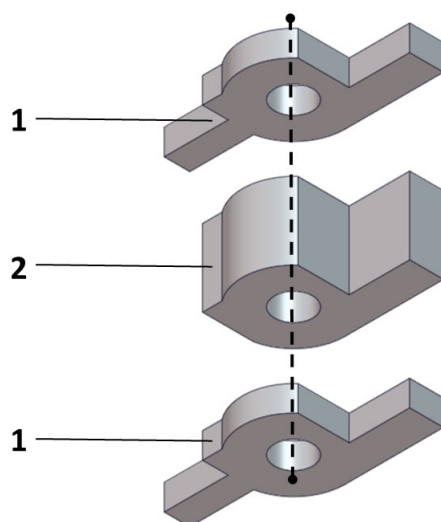
Σχήμα B'.9: Ενσωμάτωση βάσης μηχανισμού αντίχειρα στο κάτω μέρος της παλάμης.

A/A	Όνομα Τεμαχίου	Ποσ.
1	lockMechanismBracket	2
2	lockMechanismSupport	1
<b>Υλικά και εργαλεία</b>		
Κόλλα ABS		

Πίνακας B'.10: Τεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος B'.10.

### Οδηγίες κατασκευής σχήματος B'.10.

1. Ευθυγράμμιση των τεμαχίων lockMechanismBracket με το lockMechanismSupport όπως φαίνεται στο σχήμα B'.10.
2. Κόλληση των τεμαχίων lockMechanismBracket με το lockMechanismSupport.



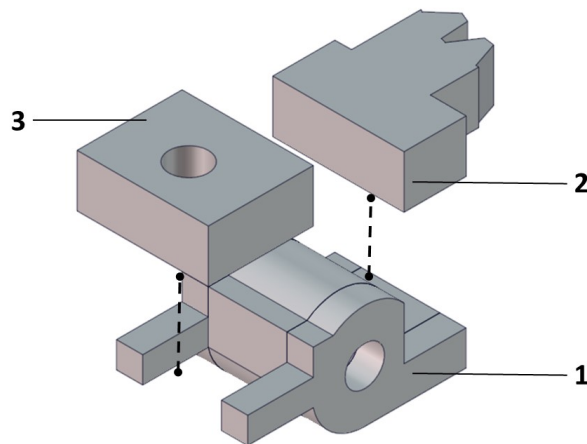
Σχήμα B'.10: 1<sup>ο</sup> βήμα κατασκευής κινούμενου μηχανισμού του αντίχειρα.

A/A	Όνομα Τεμαχίου	Ποσ.
1	Κατασκευή σχήματος B'.10	1
2	toothedBlockMechanism	1
3	thumbButton	1
<b>Υλικά και εργαλεία</b>		
Κόλλα ABS		

Πίνακας B'.11: Τεμάγια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος B'.11.

### Οδηγίες κατασκευής σχήματος B'.11.

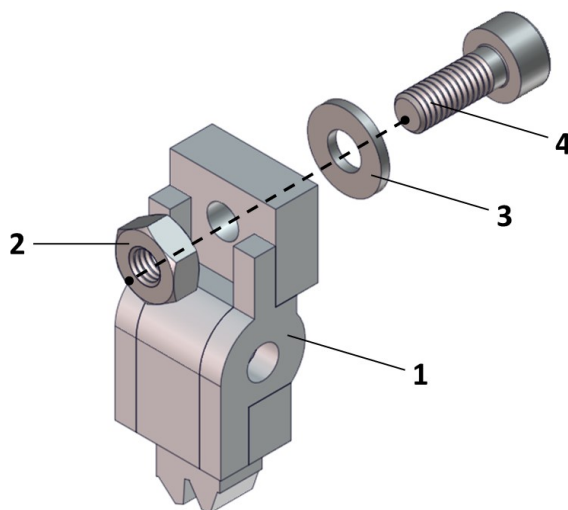
1. Κόλληση των τεμαχίων toothedBlockMechanism και thumbButton με την κατασκευή του σχήματος B'.10.



Σχήμα Β'.11: 2<sup>ο</sup> βήμα κατασκευής κινούμενου μηχανισμού του αντίχειρα.

A/A	Όνομα Τεμαχίου	Ποσ.
1	Κατασκευή σχήματος Β'.11	1
2	M3 Παξιμάδι	1
3	M3 Ροδέλα	1
4	M3×6 Βίδα allen με κεφαλή	1
<b>Υλικά και εργαλεία</b>		
Κλειδί allen		

Πίνακας Β'.12: Τεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος Β'.12.



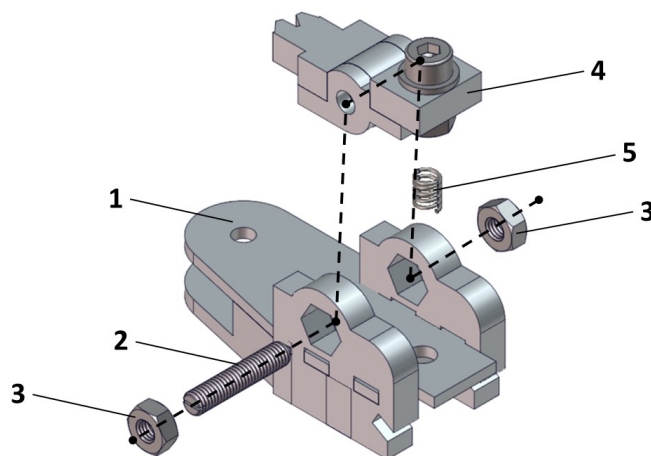
Σχήμα Β'.12: 3<sup>ο</sup> βήμα κατασκευής κινούμενου μηχανισμού του αντίχειρα.

### Οδηγίες κατασκευής σχήματος B'.12.

1. Ευθυγράμμιση των ειδών βιδοποιίας με την κατασκευή του σχήματος B'.11 όπως φαίνεται στο σχήμα B'.12.
2. Σύσφιξη βίδας allen M3×6 όπως φαίνεται στο σχήμα B'.12.

A/A	Όνομα Τεμαχίου	Ποσ.
1	thumbMovingMechanism	1
2	M3×18 βίδα allen χωρ. κεφαλή	1
3	M3 Παξιμάδι	2
4	Κατασκευή σχήματος B'.12	1
5	Ελατήριο πίεσεως 3mm L, 3.5mm OD, 0.5	1
<b>Υλικά και εργαλεία</b>		
Κλειδί allen		

Πίνακας B'.13: Τεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος B'.13.



Σχήμα B'.13: 4<sup>ο</sup> βήμα κατασκευής κινούμενου μηχανισμού του αντίχειρα.

