

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**



**ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ
ΜΗΧΑΤΡΟΝΙΚΟΥ ΕΞΩΣΚΕΛΕΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
ΑΝΩ ΑΚΡΟΥ (ΧΕΡΙΟΥ) ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗ
ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΕ ΑΤΟΜΑ ΜΕ ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΔΥΣΚΟΛΙΑ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ελισάβετ Χρυσοβαλάντου Ξενίδου
ΑΜ 2919134**

Επιβλέπων καθηγητής: Στέφανος Ζαούτσος

ΛΑΡΙΣΑ 2024

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

Τόπος: Λάρισα

Ημερομηνία: 01/03/2024

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Ζαούτσος Στέφανος
2. Θεοδοσίου Θεοδόσιος
3. Νταφόπουλος Βασίλειος

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ

Με το παρόν κείμενο βεβαιώνω ότι ο κάτωθι υπογράφων είμαι συγγραφέας της παρούσας πτυχιακής εργασίας, η οποία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των απαιτήσεων του προγράμματος σπουδών του Τμήματος Συστημάτων Ενέργειας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και η οποία παραδόθηκε, μετά από έγκριση του επιβλέποντας καθηγητή μου, σε έντυπη και ψηφιακή μορφή στην Γραμματεία του Τμήματος. Επίσης δηλώνω πως κάθε πηγή που χρησιμοποίησα (βιβλιογραφία, αρθρογραφία, δικτυογραφία), για την υποστήριξη των υποθέσεων της μελέτης και της ερευνάς μου, είναι πλήρως υπό μορφή αναφοράς-παραπομπής, σε όλο το φάσμα κειμένων της παρούσας εργασίας. Το αυτό ισχύει για την χρήση δευτερογενών δεδομένων (πινάκων, διαγραμμάτων και εικόνων), ιδεών και λέξεων, τα οποία και αναφέρονται είτε ακριβώς όπως υπάρχουν στις πηγές είτε μεθερμηνεύονται από εμένα.

ΕΠΩΝΥΜΟ	ΞΕΝΙΔΟΥ
ΟΝΟΜΑ	ΕΛΙΣΑΒΕΤ ΧΡΥΣΟΒΑΛΑΝΤΟΥ
ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ	2919134
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	16/02/2024
ΥΠΟΓΡΑΦΗ	

©2024, ΞΕΝΙΔΟΥ ΕΛΙΣΑΒΕΤ ΧΡΥΣΟΒΑΛΑΝΤΟΥ

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας της Σχολής Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους ανθρώπους που βοήθησαν στην πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας.

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου Κ. Στέφανο Ζαούτσο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά την διάρκεια της υλοποίησης της πτυχιακής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την στήριξη που μου πρόσφερε κατά την διάρκεια των σπουδών μου, καθώς και τους συγγενείς και φίλους για την ηθική υποστήριξη όλο αυτό το διάστημα. Η συνεχής στήριξή τους μου έδωσε την δυνατότητα να φτάσω στο τέλος των προπτυχιακών μου χρόνων.

Ελισάβετ Χρυσοβαλάντου Ξενίδου

Λάρισα, Φεβρουάριος 2024

Στην μνήμη του αγαπημένου μου παππού, Διονύση

Περιεχόμενα

1 ^ο Εισαγωγή.....	2
1.1 Το ανθρώπινο χέρι.....	2
1.1.1 Βασικά στοιχεία του ανθρώπινου χεριού	2
1.1.2 Βασικές κινήσεις των δακτύλων	4
1.2 Κινητικό σύστημα	4
1.2.1 Οστεολογία	4
1.2.2 Συνδεσμολογία	6
1.2.3 Μυολογία.....	7
1.2.4 Χαρακτηριστικά και ενέργεια των μύων.	9
1.2.5 Αιμάτωση του άνω άκρου.....	14
2 ^ο Ρομποτική.....	16
2.1 Τι είναι η ρομποτική και τα οφέλη της	16
2.2 Τι είναι το ρομποτικό χέρι	16
2.2.1 Μηχανολογικό υποσύστημα.....	17
2.2.2 Επενεργητές	18
2.2.3 Σερβοκινητήρες	19
2.3 Δομικές ομοιότητες μεταξύ ανθρώπινων και ρομποτικών χεριών.....	19
2.4 Ορισμός του ρομπότ και η δομή του.....	20
2.4.1 Μηχανική δομή.....	21
3 ^ο Παράμετροι του βιομηχανικού ρομπότ.....	28
3.1 Αριθμός αξόνων	28
3.2 Κινηματική του βιομηχανικού ρομπότ	29
3.3 Βαθμοί ελευθερίας	29
3.3.1 DOFs.....	30
3.3.2 Ενεργοποιητές.....	31
3.3.3 Εύκαμπτες μονάδες παραμόρφωσης.....	32
3.4 Εμβέλεια του ρομποτικού βραχίονα	33
3.5 Ελεγχόμενα κλειδιά και στροφές.....	33
3.6 Επιθυμητές ιδιότητες	34

3.7 Ανάλυση περιορισμών	36
4 ^ο Μοντελοποίηση της ανθρωπομορφικής υπολειτουργίας.....	38
4.1 Μοντελοποίηση της ανθρωπομορφικής υπολειτουργίας.....	38
4.1.1 Περιγραφή συστήματος DLR/HIT II Hand.....	40
4.1.2 Κινηματικό μοντέλο ανθρώπινου χεριού	41
5 ^ο Ανασκόπηση των κινηματικών δομών.....	45
5.1 Το χέρι του Βελιγραδιού.....	45
5.1.1 Το χέρι της Γιούτα/MIT.....	46
5.1.2 Το χέρι του Ρομποναύτη.....	48
5.1.3 Το χέρι της σκιάς.....	49
5.2 Τεχνολογίες ανίχνευσης και συστήματα ενεργοποίησης.....	50
5.2.1 Το χέρι Belgrade/USC.....	50
5.2.2 Το χέρι Utah/MIT.....	51
5.2.3 Το χέρι του ρομποναύτη	52
5.2.4 Το Χέρι της Σκιάς.....	53
6 ^ο Ιστορικό και συναφείς εργασίες	54
6.1 Τρισδιάστατη εκτύπωση και αρχιτεκτονική χεριών	54
6.2 Σχετικά έργα για τα 3D εκτυπωμένα χέρια	56
6.3 Ρομποτικό λειτουργικό σύστημα (ROS)	58
6.4 Δομή.....	60
7 ^ο Προκαταρκτικός προτεινόμενος σχεδιασμός.....	62
7.1 Δομή.....	62
7.2 Ηλεκτρικά στοιχεία	62
7.2.1 Μικροελεγκτές-Arduino	62
7.2.2 Κινητήρες	65
7.2.3 Αισθητήρες.....	65
7.3 Επιλογές λογισμικού.....	66
7.3.1 Προσομοίωση ελέγχου κλειστού βρόχου	66
7.3.2 Υπηρεσία ROS και πέρασμα μηνυμάτων	66
7.3.3 ROSserial.....	66
7.3.4 Οδηγός ROS-MYO	67
8 ^ο Τελικός σχεδιασμός και υλοποίηση	68
8.1 Δομή και συναρμολόγηση.....	68
8.2 Ηλεκτρικά εξαρτήματα	70

8.2.1 Σχηματικά.....	70
8.2.2 Βαθμονόμηση αισθητήρα	71
8.2.3 Βαθμονόμηση σερβομηχανημάτων	71
8.2.4 Μεταφορά στο Perfboard.....	72
8.3 Σχεδιασμός λογισμικού	73
8.3.1 Μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων	73
8.3.2 Εφαρμογή ROS.....	74
9 ^ο Εκτιμήσεις επιδόσεων και αποτελέσματα	76
9.1 Μέγεθος.....	76
9.2 Συγκράτηση.....	76
9.3 Κινήσεις	76
10 ^ο Οδηγίες κατασκευής ρομποτικού χεριού.....	78
10.1 3D εκτύπωση – Σχέδιο και κομμάτια	78
11 ^ο Συμπέρασμα.....	80
11.1 Μελλοντική δουλειά	81
Βιβλιογραφία.....	83

Κατάλογος Πινάκων/Διαγραμμάτων

Πίνακας 1: Η μάζα των εξαρτημάτων του εξωσκελετικού χεριού.....	26
Διάγραμμα 1: Αντιμετώπιση αλλαγής θέσης στον χώρο.....	28
Διάγραμμα 2: Αντιμετώπιση αλλαγής θέσης στον χώρο.....	28
Πίνακας 2: Συστήματα εξωσκελετικών μαλακών χεριών.....	31
Πίνακας 3: Γωνίες ενεργών κινήσεων των αρθρώσεων των δακτύλων από τον δείκτη έως το μικρό δάχτυλο.....	44
Διάγραμμα 3: Διαδρομή flexoextension της κινηματικής αλυσίδας των τριών φαλαγγών του μεσαίου δακτύλου ($0^\circ \leq MCP \leq 90^\circ$, $0^\circ \leq PIP \leq 90^\circ$, and $0^\circ \leq DIP \leq 60^\circ$).....	44
Πίνακας 4:Κινηματική δομή του σκιώδους χεριού.....	50
Πίνακας 5: Εναλλακτικές λύσεις δομικού σχεδιασμού μεταξύ των μοντέλων CAD, περιγράφοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των κάθε μοντέλων.....	60 - 61
Πίνακας 7: Απεικόνιση των κομματιών που δόθηκαν για 3D εκτύπωση..	78 - 79

Κατάλογος Εικόνων/Σχημάτων

Εικόνα 1: Τα επίπεδα του χεριού και οι κινήσεις των δακτύλων.....	3
Εικόνα 2: Κινήσεις τον δακτύλων.....	4
Εικόνα 3: Οστά άνω άκρου.....	6
Εικόνα 4: Αρθρώσεις άνω άκρου.....	6
Εικόνα 5: Μύες άνω άκρου.....	7
Εικόνα 6: Μύες άνω άκρου.....	7
Εικόνα 7: Μύες τις άκρας χειρός.....	8
Εικόνα 8: Φλέβες άνω άκρου.....	14
Εικόνα 9: Δομή του ανθρώπινου βραχίονα.....	20
Εικόνα 10: Δομή του ρομποτικού βραχίονα.....	20
Εικόνα 11: Περιστροφή αρθρώσεων μεταξύ του βραχίονα και του τελικού παράγοντα του ρομπότ.....	20
Εικόνα 12: Μοντέλο CAD μηχανισμός κάμψης με ελατήριο επιστροφής (Κατάσταση ηρεμίας).....	24
Εικόνα 13: Μοντέλο CAD κατάσταση κάμψης.....	24
Εικόνα 14: Μηχανοτρονικός σχεδιασμός: Εξαρτήματα μονάδων ελέγχου.....	25
Εικόνα 15: Προκαταρκτικές δοκιμές των κινήσεων των ψηφίων.....	26
Εικόνα 16: Δύο τυπικά συστήματα μαλακών ρομποτικών εξωσκελετικών χεριών με εύκαμπτες ράβδους.....	32
Εικόνα 17: Γραμμικοί χάρτες που αφορούν τις στροφές και τις στρέψεις ενός συστήματος σύλληψης.....	34
Εικόνα 18: DLR-HIT Hand II.....	41
Εικόνα 19: Το κινηματικό μοντέλο 25 βαθμών ελευθερίας του ανθρώπινου χεριού.....	42
Εικόνα 20: Κινηματικό μοντέλο χεριού με σταθερό μετακάρπιο (εκτός από τον αντίχειρα).....	44
Εικόνα 21: Διαμόρφωση του δεξιού χεριού, οι αρθρώσεις 0 είναι παράλληλες προς το επίπεδο βάσης.....	47
Εικόνα 22: Το χέρι ρομπότ Shadow Dextrous Robot Hand.....	49
Εικόνα 23: Σχέδιο του χεριού της ομάδας του Pizarro, που δείχνει το δέρμα (μαύρο) και την εκτεθειμένη δομή των οστών (λευκό).....	54
Εικόνα 24: Στατικό σε αρθρωτό μοντέλο χεριού χρησιμοποιώντας τη μέθοδο μετασχηματισμού του Cal`i.....	55

Εικόνα 25: Το μοντέλο χεριού του De Laurentis που δείχνει αρθρώσεις που δεν είναι συναρμολογημένες και σημεία για ενσωματωμένα εξαρτήματα εισαγωγή.....	55
Εικόνα 26: Σχέδιο χεριού της ομάδας του Borghesan, που δείχνει πώς κάθε καλώδιο τάσης ελέγχει την πλευρική ή την καμπύλωση κίνηση του δακτύλου.....	56
Εικόνα 27: Σχήματα τρισδιάστατων μοντέλων χεριών ανοικτού κώδικα..	57 - 58
Εικόνα 28: Ένα μπλοκ διάγραμμα που δείχνει πώς λειτουργούν οι κόμβοι και τα μηνύματα στο ROS.....	59
Εικόνα 29: Άνω όψη του συναρμολογημένου χεριού με τον αντιβραχίονα ανοιχτό, όπου φαίνονται τα σερβομηχανήματα στο εσωτερικό του.....	69
Εικόνα 30: Σχήματα του άκρου του δακτύλου σιλικόνης.....	69
Εικόνα 31: Short-tail FSR από Pololu citepololu-sensor.....	70
Εικόνα 32: Σχηματική απεικόνιση του πρωτοτύπου συστήματος ρομποτικού χεριού που σχεδιάστηκε με τη χρήση του Fritzing.....	71
Εικόνα 33: Σχηματική απεικόνιση σχεδίων perfboard σχεδιασμένων στο Fritzing.....	72
Σχήμα 1: Διάγραμμα κατάστασης της μηχανής πεπερασμένων καταστάσεων που σχεδιάστηκε για το ρομποτικό χέρι.....	74
Σχήμα 2: Διάγραμμα κόμβων της μηχανής πεπερασμένων καταστάσεων που υλοποιήθηκε στο ROS, που δείχνει πώς οι κόμβοι επικοινωνούν μέσω μεταβίβασης μηνυμάτων.....	75
Εικόνα 34: Πέντε σχήματα χειρονομιών κατανοητά από τον άνθρωπο που εκτελούνται από το τρισδιάστατο εκτυπωμένο χέρι ενώ βρίσκεται σε κατάσταση "Χειρονομία".....	76 - 77
Εικόνα 35: Απεικόνιση ολοκληρωμένου χεριού.....	79

Κατάλογος Συντομογραφιών

rpm Στροφές ανά λεπτό

mm Χιλιοστά

volt Μονάδα μέτρησης της ηλεκτρικής τάσης

watt Μονάδα μέτρησης της ισχύος

MNm Μεγανιούτον-μέτρο

Kg Κιλά

Libres Μονάδα μέτρησης της μάζας στο Βρετανικό Σύστημα

Bit Μονάδα μέτρησης ποσότητας πληροφορίας στα υπολογιστικά συστήματα

Bar Μονάδα μέτρησης της πίεσης

Dof's Βαθμοί ελευθερίας

N (Newton) Είναι η δύναμη που ασκεί η βαρύτητα της γης σε σώμα μάζας περίπου 102 γραμμαρίων

pitch περιστροφή γύρω από τον άξονα X

yaw περιστροφή γύρω από τον άξονα Y

kg-cm Μονάδα μέτρησης κιλό ανά εκατοστό

kΩ Μονάδα μέτρησης ηλεκτρικής αντίστασης

mA Μονάδα μέτρησης τάσης

mm/s Μονάδα μέτρησης της ταχύτητας

Περίληψη

Η ανάπτυξη συσκευών δυναμικής αποκατάστασης μπορεί να αξιολογηθεί ως ένας ερευνητικός τομέας που αναπτύσσεται ταχύτατα. Πράγματι, η θεραπεία με τη βοήθεια ρομπότ είναι μια προηγμένη νέα τεχνολογία. Αν και οι ασθενείς επωφελούνται από αυτή την τεράστια ανάπτυξη της τεχνολογίας, συμπεριλαμβανομένων της παρουσίας των ρομπότ αποκατάστασης, ο θεραπευτικός τομέας εξακολουθεί να πάσχει από έλλειψη σε ρομποτικά χέρια-συσκευές αποκατάστασης. Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα εργασία προτείνει ένα νέο σχεδιασμό ενός τρισδιάστατα εκτυπωμένου εξωσκελετικού χεριού. Το παρόν έγγραφο εξετάζει εν συντομία διαφορετικά συστήματα ρομποτικών εξωσκελετικών χεριών από δύο απόψεις: μηχανική σχεδίαση και σύστημα ελέγχου. Επίσης, για το σκοπό αυτό, συλλέγονται τα διαθέσιμα δεδομένα σχετικά με την κίνηση των ανθρώπινων δακτύλων από τη βιβλιογραφία της νευροεπιστήμης προκειμένου να εξαχθεί μια είσοδος αναφοράς για να μελετηθεί ο έλεγχος των αριθμών των ενεργοποιητών και των βαθμών ελευθερίας (DOF's). Τέλος, ο στόχος του έργου είναι η αναπαραγωγή των περισσότερων λειτουργιών ενός προηγμένου ρομποτικού χεριού με τη χρήση 3D εκτυπωμένων εξαρτημάτων. Για να επιτευχθεί αυτό, ένα τρισδιάστατα εκτυπωμένο ρομποτικό χέρι πρέπει πρώτα να συναρμολογηθεί από το μηδέν. Αυτό το χέρι θα μιμείται τις λειτουργικότητες των προηγμένων χεριών χωρίς να υποβαθμίζει την τιμή. Το υποσύνολο των προηγμένων λειτουργιών που επιλέξαμε να μιμηθούμε είναι: γρήγορος κινητήρας απόκριση, πιάσιμο με μεγάλη δύναμη, σχηματισμός απλών ανθρώπινων χειρονομιών, ελεγχόμενη με ανάδραση άσκηση δύναμης και ενσωμάτωση.

Abstract

The development of dynamic rehabilitation devices can be evaluated as a rapidly growing research area. Indeed, robot-assisted therapy is an advanced new technology. Although patients are benefiting from this tremendous growth in technology, including the presence of rehabilitation robots, the therapeutic field still suffers from a shortage of robotic hand-assisted rehabilitation devices. In this context, this paper proposes a novel design of a 3D printed exoskeletal hand. This paper briefly reviews different robotic exoskeletal hand systems from two aspects: mechanical design and control system. Also, for this purpose, available data on human finger movement from the neuroscience literature is collected in order to extract a reference input to study the control of actuator numbers and degrees of freedom (DOF's). Finally, the goal of the project is to reproduce most of the functions of an advanced robotic hand using 3D printed components. To achieve this, a 3D printed robotic hand must first be assembled from scratch. This hand will mimic the functionalities of advanced hands without compromising on price. The subset of advanced functionalities we chose to mimic are: fast motor response, high force grasping, formation of simple human gestures, feedback-controlled force exertion, and integration.

Λέξεις κλειδιά: αποκατάσταση χεριών, εξωσκελετικό χέρι, ρομπότ, ρομποτική αποκατάσταση, Dof's.

1^ο Εισαγωγή

Η ανθρωποειδής ρομποτική είναι ένας αναπτυσσόμενος τομέας έρευνας λόγω των πιθανών εφαρμογών της στην ορθοπεδική και προσθετική εργασία για τον άνθρωπο. Η αναπαραγωγή της λειτουργικότητας και των συμπεριφορών ενός πολύπλοκου βιολογικού συστήματος με τη χρήση άκαμπτων μηχανικών εξαρτημάτων μπορεί να αποτελέσει πρόκληση, και το ανθρώπινο χέρι δεν αποτελεί εξαίρεση. Αποτελείται από 29 οστά, 34 μύες και 123 συνδέσμους, το ανθρώπινο χέρι, είναι ένα πολύ πολύπλοκο σύστημα, που αποτελεί μια πρόκληση, ερευνητικό ερώτημα για την ανθρωποειδή ρομποτική σχετικά με τον τρόπο ανακατασκευής του με μηχανικά εξαρτήματα. Με τις διαθέσιμες σήμερα τεχνολογίες, το πιο προηγμένο ρομποτικό χέρι που χρησιμοποιείται στην προσθετική και την ανθρωποειδή ρομποτική μπορεί να εκτελέσει τις περισσότερες από τις εργασίες που μπορεί να εκτελέσει ένα ανθρώπινο χέρι, από την αρπαγή αντικειμένων διαφόρων σχημάτων και την κατανομή βάρους, το χειρισμό με εργαλεία για την εκτέλεση σύνθετων εργασιών, το μάζεμα μικρών και εύθραυστων αντικειμένων, όπως ένα νόμισμα, ή και μια βελόνα. Με κάθε ερευνητική προσπάθεια βελτίωσης του χεριού, τα ανθρωποειδή ρομποτικά χέρια προσεγγίζουν σταδιακά την επιδεξιότητα ενός ανθρώπινου χεριού.

1.1 Το ανθρώπινο χέρι

1.1.1 Βασικά στοιχεία του ανθρώπινου χεριού

Το χέρι αποτελείται από τέσσερα δάχτυλα και έναν αντίχειρα. Κοιτάζοντας το δεξί μας χέρι από την εσωτερική πλευρά (παλάμη), τα ονόματά τους είναι: το πρώτο δάχτυλο από δεξιά είναι ο δείκτης, δίπλα στον δείκτη είναι το μεσαίο ή μεγάλο δάχτυλο, αριστερός του μεσαίου δαχτύλου είναι ο παράμεσος και δίπλα σε αυτόν είναι ο μικρός. Δεδομένης της ανατομικής πολυπλοκότητας του φυσικού χεριού, είναι απαραίτητο να οριστούν και να αποσαφηνιστούν ορισμένοι από τους κοινούς όρους σε αυτό το κεφάλαιο, ώστε να διευκολυνθεί η πλαισιωμένη περιγραφή του ανθρώπινου χεριού.

Οι όροι εγγύς και άνω, είναι όροι που καθορίζουν τη θέση ενός ανατομικού στοιχείου σε σχέση με ένα κεντρικό σημείο. Έτσι, το άνω μέρος του δακτύλου αναφέρεται στην άκρη του και το εγγύς μέρος στη βάση του.

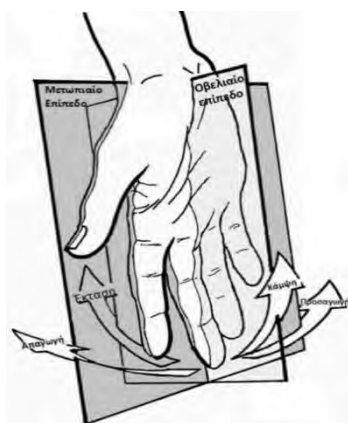
Η παλάμη αναφέρεται στο εσωτερικό της παλάμης και η ραχιαία αναφέρεται στο πίσω μέρος του χεριού.

Το μετωπιαίο επίπεδο είναι το επίπεδο που είναι παράλληλο προς την παλάμη όταν τα δάχτυλα είναι τεντωμένα (σε έκταση). Το οβελιαίο ή μεσαίο επίπεδο είναι το επίπεδο που είναι κάθετο στην παλάμη, δηλαδή κάθετο στο μετωπιαίο επίπεδο.

