



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

Ψηφιακό ομοίωμα μηχανικού συστήματος

Παναγιώτης Αργύρης
A.M.: 47703

Επιβλέπων: Γεώργιος Χαμηλοθώρης, Καθηγητής

Αθήνα - Αιγάλεω, Μάρτιος 2022



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGI-
NEERING**

Diploma Thesis

Single-chip emulator of a mechanical system

**Panagiotis Argyris
Registration Number.: 47703**

Supervisor: George Chamilothis, Professor

Athens – Egaleo, March 2022

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Παναγιώτης Αργύρης, Μάρτιος, 2022

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ενυπόγραφα ότι η παρούσα εργασία προετοιμάστηκε και ολοκληρώθηκε από εμένα αποκλειστικά και ότι είμαι ο αποκλειστικός συγγραφέας του κειμένου της.

Η εργασία μου δεν προσβάλλει οποιασδήποτε μορφής δικαιώματα πνευματικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας ή προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής ή λογοκλοπής.

Κάθε βοήθεια που έλαβα για την ολοκλήρωση της εργασίας είναι αναγνωρισμένη και αναφέρεται λεπτομερώς στο κείμενό της. Ειδικότερα, έχω αναφέρει ευδιάκριτα μέσα στο κείμενο και με την κατάλληλη παραπομπή όλες τις πηγές δεδομένων, κώδικα προγραμματισμού Η/Υ, απόψεων, θέσεων και προτάσεων, ιδεών και λεκτικών αναφορών που χρησιμοποιήθηκαν, είτε κατά κυριολεξία είτε βάσει επιστημονικής παράφρασης, και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Επιπλέον, όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης κατά τα διεθνή πρότυπα.

Τέλος δηλώνω ενυπόγραφα ότι αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ημερομηνία 10/03/2022

Παναγιώτης Αργύρης



Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

| A/A | ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ | ΒΑΘΜΙΑΔΑ / ΙΔΙΟΤΗΤΑ | ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ |
|------------|--------------------------|---------------------------------------|-------------------------|
| 1 | ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΣΤΕΡΓΙΟΥ | ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΠΡΟΕΔΡΟΣ ΤΜΗΜΑΤΟΣ | |
| 2 | ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΧΑΜΗΛΟΘΩΡΗΣ | ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ | |
| 3 | ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΖΑΧΑΡΙΑ | ΕΠΙΚΟΥΡΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ | |

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Παναγιώτης Αργύρης του Μιχαήλ, με αριθμό μητρώου 46147703 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



Ευχαριστίες

Η εν λόγω ερευνητική προσπάθεια αποτέλεσε μία ευχάριστη, αλλά και απαιτητική διαδικασία. Επομένως, την πραγμάτευση του θέματος, κρίνεται αναγκαίο να ευχαριστήσω ορισμένους καθηγητές που συνέβαλλαν στη διεκπεραίωσή της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα Καθηγητή κύριο Γεώργιο Χαμηλοθώρη, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, για την επιστημονική του καθοδήγηση και αρωγή του σε όλα τα βήματα εκπόνησης της εν λόγω μελέτης.

Επίσης, θα επιθυμούσα να ευχαριστήσω το σύνολο των καθηγητών που συνάντησα στην ακαδημαϊκή μου πορεία ως φοιτητής του τμήματος, καθώς συνέβαλαν σημαντικά στον εφοδιασμό μου με τις απαραίτητες γνώσεις και δεξιότητες, ώστε να είμαι σήμερα σε θέση να ολοκληρώσω τη διπλωματική μου εργασία.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εστιάζει στην σχεδίαση και ανάπτυξη ενός ψηφιακού ομοιώματος για ένα ρομποτικό χέρι. Αρχικά, πραγματοποιείται η σχετική βιβλιογραφική ανασκόπηση του πεδίου. Στη συνέχεια, στο ερευνητικό μέρος μελετήθηκε η κινηματική ανάλυση του ρομποτικού χεριού. Στα πλαίσια της εργασίας, αναπτύχθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο για την επίλυση του ευθύ, αλλά και αντίστροφου κινηματικού μοντέλου. Με την ανάπτυξη τετραγωνικών πινάκων και εξισώσεων αναπτύχθηκε το ευθύ και αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα ως παράδειγμα για το δάχτυλο του δείκτη, το οποίο μπορεί να γενικευθεί και για τα υπόλοιπα δάχτυλα. Με την εκπόνηση της εργασίας προέκυψαν μια σειρά ευρημάτων. Συγκεκριμένα, επιλύθηκε το ευθύ και αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα για τα δάχτυλα του χεριού, ενώ διαπιστώθηκε ότι το αντίστροφο κινηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε υπολογίζει τις συντεταγμένες στα άκρα των δαχτύλων. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε αναπαράσταση σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab της κινηματικής ανάλυσης του δαχτύλου του δείκτη. Τέλος, στο χωρίο σχεδιασμού του ρομποτικού χεριού μέσα από τη μοντελοποίηση και την μελέτη καταπόνησης των μηχανισμών των αρθρώσεων προέκυψαν αξιοσημείωτα ευρήματα σχετικά με τις αντοχή, την εργονομία και συνολικά τη σχεδίαση του χεριού.

Λέξεις – κλειδιά: ρομποτικό χέρι, ψηφιακό ομοίωμα, κινηματική ανάλυση, Inventor, Matlab

Abstract

The present work focuses on the design and development of a digital replica for a robotic arm. Initially, the relevant bibliographic review of the field is created. Then, in the research part, the kinematic analysis of the robotic arm was studied. As part of the work, a mathematical model was developed to solve the forward and inverse kinematic model. With the development of square matrices and equations, the forward and inverse kinematic problem was developed as an example for the index finger, which can be generalized to the other fingers. During the elaboration of the work, a series of findings emerged. Specifically, the forward and reverse kinematic problem for the fingers of the hand was solved, while it was found that the developed reverse kinematic model calculates the coordinates of the fingertips. At the same time, the kinematic analysis of the index finger was performed in a Matlab programming environment. Finally, in the design section of the robotic arm, through the modeling and the study of the strain of the joint mechanisms, remarkable findings emerged regarding the endurance, the ergonomics and the design of the hand as a whole.

Key – Words: robotic arm, digital replica, kinematic analysis, Inventor, Matlab

Περιεχόμενα

| | |
|---|----|
| Εισαγωγή..... | 15 |
| Κεφάλαιο 1 ^ο : Το ανθρώπινο χέρι..... | 16 |
| 1.1. Βασικά στοιχεία ανθρώπινου χεριού..... | 16 |
| 1.2. Βαθμοί ελευθερίας του χεριού..... | 18 |
| 1.3. Οστά ανθρώπινου χεριού..... | 18 |
| 1.4. Αρθρώσεις και κινήσεις του χεριού..... | 19 |
| 1.5. Μυϊκό σύστημα δαχτύλων και αντιβραχίου χεριού..... | 21 |
| 1.6. Κινησιολογία χεριού..... | 23 |
| 1.6.1. Κάμψη και έκταση δαχτύλων χεριού..... | 24 |
| 1.6.2. Απαγωγή και προσαγωγή δαχτύλων χεριού..... | 26 |
| Κεφάλαιο 2 ^ο : Ρομποτικό χέρι..... | 28 |
| 2.1. Ορισμός ρομποτικού χεριού..... | 28 |
| 2.2. Υποσυστήματα ρομποτικού χεριού..... | 28 |
| 2.3. Επενεργητές ρομποτικού χεριού..... | 29 |
| 2.4. Προϋποθέσεις κατασκευής ρομποτικού χεριού..... | 29 |
| 2.5. Υφιστάμενα ανθρωπόμορφα ρομποτικά χέρια..... | 30 |
| 2.6. Χρήσεις και πεδίο εφαρμογών ρομποτικού χεριού..... | 32 |
| Κεφάλαιο 3 ^ο : Υποχωρητικοί Μηχανισμοί..... | 34 |
| 3.1. Ορισμός υποχωρητικών μηχανισμών..... | 34 |
| 3.2. Σύνθεση/design υποχωρητικών μηχανισμών..... | 34 |
| 3.3. Πλεονεκτήματα υποχωρητικών μηχανισμών..... | 34 |
| 3.4. Περιορισμοί υποχωρητικών μηχανισμών..... | 35 |
| 3.5. Πεδία εφαρμογών υποχωρητικών μηχανισμών..... | 35 |
| 3.6. Επιλογή υποχωρητικών μηχανισμών στην προσθετική..... | 36 |
| 3.7. Απαιτήσεις κατασκευής υποχωρητικών μηχανισμών..... | 36 |
| Κεφάλαιο 4 ^ο : Μεθοδολογία..... | 38 |
| 4.1. Κινηματική ανάλυση..... | 38 |
| 4.1.1. Ορισμός κινηματικής ανάλυσης..... | 38 |
| 4.1.2. Ορθή και αντίστροφη κινηματική ανάλυση..... | 39 |
| 4.1.3. Επίλυση ευθύ κινηματικού προβλήματος..... | 39 |

| | | |
|---|--|----|
| 4.1.4. | Επίλυση αντίστροφου κινηματικού προβλήματος..... | 45 |
| 4.2. | Εργαλεία σχεδιασμού, υπολογισμού και μοντελοποίησης..... | 47 |
| 4.2.1. | Εργαλείο σχεδιασμού Inventor..... | 47 |
| 4.2.2. | Εργαλείο υπολογισμού Matlab..... | 48 |
| 4.2.3. | Εργαλείο μοντελοποίησης Sketch Up..... | 48 |
| Κεφάλαιο 5°: | Προσομοίωση του ευθύ και αντίστροφου κινηματικού προβλήματος σε περιβάλλον Matlab..... | 49 |
| 5.1. | Προσομοίωση του ευθύ και αντίστροφου κινηματικού προβλήματος για το δάχτυλο του δείκτη στο Matlab..... | 49 |
| 5.2. | Παράδειγμα προβλήματος με τυπική κίνηση του χεριού..... | 54 |
| Κεφάλαιο 6°: | Σχεδιασμός χεριού με το Inventor..... | 57 |
| 6.1. | Απαιτήσεις σχεδιασμού χεριού..... | 57 |
| 6.2. | Σχεδιασμός παλάμης και φαλάγγων..... | 57 |
| 6.2.1. | Σχεδιασμός παλάμης..... | 58 |
| 6.2.2. | Σχεδιασμός φαλάγγων..... | 59 |
| 6.3. | Σχεδιασμός και ανάλυση αρθρώσεων χεριού..... | 61 |
| 6.3.1. | Απαιτήσεις σχεδιασμού των υποχωρητικών μηχανισμών των αρθρώσεων..... | 61 |
| 6.3.2. | Μηχανισμός επίπεδης δοκού..... | 61 |
| 6.3.3. | Stress analysis του μηχανισμού επίπεδης δοκού..... | 62 |
| 6.3.4. | Ανάπτυξη και ανάλυση μηχανισμού κυματοειδούς μορφής..... | 65 |
| Κεφάλαιο 7°: | Συμπεράσματα..... | 69 |
| Βιβλιογραφία – Αναφορές – Διαδικτυακές Πηγές..... | | 70 |

Πίνακας εικόνων

| | |
|---|----|
| Εικόνα 1: Επίπεδα και κινήσεις ανθρώπινου χεριού (Levangie, White & Folkens σε Bundhoo, 2009)..... | 17 |
| Εικόνα 2 Αποτύπωμα του χεριού του Einstein (Washington, χ.χ.)..... | 17 |
| Εικόνα 3 Οι βαθμοί ελευθερίας ενός δαχτύλου | 18 |
| Εικόνα 4 Τα οστά του χεριού (Netter, Hansen & Machado, 2019)..... | 19 |
| Εικόνα 5 Οι αρθρώσεις του χεριού (Κριτσωτάκης, 2012)..... | 20 |
| Εικόνα 6 Οι κινήσεις του χεριού (Bundhoo, V. (2009)..... | 21 |
| Εικόνα 7 Οι μύες και οι τένοντες του χεριού από πρόσθια άποψη (Netter, Hansen & Machado, 2019)..... | 22 |
| Εικόνα 8 Οι μύες και οι τένοντες του χεριού από οπίσθια άποψη (Netter, Hansen & Machado, 2019)..... | 23 |
| Εικόνα 9 Μύες και τένοντες για κάμψη δαχτύλων από πρόσθια άποψη (Netter, Hansen & Machado, 2019)..... | 24 |
| Εικόνα 10 Τένοντες και μύες του δαχτύλου του χεριού σε έκταση (Netter, Hansen & Machado, 2019)..... | 25 |
| Εικόνα 11 Μύες και τένοντες για έκταση δαχτύλων από πρόσθια άποψη (Netter, Hansen & Machado, 2019)..... | 26 |
| Εικόνα 12 Μύες και τένοντες για απαγωγή και προσαγωγή δαχτύλου από οπίσθια άποψη (Netter, Hansen & Machado, 2019)..... | 27 |
| Εικόνα 13 Το Shadow Dexterous Hand της Shadow Robot Company Ltd (Shadow Robot Company, 2021)..... | 30 |
| Εικόνα 14 Το Robonaut Hand της NASA (Bridgwater, Ihrke, 2012)..... | 31 |
| Εικόνα 15 Το EH1 Milano Hand της Prensilia Srl (Prensilia. S.r.l, 2021)..... | 31 |
| Εικόνα 16 Το Elu2-Hand από την Elumotion Ltd (Elumotion, 2016)..... | 32 |
| Εικόνα 17 Το MechaTE Robot της Custom Entertainment Solutions (MechaTE, 2021)..... | 32 |
| Εικόνα 18 Μοντέλο δείκτη, όπως δημιουργήθηκε από τον συγγραφέα της διπλωματικής μέσω Sketch Up..... | 39 |
| Εικόνα 19 Σχηματική απεικόνιση των παραμέτρων Denavit και Hartenberg (Κριτσωτάκης,2012)..... | 40 |
| Εικόνα 20 Τα πλαίσια συντεταγμένων της παλάμης και της βάσης των δαχτύλων εκτός του αντίχειρα, όπως σχηματίστηκε από τον συγγραφέα..... | 41 |
| Εικόνα 21 Τα πλαίσια συντεταγμένων της παλάμης και της βάσης του αντίχειρα, όπως σχηματίστηκε από τον συγγραφέα..... | 42 |

| | |
|---|----|
| Εικόνα 22 Σχηματική απεικόνιση του χεριού με σημειωμένους τους άξονες, όπως σχεδιάστηκε από τον συγγραφέα..... | 42 |
| Εικόνα 23 Σχηματική απεικόνιση του χεριού με σημειωμένες τις σχετικές αποστάσεις, όπως σχεδιάστηκε από τον συγγραφέα..... | 44 |
| Εικόνα 24 Η προοπτική κίνησης δαχτύλου (αριστερά) και η κάτοψη κίνησης δαχτύλου (δεξιά) (Κριτσωτάκης, 2012)..... | 45 |
| Εικόνα 25 Στιγμιότυπο του command window του Matlab..... | 49 |
| Εικόνα 26 Στιγμιότυπο του περιβάλλοντος guide του Matlab..... | 50 |
| Εικόνα 27 Στιγμιότυπο του περιβάλλοντος guide του Matlab, μετά από την κατάλληλη διαμόρφωση..... | 51 |
| Εικόνα 28 Στιγμιότυπο του κώδικα επίλυσης ευθύ κινηματικού προβλήματος..... | 51 |
| Εικόνα 29 Στιγμιότυπο κώδικα επίλυσης του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος..... | 52 |
| Εικόνα 30 Στιγμιότυπο κώδικα επίλυσης του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος..... | 52 |
| Εικόνα 31 Στιγμιότυπο από εκτέλεση του κώδικα επίλυσης και των δύο προβλημάτων κινηματικής..... | 53 |
| Εικόνα 32 Στιγμιότυπο προσομοίωσης επίλυσης του ευθύ κινηματικού προβλήματος..... | 53 |
| Εικόνα 33 Στιγμιότυπο προσομοίωσης επίλυσης του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος..... | 54 |
| Εικόνα 34 Στιγμιότυπο προσομοίωσης της παλάμης από τη βιβλιοθήκη SynGrasp...55 | |
| Εικόνα 35 Στιγμιότυπο προσομοίωσης της παλάμης από τη βιβλιοθήκη SynGrasp...55 | |
| Εικόνα 36 Στιγμιότυπο προσομοίωσης της παλάμης από τη βιβλιοθήκη SynGrasp...56 | |
| Εικόνα 37 Στιγμιότυπο προσομοίωσης της παλάμης από τη βιβλιοθήκη SynGrasp...56 | |
| Εικόνα 38 Σχηματική απεικόνιση του χεριού με τις σχετικές διαστάσεις, όπως σχεδιάστηκε από τον συγγραφέα..... | 58 |
| Εικόνα 39 Στιγμιότυπο μοντελοποίησης αριστερής παλάμης και καρπού στο Inventor (πρόσθια άποψη)..... | 58 |
| Εικόνα 40 Στιγμιότυπο μοντελοποίησης αριστερής παλάμης και καρπού στο Inventor (κάτοψη)..... | 59 |
| Εικόνα 41 Στιγμιότυπο μοντελοποίησης εγγύς φάλαγγας στο Inventor..... | 60 |
| Εικόνα 42 Στιγμιότυπο μοντελοποίησης ενδιάμεσης φάλαγγας στο Inventor..... | 60 |
| Εικόνα 43 Στιγμιότυπο μοντελοποίησης άπω φάλαγγας στο Inventor..... | 60 |
| Εικόνα 44 Στιγμιότυπο μοντελοποίησης εγγύς φάλαγγας αντίχειρα στο Inventor (οπίσθια όψη)..... | 60 |

| | |
|---|----|
| Εικόνα 45 Στιγμιότυπο μοντελοποίησης εγγύς φάλαγγας αντίχειρα στο Inventor (πλάγια όψη)..... | 60 |
| Εικόνα 46 Στιγμιότυπο μοντελοποίησης μηχανισμού επίπεδης δοκού στο Inventor. . | 62 |
| Εικόνα 47 Στιγμιότυπο από συναρμολόγηση εγγύς φάλαγγας, επίπεδης δοκού και βάσης στο Inventor..... | 63 |
| Εικόνα 48 Στιγμιότυπο από συναρμολόγηση εγγύς φάλαγγας, επίπεδης δοκού και βάσης στο Inventor..... | 63 |
| Εικόνα 49 Πίνακας υλικών..... | 64 |
| Εικόνα 50 Προσομοίωση καταπόνησης στον άξονο ψ'ψ στο Inventor..... | 64 |
| Εικόνα 51 Προσομοίωση καταπόνησης στον άξονο χ'χ στο Inventor..... | 65 |
| Εικόνα 52 Στιγμιότυπο μοντελοποίησης υποχωρητικού μηχανισμού κυματοειδούς μορφής στον Inventor..... | 65 |
| Εικόνα 53 Στιγμιότυπου σχεδιασμού βάσης σύνδεσης μηχανισμών στο Inventor με διαστάσεις (πρόσθια όψη)..... | 66 |
| Εικόνα 54 Στιγμιότυπο από συναρμολόγηση εγγύς φάλαγγας, επίπεδης δοκού, βάσης και κυματοειδούς μηχανισμού στο Inventor..... | 66 |
| Εικόνα 55 Στιγμιότυπο από συναρμολόγηση εγγύς φάλαγγας, επίπεδης δοκού, βάσης και κυματοειδούς μηχανισμού στο Inventor..... | 66 |
| Εικόνα 56 Προσομοίωση καταπόνησης στον άξονο ψ'ψ στο Inventor..... | 67 |
| Εικόνα 57 Προσομοίωση καταπόνησης στον άξονο χ'χ στο Inventor..... | 67 |
| Εικόνα 58 Στιγμιότυπο μοντελοποίησης του συναρμολογημένου χεριού στο Inventor | 68 |
| Εικόνα 59 Στιγμιότυπο μοντελοποίησης του συναρμολογημένου χεριού στο Inventor | 68 |
| Εικόνα 60 Στιγμιότυπο μοντελοποίησης του συναρμολογημένου χεριού στο Inventor | 68 |

Κατάλογος πινάκων

| | |
|--|----|
| Πίνακας 1 Πίνακας των παραμέτρων Denavit και Hartenberg για τον δείκτη, όπως κατασκευάστηκε από τον συγγραφέα..... | 40 |
| Πίνακας 2 Μηκών συνδέσμων δαχτύλων, όπως σχεδιάστηκε από τον συγγραφέα... | 43 |
| Πίνακας 3 Εύρους κίνησης δείκτη σε μοίρες..... | 43 |
| Πίνακας 4 Διαστάσεων φαλάγγων..... | 59 |
| Πίνακας 5 Μηχανικών ιδιοτήτων υλικού ABS (Yong,2014)..... | 62 |

Εισαγωγή

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, ένα ρομποτικό ομοίωμα χεριού έχει τη δυνατότητα να αξιοποιηθεί ως προσθετικό μέλος, αλλά και σε άλλους τομείς για την ικανότητα αρπαγής σε ρομπότ. Κατά την αναζήτηση της βιβλιογραφίας, παρατηρήθηκε ότι σε διεθνές επίπεδο έχουν υλοποιηθεί αντίστοιχες έρευνες. Ωστόσο, είναι διαθέσιμες ελάχιστες έρευνες, κυρίως σε προπτυχιακό επίπεδο, στα ελληνικά δεδομένα. Ως άμεσο επακόλουθο, κρίνεται σκόπιμος ο σχεδιασμός και η μοντελοποίηση ενός λειτουργικού ρομποτικού χεριού.

Η παρούσα μελέτη εστιάζει στην κινηματική ανάλυση ενός ρομποτικού χεριού, η οποία αναλύεται σε επιμέρους ενέργειες μεθοδολογίας. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο για την επίλυση του ευθύ και του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος. Προκειμένου να υλοποιηθεί η συγκεκριμένη προσέγγιση αναπτύχθηκαν τετραγωνικοί πίνακες και εξισώσεις και για τα δύο προβλήματα ως παράδειγμα για τον δείκτη, το οποίο γενικεύεται και στα υπόλοιπα δάχτυλα.

Με την υλοποίηση της εν λόγω διπλωματικής εργασίας, γίνεται μία προσπάθεια μελέτης του σχεδιασμού και της μοντελοποίησης ενός ρομποτικού χεριού σε σύντομο χρονικό διάστημα με τη χρήση εύκολα προσβάσιμων και αξιοποιήσιμων εργαλείων.

Αρχικά, θα μελετηθεί η τρέχουσα βιβλιογραφία σχετικά με την ανατομία και τα κύρια χαρακτηριστικά του ανθρώπινου χεριού. Το 2^ο Κεφάλαιο αναφέρεται σε πληροφορίες αναφορικά με το ρομποτικό χέρι και, συγκεκριμένα, στον ορισμό, τα υποσυστήματα, τους επενεργητές, τις προϋποθέσεις, τις υπάρχουσες σχετικές έρευνες, αλλά και τα πεδία εφαρμογής του. Στη συνέχεια, γίνεται εκτενής αναφορά ενός ολόκληρου κεφαλαίου για τους υποχωρητικούς μηχανισμούς.

Στο επόμενο μέρος της εργασίας, αναλύεται η μεθοδολογική προσέγγιση του ερευνητικού προβληματισμού με εξήγηση της προσομοίωσης του ευθύ και αντίστροφου κινηματικού προβλήματος σε περιβάλλον Matlab και του σχεδιασμού του χεριού με το Inventor. Καταληκτικά, παρατίθενται και τα συμπεράσματα που εξάχθηκαν από την εκπόνηση της μελέτης.

Κεφάλαιο 1^ο: Το ανθρώπινο χέρι

1.1. Βασικά στοιχεία ανθρώπινου χεριού

Προσεγγίζοντας τον σχεδιασμό και την κατασκευή ενός ρομποτικού χεριού, κρίνεται σκόπιμο να μελετηθεί στο παρόν χωρίο η μορφολογία του ανθρώπινου χεριού. Δεδομένου ότι η ανατομία του ανθρώπινου χεριού είναι αρκετά περίπλοκη είναι απαραίτητο να αποσαφηνιστούν κάποια βασικά του χαρακτηριστικά και να επεξηγηθούν κάποιοι βοηθητικοί όροι. Κύριοι όροι, σύμφωνα με τους Levangie, White και Folkens, όπως αναφέρονται στον Bundhoo (2009), είναι οι ακόλουθοι: εγγύς, άπω, μετωπιαίο επίπεδο, οβελιαίο επίπεδο, κάμψη, έκταση, προσαγωγή, δάχτυλο, αντίχειρας και φάλαγγα.

Βασικοί όροι της ανατομίας του χεριού είναι οι λέξεις «εγγύς» (proximal) και «άπω» (distal). Οι εν λόγω όροι χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τη θέση ενός σημείου σε σχέση με ένα κεντρικό σημείο. Ο όρος «εγγύς» αναφέρεται σε μία θέση πλησιέστερα στο σημείο αναφοράς ενώ αντίθετα ο όρος άπω αναφέρεται σε μια θέση μακριά από το σημείο αναφοράς.

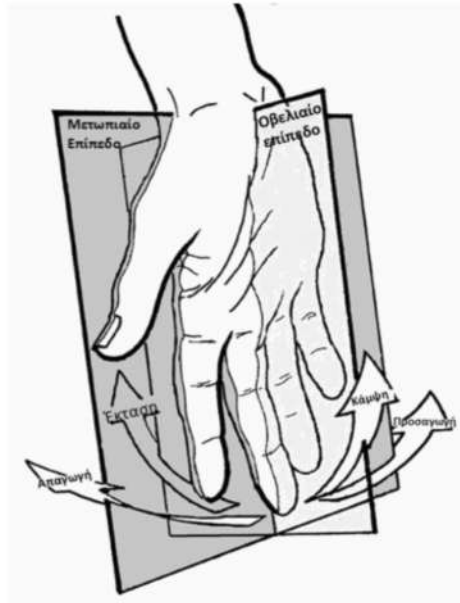
Επόμενος όρος που θα αναλυθεί είναι το «μετωπιαίο επίπεδο» (frontal plane). Το συγκεκριμένο επίπεδο χωρίζει ένα σώμα σε εμπρός και σε πίσω τμήμα. Στην περίπτωση του χεριού το μετωπιαίο επίπεδο είναι εκείνο που οριοθετείται παράλληλα με την παλάμη του χεριού, όταν τα δάχτυλα βρίσκονται σε έκταση.

Εκτός από το μετωπιαίο, υφίσταται και το «οβελιαίο επίπεδο» (sagittal plane) ή αλλιώς «μεσαίο επίπεδο». Ο εν λόγω όρος αναφέρεται στο επίπεδο το οποίο τοποθετείται κάθετα ως προς την παλάμη του χεριού.

Οι επόμενοι όροι αφορούν τις κινήσεις του χεριού και, ειδικότερα, την «κάμψη» και την «έκταση», οι οποίες πραγματοποιούνται με το μετωπιαίο επίπεδο ως σημείο αναφοράς. Αφενός, η κάμψη αναφέρεται στο λύγισμα μιας άρθρωσης με τέτοιο τρόπο, ώστε το δάχτυλο να απομακρύνεται από το μετωπιαίο επίπεδο για να κλείσει το χέρι. Αφετέρου, η έκταση του χεριού, αφορά στην κίνηση κατά την οποία τα δάχτυλα κινούνται προς την μεριά του μετωπικού επιπέδου για να σχηματίσουν μια επίπεδη παλάμη.

Ωστόσο, κινήσεις δεν πραγματοποιούνται μόνο ως προς το μετωπιαίο, αλλά και ως προς το οβελιαίο ή μεσαίο επίπεδο. Η εν λόγω κίνηση ονομάζεται «προσαγωγή» και πρόκειται για την κίνηση που φέρνει ένα ανατομικό συστατικό πιο κοντά προς το οβελιαίο επίπεδο.