### Οδηγίες κατασκευής σχήματος B'.13.

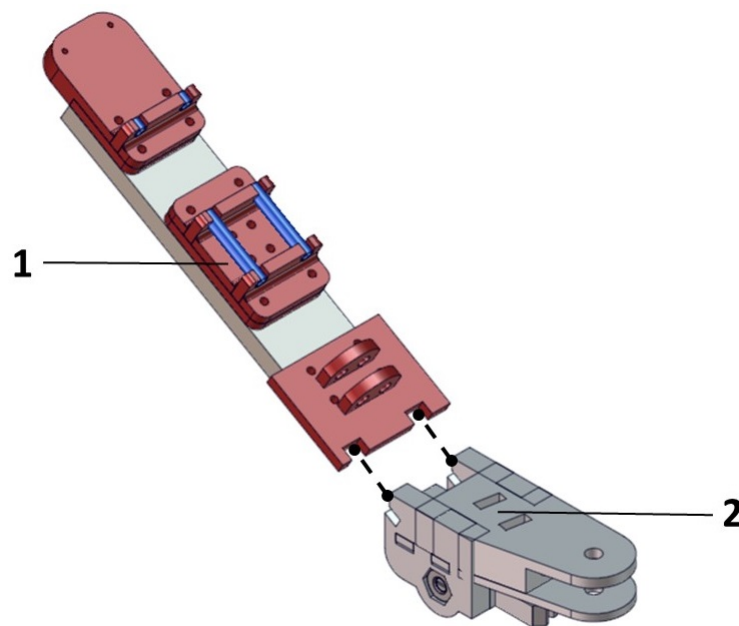
1. Ευθυγράμμιση του ελατηρίου πίεσεως με την κατασκευή του σχήματος B'.12 όπως φαίνεται στο σχήμα B'.13.
2. Ευθυγράμμιση των ειδών βιδοποιίας με την κατασκευή το τεμάχιο thumbMovingMechanism όπως φαίνεται στο σχήμα B'.13
3. Σύσφιξη βίδας allen M3×18 όπως φαίνεται στο σχήμα B'.13.

A/A	Όνομα Τεμαχίου	Ποσ.
1	thumb	1
2	Κατασκευή σχήματος B'.13	1
Υλικά και εργαλεία		
Κόλλα ABS		

Πίνακας B'.14: Τεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος B'.14.

#### Οδηγίες κατασκευής σχήματος B'.14.

1. Ευθυγράμμιση του τεμαχίου thumb με την κατασκευή του σχήματος B'.13 όπως φαίνεται στο σχήμα B'.14.
2. Κόλληση του thumb με την κατασκευή του σχήματος B'.13 όπως φαίνεται στο σχήμα B'.14.



Σχήμα B'.14: 5<sup>ο</sup> βήμα κατασκευής κινούμενου μηχανισμού του αντίχειρα.

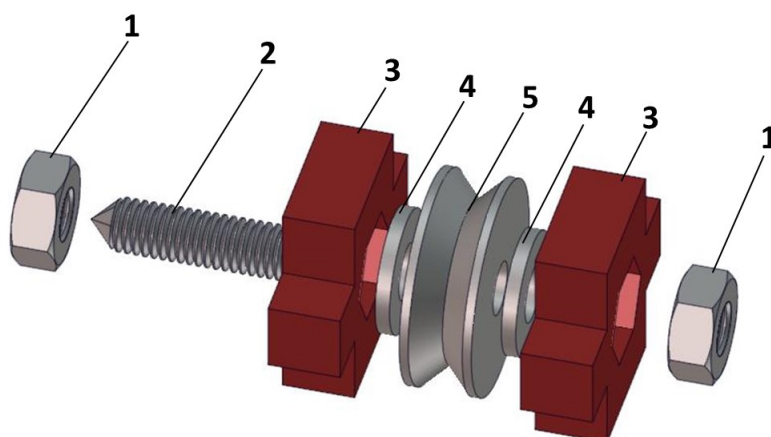
### B'.3.4 Κατασκευή συστήματος περιέλιξης τένοντα & βάσης επενεργητή

A/A	Όνομα Τεμαχίου	Ποσ.
1	M3 Παξιμάδι	2
2	M3×12 βίδα allen χωρίς κεφαλή	1
3	basePulleyInsidePalm	2
4	M3 Ροδέλα	2
5	Τροχαλία V-Grooved Sealed Ball Bearing	1
<b>Υλικά και εργαλεία</b>		
Μυτοσίμπιδο		
Κλειδί allen		

Πίνακας B'.15: Τεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος B'.15.

#### Οδηγίες κατασκευής σχήματος B'.15.

1. Ευθυγράμμιση των M3 παξιμαδιών με τις υποδοχές των τεμαχίων basePulleyInsidePalm όπως φαίνεται στο σχήμα B'.15.
2. Ευθυγράμμιση των υπολοίπων M3 ροδελών και της τροχαλίας όπως φαίνεται στο σχήμα B'.15.
3. Σύσφιξη βίδας allen M3×12 όπως φαίνεται στο σχήμα B'.15.



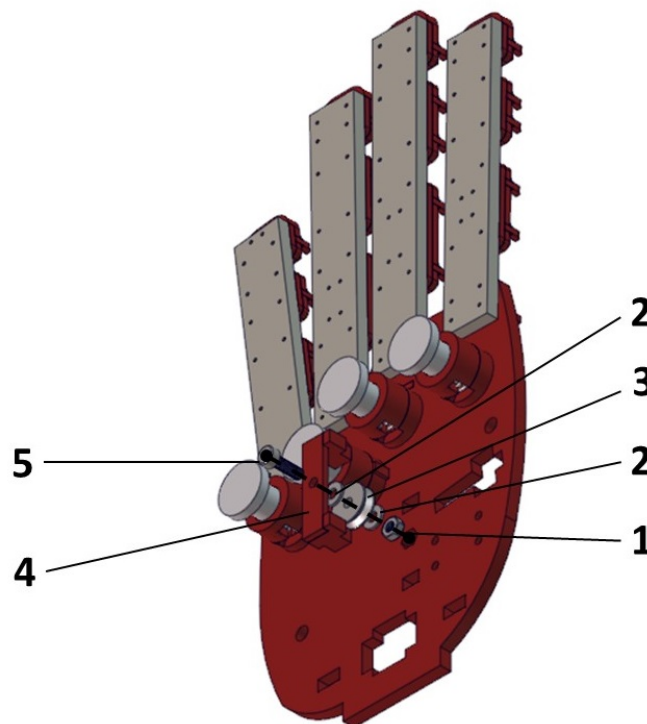
Σχήμα B'.15: 1<sup>ο</sup> βήμα κατασκευής συστήματος περιέλιξης τένοντα.

A/A	Όνομα Τεμαχίου	Ποσ.
1	M3 Παξιμάδι	1
2	M3 Ροδέλα	2
3	Τροχαλία V-Grooved Sealed Ball Bearing	1
4	supportPulleyPalmUpAssem	1
5	M3×10 βίδα allen χωρίς κεφαλή	1
<b>Υλικά και εργαλεία</b>		
Μυτοσίμπιδο		
Κλειδί allen		

Πίνακας Β'.16: Τεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος Β'.16.

### Οδηγίες κατασκευής σχήματος Β'.16.

1. Ευθυγράμμιση του παξιμαδιού M3 με την κατασκευή του σχήματος Β'.8 όπως φαίνεται στο σχήμα Β'.16.
2. Ευθυγράμμιση των υπολοίπων M3 ροδελών, της τροχαλίας και του τεμαχίου supportPulleyPalmUpAssem όπως φαίνεται στο σχήμα Β'.16.
3. Σύσφιξη βίδας allen M3×10 όπως φαίνεται στο σχήμα Β'.16.