Η κάμψη και η έκταση του χεριού βασίζονται στο μετωπιαίο επίπεδο. Η κάμψη είναι το λύγισμα μιας άρθρωσης έτσι ώστε τα δάχτυλα να απομακρύνονται από το μετωπιαίο επίπεδο και να κλείσει το χέρι. Η έκταση του χεριού αναφέρεται στην κίνηση των δακτύλων που κινούνται πλευρικά προς το μετωπικό επίπεδο για να σχηματίσουν μια επίπεδη παλάμη.

Η προσαγωγή είναι μια κίνηση που φέρνει ένα ανατομικό στοιχείο πιο κοντά στο μεσαίο ή οβελιαίο επίπεδο. Η απαγωγή είναι μια κίνηση που απομακρύνει ένα ανατομικό συστατικό από το οβελιαίο επίπεδο. Το ωλένιο αναφέρεται στο μακρύ εξωτερικό οστό του κόκκαλου του αντιβραχίου, δηλαδή, το οστό στην αντίθετη μεριά του αντίχειρα.

Ο όρος “δάχτυλα”, αφορά μόνο τα τέσσερα δάχτυλα του χεριού και όχι τον αντίχειρα. Έτσι, το χέρι έχει πέντε ψηφία: τέσσερα δάχτυλα και τον αντίχειρα.



Εικόνα 1: Τα επίπεδα του χεριού και οι κινήσεις των δακτύλων.

1.1.2 Βασικές κινήσεις των δακτύλων

Η κίνηση των αρθρώσεων χαρακτηρίζεται από τη συνδυασμένη δράση των προαναφερθέντων μυών, τενόντων, συνδέσμων, αρθρώσεων και παλαμιαίων πλακών, με τα οστά και τις αρθρικές επιφάνειες των δακτύλων να δρουν συντονισμένα. Αυτά τα ανατομικά χαρακτηριστικά είναι σημαντικά για την κίνηση της άρθρωσης επειδή περιορίζουν την κίνηση ενός οστού σε σχέση με τα άλλα και δρουν προληπτικά στους έξι βαθμούς ελευθερίας της άρθρωσης.

Το χέρι και τα δάχτυλα μπορούν επομένως να κινηθούν μόνο σε δύο επίπεδα κίνησης: προσαγωγή και αποαγωγή στο μετωπιαίο επίπεδο και έκταση ή κάμψη στο οβελιαίο επίπεδο.



Εικόνα 2: Κινήσεις των δακτύλων.

1.2 Κινητικό σύστημα

1.2.1 Οστεολογία

Η ανάπτυξη του άνω άκρου και η λειτουργικότητά του, εξαρτάται πρώτα απ' όλα από τη φυσιολογική ανάπτυξη του κινητικού του συστήματος. Είναι επομένως απαραίτητο να κατανοήσουμε την οστεολογία, συνδεσμολογία και μυολογία του άνω άκρου.

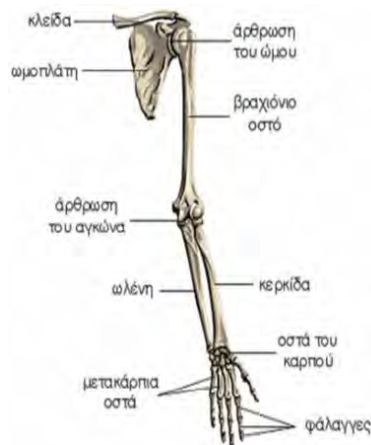
Ο σκελετός του άνω άκρου αποτελείται από: το σκελετό της ωμικής ζώνης, το βραχιόνιο οστό, το σκελετό του πήχη και το σκελετό της άκρας χειρός.

Ο σκελετός της ωμικής ζώνης, αποτελείται σε κάθε πλευρά από την κλείδα εμπρός και την ωμοπλάτη προς τα πίσω.

Το βραχιόνιο οστό συντάσσεται προς τα πάνω με την ωμοπλάτη και προς τα κάτω με τα οστά του πήχη. Το κάτω άκρο του βραχιόνιου οστού καταλήγει προς τα έξω στον κόνδυλο, που συντάσσεται με την κερκίδα, και προς τα έσω στην τροχίλια, που συντάσσεται με την ωλένη.

Ο σκελετός του πήχη αποτελείται από δύο επιμήκη, παράλληλα οστά, την κερκίδα και την ωλένη. Τα οστά αυτά, προς τα πάνω συντάσσονται και μεταξύ τους και με το βραχιόνιο οστό, ενώ προς τα κάτω συντάσσονται με τα οστά του καρπού.

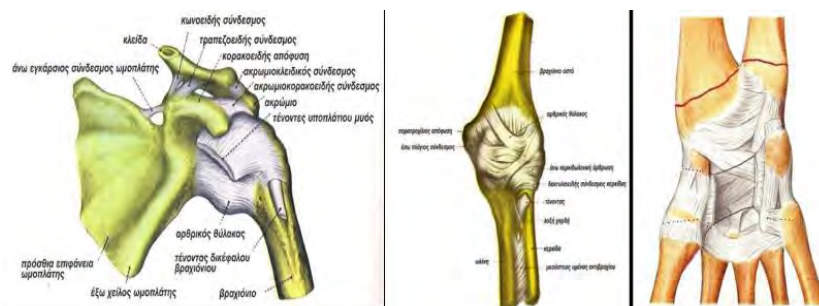
Ο σκελετός της άκρας χειρός αποτελείται από 27 οστά, που διακρίνονται σε τρεις ομάδες: i) στα οστά του καρπού, ii) στα οστά του μετακαρπίου, και iii) στα οστά των φαλάγγων των δαχτύλων. i) Ο σκελετός του καρπού αποτελείται από 8 βραχεία οστά που είναι τοποθετημένα σε δύο στίχους (άνω και κάτω). Ο πρώτος στίχος αποτελείται από έξω προς τα έσω, από: το σκαφοειδές, το μηνοειδές, το πυραμοειδές και το πισσοειδές οστό. Ο δεύτερος στίχος, αποτελείται από: το μείζον πολύγωνο, το ελάσσον πολύγωνο, το κεφαλωτό και το αγκιστρωτό. ii) Ο σκελετός του μετακαρπίου αποτελείται από πέντε επιμήκη κυλινδρικά οστά, τα μετακάρπια, τα οποία συντάσσονται προς τα άνω και μεταξύ τους και με τα οστά του κάτω στίχου του καρπού, ενώ προς τα κάτω με τη βάση των πρώτων φαλάγγων των δαχτύλων. iii) Ο σκελετός των δαχτύλων αποτελείται από τρεις φάλαγγες για κάθε δάχτυλο, την πρώτη ή μετακάρπια, τη δεύτερη ή μέση και την τρίτη ή ονυχοφόρο, εκτός από τον αντίχειρα, που έχει μόνο μετακάρπια και ονυχοφόρο φάλαγγα. Υπάρχει και ένας μεταβλητός αριθμός σησαμοειδών οστών στην παλαμιαία επιφάνεια των αρθρώσεων των δακτύλων. **[1]** Σούλη, Π. (2009) *Ανάπτυξη Άνω Άκρου*, Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Φυσικοθεραπείας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.



Εικόνα 3: Οστά άνω άκρου.

1.2.2 Συνδεσμολογία

- a) Αρθρώσεις της ωμικής ζώνης. Συνδέονται στο μπροστινό μέρος του σώματος με τον κορμό μέσω της στερνοκλειδικής διάρθρωσης. Τα οστά, κλείδα και ωμοπλάτη, ενώνονται μεταξύ τους με την ακρωμιοκλειδική διάρθρωση και με την κορακοκλειδική συνδέσμωση.
- b) Η διάρθρωση του ώμου συνδέει την κεφαλή του βραχιονίου με την ωμογλήνη της ωμοπλάτης.
- c) Αρθρώσεις του πήχη: i) κατ' αγκώνα διάρθρωση, ii) κερκιδωλενική συνδέσμωση και iii) κερκιδωλενικές διαρθρώσεις.
- d) Αρθρώσεις της άκρας χειρός: i) διαρθρώσεις του καρπού, οι οποίες είναι: η κερκιδοκαρπική, η μεσοκάρπια και οι ίδιες διαρθρώσεις των οστών του καρπού, ii) καρπομετακάρπιες διαρθρώσεις, οι οποίες διακρίνονται: στη καρπομετακάρπια του αντίχειρα, στην κοινή καρπομετακάρπια διάρθρωση και στις βασικές μεσοκάρπιες και iii) δαχτυλικές διαρθρώσεις, στις οποίες υπάρχουν οι μετακαρπιοφαλαγγικές και οι μεσοφαλαγγικές διαρθρώσεις. [1]



Εικόνα 4: Αρθρώσεις άνω άκρου.

1.2.3 Μυολογία

Μυς του άνω άκρου - πρόσθια επιφάνεια



Εικόνα 5: Μύες άνω άκρου.

Μυς του άνω άκρου - οπίσθια επιφάνεια



Εικόνα 6: Μύες άνω άκρου.

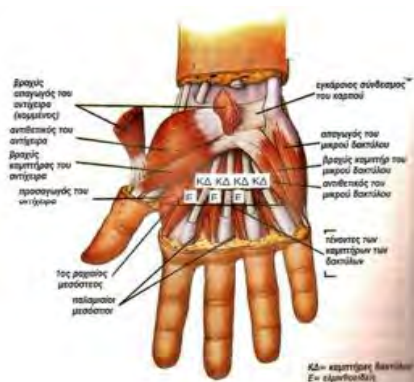
Οι μύες του άνω άκρου χωρίζονται σε: α) στους μύες της ωμικής ζώνης, β) στους μύες του βραχίονα, γ) στους μύες του πήχη και δ) στους μύες της άκρας χειρός.

α) Μύες της ωμικής ζώνης είναι: ο δελτοειδής μυς, ο υπερακάνθιος μυς, ο υπακάνθιος μυς, ο ελάσσων στρογγύλος μυς, ο μείζων στρογγύλος μυς και ο υποπλάτιος μυς.

β) Οι μύες του βραχίονα διακρίνονται στους πρόσθιους ή καμπήρες: ο δικάφαλος βραχιόνιος μυς, ο κορακοβραχιόνιος μυς και ο πρόσθιος

βραχιόνιος μυς και στους οπίσθιους ή εκτείνοντες: τρικέφαλος βραχιόνιος μυς και αγκωνιαίος μυς.

γ) Οι μύες του πήχη διαιρούνται: i) Στους μύες της πρόσθιας ή καμπτικής επιφάνειας, στρογγύλος πρηνιστής μυς, κερκιδικός καμπτήρας του καρπού μυς, μακρός παλαμικός μυς, ωλένιος καμπτήρας του καρπού μυς, επιπολής καμπτήρας των δακτύλων μυς, εν τω βάθει καμπτήρας των δακτύλων μυς, μακρός καμπτήρας του αντίχειρα μυς και τετράγωνος πρηνιστής μυς. ii) Στους μύες της οπίσθιας ή εκτατικής επιφάνειας, κοινός εκτείνων τους δαχτύλους μυς, ίδιος εκτείνων το μικρό δάκτυλο μυς, ωλένιος εκτείνων τον καρπό μυς, υπτιαστής μυς, μακρός απαγωγός του αντίχειρα μυς, βραχύς εκτείνων τον αντίχειρα μυς, μακρός εκτείνων τον αντίχειρα μυς και ίδιος εκτείνων τον δείκτη μυς. iii) Στους μύες του κερκιδικού χείλους, βραχιονοκερκιδικός μυς, μακρός κερκιδικός εκτείνων τον καρπό μυς και βραχύς κερκιδικός εκτείνων τον καρπό μυς.



Εικόνα 7: Μύες τις άκρας χειρός.

δ) Οι μύες της άκρας χειρός καταλαμβάνουν την παλαμιαία επιφάνεια και διακρίνονται: i) Στους μύες του θέναρος ή έξω παλαμιαίου, βραχύς απαγωγός του αντίχειρα μυς, βραχύς καμπτήρας του αντίχειρα μυς, αντιθετικός του αντίχειρα μυς και προσαγωγός του αντίχειρα μυς. ii) Στους μύες του οπισθέναρος ή έσω παλαμιαίου, βραχύς παλαμικός μυς, απαγωγός του μικρού δακτύλου μυς, βραχύς καμπτήρας του μικρού δακτύλου μυς και αντιθετικός του μικρού δακτύλου μυς. iii) Στους μέσους παλαμιαίους, ελμινθοειδείς μύες και μεσόστεοι μύες (4 ραχιαίοι-4 παλαμιαίοι). [1]

1.2.4 Χαρακτηριστικά και ενέργεια των μύων.

Ο δελτοειδής μυς περιβάλλει τη διάρθρωση του ώμου και το άνω τεταρτημόριο του βραχιόνιου οστού. Εκφύεται από τη κλείδα, το ακρώμιο και τη ωμοπλάτη και καταλήγει στο βραχιόνιο οστού. Νευρώνεται από το μασχαλιαίο νεύρο.

Ο υπερακάνθιος μυς προεκβάλλεται από την ωμοπλάτη και καταφύεται στο βραχιόνιο. Νευρώνεται από το υπερπλάτιο νεύρο. Με την ενέργεια του απάγει το βραχίονα και συνεργάζεται με το δελτοειδή μυ.

Ο υπακάνθιος μυς εκφύεται από την ωμοπλάτη και καταφύεται στο βραχίονα. Νευρώνεται από το υπερπλάτιο νεύρο. Με την δράση του προκαλεί έξω στροφή του βραχίονα.

Ο ελάσσων στρογγύλος μυς εκβάλλεται από το μασχαλιαίο χείλος της ωμοπλάτης και ολοκληρώνεται στο βραχίονα. Νευρώνεται από το μασχαλιαίο νεύρο. Με την ενέργεια του προκαλεί στροφή του βραχίονα προς τα έξω και πίσω.

Ο μείζων στρογγύλος μυς εκφύεται από την ωμοπλάτη και καταφύεται στο βραχίονα. Νευρώνεται από το νεύρο του μείζονος στρογγύλου. Με την ενέργεια του προκαλεί έσω στροφή και προσαγωγή του βραχίονα.

Οι υποπλάτιοι μύες ξεκινούν από την ωμοπλάτη και αποδίδονται στο βραχιόνιο οστό. Νευρώνονται από το υποπλάτιο νεύρο. Η ενέργεια τους προκαλεί τη στροφή του βραχίονα προς τα μέσα και σταθεροποιεί την άρθρωση του ώμου.

Ο δικέφαλος μυς εκφύεται με δύο εκφυτικές κεφαλές, τη μακρά και τη βραχεία, που ξεκινά από τη ωμοπλάτη και τελειώνει στο πήχη. Νευρώνεται από το μυοδερματικό νεύρο. Η κίνηση του προκαλεί την κάμψη του πήχη προς το βραχίονα και συγχρόνως τον υπτιάζει.

Ο κορακοβραχιόνιος μυς εκφύεται από την ωμοπλάτη και καταφύεται στο βραχιόνιο οστό. Νευρώνεται από το μυοδερματικό νεύρο. Η ενέργεια του χρησιμοποιείται για την κάμψη και την ελαφρά προσαγωγή του βραχιόνιου οστού.

Ο πρόσθιος βραχιόνιος μυς αρχίζει από το βραχιόνιο οστό και καταλήγει στην ωλένη. Νευρώνεται από το μυοδερματικό νεύρο. Χρησιμοποιεί την ενέργεια του για να κάμπτεται τον πήχη.

Ο τρικέφαλος μυς εμφανίζει τρεις κεφαλές, τη μακρά κεφαλή που εκφύεται από την ωμοπλάτη, και την έξω με την έσω που εκφύονται από το βραχιόνιο του οστού. Οι κεφαλές ενώνονται και ο τρικέφαλος μυς καταφύεται στο ωλέκραιο. Νευρώνεται από το κερκιδικό νεύρο. Η δράση του είναι η έκταση του πήχη.

Οι αγκωνιαίοι μύες ξεκινούν από το βραχιόνιο οστό και ολοκληρώνονται στην ωλένη. Νευρώνονται από το κερκιδικό νεύρο. Η ενέργεια του συμβάλλει εν μέρει στην έκταση του πήχη.

Ο στρογγύλος πρηνιστής μυς είναι ένας μυς που εκφύεται από το βραχιόνιο οστό και την ωλένια κεφαλή και καταφύεται στη μεσότητα της κερκίδας, έξω επιφάνεια. Νευρώνεται από το μέσο νεύρο. Με την ενέργεια του προκαλεί την κάμψη του πήχη και κάνει πρηνισμό της άκρας χείρας.

Οι κερκιδικοί καμπτήρες μύες, του καρπού μυς, εκφύονται από το βραχιόνιο οστό και την περιτονία του πήχη και σταματούν στη βάση του δεύτερου και τρίτου μετακάρπιου οστού. Νευρώνεται από το μέσο νεύρο. Με την ενέργεια του κάμπτεται και συγχρόνως απάγει το χέρι.

Ο ωλένιος καμπτήρας του καρπού μυς εκφύεται με δύο κεφαλές, τη βραχιόνια κεφαλή από το βραχιόνιο οστό και την ωλένια κεφαλή από το ωλέκραιο και την ωλένη και καταφύεται στα οστά του καρπού. Νευρώνεται από το ωλένιο νεύρο. Δρα ταυτόχρονα με την κάμψη και την έκταση του βραχίονα.

Ο μακρός παλαμικός μυς εκφύεται από την παρατροχίλια απόφυση και την περιτονία του πήχη και καταλήγει στην παλαμιαία απονεύρωση του χεριού. Νευρώνεται από το μέσο νεύρο. Η δράση του έλκει την παλαμιαία απονεύρωση και λυγίζει το χέρι.

Ο επιπολής καμπτήρας των δακτύλων μυς δίνει δύο κεφαλές, την βραχιονωλένια κεφαλή από την παρατροχίλια απόφυση και την ωλένη και την κερκιδική κεφαλή από την κερκίδα, οι οποίες καταφύονται στις φάλαγγες των

δακτύλων. Νευρώνεται από το μέσο νεύρο. Η δράση του κάμπτει τις μεσαίες φάλαγγες των τεσσάρων τελευταίων δακτύλων.

Ο τετράγωνος πρηνιστής μυς εκφύεται από το κάτω μέρος της ωλένης και καταφύεται στο κάτω μέρος της κερκίδας. Νευρώνεται από το παλαμιαίο μεσόστεο νεύρο. Η ενέργεια του οποίου, προκαλεί διόγκωση του πήχη.

Οι εν τω βάθει καμπτήρες των δακτύλων εκφύονται από την ωλένη και καταλήγουν με τέσσερις τένοντες στις ονυχοφόρους φάλαγγες του 2ου-5ου δακτύλου παλαμιαίως. Νευρώνεται από το μέσο και το ωλένιο νεύρο. Η δράση τους κάμπτει πρώτα την ονυχοφόρο φάλαγγα, στη συνέχεια των δακτύλων και τέλος τα άκρα του χεριού.

Ο μακρός καμπτήρας του αντίχειρα μυς εκφύεται από την κερκίδα και βρίσκεται στη παλαμιαία βάση της φάλαγγας του νυχιού. Νευρώνεται από το παλαμιαίο μεσόστεο νεύρο. Λειτουργεί για την κάμψη της ονυχοφόρο φάλαγγας.

Ο ωλένιος μυς του καρπού εκτείνεται από την παρακονδύλια απόφυση, από την περιτονία του πήχη και το μεσομύιο διάφραγμα και βρίσκεται στη βάση του πέμπτου μετακάρπιου οστού. Νευρώνεται από το κερκιδικό νεύρο. Η δράση του είναι η έκταση και προσάγει το καρπό και το χέρι προς τα μέσα.

Οι συνολικοί εκτείνοντες μύες του δακτύλου προέρχονται από την παρακονδύλια απόφυση και από την περιτονία του πήχη και αποδίδονται στα τέσσερα τελευταία δάκτυλα. Νευρώνεται από το κερκιδικό νεύρο. Η δράση του επιμηκύνει τα τέσσερα τελευταία δάκτυλα και συμβάλλει στην έκταση και την ωλένια προσαγωγή του χεριού.

Ο ίδιος εκτείνων το μικρό δάκτυλο μυς εκφύεται από την παρακονδύλια απόφυση και ολοκληρώνεται στη ραχιαία απονεύρωση του μικρού δακτύλου. Νευρώνεται από το κερκιδικό νεύρο. Με την ενέργεια του προκαλεί την έκταση και απαγωγή του μικρού δακτύλου.

Ο υπτιαστής μυς προεκβάλλεται από την παρακονδύλια απόφυση και τελειώνει στο άνω μέρος της κερκίδας. Νευρώνεται από το κερκιδικό νεύρο. Με την ενέργεια του προκαλεί υπτιασμό της κερκίδας και της άκρας χειρός.

Ο μακρός απαγωγός μυς του αντίχειρα μας εκφύεται από την οπίσθια πλευρά της ωλένης και της κερκίδας και εκβάλλει στην βάση του πρώτου μετακαρπίου. Νευρώνεται από το κερκιδικό νεύρο. Η ενέργεια του χρησιμοποιείται για να απάγει και να στρέφει προς τα έξω τον αντίχειρα.

Ο βραχύς εκτείνων μυς του αντίχειρα μας εκφύεται από την οπίσθια πλευρά της κερκίδας και προσφύεται στη ραχιαία επιφάνεια της βάσης της πρώτης φάλαγγας του αντίχειρα. Νευρώνεται από το κερκιδικό νεύρο. Η δράση του χρησιμοποιείται για την έκταση, την απαγωγή και την κερκιδική απαγωγή της άκρας χειρός.

Ο μακρύς εκτατικός μυς του αντίχειρα εκφύεται από την οπίσθια επιφάνεια της ωλένης και βρίσκεται στη βάση της ονυχοφόρου φάλαγγας του αντίχειρα. Νευρώνεται από το κερκιδικό νεύρο. Με την δράση του προκαλεί την έκταση και προσαγωγή του αντίχειρα.

Ο ίδιος μυς που εκτείνει τον δείκτη ξεκινάει από την οπίσθια επιφάνεια της ωλένης και καταλήγει στη ραχιαία απονεύρωση του δεύτερου δακτύλου. Νευρώνεται από το κερκιδικό νεύρο. Η δράση του επιμηκύνει το δείκτη.

Ο βραχιονοκερκιδικός μυς είναι ένας μυς που αρχίζει από το βραχιόνιο οστό και εκβάλλεται στη κερκίδα. Νευρώνεται από το κερκιδικό νεύρο. Με την ενέργεια του προκαλεί την κάμψη του πήχη και βοηθάει στον πρηνισμό του πήχη.

Ο μακρύς κερκιδικός μυς του καρπού εκφύεται από το κάτω μέρος του βραχιόνιου οστού και ολοκληρώνεται στη ραχιαία επιφάνεια της βάσης του δεύτερου μετακαρπίου. Νευρώνεται από το κερκιδικό νεύρο. Με την κίνηση του κάνει έκταση της άκρας χειρός και κερκιδική απαγωγή.