Άξια λόγου κρίνεται και η αναφορά σε όρους ανατομίας, όπως το «δάχτυλο», ο «αντίχειρας» και η φάλαγγα. Το «δάχτυλο» αναφέρεται μόνο για τα τέσσερα ψηφία του χεριού και όχι για τον «αντίχειρα». Εξ ου και το χέρι έχει πέντε ψηφία, τέσσερα «δάχτυλα» και έναν «αντίχειρα». Τέλος, ο όρος «φάλαγγα» χρησιμοποιείται για τα οστά των δαχτύλων, καθώς και για το ίδιο το δαχτυλικό τμήμα.



Εικόνα 1: Επίπεδα και κινήσεις ανθρώπινου χεριού (Levangie, White & Folkens σε Bundhoo, 2009)

Σημαντικοί, επίσης, όροι είναι τα «οστά», οι «μύες», τα «νεύρα», οι «αρτηρίες», καθώς και η ονομασία του κάθε ψηφίου του χεριού. Συγκεκριμένα, το ανθρώπινο χέρι αποτελείται από τουλάχιστον 27 οστά, περισσότερους από 30 μεμονωμένους μύες και πάνω από 100 συνδέσμους, νεύρα και αρτηρίες. Το κάθε χέρι απαρτίζεται από 4 δάχτυλα και τον αντίχειρα. Αντικρίζοντας το ανθρώπινο δεξί χέρι από την εσωτερική του μεριά, δηλαδή από την μεριά της παλάμης, από τα δεξιά προς τα αριστερά η ονομασία των χεριών είναι η ακόλουθη: πρώτος από τα δεξιά είναι ο «αντίχειρας», το πρώτο δάχτυλο είναι ο «δείκτης», το διπλανό από τον δείκτη είναι το «μεσαίο» ή «μεγάλο» δάχτυλο, αριστερά από τον μεσαίο βρίσκεται ο «παράμεσος» και στο τέλος από τα αριστερά βρίσκεται ο «μικρός» (Mahdi, 2014).

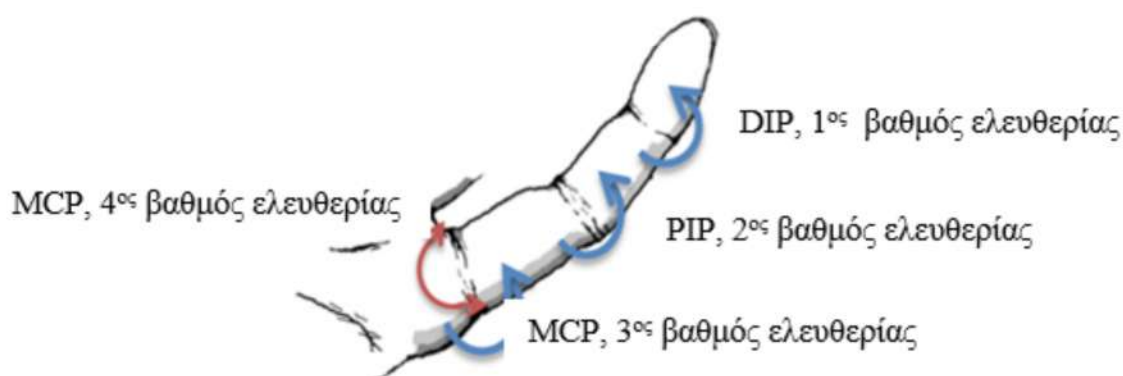


Εικόνα 2 Αποτύπωμα του χεριού του Einstein (Washington, χ.χ.)

1.2. Βαθμοί ελευθερίας του χεριού

Στη συνέχεια, κρίνεται σκόπιμο να οριστούν οι βαθμοί ελευθερίας του χεριού. Με τον όρο «βαθμοί ελευθερίας» (Degrees Of Freedom) στη μηχανική, εννοείται ο αριθμός των ανεξάρτητων κινήσεων που επιτρέπονται στο σώμα. Στην περίπτωση ενός μηχανισμού πολλών φορέων ο όρος αναφέρεται στον αριθμό των πιθανών ανεξάρτητων σχετικών κινήσεων μεταξύ των τμημάτων του μηχανισμού (Layton, 1999).

Αναφορικά με το ανθρώπινο χέρι, εμφανίζονται συνολικά 27 βαθμοί ελευθερίας. Σε κάθε δάχτυλο υφίστανται 4 βαθμοί ελευθερίας, οι 3 πρόκειται για έκταση και κάμψη σε κάθε άρθρωση (Distal Interphalangeal Phalange, Proximal Interphalangeal Phalange και Metacarpophalangeal Phalange) και ο ένας για απαγωγή και προσαγωγή. Ο αντίχειρας, βέβαια, εμφανίζει 5 βαθμούς ελευθερίας και ο καρπός 6 ούτως ώστε να υπάρχει η ικανότητα περιστροφής (όπως αναφέρουν οι Pamela, et.al., όπως αναφέρονται στον Bundhoo, V. 2009).



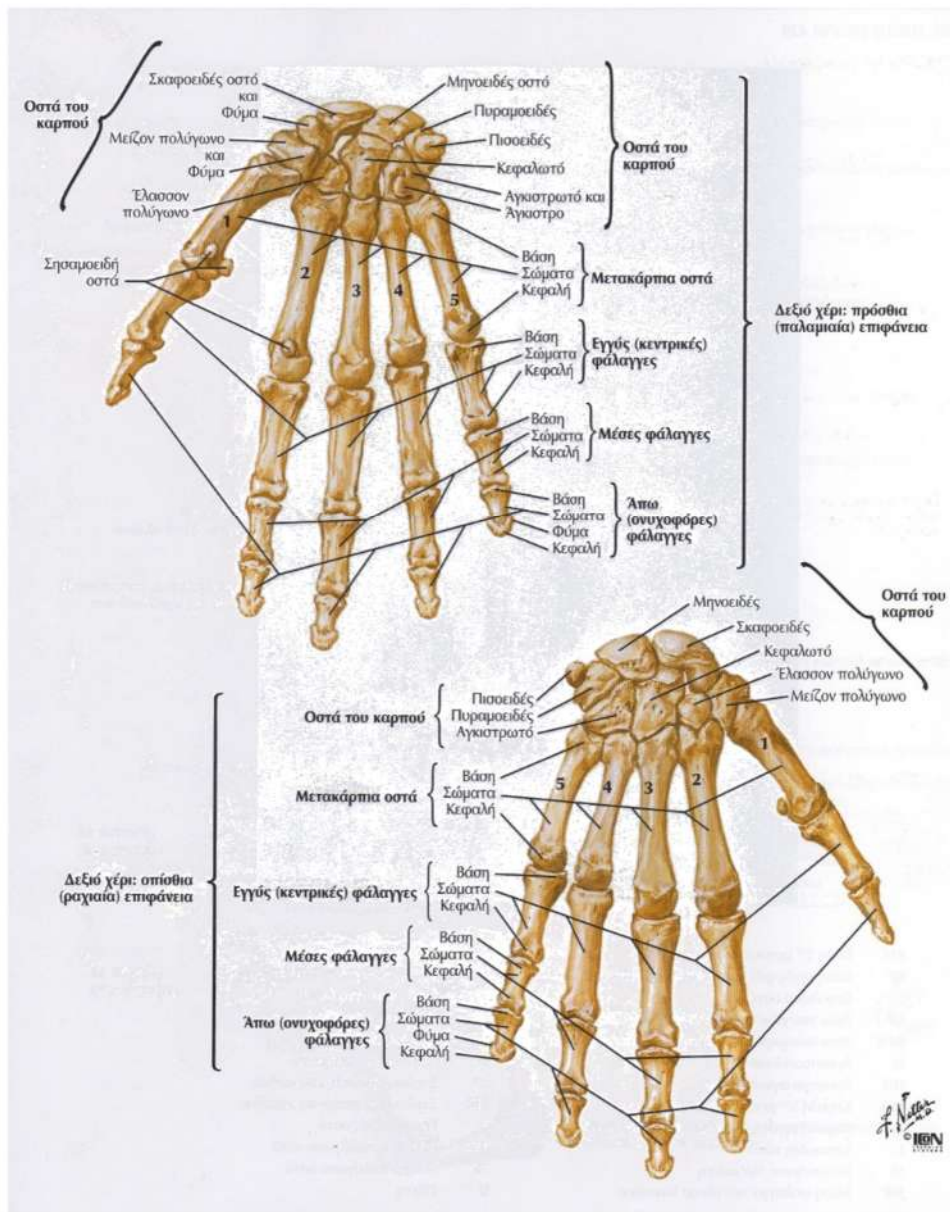
Εικόνα 3 Οι βαθμοί ελευθερίας ενός δαχτύλου

1.3. Οστά ανθρώπινου χεριού

Ο σκελετός του ανθρώπινου χεριού απαρτίζεται από 27 οστά, τα οποία μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες, τα καρπικά, τα μετακάρπια και οι φάλαγγες των δαχτύλων. Τα καρπικά οστά είναι εκείνα που αποτελούν τον καρπό. Στο σύνολό τους είναι 8 και είναι διατεταγμένα σε 2 σειρές, οι οποίες αποτελούνται από 4 και από 3 οστά, αντίστοιχα. Τα οστά που συνιστούν την παλάμη του χεριού ονομάζονται μετακάρπια. Τα μετακάρπια οστά είναι 5 και χαρακτηρίζονται από σωληνοειδή μορφή, στρογγυλά άκρα και τετραγωνικές βάσεις. Οι φάλαγγες των δαχτύλων είναι παρένθετα τμήματα οστών, τα οποία αποτελούνται από 14 συνολικά οστά (2 στον αντίχειρα και 3 σε κάθε δάχτυλο) και δημιουργούν το δάχτυλο. Κάθε δάχτυλο, με τη σειρά του, αποτελείται από 3 παρένθετα τμήματα οστών. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνονται η εγγύς φάλαγγα, η ενδιάμεση ή μέση φάλαγγα και η περιφερική ή άπω φάλαγγα.

Η εγγύς και η ενδιάμεση φάλαγγα προσδιορίζονται ως μακρά οστά με κωνικούς άξονες στην κορυφή και κυρτούς στο κάτω μέρος. Οι ραχιαίες επιφάνειες τους είναι πιο λείες και στρογγυλεμένες σε σχέση με τις παλαμοειδείς επιφάνειες τους, οι οποίες είναι πιο τραχιές. Τα άκρα των οστών των εν λόγω φαλάγγων

αναφέρονται ως βάσεις στην πλευρά κοντά στον καρπό, ενώ τα άκρα κοντά στην απομακρυσμένη πλευρά αναφέρονται ως κεφαλές (Lynette & Susan, 2006).



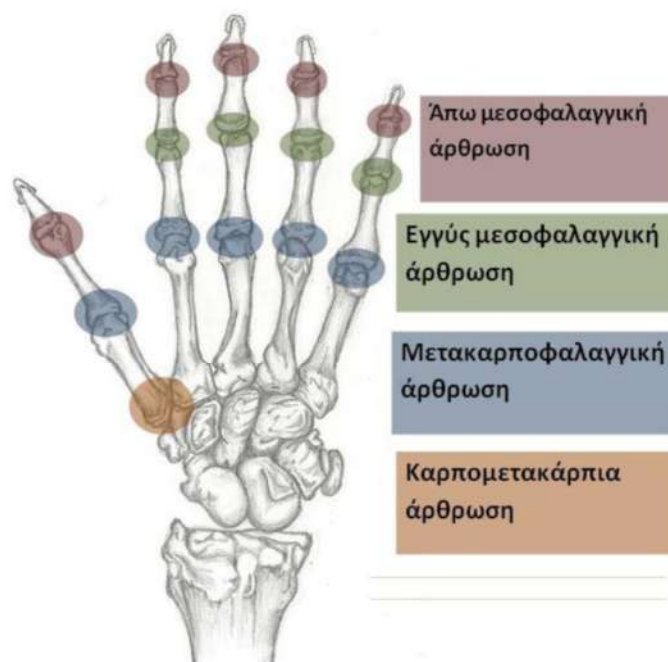
Εικόνα 4 Τα οστά του χεριού (Netter, Hansen & Machado, 2019)

1.4. Αρθρώσεις και κινήσεις του χεριού

Εκτός από τα οστά του χεριού, είναι αναγκαίο να εξηγηθούν και οι αρθρώσεις, σε συνδυασμό με τις κινήσεις του. Τα δάχτυλα του ανθρώπινου χεριού έχουν τρεις αρθρώσεις, οι οποίες συνδέουν τις φάλαγγες μεταξύ τους και είναι οι ακόλουθες (Bundhoo, 2009).

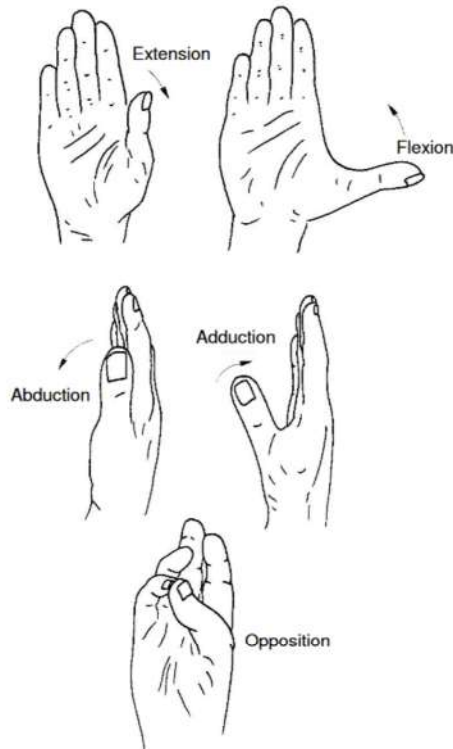
Η κοντινότερη στην παλάμη, άρθρωση είναι η μετά- καρποφαλαγγική άρθρωση (Metacarpophalangeal Phalange), η οποία συνδέει τα μετακάρπια οστά με τα οστά της εγγύς φάλαγγας. Η συγκεκριμένη άρθρωση έχει 2 βαθμούς ελευθερίας την έκτα-

ση/κάμψη και την προσαγωγή/απαγωγή. Η μεσαία άρθρωση του δαχτύλου ονομάζεται εγγύς μεσοφαλαγγική άρθρωση (Proximal Interphalangeal Phalange -PIP), η οποία έχει μόνο έναν βαθμό ελευθερίας την έκταση/κάμψη. Με άλλα λόγια, λειτουργεί ως άρθρωση «μεντεσές» μεταξύ των φαλάγγων. Η άρθρωση που βρίσκεται στην άκρη του δαχτύλου είναι η άπω μεσοφαλαγγική άρθρωση (Distal Interphalangeal Phalange -DIP) και εμφανίζει έναν βαθμό ελευθερίας την έκταση/κάμψη).



Εικόνα 5 Οι αρθρώσεις του χεριού (Κριτσωτάκης, 2012)

Ο αντίχειρας που συνεισφέρει σημαντικά στις χειριστικές ικανότητες του χεριού απαρτίζεται, με τη σειρά του, από την καρπομετακάρπια, τη μετακαρποφαλαγγική και την άπω μεσοφαλαγγική άρθρωση (Bundhoo, 2009). Αναλυτικότερα, η καρπομετακάρπια άρθρωση (Carpometacarpal - CMC) συνδέει τη βάση του μετακαρπικού οστού του αντίχειρα και το πιο πλάγιο καρπικό οστό του καρπού. Η συγκεκριμένη άρθρωση εκτός από την έκταση/κάμψη και την προσαγωγή/απαγωγή εμφανίζει έναν ακόμη βαθμό ελευθερίας. Μπορεί να κινηθεί σε αντίθεση με τα δάχτυλα με μια συνδυασμένη κίνηση κάμψης, προσαγωγής και κάποια κυκλική περιστροφή. Η επόμενη άρθρωση ονομάζεται μετά-καρποφαλαγγική άρθρωση (Metacarpophalangeal Phalange - MCP) και είναι πιο κοντά στη παλάμη, ενώ η τελευταία άρθρωση του αντίχειρα άπω μεσοφαλαγγική άρθρωση (Distal Interphalangeal Phalange - DIP).



Εικόνα 6 Οι κινήσεις του χεριού (Bundhoo, V. (2009)

1.5. Μυϊκό σύστημα δαχτύλων και αντιβραχίου χεριού

Βασικό στοιχείο του ανθρώπινου χεριού συνιστά το σύνολο των μυών του άκρου. Συγκεκριμένα, το μυϊκό σύστημα των δαχτύλων και του αντιβραχίου αποτελείται από τένοντες και διάφορους μύες οι οποίοι μπορούν να ταξινομηθούν σε δυο ευρύτερες ομάδες, τους εξωγενείς και τους ενδογενείς μύες.

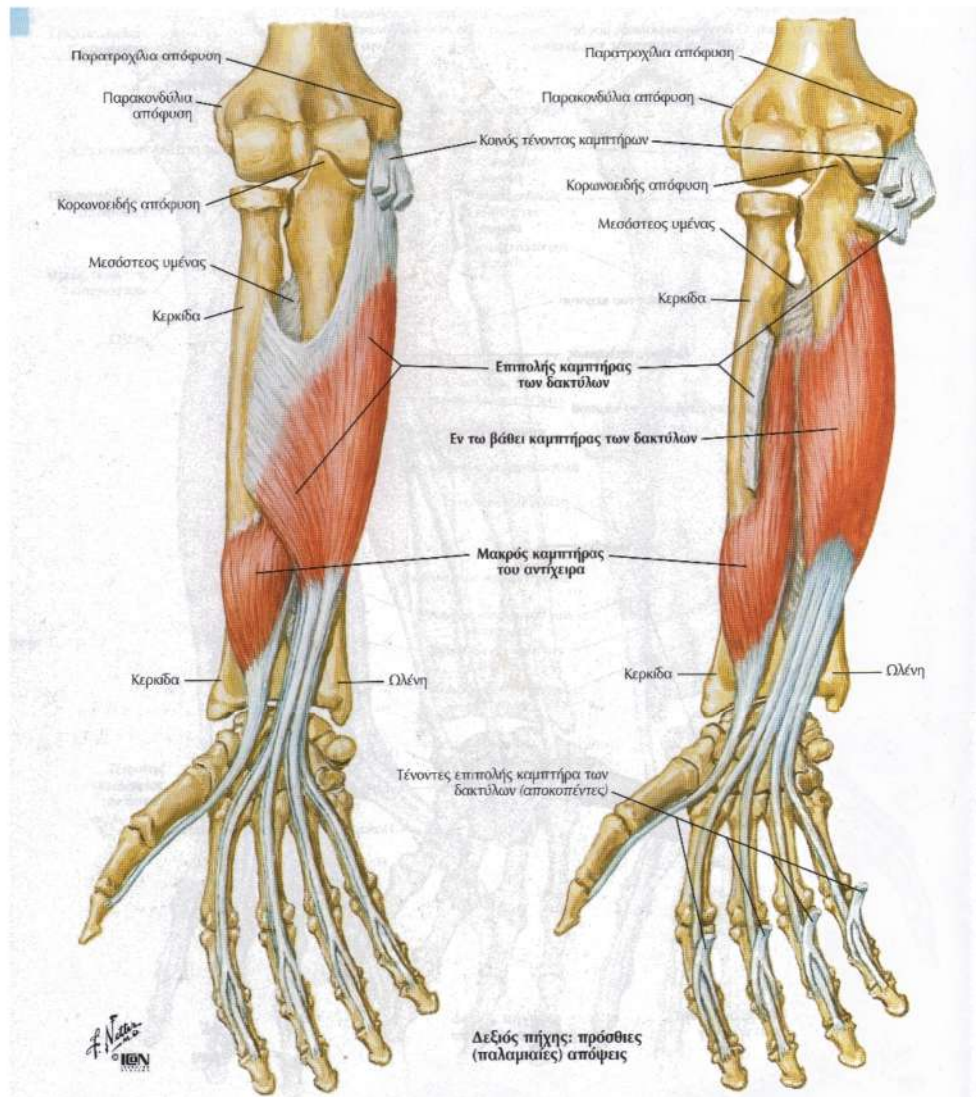
Οι εξωγενείς μύες βρίσκονται στο αντιβράχιο και είναι υπεύθυνοι για την κάμψη και την έκταση των δαχτύλων. Γενικότερα αυτή ομάδα των μυών είναι υπεύθυνη για τις κινήσεις που απαιτούν δύναμη, όπως για παράδειγμα την αρπαγή αντικειμένων. Από την άλλη, οι ενδογενείς μύες είναι πιο αδύναμοι συγκριτικά με τους εξωγενείς. Οι εν λόγω μύες βρίσκονται στην παλάμη ενώ είναι υπεύθυνοι για την προσαγωγή, απαγωγή αλλά και για άλλες κινήσεις ακριβείας των δαχτύλων.

Το μυϊκό σύστημα του χεριού περιλαμβάνει εκτός από τους μύες και τους τένοντες. Οι τένοντες ορίζονται ως μια σειρά παράλληλων ινών κολλαγόνου που συνθέτουν μια ζώνη συνδετικού ιστού. Η συγκεκριμένη ζώνη χρησιμεύει για τη σύνδεση ενός μυός σε ένα οστό. Οι ίνες γίνονται συνεχείς με το περίβλημα κολλαγόνου γύρω από τις μυϊκές ίνες και με τον συνδετικό ιστό να καλύπτει την επιφάνεια του οστού, δημιουργώντας μια ισχυρή δέσμη χωρίς αδύναμες συνδέσεις. Οι τένοντες διακρίνονται σε δυο κατηγορίες, τους καμπτήρες και τους εκτίνοντες, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για το κλείσιμο των δαχτύλων και το άνοιγμα των δαχτύλων, αντίστοιχα (Hale, Saunders & Margham 2005).

Όσον αφορά τη σύνδεση μυών και τενόντων, υφίστανται επιμέρους περιπτώσεις. Στην περίπτωση των εξωγενών μυών, οι τένοντες συνδέουν τους μύες του βραχίονα με το δάχτυλο και εκτείνονται σε πολλαπλές αρθρώσεις στο χέρι. Στην

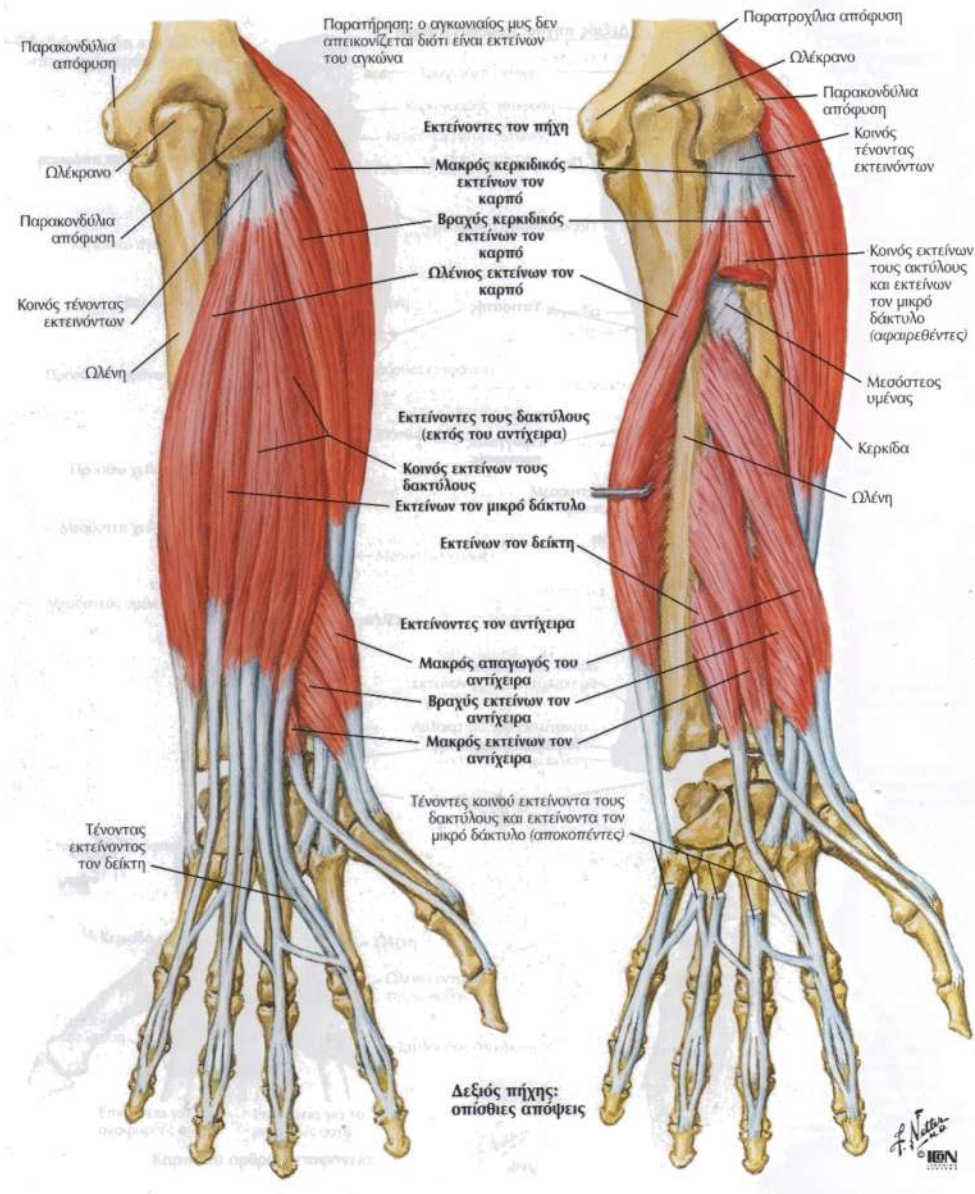
περίπτωση των δαχτύλων, οι τένοντες σχηματίζουν μια περίπλοκη δομή που μοιάζει με ιστό και προσκολλώνται απευθείας στα οστά των δαχτύλων. Η σύσπαση των μυών του βραχίονα προκαλεί μια πολύπλοκη αλληλεπίδραση μεταξύ των τενόντων η οποία έχει ως αποτέλεσμα την κίνηση στην άρθρωση. Επειδή οι τένοντες αποτελούνται από κολλαγόνο γίνονται πιο άκαμπτοι, καθώς τεντώνονται και επιτρέπουν στην άρθρωση του δαχτύλου να κάμπτεται ή να εκτείνεται. Επιπρόσθετα, οι τένοντες έχουν την δυνατότητα να συστέλλονται επιτρέποντας στο δάχτυλο να επιστρέφει στην αρχική του θέση μετά από κάμψη/έκταση ή προσαγωγή/απαγωγή (Bundhoo, 2009).

Αναφορικά με το αντιβράχιο, οι μύες διακρίνονται στην πρόσθια και οπίσθια μεριά - μοίρα. Οι μύες του πρόσθιου διαμερίσματος του αντιβραχίου είναι διατεταγμένοι σε δύο στρώματα. Θεωρούνται οι κύριοι καμπτήρες του χεριού και των δαχτύλων. Αρκετοί από αυτούς μπορούν να απάγουν και να προσάγουν το χέρι στον καρπό. Οι τένοντες του πρόσθιου διαμερίσματος του αντιβραχίου εκτείνονται μέχρι τα δάχτυλα (Netter, Hansen & Machado 2019).



Εικόνα 7 Οι μύες και οι τένοντες του χεριού από πρόσθια άποψη (Netter, Hansen & Machado, 2019)

Οι μύες του οπίσθιου διαμερίσματος του αντιβραχίου θεωρούνται ως οι κύριοι εκτίνοντες του χεριού και των δαχτύλων, ενώ κάποιοι εξ αυτών μπορούν να απαγούν και να προσάγουν τον αντίχειρα. Οι τένοντες του οπίσθιου διαμερίσματος του αντιβραχίου εκτείνονται μέχρι στον καρπό και στη ράχη του χεριού (Netter, Hansen & Machado, 2019).