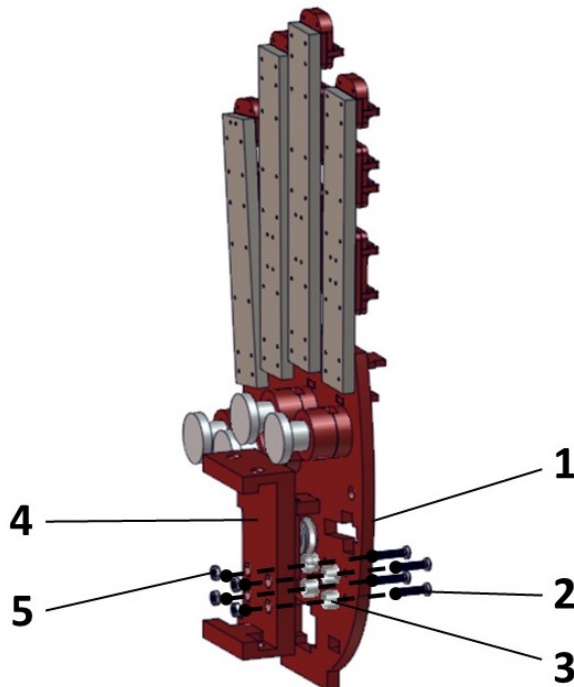
Σχήμα Β'.16: 2° βήμα κατασκευής συστήματος περιέλιξης τένοντα.

A/A	Όνομα Τεμαχίου	Ποσ.
1	Κατασκευή σχήματος B'.16	1
2	M2×10 βίδα με κεφαλή	4
3	Πλαστικός αποστάτης 4mm	4
4	baseHerkulex	1
5	M2 παξιμάδι	4
<b>Υλικά και εργαλεία</b>		
Κατσαβίδι		

Πίνακας B'.17: Τεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος B'.17.

### Οδηγίες κατασκευής σχήματος B'.17.

1. Ευθυγράμμιση των τεσσάρων παξιμαδιών M2 με το τεμάχιο baseHerkulex όπως φαίνεται στο σχήμα B'.17.
2. Ευθυγράμμιση των υπολοίπων M2 βιδών και των πλαστικών αποστατών όπως φαίνεται στο σχήμα B'.17.
3. Σύσφιξη των βιδών M2×10 όπως φαίνεται στο σχήμα B'.17.



Σχήμα B'.17: Κατασκευή βάσης ηλεκτρικού επενεργητή.

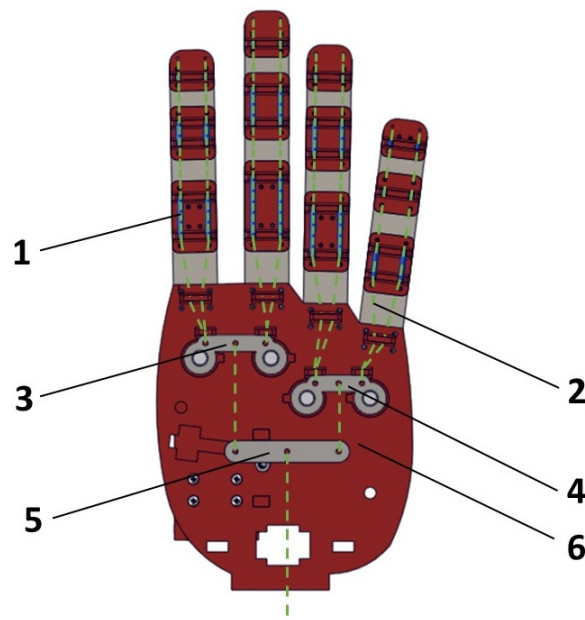


A/A	Όνομα Τεμαχίου	Ποσ.
1	Μπατονέτες	–
2	Dyneema	–
3	barIndexMiddle	1
4	barRingPinky	1
5	mainBar	1
6	Κατασκευή σχήματος Β'.17	1
<b>Υλικά και εργαλεία</b>		
Μακριές βελόνες		
Ψαλίδι		

Πίνακας Β'.18: Τεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος Β'.18.

### Οδηγίες κατασκευής σχήματος Β'.18.

1. Πρόσδεση των δαχτύλων δείκτης και μέσος με το τεμάχιο barIndexMiddle όπως φαίνεται στο σχήμα Β'.18.
2. Πρόσδεση των δαχτύλων παράμεσος και μικρός με το τεμάχιο barRingPinky όπως φαίνεται στο σχήμα Β'.18.
3. Σύνδεση των τεμαχίων barIndexMiddle και barRingPinky με το τεμάχιο main-Bar όπως φαίνεται στο σχήμα Β'.18.



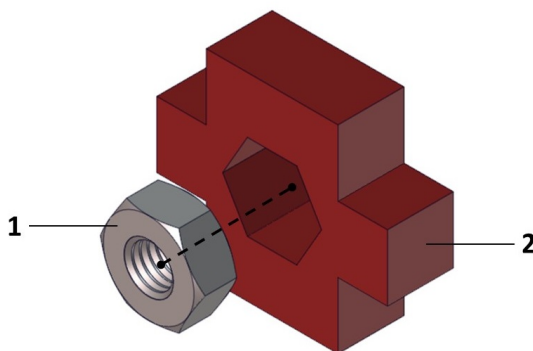
Σχήμα Β'.18: 3<sup>ο</sup> βήμα κατασκευής συστήματος περιέλιξης τένοντα.

A/A	Όνομα Τεμαχίου	Ποσ.
1	M3 παξιμάδι	2
2	basePulleyInsidePalm	2

Πίνακας Β'.19: Τεμάχια για την κατασκευή του σχήματος Β'.19.

#### Οδηγίες κατασκευής σχήματος Β'.19.

1. Τοποθέτηση του παξιμαδιού M3 στο τεμάχιο basePulleyInsidePalm όπως φαίνεται στο σχήμα Β'.19.
2. Επανάληψη βήματος 1.



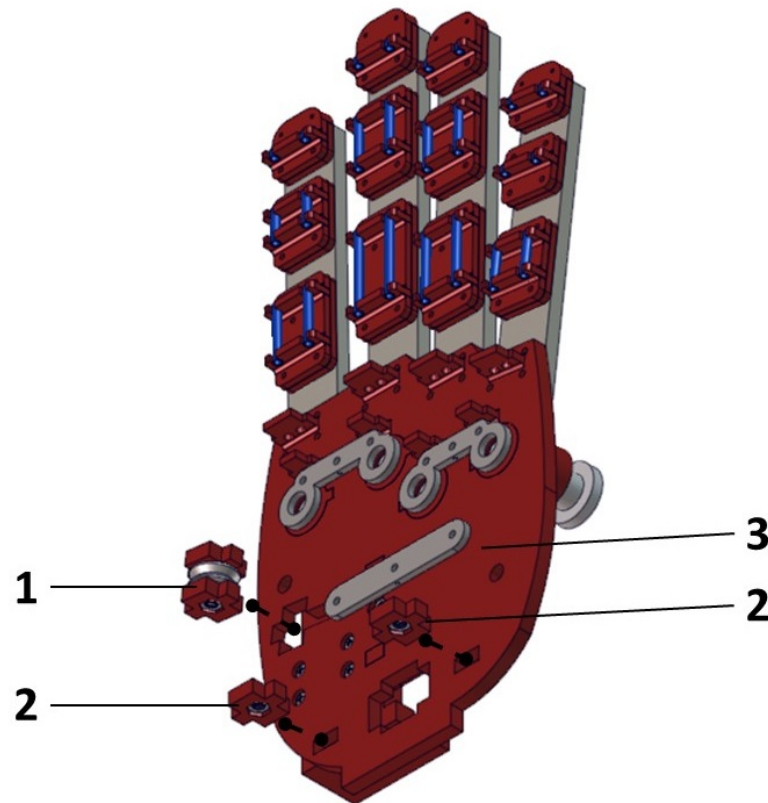
Σχήμα Β'.19: 4<sup>ο</sup> βήμα κατασκευής συστήματος περιέλιξης τένοντα.