Οι βραχείς κερκιδικοί μύες του καρπού εκφύονται από την παρακονδύλια απόφυση και καταλήγουν στη βάση της στυλοειδούς απόφυσης του τρίτου μετακαρπίου. Νευρώνεται από το κερκιδικό νεύρο. Με την ενέργεια του προκαλεί έκταση της άκρας χείρας και κερκιδική απαγωγή.

Ο βραχύς απαγωγός του μυς του αντίχειρα εκφύεται από το φύμα του σκαφοειδούς και βρίσκεται στη βάση της πρώτης φάλαγγας του αντίχειρα.

Νευρώνεται από το μέσο νεύρο. Η ενέργεια του χρησιμοποιείται για να απάγει τον αντίχειρα.

Οι βραχείες καμπτήρες μύες του αντίχειρα εκφύονται από το μείζον και ελάσσον πολύγωνο και καταφύονται στην βάση της πρώτης φάλαγγας του αντίχειρα. Νευρώνονται από το μέσο και το ωλένιο νεύρο. Η δράση τους κάμπτει τον αντίχειρα.

Ο αντιθετικός μυς του αντίχειρα αρχίζει από το μείζον πολύγωνο και καταφύεται στο μέσο του πρώτου μετακαρπίου. Νευρώνεται από το μέσο νεύρο. Η δράση του είναι να αντιτίθεται ο αντίχειρας στα υπόλοιπα δάκτυλα.

Ο προσαγωγός του αντίχειρα μυς εκφύεται από το ελάσσον πολύγωνο, το κεφαλωτό και το δεύτερο-τρίτο μετακάρπιο και καταλήγει στην βάση της πρώτης φάλαγγας του αντίχειρα. Νευρώνεται από το ωλένιο νεύρο. Λειτουργεί για να προσάγει τον αντίχειρα.

Ο βραχύς παλαμικός μυς εκφύεται από την παλαμιαία απονεύρωση και καταφύεται στο δέρμα του ωλένιου χείλους της άκρας χειρός. Νευρώνεται από το ωλένιο νεύρο. Με την ενέργεια του ρυτιδώνει το δέρμα του οπισθέναρος.

Ο απαγωγός μυς του μικρού δακτύλου εκφύεται από το πισσοειδές οστό και τελειώνει στη βάση της πρώτης φάλαγγας του μικρού δακτύλου. Νευρώνεται από το ωλένιο νεύρο. Λειτουργεί για την απαγωγή του μικρού δακτύλου.

Ο βραχύς καμπτήρας μυς του μικρού δακτύλου εκφύεται από το αγκιστρωτό οστό και ολοκληρώνεται στην βάση της πρώτης φάλαγγας του μικρού δακτύλου. Νευρώνεται από το ωλένιο νεύρο. Η κίνηση του δημιουργεί την κάμψη του μικρού δακτύλου.

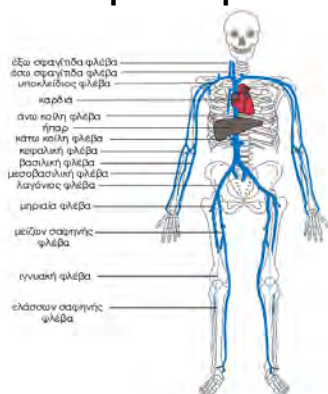
Ο αντιθετικός μυς του μικρού δακτύλου εκφύεται από το αγκιστρωτό οστό και καταλήγει στην βάση της έσω επιφάνειας του πέμπτου μετακαρπίου. Νευρώνεται από το ωλένιο νεύρο. Με την δράση του αντιτάσσει το μικρό δάκτυλο προς τον αντίχειρα.

Οι ελμινθοειδείς μύες εκφύονται από τους τένοντες 1-4 των εν τω βάθει καμπτήρων των δακτύλων και καταφύονται στη ραχιαία επιφάνεια των φαλάγγων του σύστοιχου δακτύλου. Νευρώνονται από το μέσο 1^ο-2^ο και το

ωλένιο 3^ο-4^ο νεύρο. Η δράση τους προκαλεί κάμψη της πρώτης φάλαγγος και έκταση των άλλων φαλάγγων.

Ο μεσοστέος μυς εκφύεται από την πλάγια πλευρά του μετακάρπιου οστού και καταφύεται στην ραχιαία απονεύρωση των δακτύλων. Νευρώνεται από το ωλένιο νεύρο. Η δράση του είναι η κάμψη της πρώτης φάλαγγας και η έκταση των άλλων φαλάγγων. Επιπλέον, οι ραχιαίοι μύες απάγουν τα δάκτυλα και οι παλαμιαίοι μύες προσάγουν τους δακτύλους. [1]

1.2.5 Αιμάτωση του άνω άκρου



Εικόνα 8: Φλέβες άνω άκρου.

Η έξω σφαγίτιδα φλέβα, στην οποία συγκεντρώνεται το αίμα από τις αντίστοιχες φλέβες της κεφαλής και του τραχήλου, πορεύεται στον τράχηλο και συνδέεται με την σύστοιχη υποκλείδια φλέβα για να δημιουργήσουν την σύστοιχη ανώνυμη φλέβα.

Η έξω σφαγίτιδα φλέβα διαμορφώνεται από την συμβολή της οπίσθιας προσωπικής φλέβας με την οπίσθια ωτιαία φλέβα. Έπειτα, οδεύει προς τα κάτω, πάνω στον στερνοκλειδομαστοειδή μυ και καταλήγει στην υποκλείδια φλέβα.

Η υποκλείδια φλέβα είναι η συνέχεια της βάσης του τραχήλου της μασχαλιαίας φλέβας. Συγκεντρώνει το αίμα ολόκληρου του άνω άκρου, μέσω της μασχαλιαίας φλέβας και μέρος από το αίμα της κεφαλής και του τραχήλου με την έξω σφαγίτιδα φλέβα. Μαζί με την έσω σφαγίτιδα φλέβα σχηματίζουν την ανώνυμο φλέβα.

Η άνω κοίλη φλέβα μαζεύει το αίμα διάφορων οργάνων όπως της κεφαλής, του τραχήλου, των άνω άκρων και των τοιχωμάτων καθώς και σπλάγχχνων του

θώρακα. Αρχίζει με τη συμβολή των δύο ανώνυμων φλεβών και καταλήγει στο άνω τοίχωμά του δεξιού κόλπου της καρδιάς. Στην άνω κοίλη φλέβα καταλήγει και η άζυγη φλέβα.

Η μασχαλιαία φλέβα συλλέγει το αίμα από το άνω άκρο και μέσω αυτής, διαβιβάζεται στην υποκλείδια φλέβα. Δομείται από τη συμβολή των δύο δορυφόρων βραχιονιών φλεβών.

Η κεφαλική φλέβα απορρέει από την αναστόμωση των φλεβών του κερκιδικού χείλους και φέρεται στον πήχη, συνδέεται με τη βασιλική φλέβα, ανέρχεται στο βραχίονα και εκβάλλει στη μασχαλιαία φλέβα.

Η βασιλική φλέβα εκφύεται από το ωλένιο τμήμα του ραχιαίου φλεβικού δικτύου του χεριού και προέρχεται στον πήχη, συνδέεται με την κεφαλική φλέβα, ανέρχεται προς το βραχίονα και καταλήγει στην έσω βραχιόνια φλέβα.

Η μέση φλέβα του πήχη είναι πολύ ασταθής και χωρίζεται σε δύο κλάδους, τη μεσοβασιλική και τη μεσοκεφαλική. Η μια εκβάλλει στη βασιλική φλέβα και η άλλη στην κεφαλική φλέβα. **[1]**

2° Ρομποτική

2.1 Τι είναι η ρομποτική και τα οφέλη της

Η ρομποτική αφορά τον σχεδιασμό, την κατασκευή, τη χρήση και τη λειτουργία του ρομπότ. Επιπλέον, ασχολείται με τα συστήματα υπολογιστών για τον έλεγχο, την αισθητηριακή ανάδραση καθώς και την επεξεργασία πληροφοριών. Οι νέες αυτές τεχνολογίες χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη μηχανών που αναπαράγουν την ανθρώπινη συμπεριφορά.

Τα βιομηχανικά ρομπότ έχουν φέρει επανάσταση στη μεταποιητική βιομηχανία και αυτό οφείλεται σε μια σειρά σημαντικών πλεονεκτημάτων. Το πρώτο και σημαντικότερο πλεονέκτημα είναι η αποτελεσματικότητά τους, καθώς επίσης και η αποδοτικότητά τους όπου ολοκληρώνουν εργασίες ταχύτερα από τη χειρωνακτική εργασία και βελτιώνει παράλληλα το χρόνο λειτουργίας. Ο συνδυασμός της ταχύτητας και του χρόνου διαθεσιμότητας οδηγεί σε υψηλότερη αποδοτικότητα και χαμηλότερο κόστος. Τα βιομηχανικά ρομπότ, είναι επίσης εγγενώς επαναλαμβανόμενα όταν προγραμματίζονται σωστά. Αυτό αυξάνει δραματικά τη συνοχή της παραγωγής και την ποιότητα των προϊόντων, ενώ ταυτόχρονα μειώνει τα απόβλητα.

Η αγορά των βιομηχανικών ρομπότ είναι μεγάλη και αναπτύσσεται με ταχείς ρυθμούς. Η υποκείμενη τεχνολογία αλλάζει εξίσου γρήγορα, αν και μπορεί να είναι δύσκολο να συμβαδίσει κανείς με τον ταχύτατο ρυθμό αλλαγών στη βιομηχανία της ρομποτικής. Η κατανόηση των βασικών αρχών της βιομηχανικής ρομποτικής και των πλεονεκτημάτων της είναι μια καλή αρχή.

2.2 Τι είναι το ρομποτικό χέρι

Τα ρομποτικά χέρια είναι σύνθετες τεχνολογικές αναπαραγωγές του ανθρώπινου χεριού. Προσπαθούν να μιμηθούν και να αναπαράγουν τις χειρονομίες, τις κινήσεις και το κράτημα του ανθρώπινου χεριού, όσο το δυνατόν πιο πιστά, μέσω προγραμματιζόμενων κινήσεων. Το ανθρώπινο χέρι αποτελείται από οστά, μύες, νεύρα και δέρμα, ενώ το ρομποτικό χέρι αποτελείται από μεταλλικά και πλαστικά κράματα, ενεργοποιητές, αισθητήρες, ελεγκτές και ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά κυκλώματα. Συνοπτικά, τα συστήματα

που συνθέτουν ένα ρομποτικό χέρι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρία βασικά υποσυστήματα:

- Μηχανολογικό υποσύστημα: αυτό που επιτρέπει την κίνηση του ρομποτικού χεριού. Το μηχανολογικό υποσύστημα ενός ρομποτικού βραχίονα αποτελείται από τους μηχανισμούς που επιτρέπουν την κίνηση του ρομποτικού χεριού, όπως οι αρθρώσεις, οι σύνδεσμοι, οι επενεργητές-κινητήρες και τα συστήματα μετάδοσης της κίνησης. Εάν ο γενικός επενεργητής είναι ηλεκτρικός, μπορεί να θεωρηθεί ως ξεχωριστό υποσύστημα, το ηλεκτρολογικό υποσύστημα.
- Υποσύστημα αίσθησης: υπεύθυνο για την αλληλεπίδραση μεταξύ του ρομποτικού χεριού με τον υλικό κόσμο. Αυτό επιτυγχάνεται με τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με τη θέση και την κατάσταση του ρομποτικού χεριού και του περιβάλλοντος εργασίας. Οι πληροφορίες αυτές κωδικοποιούνται και μετατρέπονται σε ηλεκτρική ισχύ για την κίνηση των επενεργητών κινητήρων. Μεταδίδονται επίσης ως έξοδος για να ενημερώνεται το σύστημα για την κατάστασή του. Τα υποσυστήματα ανίχνευσης αποτελούνται συνήθως από αισθητήρες, όργανα μέτρησης και ηλεκτρονικά στοιχεία.
- Υποσυστήματα ελέγχου: διασφαλίζουν ότι οι αισθήσεις και οι κινήσεις συντονίζονται σωστά και ότι ο ρομποτικός βραχίονας μπορεί να εκτελέσει τις λειτουργίες που θέλουμε με τον σωστό τρόπο. Το υποσύστημα ελέγχου είναι ο "εγκέφαλος" του ρομποτικού χεριού. Το υποσύστημα ελέγχου λαμβάνει συνεχώς πληροφορίες από το υποσύστημα αισθητήρων σχετικά με την κατάσταση του συστήματος (ρομποτικό χέρι και περιβάλλον), και χρησιμοποιεί αυτές τις πληροφορίες για να συντονίζει και να επιβλέπει τις κινήσεις του ρομποτικού χεριού. Το υποσύστημα ελέγχου αποτελείται συνήθως από έναν ελεγκτή ή μικροελεγκτή και σπάνια από έναν υπολογιστή λόγω του μεγέθους του.

2.2.1 Μηχανολογικό υποσύστημα

Τα ρομποτικά χέρια έχουν αρθρώσεις που συνδέονται με συνδέσμους (φάλαγγες), σχηματίζοντας μια ανοικτή κινηματική αλυσίδα. Οι αρθρώσεις

μπορεί να είναι περιστροφικές ή σφαιρικές και πρέπει να είναι κατασκευασμένες από υλικά που έχουν χαμηλή τριβή, είναι ανθεκτικά και δεν θερμαίνονται κατά τη λειτουργία. Συνήθως, για να επιτευχθεί η περιστροφή της άρθρωσης είναι επιθυμητό να χρησιμοποιούνται μικρά έδρανα κύλισης ή ρουλεμάν, αλλά δεν είναι ασυνήθιστο για τους σχεδιαστές ρομποτικών βραχιόνων να επινοούν αρθρώσεις που δεν χρειάζεται να είναι εξοπλισμένες με έδρανα κύλισης ή ρουλεμάν. Οι αρθρώσεις πρέπει να είναι κατασκευασμένες από υλικά που προσδίδουν στιβαρότητα και ακαμψία έναντι εξωτερικών καταπονήσεων. Συνήθως, τα σκληρά υλικά, όπως πλαστικά και ελαφρά κράματα όπως το αλουμίνιο, το τιτάνιο και τα μέταλλα.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στη μετάδοση της κίνησης από τον επενεργητή στην άρθρωση, καθώς ο επενεργητής βρίσκεται συνήθως μακριά από το σημείο περιστροφής της άρθρωσης λόγω έλλειψης χώρου (π.χ. στο βραχίονα ενός ρομποτικού χεριού). Ωστόσο, σε εξαιρετικές περιπτώσεις, η κίνηση μπορεί να μεταδίδεται απευθείας από τον κινητήρα στην άρθρωση. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η κίνηση μπορεί να μεταδίδεται με διάφορους τρόπους, π.χ. με τροχαλία ή ιμάντα, οδοντωτό ιμάντα και οδοντωτό τροχό, συνεργαζόμενους οδοντωτούς τροχούς, ντίζες κτλ.

Η ανάπτυξη των ρομποτικών χεριών έχει προχωρήσει ραγδαία τα τελευταία χρόνια. Η τεχνολογία των υλικών έχει επίσης σημειώσει μεγάλη πρόοδο, με αποτέλεσμα τη δημιουργία "έξυπνων" υλικών με νέες λειτουργίες που δίνουν νέα ώθηση στην εφαρμοσμένη μηχανική.

2.2.2 Επενεργητές

Η λειτουργία ενός ρομποτικού χεριού απαιτεί πολύπλοκες κινήσεις των αρθρώσεων, για τις οποίες χρησιμοποιούνται ειδικοί επενεργητές. Στο σύστημα χρησιμοποιούνται η ταχύτητα αντίδρασης και της κίνησης των αρθρώσεων και των δακτύλων, καθώς και η δύναμη που μπορούν να ασκήσουν σχετίζονται άμεσα με τους επενεργητές. Γενικά, όσο περισσότερους επενεργητές διαθέτει ένα ρομποτικό χέρι, τόσο πιο ευέλικτο είναι.

Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα επενεργητών στην αγορά, αλλά για να χρησιμοποιηθούν σε ένα ρομποτικό χέρι πρέπει να πληρούν ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά:

Χαμηλή ροπή αδράνειας

Μεγάλη σχέση ισχύος- βάρους

Ικανότητα ανάπτυξης υψηλών επιταχύνσεων

Μικρή κατανάλωση ενέργειας

Δυνατότητα λειτουργίας σε ένα μεγάλο φάσμα ταχυτήτων

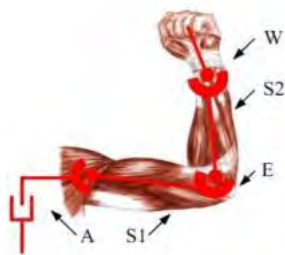
Παρακάτω αναφέρονται διάφορα είδη επενεργητών, οι οποίοι χρησιμοποιούνται συνήθως στα ρομποτικά χεριά.

2.2.3 Σερβοκινητήρες

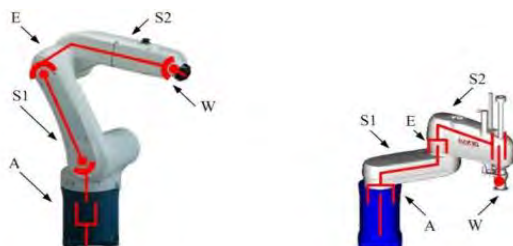
Οι σερβοκινητήρες, είναι κινητήρες που χρησιμοποιούνται σε συστήματα αυτόματου ελέγχου και ενώ μπορεί να μοιάζουν κατασκευαστικά με τους απλούς κινητήρες δεν είναι ίδιοι.

2.3 Δομικές ομοιότητες μεταξύ ανθρώπινων και ρομποτικών χεριών.

Τα ρομπότ και οι άνθρωποι έχουν ένα κοινό στοιχείο. Ανθρώπινα και μηχανικά ρομπότ αν και φαίνονται να είναι αντίθετα, στην πραγματικότητα έχουν την ίδια θεμελιώδη δομή (οστών) και αρθρώσεων. Το βασικό πλαίσιο των βιομηχανικών ρομπότ, κυρίως των ρομποτικών βραχιόνων, είναι ένας συνδυασμός αρθρώσεων και συνδέσμων. Σε σχέση με το ανθρώπινο σώμα, οι αρθρώσεις είναι τα μέρη του σώματος που μπορούν να λυγίζουν και να κινούνται ελεύθερα, όπως οι αγκώνες και οι ώμοι, και τα οστά που συνδέουν αυτές τις αρθρώσεις αντιστοιχούν στους συνδέσμους του ρομπότ. Οι αρχές της κίνησης των αρθρώσεων και της μετάδοσης της δύναμης μέσω των αρθρώσεων είναι κοινές, τόσο στους ανθρώπους όσο και στα ρομπότ. Τα βιομηχανικά ρομπότ με ένα βραχίονα εγκαθίστανται συνήθως σε σταθερή θέση σε μια γραμμή παραγωγής και εκτελούν μια δεδομένη εργασία για μεγάλο χρονικό διάστημα.



Εικόνα 9: Δομή του ανθρώπινου βραχίονα.



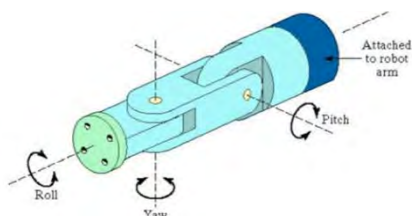
Εικόνα 10: Δομή του ρομποτικού βραχίονα.

Καρπός: Ένα σύνολο περιστροφικών αρθρώσεων μεταξύ του βραχίονα και του τελικού φορέα του ρομπότ που επιτρέπει στον τελικό φορέα να δείχνει προς την κατεύθυνση στο κομμάτι εργασίας. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο καρπός μπορεί να έχει έναν βαθμό ελευθερίας που του επιτρέπει να πιάσει ένα αντικείμενο με ένα γεωμετρικό σύστημα αξόνων αναφοράς (roll, pitch και yaw).

Roll: περιλαμβάνει την περιστροφή του καρπού γύρω από τον άξονα του βραχίονα.

Pitch: περιστροφή προς τα πάνω προς τα κάτω.

Yaw: αριστερά-δεξιά περιστροφή του καρπού.



Εικόνα 11: Περιστροφή αρθρώσεων μεταξύ του βραχίονα και του τελικού παράγοντα του ρομπότ.

2.4 Ορισμός του ρομπότ και η δομή του

Στη βιβλιογραφία, ο όρος βιομηχανικό ρομπότ αναφέρεται σε συσκευές που έχουν την ικανότητα να επιλύουν ανεξάρτητα διάφορες εργασίες χειρισμού.

Σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο ISO 8373:2012, ο ορισμός του βιομηχανικού ρομπότ είναι «πολυλειτουργικός, επαναπρογραμματιζόμενος, αυτόματα ελεγχόμενος χειριστής, προγραμματιζόμενος σε τρεις ή περισσότερους άξονες που μπορεί να στερεωθεί σε μία περιοχή ή κινητό για χρήση σε εφαρμογές βιομηχανικού αυτοματισμού».

Ένα βιομηχανικό ρομπότ αποτελείται από έναν χειριστή ο οποίος κινείται και πραγματοποιεί εργασίες, έναν ελεγκτή που ενεργοποιεί και ελέγχει τον χειριστή, και την συσκευή τηλεχειρισμού που “μαθαίνει” την κίνηση του χειριστή.

2.4.1 Μηχανική δομή

Τα εξαρτήματα του Σταθμικού Ρομπότ είναι:

Μηχανική δομή: Χειριστής, Τελικός παράγοντας/εργαλείο.

Ελεγκτής.

Συσκευή τηλεχειρισμού για προγραμματισμό.

Οδηγοί.

Αισθητήρες/σύστημα όρασης.

Ο χειριστής αποτελείται από αρθρώσεις και συνδέσμους. Οι αρθρώσεις βοηθούν τα μέρη του σώματός μας να κινούνται. Οι σύνδεσμοι είναι άκαμπτα μέλη μεταξύ των αρθρώσεων.

Ο χειριστής ρομπότ έχει δύο σημαντικά μέρη: ένα σώμα και έναν βραχίονα που μπορούν να μετακινήσουν τα πράγματα στον χώρο και έναν καρπό που βοηθάει το ρομπότ στον προσανατολισμό.

Οι σύνδεσμοι είναι στατικά υλικά που συνδέουν τις αρθρώσεις του βραχίονα μεταξύ τους. Αυτό αποτελεί την κινηματική αλυσίδα. Στο ανθρώπινο σώμα, οι σύνδεσμοι είναι τα οστά.

Οι αρθρώσεις αποτελούν μέρος του συστήματος χειρισμού και μπορούν να περιστρέφονται και να μεταφέρονται.