Εικόνα 8 Οι μύες και οι τένοντες του χεριού από οπίσθια άποψη (Netter, Hansen & Machado, 2019)

1.6. Κινησιολογία χεριού

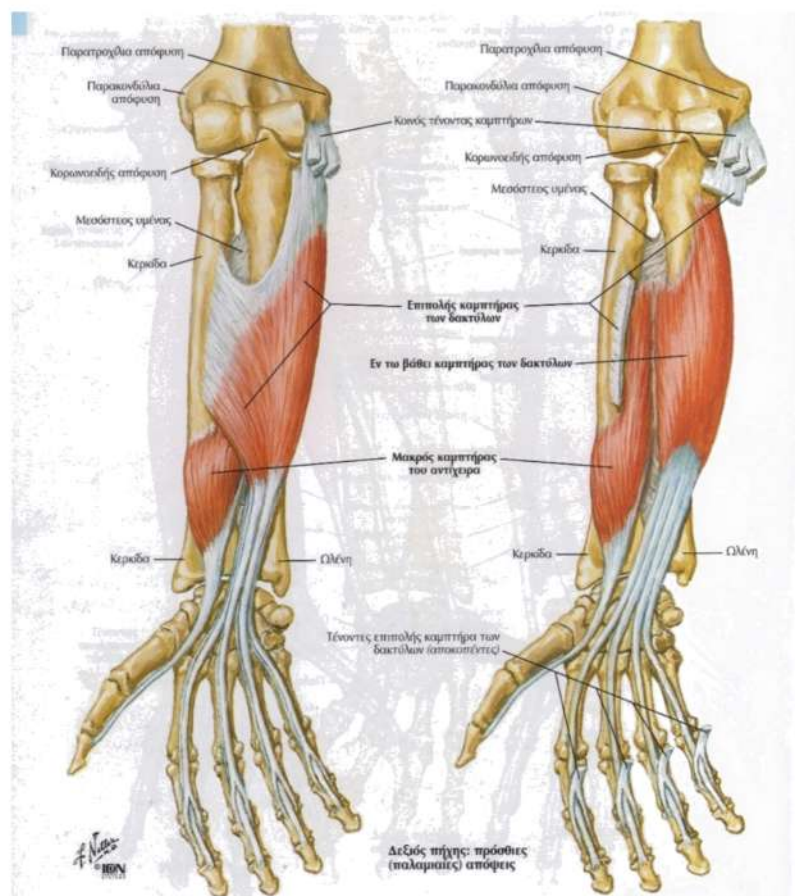
Με τον όρο κινησιολογία νοείται η διαδικασία μελέτης της ανθρώπινης κίνησης. Η ανατομική πλευρά της κινησιολογίας επαφίεται στη μελέτη και καταγραφή των ανατομικών στοιχείων του σκελετικού, μυϊκού και νευρικού

συστήματος. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας εξετάζονται αποκλειστικά τα ανατομικά στοιχεία του μυοσκελετικού συστήματος του χεριού. Επομένως, όταν γίνεται αναφορά στην κινησιολογία του χεριού, ουσιαστικά μελετώνται οι κινήσεις των αρθρώσεων (δαχτυλικές αρθρώσεις και αρθρώσεις αντίχειρα) και των μυών (τένοντες, μύες δαχτύλων και αντίχειρα).

1.6.1. Κάμψη και έκταση δαχτύλων χεριού

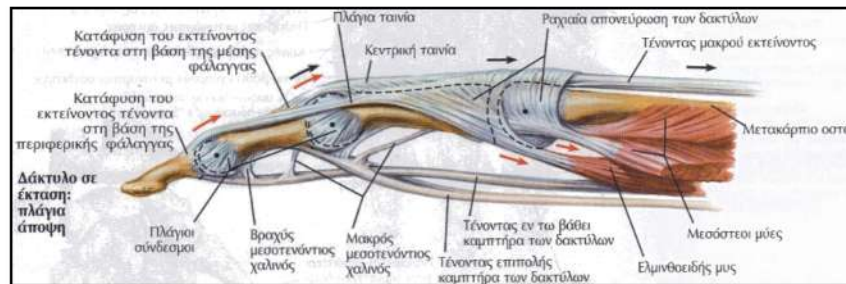
Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο υποκεφάλαιο, οι βασικές κινήσεις των χεριών είναι η κάμψη και η έκταση, σε συνδυασμό με την απαγωγή και την προσαγωγή. Στο συγκεκριμένο χωρίο, θα εξηγηθούν οι κινήσεις μυών και αρθρώσεων αναφορικά με την πρώτη ομάδα κινήσεων.

Η κάμψη των δαχτύλων είναι το αποτέλεσμα της δράσης δύο εξωγενών μυών, του επιπολής καμπτήρα των δαχτύλων (Flexor Digitorum Superficialis) και του εν τω βάθει καμπτήρα των δαχτύλων (Flexor Digitorum Profundus). Οι δύο αυτοί μύες περνούν από την πρόσθια πλευρά του αντιβραχίου και φθάνουν μέχρι τον καρπό. Στον καρπό ο κάθε μυς χωρίζεται σε τέσσερις τένοντες, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 9 Μύες και τένοντες για κάμψη δαχτύλων από πρόσθια άποψη (Netter, Hansen & Machado, 2019)

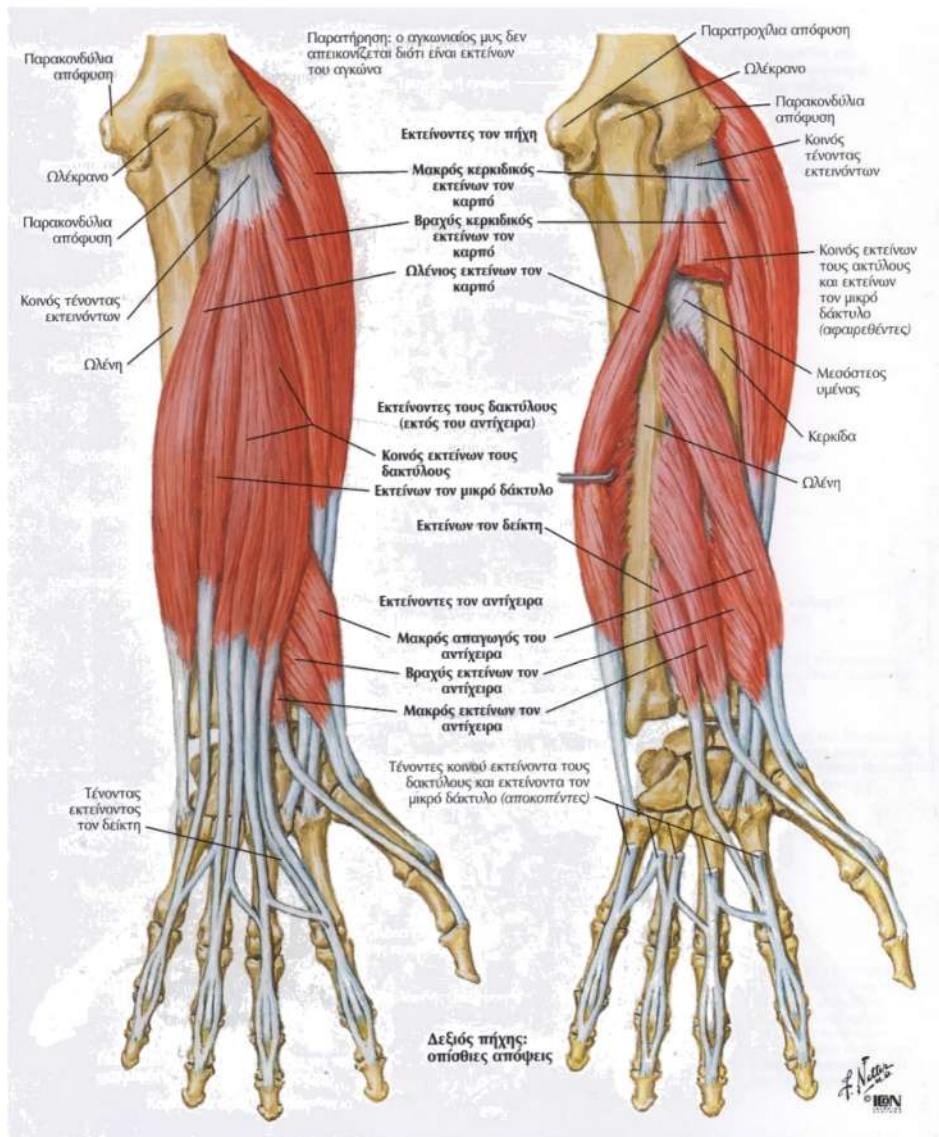
Στη συνέχεια, οι τένοντες διέρχονται μέσα από την παλάμη και καταλήγουν στα δάχτυλα. Ο επιπολής καμπτήρας των δαχτύλων προσκολλάται στη βάση της μέσης φάλαγγας, ενώ ο εν τω βάθει καμπτήρας προσκολλάται στη άπω φάλαγγα.



Εικόνα 10 Τένοντες και μύες του δαχτύλου του χεριού σε έκταση (Netter, Hansen & Machado, 2019)

Ο επιπολής καμπτήρας κάμπτει μόνο την εγγύς μεσοφαλαγγική άρθρωση σε αντίθεση με τον εν τω βάθει καμπτήρα ο οποίος κάμπτει και την εγγύς αλλά και την άπω μεσοφαλαγγική άρθρωση. Ο επιπολής καμπτήρας ενεργοποιείται όχι μόνο όταν απαιτείται κάμψη της άπω μεσοφαλαγγικής άρθρωσης, αλλά και συνδυαστικά με τον εν τω βάθει καμπτήρα, όταν απαιτείται η άσκηση περισσότερης δύναμης, όπως αναφέρουν οι Levangie, et. al. (Bundhoo, 2009).

Η έκταση των δαχτύλων προκύπτει από την κίνηση των εκτινόντων μυών των δαχτύλων. Συγκεκριμένα, οι μύες του οπίσθιου διαμερίσματος του αντιβραχίου θεωρούνται ως οι κύριοι εκτινόντες του χεριού και των δαχτύλων, ενώ κάποιοι εξ αυτών μπορούν να απάγουν και να προσάγουν τον αντίχειρα. Οι τένοντες του οπίσθιου διαμερίσματος του αντιβραχίου εκτείνονται από τον καρπό μέχρι και τη ράχη του χεριού (Netter, Hansen & Machado 2019).

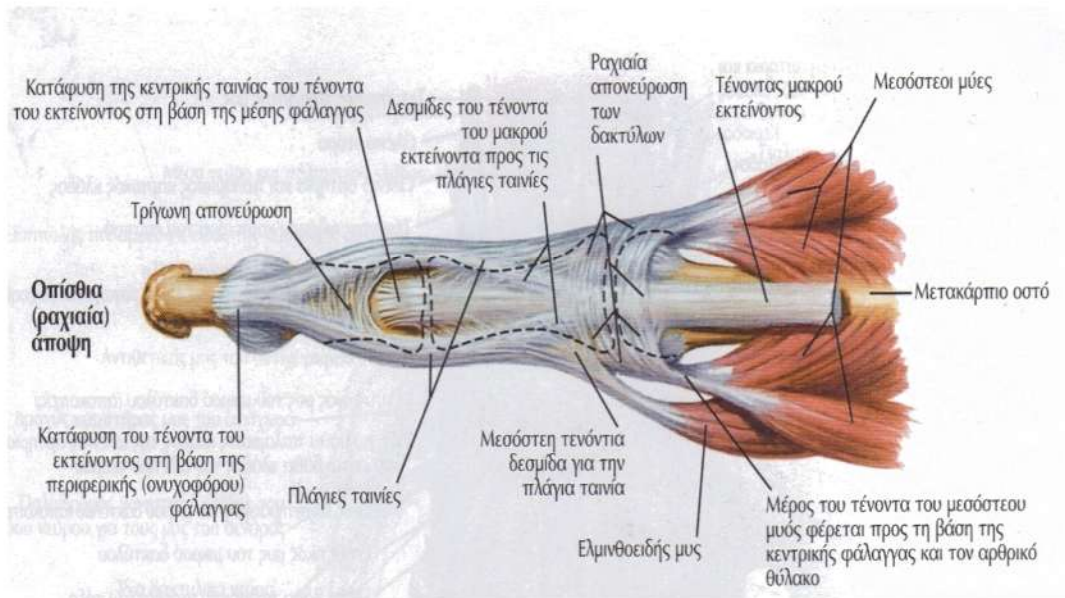


Εικόνα 11 Μύες και τένοντες για έκταση δαχτύλων από πρόσθια άποψη (Netter, Hansen & Machado, 2019)

Οι δύο κυριότεροι εκτίνοντες μύες των δαχτύλων είναι ο κοινός εκτίνων των δαχτύλων και ο εκτίνων του δείκτη. Οι εν λόγω μύες περνούν οπίσθια πάνω από τον καρπό και συγκρατούνται από μία ζώνη ινώδους ιστού. Ο κοινός εκτίνων μύς χωρίζεται σε 4 τμήματα στο ύψος του καρπού και στη συνέχεια εισέρχεται στα δάχτυλα μέσα από τη ραχιαία πλευρά του χεριού. Ο εκτίνων του δείκτη κατά την διαδικασία της έκτασης του δείκτη συγχωνεύεται με τον κοινό εκτίνων των δαχτύλων. Οι δύο αυτοί μύες είναι οι μόνοι μύες ικανοί να προκαλέσουν έκταση της μετά-καρποφαλαγγικής άρθρωσης, όπως αναφέρουν οι Levangie, et. al. στον Bundhoo (2009).

1.6.2. Απαγωγή και προσαγωγή δαχτύλων χεριού

Ακόμα ένας βασικός συνδυασμός κινήσεων είναι η απαγωγή και η προσαγωγή των δαχτύλων. Κατά την πραγματοποίηση των συγκεκριμένων κινήσεων των δαχτύλων οι απαραίτητοι ενδογενείς μύες είναι οι μεσόστεοι παλαμιαίοι και ραχιαίοι μύες. Οι ραχιαίοι μεσόστεοι μύες είναι 4, βρίσκονται μεταξύ των μετακαρπίων οστών στην ραχιαία πλευρά του χεριού και δρουν σε κινήσεις απαγωγής. Οι παλαμιαίοι μεσόστεοι μύες είναι 3, βρίσκονται μεταξύ των μετακαρπίων οστών, αλλά και στην παλαμιαία πλευρά και συμμετέχουν σε κινήσεις προσαγωγής. Τέλος, εξίσου σημαντικοί για την κίνηση των δαχτύλων θεωρούνται και οι 4 ελμινθοειδείς μύες, οι οποίοι προέρχονται από εν τω βάθει καμπτήρα.



Εικόνα 12 Μύες και τένοντες για απαγωγή και προσαγωγή δαχτύλου από οπίσθια άποψη (Netter, Hansen & Machado, 2019)

Κεφάλαιο 2^ο: Ρομποτικό χέρι

Αφού έχουν μελετηθεί λεπτομερώς τα βασικά στοιχεία, η ανατομία και η κινησιολογία του χεριού, ακολουθεί αναφορά στον ορισμό, τα υποσυστήματα του ρομποτικού χεριού.

2.1. Ορισμός ρομποτικού χεριού

Ένα ρομποτικό χέρι, ως συνολικό σύστημα, ορίζεται ως μια μηχανική διάταξη, η οποία αποτελείται από συνεργαζόμενα και ενσωματωμένα υποσυστήματα. Ένα τέτοιου είδους σύστημα είναι προγραμματιζόμενο και διαθέτει λειτουργίες και χαρακτηριστικά τα οποία είναι παρόμοια με αυτά του ανθρώπινου χεριού.

2.2. Υποσυστήματα ρομποτικού χεριού

Εξ ορισμού του, το ρομποτικό χέρι αποτελείται από συνεργαζόμενα υποσυστήματα, τα οποία δρουν αυτόνομα, αλλά και συνδυαστικά. Τα υποσυστήματα αυτά είναι το μηχανολογικό υποσύστημα, το υποσύστημα αίσθησης και το σύστημα ελέγχου και αναλύονται παρακάτω.

Το μηχανολογικό υποσύστημα ενσωματώνει την δυνατότητα του ρομποτικού χεριού για εκτέλεση έργου. Το συγκεκριμένο υποσύστημα αποτελείται από μια σειρά μηχανισμών οι οποίοι επιτρέπουν στο ρομποτικό χέρι να κινείται. Μερικοί από αυτούς τους μηχανισμούς είναι οι ακόλουθοι. Οι σύνδεσμοι, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την συγκρότηση του σκελετού του ρομποτικού χεριού και οι αρθρώσεις οι οποίες επιτρέπουν τη κίνηση μεταξύ των συνδέσμων και μπορεί να είναι περιστροφικές, σφαιρικές ή πρισματικές. Σημαντικοί μηχανισμοί είναι, επίσης, οι επενεργητές-κινητήρες με τους οποίους πραγματοποιείται η κίνηση των αρθρώσεων, καθώς και σύστημα μετάδοσης κίνησης, όπως ντίζες, οδοντωτοί τροχοί και τροχαλίες.

Το επόμενο υποσύστημα ενός ρομποτικού χεριού είναι το υποσύστημα αίσθησης. Το εν λόγω υποσύστημα καθιστά ικανό το ρομποτικό χέρι να συγκεντρώνει πληροφορίες, τόσο για το ίδιο, όσο και για το περιβάλλον που βρίσκεται. Οι μηχανισμοί που συνιστούν αυτό το υποσύστημα είναι τα όργανα μέτρησης, οι αισθητήρες και τα ηλεκτρονικά στοιχεία. Συγκεκριμένα, τα όργανα μέτρησης και οι αισθητήρες λαμβάνουν πληροφορίες από το περιβάλλον του ρομποτικού χεριού, όπως για παράδειγμα τη πίεση που επικρατεί αλλά και πληροφορίες σχετικά με τις θέσεις των αρθρώσεων.

Τελευταίο υποσύστημα είναι το σύστημα ελέγχου, το οποίο συνδυάζει με κατάλληλο τρόπο την αίσθηση και τη δράση προκειμένου το ρομποτικό χέρι να λειτουργεί αποτελεσματικά και να ανταποκρίνεται στις εντολές του χειριστή. Αναλυτικότερα, το σύστημα ελέγχου αποτελεί μια ηλεκτρονική μονάδα η οποία απαρτίζεται από το ηλεκτρονικό (hardware) και το λογισμικό (software) σκέλος. Το ηλεκτρονικό κομμάτι περιλαμβάνει, συνήθως, κάποιον υπολογιστή στον οποίο αποθηκεύεται το κύριο πρόγραμμα που θα εκτελεστεί προκειμένου να κινηθεί το ρομποτικό χέρι και τα ηλεκτρονικά επικοινωνίας μεταξύ του ελεγκτή, του μηχανικού

μέρους και του εξωτερικού περιβάλλοντος του συστήματος. Το λογισμικό χρησιμοποιείται, κυρίως, για τη δημιουργία σημάτων ελέγχου λαμβάνοντας υπόψιν μια σειρά μεταβλητών όπως για παράδειγμα τη θέση του ρομποτικού χεριού. Εκτός από το κύριο πρόγραμμα, το λογισμικό περιλαμβάνει και βοηθητικά προγράμματα όπως αυτά τα οποία είναι υπεύθυνα για τον έλεγχο λειτουργίας του ρομποτικού χεριού (Κωνσταντουδάκης, 2012).

2.3. Επενεργητές ρομποτικού χεριού

Ένα ανθρωπόμορφο ρομποτικό χέρι αποτελείται από συνδέσμους τις λεγόμενες φάλαγγες, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους με αρθρώσεις. Προκειμένου, όμως, να πραγματοποιήσει οποιαδήποτε κίνηση απαιτείται η συνδυαστική κίνηση των αρθρώσεων του. Η συγκεκριμένη κίνηση πραγματοποιείται με τη χρήση επενεργητών. Παράγοντες, οι οποίοι έχουν άμεση σχέση με τους επενεργητές είναι η πληθώρα των κινήσεων, η ταχύτητα απόκρισης, καθώς και η δύναμη την οποία μπορούν να ασκήσουν οι αρθρώσεις (Τσαντάκης, 2012).

Κατά την κατασκευή ενός ρομποτικού χεριού, υπάρχουν διάφορα είδη επενεργητών που μπορούν να αξιοποιηθούν. Ένα από αυτά τα είδη είναι οι σερβοκινητήρες. Πρόκειται, κατά κύριο λόγο, για μικρούς κινητήρες συνεχούς ρεύματος, οι οποίοι διαθέτουν ένα σύστημα γραναζιών και κύκλωμα ελέγχου ανάδρασης. Η κύρια χρήση τους αφορά στον έλεγχο του προσανατολισμού ή της ταχύτητας περιστροφής ενός άξονα ο οποίος μπορεί να κινεί μια άρθρωση ή οποιοδήποτε άλλο αντικείμενο είναι συνδεδεμένο με τον σερβοκινητήρα. Οι σερβοκινητήρες δυνάμται να κατηγοριοποιηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες, τους τυπικούς σερβοκινητήρες και τους σερβοκινητήρες ταχύτητας. Οι τυπικοί διαθέτουν περιορισμένο εύρος κίνησης και προσπαθούν να καταλήξουν σε μια θέση, η οποία καθορίζεται από το χρήστη. Οι σερβοκινητήρες ταχύτητας επιδιώκουν να καταλήξουν σε μια ταχύτητα που καθορίζεται από το χρήστη, ενώ το εύρος κίνησής τους περιλαμβάνει μια πλήρη περιστροφή, δηλαδή 360° μοίρες (Τσαντάκης, 2012).

2.4. Προϋποθέσεις κατασκευής ρομποτικού χεριού

Προκειμένου να μελετηθεί, να σχεδιαστεί, να κατασκευαστεί και να ελεγχθεί ένα προσθετικό ρομποτικό χέρι κρίνεται σκόπιμο να λαμβάνονται υπόψιν ποικίλες παράμετροι. Οι εν λόγω περιορισμοί που αφορούν στην κατασκευή του είναι πολλοί και συχνά δύσκολο να αρθούν. Η εμφάνιση, το σχήμα, η ευελιξία, το βάρος και η τιμή αποτελούν τις κύριες προϋποθέσεις.

Αναλυτικότερα, η εμφάνιση είναι ένα βασικό χαρακτηριστικό, καθώς πρέπει να είναι ελκυστική, αλλά και να φέρει χαρακτηριστικά τα οποία θα μοιάζουν με εκείνα του ανθρώπινου χεριού. Ο ανθρωπομορφισμός, λοιπόν, είναι βασικό κριτήριο και συμβάλλει στην αποδοχή της συσκευής από το χρήστη. Ο ανθρωπομορφισμός μπορεί να περιγραφεί ως η ικανότητα του ρομπότ-τελικού τελεστή για μίμηση χαρακτηριστικών του ανθρώπινου χεριού (Puig et al., 2008). Επίσης, τόσο η στατική όσο και η δυναμική εμφάνιση της συσκευής είναι σημαντική.

Το σχήμα και γενικότερα η κατασκευή σαν σύνολο πρέπει να είναι συμπαγής και εργονομική. Το πλήθος των χρηστών ποικίλλει ως προς το μήκος του υπολειπόμενου άκρου τους, ως άμεσο επακόλουθο η συσκευή θα πρέπει να περικλείει τις μονάδες κίνησης και τις πηγές ενέργειας της εντός του προφίλ του χεριού.

Ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά του ρομποτικού χεριού είναι και η ικανότητα και η ευελιξία του. Με άλλα λόγια, είναι βασική προϋπόθεση η δυνατότητα χειρισμού αντικειμένων με ευκολία, αλλά και η δυνατότητα αλλαγής προσανατολισμού και θέσης.

Σημαντικό, επίσης, κριτήριο κατασκευής είναι το βάρος του. Κάθε ρομποτικό χέρι, το οποίο χρησιμοποιείται ως προσθετικό άκρο κρίνεται, αναγκαίο να είναι ελαφρύ. Δεδομένου ότι η συσκευή προσαρμόζεται στο άκρο του χειριστή ένα μεγάλο βάρος θα περιορίζε σημαντικά το εύρος κινήσεων του. Ένας επιπλέον κίνδυνος ενός βαριού χεριού είναι ότι θα μπορούσε να επιφέρει δυσφορία στο χειριστή ή και ακόμη να εμποδίσει τη ροή του αίματος.

Τελευταίος, αλλά εξίσου σημαντικός παράγοντας σχεδιασμού και κατασκευής ενός ρομποτικού χεριού είναι το κόστος του. Οποιοδήποτε προσθετικό χέρι θα πρέπει να είναι κατάλληλο να αξιοποιηθεί από χρήστες ενός ευρύ οικονομικού φάσματος. Αυτό σημαίνει ότι το κόστος της συσκευής πρέπει να έχει ανταγωνιστική και ταυτόχρονα προσιτή τιμή (Kyberd, Light & Chappell, 2001).

2.5. Υφιστάμενα ανθρωπόμορφα ρομποτικά χέρια

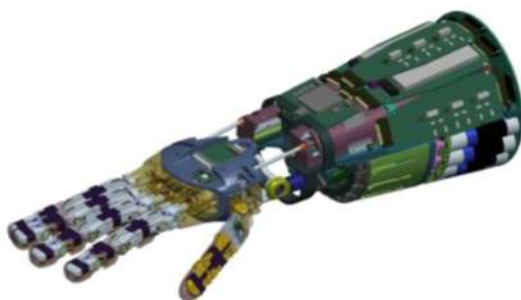
Τα τελευταία χρόνια έχουν κατασκευαστεί πολλά ανθρωπόμορφα ρομποτικά χέρια από διάφορες ερευνητικές εταιρίες, τα οποία προσπαθούν να προσεγγίσουν την ανατομία, την ευελιξία, αλλά και την επιδεξιότητα του ανθρώπινου χεριού. Τα πιο ευρέως διαδεδομένα είναι τα ακόλουθα.

Πρώτο ρομποτικό χέρι που θα αναφερθεί είναι το Shadow Dexterous Hand που κατασκευάστηκε από τη Shadow Robot Company Ltd. Το συγκεκριμένο ανθρωπόμορφο χέρι μπορεί να πραγματοποιήσει 24 κινήσεις με το κάθε δάχτυλο να κινείται ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα. Διαθέτει 20 βαθμούς ελευθερίας και 129 αισθητήρες για μεγαλύτερη ακρίβεια κινήσεων. Το χέρι χρησιμοποιεί πνευματικούς μυς, οι οποίοι βρίσκονται κάτω από τον καρπό, ενώ η δύναμη που ασκείται ελέγχεται με ακρίβεια από αισθητήρες (Shadow Robot Company, 2021).



Εικόνα 13 Το Shadow Dexterous Hand της Shadow Robot Company Ltd (Shadow Robot Company, 2021)

Ένα ακόμα προσθετικό χέρι που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από τη NASA είναι το Robonaut Hand. Το Robonaut διαθέτει συνολικά 14 βαθμούς ελευθερίας και αποτελείται από το αντιβράχιο στο οποίο στεγάζονται και οι 14 κινητήρες του, καθώς και τα ηλεκτρονικά του μέρη (Bibby, 2008). Επίσης, διαθέτει ένα καρπό με δύο βαθμούς ελευθερίας και πέντε δάχτυλα με δώδεκα βαθμούς ελευθερίας (Bridgwater, Ihrke, 2012).