A/A	Όνομα Τεμαχίου	Ποσ.
1	Κατασκευή σχήματος Β'.15	1
2	Κατασκευή σχήματος Β'.18	1
3	Κατασκευή σχήματος Β'.19	2

Πίνακας Β'.20: Τεμάχια για την κατασκευή του σχήματος Β'.20.

#### Οδηγίες κατασκευής σχήματος Β'.20.

1. Τοποθέτηση κατασκευής σχήματος Β'.15 στην κατασκευή του σχήματος Β'.18 όπως φαίνεται στο σχήμα Β'.20.
2. Τοποθέτηση κατασκευών σχήματος Β'.19 στην κατασκευή του σχήματος Β'.18 όπως φαίνεται στο σχήμα Β'.20.



Σχήμα Β'.20: 5<sup>ο</sup> βήμα κατασκευής συστήματος περιέλιξης τένοντα.

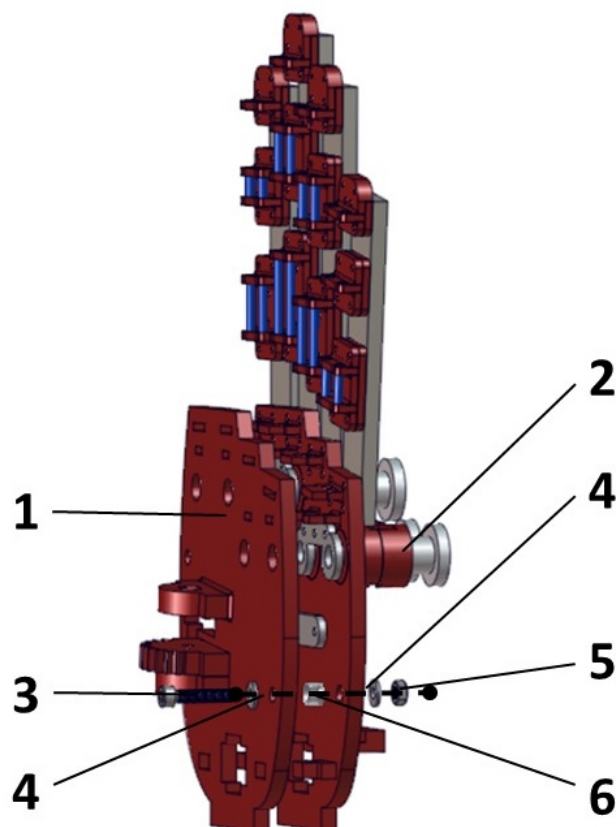
A/A	Όνομα Τεμαχίου	Ποσ.
1	Κατασκευή σχήματος Β'.10	1
2	Κατασκευή σχήματος Β'.20	1
3	M3×16 βίδα allen με κεφαλή	1
4	M3 ροδέλα	2
5	M3 παξιμάδι	1
6	Πλαστικός αποστάτης 4mm	1
<b>Υλικά και εργαλεία</b>		
Κλειδί allen		

Πίνακας Β'.21: Τεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος Β'.21.

### Οδηγίες κατασκευής σχήματος Β'.21.

1. Ευθυγράμμιση κατασκευής σχήματος Β'.10 με κατασκευή σχήματος Β'.20 όπως φαίνεται στο σχήμα Β'.21.
2. Σύσφιξη βίδας allen M3×16 όπως φαίνεται στο σχήμα Β'.21.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Το κενό μεταξύ των κατασκευών των σχημάτων Β'.10 και Β'.20 πρέπει να είναι 4mm.



Σχήμα Β'.21: 6<sup>ο</sup> βήμα κατασκευής συστήματος περιέλιξης τένοντα.

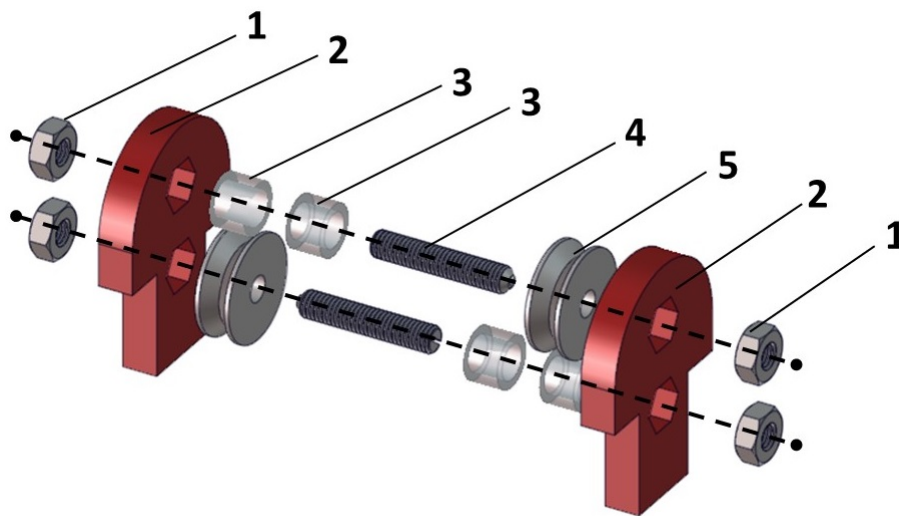
A/A	Όνομα Τεμαχίου	Ποσ.
1	M3 παξιμάδι	4
2	supportPulley1	2
3	Πλαστικός αποστάτης 4mm	4
4	M3×18 βίδα allen χωρίς κεφαλή	2
5	Τροχαλία V-Grooved Sealed Ball Bearing	2
<b>Υλικά και εργαλεία</b>		
Κλειδί allen		

Πίνακας Β'.22: Τεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος Β'.22.

### Οδηγίες κατασκευής σχήματος Β'.22.

1. Τοποθέτηση των παξιμαδιών M3 στις υποδοχές των τεμαχίων supportPulley1 όπως φαίνεται στο σχήμα Β'.22.
2. Ευθυγράμμιση των πλαστικών αποστατών και των τροχαλιών όπως φαίνεται στο σχήμα Β'.22.

3. Σύσφιξη βίδας allen M3×18 όπως φαίνεται στο σχήμα Β'.22.



Σχήμα Β'.22: 7<sup>ο</sup> βήμα κατασκευής συστήματος περιέλιξης τένοντα.