Ένας βιομηχανικός ρομποτικός βραχίονας είναι ένα διασυνδεδεμένο συγκρότημα συνδέσμων και κινητήριων αρθρώσεων που αποτελείται από έναν χειριστή που υποστηρίζει ή μετακινεί έναν καρπό και το βραχίονα στο χώρο. Οι βιομηχανικοί ρομποτικοί βραχίονες ποικίλλουν σε μέγεθος και σχήμα. Ο βιομηχανικός ρομποτικός βραχίονας είναι το τμήμα που μεταφέρει τον τελικό παράγοντα. Ο ρομποτικός βραχίονας περιλαμβάνει κίνηση των ώμων, των αγκώνων και των καρπών, καθώς και μετατόπιση και περιστροφή για την τοποθέτηση του τελικού παράγοντα στη σωστή και ακριβή θέση. Κάθε μία από αυτές τις αρθρώσεις δίνει στο ρομπότ τρεις βαθμούς ελευθερίας: ένα απλό ρομπότ με τρεις βαθμούς ελευθερίας μπορεί να κινείται πάνω και κάτω, αριστερά και δεξιά, πίσω και εμπρός. Τα περισσότερα βιομηχανικά ρομπότ που χρησιμοποιούνται σήμερα στα εργοστάσια είναι ρομπότ έξι αξόνων.

Άξονας: αναφέρεται σε μια διαδρομή κίνησης στο χώρο, που συνήθως αναφέρεται ως γραμμική κατεύθυνση κίνησης σε καθεμία από τις τρεις διαστάσεις. Στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, οι ετικέτες X, Y και Z χρησιμοποιούνται συνήθως για να δηλώσουν την κατεύθυνση ενός άξονα σε σχέση με τη Γη: το X αναφέρεται σε ένα κατευθυντικό επίπεδο ή μια ευθεία παράλληλη προς τη Γη, το Y αναφέρεται σε ένα κατευθυντικό επίπεδο ή μια ευθεία παράλληλη προς τη Γη και κάθετη στο X και το Z αναφέρεται σε ένα κατευθυντικό επίπεδο ή μια γραμμή που είναι κατακόρυφη στην επιφάνεια της Γης και κάθετη προς την επιφάνεια αυτής.

Άξονας, πρισματικός: ονομάζεται επίσης άξονας μεταγραφής. Μηχανικά, βρίσκεται μεταξύ δύο άκαμπτων μελών και επιτρέπει στο ένα να κινείται γραμμικά σε σχέση και σε επαφή με το άλλο.

Άξονας, περιστροφικός: ονομάζεται επίσης περιστροφικός άξονας, έχει διάταξη που συνδέει δύο άκαμπτα μέλη σε έναν μηχανισμό περιστροφής που επιτρέπει στο ένα να περιστρέφεται σε σχέση με το άλλο γύρω από σταθερό άξονα.

Τελικός παράγοντας: είναι μια συσκευή στο άκρο του ρομποτικού βραχίονα, σχεδιασμένη να αλληλεπιδρά με το περιβάλλον. Η ακριβής φύση αυτής της συσκευής εξαρτάται από την εφαρμογή του ρομπότ. Ο μηχανισμός του καρπού συνδέεται με το άκρο του βραχίονα, ενώ ο τελικός φορέας συνδέεται

με τον μηχανισμό του καρπού. Η λειτουργία του μηχανισμού του καρπού είναι να προσανατολίζει τον τελικό φορέα και λειτουργεί ως χέρι. Το τμήμα αυτό βρίσκεται σε άμεση επαφή με το υλικό που χειρίζεται το ρομπότ. Ορισμένες παραλλαγές των τελικών αποτελεσμάτων είναι οι αρπαγές, οι αντλίες κενού, οι μαγνήτες και τα φανοί συγκόλλησης. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία από αυτά, συμπεριλαμβανομένων εξαρτημάτων για την ανύψωση αντικειμένων, τύπων κενού (αναρρόφησης) και εργαλείων για συγκόλληση και βαφή. Οι ευέλικτες κινήσεις που εκτελούνται από τους άξονες του ρομπότ, σε συνδυασμό με τους ειδικούς τελικούς παράγοντες, του επιτρέπουν να εκτελεί ένα πολύ ευρύ φάσμα εργασιών.

2.4.2 Μηχανοτρονικός σχεδιασμός

Οι ανατομικοί περιορισμοί καλύπτουν την ανάγκη τριών αλληλένδετων παραγόντων που είναι η εργονομία, οι επιδόσεις και η άνεση. Στην παρούσα ενότητα, σύμφωνα με αυτούς τους παράγοντες, παρουσιάσαμε τον σχεδιασμό της μηχανικής αρχιτεκτονικής καθώς και το ηλεκτρονικό μέρος και το σύστημα ελέγχου. Όπως παρουσιάστηκε από [2] Sushant, N., Suresh, D., Sharma, K.R., (2014), Basics and applications of rapid prototyping medical models, *Rapid Prototyping Journal*, 20 (3), 256-267. Διάφορες τεχνικές ταχείας πρωτοτυποποίησης (RP) είναι χρήσιμες στον ιατρικό τομέα. Ειδικότερα, η χρήση της τεχνολογίας τρισδιάστατων εκτυπωτών εκπέμπει στον τομέα των συσκευών αποκατάστασης, ειδικά στην κατασκευή εξωσκελετών.[3] Baronio, G., Harran, S. and Signoroni, (2016), A critical analysis of a hand orthosis reverse engineering and 3D printing process, *Applied Bionics and Biomechanics*, 7.

Ως εκ τούτου, η χρήση της διαδικασίας προσθετικής κατασκευής επιτρέπει την επίτευξη υψηλού επιπέδου εξατομίκευσης η οποία απαιτεί την υλοποίηση (τρισδιάστατη εκτύπωση) μόνο του γεωμετρικού μοντέλου του ρομποτικού εξωσκελετικού χεριού. Τα τρία κύρια βήματα της μηχανικής κατασκευής μιας συσκευής εξωσκελετικού χεριού με τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορούν να περιγραφούν ως εξής:

- Μοντελοποίηση της τρισδιάστατης γεωμετρίας της επιθυμητής συσκευής εξωσκελετικού χεριού με χρήση λογισμικών CAD.

- Επεξεργασία των αποκτηθέντων δεδομένων μέσω ειδικού λογισμικού.
- Υλοποίηση της συσκευής εξωσκελετικού με τη χρήση τρισδιάστατου εκτυπωτή.

Ο σχεδιασμός του καλουπιού της συσκευής δημιουργήθηκε με τη χρήση του λογισμικού CAD Solidworks και στη συνέχεια εκτυπώθηκε με τη χρήση τρισδιάστατου εκτυπωτή. Πράγματι, η δυνατότητα υλοποίησης εξαιρετικά προσαρμοσμένων εξωσκελετικών χεριών δέχεται ώθηση χάρη στην ευρεία διάδοση της τρισδιάστατης εκτύπωσης χαμηλού κόστους τεχνολογιών. Στην Εικόνα 12 και στην Εικόνα 13 απεικονίζεται το μοντέλο CAD της σχεδιασμένης συσκευής σε ηρεμία και σε κατάσταση έκτασης, αντίστοιχα. Οι διάφορες κινήσεις της συναρμολόγησης του μοντέλου δοκιμάζονται και κινούνται με τη χρήση της εργαλειοθήκης animation και motion toolbox του Solidworks.[4] Abdallah, I.B., Bouteraa, Y., Rekik, C., (2017), DESIGN AND DEVELOPMENT OF 3D PRINTED MYOELECTRIC ROBOTIC EXOSKELETON FOR HAND REHABILITATION, *INTERNATIONAL JOURNAL ON SMART SENSING AND INTELLIGENT SYSTEMS*, 10 (2), 341-346.



Εικόνα 12: Μοντέλο CAD μηχανισμός κάμψης με ελατήριο επιστροφής (Κατάσταση ηρεμίας).



Εικόνα 13: Μοντέλο CAD κατάσταση κάμψης.

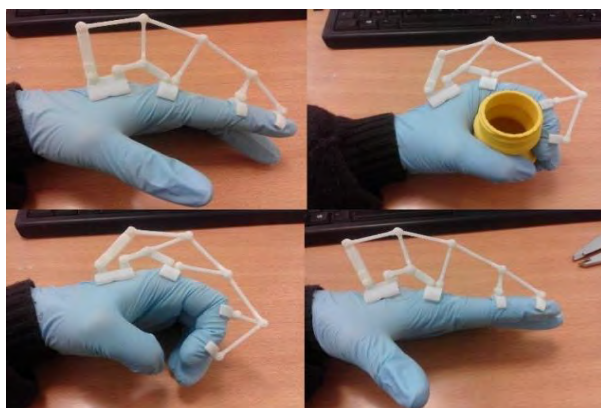
Ο μηχανισμός του εξωσκελετικού χεριού αποτελείται από τρία βασικά στοιχεία: ένα βραχίονα νάρθηκα, μια μονάδα ελέγχου και μηχανισμούς πέντε

δακτύλων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 14. Στον πίνακα 2 παρατίθεται η μάζα κάθε εξωσκελετικού χεριού (η συνολική μάζα είναι 310 g). Ειδικότερα, το κουτί της μονάδας ελέγχου και οι μηχανισμοί των πέντε δακτύλων εκτυπώνονται τρισδιάστατα με πλαστικό PLA που ονομάζεται επίσης πολυγαλακτικό οξύ και είναι ένας θερμοπλαστικός πολυεστέρας. Πράγματι, το PLA είναι ένα θαυμάσιο, εύκολο στη χρήση, υλικό τρισδιάστατης εκτύπωσης. Ως κύριο πλεονέκτημα, είναι ένας ανανεώσιμος και βιοδιασπώμενος πόρος, επειδή συνήθως προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές, όπως το άμυλο καλαμποκιού, οι ρίζες ταπιόκας ή το ζαχαροκάλαμο. Έτσι, αποικοδομείται με φυσικό τρόπο όταν εκτίθεται στο περιβάλλον. Επιπλέον, είναι μη τοξικό και έχει ευχάριστη οσμή κατά την εκτύπωση. Το νήμα PLA διατίθεται σε ένα ευρύ φάσμα χρωμάτων και λόγω των θερμικών χαρακτηριστικών του, είναι ιδιαίτερα εύκολο να πετύχετε εξαιρετικές εκτυπώσεις.[4]

Ο νάρθηκας επιλέγεται ανάλογα με το μέγεθος του αντιβραχίου του υποκειμένου. Αυτή η στήριξη επιτρέπει στον εξωσκελετό να προσαρμόζεται εύκολα σε διαφορετικά μεγέθη χεριών. Το εν λόγω στήριγμα θεωρείται ως "επίγειος" σύνδεσμος των μηχανισμών των δακτύλων, και οι ενεργοποιητές και η μονάδα ελέγχου, συμπεριλαμβανομένης της μπαταρίας, είναι όλοι συνδεδεμένοι με το στήριγμα.[4]



Εικόνα 14: Μηχανοτρονικός σχεδιασμός: Εξαρτήματα μονάδων ελέγχου.



Εικόνα 15: Προκαταρκτικές δοκιμές των κινήσεων των ψηφίων.

Πίνακας 1: Η μάζα των εξαρτημάτων του εξωσκελετικού χεριού.

Στοιχείο	Μάζα (g)
Νάρθηκας στήριξης του αντιβραχίου	115
Μηχανισμός δακτύλων x5	20x5
Μονάδα ελέγχου	108
Σερβοκινητήρας x5	09x5
Επαναφορτιζόμενη μπαταρία 9V	20
Συνολική μάζα	388

Ο μηχανισμός του εξωσκελετικού χεριού έχει σχεδιαστεί ειδικά για να εκτελεί τις βασικές κινήσεις των δακτύλων που αναπαράγει τις θεραπευτικές ασκήσεις, υιοθετώντας ένα καλώδιο που ενεργοποιείται με επέκταση και μηχανισμό κάμψης με ελατήριο. Η Εικόνα 15 αποδεικνύει την ικανότητα του σχεδιασμένου συστήματος να εκτελεί την κάμψη-έκταση του δακτύλου και τη σύλληψη ενός αντικειμένου. Η μονάδα ελέγχου συνδέεται με το στήριγμα μέσω μιας ρυθμιζόμενης ελαστικής ταινίας που είναι τοποθετημένη γύρω από το βραχίονα, καθιστώντας τους ενεργοποιητές σε αντιστοιχία με κάθε μηχανισμό δακτύλου. Κάθε μηχανισμός δακτύλων συνδέεται με το στήριγμα μέσω τριών απλών ταινιών που χαράσσονται με τους συνδέσμους του κάθε δακτύλου. Αυτό μπορεί να επιτρέψει στο δάχτυλο να κινείται ελεύθερα στις κατευθύνσεις κάμψης και έκτασης. Κάθε μηχανισμός δακτύλου αποτελείται από τρεις φάλαγγες με διασυνδεδεμένες αρθρώσεις περιστροφής. Αυτή την διαμόρφωση ακολουθεί το μοντέλο της ανθρώπινης φυσιολογίας και μιμείται τα βασικά χαρακτηριστικά του ανθρώπινου χεριού.[4]

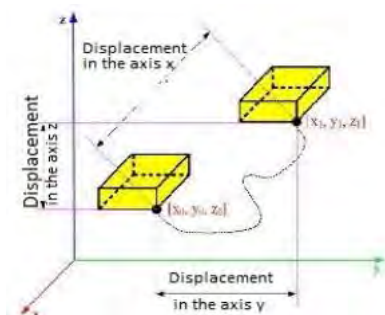
Στον μηχανοτρονικό σχεδιασμό, παρουσιάζουμε το ηλεκτρονικό μέρος που είναι υπεύθυνο για την τροφοδοσία και την κίνηση της μηχανικής δομής (βλέπε Εικόνα 14). Το κιβώτιο ελέγχου, που είναι στερεωμένο στο βραχίονα του νάρθηκα, είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο του εξωσκελετικού χεριού και περιέχει Arduino mega 2560, πέντε μικρο-σερβοκινητήρες sg90. Αυτό το σύστημα μπορεί να τροφοδοτηθεί από επαναφορτιζόμενη μπαταρία (9V) ή από εξωτερική παροχή ρεύματος (12V συνιστάται). Το sg90 είναι μια λύση χαμηλού κόστους για την ενσωμάτωση σε φορητή συσκευή, λόγω του χαμηλού βάρους του (9g) και το μειωμένο μέγεθός του (23,0 mm x 12,2 mm x 29,0 mm). Η πλακέτα Arduino είναι ικανή να ελέγχει την άσκηση αποκατάστασης, όπως τον έλεγχο του κινητήρα και την απόκτηση και επεξεργασία του EMG με τη χρήση ασπίδας E-health.[4]

3^ο Παράμετροι του βιομηχανικού ρομπότ

3.1 Αριθμός αξόνων

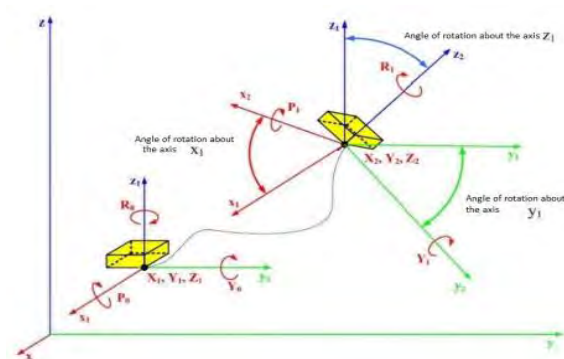
Δύο άξονες χρειάζονται για να φτάσουμε σε οποιοδήποτε σημείο ενός επιπέδου και τρεις άξονες χρειάζονται για να φτάσουμε σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου. Τρεις ακόμη άξονες απαιτούνται για τον πλήρη έλεγχο του προσανατολισμού του άκρου του βραχίονα (δηλαδή του καρπού). Τα ονόματα προέρχονται (roll,pitch,yaw) προέρχονται από την αεροδυναμική και δηλώνουν αντίστοιχα το roll την περιστροφή γύρω από τον άξονα Z, ο όρος pitch περιστροφή γύρω από τον άξονα X και τέλος ο όρος yaw δηλώνει την περιστροφή γύρω από τον άξονα Y.

Κάθε θέση πρέπει να έχει τουλάχιστον τρεις βαθμούς ελευθερίας, αυτές είναι οι X, Y, Z κατευθύνσεις ενός ορθογώνιου συστήματος συντεταγμένων σύμφωνα με το διάγραμμα 1.



Διάγραμμα 1: Αντιμετώπιση αλλαγής θέσης στον χώρο.

Επιπλέον, υπάρχουν 3 βαθμοί ελευθερίας περιστροφής σε ανεξάρτητους άξονες ώστε να επιτευχθεί ο προσανατολισμός ενός αντικειμένου ή ενός τελικού παράγοντα, σύμφωνα με το διάγραμμα 2.



Διάγραμμα 2: Αντιμετώπιση αλλαγής θέσης στον χώρο.

Αυτές οι κινήσεις εφαρμόζονται στον καρπό του ρομπότ, έτσι ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη ευελιξία του άκρου του βραχίονα.

3.2 Κινηματική του βιομηχανικού ρομπότ

Γενικά, η κινηματική ασχολείται με την μελέτη της γεωμετρικής κίνησης του μηχανισμού: Ενός σταθερού συστήματος συντεταγμένων αναφοράς και ανεξάρτητα από τις δυνάμεις που προκαλούν την κίνηση.

Για τον έλεγχο και τον προγραμματισμό ενός ρομπότ είναι απαραίτητη η γνώση τόσο της χωρικής διάταξης του ρομπότ όσο και του μέσου αναφοράς στο περιβάλλον. Η μηχανική του φορέα μπορεί να αναπαρασταθεί ως κινηματική αλυσίδα άκαμπτων σωμάτων που συνδέονται με περιστροφικές ή πρισματικές αρθρώσεις.

- Η περιστροφική άρθρωση, είναι άρθρωση που επιτρέπει σχετική στροφή μεταξύ δύο γειτονικών συνδέσμων. Δίνει ένα βαθμό ελευθερίας αφήνοντας το σώμα να περιστραφεί σε ένα επίπεδο και αποκόπτει κάθε άλλη δυνατότητα κίνησης.
- Η πρισματική (ή τηλεσκοπική) άρθρωση, είναι άρθρωση που επιτρέπει σχετική μετατόπιση (σε ευθεία γραμμή) μεταξύ δύο γειτονικών συνδέσμων. Δίνει και αυτή ένα βαθμό ελευθερίας αφήνοντας το σώμα να μετατοπίζεται στη διεύθυνση ενός από τους άξονες, και αποκόπτει κάθε άλλη δυνατότητα κίνησης.

Η πραγματική διάταξη των άκαμπτων στοιχείων και των αρθρώσεων του ρομπότ καθορίζει τις πιθανές κινήσεις του ρομπότ. Το αποτέλεσμα, της προκύπτουσας κίνησης λαμβάνεται από τη σύνθεση της στοιχειώδους κίνησης κάθε συνδέσμου σε σχέση με τον προηγούμενο σύνδεσμο.

3.3 Βαθμοί ελευθερίας

Όπως γνωρίζουμε για το μηχανολογικό σχεδιασμό, διαφορετικά κριτήρια σχεδιασμού θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, ειδικά στο σχεδιασμό του μαλακού εξωσκελετικού. Ειδικότερα, με τα κριτήρια σχεδιασμού του εξωσκελετικού μηχανισμού των κάτω άκρων ασχολήθηκαν διάφοροι επιστήμονες. Τα κριτήρια είναι επίσης καλά και για το σχεδιασμό των

εξωσκελετικών χεριών. Αυτά είναι τα εργονομικά και ο άνετος σχεδιασμός, η υψηλή ευελιξία, η ελαφρύς και η ισχυρή δομή, η προσαρμοστικότητα σε διαφορετικούς χρήστες, και ο χρήστης ασφάλεια. Αυτά τα κριτήρια σχεδιασμού είναι το κλειδί για τον καθορισμό των αριθμών των DOFs (βαθμοί ελευθερίας) και των ενεργοποιητών, για το σχεδιασμό των εύκαμπτων τμημάτων για την κίνηση των δακτύλων όσον αφορά το σχεδιασμό ενός εξωσκελετικού χεριού. [5] Onen, U., Botsali F.M., Kalyoncu, M., Tinkir, M., Yilmaz, N., Şahin, Y., (2014), Design and Actuator Selection of a Lower Extremity Exoskeleton, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19, 623-632.

Οι βραχίονες ενός ρομπότ περιγράφονται από τους βαθμούς ελευθερίας του. Οι βαθμοί ελευθερίας του ρομπότ ορίζονται ως ο αριθμός των ανεξάρτητων κοινών μεταβλητών που απαιτούνται για τον προσδιορισμό των θέσεων όλων των συνδέσμων του ρομπότ στο χώρο. Αυτός είναι συνήθως ο ίδιος με τον αριθμό των αξόνων.

Τα συστήματα σειριακών χειριστών σχεδιάζονται συνήθως για να τοποθετούν έναν τελικό παράγοντα με έξι βαθμούς ελευθερίας, που περιλαμβάνουν τρεις βαθμούς ελευθερίας για τη μεταγραφή και τρεις βαθμούς ελευθερίας για τον προσανατολισμό. Αυτό δημιουργεί μια άμεση σχέση μεταξύ της θέσης του ενεργοποιητή και της διαμόρφωσης του χειριστή που ορίζεται από την προς τα εμπρός και την αντίστροφη κινηματική του.

3.3.1 DOFs

Στον πίνακα 2, όπως φαίνεται παρακάτω παρατηρούμε τα διάφορα συστήματα μαλακών ρομποτικών εξωσκελετικών χεριών που παρουσιάζουν διαφορετικό αριθμό DOFs, λόγω των απαιτήσεων σχεδιασμού τους (ή των χαρακτηριστικών των επιθυμητών εξωσκελετικών χεριών). Ένα χέρι έχει 20 DOF, πρόκειται για τα DOF κάμψης/έκτασης σε κάθε μεσοφαλαγγικό (IP) και σε κάθε μεταταρσοφαλαγγικό (MCP), καθώς και τα δύο DOF κάμψης/έκτασης και απαγωγή/προσαγωγή DOF στο καρπομετακάρπιο (CMC). Γενικά, ο σχεδιαστής ορίζει τον αριθμό των DOF προκειμένου να μιμηθεί τις κινήσεις του χεριού. Ωστόσο, δεν υπάρχουν συστήματα που να μπορούν να υλοποιήσουν 20 DOFs, παρόλο που υιοθέτησαν μηχανισμούς με υπολειτουργία. [6] Buchholz, B., Armstrong, T. J., (1992), A kinematic model of

the human hand to evaluate its prehensile capabilities. Working paper, Department of Occupational Environment, University of Mass. Lowell, Lowell, MA, USA Department of Environmental and Industrial Health, University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA, *J Biomech*, 25, 149-62.

Πίνακας 2: Συστήματα εξωσκελετικών μαλακών χεριών.