Εικόνα 14 Το Robonaut Hand της NASA (Bridgwater, Ihrke, 2012)

Αξιοσημείωτη είναι, επίσης, και η αναφορά στην κατασκευή του EHI Milano Hand από την Prensilia Srl. Το EHI-Milano είναι ένα ανθρωπόμορφο χέρι με 5 δάχτυλα, αλλά και αυτόνομο με 6 ηλεκτρικούς κινητήρες. Κάθε κινητήρας ενεργοποιεί και έναν βαθμό ελευθερίας όπως για παράδειγμα για την έκταση και κάμψη του δείκτη. Κάθε δάχτυλο έχει δύο φάλαγγες που συνδέονται μέσω δύο αρθρώσεων, την εγγύς φάλαγγα, που είναι κατασκευασμένη από αλουμίνιο και την άπω φάλαγγα, που είναι κατασκευασμένη από καουτσούκ. Κάθε δάχτυλο ενεργοποιείται μέσω ενός τένοντα που διέρχεται μέσα από τις φάλαγγες και τυλίγεται γύρω από τις τροχαλίες στις αρθρώσεις. Κατά το κλείσιμο του γύρω από ένα αντικείμενο, το δάχτυλο προσαρμόζεται αυτόματα σε αυτό (Prensilia. S.r.l, 2021).



Εικόνα 15 Το EHI Milano Hand της Prensilia Srl (Prensilia. S.r.l, 2021)

Μία επιπλέον χρήσιμη κατασκευή είναι εκείνη της Elumotion Ltd. Το Elu2-Hand πρόκειται για ένα ανθρωπόμορφο ρομποτικό χέρι, το οποίο έχει σχεδιαστεί σε ανθρώπινη κλίμακα. Είναι ικανό να προσεγγίζει τις πραγματικές κινήσεις των χεριών με ανθρώπινες ταχύτητες και γι' αυτό το λόγο είναι ιδανικό για αλληλεπίδραση με ανθρώπους. Το συγκεκριμένο χέρι διαθέτει συνολικά 9 βαθμούς ελευθερίας που

ενεργοποιούνται από σερβοκινητήρες, οι οποίοι βρίσκονται μέσα στον όγκο του χεριού (Elumotion, 2016).



Εικόνα 16 Το Elu2-Hand από την Elumotion Ltd (Elumotion, 2016)

Ένα ακόμα προσθετικό χέρι που θα αναφερθεί είναι το MechaTE Robot της Custom Entertainment Solutions. Το συγκεκριμένο ρομποτικό χέρι αναπτύχθηκε για την ικανοποίηση ενός ευρύ φάσματος απαιτήσεων. Ο σχεδιασμός του επιτρέπει στον χειριστή να το κινεί με ταχύτητα και ευκολία, καθώς διαθέτει μόνο 5 σερβοκινητήρες, ενώ παράλληλα παρέχει ρεαλιστική κίνηση μέσω των 14 αρθρώσεων του (MechaTE, 2021).



Εικόνα 17 Το MechaTE Robot της Custom Entertainment Solutions (MechaTE, 2021)

2.6. Χρήσεις και πεδίο εφαρμογών ρομποτικού χεριού

Δεδομένου ότι, τα ρομποτικά χέρια ποικίλουν αναφορικά με τον σχεδιασμό και τις προδιαγραφές τους, έχουν διάφορες εφαρμογές. Οι πιο βασικές από αυτές είναι ως προσθετικά μέλη, για χρήση σε ανθρωπόμορφα και μη ρομπότ και για ικανότητα αρπαγής σε ρομποτικούς βραχίονες.

Το κύριο πεδίο εφαρμογής των ρομποτικών χεριών είναι ως προσθετικά μέλη. Τα ρομποτικά χέρια που λειτουργούν ως προσθετικά μέλη αποσκοπούν στην αντικατάσταση των ακρωτηριασμένων άκρων των χειριστών τους. Ως προσθετικά

μέλη οι συσκευές αυτές πρέπει να ανταποκρίνονται, τόσο στις λειτουργικές όσο και στις αισθητικές απαιτήσεις του χειριστή.

Όσον αφορά τη χρήση τους σε ανθρωπόμορφα και μη ρομπότ, τα ρομποτικά χέρια σε αυτό τον τομέα καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Συγκεκριμένα, δύνανται να αξιοποιηθούν ως αντικείμενο επιστημονικής έρευνας από διάφορους επιστημονικούς τομείς ή να χρησιμοποιηθούν ακόμη και ψυχαγωγικούς σκοπούς.

Μία ακόμα χρήση των ρομποτικών χεριών είναι η ικανότητα αρπαγής σε ρομποτικούς βραχίονες. Με τη συγκεκριμένη αξιοποίηση του ρομποτικού χεριού αυξάνονται οι δυνατότητες, αλλά και το εύρος κινήσεων ενός ρομποτικό βραχίονα. Έτσι, με τη βοήθεια ρομποτικών χεριών ένας βραχίονας μπορεί να εκτελέσει κινήσεις όχι μόνο περισσότερες σε αριθμό, αλλά και με μεγαλύτερη ακρίβεια. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της συγκεκριμένης εφαρμογής είναι οι χειρουργικές επεμβάσεις στον τομέα της ιατρικής.

Κεφάλαιο 3^ο: Υποχωρητικοί Μηχανισμοί

3.1. Ορισμός υποχωρητικών μηχανισμών

Ένας υποχωρητικός μηχανισμός μπορεί να οριστεί ως ένας ολόσωμος εύκαμπτος φορέας ο οποίος χρησιμοποιεί ελαστική παραμόρφωση για τη μετάδοση δύναμης και κίνησης. Η κίνηση του προέρχεται κατά κύριο λόγο από τη σχετική ευκαμψία των μελών του παρά από τις συμβατικές αρθρώσεις του μόνο (Shuib, Ridzwan & Kadarman, 2007).

3.2. Σύθεση/design υποχωρητικών μηχανισμών

Όσον αφορά τον σχεδιασμό ενός υποχωρητικού μηχανισμού, διακρίνονται δύο διαφορετικές προσεγγίσεις. Η πρώτη προσέγγιση βασίζεται στην κινηματική, ενώ η άλλη στηρίζεται στη δομική βελτιστοποίηση.

Στην προσέγγιση, που βασίζεται στην κινηματική, τα τμήματα του μηχανισμού απεικονίζονται ως άκαμπτοι σύνδεσμοι οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με στροφικές αρθρώσεις ενώ παράλληλα υπάρχουν και στρεπτικά ελατήρια τα οποία είναι υπεύθυνα για την αντίσταση στην στρέψη. Η σταθερά του ελατηρίου καθώς και η τοποθέτηση τους στο μοντέλο εξαρτάται από τα τμήματα από τα οποία αποτελείται το μοντέλο. Η συγκεκριμένη προσέγγιση προτιμάται σε μηχανισμούς με μη γραμμική εκτροπή, ενώ προϋποθέτει ότι επιλέγεται εξ αρχής ο αρθρωτός μηχανισμός (Shuib, Ridzwan & Kadarman, 2007).

Η επόμενη προσέγγιση έχει ως βάση τη δομική βελτιστοποίηση του υποχωρητικού μηχανισμού, σύμφωνα με την οποία, δεν απαιτείται η εξ αρχής επιλογή ενός αρθρωτού μηχανισμού. Αντ' αυτού επικεντρώνεται στον προσδιορισμό της τοπολογίας, του μεγέθους και του σχήματος του μηχανισμού. Για τον προσδιορισμό της τοπολογίας του μηχανισμού η διαδικασία της βελτιστοποίησης ξεκινά από την επιλογή του υλικού στο οποίο εφαρμόζονται εξωτερικά φορτία και τοποθετούνται κατάλληλες στηρίξεις. (Shuib, Ridzwan & Kadarman, 2007).

3.3. Πλεονεκτήματα υποχωρητικών μηχανισμών

Οι υποχωρητικοί μηχανισμοί χαρακτηρίζονται από ένα φάσμα πλεονεκτημάτων, συμπεριλαμβανομένων της εύκολης συναρμολόγησης, της απλοποιημένης κατασκευής, της αυξημένης απόδοσης, της υψηλής ακρίβειας και του μικρού μεγέθους και βάρους τους. Το σύνολο των πλεονεκτημάτων τους απορρέουν από τη δυνατότητα Η ενσωμάτωσης των διαφόρων λειτουργιών σε λιγότερα μέρη.

Αρχικά τα λιγότερα βήματα που απαιτούνται για την συναρμολόγηση, τα λιγότερα εξαρτήματα, αλλά και η δυνατότητα απλοποιημένης κατασκευής έχει ως αποτέλεσμα σημαντικά μικρότερα κόστη. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα αυξημένης απόδοσης. Αυτή περιλαμβάνει υψηλή ακρίβεια λόγω μειωμένης φθοράς ή εξουδετερωμένης αντίδρασης. Επιπλέον, η δυνατότητα σμίκρυνσης των

συγκεκριμένων μηχανισμών τους καθιστά εξαιρετικά ανταγωνιστικούς. Για παράδειγμα, τα μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS) κατασκευάζονται συχνά από τους εν λόγω μηχανισμούς, οι οποίοι βοηθούν στην διευκόλυνση της κίνησης ακόμη και σε περιπτώσεις όπου η γεωμετρία του αντικειμένου επιβάλλει πολλούς περιορισμούς. Τέλος, το μικρό τους βάρος είναι χρήσιμο στις μεταφορές, αλλά και στον σχεδιασμό αντικειμένων που απαιτούν μικρό βάρος, όπως στα διαστημόπλοια (Howell, Magleby & Olsen, 2013).

3.4. Περιορισμοί υποχωρητικών μηχανισμών

Εκτός από τα θετικά σημεία που χαρακτηρίζουν τους υποχωρητικούς μηχανισμούς, η χρήση τους συνεπάγεται και ορισμένους περιορισμούς, όπως η διάρκεια ζωής τους, το εύρος κίνησής τους και η δυσκολία περιγραφής συμπεριφοράς και κίνησης.

Ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα των υποχωρητικών μηχανισμών πηγάζει από τον τρόπο λειτουργίας τους και πρόκειται για τη μικρή διάρκεια ζωής τους. Η κίνησή τους προέρχεται από την κάμψη των εύκαμπτων μερών τους. Τα εν λόγω μέρη υφίστανται πίεση με αποτέλεσμα να δημιουργούνται φορτία κόπωσης μέσα από την επανάληψη των κινήσεων, τα οποία μειώνουν την διάρκεια ζωής των μηχανισμών.

Επόμενο αρνητικό σημείο τους αποτελεί και το μειωμένο εύρος κίνησης των υποχωρητικών μηχανισμών σε σχέση με μηχανισμούς τύπου άκαμπτου συνδέσμου (rigid – link).

Τέλος, μειονέκτημα συνιστά και η δυσκολία περιγραφής συμπεριφοράς και κίνησης. Η ενσωμάτωση διαφορετικών λειτουργιών σε λιγότερα μέρη να μην αποφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, αλλά απαιτεί παράλληλα την μελέτη της συμπεριφοράς και της κίνησης των μηχανισμών μια διαδικασία, η οποία αδυνατεί να περιγραφεί εύκολα από γραμμικές εξισώσεις (Howell, Magleby & Olsen, 2013).

3.5. Πεδία εφαρμογών υποχωρητικών μηχανισμών

Οι υποχωρητικοί μηχανισμοί βρίσκουν εφαρμογή σε ένα ευρύ πεδίο που περιλαμβάνει τα εξαρτήματα στον τομέα των μεταφορών, των εργαλείων χειρός, της ιατρικής και της εμβιομηχανικής, των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών, καθώς και της ρομποτικής.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής των υποχωρητικών μηχανισμών στον τομέα των μεταφορών αποτελεί το φτερό του αεροπλάνου. Χρησιμοποιώντας συμβατικούς μηχανισμούς το φτερό του αεροπλάνου έχει τη δυνατότητα να κάμπτεται και να στρίβει ολόσωμα, εξαλείφοντας άλλα εξαρτήματα όπως τα πτερύγια (flaps) και τα αερόφρενα. Με αυτόν το τρόπο απλοποιείται η διαδικασία κατασκευής και αυξάνεται η απόδοση του εξαρτήματος.

Μία επόμενη εφαρμογή των υποχωρητικών μηχανισμών είναι σε εργαλεία χειρός. Εξαιτίας της δυνατότητας των συμβατικών μηχανισμών να προσαρμόζονται και σε κατασκευές μικρής κλίμακας, μπορούν να εφαρμοσθούν και σε διάφορα

εργαλεία χειρός. Σημαντικά πλεονεκτήματά τους στην εν λόγω εφαρμογή είναι η σημαντική μείωση των κραδασμών, γεγονός που καθιστά τα εργαλεία πιο αποδοτικά και εύχρηστα για τον χειριστή.

Σημαντική είναι, επίσης, η εφαρμογή τους σε ιατρική και εμβιομηχανική. Εξαιτίας της ομοιότητας που παρουσιάζουν οι συμβατικοί μηχανισμοί με τα ανθρώπινα άκρα όσον αφορά τις αντιστάσεις, αλλά και την κινηματική τους συμπεριφορά καθίστανται κατάλληλοι για την ανάπτυξη προσθετικών άκρων. Παράλληλα, στον τομέα της εμβιομηχανικής δύνανται να αξιοποιηθούν ως αρθρώσεις σε γόνατο ή ισχίο, αλλά και για την κατασκευή τεχνητής καρδιακής βαλβίδας, που διευκολύνει τη ροή του αίματος.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα συμβατικών μηχανισμών στον τομέα των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών αποτελούν οι μηχανισμοί MEMS. Οι εν λόγω μηχανισμοί πρόκειται για συσκευές με μηχανολογικές και ηλεκτρικές εφαρμογές όπως για παράδειγμα για την κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Αξιοσημείωτη είναι, επίσης, η εφαρμογή των υποχωρητικών μηχανισμών στον τομέα της ρομποτικής. Συγκεκριμένα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως οι προσαρμοστικές δομές, οι μικρο- και μακρο-κατασκευές, οι συσκευές δοκιμής φθοράς, τα ρομποτικά τερματικά εξαρτήματα κλπ. Αξίζει να σημειωθεί και η χρήση μηχανισμών σχεδόν σταθερής δύναμης (near constant force) οι οποίοι εμφανίζουν απόκλιση μόνο 2% σε δυνάμεις συμπίεσης γεγονός που καθιστά τους υποχωρητικούς μηχανισμούς ανταγωνιστική επιλογή στο τομέα της ρομποτικής (Shuib, Ridzwan & Kadarman, 2007).

3.6. Επιλογή υποχωρητικών μηχανισμών στην προσθετική

Οι προσθετικές συσκευές είναι συνήθως ακριβείς και βραχύβιες και μόνο οι πιο ακριβείς παρέχουν απόκριση παρόμοια με την ανθρώπινη. Οι υποχωρητικοί μηχανισμοί, και ειδικότερα οι υποχωρητικές αρθρώσεις, παρέχουν αντίσταση παρόμοια με ένα ανθρώπινο άκρο λόγω της μη γραμμικής τους φύσης. Έτσι, καθώς το καλώδιο στην άρθρωση κάμπτεται, η ακαμψία αυξάνεται, ενώ στις περιπτώσεις των τυπικών μηχανικών συσκευών η ακαμψία είναι σταθερή (Shuib, Ridzwan & Kadarman, 2007). Επιπλέον, τα πλεονεκτήματά των υποχωρητικών αρθρώσεων σε σύγκριση με τα παραδοσιακά κινηματικά ζεύγη περιλαμβάνουν την απουσία φθοράς, αντίδρασης και τριβής, ενώ εξασφαλίζουν μείωση μεγέθους και βάρους (Melchiorri, Palli, Berselli & Vassura, 2013).

3.7. Απαιτήσεις κατασκευής υποχωρητικών μηχανισμών

Κατά την κατασκευή των υποχωρητικών μηχανισμών, κρίνεται αναγκαίο να πληρούνται ορισμένες προϋποθέσεις, όπως η δύναμη, η ευελιξία ή και η ακαμψία.

Ένας υποχωρητικός μηχανισμός πρέπει να διαθέτει ευκαμψία, αλλά ταυτόχρονα να είναι αρκετά στιβαρός – ανθεκτικός. Η ευκαμψία θεωρείται απαραίτητη για την κινηματική διαμόρφωση των μηχανισμών, έτσι ώστε να παρέχεται η απαιτούμενη μετατόπιση στο σημείο του ενδιαφέροντος. Επιπλέον, ένας

υποχωρητικός μηχανισμός πρέπει να είναι αρκετά στιβαρός για να μπορεί να αντιστέκεται σε εξωτερικά φορτία. (Mahdi, 2014).

Ένα τυπικό παράδειγμα εύκαμπτου και στιβαρού μηχανισμού είναι το ενδοσκόπιο. Το ενδοσκόπιο πρέπει να είναι εύκαμπτο για να υποστεί την απαιτούμενη παραμόρφωση κατά την είσοδο και κίνησή του στο ανθρώπινο σώμα, αλλά και αρκετά στιβαρό, ώστε να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα οποιουδήποτε τραυματισμού από τη χρήση του (Howell, Magleby & Olsen, 2013).

Εκτός από την ευκαμψία, η δύναμη δύνανται να συνδυάζεται σε διάφορες κατασκευές με την ακαμψία. Με άλλα λόγια, κρίνεται σε ορισμένες περιπτώσεις αναγκαίο οι κατασκευές να είναι άκαμπτες και στιβαρές, δηλαδή να αντέχουν σε εξωτερικά φορτία, όπως για παράδειγμα μια γέφυρα. Πολλές φορές οι έννοιες στιβαρότητα και ακαμψία συγχέονται, ωστόσο διαφοροποιούνται σημαντικά. Η στιβαρότητα, αφενός, σχετίζεται με την αντίσταση στην αστοχία (failure), αφετέρου η ακαμψία σχετίζεται με την αντίσταση στην απόκλιση – εκτροπή (deflection) (Howell, Magleby & Olsen, 2013).

Σε κάθε περίπτωση η ευκαμψία ή η ακαμψία ενός μηχανισμού είναι απόρροια τριών βασικών παραμέτρων, της επιλογής του κατάλληλου υλικού, της γεωμετρίας του μηχανισμού και των συνθηκών φόρτισης (Howell, Magleby & Olsen, 2013).

Κεφάλαιο 4^ο: Μεθοδολογία

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο πρόκειται να δημιουργηθεί ένα κινηματικό μοντέλο για το ανθρώπινο χέρι. Το κινηματικό αυτό μοντέλο θα χρησιμοποιηθεί, έπειτα, για την αναπαράσταση του δαχτύλου του δείκτη. Για την αναπαράσταση του δείκτη χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Matlab και αναπτύχθηκε ο απαραίτητος πρωτότυπος κώδικας. Τέλος, για την τρισδιάστατη απεικόνιση κίνησης εγκλωβισμού μια σφαίρας χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη SynGrasp.

Προκειμένου να βρεθεί η θέση και ο προσανατολισμός ενός αντικειμένου στο χώρο κρίνεται σκόπιμο το αντικείμενο να ενσωματωθεί σε ένα σύστημα συντεταγμένων. Στη συνέχεια, θα περιγραφεί η θέση και ο προσανατολισμός του αντικειμένου ως προς κάποιο αδρανειακό πλαίσιο αναφοράς. Η περιγραφή της θέσης γίνεται με ένα διάνυσμα θέσης ενώ η περιγραφή του προσανατολισμού με ένα πίνακα στροφής. Η κινηματική ανάλυση πραγματοποιήθηκε προκειμένου να περιγράψει με μαθηματικό τρόπο την γωνιακή θέση της κάθε άρθρωσης και την θέση των ακροδάχτυλων.

4.1. Κινηματική ανάλυση

Με απώτερο σκοπό την περιγραφή θέσης των αρθρώσεων και των ακροδαχτύλων, θα πραγματοποιηθεί η κινηματική ανάλυση στη συνέχεια της παρούσας εργασίας. Ωστόσο, πριν από τη διατύπωση του ευθύ και του αντίστροφου προβλήματος κινηματικής, κρίνεται σκόπιμο να διατυπωθεί ο ορισμός της και να γίνει αναφορά στα δύο είδη της.

4.1.1. Ορισμός κινηματικής ανάλυσης

Η κινηματική ανάλυση μελετά την κίνηση των σωμάτων χωρίς να λαμβάνει υπόψιν την μάζα τους καθώς και τις δυνάμεις που προκαλούν την κίνηση. Συγκεκριμένα η κινηματική ανάλυση των ρομπότ αναφέρεται στην αναλυτική μελέτη της κίνησης ενός χειριστή ρομπότ (Cubero, 2007).

Η διαμόρφωση των κατάλληλων μοντέλων κινηματικής για ένα μηχανισμό ρομπότ είναι πολύ σημαντική για την ανάλυση της συμπεριφοράς των βιομηχανικών χειριστών. Οι κυριότεροι χώροι που χρησιμοποιούνται στην κινηματική μοντελοποίηση των χειριστών είναι δύο, ο καρτεσιανός χώρος και χώρος του κουατερνίου. Ο μετασχηματισμός μεταξύ δύο καρτεσιανών συντεταγμένων μπορεί να αναλυθεί σε μια περιστροφή και μια μεταφορά. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι αναπαράστασης της περιστροφής με τον πιο διαδεδομένο στον τομέα της ρομποτικής να είναι αυτός του ορθοκανονικού πίνακα (4×4). Σύμφωνα με τους Denavit και Hartenberg, ένας γενικός μετασχηματισμός μεταξύ 2 αρθρώσεων απαιτεί 4 παραμέτρους οι οποίες είναι γνωστοί ως παράμετροι Denavit και Hartenberg (DH) και θεωρούνται πρότυπο για την περιγραφή της ρομποτικής κινηματικής (Cubero, 2007).

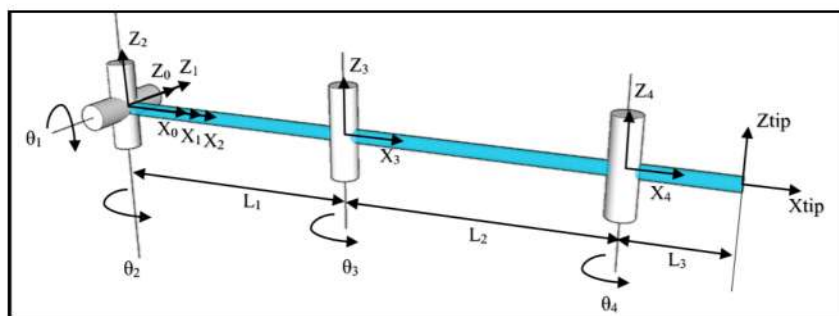
4.1.2. Ορθή και αντίστροφη κινηματική ανάλυση

Η κινηματική ανάλυση των ρομπότ μπορεί να διακριθεί σε ευθεία και αντίστροφη. Η ευθεία κινηματική ανάλυση αποσκοπεί στον καθορισμό της θέσης και του προσανατολισμού του τελικού στοιχείου δράσης συναρτήσει των μεταβλητών των αρθρώσεων. Αντίθετα, ο σκοπός της αντίστροφης κινηματικής είναι ο υπολογισμός των μεταβλητών των αρθρώσεων με δεδομένη την θέση και τον προσανατολισμό του τελικού στοιχείου δράσης (Μαραγκουδάκης, 2017).

4.1.3. Επίλυση ευθύ κινηματικού προβλήματος

Για την επίλυση του ευθύ κινηματικού προβλήματος είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της θέσης και του προσανατολισμού του κάθε δαχτύλου ως προς ένα πλαίσιο αναφοράς. Στη παρούσα διπλωματική εργασία, το κάθε τεχνητό δάχτυλο διαμορφώθηκε ως ένα ρομποτικό δάχτυλο 3 συνδέσμων σε μια κοινή βάση που αντιστοιχεί στη παλάμη. Ενδεικτικά παρακάτω αναλύεται το ευθύ κινηματικό πρόβλημα για το δάχτυλο του δείκτη. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 18 το δάχτυλο αποτελείται από 4 αρθρώσεις θ_1 , θ_2 , θ_3 και θ_4 και 3 συνδέσμους L_1 , L_2 και L_3 . Συγκεκριμένα, η πρώτη άρθρωση, η μετά- καρποφαλαγγική άρθρωση (MCP), είναι αυτή που συνδέει το δάχτυλο με τη παλάμη και έχει 2 βαθμούς ελευθερίας προσαγωγή/απαγωγή και έκταση/κάμψη, επειδή η εν λόγω άρθρωση επιτρέπει συνολικά 4 κινήσεις στο δάχτυλο για την επίλυση του προβλήματος του έχουν αποδοθεί η θ_1 και θ_2 . Η επόμενη άρθρωση θ_3 είναι η εγγύς μεσοφαλαγγική άρθρωση (PIP), η οποία επιτρέπει την έκταση και κάμψη. Ακολουθεί η άπω μεσοφαλαγγική άρθρωση (DIP), η οποία αντιστοιχεί στην θ_4 . Στο τέλος του συνδέσμου L_3 βρίσκεται η άκρη του δαχτύλου (tip). Έχοντας ως δεδομένα τα μήκη των συνδέσμων καθώς και τις γωνίες των αρθρώσεων πρέπει να υπολογιστούν η θέση και ο προσανατολισμός του δαχτύλου του δείκτη.

Το πρώτο βήμα για τη γεωμετρική διαμόρφωση του τεχνητού δαχτύλου είναι η αντιστοίχιση των πλαισίων των συντεταγμένων σε κάθε άρθρωση. Το πλαίσιο [0] αποδίδεται στο σημείο όπου το δάχτυλο συναντά την παλάμη. Αυτό συμπίπτει με το πλαίσιο [1] που έχει εκχωρηθεί στην άρθρωση θ_1 (MCP) και με το πλαίσιο [2] που έχει εκχωρηθεί στην άρθρωση θ_2 . Τα πλαίσια [3] και [4] βρίσκονται στις αρθρώσεις θ_3 (PIP) και θ_4 (DIP) αντίστοιχα, ενώ το πλαίσιο [tip] αντιστοιχεί στο άκρο του δείκτη.



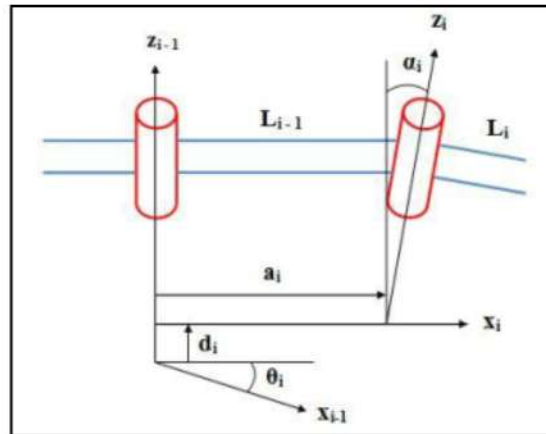
Εικόνα 18 Μοντέλο δείκτη, όπως δημιουργήθηκε από τον συγγραφέα της διπλωματικής μέσω Sketch Up

Οι συντεταγμένες των πλαισίων ορίζονται ως εξής:

- Z_i , τα σημεία κατά μήκος του άξονα περιστροφής της άρθρωσης i
- X_i , βρίσκεται κατά μήκος της κοινής καθέτου μεταξύ δυο διαδοχικών αξόνων
- Y_i , ολοκληρώνει το δεξιό σύστημα συντεταγμένων

Οι μετασχηματισμοί μεταξύ των συνδέσμων είναι ομοιογενείς πίνακες οι οποίοι προέρχονται από τέσσερις παραμέτρους τις λεγόμενους παραμέτρους Denavit και Hartenberg (DH):

- α_i : η γωνία μεταξύ των Z_i και Z_{i+1} μετρούμενη ως προς X_i (γωνία κάμψης)
- θ_i : η γωνία μεταξύ των X_{i-1} και X_i μετρούμενη ως προς Z_i (γωνία άρθρωσης)
- d_i : η απόσταση μεταξύ των X_{i-1} και X_i μετρούμενη κατά μήκος του Z_i (απομάκρυνση)
- a_i : η απόσταση μεταξύ των Z_i και Z_{i+1} μετρούμενη κατά μήκος του X_i (μήκος συνδέσμου)



Εικόνα 19 Σχηματική απεικόνιση των παραμέτρων Denavit και Hartenberg (Κριτσωτάκης, 2012)

Με βάση τα παραπάνω συμπληρώνεται ο πίνακας των παραμέτρων DH για το δάχτυλο του δείκτη.

| | Γωνία κάμψης | Μήκος συνδέσμου | Απομάκρυνση | Γωνία άρθρωσης | |
|-----|--------------|-----------------|-------------|----------------|-------|
| i | α | a | d | θ_i | $i+1$ |
| 0 | 0 | 0 | 0 | θ_1 | 1 |
| 1 | 90 | 0 | 0 | θ_2 | 2 |
| 2 | 0 | L1 | 0 | θ_3 | 3 |
| 3 | 0 | L2 | 0 | θ_4 | 4 |
| 4 | 0 | L3 | 0 | 0 | tip |

Πίνακας 1 Πίνακας των παραμέτρων Denavit και Hartenberg για τον δείκτη, όπως κατασκευάστηκε από τον συγγραφέα

Με βάση τις παραπάνω παραμέτρους υπολογίζεται ο ομογενής μετασχηματισμός που συνδέει δύο γειτονικούς συνδέσμους.

$$g_{i-1,i} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i \cdot \cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \cdot \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} \cdot d_i \\ \sin\theta_i \cdot \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \cdot \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} \cdot d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα υπολογίζονται ο ομογενής μετασχηματισμός που συνδέει τα πλαίσια συντεταγμένων [0],[1],[2],[3],[4] και [tip].