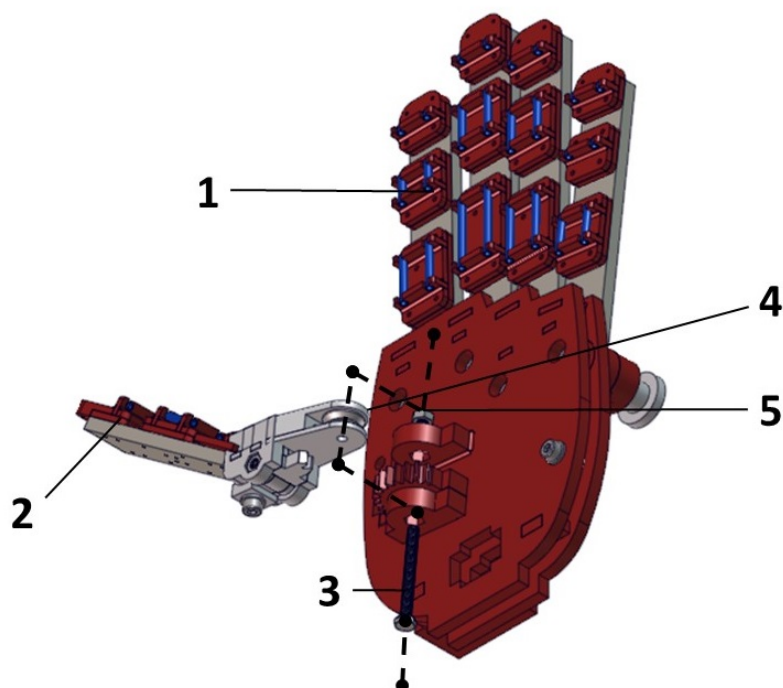
### Β'.3.5 Ενσωμάτωση αντίχειρα & συστήματος περιέλιξης τένοντα

Οδηγίες κατασκευής σχήματος Β'.23.

1. Ευθυγράμμιση τροχαλίας με την κατασκευή των σχημάτων Β'.21 και Β'.14 όπως φαίνεται στο σχήμα Β'.23.
2. Τοποθέτηση παξιμαδιών στις οπές της κατασκευής Β'.21 όπως φαίνεται στο σχήμα Β'.23.
3. Σύσφιξη βίδας allen M3×30 όπως φαίνεται στο σχήμα Β'.23.

A/A	Όνομα Τεμαχίου	Ποσ.
1	Κατασκευή σχήματος B'.21	1
2	Κατασκευή σχήματος B'.14	1
3	M3×30 βίδα allen χωρίς κεφαλή	1
4	Τροχαλία V-Grooved Sealed Ball Bearing	1
5	M3 παξιμάδι	1
<b>Υλικά και εργαλεία</b>		
Κλειδί allen		

Πίνακας B'.23: Τεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος B'.23.



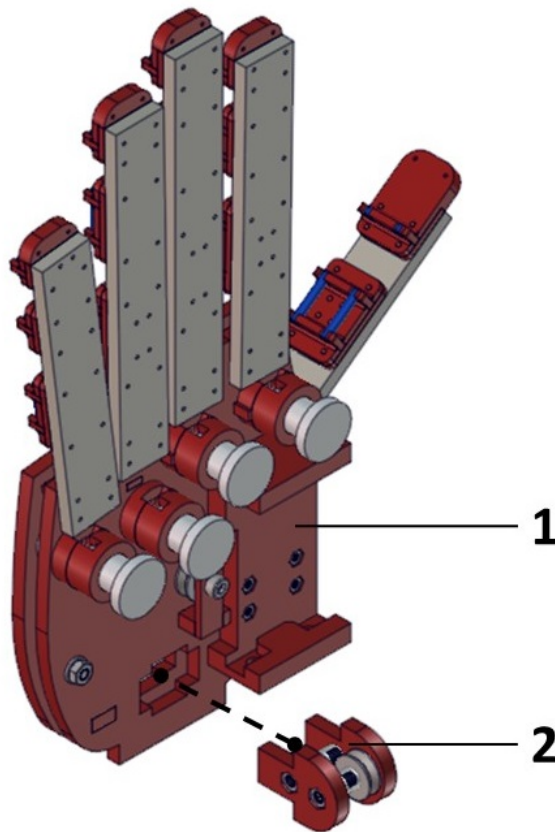
Σχήμα B'.23: Ενσωμάτωση αντίχειρα στην παλάμη.

A/A	Όνομα Τεμαχίου	Ποσ.
1	Κατασκευή σχήματος B'.23	1
2	Κατασκευή σχήματος B'.22	1
<b>Υλικά και εργαλεία</b>		
Κόλλα ABS		

Πίνακας B'.24: Τεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος B'.24.

### Οδηγίες κατασκευής σχήματος B'.24.

1. Τοποθέτηση κατασκευής του σχήματος B'.22 στην υποδοχή της κατασκευής του σχήματος B'.23 όπως φαίνεται στο σχήμα B'.24.
2. Κόλληση κατασκευών σχημάτων B'.22 και B'.23 όπως φαίνεται στο σχήμα B'.24.



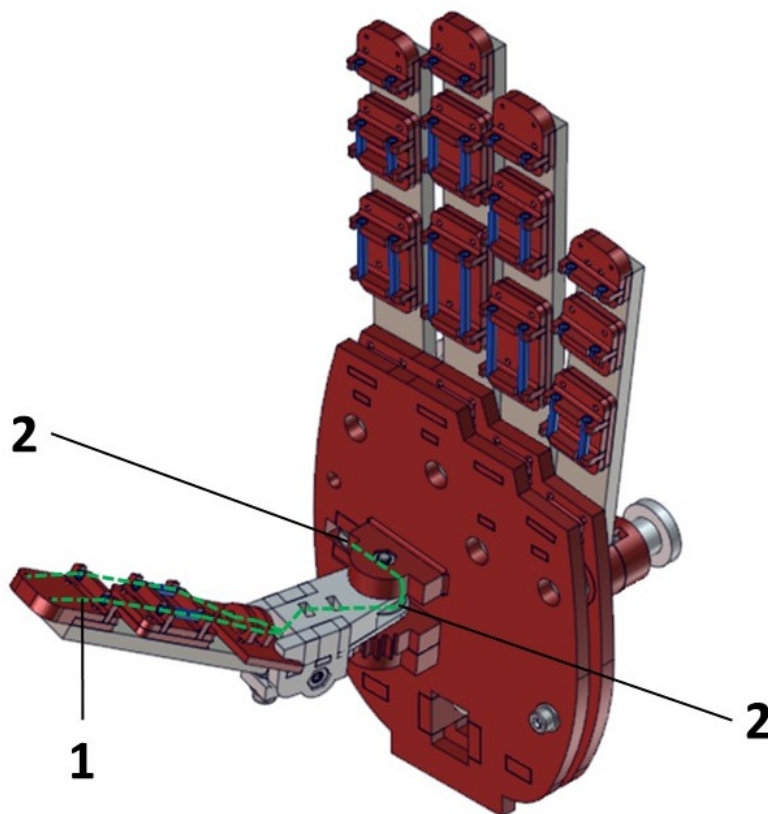
Σχήμα B'.24: 1<sup>ο</sup> βήμα ενσωμάτωσης συστήματος περιέλιξης τένοντα στην παλάμη.

A/A	Όνομα Τεμαχίου	Ποσ.
1	Dyneema	–
2	Τροχαλία V-Grooved Sealed Ball Bearing	2
<b>Υλικά και εργαλεία</b>		
Μακριές βελόνες		

Πίνακας B'.25: Τεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος B'.25.

### Οδηγίες κατασκευής σχήματος B'.25.

1. Οδήγηση τένοντα περιέλιξης αντίχειρα<sup>2</sup> όπως φαίνεται στο σχήμα Β'.25.