Όχι.	Όνομα	Πρωτ αγωνι στής τύποι	DOFs	Εύκαμπτη μονάδα παραμόρφωσης	Λειτουργία
1	OHAE ^[7]	Κινητήρας	3	Ευέλικτη ράβδος και κίνηση με σχοινί	Αποκατάσταση και υποστήριξη της καθημερινής ζωής
2	SNU Exo-Glove ^[8]	Κινητήρας	1	Ευέλικτη ράβδος και κίνηση με σχοινί	Αποκατάσταση και υποστήριξη της καθημερινής ζωής
3	Το γάντι SEM ^[9]	Κινητήρας	3	Κίνηση με ελαστομερές και σχοινί	Αποκατάσταση και υποστήριξη της καθημερινής ζωής
4	Πολυτεχνικό Ινστιτούτο Worcester ^[10]	Κινητήρας	5	Κίνηση με ελαστομερές και σχοινί	Εκπαίδευση αποκατάστασης
5	Πανεπιστήμιο του Strathclyde ^[11]	Κινητήρας	3	Κίνηση με ελαστομερές και σχοινί	Εκπαίδευση αποκατάστασης
6	Το Εθνική Πανεπιστήμιο του Okayama I ^[12]	Αντλία αέρα	6	Ελαστομερές και πνευματική κίνηση	Αποκατάσταση και υποστήριξη της καθημερινής ζωής
7	Το Εθνική Πανεπιστήμιο του Okayama II ^[13]	Αντλία αέρα	6	Ελαστομερές και πνευματική κίνηση	Αποκατάσταση και υποστήριξη της καθημερινής ζωής
8	Toshiba Corp της Ιαπωνίας ^[14]	Αντλία αέρα	4	Ελαστομερές και πνευματική κίνηση	Αποκατάσταση και υποστήριξη της καθημερινής ζωής
9	Εθνικό Πανεπιστήμιο της Σιγκαπούρης ^[15]	Αντλία αέρα	1	Ελαστομερές και πνευματική κίνηση	Αποκατάσταση και υποστήριξη της καθημερινής ζωής
10	MRC-Glove ^[16]	Αντλία αέρα	4	Ελαστομερές και πνευματική κίνηση	Εκπαίδευση αποκατάστασης
11	Εθνικό Πανεπιστήμιο της Σιγκαπούρης ^[17]	Αντλία αέρα	3	Ελαστομερές και πνευματική κίνηση	Εκπαίδευση αποκατάστασης
12	Πανεπιστήμιο Χάρβαρντ I ^[18] , ^[31]	υδραυλικό αντλία	5	Ελαστομερές και υδραυλική κίνηση	Εκπαίδευση αποκατάστασης
13	Πανεπιστήμιο Χάρβαρντ III ^[19]	υδραυλικό αντλία	5	Ελαστομερές και υδραυλική κίνηση	Αποκατάσταση και υποστήριξη της καθημερινής ζωής

3.3.2 Ενεργοποιητές

Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα, ο αριθμός των ενεργοποιητών αποτελεί βασική παράμετρο σχεδιασμού στους μηχανισμούς εξωσκελετικού μαλακών χεριών. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να συζητηθεί με το σχεδιασμό ενός υποενεργοποιημένου μηχανισμού. Ωστόσο, υπάρχει ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα στον σχεδιασμό του συστήματος. Αυτό είναι η επιλογή των ενεργοποιητών. Υπάρχουν πνευματικοί, υδραυλικοί, ηλεκτρικοί, πιεζοηλεκτρικοί, ηλεκτροενεργοί ενεργοποιητές πολυμερών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ρομποτικές εφαρμογές. Ειδικότερα, οι πνευματικοί, υδραυλικοί και ηλεκτρικοί ενεργοποιητές είναι οι συνήθεις ενεργοποιητές στα συστήματα μαλακών ρομποτικών εξωσκελετικών χεριών (όπως φαίνεται στον πίνακα 2), επειδή απαιτείται η μεγάλη ροπή και η μετατόπιση. Ωστόσο, οι πνευματικοί και υδραυλικοί ενεργοποιητές έχουν ορισμένα μειονεκτήματα, όπως το βαρύ συνημμένο και τη μικρή ροπή εξόδου. Ως εκ τούτου, θα πρέπει να αναπτυχθούν στο μέλλον ενεργοποιητές μεγάλης ροπής εξόδου, μεγάλης

διαδρομής προκειμένου να ικανοποιήσουν τα κριτήρια του ελαφρού βάρους και της υψηλής ευελιξίας. [3]

3.3.3 Εύκαμπτες μονάδες παραμόρφωσης

Σύμφωνα με τα κριτήρια, ένα μαλακό ρομποτικό σύστημα εξωσκελετικού χεριού πρέπει να λαμβάνει υπόψη το αίσθημα του χρήστη για τη σωστή χρήση του και τον έλεγχο του. Ως εκ τούτου, η επιλογή του υλικού και του σχεδιασμού του ενεργού μαλακού μηχανισμού για κάθε δάχτυλο ή ολόκληρο το χέρι είναι πολύ σημαντικά. Το OHAE [7] Baker, M.D., McDonough, M.K., McMullin, E.M., Swift, M., BuSha, B.F., Orthotic Hand-Assistive Exoskeleton, The College of New Jersey, *Ieee 37th Annual Northeast Bioengineering Conference (Nebec)*, Troy, NY, USA, May 27, 2011, [<https://ieeexplore.ieee.org/document/5778523>, ανακτήθηκε 11/01/2024], (που παρουσιάζεται στην εικόνα 16α) υιοθέτησε ράβδους από ανθρακονήματα διαμέτρου 0,020" για την παραγωγή της κίνησης των φαλάγγων και χρησιμοποίησε ένα πλεγμένο καλώδιο πολυμερούς διαμέτρου 0,014" σε ένα τμήμα έλξης-τραβήγματος προκειμένου να παρέχει τις ροπές σε κάθε άρθρωση. Η ευελιξία του μηχανισμού παίζει τον βασικό ρόλο στην εργονομία και την άνεση αυτού του τύπου συστημάτων. Αυτός ο τύπος εύκαμπτων ράβδων είναι ένας μεντεσές κάμψης που χρησιμοποιείται για να υποκαθιστούν την άκαμπτη περιστροφική άρθρωση σε συμμορφούμενους μηχανισμούς. Ωστόσο, το εύρος κίνησης μπορεί να περιοριστεί από το υλικό και τις γεωμετρικές ιδιότητες και η παραμόρφωση της εύκαμπτης ράβδου μπορεί να επηρεάσει την άνετη λειτουργία. SNU Exo-Glove (όπως φαίνεται στην εικόνα 16β) απλοποίησε το σχήμα της εύκαμπτης ράβδου κάθε δακτύλου προκειμένου να προάγει την άνεση και η δυνατότητα ελέγχου.[8] Useok, Jeong, Hyun-Ki, In, Kyu-Jin, Cho, (2013), Implementation of various control algorithms for hand rehabilitation exercise using wearable robotic hand, *Intelligent Service Robotics*, 6, 181-189.



α) OHAE

β) SNU Exo-Glove

Εικόνα 16: Δύο τυπικά συστήματα μαλακών ρομποτικών εξωσκελετικών χεριών με εύκαμπτες ράβδους.

3.4 Εμβέλεια του ρομποτικού βραχίονα

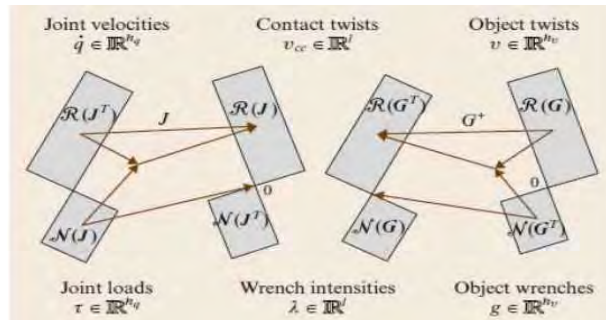
Η εμβέλεια του ρομπότ είναι η απόσταση από το κέντρο του ρομπότ έως τη μέγιστη έκταση του βραχίονα του ρομπότ. Όπως υποδηλώνει το όνομα του, η <<εμβέλεια>> του ρομπότ είναι ένα μέτρο του πόσο μακριά μπορεί να φτάσει ο ρομποτικός βραχίονας όταν είναι πλήρως εκτεταμένος. Με άλλα λόγια, υποδεικνύει τα όρια του εύρους λειτουργίας του ρομπότ.

3.5 Ελεγχόμενα κλειδιά και στροφές

Στο σχεδιασμό του χεριού και στο σχεδιασμό της λαβής και του χειρισμού, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε το σύνολο των στροφών που μπορούν να προσδώσουν στο αντικείμενο οι κινήσεις των δακτύλων, και αντίστροφα, τις συνθήκες υπό τις οποίες το χέρι μπορεί να αποτρέψει όλες τις πιθανές κινήσεις του αντικειμένου. Η διπλή άποψη είναι ότι πρέπει να γνωρίζουμε το σύνολο των στροφών που το χέρι μπορεί να εφαρμόσει στο αντικείμενο και υπό ποιες συνθήκες κάθε κλειδί μπορεί να εφαρμοστεί μέσω των επαφών. Αυτή η γνώση θα αποκτηθεί με τη μελέτη των διαφόρων υποχώρων που σχετίζονται με τον πίνακα πιασίματος(Grasp Matrix) και τη Ιακωβιανή του χεριού(Hand Jacobian).

Οι χώροι που εμφανίζονται στο επόμενο σχήμα είναι οι χώροι των στηλών και οι μηδενικοί χώροι του G , G^T , J , J^T . Ο χώρος των στηλών (επίσης γνωστός ως εύρος) και ο μηδενικός χώρος θα συμβολίζονται ως $R(\cdot)$ και $N(\cdot)$ αντίστοιχα. Τα βέλη δείχνουν τη διάδοση των διαφόρων ταχυτήτων και των μεγεθών φορτίου μέσω του συστήματος σύλληψης. Πιο συγκεκριμένα, ένας πίνακας A απεικονίζει διανύσματα από το (A^T) το (A) σε ένα προς ένα, δηλαδή ο χάρτης A είναι μια διμερής διαίρεση. Ο γενικευμένος αντίστροφος A^+ του A είναι μια διχοτόμηση που χαρτογραφεί διανύσματα προς την αντίθετη κατεύθυνση. Επίσης, ο A απεικονίζει διανύσματα σε $N(A)$ στο 0. Τέλος, δεν υπάρχει κανένα μη τετριμμένο διάνυσμα A που μπορεί να απεικονίσει στο $N(A^T)$. Αυτό συνεπάγεται ότι, αν $N(G^T)$ δεν είναι μη τετριμμένη, τότε το χέρι δεν θα είναι σε θέση να ελέγξει όλους τους βαθμούς ελευθερίας της κίνησης του αντικειμένου. Αυτό είναι σίγουρα αληθές για την ουσιαστική αντιστατική λαβή, αλλά όταν η

δυναμική είναι σημαντική, μπορεί να προκαλέσει την κίνηση του αντικειμένου κατά μήκος τις κατευθύνσεις σε $N(G^T)$. [9] Trachana, Z.D., (), *Manipulation Planning for an Underactuated Hand Performing Manipulation Tasks*, Diploma, School of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens.



Εικόνα 17: Γραμμικοί χάρτες που αφορούν τις στροφές και τις στρέψεις ενός συστήματος σύλληψης.

3.6 Επιθυμητές ιδιότητες

Για ένα σύστημα σύλληψης γενικής χρήσης, υπάρχουν τρεις κύριες επιθυμητές ιδιότητες: έλεγχος της στροφής του αντικειμένου v , έλεγχος του κλειδιού αντικειμένου g και έλεγχος του εσωτερικού δυνάμεων. Ο έλεγχος αυτών των μεγεθών συνεπάγεται ότι το χέρι μπορεί να παρέχει την επιθυμητή συστροφή και κλειδί με καθορισμένη πίεση λαβής με την κατάλληλη επιλογή των ταχυτήτων των αρθρώσεων και των ενεργειών. Οι σχετικές συνθήκες προκύπτουν σε δύο στάδια. Πρώτον, η δομή και η διαμόρφωση του χεριού, η οποία αποτυπώνεται στην Ιακωβιανή (Hand Jacobian) του χεριού, αγνοείται υποθέτοντας ότι το σημείο επαφής στο δάχτυλο μπορεί να διαταχθεί να κινηθεί προς οποιαδήποτε κατεύθυνση που μεταδίδεται από το επιλεγμένο μοντέλο επαφής. Μια σημαντική προοπτική εδώ είναι ότι v_{cc} . [9]

Η διπλή ερμηνεία είναι ότι οι ενεργοποιητές μπορούν να παράγουν οποιαδήποτε δύναμη και ροπή επαφής στις περιορισμένες κατευθύνσεις. Κατά παρόμοιο τρόπο, το λ , θεωρείται ως η είσοδος και το g θεωρείται ως η έξοδος. Η προκαταρκτική ιδιότητα που ενδιαφέρει υπό αυτή την υπόθεση είναι κατά πόσον η διάταξη και οι τύποι των επαφών στο αντικείμενο (που

αποτυπώνονται στο G) είναι τέτοιοι ώστε ένα επαρκώς επιδέξιο χέρι να μπορεί να ελέγξει τα δάχτυλά του έτσι ώστε να προσδώσει οποιαδήποτε στροφή στο αντικείμενο και, ομοίως, να εφαρμόσει οποιοδήποτε κλειδί στο αντικείμενο. Υπάρχουν οι ακόλουθες δυνατότητες:

- Όλες οι συστροφές αντικειμένων είναι δυνατές: Δεδομένου ενός συνόλου θέσεων και τύπων σημείων επαφής, παρατηρώντας το χάρτη το G στη δεξιά πλευρά του σχήματος, βλέπουμε ότι οι εφικτές στροφές αντικειμένων είναι εκείνες που βρίσκονται μέσα στο $R(G)$. Εκείνες στο $N(G^T)$ δεν θα μπορούσαν να επιτευχθούν από οποιοδήποτε χέρι χρησιμοποιώντας τη δεδομένη λαβή . Επομένως, για να επιτευχθεί οποιοδήποτε αντικείμενο στροφή, πρέπει να έχουμε $N(G^T)=0$ ή, ισοδύναμα, $\text{rank}(G)=n_v$. Οποιαδήποτε αντίληψη με τρεις μη ομόκεντρες σκληρές επαφές ικανοποιεί αυτή τη συνθήκη.
- Όλα τα δυνατά κλειδιά αντικειμένων: Αυτή η περίπτωση είναι η διπλή της προηγούμενης, οπότε αναμένουμε την ίδια συνθήκη. Έτσι, προκύπτει αμέσως ότι η επαρκής συνθήκη είναι $N(G^T)=0$, οπότε και πάλι μπορεί κανείς να λάβει ότι $\text{rank}(G)=n_v$. Για να προκύψουν οι συνθήκες που απαιτούνται για τον έλεγχο των διαφόρων ποσοτήτων ενδιαφέροντος, η δομή του χεριού δεν μπορεί να αγνοηθεί. Υπενθυμίζεται ότι η μόνη εφικτή επαφή στροφής στο χέρι είναι σε $R(G)$.
- Έλεγχος όλων των στροφών αντικειμένων: Είναι προφανές ότι, προκειμένου να προκαλέσετε οποιαδήποτε στροφή αντικειμένου v με την επιλογή των κοινών ταχυτήτων q , πρέπει να έχουμε $R(GJ)=R(G)$ και $N(G^T)=0$. Οι συνθήκες αυτές είναι ισοδύναμες με $\text{rank}(GJ)=\text{rank}(G)=n_v$.
- Έλεγχος όλων των κλειδιών αντικειμένων: Αυτή η ιδιότητα είναι διπλή με την προηγούμενη. Η ανάλυση οδηγεί στο ίδιο συμπέρασμα.
- Έλεγχος όλων των εσωτερικών δυνάμεων: Η ανάλυση δείχνει ότι οι εντάσεις των κλειδιών χωρίς επίδραση στην κίνηση του αντικειμένου είναι μόνο εκείνες που $N(G)$. Σε γενικές γραμμές, δεν μπορούν όλες οι εσωτερικές δυνάμεις να ελεγχθούν ενεργά από τις δράσεις των αρθρώσεων. Έχει αποδειχθεί ότι όλες οι εσωτερικές δυνάμεις σε $N(G)$ είναι ελεγχόμενες εάν και μόνο εάν $N(G) \cap N(J^T)=0$. [9]

3.7 Ανάλυση περιορισμών

Η πιο θεμελιώδης απαίτηση για τη σύλληψη και τον επιδέξιο χειρισμό είναι οι ικανότητες να κρατάτε ένα αντικείμενο σε ισορροπία και να ελέγχετε τη θέση και τον προσανατολισμό του αντικειμένου που πιάνεται σε σχέση με την παλάμη του χεριού. Οι πιο χρήσιμοι χαρακτηρισμοί της συγκράτησης της λαβής είναι το κλείσιμο της δύναμης και το κλείσιμο της μορφής. Οι ονομασίες αυτές ήταν σε χρήση πάνω από 134 χρόνια πριν στον τομέα του σχεδιασμού μηχανών για τη διάκριση μεταξύ αρθρώσεων που απαιτούσαν μια εξωτερική δύναμη για τη διατήρηση της επαφής και εκείνων που δεν το απαιτούσαν. Για παράδειγμα, ορισμένοι υδραυλικοί τροχοί είχαν έναν κυλινδρικό άξονα που ήταν τοποθετημένος σε ένα οριζόντιο ημικυλινδρικό αυλάκι που χωριζόταν σε κάθε πλευρά του τροχού. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, το βάρος του τροχού ενεργούσε για να κλείσει τις επαφές αυλακιού-άξονα, εξ ου και ο όρος κλείσιμο με δύναμη. Αντίθετα, εάν τα αυλάκια αντικαταστάθηκαν από κυλινδρικές οπές αρκετά μεγάλες ώστε να δέχονται τον άξονα, τότε οι επαφές θα έκλειναν από τη γεωμετρία (ακόμη και αν η κατεύθυνση της βαρυτικής δύναμης αντιστρεφόταν), εξ ου και ο όρος κλείσιμο μορφής. Όταν εφαρμόζονται στη σύλληψη, το κλείσιμο μορφής και το κλείσιμο δύναμης έχουν τις ακόλουθες ερμηνείες. Ας υποθέσουμε ότι ένα χέρι που πιάνει ένα αντικείμενο έχει κλειδωμένες τις γωνίες των αρθρώσεων του και την παλάμη του σταθερή στο χώρο, τότε η σύλληψη έχει κλειστό σχήμα, ή το αντικείμενο είναι κλειστό σχήμα, αν είναι αδύνατο να μετακινηθεί το αντικείμενο, έστω και απειροελάχιστα. Υπό τις ίδιες συνθήκες, η λαβή έχει κλείσιμο δύναμης ή το αντικείμενο είναι κλειστό με δύναμη, αν για κάθε κλειδί μη επαφής που υφίσταται το αντικείμενο, το κλειδί επαφής υπάρχει και είναι συνεπές με τους περιορισμούς που επιβάλλονται από τα μοντέλα τριβής που ισχύουν στα σημεία επαφής. Σημειώστε ότι όλες οι λαβές κλεισίματος μορφής είναι επίσης δυνάμεις κλεισίματος δύναμης. Όταν βρίσκονται σε κλείσιμο μορφής, το αντικείμενο δεν μπορεί να κινηθεί με κλείσιμο δύναμης στους άλλους τρεις βαθμούς ελευθερίας, ανεξάρτητα από το κλειδί μη επαφής. Επομένως, το χέρι διατηρεί το αντικείμενο σε ισορροπία για οποιοδήποτε εξωτερικό κλειδί, η οποία είναι η απαίτηση κλεισίματος δύναμης. Χονδρικά μιλώντας, το κλείσιμο μορφής συμβαίνει όταν η παλάμη και τα δάχτυλα τυλίγονται γύρω από το αντικείμενο σχηματίζοντας ένα κλουβί χωρίς περιθώρια μετακίνησης. Αυτή η

μορφή σύλληψης ονομάζεται επίσης σύλληψη με δύναμη. Ωστόσο, το κλείσιμο με δύναμη είναι δυνατό με λιγότερες επαφές, αλλά σε αυτή την περίπτωση το κλείσιμο με δύναμη απαιτεί την ικανότητα ελέγχου των εσωτερικών δυνάμεων. Είναι επίσης δυνατό μια λαβή να έχει μερικό κλείσιμο μορφής, υποδεικνύοντας ότι μόνο ένα υποσύνολο των πιθανών βαθμών ελευθερίας περιορίζεται από το κλείσιμο μορφής. **[9]**

4ο Μοντελοποίηση της ανθρωπομορφικής υπολειτουργίας

4.1 Μοντελοποίηση της ανθρωπομορφικής υπολειτουργίας

Σήμερα, όπου η ανάγκη για απλά, ελαφριά σχέδια είναι πιο έντονη από ποτέ, η ιδέα των συνεργιστικών υπολειτουργικών χεριών έχει προκαλέσει ένα γενικό ενδιαφέρον που επικεντρώνεται στον τομέα της ρομποτικής λαβής. Γενικά, η υπολειτουργία είναι ένας τεχνικός όρος που χρησιμοποιείται στην ρομποτική για να περιγράψει μηχανικά συστήματα που δεν μπορούν να διαταχθούν, να ακολουθήσουν αυθαίρετες τροχιές στο χώρο διαμόρφωσης. Η κατάσταση αυτή μπορεί να συμβεί για μια σειρά από λόγους, ο απλούστερος από τους οποίους είναι όταν το σύστημα διαθέτει μικρότερο αριθμό ενεργοποιητών από τους βαθμούς ελευθερίας. Στην περίπτωση αυτή, το σύστημα λέγεται ότι είναι *trivially underactuated*. Η κλάση των υποενεργοποιημένων μηχανικών συστημάτων είναι πολύ πλούσια και περιλαμβάνει τόσο ποικίλα μέλη όπως τα αυτοκίνητα, τα αεροπλάνα και ακόμη και τα ζώα. Οι ρομποτιστές του σήμερα μοντελοποιούν, σχεδιάζουν και κατασκευάζουν μηχανικά χέρια εμπνευσμένα από τον τρόπο με τον οποίο το ανθρώπινο χέρι κινείται, πιάνει και χειρίζεται αντικείμενα. Κοινωνικά εμπνευσμένοι από την ανάγκη να έρθουν τα ρομπότ και η προσθετική κοντά στις ανάγκες της σύγχρονης κοινωνίας, φαίνεται ότι αναμφισβήτητο να μην σχεδιάζονται και να μην κατασκευάζονται ρομποτικά χέρια με ανθρωπομορφική προοπτική. Οι άνθρωποι σήμερα δεν είναι τόσο εξοικειωμένοι με την έννοια του προσθετικού χεριού και αυτό πρέπει να αλλάξει, ώστε να αποφευχθούν ρατσιστικές συμπεριφορές στην καθημερινή ζωή και να συμβάλλει σε μια νέα κοινή επιρροή στον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι αυτοί ζουν τη ζωή τους. Ένας άλλος εξαιρετικός λόγος για την έρευνα αυτής της ενδιαφέρουσας κατεύθυνσης της ρομποτικής αγκομαχίας, είναι το ιδιαίτερο ενδιαφέρον που παρουσιάζει η λειτουργία και η κατασκευή των υπολειτουργούντων ρομποτικών χεριών. Έτσι, η μηχανική φύση του προβλήματος για έναν που ασχολείται με την ρομποτική, είναι να διερευνήσει, να αποφασίσει και να λάβει την απόφαση να κατασκευάσει το υποενεργοποιημένο ρομποτικό χέρι. Εμπνευσμένο από τις πρόσφατες μελέτες νευρολόγων που επισημαίνουν μια συγκεκριμένη αντίληψη ότι το ανθρώπινο χέρι λειτουργεί σε καθημερινές εργασίες, τα περισσότερα

υπολειτουργικά χέρια κατασκευάζονται υπό το πρίσμα της συνεργιστικής τρόπων υπολειτουργίας. Ο αναγνώστης μπορεί να σκεφτεί τις συνέργειες ως έναν ιδιαίτερο τρόπο αντίληψης της κίνησης, της σύλληψης και του χειρισμού ενός συγκεκριμένου αντικειμένου από ένα ανθρώπινο χέρι και -από μαθηματική άποψη- μια κίνηση σε συγκεκριμένες πολλαπλότητες προκειμένου να πιάσει και να χειριστεί ένα αντικείμενο.