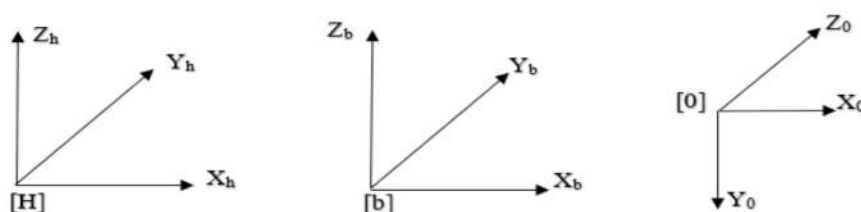
$$g_{0-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, g_{1-2} = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$g_{2-3} = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & L1 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, g_{3-4} = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & -\sin\theta_4 & 0 & L2 \\ \sin\theta_4 & \cos\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$g_{4-tip} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

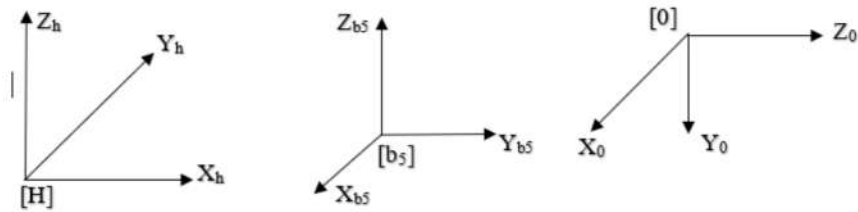
Ο πίνακας που συνδέει το πλαίσιο [0] με το πλαίσιο του [tip] προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό των παραπάνω πινάκων: $g_{0tip} = g_{01} * g_{12} * g_{23} * g_{34} * g_{4tip}$.

Εκτός από τα πλαίσια των αρθρώσεων σκόπιμο είναι να οριστούν τόσο το πλαίσιο αναφοράς της παλάμης [h] όσο και τα πλαίσια [b] που βρίσκονται επισυναπτόμενα στις βάσεις των δαχτύλων. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα πλαίσια [h] και [b] για το δάχτυλο του δείκτη. Επίσης αναπαρίσταται και ο προσανατολισμός του πλαισίου [0] το οποίο βρίσκεται στο ίδιο σημείο με το πλαίσιο [b]. Αυτή η ταύτιση των δύο πλαισίων είναι ίδια και για τα υπόλοιπα δάχτυλα εκτός του αντίχειρα.



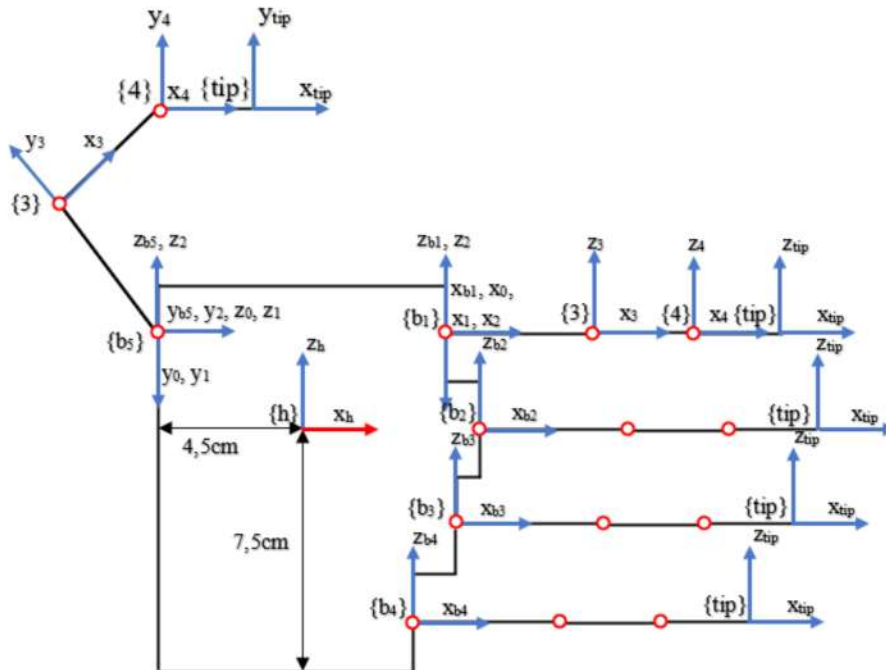
Εικόνα 20 Τα πλαίσια συντεταγμένων της παλάμης και της βάσης των δαχτύλων εκτός του αντίχειρα, όπως σχηματίστηκε από τον συγγραφέα

Οι προσανατολισμοί των πλαισίων [h], [b] και [0] είναι διαφορετικοί για τον αντίχειρα και παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 21 Τα πλαίσια συντεταγμένων της παλάμης και της βάσης του αντίχειρα, όπως σχηματίστηκε από τον συγγραφέα

Έτσι, προκύπτει το χέρι συνολικά με τα πλαίσια των αρθρώσεων, της παλάμης και τα πλαίσια που βρίσκονται επισυναπτόμενα στις βάσεις των δαχτύλων



Εικόνα 22 Σχηματική απεικόνιση του χεριού με σημειωμένους τους άξονες, όπως σχεδιάστηκε από τον συγγραφέα

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει ο ομογενής μετασχηματισμός ο οποίος συνδέει το πλαίσιο [0] με το πλαίσιο [b] της βάσης του δαχτύλου του δείκτη.

$$g_{b1-0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

όπου b1 το πλαίσιο συντεταγμένων για το δάχτυλο 1 δηλαδή τον δείκτη. Με βάση τον παραπάνω πίνακα και τον πίνακα g_{0-tip} είναι δυνατό να βρεθεί η θέση του άκρου του δείκτη ως προς το πλαίσιο [b] της βάσης του.

$$g_{b1-tip} = g_{b1-0} * g_{0-tip}$$

Με την παραδοχή ότι f = 1 έως 5 είναι τα δάχτυλα (1 = δείκτης, 2 = μέσος, 3 = παράμεσος, 4 = μικρός και 5 = αντίχειρας) για την εύρεση της θέσης οποιουδήποτε δαχτύλου ως προς το πλαίσιο της βάσης τους ισχύει ο παρακάτω τύπος:

$$g_{bf-tip} = g_{bf-0} * g_{0-tipf}$$

Τα παραπάνω ισχύουν για όλα τα δάχτυλα σύμφωνα με τα μήκη που παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα.

| Δείκτης , Μέσος, Παράμεσος και Μικρός | | Αντίχειρας | |
|---------------------------------------|-------|------------|-------|
| Σύνδεσμοι | Μήκος | Σύνδεσμοι | Μήκος |
| L1 | 4,8 | L1 | 3 |
| L2 | 3 | L2 | 4,3 |
| L3 | 2,7 | L3 | 5 |

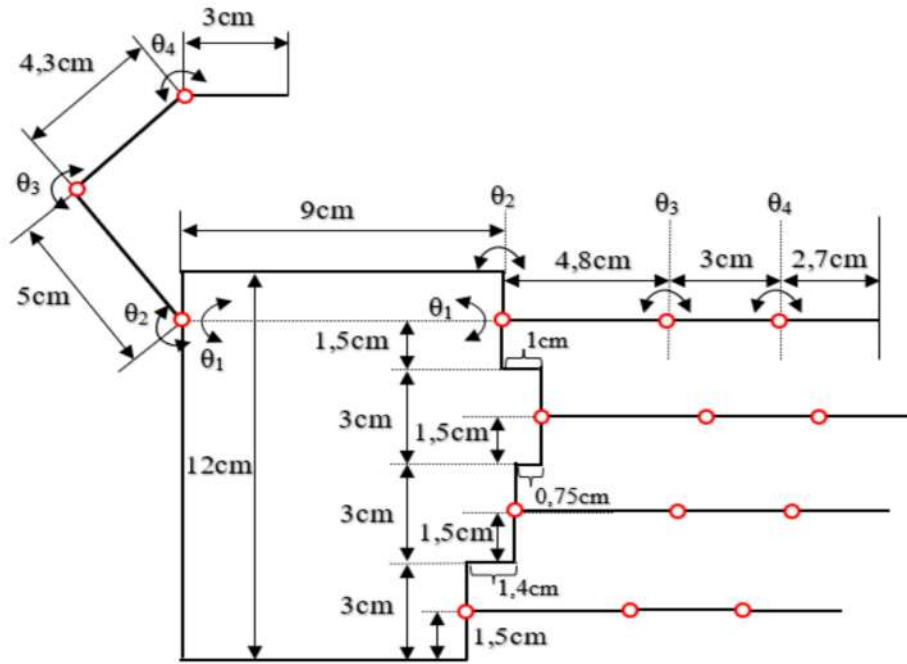
Πίνακας 2 Μηκών συνδέσμων δαχτύλων, όπως σχεδιάστηκε από τον συγγραφέα

Σε αυτό το σημείο αξίζει να παρατεθεί ο πίνακας με το εύρος κίνησης του δείκτη

| Άρθρωση | Κίνηση |
|----------------------------------|-------------------|
| Μετακαρποφαλαγγική άρθρωση (MCP) | Προσαγωγή/Απαγωγή |
| Μετακαρποφαλαγγική άρθρωση (MCP) | Έκταση/Κάμψη |
| Εγγύς μεσοφαλαγγική (PIP) | Έκταση/Κάμψη |
| Άπω μεσοφαλαγγική | Έκταση/Κάμψη |

Πίνακας 3 Εύρους κίνησης δείκτη σε μοίρες

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται αναλυτικά η παλάμη του χεριού με τα δάχτυλα, τις αρθρώσεις καθώς και τις σχετικές αποστάσεις προκειμένου να πραγματοποιηθεί η μοντελοποίηση της κινηματικής του ανάλυσης:



Εικόνα 23 Σχηματική απεικόνιση του χεριού με σημειωμένες τις σχετικές αποστάσεις, όπως σχεδιάστηκε από τον συγγραφέα.

Από τον πίνακα g_{b1-0} και τον Πίνακα 2 προκύπτουν οι ομογενείς μετασχηματισμοί που συνδέουν τα πλαίσια των δαχτύλων [b] με το πλαίσιο της παλάμης [h].

| Δείκτης | Μέσος | Παράμεσος |
|--|--|--|
| $g_{h-b1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 4.5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$ | $g_{h-b2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 5.5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$ | $g_{h-b3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 4.75 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$ |

| Μικρός | Αντίχειρας |
|---|---|
| $g_{h-b4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 3.1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$ | $g_{h-b5} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -4.5 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ |

Τέλος, προκύπτει ότι ο υπολογισμός του ευθέως κινηματικού μοντέλου για τα δάχτυλα του χεριού είναι:

$$g_{p-tipf} = g_{p-bf} * g_{bf-0} * g_{0-tipf}$$

4.1.4. Επίλυση αντίστροφου κινηματικού προβλήματος

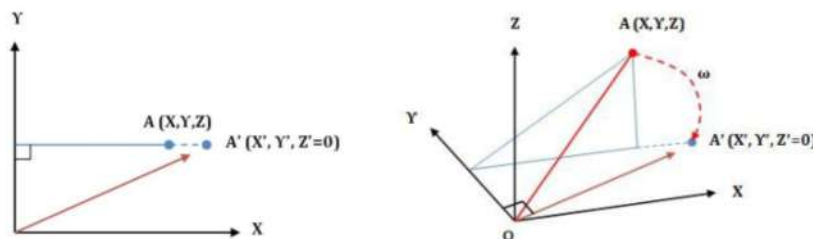
Η αντίστροφη κινηματική ανάλυση των αρθρώσεων των δαχτύλων αποσκοπεί στον προσδιορισμό των γωνιών των αρθρώσεων των δαχτύλων έχοντας ως δεδομένα τις συντεταγμένες της θέσης της άκρης του δαχτύλου. Παρακάτω θα επιλυθεί το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα για το δάχτυλο του δείκτη.

Για την επίλυση του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος θα χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$x=L1*\cos(\theta2)+L2*\cos(\theta2+\theta3)+L3*\cos(\theta2+\theta3+\theta4)$$

$$y=L1*\sin(\theta2)+L2*\sin(\theta2+\theta3)+L3*\sin(\theta2+\theta3+\theta4)$$

Έστω ότι τοποθετείται ο δείκτης σε ένα τυχαίο σημείο K με συντεταγμένες (X, Y, Z). Στο σημείο αυτό αντιστοιχεί ένα σημείο K' με συντεταγμένες (X', Y', Z' = 0) στο επίπεδο X – Y για το οποίο σημείο όταν το δάχτυλο βρίσκεται σε αυτό μια στροφή με τη κατάλληλη γωνία ω γύρω από τον άξονα Y θα φέρει το A' στο A. Με βάση τα παραπάνω είναι δυνατό να υπολογιστούν οι γωνίες θ2, θ3, θ4 με δεδομένη τη θέση (X', Y'). Έτσι μένει να υπολογιστούν οι συντεταγμένες (X', Y') καθώς και η γωνία της πρώτης άρθρωσης του δείκτη θ1.



Εικόνα 24 Η προοπτική κίνησης δαχτύλου (αριστερά) και η κάτοψη κίνησης δαχτύλου (δεξιά) (Κριτσωτάκης, 2012)

Ο υπολογισμός της γωνίας ω γίνεται μέσω των συντεταγμένων X και Z

$$\omega=\theta1=\text{atan}^2(Z,X)$$

Η περιστροφή γύρω από τον άξονα Y κατά γωνία ω υπολογίζεται από το πίνακα στροφής $I_{Y,\omega}$:

$$I_{Y,\omega}=\begin{bmatrix} \cos \omega & 0 & \sin \omega \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \omega & 0 & \cos \omega \end{bmatrix}$$

Πολλαπλασιάζοντας τον πίνακα $I_{Y,\omega}$ με τα X, Y, Z προκύπτουν οι συντεταγμένες (X', Y').

$$I_{Y,\omega} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}$$

Τα X, Y, Z του σημείου K είναι συντεταγμένες του σημείου ως προς το πλαίσιο της βάσης του δαχτύλου b . Γνωρίζοντας τις συντεταγμένες του σημείου $K (x, y, z)$ ως προς το πλαίσιο συντεταγμένων της παλάμης είναι δυνατό να αναχθούν οι συντεταγμένες x, y, z ως προς το πλαίσιο βάσης του δαχτύλου (X, Y, Z):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = g_{bi-h} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{εξ } 1)$$

Με g_{bi-h} ο ομογενής μετασχηματισμός που συνδέει το πλαίσιο συντεταγμένων της παλάμης με το πλαίσιο συντεταγμένων της βάσης του κάθε δαχτύλου. Έτσι, για όλα τα δάχτυλα ισχύει ότι:

$$R_{p-bi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, P_{p-bi} = \begin{bmatrix} xbi \\ ybi \\ zbi \end{bmatrix} \quad \text{με } i=1,2,3,4$$

Πιο αναλυτικά:

Δείκτης Μέσος Παράμεσος Μικρός

$$P_{p-b1} = \begin{bmatrix} 4,5 \\ 0 \\ 3 \end{bmatrix}, P_{p-b2} = \begin{bmatrix} 5,5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, P_{p-b3} = \begin{bmatrix} 3,6 \\ 0 \\ -3 \end{bmatrix}, P_{p-b4} = \begin{bmatrix} 3,4 \\ 0 \\ -6 \end{bmatrix}$$

Για τον αντίχειρα ισχύει:

$$R_{p-bi} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, P_{p-bi} = \begin{bmatrix} xbi \\ ybi \\ zbi \end{bmatrix}, P_{p-b5} = \begin{bmatrix} -4,5 \\ 0 \\ 3 \end{bmatrix},$$

Σύμφωνα με την εξίσωση (1) σε συνδυασμό με αντικατάσταση των παραπάνω δεδομένων μπορούν να βρεθούν τα X , Y , Z .

Έτσι, για τα δάχτυλα του δείκτη, μέσου, παράμεσου και μικρού ισχύουν: $X=x-x_{bi}$

$$Y=y-y_{bi}$$

$$Z=z-z_{bi}$$

Ενώ για τον αντίχειρα ισχύει: $X=-y-y_{bi}$

$$Y=x-x_{bi}$$

$$Z=z-z_{bi}$$

4.2. Εργαλεία σχεδιασμού, υπολογισμού και μοντελοποίησης

Σε επόμενα κεφάλαια θα περιγραφούν η προσομοίωση των προβλημάτων ενός δείκτη, ο σχεδιασμός του χεριού και η ανάλυση για την επιλογή του κατάλληλου υποχωρητικού μηχανισμού. Για την υλοποίηση των προαναφερθέντων θα αξιοποιηθούν 3 λογισμικά, τα οποία θα αναφερθούν συνοπτικά σε αυτό το σημείο.

4.2.1. Εργαλείο σχεδιασμού Inventor

Το Inventor πρόκειται για ένα λογισμικό σχεδιασμού μηχανικής που αναπτύχθηκε από την εταιρεία Autodesk. Το συγκεκριμένο λογισμικό αποτελεί ένα παραμετρικό σύστημα που βασίζεται σε χαρακτηριστικά τα οποία επιτρέπουν την δημιουργία τρισδιάστατων σχεδίων, συναρμολογήματα, δισδιάστατα σχέδια κ.α. Στον συγκεκριμένο παραμετρικό μοντελοποιητή τα πάντα ελέγχονται από παραμέτρους, διαστάσεις ή σχέσεις. Το Inventor σε σχέση με άλλα παρόμοια λογισμικά επιτρέπει στο χρήστη μεγάλη ευελιξία αναφορικά με τον τρόπο σχεδίασης. Αξίζει να σημειωθεί το γεγονός ότι σε περίπτωση αλλαγής της σχεδίασης ενός εξαρτήματος η αλλαγή αυτή θα τεθεί σε ισχύ σε όλα τα κομμάτια τα οποία αποτελούν το συναρμολόγημα (Metalios, 2020).

Αναφορικά με την εικονική αναπαράσταση ενός ρομποτικού χεριού, το Autodesk Inventor έχει χρησιμοποιηθεί από τους Bucur et. al. (2015). Οι ερευνητές υποστηρίζουν ότι το Inventor καθίσταται το κατάλληλο λογισμικό, λόγω του του χαμηλού κόστους του σε συνδυασμό με την προσομοίωση απεριόριστου αριθμού συνθηκών εργασίας. Αναλυτικότερα, οι Bucur et. al. αξιοποίησαν το Inventor για να προσδιορίσουν τις παραμέτρους DH μέσα από τους μετασχηματισμούς συντεταγμένων. Εκτός από τους παραπάνω, οι Cardozo et. al. χρησιμοποίησαν το συγκεκριμένο υπολογιστικό εργαλείο για την απόκτηση αποτελεσμάτων προσομοίωσης ενός λειτουργικού πρωτότυπου προσθετικού χεριού.

Σε γενικότερο επίπεδο, το εν λόγω λογισμικό χρησιμοποιείται για τη δημιουργία εργαλείων, τον μηχανικό σχεδιασμό και την προσομοίωση προϊόντων. Επίσης το λογισμικό εκτελείται σε συστήματα Windows και Mac ενώ διατίθεται σε διάφορους τύπους αρχείων όπως IAM, DW, IPT και IPN (Metalios, 2020).

4.2.2. Εργαλείο υπολογισμού Matlab

Το Matlab (matrix laboratory) είναι ένα περιβάλλον αριθμητικής υπολογιστικής και μια προγραμματιστική γλώσσα τέταρτης γενιάς. Ουσιαστικά, αποθηκεύει και κάνει τις πράξεις με βάση την άλγεβρα μητρών. Στον τομέα των γραφικών, όσον αφορά τον μαθηματικό κλάδο παρέχει τη δυνατότητα να υλοποιήσει ο χρήστης συναρτήσεις πραγματικές, μιγαδικές, πεπλεγμένες συναρτήσεις δύο μεταβλητών και άλλες. Όσον αφορά τον στατιστικό κλάδο, δύναται να υλοποιηθούν ιστογράμματα, τομεογράμματα, ραβδοδιαγράμματα, εμβοδογράμματα και άλλα (MathWorks, 2020).

Όσον αφορά την αξιοποίησή του στον σχεδιασμό ενός ρομποτικού χεριού, έχει πραγματοποιηθεί από τους Ramasamy και Arshad (2000). Αναλυτικότερα, οι ερευνητές σχημάτισαν την κινηματική και τη δυναμική προσομοίωση κάθε δαχτύλου από το λογισμικό και το αξιοποίησαν για την κίνηση του συνόλου. Παράλληλα, μέσω του Matlab οι συντεταγμένες ή γωνίες χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για την εύρεση των κινηματικών και δυναμικών ιδιοτήτων.

Το συγκεκριμένο εργαλείο περιλαμβάνει και το Live Editor για τη δημιουργία σεναρίων που συνδυάζουν κώδικα, έξοδο και μορφοποιημένο κείμενο. Το Matlab απευθύνεται σε μηχανικούς, επιστήμονες και, ακαδημαϊκούς, αλλά και χρησιμοποιείται ευρύτατα σε άλλους τομείς, όπως η βιομηχανία (MathWorks, 2020).

4.2.3. Εργαλείο μοντελοποίησης Sketch Up

Το Sketch Up είναι ένα λογισμικό τρισδιάστατης μοντελοποίησης, το οποίο χρησιμοποιείται για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σχεδίασης όπως της αρχιτεκτονικής, της εσωτερικής διακόσμησης, του βιομηχανικού σχεδιασμού, της αρχιτεκτονικής τοπίου και του σχεδιασμού προϊόντων. Επίσης χρησιμοποιείται σε διάφορους τομείς όπως τη βιομηχανία, το θέατρο και τη παραγωγή βιντεοπαιχνιδιών (Trimble, 2022).

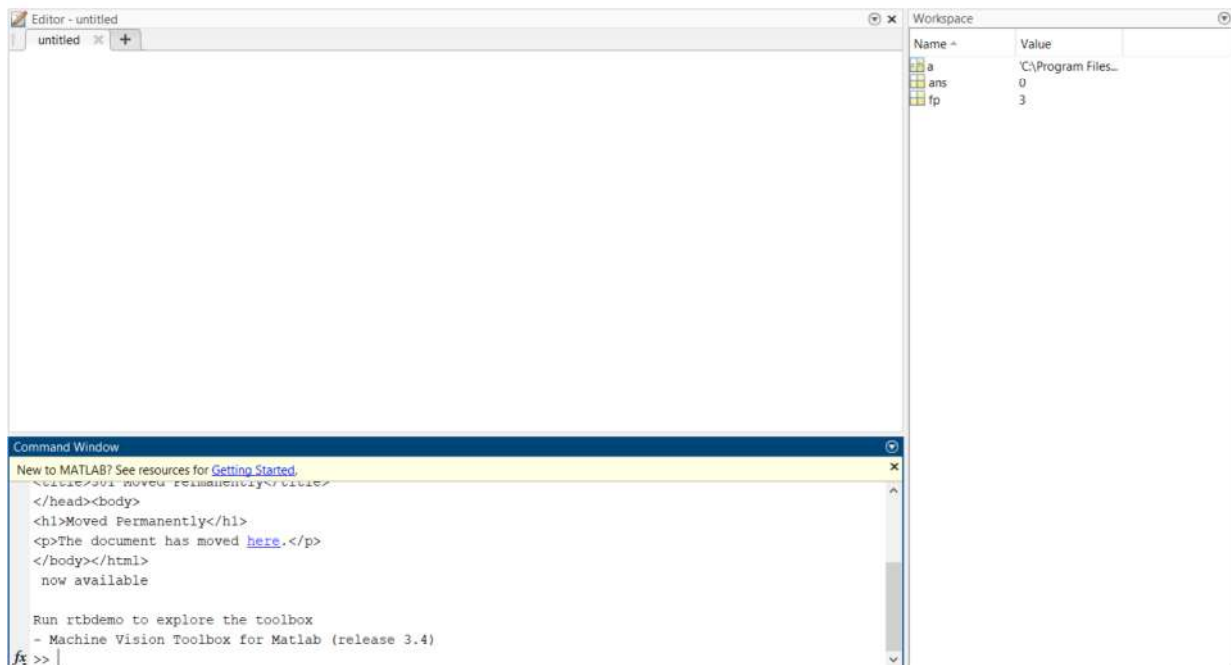
Όσον αφορά τη μοντελοποίηση ενός ρομποτικού χεριού, οι Dutta et.al. (2018) αξιοποίησαν το εργαλείο Sketch Up για να προσομοιώσουν ένα κινούμενο βοηθητικό ρομποτικό άκρο.