Σχήμα Β'.25: 2<sup>ο</sup> βήμα ενσωμάτωσης συστήματος περιέλιξης τένοντα στην παλάμη.

A/A	Όνομα Τεμαχίου	Ποσ.
1	Dyneema	–
2	Τροχαλία V-Grooved Sealed Ball Bearing	2
<b>Υλικά και εργαλεία</b>		
Μακριές βελόνες		

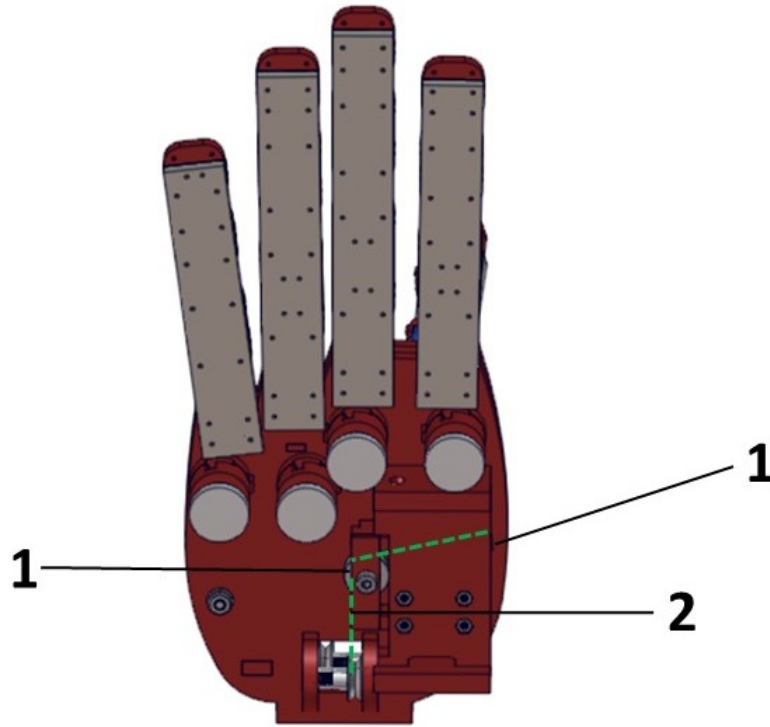
Πίνακας Β'.26: Τεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος Β'.26.

### Οδηγίες κατασκευής σχήματος Β'.25.

<sup>2</sup>Οι μακριές βελόνες θα διευκολύνουν την διαδικασία.



1. Οδήγηση τένοντα περιέλιξης αντίχειρα όπως φαίνεται στο σχήμα Β'.26.



Σχήμα Β'.26: 3<sup>ο</sup> βήμα ενσωμάτωσης συστήματος περιέλιξης τένοντα στην παλάμη.

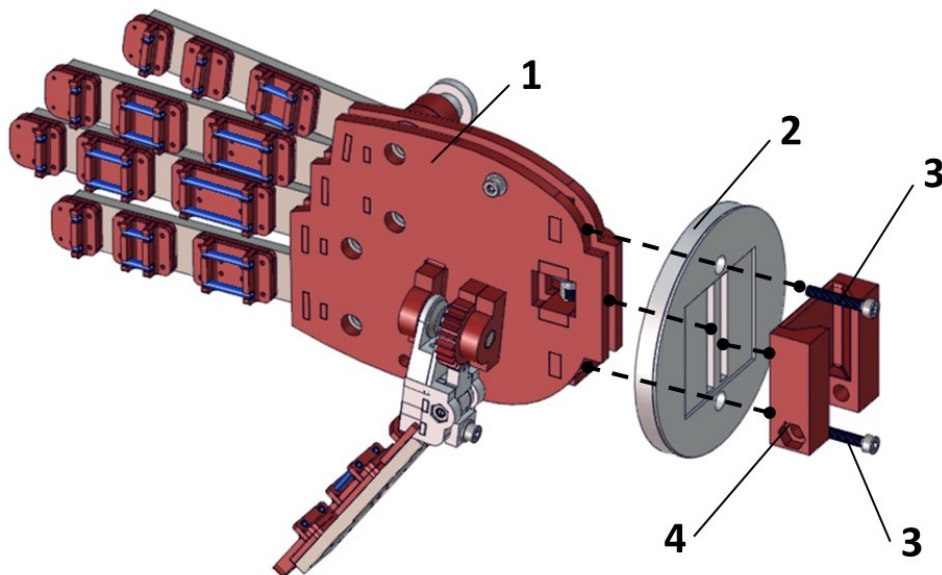
### B'.3.6 Ενσωμάτωση φλάντζας

A/A	Όνομα Τεμαχίου	Ποσ.
1	Κατασκευή σχήματος B'.26	1
2	flangePlate	1
3	M3×20 βίδα allen με κεφαλή	2
4	dovetailFemale	1
<b>Υλικά και εργαλεία</b>		
Κλειδί allen		
Κόλλα ABS		

Πίνακας B'.27: Τεμάχια και υλικά για την κατασκευή του σχήματος B'.27.

#### Οδηγίες κατασκευής σχήματος B'.27

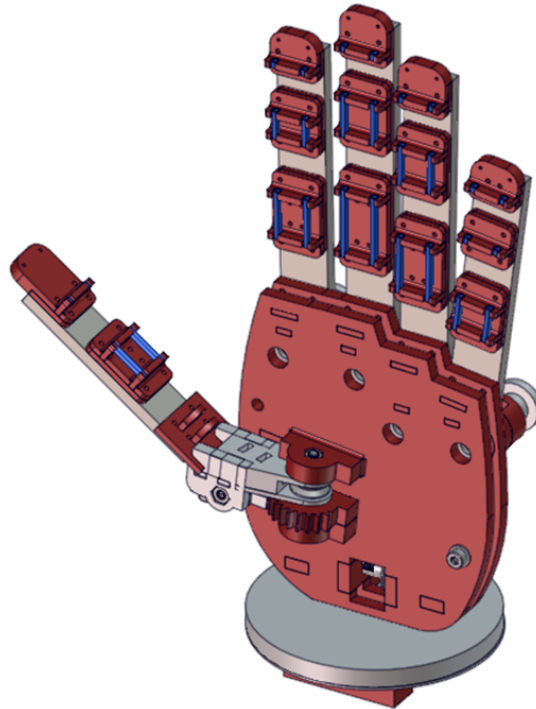
1. Κόλληση των τεμαχίων flangePlate και dovetailFemale όπως φαίνεται στο σχήμα B'.27.
2. Ενσωμάτωση του τεμαχίου flangePlate στην κατασκευή του σχήματος B'.26 όπως φαίνεται στο σχήμα B'.27.
3. Σύσφιξη βιδών allen M3×20 όπως φαίνεται στο σχήμα B'.27.