Παρ' όλα αυτά, η προσπάθεια αυτή οδηγεί σε περιορισμούς στην επιδεξιότητα των ρομποτικών τεχνουργημάτων, ωθώντας τους ερευνητές σε κατευθύνσεις προκειμένου να αντισταθμίσουν αυτές τις εξισορροπητικές. Συνολικά, ο σύγχρονος σχεδιασμός ρομπότ με χέρια που υπολειτουργούν συνεργατικά, μπορεί να μην έχει την επιδεξιότητα των πλήρως ενεργοποιημένων χεριών, αλλά αποτελούν μια δίκαιη λύση για την καθημερινή ζωή, πόσο μάλλον όταν οι νευρολόγοι επαληθεύουν ότι ακόμη και ο άνθρωπος δεν κάνει πλήρη χρήση αυτών. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν αρκετές μελέτες που δείχνουν ένα βασικό χαρακτηριστικό της ανθρώπινης σύλληψης και του χειρισμού: οι άνθρωποι πιάνουν ένα αντικείμενο σύμφωνα με το εργασία που επιθυμούν να εκτελέσουν με πολύ λιγότερα εξαρτήματα από τον αριθμό των ανθρώπινων βαθμών ελευθερίας (Dof's) του χεριού, αποκαλύπτοντας μια συσχέτιση μεταξύ των βαθμών ελευθερίας (Dof's) του χεριού, επιβεβαιώνοντας την ύπαρξη των ανθρώπινων συνεργειών, που αναφέρονται προηγουμένως. Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζεται η πλήρης μεθοδολογία μοντελοποίησης ενός ρομποτικού χεριού με δεδομένη την κινηματική με ανθρωπομορφικό τρόπο, με βάση αμιγώς ανθρώπινα δεδομένα.

Για να γίνει αυτό, έχουν συλλεχθεί δεδομένα τόσο για την ανθρώπινη λαβή όσο και για τον χειρισμό και με κατάλληλες στατιστικές μεθόδους, αναλύθηκαν και κατέληξαν σε ένα τελικό ανθρώπινο μοντέλο. Στη συνέχεια, το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται ως είσοδος σε ένα σύστημα πολλαπλής βελτιστοποίησης προκειμένου να προκύψει το συνεργιστικό υπολειτουργικό μοντέλο του συγκεκριμένου ρομποτικού χεριού με δεδομένο κινηματικό μοντέλο. Το κινηματικό μοντέλο του ρομπότ που χρησιμοποιείται στην παρούσα ανάλυση είναι το DLR/HIT II Hand, το οποίο αποτελεί μέρος του εξοπλισμού του εργαστηρίου νευρορομποτικής. **[9]**

4.1.1 Περιγραφή συστήματος DLR/HIT II Hand

Το DLR-HIT Hand II χρησιμοποιείται ως εργαλείο στο Space Justin για τηλεχειρισμό. Ο ανθρώπινος χειριστής μπορεί να εκτελέσει πολλές εργασίες χειρισμού με αυτό το χέρι ρομπότ. Για την υποστήριξη του χειριστή αποδεικνύονται νέες μέθοδοι κοινής αυτονομίας. Το DLR HIT Hand II από το HIT (Harbin Institute of Technology) και το DLR Institut for Robotics and Mechatronic είναι ένα περαιτέρω στάδιο του DLR HIT Hand I. Σε αντίθεση με το DLR HIT Hand I, το νέο DLR HIT Hand II έχει πέντε αρθρωτά δάχτυλα με τέσσερις αρθρώσεις και τρεις ενεργούς βαθμούς ελευθεριών και εξακολουθεί να είναι ελαφρύτερο και μικρότερο. Ως DLR Hit Hand I το έτος 2007, το DLR Hit Hand II βραβεύτηκε με το IF-Design-Award 2009. Το Hand χρησιμοποιείται στη ρύθμιση Space Justin για την σύλληψη αντικειμένων με κοινή αυτονομία. Η κοινή αυτονομία υποστηρίζει τον ανθρώπινο τηλεχειριστή κατά τη διάρκεια, για παράδειγμα, διαστημικών επιχειρήσεων με αυτόνομο σχεδιασμό σύλληψης. Κύριο θέμα στην έρευνα υλικού είναι η χρήση των Hit Hand II Fingers για επαναδιαμορφώσιμες επιδέξιες μηχανές endeffectors της σειράς ReDex και η δημιουργία διεπαφής ανθρώπινης μηχανής (HMI) που βασίζεται σε αρθρωτά δάχτυλα.[10]

<https://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-11886/#gallery/28915>

Τεχνικά δεδομένα

- Βάρος: 1,5kg
- Βαθμοί ελευθερίας: 15 (3 κάθε δάκτυλο)
- Φορτίο επί πληρωμή: 10N ενεργή δύναμη στο άκρο του δακτύλου
- Ταχύτητα: Ταχύτητα άρθρωσης 360°/s
- Χαρακτηριστικά:
 1. Ηλεκτρονικά αισθητήρων που βρίσκονται ακριβώς δίπλα στους αισθητήρες.
 2. Μετατροπή A/D σε κάθε σύνδεσμο δακτύλου. Σύστημα σειριακής επικοινωνίας που συνδέεται μέσα στο δάχτυλο για τη σύνδεση των δακτυλικών συνδέσμων με έναν ελάχιστο αριθμό καλωδίων.

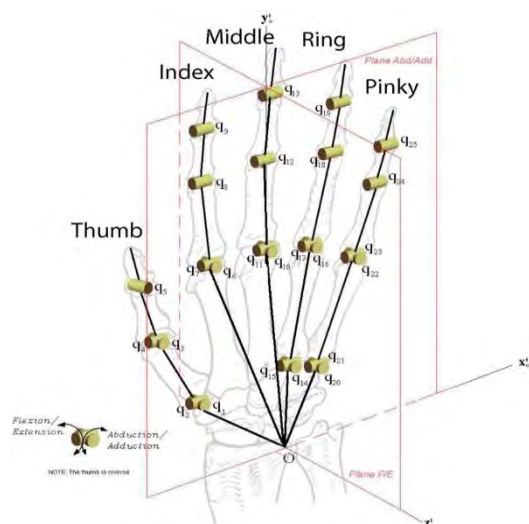
3. Πέντε πανομοιότυπα δάχτυλα με τέσσερις ενώσεις και μια δομή ανοιχτού σκελετού αλουμινίου με πλαστικά κελύφη χυτευμένα με έγχυση.
4. Σύστημα σειριακής επικοινωνίας που συνδέει τα δάχτυλα με το χέρι και το χέρι με οποιονδήποτε εξωτερικό υπολογιστή ελέγχου.
5. Αλλαγή εργαλείων με δυνατότητα τροφοδοσίας μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα με προσαρμοσμένο στήριγμα εργαλείων. **[10]**



Εικόνα 18: DLR-HIT Hand II.

4.1.2 Κινηματικό μοντέλο ανθρώπινου χεριού

Προκειμένου να καταγραφεί με επιτυχία η κινηματική του ανθρώπινου χεριού και να αναλυθεί κατάλληλα, χρειαζόμαστε ένα κατάλληλο κινηματικό μοντέλο του ανθρώπινου χεριού. Αρκετές μελέτες έχουν διεξαχθεί σε αυτή την προοπτική προκειμένου να μοντελοποιηθεί η πολυπλοκότητα του πιο δύσκολου άκρου στη φύση. Μεταξύ αυτών, μία από τις πιο διαδεδομένες αντιπροσωπευτικές και αποδεκτές είναι το μοντέλο που πρότεινε ο Pitarch. Αυτό το μοντέλο θεωρεί 25 βαθμούς ελευθερίας για τη δημιουργία της κινηματικής του χεριού. Η παρακάτω εικόνα δείχνει λεπτομερώς την τοποθέτηση κάθε βαθμού ελευθερίας σε κάθε άρθρωση του ανθρώπινου χεριού, οι γωνίες απαγωγής/προσαγωγής και κάμψης/έκτασης που τοποθετούνται στα δύο επίπεδα και το όνομα κάθε δακτύλου. Για λόγους απλότητας το κέντρο και η προέλευση όλων των μετρήσεων ορίζεται ότι βρίσκεται στη θέση του καρπού, όπως ακριβώς απεικονίζεται στην εικόνα του Pitarch, που ακολουθεί παρακάτω. Στην εικόνα 19, αναφέρεται επίσης η ονοματολογία κάθε γωνίας άρθρωσης ξεκινώντας με q_1 μέσω q_2 των βαθμών ελευθερίας. Αυτή η ονοματολογία υιοθετείται επίσης στην δική μας ανάλυση με τον ακριβή τρόπο. **[11]** Pitarch, E.P., (2010), *Virtual Human Hand: Grasping*



Εικόνα 19: Το κινηματικό μοντέλο 25 βαθμών ελευθερίας του ανθρώπινου χεριού.

Η γενική δομή του ανθρώπινου χεριού μπορεί να χωριστεί σε δύο σύνολα για την κινηματική του ανάλυση. Το πρώτο σύνολο αποτελείται από τα οστά του καρπού και το δεύτερο από τον σύνδεσμο των μετακαρπίων και τις φάλαγγες του, των πέντε δακτύλων [12] Kapandji, A. I., *Fisiología Articular: Esquemas Comentados de Mecanica Humana*, 6th edition, Editorial Medica Panamericana, Madrid, Spain, 2006. Μια ρεαλιστική προσέγγιση, χρήσιμη για ασκήσεις κάμψης των δακτύλων σε θεραπείες αποκατάστασης, θεωρεί για τα δάκτυλα από το δείκτη έως το μικρό δάκτυλο μια κινηματική αλυσίδα με 3 κρίκους, που είναι οι φάλαγγες και 4 βαθμούς ελευθερίας (DOF). Για τον αντίχειρα, η κινηματική αλυσίδα έχει 3 συνδέσμους, το μετακάρπιο (MC), 2 φάλαγγες και 5 DOF. Η παλάμη του χεριού θεωρείται σταθερή βάση. Σε αυτή την προσέγγιση, για το δείκτη έως το μικρό δάκτυλο, η μετακάρπια (MC) αντιπροσωπεύει την ακίνητη βάση κάθε κινηματικής αλυσίδας. Αυτό συμπληρώνεται από την εγγύς φάλαγγα (PP), τη μεσαία φάλαγγα (MP) και την άπω φάλαγγα (DP) ως συνδέσμους, όπως φαίνεται στην εικόνα 20. Η μετακαρποφαλαγγική άρθρωση (MCP) έχει 2 DOF, ενώ οι μεσοφαλαγγικές αρθρώσεις, η εγγύς (PIP) και η άπω (DIP), έχουν μόνο 1 DOF. Η P αντιπροσωπεύει το άκρο του δακτύλου, το κινητό άκρο της κινηματικής αλυσίδας. Οι αρθρώσεις του αντίχειρα είναι η καρπομετακαρπική (TCMC) με 2

DOF, η μετακαρποφαλαγγική (TMCP) με 2 DOF, και η εγγύς μεσοφαλαγγική άρθρωση (PIP) με 1 DOF. Η σύμβαση Denavit-Hartenberg (D-H) χρησιμοποιείται για τον ορισμό κάθε μίας από τις τέσσερις κινηματικές αλυσίδες. Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει τις παραμέτρους D-H των κινηματικών αλυσίδων, όπου LPP, LMP και LDP είναι τα ονομαστικά μήκη των εγγύς, μέσης και άπω φάλαγγας, αντίστοιχα. Η εξίσωση (1) περιγράφει τη θέση και τον προσανατολισμό του άκρου του δακτύλου [13] Delph, M. A., Fischer, S. A., Gauthier, P. W., Luna, C. H. M., Clancy, E. A., Fischer, G. S., (2013), A soft robotic exomusculature glove with integrated sEMG sensing for hand rehabilitation. *In Proceedings of the IEEE 13th International Conference on Rehabilitation Robotics*, June 24-26, 2013.

[<https://ieeexplore.ieee.org/document/6650426>, ανακτήθηκε 31/01/2024]

P_k

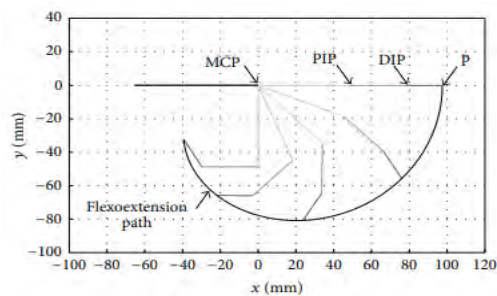
$$= {}_{-1}^0T(u_k){}_4^0T(\theta_i)k = {}_{-1}^0T(u_k){}_1^0T(\theta_{MCPabd}) \times k_2^1T(\theta_{MCPflex})k_3^2T(\theta_{PIPflex})k_4^3T(\theta_{DIPflex})k \quad (1)$$

όπου το P_k αντιπροσωπεύει έναν πίνακα που περιέχει τη θέση και το προσανατολισμό του άκρου του δακτύλου και k είναι ο δείκτης για το δάχτυλο: δείκτης=2, μεσαίο δάχτυλο=3, δαχτυλίδι=4 και μικρό δάχτυλο=5, δεδομένου ότι το 1 προορίζεται για τον αντίχειρα. Το $T(uk)$ αντιπροσωπεύει τον διάνυσμα που χρησιμοποιείται για τον ορισμό του πλαισίου αναφοράς στην αρχή της κινηματικής αλυσίδας κάθε δακτύλου σε σχέση με ένα σταθερό πλαίσιο του πλαισίου αναφοράς στη βάση του χεριού. $T(\theta_i)k$ είναι οι πίνακες ομογενών μετασχηματισμών που ορίζουν τις γεωμετρικές μετασχηματισμό μεταξύ της αρχής της κινηματικής αλυσίδας των κάθε δακτύλου και του άκρου του. Σύμφωνα με τις [11], [14] Tondu B., (2009) Kinematic modelling of anthropomorphic robot upper limb with human-like hands. *In Proceedings of the International Conference on Advanced Robotics*, Munich, Germany, June 2009. [<https://ieeexplore.ieee.org/document/5174764?arnumber=5174764>, ανακτήθηκε 31/01/2024]. Η περιστροφή των αρθρώσεων των δακτύλων παρουσιάζεται στον πίνακα 3. Στο διάγραμμα 3 παρουσιάζεται η διαδρομή της κινηματικής αλυσίδας των τριών φαλάγγων του μεσαίου δακτύλου. Αυτή η

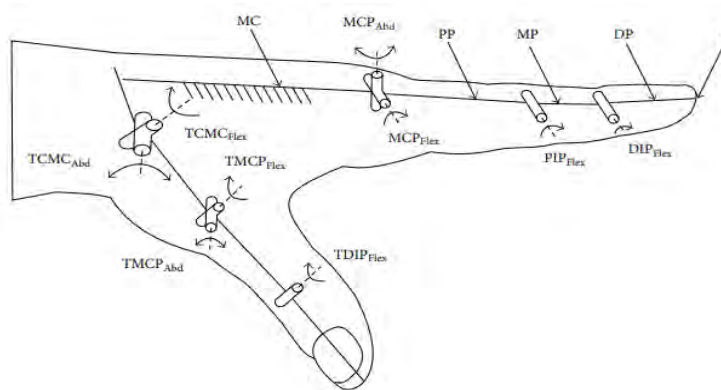
διαδρομή δακτύλου (P) είναι η αρχική απαίτηση για την κίνηση των μηχανισμών του καμπτοεκτατήρα του ρομποτικού συστήματος.

Πίνακας 3: Γωνίες ενεργών κινήσεων των αρθρώσεων των δακτύλων από τον δείκτη έως το μικρό δάχτυλο.

Δάκτυλο/άρθρωση	$\theta_{MCP\ abd}$	$\theta_{MCP\ flex}$	$\theta_{PIP\ Pflex}$	$\theta_{DIP\ flex}$
Δείκτης	20-30°	90°	110°	80°-90°
Μεσαίος	20-30°	90°	110°	80°-90°
Δακτύλιος	20-30°	90°	120°	80°-90°
Μικρό	20-30°	90°	135°	90°



Διάγραμμα 3: Διαδρομή flexoextension της κινηματικής αλυσίδας των τριών φαλαγγών του μεσαίου δακτύλου ($0^\circ \leq MCP \leq 90^\circ$, $0^\circ \leq PIP \leq 90^\circ$, and $0^\circ \leq DIP \leq 60^\circ$).



Εικόνα 20: Κινηματικό μοντέλο χεριού με σταθερό μετακάρπιο (εκτός από τον αντίχειρα).

5^ο Ανασκόπηση των κινηματικών δομών

5.1 Το χέρι του Βελιγραδιού

Σε μια προσπάθεια να μιμηθεί τη λειτουργικότητα του ανθρώπινου χεριού, το Πανεπιστήμιο της Νότιας Καλιφόρνιας και το Πανεπιστήμιο του NoviSad στο Βελιγράδι ανέπτυξαν από κοινού ένα ρομποτικό χέρι με πολλαπλά δάχτυλα που ονομάζεται χέρι του Βελιγραδιού/USC. Πρόκειται για ένα ρομποτικό χέρι με πέντε δάχτυλα το οποίο απαιτεί τον έλεγχο μόνο τεσσάρων βαθμών ελευθερίας, ένας μηχανισμός βραχίονα κουνήματος συνδέει μηχανικά δύο ζεύγη δακτύλων [15] Bekey, G.A., Tomovic, R., Zeljkovic I., *Control Architecture for the Belgrade/USC Hand, Dextrous Robot Hands*, S.T. Venkataraman, T. Iberall. Springer-Verlag, New York Inc, 136-149, 1990. Ο σχεδιασμός βασίζεται στο προσθετικό χέρι Belgrade [16] Tomovic, R., Boni, G., *An Adaptive Artificial Hand, IRE Transactions on Automatic control*, AC-7, 3-10 1962., το οποίο αρχικά είχε πέντε δάχτυλα, που ελέγχονταν από ένα κινητήρα και βασίστηκε στην αρχή της σύλληψης σε μια πολύ απλή στρατηγική ελέγχου, κατά την οποία μετά την επαφή ενός δακτύλου με το αντικείμενο προς σύλληψη, τα υπόλοιπα δάχτυλα κλείνουν μέχρι η πίεση σε όλα τα μαξιλαράκια των δακτύλων ήταν περίπου ίση, επιτυγχάνοντας έτσι υψηλό βαθμό αυτόματης προσαρμοστικότητας στο σχήμα.

Ο στόχος αυτού του ανθρωπόμορφου χεριού ήταν να είναι κατάλληλο για εργασίες σύλληψης και ικανό για αυτόνομη προσαρμογή, ενώ παράλληλα να εφαρμόζει απλή αρχιτεκτονική ελέγχου βασισμένη στην αρχές του μη αριθμητικού ή αντανakλαστικού ελέγχου για την οδήγηση του το χέρι. [17] Bekey, G.A., Tomovic R., *Robot control by reflex actions, Proceedings 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, CA, 240-247, 1986.

Στο μοντέλο II, ο αντίχειρας έχει δύο αρθρώσεις και μπορεί να περιστρέφεται 120° γύρω από έναν άξονα παράλληλο προς τον καρπό από την πλήρως θέση σε αντίθεση με τα δάχτυλα αριθ. 2, 3 ή 4, τα οποία είναι πανομοιότυπα σε μέγεθος και αποτελούνται από τρεις αρθρώσεις το καθένα. Οι περιστροφές των αρθρώσεων υποστηρίζονται από μικροσκοπικά ρουλεμάν και κινούνται

από σερβοκινητήρες συνεχούς ρεύματος που βρίσκονται εντός της δομής του καρπού. Οι κινήσεις κάθε φάλαγγας δεν ελέγχονται μεμονωμένα αφού συνδέονται μέσω συνδέσμων με τρόπο που μπορούν να εμφανίζουν παρόμοιες κινήσεις με τα ανθρώπινα δάχτυλα κατά τη διάρκεια της λαβής. Η αυτόνομη προσαρμογή στο σχήμα επιτυγχάνεται μέσω ενός κουνιστού βραχίονα, εάν η κίνηση του ενός δακτύλου του οδηγούμενου ζεύγους αναστέλλεται, το δεύτερο δάχτυλο συνεχίζει να κινείται, παρέχοντας έτσι πρόσθετους βαθμούς ελευθερίας στα δάχτυλα χωρίς ενεργό έλεγχο. Αυτή η αρχιτεκτονική καθορίζει ένα χέρι κατάλληλο για εργασίες σύλληψης, αν και δεν έχει επιδεξιότητα για εφαρμογές που απαιτούν μεγαλύτερο αριθμό εξωτερικά ελεγχόμενων βαθμών ελευθερίας.

5.1.1 Το χέρι της Γιούτα/MIT

Αναπτύχθηκε από το Κέντρο Μηχανικού Σχεδιασμού στο University of Utah, και το Εργαστήριο Τεχνητής Νοημοσύνης στο MIT, αυτό το ρομποτικό τελικό εργαλείο προοριζόταν να λειτουργήσει ως ερευνητικό εργαλείο γενικού σκοπού για τη μελέτη της μηχανικής επιδεξιότητας [18] Jacobsen, S.C., Iversen, E.K., Knutti, D.F., Johnson, R.T., Biggers, K.B., Design of the Utah/M.I.T. Dextrous Hand, Proc, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, CA, USA, April 07-10, 1986,

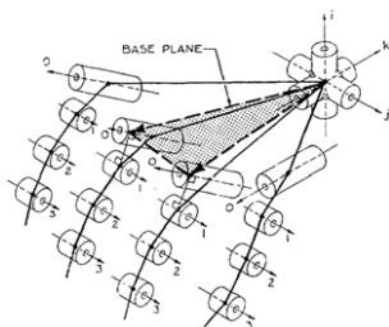
[<https://ieeexplore.ieee.org/document/1087395>, ανακτήθηκε 05/02/2024].