Κεφάλαιο 5^ο: Προσομοίωση του ευθύ και αντίστροφου κινηματικού προβλήματος σε περιβάλλον Matlab

5.1. Προσομοίωση του ευθύ και αντίστροφου κινηματικού προβλήματος για το δάχτυλο του δείκτη στο Matlab

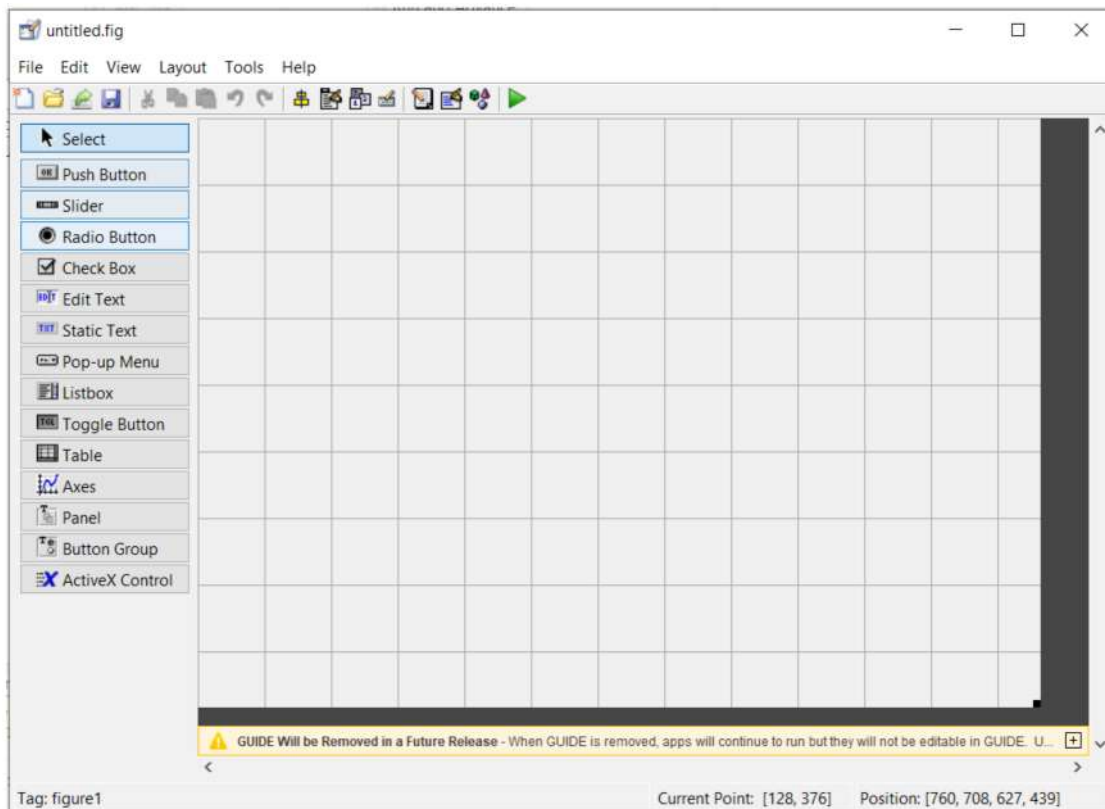
Για την αναπαράσταση του ευθύ και αντίστροφου κινηματικού προβλήματος του δείκτη χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Matlab, καθώς και η βιβλιοθήκη εργαλείων του Matlab Robotics Toolbox, όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια.

Αρχικά, από το command window του προγράμματος καλείται την συνάρτηση `startup_rvc` προκειμένου να ενεργοποιηθεί η βιβλιοθήκη Robotics Toolbox.






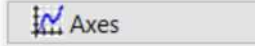
Εικόνα 25 Στιγμιότυπο του command window του Matlab

Στη συνέχεια καλούμε την εντολή `guide` προκειμένου να βρεθούμε στο περιβάλλον σχεδίασης.

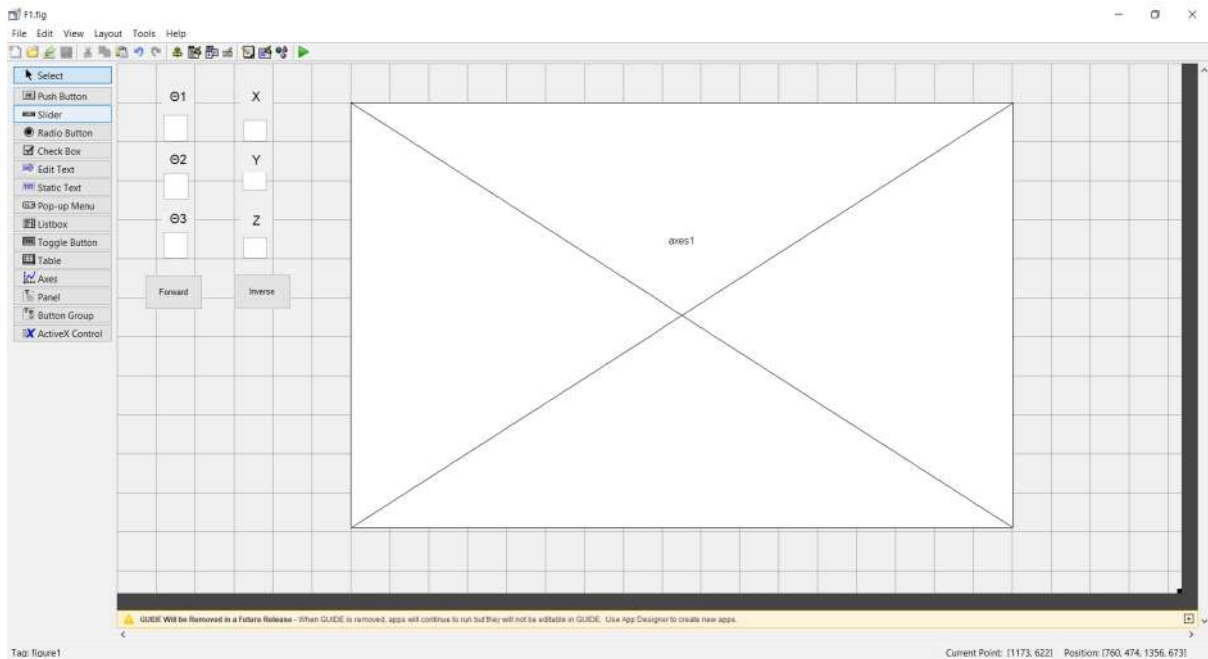


Εικόνα 26 Στιγμιότυπο του περιβάλλοντος *guide* του *Matlab*

Στη συνέχεια, διαμορφώνεται κατάλληλα το περιβάλλον προκειμένου, ώστε στην περίπτωση του ευθύ κινηματικού προβλήματος, να δίνεται τιμές για τις γωνίες των αρθρώσεων θ_1 , θ_2 , θ_3 και με την εκτέλεση του κώδικα να λαμβάνουμε την θέση και το προσανατολισμό του άκρου του δείκτη σε συντεταγμένες x , y , z . Στην περίπτωση του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος τοποθετώντας τις επιθυμητές συντεταγμένες με την πραγματοποίηση του κώδικα θα λάβουμε τις γωνίες θ_1, θ_2 και θ_3 . Πιο αναλυτικά χρησιμοποιούμε:

- Δύο πλήκτρα εντολών τύπου push button τα οποία εκτελούν κώδικα κατά την ενεργοποίησή τους 
- Έξι ετικέτες κειμένου (Static Text) που λαμβάνουν μόνο στατικό κείμενο 
- Έξι κελιά τύπου Edit Text τα οποία έχουν την δυνατότητα να δέχονται μεταβλητές και να συνδέονται με τα πλήκτρα 
- Ένα κελί τύπου Axes στο οποίο θα γίνει η τρισδιάστατη αναπαράσταση 

Στη συνέχεια δίνονται ονόματα στο κάθε κελί τύπου στατικού κειμένου με αποτέλεσμα το σχεδιαστικό περιβάλλον να διαμορφώνεται ως εξής:

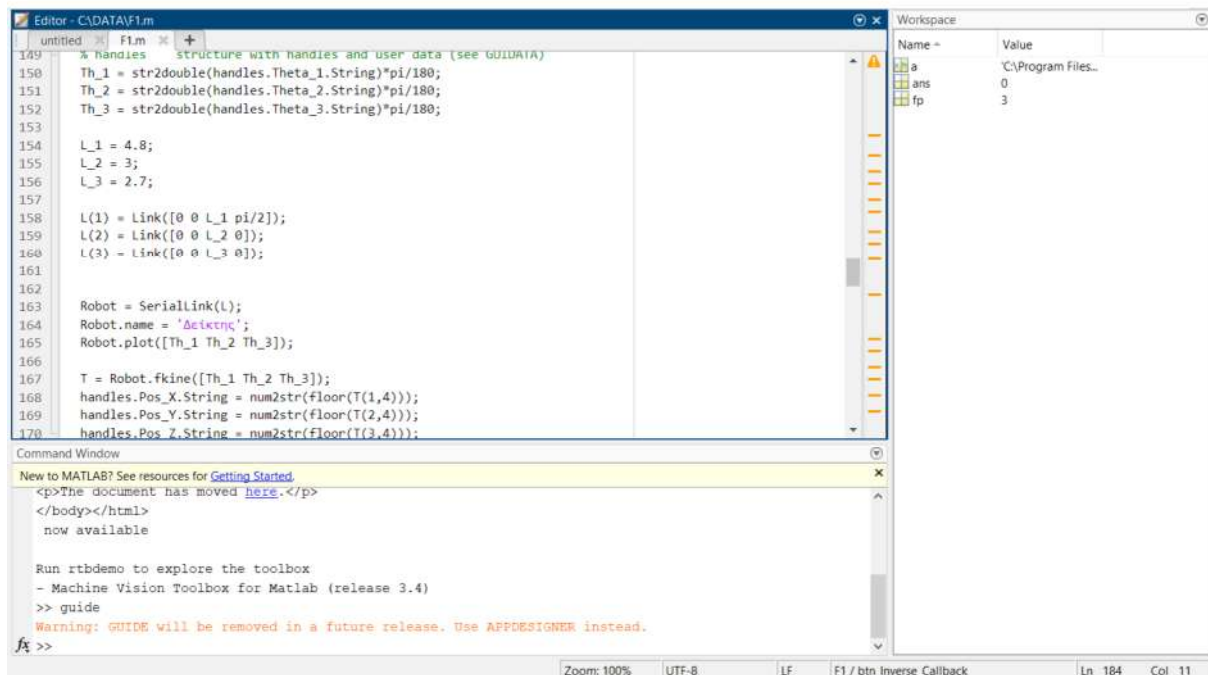


Tag: figure1

Current Point: (11173, 622) Position: (760, 474, 1356, 673)

Εικόνα 27 Στιγμιότυπο του περιβάλλοντος guide του Matlab, μετά από την κατάλληλη διαμόρφωση

Στη συνέχεια πατώντας δεξί κλικ στο κατάλληλο push button και επιλέγοντας την επιλογή callback μεταφερόμαστε στο σημείο του όπου πρέπει να αναπτύξουμε τον κώδικα για την επίλυση του ευθύ κινηματικού προβλήματος. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ο κώδικας που πρέπει να εκτελεστεί για την επίλυση του ευθύ κινηματικού προβλήματος.



Εικόνα 28 Στιγμιότυπο του κώδικα επίλυσης ευθύ κινηματικού προβλήματος

Στη συνέχεια, ακολουθούμε την ίδια διαδικασία αυτή τη φορά για το push button που είναι υπεύθυνο για την εκτέλεση του κώδικα του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος. Ο κώδικας είναι ο εξής:

```

176 % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
177 % handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
178 PX = str2double(handles.Pos_X.String);
179 PY = str2double(handles.Pos_Y.String);
180 PZ = str2double(handles.Pos_Z.String);
181
182 L_1 = 4.8;
183 L_2 = 3;
184 L_3 = 2.7;
185
186 L(1) = Link([0 0 L_1 pi/2]);
187 L(2) = Link([0 0 L_2 0]);
188 L(3) = Link([0 0 L_3 0]);
189
190 Robot = SerialLink(L);
191 Robot.name = 'Finger';
192
193 T = [ 1 0 0 PX;
194       0 1 0 PY;
195       0 0 1 PZ;
196       0 0 0 1];

```

Command Window

```

New to MATLAB? See resources for Getting Started.
<p>The document has moved here.</p>
</body></html>
now available

Run rtbdemo to explore the toolbox
- Machine Vision Toolbox for Matlab (release 3.4)
>> guide
Warning: GUIDE will be removed in a future release. Use APPDESIGNER instead.
fx >>

```

Εικόνα 29 Στιγμιότυπο κώδικα επίλυσης του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος

```

193 T = [ 1 0 0 PX;
194       0 1 0 PY;
195       0 0 1 PZ;
196       0 0 0 1];
197
198 J = Robot.jkine(T, [0 0 0], [1 1 1 0 0 0]) * 180/pi;
199 handles.Theta_1.String = num2str(floor(J(1,1)));
200 handles.Theta_2.String = num2str(floor(J(2,1)));
201 handles.Theta_3.String = num2str(floor(J(3,1)));
202
203 Robot.plot(J*pi/180);
204
205
206
207
208 function Pos_X_Callback(hObject, eventdata, handles)
209 % hObject handle to Pos_X (see GCBO)
210 % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
211 % handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
212
213 % Hints: get(hObject,'String') returns contents of Pos_X as text

```

Command Window

```

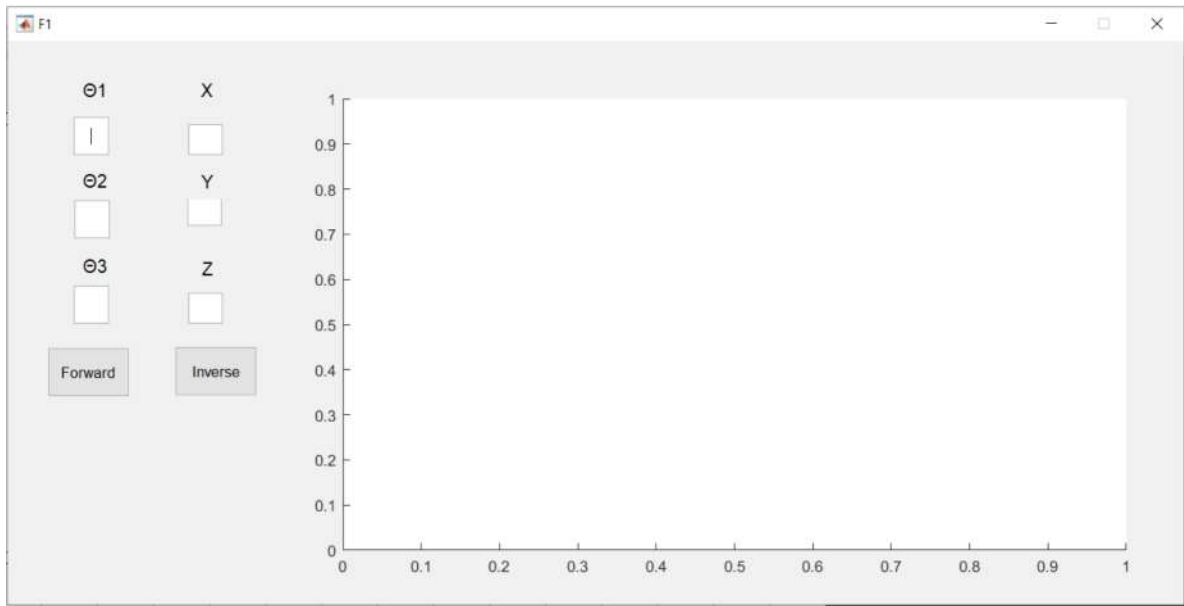
New to MATLAB? See resources for Getting Started.
<p>The document has moved here.</p>
</body></html>
now available

Run rtbdemo to explore the toolbox
- Machine Vision Toolbox for Matlab (release 3.4)
>> guide
Warning: GUIDE will be removed in a future release. Use APPDESIGNER instead.
fx >>

```

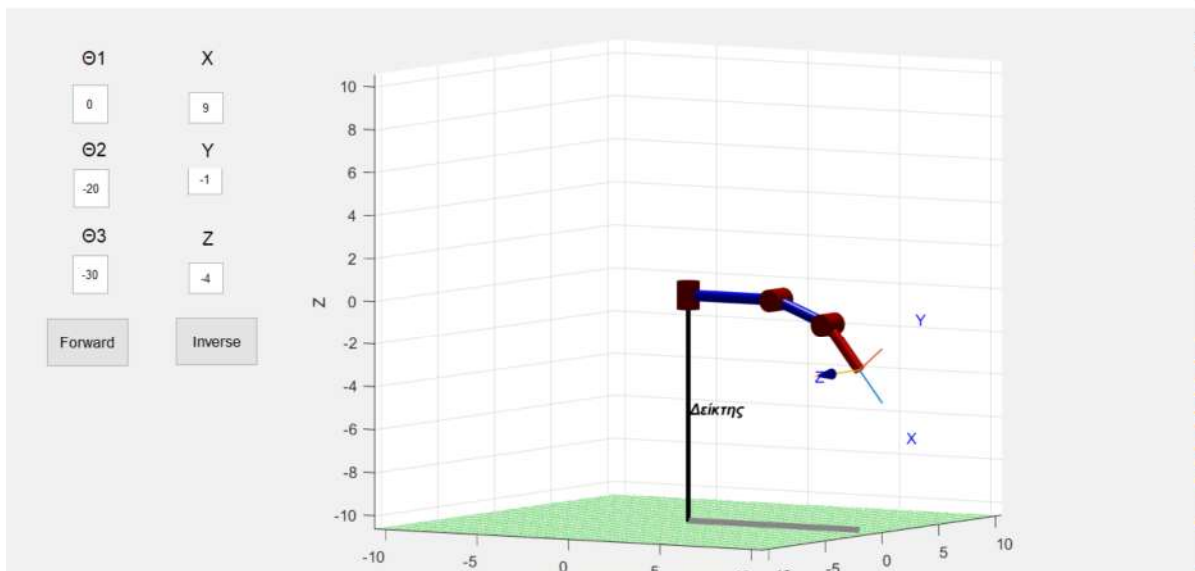
Εικόνα 30 Στιγμιότυπο κώδικα επίλυσης του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος

Έχοντας σχεδιάσει καταλλήλως το περιβάλλον σχεδίασης και αναπτύξει τον κώδικα για την επίλυση του ευθύ και αντιστρόφου κινηματικού προβλήματος, εκτελούμε το πρόγραμμα.



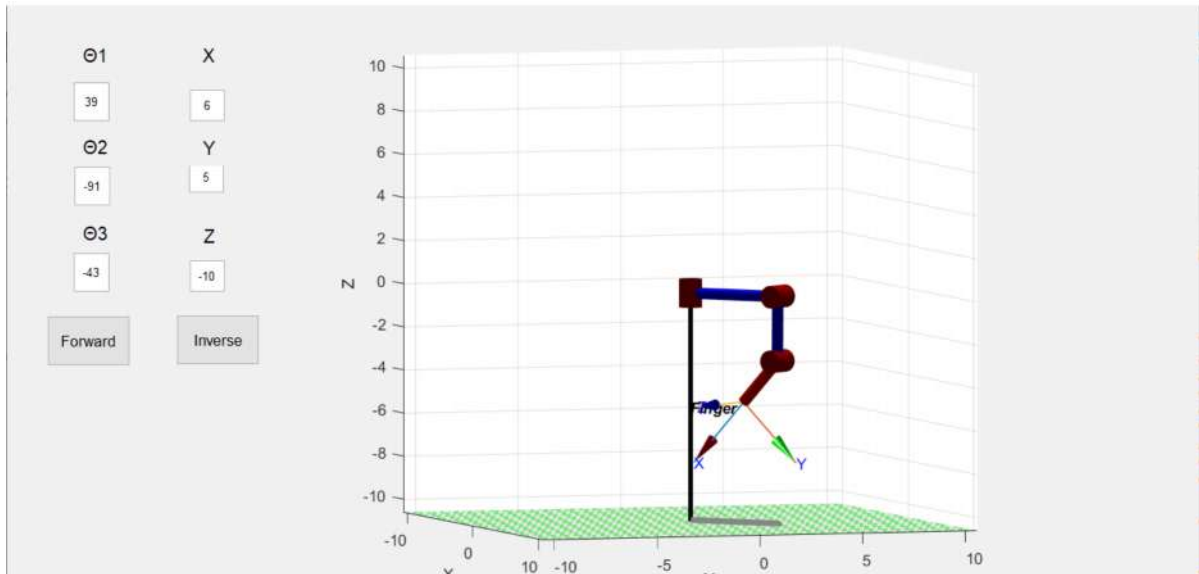
Εικόνα 31 Στιγμιότυπο από εκτέλεση του κώδικα επίλυσης και των δύο προβλημάτων κινηματικής

Σε αυτό το σημείο τοποθετώντας τιμές στις αρθρώσεις $\theta 1$, $\theta 2$ και $\theta 3$ πρέπει να λάβουμε από το πρόγραμμα τις συντεταγμένες x , y , z . Για παράδειγμα, για $\theta 1 = 0$, $\theta 2 = -20$ και $\theta 3 = -30$:



Εικόνα 32 Στιγμιότυπο προσομοίωσης επίλυσης του ευθύ κινηματικού προβλήματος

Αντίστοιχα, στην περίπτωση της αντίστροφης κινηματικής ανάλυσης τοποθετούμε τιμές για τις συντεταγμένες x , y , z προκειμένου να λάβουμε τις γωνίες των αρθρώσεων $\theta 1$, $\theta 2$ και $\theta 3$:

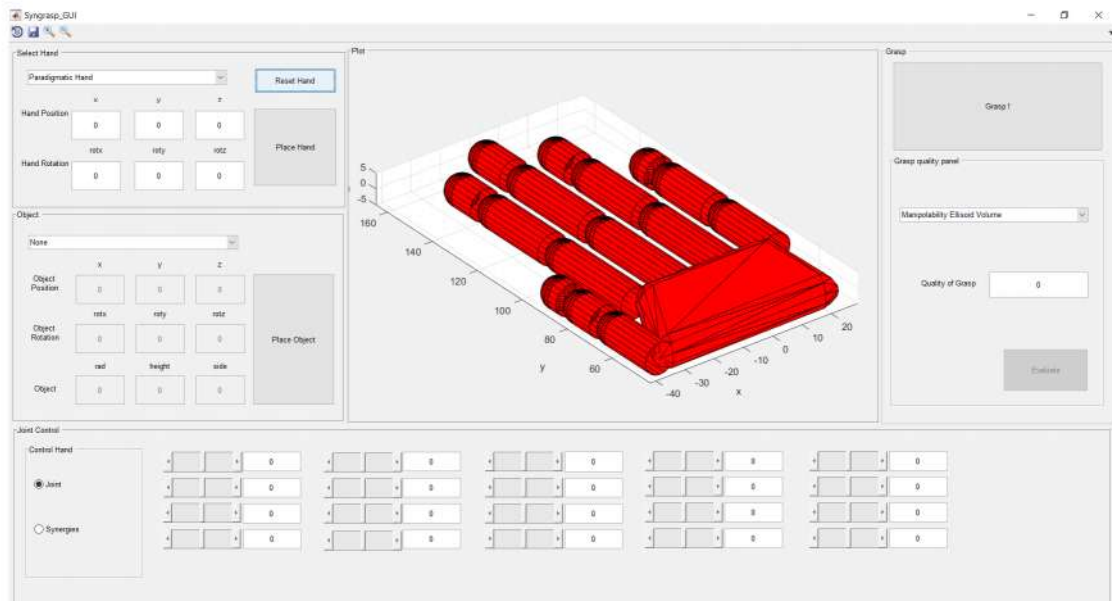


Εικόνα 33 Στιγμιότυπο προσομοίωσης επίλυσης του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος

5.2. Παράδειγμα προβλήματος με τυπική κίνηση του χεριού

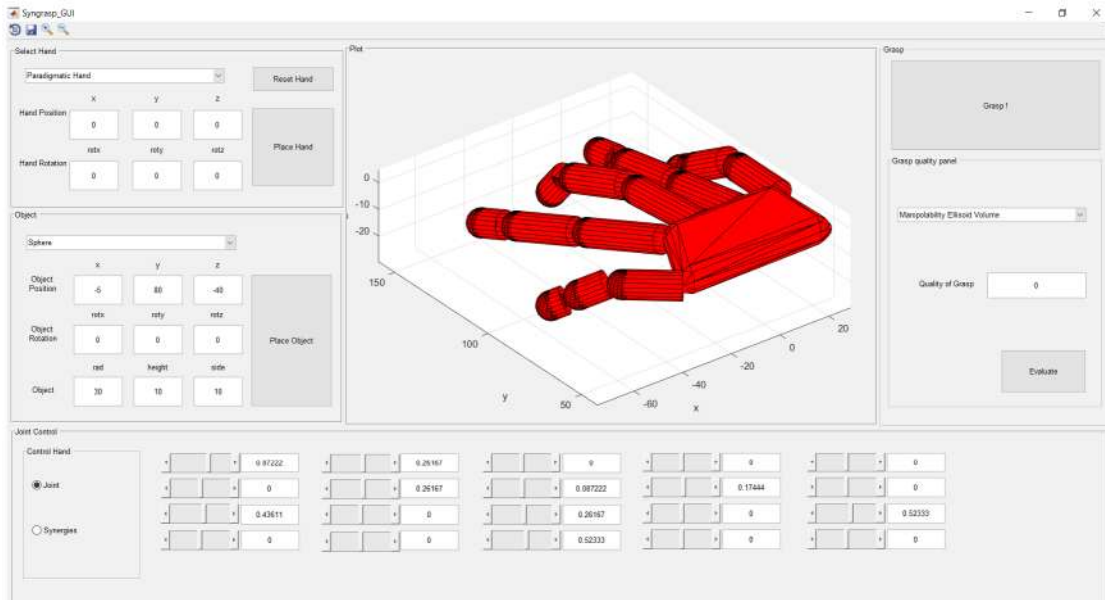
Έχοντας αναπτύξει το ευθύ κινηματικό πρόβλημα για το δάχτυλο του δείκτη, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Matlab, κρίνεται σκόπιμο να αναπτυχθεί παράδειγμα με κάποια χαρακτηριστική κίνηση του χεριού.

Έστω ότι θέλουμε να αναπαραστήσουμε την κίνηση του χεριού για τον εγκλωβισμό μιας σφαίρας. Για την επίλυση του εν λόγω προβλήματος επιλέχθηκε το πρόγραμμα Matlab και τη βιβλιοθήκη SynGrasp. Εκκινώντας το πρόγραμμα παρουσιάζεται στην οθόνη η παρακάτω εικόνα με την αναπαράσταση της παλάμης και των δαχτύλων σε έκταση.



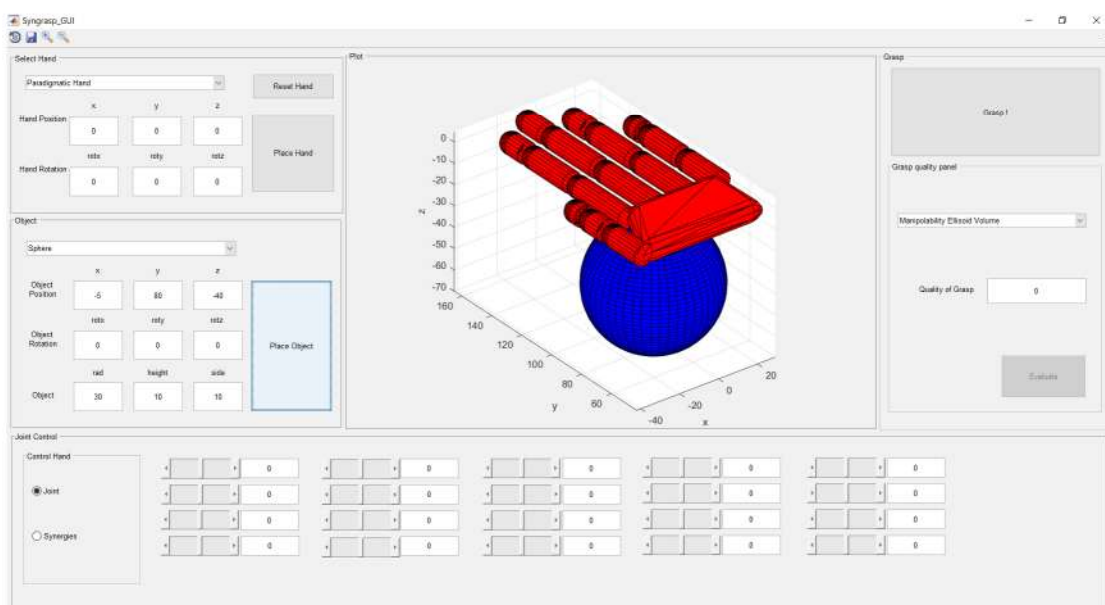
Εικόνα 34 Στιγμιότυπο προσομοίωσης της παλάμης από τη βιβλιοθήκη SynGrasp

Έχοντας τοποθετήσει τη παλάμη δύναται να αλληλεπιδράσει ο χρήστης με τις αρθρώσεις των δαχτύλων τοποθετώντας τις επιθυμητές συντεταγμένες.