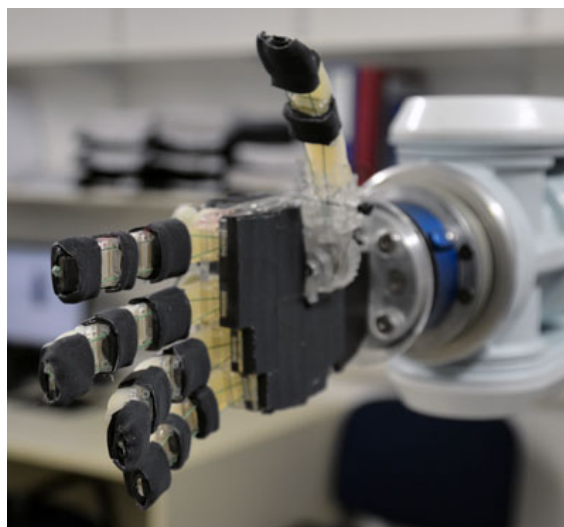
Σχήμα B'.27: Ενσωμάτωση φλάντζας στην κατασκευή.

## Β'.4 Συναρμολογημένη κατασκευή

Το τριδιάστατο μοντέλο του συναρμολογημένου ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού φαίνεται στο σχήμα Β'.28 και η τελική κατασκευή στο σχήμα Β'.29.



Σχήμα Β'.28: Ανθρωπομορφικό ρομποτικό χέρι, συναρμολογημένη κατασκευή.



Σχήμα Β'.29: Ανθρωπομορφικό ρομποτικό χέρι πακτωμένο στον βραχίονα Mitsubishi PA-10.



# Γλωσσάριο

## Ελληνικός όρος

τελικό άκρο  
υποεπενεργούμενα  
αντίθεση  
κάμψη-επέκταση  
ωλένη  
φυσική θέση  
άπω μεσοφαλαγγική  
εγγύς μεσοφαλαγγική  
μετακαρπιοφαλαγγική  
απαγωγή-προσαγωγή  
υποχωρητικότητα  
σύστημα περιέλιξης τένοντα  
άρθρωση σταθερού άξονα περιστροφής  
ελαστική άρθρωση  
επικάλυψη  
ιδιο-προσαρμοστικά  
συγκεκριμένη κίνηση σύζευξης  
μηχανικός συζεύκτης  
μηχανή εναπόθεσης τήγματος  
πλευρική αρπάγη  
 τρίποδη αρπάγη  
 τρίποδη αρπάγη γραφής  
 ακριβής σφαιροειδή αρπάγη  
 αρπάγη δύναμης δίσκου  
 αρπάγη μεγάλης διαμέτρου  
 αρπάγη μεσαίας διαμέτρου  
 πλευρική τρίποδη αρπάγη

## Αγγλικός όρος

end effector  
underactuated  
opposition  
flexion-extension  
ulnar  
neutral position  
distal  
proximal  
metacarpophalangeal  
adduction-abduction  
compliance  
tendon routing system  
pin joint  
flexure joint  
overlap  
self-adaptable  
fixed-motion coupling  
button  
3D Printer  
lateral grasp  
tripod grasp  
writing tripod grasp  
precision sphere grasp  
power disk grasp  
large diameter grasp  
medium diameter grasp  
lateral tripod grasp



# Bibliography

- [1] M. V. Liarokapis, P. K. Artemiadis, and K. J. Kyriakopoulos, “Quantifying anthropomorphism of robot hands,” in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2013, pp. 2041–2046.
- [2] C. I. Mavrogiannis, M. V. Liarokapis, and K. J. Kyriakopoulos, “Quantifying anthropomorphism of robot arms,” in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2015, pp. 4084–4089.
- [3] B. Buchholz, T. J. Armstrong, and S. A. Goldstein, “Anthropometric data for describing the kinematics of the human hand,” *Ergonomics*, vol. 35, no. 3, pp. 261–273, 1992.
- [4] J. R. Napier, “The prehensile movements of the human hand,” *Bone & Joint Journal*, vol. 38, no. 4, pp. 902–913, 1956.
- [5] M. R. Cutkosky, “On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 5, no. 3, pp. 269–279, 1989.
- [6] T. Feix, J. Romero, H.-B. Schmiebmayer, A. M. Dollar, and D. Kragic, “The grasp taxonomy of human grasp types,” *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, vol. 46, no. 1, pp. 66–77, 2016.
- [7] S. C. Jacobsen, E. K. Iversen, D. F. Knutti, R. T. Johnson, and K. B. Biggers, “Design of the utah/mit dextrous hand,” in *IEEE International Conference on Robotics and Automation. Proceedings*, vol. 3, 1986, pp. 1520–1532.
- [8] G. Hirzinger, K. Landzettel, B. Brunner, I. Schaefer, M. Fischer, M. Grebenstein, N. Sporer, J. Schott, M. Schedl, and C. Deutrich, “Dlr’s robotics lab-recent developments in space robotics,” in *International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS)*, vol. 440, 1999, p. 25.

- [9] H. Kawasaki, H. Shimomura, and Y. Shimizu, “Educational–industrial complex development of an anthropomorphic robot hand ‘gifu hand’,” *Advanced Robotics*, vol. 15, no. 3, pp. 357–363, 2001.
- [10] S. A. Dalley, T. E. Wiste, T. J. Withrow, and M. Goldfarb, “Design of a multifunctional anthropomorphic prosthetic hand with extrinsic actuation,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 14, no. 6, pp. 699–706, 2009.
- [11] H. Liu, K. Wu, P. Meusel, N. Seitz, G. Hirzinger, M. Jin, Y. Liu, S. Fan, T. Lan, and Z. Chen, “Multisensory five-finger dexterous hand: The dlr/hit hand ii,” in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2008, pp. 3692–3697.
- [12] C. Cipriani, M. Controzzi, and M. C. Carrozza, “Objectives, criteria and methods for the design of the smarthand transradial prosthesis,” *Robotica*, vol. 28, no. 06, pp. 919–927, 2010.
- [13] J. T. Belter and A. M. Dollar, “Novel differential mechanism enabling two dof from a single actuator: Application to a prosthetic hand,” in *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, 2013, pp. 1–6.
- [14] M. Baril, T. Laliberté, C. Gosselin, and F. Routhier, “On the design of a mechanically programmable underactuated anthropomorphic prosthetic gripper,” *Journal of Mechanical Design*, vol. 135, no. 12, p. 121008, 2013.
- [15] M. Tavakoli and A. T. de Almeida, “Adaptive under-actuated anthropomorphic hand: Isr-softhand,” in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2014, pp. 1629–1634.
- [16] M. G. Catalano, G. Grioli, E. Farnioli, A. Serio, C. Piazza, and A. Bicchi, “Adaptive synergies for the design and control of the pisa/iit softhand,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 33, no. 5, pp. 768–782, 2014.
- [17] Yale University, Grab Laboratory, “Yale openhand project,” [Online]. Available: <http://www.eng.yale.edu/grablab/openhand/>, March 2016.
- [18] Natural Machine Motion Initiative, “Community tool built, used, and maintained by researchers, industrial partners and enthusiasts to support the philosophy of a joint and open development of natural motion,” [Online]. Available: <http://www.naturalmachinemotioninitiative.com/>, March 2016.
- [19] M. V. Liarokapis, A. G. Zisimatos, C. I. Mavrogiannis, and K. J. Kyriakopoulos, “Openbionics: An open-source initiative for the creation of affordable, modular,