Αρχικά προοριζόταν να μοιάζει με ανθρώπινο χέρι, η τελική διαμόρφωση του Utah/MIT Dextrous Hand είναι ένα οιονεί ανθρωπόμορφο χέρι με 3 δάχτυλα και 1 αντίχειρα. Οι λόγοι για να μοιάζει με ανθρώπινο χέρι ήταν καταρχήν να υπάρχει, δεύτερον για να επιτραπεί η χρήση ενός ανθρώπου ερευνητή για να συγκρίνει τις λειτουργίες του ρομποτικού χεριού με τις λειτουργίες του δικού του χεριού. Τέλος, η ανθρωπομορφία του πρότεινε τη χρήση του σε ένα σύστημα τηλεχειρισμού.

Μηχανική δομή

Το χέρι διαθέτει 4 δάχτυλα. Κάθε δάχτυλο έχει τέσσερις αρθρώσεις- η πρώτη άρθρωση συνδέει την άρθρωση με την παλάμη και επιτρέπει την περιστροφή

του δάκτυλου γύρω από έναν άξονα κάθετο στην παλάμη. Οι άλλες τρεις αρθρώσεις (άπω αρθρώσεις) είναι επίσης περιστροφικές και ο άξονας τους είναι παράλληλος προς την παλάμη και κάθετος προς το δάκτυλο, όπως φαίνεται στην εικόνα 21.



Εικόνα 21: Διαμόρφωση του δεξιού χεριού, οι αρθρώσεις 0 είναι παράλληλες προς το επίπεδο βάσης.

Αυτό το ρομποτικό χέρι χρησιμοποιεί ένα μηχανισμό τένοντα-τροχαλίας για τους ενεργοποιητές που ενεργοποιούν κάθε ένα από τους 16 βαθμούς ελευθερίας. Σε αυτόν τον τύπο μηχανισμού το ένα άκρο του τένοντα συνδέεται με ένα πνευματικό ενεργοποιητή και το άλλο άκρο είναι στερεωμένο σε έναν μεντεσέ που βρίσκεται στο τμήμα του δακτύλου που πρόκειται να μετακινηθεί. Για να καταστεί δυνατή η αξιόπιστη λειτουργία, οι δύο πρώτες αρθρώσεις κάθε δακτύλου διαχωρίστηκαν κατά τρόπο ώστε οι τένοντες να μπορούν να δρομολογηθούν σωστά.

Οι άπω αρθρώσεις (1, 2 και 3) των δακτύλων και του αντίχειρα είναι ικανές να εκτελούν κινήσεις που κυμαίνονται από 0 έως 95 μοίρες, ενώ η εγγύς άρθρωση (άρθρωση 0) λειτουργεί διαφορετικά ανάλογα με αν είναι η βάση του αντίχειρα ή του δακτύλου. Σε ένα δάκτυλο, η εγγύς άρθρωση είναι ικανή για κινήσεις από -25 έως +25 μοίρες και στον αντίχειρα από -45 έως +45 μοίρες. Ο καρπός περιλαμβάνει δύο κάθετους άξονες σε έναν μηχανισμό με σταυρωτό ζυγό, επιτρέποντας την κάμψη/έκταση του καρπού σε εύρος από -45 έως +45 μοίρες και απαγωγή/προσαγωγή του καρπού σε εύρος από -15 έως +15 μοίρες.

Περιστροφή του καρπού γύρω από έναν τρίτο ορθογώνιο άξονα στην περιοχή από -135 έως +135 καθίσταται δυνατή από την περιστροφή των ράβδων

συμπίεσης του τηλεχειριστηρίου. Ο απομακρυντής είναι στοιχείο της δομής που μεταφέρει τένοντες από το πακέτο του ενεργοποιητή.

5.1.2 Το χέρι του Ρομποναύτη

Σχεδιάστηκε από τον κλάδο τεχνολογίας ρομποτικών συστημάτων Johnson της NASA Space Center για την αναπαραγωγή του μεγέθους, την κινηματική και τη δύναμη του χεριού του αστροναύτη που ταιριάζει στο διάστημα, το Robonaut Hand πληροί τις απαιτήσεις για EVA (Extra Vehicular Activity). Τέτοιες δραστηριότητες θα μπορούσαν να είναι συντήρηση ή κατασκευή, αλληλεπίδραση με προγραμματισμένες διαστημικές διασυνδέσεις και εργαλεία του πληρώματος EVA του σταθμού, με στόχο να μειωθεί ο χρόνος που πρέπει να περνούν οι αστροναύτες εκτός της σχετικής ασφάλειας του διαστημικού σταθμού [19] Lovchik, C.S., Diftler, M.A., The Robonaut hand: a dexterous robot hand for space, Robotics and Automation, Proceedings, *IEEE International Conference*, Detroit, MI, USA, May 10-15, 1999, [<https://ieeexplore.ieee.org/document/772420>, ανακτήθηκε 05/02/2024]. Το χέρι ρομποναύτη έχει ανθρωπομορφική διαμόρφωση με 5 δάχτυλα και δώδεκα βαθμούς ελευθερίας. Ο καρπός έχει δύο DOF για συνολικά δεκατέσσερις βαθμούς ελευθερίας. Ένα αντιβράχιο ολοκληρώνει τη δομή, φιλοξενώντας και τους δεκατέσσερις κινητήρες, δώδεκα πλακέτες κυκλωμάτων και την καλωδίωση του χεριού και έχει διάμετρο τέσσερις ίντσες στην βάση και μήκος περίπου οκτώ ίντσες.

Το χέρι παρουσιάζει δύο υποσύνολα, ένα σύνολο επιδέξιων εργασιών το οποίο χρησιμοποιείται για το χειρισμό και ένα σύνολο λαβής που επιτρέπει το χέρι να διατηρεί μια σταθερή λαβή ενώ διατηρεί ή ενεργοποιεί ένα δεδομένο αντικείμενο. Το επιδέξιο σύνολο αποτελείται από δύο, τρία DOF δάχτυλα (μεσαίο και δείκτη) και ένα αντιθετικό δάχτυλο τριών DOF αντίχειρα. Τα δύο τελευταία δάχτυλα (δακτύλιος και μικρό δάχτυλο) παρουσιάζουν μόνο ένα DOF και μαζί με την παλάμη αντιστοιχούν στο σύνολο λαβής. Όλα τα δάχτυλα είναι τοποθετημένα στην παλάμη. Για να ταιριάζει με το μέγεθος του γαντοφορεμένου χεριού ενός αστροναύτη, οι κινητήρες τοποθετούνται εκτός του χεριού και η μηχανική ισχύς μεταδίδεται μέσω ενός εύκαμπτου συστήματος κίνησης. Για να αποφευχθούν προβλήματα αξιοπιστίας που

σχετίζονται με τους τένοντες όταν χρησιμοποιούνται σε διαστημικό περιβάλλον EVA (Extra Vehicular Activity), το χέρι χρησιμοποιεί εύκαμπτους άξονες για τη μετάδοση δύναμης από τους κινητήρες στο αντιβράχιο στα δάχτυλα. Η περιστροφική κίνηση των εύκαμπτων αξόνων μετατρέπεται σε γραμμική κίνηση στο χέρι με τη χρήση μικρών αρθρωτών συγκροτημάτων βιδών με αποτέλεσμα ένα συμπαγές σύστημα κίνησης.

5.1.3 Το χέρι της σκιάς

Αναπτύχθηκε από την εταιρεία Shadow Robot Company, το Shadow Dextrous Robot Hand, στην Εικόνα 22, είναι ένα προηγμένο ανθρωποειδές σύστημα ρομποτικού χεριού διαθέσιμο για αγορά και θεωρείται ως το πιο προηγμένο ρομποτικό χέρι στον κόσμο αυτή τη στιγμή. Αυτό το χέρι αναπαράγει πιστά τους 24 βαθμούς ελευθερίας του το ανθρώπινο χέρι και παρέχει παραγωγή δύναμης και κίνηση ευαισθησία παρόμοια με εκείνη του ανθρώπινου ομολόγου του. Ωστόσο, όσον αφορά την ταχύτητα, το Shadow Hand έχει μια γενική κίνηση περίπου με τη μισή ταχύτητα του ανθρώπινου χεριού. Οι 24 βαθμοί ελευθερίας κατανέμονται ως εξής: 4 DOF το καθένα για το πρώτο, το μεσαίο και το δακτυλικό δάκτυλο, 5 DOF για το μικρό δάκτυλο, 5 DOF για τον αντίχειρα και 2 DOF για τον καρπό. Ο πίνακας 4 παρουσιάζει λεπτομερώς τη σύνδεση για κάθε άρθρωση και τις εύρος κίνησης σε μοίρες.



Εικόνα 22: Το χέρι ρομπότ Shadow Dextrous Robot Hand.

Ο παράγοντας μορφής του Shadow Hand ανταποκρίνεται σε αυτόν ενός τυπικού ανθρώπινου αρσενικού. Το συνολικό βάρος, συμπεριλαμβανομένων των αισθητήρων, των μυών και την πολλαπλή βαλβίδα είναι περίπου 4 κιλά μόνο, λόγω του υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του. Ατσάλι χρησιμοποιείται μόνο για το αντιβράχιο, ενώ άλλα υλικά όπως αλουμίνιο,

πολυκαρβονικό, καουτσούκ, κ.λπ. χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των δακτύλων, της παλάμης και της βάσης.

Πίνακας 4:Κινηματική δομή του σκιώδους χεριού.

Κοινή	Συνδέει το	Εύρος
Πρώτο, μεσαίο, δακτυλικό δάχτυλο		
1	Distal - Μέση	-20 - +90
2	Μεσαίο - εγγύς	0 - +90
3	Πρόσθια - Αρθρώνα	-20 - +90
4	Αρθρώνα - Παλάμη	-25 - +25
Μικρό δάχτυλο		
1	Distal - Μέση	-20 - +90
2	Μεσαίο - εγγύς	0 - +90
3	Πρόσθια - Αρθρώνα	-20 - +90
4	Αρθρώνα - Μετακάρπιο	-25 - +25
5	Μετακάρπιο - Παλάμη	0 - +40
Αντίχειρας		
1	Distal - Μέση	-20 - +90
2	Μεσαίο - εγγύς 1	-40 - +40
3	Μεσαίο - εγγύς 2	-15 - +15
4	Πρόσθιο - Παλάμη 1	0 - +80
5	Proximal - Παλάμη 2	-60 - +60
Καρπός		
1	Παλάμη - Καρπός	-55 - +45
2	Καρπός - Αντιβράχιο	-30 - +10

Χαρακτηριστικό αυτών των χεριών είναι ο ελεγκτής, με βάση ένα δυναμικό νευρωνικό δίκτυο που προσομοιώνει τους κινητονευρώνες [20] Folgheraiter, M., Giuseppina, C., G., (2001), Human-like hierarchical reflex control for an artificial hand, *Proc. IEEE Humanoids*, 2001, Tokyo, Japan, November 2001. Σε αυτόν τον ελεγκτή, υπάρχουν 3 συνδυασμένα υποσυστήματα: Κύκλωμα αντανakλαστικών - για τον έλεγχο της θέσης της μεμονωμένης άρθρωσης και δυσκαμψία. Αντίστροφη κινηματική - για τον υπολογισμό της αναφοράς των αρθρώσεων λαμβάνοντας ως είσοδο μια συγκεκριμένη θέση αντικειμένου σε καρτεσιανών συντεταγμένων. Γεννήτρια προτύπων - για να αποφασίσει την τροχιά σε όρους τη στιγμιαία θέση της άρθρωσης και τη δυσκαμψία.

5.2 Τεχνολογίες ανίχνευσης και συστήματα ενεργοποίησης

5.2.1 Το χέρι Belgrade/USC

Αισθητήρες

1. Οι αισθητήρες θέσης υποδεικνύουν την περιστροφή της βάσης του δακτύλου σε σχέση με το επίπεδο της παλάμης. Πρόκειται για μικρά αγωγίμα πλαστικά ποτενσιόμετρα μικρού μεγέθους (35x10x3mm), με καλή ανάλυση (320ohms/mm) και υψηλό προσδόκιμο ζωής (της τάξης του ενός εκατομμυρίου κύκλων).
2. Οι αισθητήρες πίεσης αφής είναι αντιστάσεις ανίχνευσης δύναμης (FSR) που βρίσκονται στις άκρες των δακτύλων και ανιχνεύουν την επαφή με ένα αντικείμενο και τη δύναμη που ασκείται στο εύρος από 20 γραμμάρια έως 5 kg. Αυτοί οι αισθητήρες μπορούν επίσης να αναφέρουν συμβάντα επαφής όταν αντιλαμβάνονται μια ελάχιστη κανονική δύναμη.

Ενεργοποιητές

Τέσσερις κινητήρες ροπής συνεχούς ρεύματος αντιστοιχίζονται ως εξής: ένας κινητήρας για την κάμψη κάθε ζεύγους δακτύλων, ένας τρίτος κινητήρας για την παραγωγή κάμψη του αντίχειρα και ένας τέταρτος κινητήρας για την περιστροφή του αντίχειρα. Τα χαρακτηριστικά των τριών πρώτων κινητήρων είναι τα εξής: 36 βολτ, 6 Watt, ταχύτητα 8810 rpm χωρίς φορτίο, ροπή ακινητοποίησης 43 mNm και γρανάζι, αναλογία μείωσης 30:1. Ο τέταρτος κινητήρας έχει σχεδόν τα ίδια χαρακτηριστικά εκτός από τη σχέση μείωσης 102:1. [21] Martell, J., W., Giuseppina, G., (2007), Robotic Hands: Design Review and Proposal of New Design Process, *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.*, 587-592.

5.2.2 Το χέρι Utah/MIT

Αισθητήρες

Οι εσωτερικοί αισθητήρες βρίσκονται σε κάθε άρθρωση για τη μέτρηση της γωνίας εκτροπής και το σύστημα αισθητήρων βασίζεται στο φαινόμενο Hall. Μαγνητικά ευαίσθητη συσκευή φαινομένου Hall βρίσκεται στο εγγύς σύνδεσμο και δύο μαγνήτες κοβαλτίου-σαμαρίου, που λειτουργούν σε διάταξη διπόλου, είναι προσαρτημένοι στον άπω σύνδεσμο. Άλλοι εσωτερικοί αισθητήρες που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνονται σε καθένα από τα 32 συστήματα ανίχνευσης της τάσης του τένοντα που βρίσκονται στον καρπό.

Δεδομένου ότι η τροχαλία είναι τοποθετημένη κατά τρόπο που να διαταράσσει την πορεία του τένοντα, η τάση του τένοντα επιβάλλει ένα φορτίο στην προβαλλόμενη και μια γέφυρα με ημιαγωγό μετρητή τάσης ανιχνεύει τη δοκό τάσης παρέχοντας γραμμική έξοδο για την τάση του τένοντα σε ένα εύρος από 0 έως 30 λίβρες.

Ενεργοποιητές

Δεδομένου ότι κάθε άρθρωση δέχεται δύο τένοντες, ο αριθμός των ενεργοποιητών που απαιτούνται για την κίνησή τους διπλασιάζει τον αριθμό των δακτύλων άρθρωσης. Η έκδοση III του χεριού Utah/MIT χρησιμοποιεί μια διπλή μονάδα ενεργοποιητή που αποτελείται από δύο μονάδες ελέγχου της πίεσης βαλβίδες, δύο κυλίνδρους ενεργοποιητή και δύο ρυθμιζόμενες πνευματικές αποσβεστήρες. Περιλαμβάνονται επίσης συστήματα τάνυσης ελατηρίων, για να διατηρούν τις τάσεις των τενόντων όταν το σύστημα είναι χωρίς πίεση. Οι κύλινδροι για την ενεργοποίηση και την απόσβεση είναι κατασκευασμένοι από γυαλί και έμβολα γραφίτη στενής τοποθέτησης και οι μονάδες ενεργοποίησης τοποθετούνται σε ένα συμπαγές ορθογώνιο συγκρότημα διαστάσεων 4,25 x 4,25 x 24 ιντσών και βάρος 20 κιλά. [21]

5.2.3 Το χέρι του ρομποναύτη

Αισθητήρες

Συνολικά, το χέρι διαθέτει σαράντα τρεις αισθητήρες, χωρίς να συμπεριλαμβάνουν την αίσθηση αφής. Κάθε άρθρωση είναι εξοπλισμένη με έναν ενσωματωμένο αισθητήρα απόλυτης θέσης. Κάθε κινητήρας είναι εξοπλισμένος με απόλυτους κωδικοποιητές. Κάθε ένας καθώς και οι σύνδεσμοι σφαιρικών αρθρώσεων καρπού είναι ως κυψέλες φορτίου για την παροχή ανατροφοδότησης δύναμης.

Ενεργοποιητές

Το χέρι Robonaut χρησιμοποιεί δεκατέσσερις κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες εξοπλισμένους με κωδικοποιητή και πλανητικό γρανάζι 14 προς 1. Οι κινητήρες συνδέονται με ανοξειδωτους χάλυβες υψηλής ευκαμψίας

flexshafts. Ο καρπός ενεργοποιείται με διαφορετικό τρόπο μέσω δύο γραμμικών ενεργοποιητών. [21]

5.2.4 Το Χέρι της Σκιάς Αισθητήρες

Αισθητήρες θέσης, οι οποίοι αντιλαμβάνονται την περιστροφή κάθε άρθρωσης του Shadow Hand είναι αισθητήρες επίδρασης Hall με 0,2 μοίρες απόκλισης ανάλυσης. Ένας ADC 12 bit χρησιμοποιείται για τη δειγματοληψία των δεδομένων που προέρχονται από τους αισθητήρες και στη συνέχεια μεταδίδονται στο CANbus (Controller Area Network BUS), μια διεπαφή μεταξύ του συστήματος του χεριού και του εξωτερικού κόσμου. Αισθητήρες πίεσης, τοποθετημένοι απευθείας στην πολλαπλή βαλβίδα, είναι αισθητήρες πίεσης στερεάς κατάστασης που μετρούν την πίεση σε κάθε μυ με ανάλυση 12 bit σε εύρος από 0 έως 4 bar.

Ενεργοποιητές

Σαράντα μύες Shadow Air τοποθετημένοι στο αντιβράχιο και συνδέονται με τις αρθρώσεις με τένοντες, χρησιμοποιούνται για την κίνηση του Shadow Χέρι. Οι πνευματικές βαλβίδες για κάθε μυ κινούνται από ενσωματωμένα ηλεκτρονικά συστήματα στη βάση του χεριού, που διαχειρίζονται επίσης τους αντίστοιχους αισθητήρες πίεσης των μυών. Κάθε μυς συμπεριφέρεται με τρόπο παρόμοιο με ένα βιολογικό μυ, συστέλλοντας έως και 40% του αρχικού του μήκους όταν ενεργοποιείται με πεπιεσμένο αέρα και παρέχει μια δύναμη που μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού συστολής. [21]

6^ο Ιστορικό και συναφείς εργασίες

6.1 Τρισδιάστατη εκτύπωση και αρχιτεκτονική χεριών

Οι περισσότεροι ερευνητές που στοχεύουν στην τρισδιάστατη εκτύπωση ανθρωποειδών χεριών παρακινούνται από την ικανότητα της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης που επιτρέπει την εκτύπωση του χεριού χωρίς καμία μορφή συναρμολόγησης. Η ομάδα του Pizarro [22] Haridra Gazzela, Bhagyashree Shirkar, Neetu Yadav, Nutan Malekar, (2021), *Prosthetic Arm for Amputees, VIVA-Tech International Journal for Research and Innovation*, 1 (4), 1-6, έχει κάνει ένα έργο για τον σχεδιασμό ενός τρισδιάστατου μοντέλου ενός ανθρωποειδούς χεριού που απαιτεί καμία συναρμολόγηση. Χρησιμοποίησαν έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή Objet Connex350, ο οποίος χρησιμοποιεί την τρισδιάστατη εκτύπωση πολλαπλών υλικών PolyJet τεχνολογία. Πρόκειται για μια μορφή διαδικασίας προσθετικής κατασκευής που χρησιμοποιεί ένα πολυμερές με δυνατότητα σκλήρυνσης με υπεριώδη ακτινοβολία, το οποίο σκληρύνεται με κάθε πέρασμα της εκτύπωσης. Δεδομένου ότι ο εκτυπωτής επιτρέπει την εκτύπωση πολλαπλών υλικών, τόσο το "οστό" όσο και το "δέρμα" του χεριού μπορούν να εκτυπωθούν χρησιμοποιώντας την άκαμπτη ρητίνη VeroWhitePlus και τη ρητίνη TangoBlack που μοιάζει με καουτσούκ.



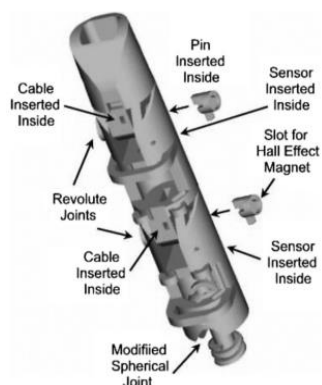
Εικόνα 23: Σχέδιο του χεριού της ομάδας του Pizarro, που δείχνει το δέρμα (μαύρο) και την εκτεθειμένη δομή των οστών (λευκό).

Μια βιβλιογραφική αναζήτηση αποκάλυψε επίσης σχετικές έρευνες σχετικά με την τρισδιάστατη εκτύπωση διαφόρων τύπων αρθρώσεων χωρίς συναρμολόγηση για το ανθρώπινο χέρι και άλλα αρθρωτά μοντέλα. Η έρευνα του Cal`i [23] Cal`i, J., Calian, D., A., Amati, C., Kleinberger, R., Steed, A., Kautz, J., Weyrich, T., (2012), 3d-printing of non-assembly articulated models, *ACM Transactions on Graphics*, 31, 130:1–130:8, διερευνά μεθόδους

μετατροπής στατικών πλεγμάτων μοντέλων σε τρισδιάστατα εκτυπώσιμα αρθρωτά μοντέλα που δεν απαιτούν συναρμολόγηση. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή βρέθηκε να είναι χρήσιμη μόνο για μοντέλα που "ποζάρουν", όπως φαίνεται στην εικόνα 26.



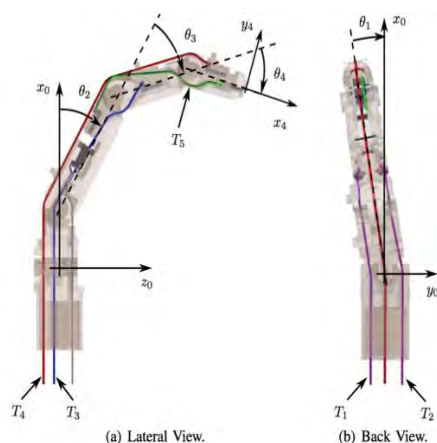
Εικόνα 24: Στατικό σε αρθρωτό μοντέλο χεριού χρησιμοποιώντας τη μέθοδο μετασχηματισμού του Cal'i.