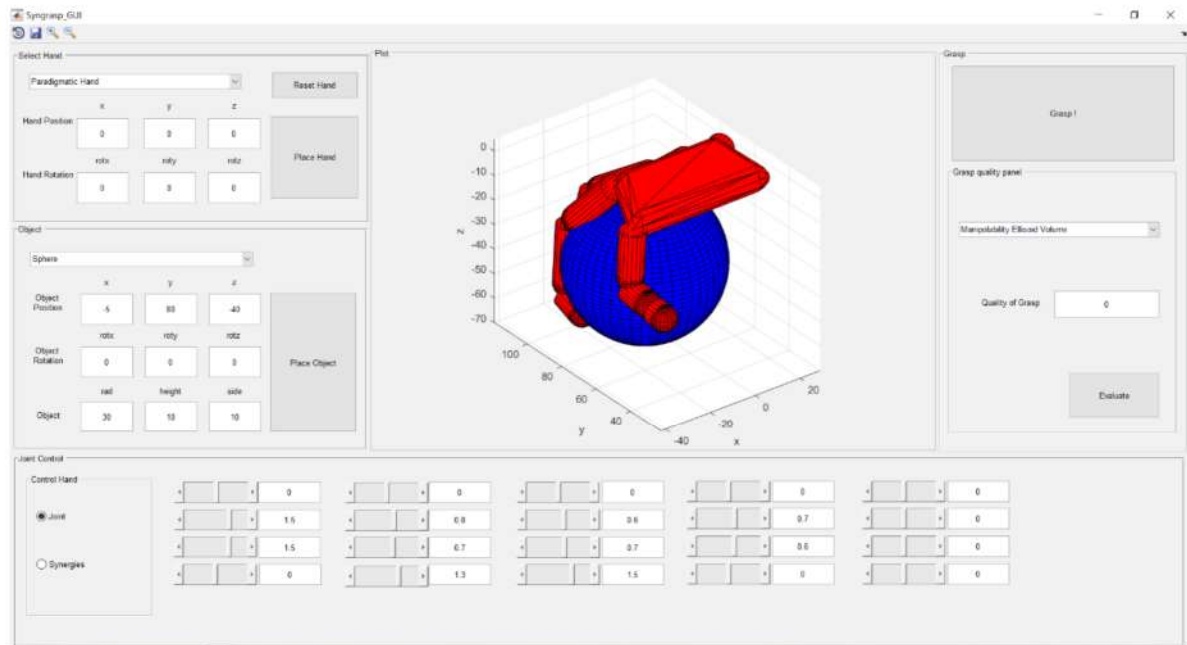
Εικόνα 35 Στιγμιότυπο προσομοίωσης της παλάμης από τη βιβλιοθήκη SynGrasp

Για την επίλυση του προβλήματος, δηλαδή τον εγκλωβισμό μιας σφαίρας, αρχικά επιλέγουμε από το σχετικό μενού το επιθυμητό αντικείμενο και του αποδίδουμε συντεταγμένες ($x = -5, y = 80, z = -40, \text{rad} = 30^\circ$) για την θέση και το μέγεθος του στο χώρο. Έχοντας παραμετροποιήσει τις συντεταγμένες της σφαίρας, πατώντας το button place object, τοποθετούμε τη σφαίρα στο τρισδιάστατο περιβάλλον.



Εικόνα 36 Στιγμιότυπο προσομοίωσης της παλάμης από τη βιβλιοθήκη SynGrasp

Στη συνέχεια, πατάμε το button grasp. Παρατηρούμε ότι συντεταγμένες των αρθρώσεων των δαχτύλων έχουν αλλάξει προκειμένου το χέρι να αγκαλιάσει τη σφαίρα.



Εικόνα 37 Στιγμιότυπο προσομοίωσης της παλάμης από τη βιβλιοθήκη SynGrasp

Κεφάλαιο 6^ο: Σχεδιασμός χεριού με το Inventor

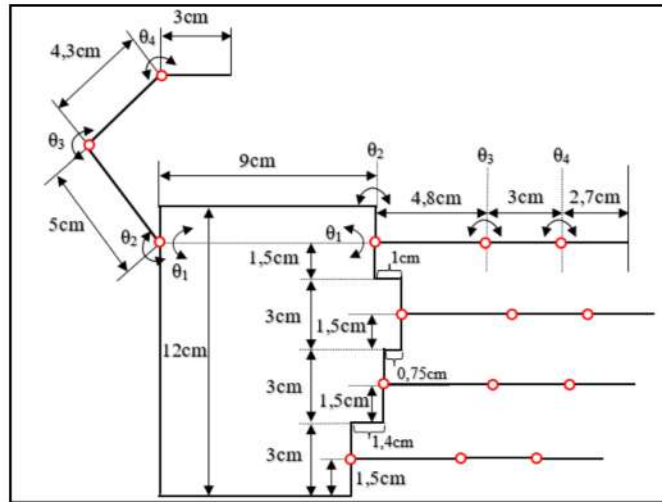
Σε αυτό το κεφαλαίο θα περιγραφούν τα βήματα, αλλά και το σκεπτικό γύρω από τη σχεδίαση του ψηφιακού ομοιώματος του ανθρώπινου χεριού. Στα πλαίσια της εργασίας τα δάχτυλα του χεριού (δείκτης, μέσος, παράμεσος και μικρός), εκτός του αντίχειρα σχεδιάστηκαν με την δυνατότητα μόνο της έκτασης – κάμψης και όχι της απαγωγής – προσαγωγής. Στην περίπτωση του αντίχειρα, ο τρόπος σχεδίασης του, ο οποίος θα αναλυθεί παρακάτω, του επιτρέπει τόσο την έκταση – κάμψη, όσο και την απαγωγή – προσαγωγή.

6.1. Απαιτήσεις σχεδιασμού χεριού

Η σχεδίαση ενός ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού αποτελεί μια πολυπαραγοντική εξίσωση, ενώ οι απαιτήσεις για την δημιουργία του είναι πολυδιάστατες. Καταρχήν, οι αρθρώσεις, οι φάλαγγες, αλλά και συνολικά το ρομποτικό χέρι θα πρέπει να είναι κατασκευασμένα από υλικά, τα οποία θα έχουν μικρό βάρος και θα είναι εύκολα διαθέσιμα στην αγορά. Επίσης, είναι ιδιαίτερα σημαντικό το ρομποτικό χέρι να προσομοιάζει το δυνατόν περισσότερο το ανθρώπινο, δηλαδή να διακρίνεται από υψηλό δείκτη ανθρωπομορφικότητας. Ο ανθρωπομορφισμός μπορεί να θεωρηθεί ως ένας ιδιαίτερα σημαντικός στόχος σχεδιασμού καθώς το ρομποτικό χέρι θα πρέπει να είναι σε θέση να λειτουργεί και να αλληλοεπιδρά με εργαλεία τα οποία έχουν σχεδιαστεί σύμφωνα με τις ανθρώπινες απαιτήσεις (Puig et al., 2008). Τέλος, ο πιο σημαντικός παράγοντας είναι η λειτουργικότητα του χεριού. Η σχεδίαση των αρθρώσεων, των φαλάγγων και του χεριού συνολικότερα πρέπει να το καθιστά ικανό να επιτυγχάνει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο αριθμό κινήσεων και αρπαγών.

6.2. Σχεδιασμός παλάμης και φαλάγγων

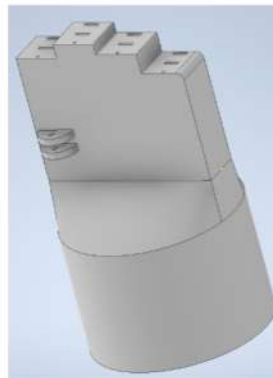
Στην παρούσα εργασία, το ρομποτικό χέρι σαν σύνολο σχεδιάστηκε με πρωταρχικό στόχο τη επίτευξη της μέγιστης δυνατής λειτουργικότητας και με δευτερεύον στόχο τον υψηλότερο δείκτη ανθρωπομορφικότητας. Το χέρι σχεδιάστηκε με βάση τα μήκη και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως αυτά παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 38 Σχηματική απεικόνιση του χεριού με τις σχετικές διαστάσεις, όπως σχεδιάστηκε από τον συγγραφέα

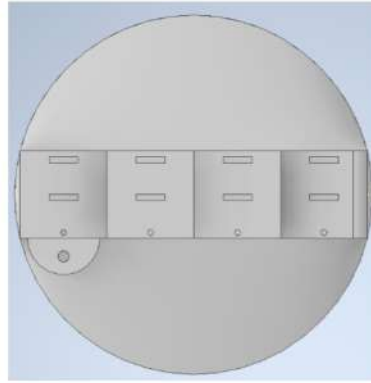
6.2.1. Σχεδιασμός παλάμης

Ο σχεδιασμός της παλάμης ξεκίνησε αρχικά με το βασικό περίγραμμα της παλάμης με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όπως παρουσιάζονται στην προηγούμενη εικόνα και με πάχος 30mm.



Εικόνα 39 Στιγμιότυπο μόντελοποίησης αριστερής παλάμης και καρπού στο Inventor (πρόσθια άποψη)

Στο κομμάτι της παλάμης στο οποίο θα προσαρτηθούν τα δάχτυλα έχουν δημιουργηθεί κοιλότητες βάθους 2mm στα οποία θα εισέρχονται οι αρθρώσεις. Επίσης στο κάτω μέρος της εν λόγω επιφάνειας έχει δημιουργηθεί οπή διαμέτρου 2mm από την οποία θα διέρχεται συρματόσχοινο το οποίο θα ξεκινά από το καρπό και θα καταλήγει στις άκρες των δαχτύλων επιτρέποντας την κάμψη τους. Το συρματόσχοινο θα συνδέεται με τους σερβοκινητήρες οι οποίοι θα είναι τοποθετημένοι στο εσωτερικό του καρπού.



Εικόνα 40 Στριμότητα μοντελοποίησης αριστερής παλάμης και καρπού στο Inventor (κάτοψη)

Στο κάτω μέρος αριστερής παλάμης στο εσωτερικό μέρος όπως διακρίνεται στην εικόνα 39 υπάρχουν κατάλληλα διαμορφωμένοι υποδοχείς, οι οποίοι θα αναλυθούν παρακάτω στο κομμάτι που αφορά το σχεδιασμό του αντίχειρα.

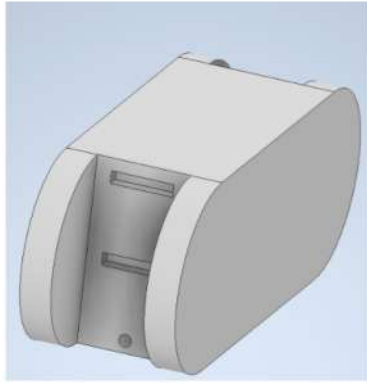
6.2.2. Σχεδιασμός φαλάγγων

Το δάχτυλο αποτελείται από τρία βασικά μέρη, την εγγύς, την ενδιάμεση και την άπω φάλαγγα. Το μήκος, το πάχος, καθώς και το ύψος της κάθε φάλαγγας παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα.

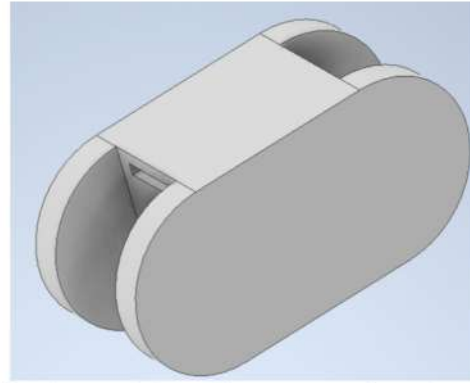
| Φάλαγγες | Μήκος (mm) | Ύψος (mm) | Πάχος (mm) |
|-----------|------------|-----------|------------|
| Εγγύς | 48 | 30 | 25 |
| Ενδιάμεση | 30 | 30 | 25 |
| Άπω | 27 | 30 | 25 |

Πίνακας 4 Διαστάσεων φαλάγγων

Όλες οι φάλαγγες σχεδιάστηκαν ως ορθογώνια σχήματα προκειμένου να καλύπτουν τη μέγιστη δυνατή επιφάνεια. Στα πλαϊνά κομμάτι των φαλάγγων έχουν τοποθετηθεί ημικυκλικά καπάκια διαμέτρου 30mm. Τα καπάκια αυτά έχουν διττό ρόλο. Αφενός προσδίνουν μεγαλύτερο ανθρωπομορφισμό στις φάλαγγες και αφετέρου καλύπτουν ένα μέρος των συνδέσμων – αρθρώσεων κάνοντας τις με αυτό το τρόπο πιο ευπαρουσίαστες. Στη επόμενες εικόνες παρουσιάζονται οι φάλαγγες των δαχτύλων

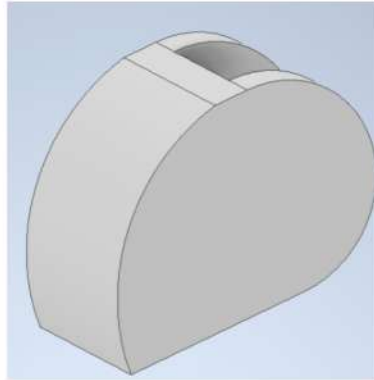


Εικόνα 41 Στιγμιότυπο μοντελοποίησης εγγύς φάλαγγας στο Invetor

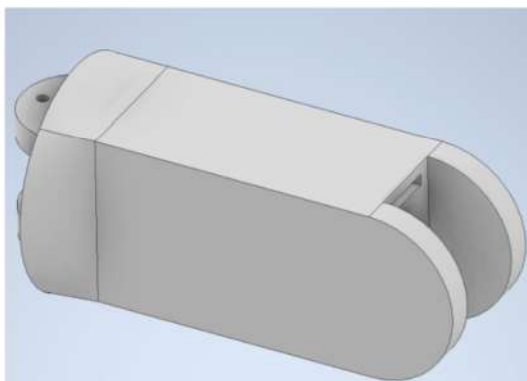


Εικόνα 42 Στιγμιότυπο μοντελοποίησης ενδιάμεσης φάλαγγας στο Invetor

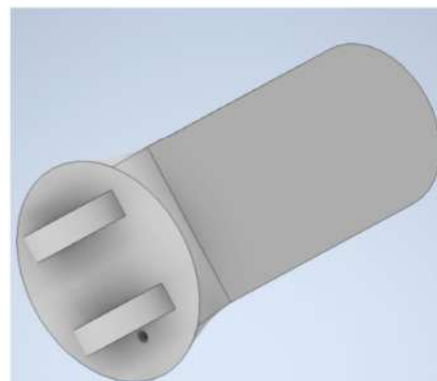
Η άπω φάλαγγα σχεδιάστηκε με μια καμπυλότητα στο άκρο της με σκοπό να προσομοιάζει το δυνατόν περισσότερο το ανθρώπινο ακροδάχτυλο.



Εικόνα 43 Στιγμιότυπο μοντελοποίησης άπω φάλαγγας στο Invetor



Εικόνα 44 Στιγμιότυπο μοντελοποίησης εγγύς φάλαγγας αντίχειρα στο Invetor (οπίσθια όψη)



Εικόνα 45 Στιγμιότυπο μοντελοποίησης εγγύς φάλαγγας αντίχειρα στο Invetor (πλάγια όψη)

Στην περίπτωση του αντίχειρα ο σχεδιασμός είναι διαφορετικός. Προκειμένου ο αντίχειρας να μπορεί να εκτελεί απαγωγή – προσαγωγή πέρα από έκταση – κάμψη η εγγύς φάλαγγα σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο προκειμένου να συνδέεται με τη

βοήθεια ενός πύρου με τη παλάμη. Αναλυτικότερα, όπως φαίνεται και στις εικόνες 44 και 45 στη μία άκρη της φάλαγγας σχεδιάστηκαν δύο ημικυκλικοί υποδοχείς διαμέτρου 20mm με μια οπή στον καθένα διαμέτρου 4mm. Η μια άκρη της φάλαγγας έχει κυκλικό σχήμα προκειμένου να επιτρέπει στον αντίχειρα να μετακινείται, δίχως να προσκρούει στη παλάμη, ενώ η άλλη άκρη ακολουθεί τον σχεδιασμό των υπόλοιπων φαλάγγων των δαχτύλων προκειμένου να συνδεθούν απρόσκοπτα οι αρθρώσεις.

Αντίστοιχα στο κομμάτι της παλάμης όπως παρατηρείται και στην Εικόνα 39 έχουν σχεδιαστεί δύο ημικυκλικοί υποδοχείς με αντίστοιχες οπές 4mm.

6.3. Σχεδιασμός και ανάλυση αρθρώσεων χεριού

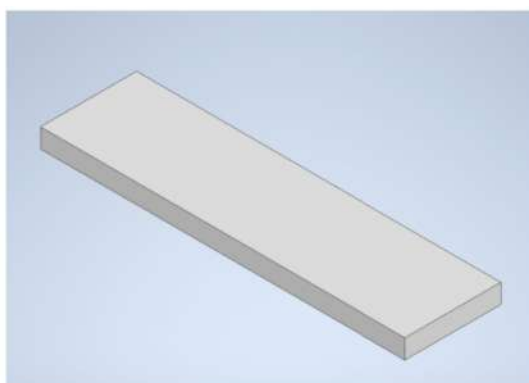
Η επιλογή και η σχεδίαση των αρθρώσεων αποτελεί ένα από τα δυσκολότερα κομμάτια στη συνολική σχεδίαση του χεριού. Στη παρούσα εργασία τις αρθρώσεις αποτελούν υποχωρητικοί μηχανισμοί. Με σκοπό το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα ελήφθησαν υπόψιν μια σειρά παράγοντες, όπως το εύρος κίνησης, ο χώρος τον οποίο οι μηχανισμοί θα καταλαμβάνουν, η ικανότητα επαναφοράς στην αρχική θέση, η αντίσταση στην κάθετη και πλευρική παραμόρφωση, η πιθανόν αδύναμη ανθρωπόμορφη εμφάνιση και το υλικό κατασκευής.

6.3.1. Απαιτήσεις σχεδιασμού των υποχωρητικών μηχανισμών των αρθρώσεων

Όπως προαναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, τόσο οι αρθρώσεις όσο και το ρομποτικό χέρι σαν σύνολο πρέπει να αποτελούνται από υλικά τα οποία έχουν μικρό βάρος και μηχανικές ιδιότητες οι οποίες θα επιτρέπουν την μέγιστη δυνατή ευελιξία. Ειδικότερα στο κομμάτι των αρθρώσεων οι υποχωρητικοί μηχανισμοί πρέπει να σχεδιαστούν με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να επιτρέπουν το μέγιστο δυνατό εύρος κίνησης και παράλληλα να ελαχιστοποιούν την δύναμη που απαιτείται από τους σερβοκινητήρες, προκειμένου τα δάχτυλα να εκτελέσουν κινήσεις έκτασης και κάμψης.

6.3.2. Μηχανισμός επίπεδης δοκού

Λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις παραπάνω απαιτήσεις ο υποχωρητικός μηχανισμός που σχεδιάστηκε αποτελεί μια επίπεδη δοκό, όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 46 Στιγμιότυπο μοντελοποίησης μηχανισμού επίπεδης δοκού στο Inventor

Ο μηχανισμός είναι απλοϊκός στη σύλληψη και τη σχεδίαση του. Έχει σχεδιαστεί σε 2 παραλλαγές, μια για τη σύνδεση της εγγύς φάλαγγας με τη παλάμη με μήκος 25mm και μια για την σύνδεση των υπόλοιπων φαλάγγων μεταξύ τους με μήκος 38mm. Το ύψος και στις δύο περιπτώσεις είναι 10mm, ενώ το πάχος 2mm. Ο μηχανισμός αν και απλός χαρακτηρίζεται από καλή ικανότητα αυτό – επαναφοράς, σχετικά καλή ανθρωπόμορφη εμφάνιση ενώ παράλληλα δεν καταλαμβάνει μεγάλο χώρο. Η απλότητα της κατασκευής του τον καθιστά λειτουργικό και ταυτόχρονα εύκολα παράξιμο.

6.3.3. Stress analysis του μηχανισμού επίπεδης δοκού

Για τον βέλτιστο σχεδιασμό του μηχανισμού εκτός των διαφόρων απαιτήσεων του όπως αυτοί προαναφέρθηκαν παραπάνω πρέπει επίσης να δοθεί ιδιαίτερη βαρύτητα στην αντοχή των μηχανισμών στην πλευρική και στρεπτική παραμόρφωση. Για αυτό το λόγο μέσω του προγράμματος inventor δημιουργήθηκαν κάποιες αναλύσεις καταπόνησης (stress analysis) προκειμένου να εξεταστεί η αντοχή και η παραμόρφωση του υποχωρητικού μηχανισμού.

Το υλικό κατασκευής που επιλέχθηκε για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης είναι το θερμοπλαστικό ABS (ακρυλονιτρίλιο – βουταδένιο – στυρένιο). Το θερμοπλαστικό υλικό ABS είναι ένα τριπολυμερές υλικό το οποίο συντίθεται από στυρένιο και ακρυλονιτρίλιο παρουσία πολυβουταδιενίου (Vishwakarma, Pandey & Gupta, 2017). Το εν λόγω υλικό επιλέχθηκε διότι έχει μικρό βάρος, παρουσιάζει υψηλή αντίσταση κρούσης ενώ παράλληλα δεν παρεμποδίζει την επιθυμητή ευελιξία των αρθρώσεων. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται κάποιες από τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού.

| | | | |
|--------------------|-----------------------|------------------|----------|
| Density | 1020kg/m ³ | Tensile strength | 40MPa |
| Poisson ratio | 0.394 | Shear strength | 318.9MPa |
| Elasticity modulus | 2000MPa | Bending strength | 70MPa |

Πίνακας 5 Μηχανικών ιδιοτήτων υλικού ABS (Yong, 2014)

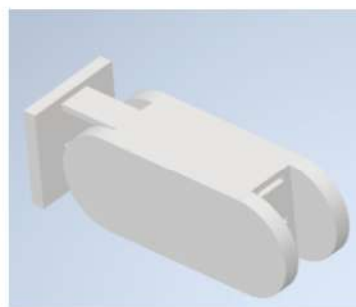
Αναφορικά με τη δύναμη που πρέπει να ασκηθεί στην προσομοίωση της καταπόνησης υπάρχουν διάφοροι περιορισμοί. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αντοχή των

αρθρώσεων των ανθρώπινων δαχτύλων διαφέρει τόσο ως προς το φύλλο όσο και προς την ιδιαίτερη ανατομία του κάθε ανθρώπου (McGee,2020). Για αυτό λόγο είναι ιδιαίτερα δύσκολο να προσδιοριστεί μια συγκεκριμένη τιμή ως όριο θραύσης για τις αρθρώσεις των δαχτύλων.

Παράλληλα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψιν η αντοχή του υλικού σε δύναμη κάμψης. Λαμβάνοντας υπόψιν τον Πίνακα 5 η μέγιστη δύναμη κάμψης του υλικού ανέρχεται στα 70 MPa. Σύμφωνα με τους Chao, Orgrande και Axmeier (1976), οι οποίοι μελέτησαν τις δυνάμεις περιορισμού των αρθρώσεων των δαχτύλων μια ασφαλής τιμή για τη δύναμη είναι τα 12N. Στα πλαίσια της εργασίας θα εξεταστεί παρακάτω η παραμόρφωση και η καταπόνηση που δέχεται η άρθρωση τόσο κάθετα στον άξονα $\chi - \chi'$ καθώς και πλάγια στον άξονα $\psi - \psi'$.



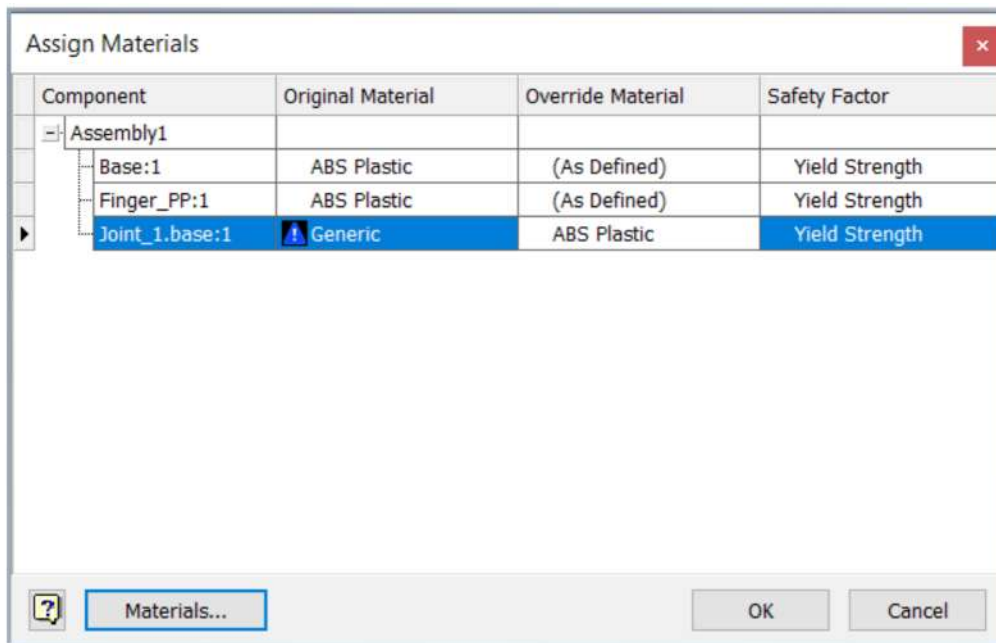
Εικόνα 47 Στιγμιότυπο από συναρμολόγηση εγγύς φάλαγγας, επίπεδης δοκού και βάσης στο Inventor



Εικόνα 48 Στιγμιότυπο από συναρμολόγηση εγγύς φάλαγγας, επίπεδης δοκού και βάσης στο Inventor

Στο παρακάτω σενάριο που δημιουργήθηκε ο υποχωρητικός μηχανισμός της επίπεδης δοκού συνδέεται με την εγγύς φάλαγγα και παράλληλα με μια πλάκα ύψους 30mm, μήκους 30mm και πάχους 4mm η οποία προσομοιάζει την βάση της παλάμης πάνω στην οποία θα προσδεθούν οι αρθρώσεις και συνολικά τα δάχτυλα.

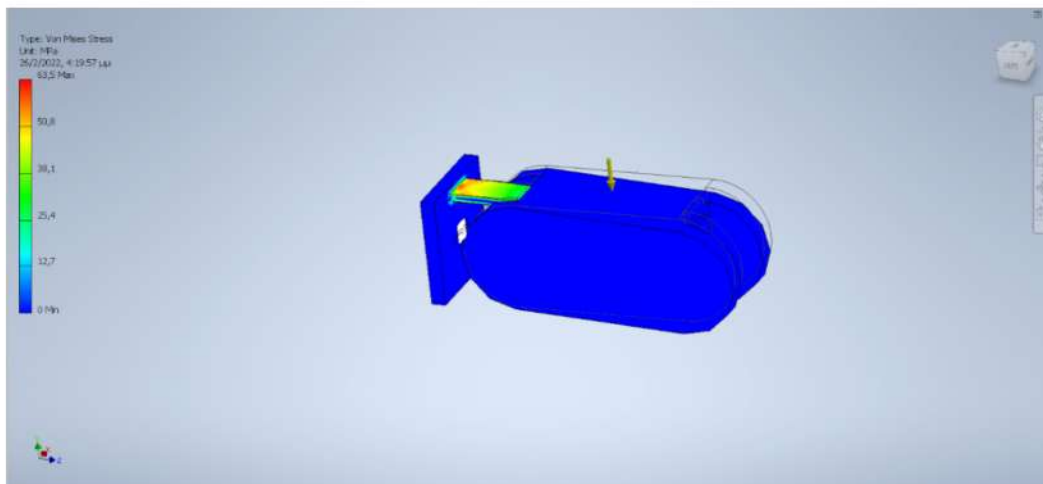
Αρχικά, από το μενού δημιουργείται μια stress analysis. Από το μενού επιλογής υλικών επιλέγεται το υλικό ABS το οποίο αναφέρθηκε παραπάνω.