- light-weight, underactuated robot hands and prosthetic devices,” in *2nd ASU Rehabilitation Robotics Workshop*, 2014.
- [20] BeBionic, Steeper, [Online]. Available: <http://bebionic.com/>, March 2016.
- [21] iLimb, TouchBionics, [Online]. Available: <http://www.touchbionics.com/>, March 2016.
- [22] Vincent Hand, Vincent Systems, [Online]. Available: <http://vincentsystems.de/en/>, March 2016.
- [23] Michelangelo Hand, Ottobock, [Online]. Available: <http://www.ottobock.com/en/>, March 2016.
- [24] L. Birglen, T. Laliberté, and C. M. Gosselin, *Underactuated robotic hands*. Springer, 2007, vol. 40.
- [25] I. Kapandji, *Physiology of the Joints: Upper Limb: Volume 1*. Churchill Livingstone Edinburgh, 1974.
- [26] E. P. Pitarch, “Virtual human hand: Grasping strategy and simulation,” Ph.D. dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya, 2010.
- [27] R. Chandler, C. E. Clauser, J. T. McConville, H. Reynolds, and J. W. Young, “Investigation of inertial properties of the human body,” Defense Technical Information Center, Tech. Rep., 1975.
- [28] N. M. Bajaj, A. J. Spiers, and A. M. Dollar, “State of the art in prosthetic wrists: Commercial and research devices,” in *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, 2015, pp. 331–338.
- [29] J. T. Belter and J. L. Segil, “Mechanical design and performance specifications of anthropomorphic prosthetic hands: a review,” *Journal of rehabilitation research and development*, vol. 50, no. 5, p. 599, 2013.
- [30] RepRap, “Open source rapid prototyping system that is capable of producing its own parts and can therefore be replicated easily,” [Online]. Available: <http://reprap.org/>, March 2016.
- [31] A. G. Zisimatos, M. V. Liarokapis, C. I. Mavrogiannis, and K. J. Kyriakopoulos, “Open-source, affordable, modular, light-weight, underactuated robot hands,” in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2014, pp. 3207–3212.

- [32] R. R. Ma, L. U. Odhner, and A. M. Dollar, “A modular, open-source 3d printed underactuated hand,” in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2013, pp. 2737–2743.
- [33] D. Giurintano, A. Hollister, W. Buford, D. Thompson, and L. Myers, “A virtual five-link model of the thumb,” *Medical engineering & physics*, vol. 17, no. 4, pp. 297–303, 1995.
- [34] M. Barakat, J. Field, and J. Taylor, “The range of movement of the thumb,” *Hand*, vol. 8, no. 2, pp. 179–182, 2013.
- [35] A. Hollister, W. L. Buford, L. M. Myers, D. J. Giurintano, and A. Novick, “The axes of rotation of the thumb carpometacarpal joint,” *Journal of Orthopaedic Research*, vol. 10, no. 3, pp. 454–460, 1992.
- [36] F. Lbath, C. Rumelhart, and J. Comtet, “[variability of muscular and articular forces of the thumb. comparison of three results during lateral grip],” *Chirurgie de la main*, vol. 20, no. 1, pp. 11–22, 2001.
- [37] W. P. Cooney and E. Chao, “Biomechanical analysis of static forces in the thumb during hand function,” *J Bone Joint Surg Am*, vol. 59, no. 1, pp. 27–36, 1977.
- [38] M. V. Liarokapis, A. G. Zisimatos, M. N. Bousiou, and K. J. Kyriakopoulos, “Open-source, low-cost, compliant, modular, underactuated fingers: Towards affordable prostheses for partial hand amputations,” in *36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 2014, pp. 2541–2544.
- [39] MATLAB, Mathworks, “High-level language and interactive environment,” [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>, March 2016.
- [40] Github repository, OpenBionics, “Prosthetic hand, kinematic model,” [Online]. Available: <https://github.com/OpenBionics/Prosthetic-Hands>, March 2016.
- [41] P. Corke, “A robotics toolbox for matlab,” *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 3, no. 1, pp. 24–32, 1996.
- [42] L. Sciavicco and B. Siciliano, *Modelling and control of robot manipulators*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [43] M. Santello, M. Flanders, and J. F. Soechting, “Postural hand synergies for tool use,” *The Journal of Neuroscience*, vol. 18, no. 23, pp. 10 105–10 115, 1998.

- [44] M. Grebenstein, M. Chalon, G. Herzinger, and R. Siegwart, “A method for hand kinematics designers,” in *1st International conference on applied bionics and biomechanics*, 2010.
- [45] T. Lalibert, M. Baril, F. Guay, and C. Gosselin, “Towards the design of a prosthetic underactuated hand,” *Mechanical Sciences*, vol. 1, pp. 19–26, 2010.
- [46] A. M. Dollar and R. D. Howe, “The highly adaptive sdm hand: Design and performance evaluation,” *The International journal of robotics research*, vol. 29, no. 5, pp. 585–597, 2010.
- [47] K. B. Shimoga and A. A. Goldenberg, “Soft materials for robotic fingers,” in *IEEE International Conference on Robotics and Automation. Proceedings*, 1992, pp. 1300–1305.
- [48] M. Ciocarlie, A. Miller, and P. Allen, “Grasp analysis using deformable fingers,” in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2005, pp. 4122–4128.
- [49] Solidworks, Dassault Systems, “3d cad design software,” [Online]. Available: <http://www.solidworks.com/>, March 2016.
- [50] A. G. Zisimatos, M. V. Liarokapis, C. I. Mavrogiannis, G. P. Kontoudis, and K. J. Kyriakopoulos, “How to create affordable, modular, light-weight, underactuated, compliant robot hands,” National Technical University of Athens, Tech. Rep., 2015.
- [51] Arduino, “Open-source electronics prototyping platform based on microcontroller,” [Online]. Available: <http://www.arduino.cc>, March 2016.
- [52] DST robot, “Herkulex drs-0201 library for arduino,” [Online]. Available: [http://hovis.co.kr/guide/drs0201\\_api\\_eng.html](http://hovis.co.kr/guide/drs0201_api_eng.html), March 2016.
- [53] Vernier, “User manual of hand dynamometer hd-bta,” [Online]. Available: <http://www.vernier.com/files/manuals/hd-bta.pdf>, March 2016.
- [54] OpenBionics, “Open-source, affordable, anthropomorphic robot hands and prostheses,” [Online]. Available: [https://www.youtube.com/watch?v=LoG\\_JTOIMO4&list=PLShFad51RfB\\_4zzSdsDUiQn7YVKfAHm-y](https://www.youtube.com/watch?v=LoG_JTOIMO4&list=PLShFad51RfB_4zzSdsDUiQn7YVKfAHm-y), March 2016.
- [55] —, “An open-source initiative for low-cost, light-weight, underactuated robot hands and prosthetic devices,” [Online]. Available: <http://www.openbionics.org>, March 2016.

- 
- [56] G. P. Kontoudis, M. V. Liarokapis, A. G. Zisimatos, C. I. Mavrogiannis, and K. J. Kyriakopoulos, “Open-source, anthropomorphic, underactuated robot hands with a selectively lockable differential mechanism: Towards affordable prostheses,” in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2015, pp. 5857–5862.
- [57] —, “How to create affordable, anthropomorphic, personalized, light-weight prosthetic hands,” National Technical University of Athens, Tech. Rep., 2015.
- [58] Aleph Objects, “Development of open-source hardware for 3d printing with full support for free and open-source software,” [Online]. Available: <https://www.alephobjects.com/>, March 2016.
- [59] Slic3r, “G-code generator for 3d printers,” [Online]. Available: <http://slic3r.org/>, March 2016.