Εικόνα 49 Πίνακας υλικών

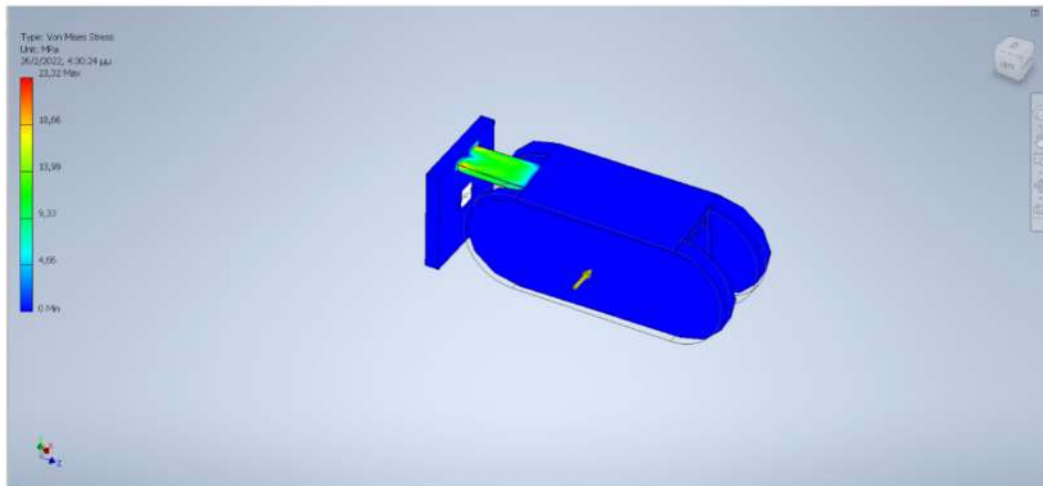
Στη συνέχεια τίθεται ως σταθερός περιορισμός (fixed constraint) η τετραγωνική βάση ενώ ο μηχανισμός της επίπεδης δοκού συνδέεται ως σύνδεσμος (joint) με τη βάση και την εγγύς φάλαγγα. Τέλος, επιλέγεται το σημείο στο οποίο θα ασκηθεί η δύναμη καθώς επίσης και το μέτρο της δύναμης.

Στη παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τη δύναμη να ασκείται κάθετα στον άξονα $\psi - \psi'$.



Εικόνα 50 Προσομοίωση καταπόνησης στον άξονο $\psi' \psi$ στο Inventor

Στο ίδιο σενάριο αυτή τη φορά η δύναμη ασκείται πλάγια στη φάλαγγα στον άξονα $\chi - \chi'$.

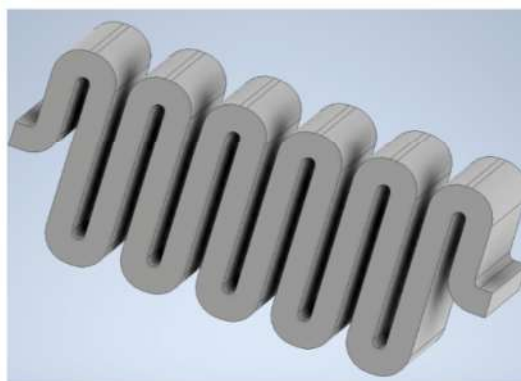


Εικόνα 51 Προσομοίωση καταπόνησης στον άξονο χ'χ στο Inventor

Από τη προσομοίωση είναι εμφανές ότι η επίπεδη δοκός δέχεται τη μεγαλύτερη καταπόνηση στο σημείο σύνδεσης της με τη βάση. Ταυτόχρονα παρατηρείται ότι ο μηχανισμός διαθέτει σημαντικά μειονεκτήματα όσον αφορά την πλάγια μετατόπιση δηλαδή την μετατόπιση στον άξονα $x - x'$ καθώς από την προσομοίωση προκύπτει μια μετατόπιση της τάξεως των 4mm.

6.3.4. Ανάπτυξη και ανάλυση μηχανισμού κυματοειδούς μορφής

Για αυτό λόγο και για την επίτευξη της μέγιστης δυνατής ευελιξίας σχεδιάστηκε εκ νέου ένας ακόμη υποχωρητικός μηχανισμός με σκοπό να λειτουργεί συνδυαστικά με το μηχανισμό της επίπεδης δοκού. Στη παρακάτω φωτογραφία παρουσιάζεται ο εν λόγω μηχανισμός κυματοειδούς μορφής.

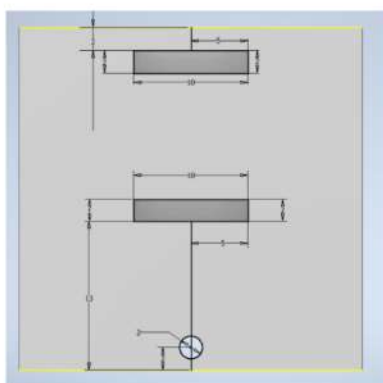


Εικόνα 52 Στιγμιότυπο μοντελοποίησης υποχωρητικού μηχανισμού κυματοειδούς μορφής στον Inventor

Ο παραπάνω μηχανισμός σχεδιάστηκε με σκοπό να αυξήσει τη μέγιστη καταπόνηση που μπορεί να δεχθούν οι αρθρώσεις και παράλληλα να προσδώσει μεγαλύτερη ευελιξία στο σύνολο των δαχτύλων. Όπως στη περίπτωση της επίπεδης

δοκού έτσι και εδώ σχεδιάστηκαν δύο παραλλαγές του μηχανισμού μια μήκους 25mm και μια ακόμη μήκους 38mm.

Αξίζει να σημειωθεί ότι δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στη σχεδίαση του ύψους των υποχωρητικών μηχανισμών. Το ύψος των μηχανισμών πρέπει να τέτοιο έτσι ώστε κατά την έκταση – κάμψη των δαχτύλων οι μηχανισμοί να λειτουργούν αρμονικά δίχως ο ένας να παρεμποδίζει την λειτουργία του άλλου ενώ παράλληλα να μην καλύπτεται η οπή στο κάτω μέρος των φαλάγγων από την οποία θα διέρχεται το συρματόσχοινο. Στη παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η βάση στην οποία θα συνδεθούν οι υποχωρητικοί μηχανισμοί όπως αυτή επανασχεδιάστηκε προκειμένου να δεχθεί και τον δεύτερο μηχανισμό κυματοειδούς μορφής.



Εικόνα 53 Στιγμιότυπο σχεδιασμού βάσης σύνδεσης μηχανισμών στο Inventor με διαστάσεις (πρόσθια όψη)



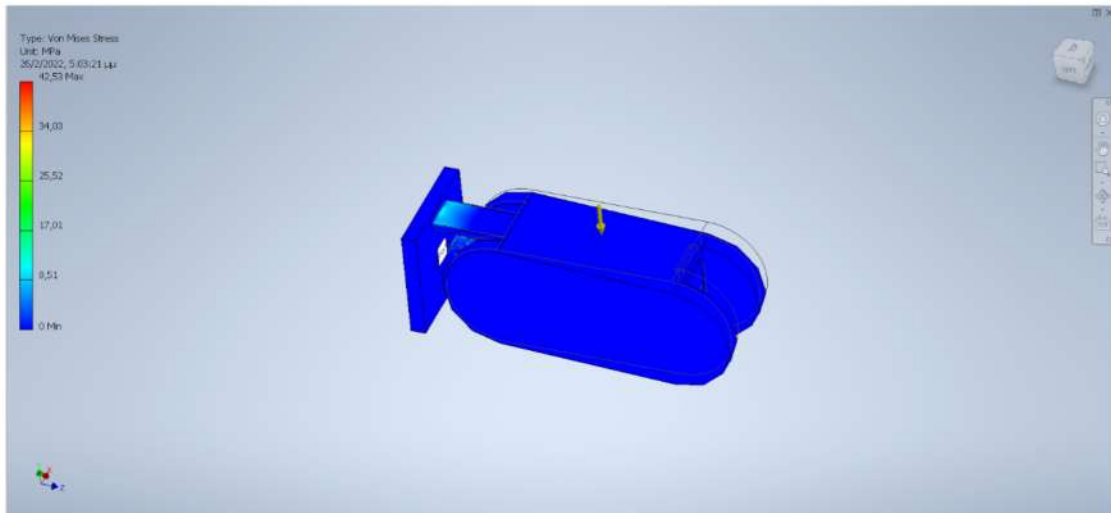
Εικόνα 54 Στιγμιότυπο από συναρμολόγηση εγγύς φάλαγγας, επίπεδης δοκού, βάσης και κυματοειδούς μηχανισμού στο Inventor



Εικόνα 55 Στιγμιότυπο από συναρμολόγηση εγγύς φάλαγγας, επίπεδης δοκού, βάσης και κυματοειδούς μηχανισμού στο Inventor

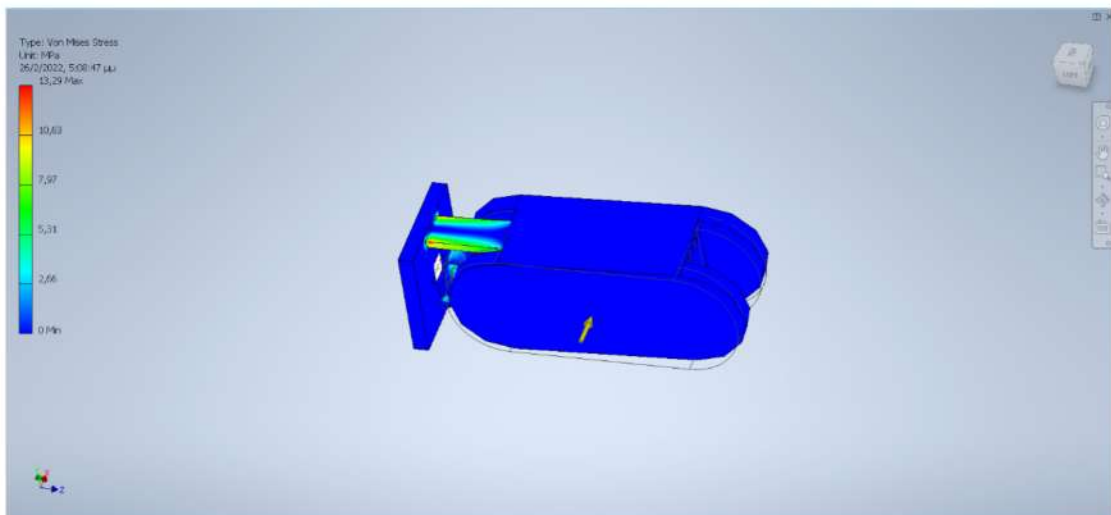
Προκειμένου να διαπιστωθεί το πως συμπεριφέρονται οι δυο μηχανισμοί ταυτόχρονα, αλλά και αν ο κυματοειδής μηχανισμός συντέλεσε στη βελτίωση της αντοχής και ευελιξίας της άρθρωσης συνολικά πραγματοποιείται εκ νέου stress analysis και με τους δύο τύπους αρθρώσεων όπως φαίνεται στη παρακάτω εικόνα.

Έτσι χρησιμοποιώντας τα ίδια δεδομένα της προσομοίωσης του πρώτου σεναρίου προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα. Αρχικά η δύναμη ασκείται στον άξονα $\psi - \psi'$.



Εικόνα 56 Προσομοίωση καταπόνησης στον άξονο $\psi'\psi$ στο Inventor

Στη συνέχεια όπως και στο αρχικό σενάριο η δύναμη ασκείται και στον άξονα $\chi - \chi'$.

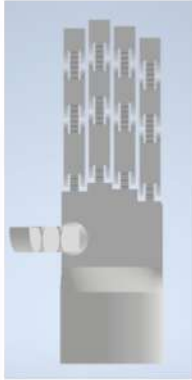


Εικόνα 57 Προσομοίωση καταπόνησης στον άξονο $\chi'\chi$ στο Inventor

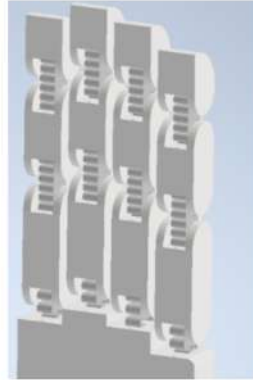
Συγκρίνοντας τα δύο σενάρια παρατηρείται ότι η τοποθέτηση και του κυματοειδούς μηχανισμού συμβάλει σημαντικά στη μείωση της καταπόνησης που δέχεται ο μηχανισμός της επίπεδης δοκού. Τα σημεία με κόκκινο χρωματισμό τα οποία και υποδηλώνουν τη μέγιστη καταπόνηση είναι εμφανώς λιγότερα. Στη κλίμακα, στα δεξιά της εικόνας 56, η οποία αποτυπώνει με νούμερα τη καταπόνηση των διαφόρων σημείων παρατηρείται ότι η μέγιστη καταπόνηση έχει μειωθεί στα 42 MPa (εικόνα 56) σε σχέση με τα 63 MPa της εικόνας 50.

Έτσι, με την ταυτόχρονη χρήση και των δύο μηχανισμών προκύπτουν σημαντικά πλεονεκτήματα όπως η αύξηση του εύρους κίνησης και ταυτόχρονα η μείωση της καταπόνησης και του ρίσκου θραύσης του μηχανισμού της επίπεδης δοκού.

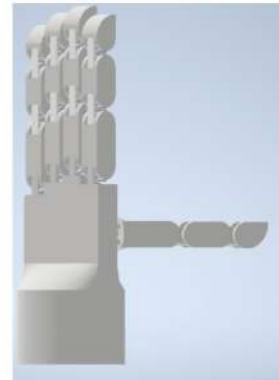
Έχοντας καταλήξει στην επιλογή και σχεδίαση των υποχωρητικών μηχανισμών και των φαλάγγων των δαχτύλων προκύπτει η συναρμολόγηση/παρουσίαση του χεριού συνολικά.



Εικόνα 58 Στιγμιότυπο μοντελοποίησης του συναρμολογημένου χεριού στο Inventor



Εικόνα 59 Στιγμιότυπο μοντελοποίησης του συναρμολογημένου χεριού στο Inventor



Εικόνα 60 Στιγμιότυπο μοντελοποίησης του συναρμολογημένου χεριού στο Inventor

Κεφάλαιο 7^ο: Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η κινηματική ανάλυση και ο σχεδιασμός ενός ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού, καθώς και η προσομοίωση του δείκτη σε προγραμματιστικό περιβάλλον, μετά από την ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας. Με την εκπόνηση της εργασίας εξάγονται ορισμένα συμπεράσματα, τα οποία αναλύονται παρακάτω.

Αρχικά, στο χωρίο της κινηματικής ανάλυσης και συγκεκριμένα στην αντίστροφη κινηματική ανάλυση για να πραγματοποιηθεί η λαβή ενός αντικειμένου κρίθηκε αναγκαίο να υπολογιστούν οι συντεταγμένες των σημείων επαφής του αντικειμένου για κάθε δάχτυλο. Επίσης, το αντίστροφο κινηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε υπολογίζει τις συντεταγμένες στα άκρα των δαχτύλων, αλλά όχι στα σημεία επαφής κάθε συνδέσμου.

Όσον αφορά το κομμάτι της προσομοίωσης του δείκτη στο λογισμικό Matlab, αξίζει να αναφερθεί ότι παρόλο που το πρόγραμμα λειτούργησε επιτυχώς, αρχικά, δεν έγινε δυνατό να αποτυπωθεί η απαγωγή και προσαγωγή του δείκτη, παρά μόνο η έκταση και η κάμψη. Επίσης, η χρήση της βιβλιοθήκης SynGrasp αποδείχθηκε χρήσιμη και αποτελεσματική για τον έλεγχο του χεριού μέσω των αρθρώσεων των δακτύλων. Ωστόσο, οι περιορισμοί στην αλληλεπίδραση των μηκών των φαλάγγων επηρέασαν σημαντικά το αποτέλεσμα της διαδικασίας.

Αναφορικά με το κομμάτι του σχεδιασμού του ρομποτικού χεριού αξίζει να αναφερθεί ότι τα δάχτυλα εκτός του αντίχειρα έχουν την δυνατότητα έκτασης και κάμψης, αλλά όχι προσαγωγής και απαγωγής. Από την μελέτη καταπόνησης που πραγματοποιήθηκε, παρατηρήθηκε ότι η συμπεριφορά της ταυτόχρονης λειτουργίας των μηχανισμών είναι ικανοποιητική σε αντοχή και ευελιξία, χωρίς βέβαια την επαλήθευση από μια προσομοίωση μετωπικής καταπόνησης. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας δόθηκε μεγαλύτερη βαρύτητα στον ανθρωπομορφισμό και στη λειτουργικότητα του ρομποτικού χεριού με αποτέλεσμα να υπάρχουν περιθώρια για περαιτέρω μελέτη άλλων παραγόντων, όπως το κόστος αγοράς. Τέλος, η περιορισμένη εξοικείωση με τα χρησιμοποιημένα λογισμικά αποτέλεσε ένα περιορισμό στην περαιτέρω ανάπτυξη της έρευνας.

Καταληκτικά, στην εν λόγω διπλωματική εργασία υλοποιήθηκε ανασκόπηση της βιβλιογραφίας σχετικά με το ρομποτικό χέρι, μελετήθηκε η κινηματική ανάλυση και ο σχεδιασμός του και προσομοιώθηκε ο δείκτης σε προγραμματιστικό περιβάλλον. Παρά τους περιορισμούς που προέκυψαν από τα εργαλεία που αξιοποιήθηκαν, η συγκεκριμένη μοντελοποίηση επιτεύχθηκε σε ένα σύντομο χρονικό διάστημα και με λογισμικά εύκολα προσβάσιμα. Επομένως, αυτό εγείρει προβληματισμούς για τη βελτίωση της προσέγγισης στο μέλλον. Αυτό δύναται να επιτευχθεί με ποικίλους τρόπους, όπως η αύξηση του ανθρωπομορφισμού του άκρου, η βελτίωση της λεπτής κινητικότητας, η αύξηση του αριθμού των δυνατών κινήσεων, η μείωση του κόστους χρήσης, αλλά και η καλύτερη από αισθητικής πλευράς.

Βιβλιογραφία – Αναφορές – Διαδικτυακές Πηγές

Bibby, J. (2008). *Robonaut. National Aeronautics And Space Administration*. Ανακτήθηκε από: <https://robonaut.jsc.nasa.gov/r1/sub/hands.asp>

Bridgwater, L. Ihrke, C. Diftler, M. Abdallah, M and others. (2012). *The Robonaut 2 Hand – Designed To Do Work With Tools*. Thesis. Houston, Texas: NASA. Ανακτήθηκε από: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20110023122/downloads/20110023122.pdf>

Bucur, D. A., Vladareanu, L., Yu, H. N., Zhao, X. C., & Dumitru, S. (2015). Hybrid Force-Position Humanoid Hand Control in 3D Virtual Environment. Σε *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 762, σσ. 91 – 97. DOI:10.4028/www.scientific.net/a. Ανακτήθηκε από: <https://sci-hub.se/10.4028/www.scientific.net/amm.762.91>

Bundhoo, V. (2009). *Design and evaluation of a shape memory alloy-based tendon-driven actuation system for biomimetic artificial fingers*. Thesis. University of Victoria. Ανακτήθηκε από: <https://dspace.library.uvic.ca/bitstream/handle/1828/1784/Design%20and%20evaluation%20of%20a%20shape%20memory%20alloy-based%20tendon-driven%20actuation%20system%20for%20biomimetic%20artificial%20fingers.pdf?sequence=1>

Cardozo, M., Serrezuela, R., Trujillo, J., Zamora, R. & Reyes, E. (2021). Design and implementation of a robotic hand prosthesis under the tensegrity approach for transradial amputees. Σε *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 16, No (4), σσ. 503 – 508. ISBN: 1819-6608. Ανακτήθηκε από: https://www.researchgate.net/profile/Ruthber-Rodriguez/publication/350808830_DESIGN_AND_IMPLEMENTATION_OF_A_ROBOTIC_HAND_PROSTHESIS_UNDER_THE_TENSEGRITY_APPROACH_FOR_TRANSRADIAL_AMPUTEES/links/6073cf494585150fe99f3db0/DESIGN-AND-IMPLEMENTATION-OF-A-ROBOTIC-HAND-PROSTHESIS-UNDER-THE-TENSEGRITY-APPROACH-FOR-TRANSRADIAL-AMPUTEES.pdf

Chao, Opgrande, Axmear. (1976). *Three-dimensional force analysis of finger joints in selected isometric hand functions*. Σε *Journal of Biomechanics*. Volume 9, Issue 6. Ανακτήθηκε από: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0021929076901160>

Cubero, S. (2007). *Industrial Robotics Theory, Modelling and Control*. Croatia: Verlag Robert Mayer-Scholz

Dutta, N., Saha, J., Sarker, F., & Zaman, H. U. (2018). A novel design of a multi-DOF mobile robotic helping hand for paralyzed patients. Σε *International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, σσ. 2219 – 2225. Ανακτήθηκε από: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8554423>

Elumotion Ltd. (2016). *Elumotion - Biologically Inspired Robotic Devices*. Ανακτήθηκε από: <http://elumotion.com/index.php/portfolio/project-title-1>

Hale W. G., Saunders V. A., Margham J. P.. (2005). *Collins Dictionary of Biology*, 3rd ed. Ανακτήθηκε από: <https://medical-dictionary.thefreedictionary.com>

Hansen, J. T., Netter, F. H. 1., & Machado, C. A. G. (2019). *Netter's clinical anatomy* (4th edition.). Philadelphia, PA: Elsevier.

Howell, L. Magleby S. Olsen, B. (2013). *Handbook of Compliant Mechanisms*. UK: Wiley.

Jones, Lynette. Lederman, Susan. (2006). *Human Hand Function*. Σε *Journal of Hand Surgery*. Vol. 32. DOI: 10.1093/acprof:oso/9780195173154.001.0001. Ανακτήθηκε από: https://www.researchgate.net/publication/231514041_Human_Hand_Function

Kyberd, P. Light, C. Chappell, P and others. (2001). The design of anthropomorphic prosthetic hands: A study of the Southampton Hand. *Robotica*. Volume 19, pp. 593-600. Cambridge University Press. Ανακτήθηκε από: <https://www.cambridge.org/core>

Layton, H. (1999). *Principles and techniques for designing precision machines*. PhD Thesis,. Massachusetts Institute of Technology. Ανακτήθηκε από: https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc784803/m2/1/high_res_d/8431.pdf

Mahdi, H. (2014). *3D Printed Myoelectric Prosthetic Arm*. Thesis. School of Aeronautical, mechanical and mechatronic engineering (AMME). Ανακτήθηκε από: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0309364615579317>

MathWorks. (2020). *Company Overview*. Ανακτήθηκε από: <https://uk.mathworks.com/content/dam/mathworks/handout/2020-company-factsheet-8-5x11-8282v20.pdf>

Melchiorri, C. Palli, G. Berselli, G. and Vassura, G. (2013). Development of the UB Hand IV. *IEEE ROBOTICS & AUTOMATION MAGAZINE*. 10.1109/MRA.2012.2225471. Ανακτήθηκε από: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6523131?casa_token=PykZe1DJ4cgAAAAA:bVBRZZm8QJyXActLZFna6jUE3fulxCgssKHjDSadmRdnN3tc9hNZYYdy0GRNSK3xaZnoTH-SUPqZ

Metalios, Z. (2020). CAD, CAM, & BIM: What is Autodesk Inventor?. Ανακτήθηκε από: <https://www.solidprofessor.com/blog/what-is-autodesk-inventor/>

Premsilia. (2013). *Extrinsic Robotic Hand Basic User Guide*. Ανακτήθηκε από: https://www.premsilia.com/wp-content/uploads/support/doc/PREMSILIA_EH1_basic_10.pdfhttps://www.premsilia.com/wpcontent/uploads/support/doc/PREMSILIA_EH1_basic_10.pdf

Puig, J. E. P., Rodriguez, N. E. N., & Ceccarelli, M. (2008). A Methodology for the Design of Robotic Hands with Multiple Fingers. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 5(2), 22. <https://doi.org/10.5772/5600>

Ramasamy, S. & Arshad, M. R. (200). Robotic hand simulation with kinematics and dynamic analysis, *2000 TENCON Proceedings: Intelligent Systems and Technologies for the New Millennium*, σσ. 178 – 183, Vol. 3. DOI: 10.1109/TENCON.2000.892246. Ανακτήθηκε από: <https://sci-hub.se/10.1109/tencon.2000.892246>

Shadow Robot Company. (2021). *Shadow Dexterous Hand Technical Specification*. Ανακτήθηκε από: https://www.shadowrobot.com/wp-content/uploads/shadow_dexterous_hand_technical_specification_E_20190221.pdf

Shuib, S. & Ridzwan, M. & Kadarman, A H.. (2007). Methodology of Compliant Mechanisms and its Current Developments in Applications: A Review. Σε *American Journal of Applied Sciences*. Vol. 4, 160-167. DOI: 10.3844/ajassp.2007.160.167. Ανακτήθηκε από: https://www.researchgate.net/publication/270072020_Methodology_of_Compliant_Mechanisms_and_its_Current_Developments_in_Applications_A_Review

Trimble. (2022). Sketch Up. Ανακτήθηκε από: <https://www.sketchup.com/>

Vishwakarma, S., Pandey, P. & Gupta, N. (2017). Characterization of ABS Material: A Review. Σε *Journal of Research in Mechanical Engineering*, Vol. 3, Issue 5, σσ. 13 – 16. ISSN(Online): 2321-8185. Ανακτήθηκε από: file:///D:/My_Documents/Downloads/CharacterizationofABSMaterialAReview.pdf

Wanshigton, A. (χ.χ.). *The Signed Handprints of Albert Einstein*. Ανακτήθηκε από: <https://www.pdc.co.il/einstein.html>

X. Yong, X. Jing, Y. Jiang, H. Yokoi and R. Kato, "Tendon drive finger mechanisms for an EMG prosthetic hand with two motors," 2014 7th International Conference on Biomedical Engineering and Informatics, 2014, pp. 568-572, doi: 10.1109/BMEI.2014.7002838. Ανακτήθηκε από: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7002838>

Κριτσωτάκης. Ν. (2012). Κινηματική ανάλυση και έλεγχος κίνησης-λαβής ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού. Πτυχιακή. Ηράκλειο: Τεχνολογική Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης. Ανακτήθηκε από: <https://apothesis.lib.hmu.gr/handle/20.500.12688/4299>

Κωνσταντουδάκης. Ι. (2012). Σχεδίαση και κατασκευή ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού. Πτυχιακή. Ηράκλειο: Τεχνολογική Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης. Ανακτήθηκε από: <https://apothesis.lib.hmu.gr/handle/20.500.12688/8085>

Μαραγκουδάκης, Θ. (2017). *Κινηματική Ανάλυση του Ρομποτικού βραχίονα KUKA KR 15/1*. Διπλωματική. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Ανακτήθηκε από: <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/47734/%CE%9A%CE%B9%CE%BD%CE%B7%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE%20%CE%91%CE%BD%CE%AC%CE%BB%CF%85%CF%83%CE%B7%20%CF%84%CE%BF%CF%85%20%CE%A1%CE%BF%CE%BC%CF%80%CE%BF%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CF%8D%20%CE%92%CF%81%CE%B1%CF%87%CE%AF%CE%BF%CE%BD%CE%B1%20KUKA%20KR%2015.1.pdf?sequence=1>