Εικόνα 25: Το μοντέλο χεριού του De Laurentis που δείχνει αρθρώσεις που δεν είναι συναρμολογημένες και σημεία για ενσωματωμένα εξαρτήματα εισαγωγή.

Το άρθρο του De Laurentis **[24]** De Laurentis, K., J., Mavroidis, C., (2004) Rapid fabrication of a non-assembly robotic hand with embedded components, *Assembly Automation*, 24 (4), 394–405, διερευνά τον τρόπο με τον οποίο να σχεδιάσετε τρισδιάστατα εκτυπώσιμα μοντέλα πιο άμεσα. Ωστόσο, αυτό το μοντέλο περιλαμβάνει υποδοχές για την εισαγωγή του φαινομένου hall-effect αισθητήρων, τη φόρτιση των ελατηρίων για την ένταση και την τοποθέτηση ενός καλωδίου για τη συστολή, όπως φαίνεται στην εικόνα 25. Μια πιο προσανατολισμένη προσέγγιση στον μηχανικό σχεδιασμό μπορεί επίσης να βρεθεί στην εργασία του Borghesan **[25]** Borghesan, G., Palli, G., Melchiorri, C., (2010) Design of tendon-driven robotic fingers: Modeling and control issues, in *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, Anchorage, AK., 3-8, 2010,

[https://kuleuven.limo.libis.be/discovery/fulldisplay?docid=lirias653415&context=SearchWebhook&vid=32KUL_KUL:Lirias&lang=en&search_scope=lirias_profile&adaptor=SearchWebhook&tab=LIRIAS&query=any,contains,LIRIAS653415&offset=0 ανακτήθηκε 13/02/2024]. Το μοντέλο του είναι πλήρες και απαιτεί πέντε τένοντες ανά δάχτυλο. Στην εικόνα 26 παρουσιάζεται το μοντέλο του.



Εικόνα 26: Σχέδιο χεριού της ομάδας του Borghesan, που δείχνει πώς κάθε καλώδιο τάσης ελέγχει την πλευρική ή την καμπύλωση κίνηση του δακτύλου.

Μπορείτε επίσης να βρείτε και άλλες προσπάθειες τρισδιάστατης εκτύπωσης υπολειπургικών χεριών - μικρότερος αριθμός ενεργοποιητών από τους βαθμούς ελευθερίας -. Η έρευνα του Raymond [24] περιλαμβάνει την τρισδιάστατη εκτύπωση ενός χεριού τεσσάρων δακτύλων με ένα μόνο ενεργοποιητή. Αυτή η λαβίδα με υπολειτουργία μπορεί να πιάσει μια μεγάλη ποικιλία γεωμετριών αντικειμένων. Ο σχεδιασμός του χεριού του Ραφαήλ [31] Deimel, R., Brock, O., A novel type of compliant, underactuated robotic hand for dexterous grasping, in *Proceedings of Robotics: Science and Systems*, Berkeley, USA, July 2014, χρησιμοποιεί ένα εύκαμπτο υλικό για να σχηματίσει ένα υποενεργοποιημένο ανθρωπόμορφο χέρι. Λόγω της εύκαμπτης παλάμης του σχεδιασμού, ο αντίχειρας αυτού του χεριού έχει τη δυνατότητα να αγγίζει τις άκρες και των άλλων τεσσάρων δακτύλων.

6.2 Σχετικά έργα για τα 3D εκτυπωμένα χέρια

Τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα σχέδια χεριών ανοικτού κώδικα είναι ευρέως διαθέσιμα λόγω του δυνητικού αντίκτυπού τους στην φθηνή προσθετική. Ο πιο αξιοσημείωτος σχεδιασμός είναι το χέρι Raptor [26] The raptor hand,

[<https://enablingthefuture.org/upper-limb-prosthetics/the-raptor-hand/>, ανακτήθηκε 13/02/2024] που αναπτύχθηκε από την e-NABLE και παρουσιάζεται στην εικόνα 27α. Αυτός ο σχεδιασμός χρησιμεύει ως στατική προσθετική που μπορεί να ενεργοποιηθεί από το αντιβράχιο του ακρωτηριασμένου. Μια παραλλαγή αυτού του σχεδιασμού, που αναπτύχθηκε επίσης από την e-NABLE, ονομάζεται Flexy Hand [27] The flexy hand and flexy hand 2, [<https://enablingthefuture.org/upper-limb-prosthetics/the-flexy-hand/>, ανακτήθηκε 13/02/2024] και παρουσιάζεται στην εικόνα 27β. Αυτό το χέρι χρησιμοποιεί εύκαμπτους μεντεσέδες που αποσύρονται όταν ο μυς του αντιβραχίου χαλαρώνει, εξαλείφοντας την ανάγκη για εύκαμπτες χορδές. Άλλα τρισδιάστατα εκτυπώσιμα σχέδια ενεργού προσθετικής περιλαμβάνουν ένα που αναπτύχθηκε από το πρόγραμμα Open Hand [28] Open hand project, [<https://inmoov.fr/inmoov-prosthetic-hand-almost-ready/>, ανακτήθηκε 13/02/2024]. Πρόκειται για ένα συμπαγές σχέδιο που χρησιμοποιεί μικρούς κινητήρες συνεχούς ρεύματος ως ενεργοποιητές, το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 27γ. Ένας λιγότερο συμπαγής σχεδιασμός που χρησιμοποιεί σερβοκινητήρες έχει αναπτυχθεί ως σχέδιο ανθρωποειδούς ρομποτικού συστήματος με την ονομασία InMoov Project [29] Open hand project, [<https://inmoov.fr/inmoov-prosthetic-hand-almost-ready/>, ανακτήθηκε 13/02/2024], όπως φαίνεται στο Σχήμα 27δ. Μια παραλλαγή του σχεδιασμού του χεριού του InMoov Project, η οποία επιτρέπει περισσότερους βαθμούς ελευθερίας, έχει επίσης αναπτύχθηκε από μια εταιρεία με το όνομα Looqui. Λεπτομερής συζήτηση σχετικά με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα καθενός από αυτά μπορεί να βρεθεί στην ενότητα 5.



α) Σχεδιασμός Raptor Hand με εύκαμπτες χορδές



β) Flexy Hand design without flexible chords



γ) Ο συμπαγής σχεδιασμός του Open Hand Project που χρησιμοποιεί DC Κινητήρες



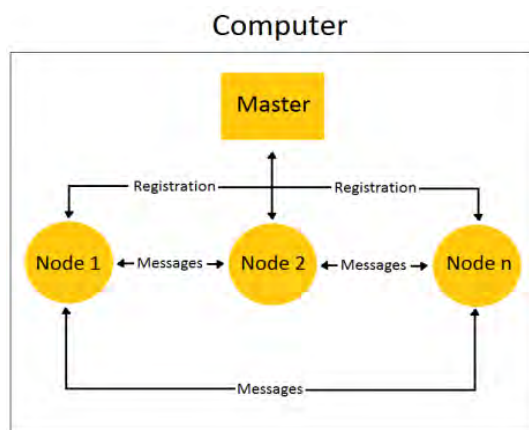
δ) Συναρμολογημένο χέρι του 3D εκτυπώσιμου ανθρωποειδούς της InMoov Ρομπωτικό έργο

Εικόνα 27: Σχήματα τρισδιάστατων μοντέλων χεριών ανοικτού κώδικα.

6.3 Ρομπωτικό λειτουργικό σύστημα (ROS)

Το Robot Operating System (ROS) είναι ένα πλαίσιο ανοικτού κώδικα για τη συγγραφή λογισμικού ρομπότ. Όπως αναφέρεται στο Quigley [30] Quigley, M., Conley, K., Gerkey, B., Faust, J., Foote, T., Leibs, J., Wheeler, R., Ng, N., A., Ros: an opensource robot operating system, *in ICRA workshop on open source software*, 3, 5, 2009. Το ROS δεν είναι ένα λειτουργικό σύστημα με την παραδοσιακή έννοια της διαχείρισης διαδικασιών και μάλλον, παρέχει ένα δομημένο επίπεδο επικοινωνίας πάνω από τα λειτουργικά συστήματα υποδοχής μιας ετερογενούς υπολογιστικής συστάδας. Το έγγραφο περιγράφει επίσης λεπτομερώς τους στόχους του ROS, την υλοποίηση και διάφορες κοινές περιπτώσεις χρήσης της ανάπτυξης ρομπωτικού λογισμικού. Ακολουθεί μια σύντομη επισκόπηση του ROS. Με την αύξηση της κλίμακας και του πεδίου εφαρμογής της ρομπωτικής, η συγγραφή λογισμικού για ρομπότ γίνεται όλο και πιο δύσκολη. Δεδομένου ότι η υλοποίηση τέτοιων

πολύπλοκων επιπέδων λογισμικού (τα οποία μπορεί να περιέχουν λογισμικά επιπέδου οδηγού για τα ανώτερου επιπέδου λογισμικά για αντίληψη, σχεδιασμό, αφηρημένη σκέψη και πέραν αυτού) είναι ένα δύσκολο έργο για το ένα μεμονωμένο άτομο, εργαστήριο ή ίδρυμα, το ROS δημιουργήθηκε από την αρχή για να ενθαρρύνει τη συνεργατική ανάπτυξη λογισμικού ρομποτικής. Αυτό επιτρέπει σε ειδικούς από ένα εργαστήριο, οι οποίοι είναι εξειδικευμένοι σε χαρτογράφηση εσωτερικών περιβαλλόντων, να συνεισφέρουν ένα σύστημα παγκόσμιας κλάσης για την παραγωγή χαρτών, ενώ ειδικοί από άλλο εργαστήριο που αναπτύσσουν αλγόριθμους σχεδιασμού να κάνουν χρήση του ίδιου λογισμικού χαρτογράφησης. Οι τομείς του ROS που αναπτύχθηκαν το 2007, περιλαμβάνουν πλέον έναν κύριο κόμβο συντονισμού, τη δημοσίευση ή τη συνδρομή σε ροές δεδομένων: εικόνες, στερεοφωνικά, λέιζερ, έλεγχος, ενεργοποίηση, επαφή κ.λπ., πολυπλεξία πληροφοριών, δημιουργία κόμβων και καταστροφή, και όχι μόνο. Τα ευρέως χρησιμοποιούμενα πακέτα ROS περιλαμβάνουν την αντίληψη, την αναγνώριση προσώπου, τη χειρονομία αναγνώριση, παρακολούθηση κίνησης, κινητή ρομποτική και πολλά άλλα.



Εικόνα 28: Ένα μπλοκ διάγραμμα που δείχνει πώς λειτουργούν οι κόμβοι και τα μηνύματα στο ROS.

Η εικόνα 28 δείχνει πώς λειτουργούν οι κόμβοι και τα μηνύματα μέσα στο ROS. Το ROS Master παρέχει ονοματοδοσία και υπηρεσίες εγγραφής στους υπόλοιπους κόμβους του συστήματος ROS. Παρακολουθεί τους εκδότες και τους συνδρομητές σε θέματα. Ο ρόλος του Master είναι να επιτρέπει στους μεμονωμένους κόμβους ROS να εντοπίζουν ο ένας τον άλλον. Ένας κόμβος είναι ουσιαστικά ένα εκτελέσιμο αρχείο μέσα σε ένα πακέτο ROS. Οι κόμβοι

ROS χρησιμοποιούν μια βιβλιοθήκη-πελάτη ROS για να επικοινωνούν με άλλους κόμβους. Οι κόμβοι μπορούν να δημοσιεύσουν ή να εγγραφούν σε ένα θέμα. Τα θέματα είναι ονοματοδοτημένοι δίαυλοι μέσω των οποίων οι κόμβοι ανταλλάσσουν μηνύματα. Τα θέματα έχουν ανώνυμη σημασιολογία δημοσίευσης/εγγραφής, η οποία αποσυνδέει την παραγωγή πληροφοριών από την κατανάλωσή τους. Γενικά, οι κόμβοι δεν γνωρίζουν με ποιον επικοινωνούν. Οι κόμβοι επικοινωνούν μεταξύ τους δημοσιεύοντας μηνύματα σε θέματα. Ένα μήνυμα είναι μια απλή δομή δεδομένων, που αποτελείται από τυποποιημένα πεδία. Υποστηρίζονται οι τυπικοί πρωτογενείς τύποι (ακέραιος, κινητής υποδιαστολής, boolean, κ.λπ.), καθώς και πίνακες πρωτογενών τύπων. Η συνάφεια του ROS με το έργο ρομποτικό χέρι προκύπτει από τους στόχους του έργου: αρθρωτότητα και ευκολία του ελέγχου. Το ρομποτικό χέρι στοχεύει να χρησιμεύσει ως αρθρωτό στοιχείο: μπορεί να λειτουργήσει ως αυτόνομο σύστημα ή ως εξάρτημα ενός πιο σύνθετου ρομποτικού συστήματος. Η λειτουργία του ρομποτικού χεριού ως ROS κόμβος θα επιτρέψει την εύκολη ενσωμάτωση του χεριού σε ένα μεγαλύτερο ρομποτικό σύστημα που εκτελεί επίσης ROS.

6.4 Δομή

Τα διάφορα μοντέλα σχεδιασμού CAD συζητήθηκαν στην ενότητα 6.1 και 6.2. Ο πίνακας 5 αναλύει λεπτομερώς τα οφέλη και τα μειονεκτήματα κάθε μοντέλου. Στο παρόν έργο επιλέχθηκε ο σχεδιασμός του χεριού του έργου InMoov.

Πίνακας 5: Εναλλακτικές λύσεις δομικού σχεδιασμού μεταξύ των μοντέλων CAD, περιγράφοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των κάθε μοντέλων.

Μοντέλο χεριού από Pizarro	Τεχνολογία που απαιτείται για τέτοια εκτύπωση πολλαπλών υλικών είναι διαθέσιμη. Απαιτεί μικρή συναρμολόγηση.	Το μοντέλο σχεδιασμού δεν είναι άμεσα διαθέσιμο. Μπορεί να μην επιτρέπει την τοποθέτηση καλωδίων εφελκυσμού.
Μέθοδος σχεδιασμού από την έρευνα του Cal'i	Απλό και διαισθητικό μοντέλο. Πολύ ζωντανό.	Απαιτεί χρόνο για την εκμάθηση του λογισμικού. Επιτρέπει την μόνο την πόζα των μοντέλων. Οι κινήσεις των χεριών είναι χειροκίνητες.
Κατασκευή μέθοδος από την De Laurentis'	Καλά καθορισμένες αρθρώσεις που απαιτούν μικρή συναρμολόγηση.	Το μοντέλο απαιτεί αρθρώσεις με ελατήριο. Περιλαμβάνει περιττά εξαρτήματα υλικού (αισθητήρες φαινομένου αίθουσας). Σχέδια που δεν είναι εύκολα διαθέσιμα.
Σχέδιο του χεριού του Ραφαήλ	Πολύ ευέλικτο και λειτουργικό. Μπορεί να εκτελεί ποικιλία	Δεν πληροί την απαιτούμενη απαίτηση δύναμης.

	χειρονομιών.	
Χέρι αρπαχτής και ευέλικτο χέρι	Απλή συναρμολόγηση. Απαιτούν λίγο 3D εκτύπωση.	Δεν είναι κατάλληλα ως ενεργά προσθετικά.
Έργο Open Hand	Πολύ συμπαγές. Σε φυσικό μέγεθος. Χαμηλό κόστος.	Αργός χρόνος απόκρισης. Μοντέλα που δεν συναρμολογούνται εύκολα. Δεν υποστηρίζει απτική αίσθηση.
Έργο InMoove σχεδιασμός	Σε φυσικό μέγεθος. Χαμηλό κόστος. Ανεξάρτητη κίνηση των δακτύλων. Υποστήριξη απτικής αντίχνευση. Εύκολα διαθέσιμα μοντέλα.	Απαιτούν εκτεταμένη συναρμολόγηση.
Σχεδιασμός του Looqui	Σε φυσικό μέγεθος. Χαμηλό κόστος. Ανεξάρτητη κίνηση των δακτύλων. Υποστήριξη απτικής αντίχνευση. Υποστήριξη διασταυρούμενων δακτύλων.	Απαιτούν εκτεταμένη συναρμολόγηση. Μοντέλα που δεν είναι εύκολα διαθέσιμα.

7^ο Προκαταρκτικός προτεινόμενος σχεδιασμός

7.1 Δομή

Για τη δομή του χεριού, διαπιστώσαμε ότι είναι καταλληλότερο να χρησιμοποιήσουμε το σχέδιο μοντέλου CAD από το InMoov Project. Τα Raptor hand και Flexy hand δεν ταιριάζουν στις απαιτήσεις μας, καθώς δεν επιτρέπουν την ανεξάρτητη χρήση των δακτύλων ελέγχου. Παρόλο που τα σχέδια μοντέλων CAD που παρουσιάζονται από το Open Hand Project ταιριάζουν στη χρήση μας, δεδομένου ότι χρησιμοποιεί κινητήρες συνεχούς ρεύματος, καθιστά δύσκολο τον ακριβή έλεγχο της θέσης του χεριού χωρίς κωδικοποιητές. Δεδομένου ότι ο σχεδιασμός για το Open Hand Project είναι τόσο συμπαγής που δεν επιτρέπει την προσθήκη αισθητήρων δύναμης ή κωδικοποιητών, δεν θα πληροί τις απαιτήσεις του σχεδιασμού μας. Από την άλλη πλευρά, ο σχεδιασμός του έργου Looqui περιέχει περιττές λειτουργικότητες, όπως η δυνατότητα διασταύρωσης των δακτύλων, τις οποίες δεν χρειαζόμαστε. Επιπλέον, το σχέδιο για τα μοντέλα δεν ήταν ανοικτού κώδικα. Το έργο InMoov, από την άλλη πλευρά, επιτρέπει την ανεξάρτητη κίνηση των δακτύλων έχοντας κάθε δάκτυλο να οδηγείται με ξεχωριστό τένοντα για τη σύσπαση και την έκταση. Επιπλέον, δεδομένου ότι κάνει χρήση σερβοκινητήρων και επιτρέπει την προσάρτηση αισθητήρων, παρέχει ευκολία στον έλεγχο της θέσης του χεριού καθώς και της δύναμης που ασκείται. Παρόλο που τα δάχτυλα δεν επιτρέπουν την πλευρική κίνηση, επιτρέπουν την εκτέλεση του απαιτούμενου συνόλου χειρονομιών. Το μόνο μειονέκτημα αυτού του σχεδιασμού είναι ότι το χέρι γίνεται αρκετά βαρύ λόγω της χρήσης πολλαπλών σερβομηχανισμών στο εσωτερικό του αντιβραχίονα.

7.2 Ηλεκτρικά στοιχεία

7.2.1 Μικροελεγκτές-Arduino

Ένας μικροελεγκτής αποτελεί ένα «ολοκληρωμένο» μικρό υπολογιστή, αφού εκτός από τη δυνατότητα εκτέλεσης εντολών διαθέτει εσωτερική μνήμη για τα προγράμματα, εισόδους/εξόδους για ανταλλαγή σημάτων κλπ. Ένα βασικό χαρακτηριστικό των μικροελεγκτών είναι η δυνατότητα τους να αλληλεπιδρούν με το φυσικό κόσμο με τρόπους που ένας τυπικός προσωπικός υπολογιστής

δεν μπορεί. Οι μικροελεγκτές παίρνουν πληροφορίες απο το φυσικό περιβάλλον μέσα απο αισθητήρες και διακόπτες , και μπορούν να ελέγχουν φυσικά αντικείμενα όπως led, μοτέρ κλπ. Υπάρχει μεγάλος αριθμός εφαρμογών που βασίζονται σε προσαρμοσμένα κυκλώματα που χρησιμοποιούν μικροελεγκτές.[32] Πογαρίδης Δ., Ενσωματωμένα Συστήματα, οι Μικροελεγκτές AVR και ARDUINO, (2015), *Εκδόσεις Δισίγμα*.

Μερικές εφαρμογές είναι:

- 1) Βιομηχανικός έλεγχος
- 2) Προστασία και παρακολούθηση περιβάλλοντος με δίκτυα αισθητήρων
- 3) Συστήματα αυτόματων συναλλαγών
- 4) Μουσικά εφέ και επεξεργασία ήχου
- 5) Παιχνιδομηχανές

Το Arduino δημιουργήθηκε απο έναν φοιτητή στην Ιταλία το 2003. Στα πλαίσια μιας εργασίας ανέπτυξε το Wiring project. Το project αυτό ήταν η ανάπτυξη ενός απλού συστήματος βασισμένου σε μικροελεγκτή που να προσφέρεται για γρήγορη και εύκολη ανάπτυξη εφαρμογών. Έτσι το Arduino αποτέλεσε το καλύτερο ξεκίνημα για φοιτητές και μηχανικούς. Έτσι λοιπόν το Arduino είναι μια πλατφόρμα ανάπτυξης έργων, ανοιχτού κώδικα. Η πλατφόρμα περιλαμβάνει μια απλή πλακέτα μικροελεγκτή μαζί με ένα περιβάλλον ανάπτυξης προγραμμάτων για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή. Το Arduino χρησιμοποιεί μικροελεγκτές Atmel AVR και η γλώσσα προγραμματισμού ονομάζεται Wiring C, η οποία αποτελεί παραλλαγή της γλώσσας C++, ενώ μέσα απο την προσθήκη βιβλιοθηκών υποστηρίζονται περισσότερες λειτουργίες και δυνατότητες. Συμπερασματικά, η πλατφόρμα Arduino αποτελεί ιδανική λύση για ρομποτικές κατασκευές και καλύπτει ένα μεγάλο φάσμα απαιτήσεων που εκτείνονται κατά τη προετοιμασία μιας ρομποτικής κατασκευής. Η πλατφόρμα Arduino είναι ανοιχτής αρχιτεκτονικής, που σημαίνει ότι είναι ελεύθερα διαθέσιμα όλα τα σχέδια κατασκευής με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η αναπαραγωγή και αξιοποίηση της απο κάθε ενδιαφερόμενο.

Υπάρχουν πολλές εκδόσεις και παραλλαγές του Arduino. Κάθε board υποστηρίζει συγκεκριμένο τύπο μικροελεγκτή και διαθέτει ένα σύνολο ακροδεκτών για είσοδο και έξοδο. Οι ακροδέκτες μπορούν να χωριστούν σε ακροδέκτες εισόδου/εξόδου και ακροδέκτες που σχετίζονται με την τροφοδοσία. Το Arduino διαβάζει αναλογικά σήματα από 0 έως 5V καθώς και ψηφιακά 0 ή 5V. Οι έξοδοι υποστηρίζουν μόνο ψηφιακά σήματα. Επιπλέον το Arduino μπορεί να προσφέρει τροφοδοσία σε εξωτερικές συσκευές (π.χ αισθητήρες) στα 3.3 ή 5V, ενώ δε μπορεί να δώσει στις εξόδους μεγαλύτερο ρεύμα από 30-40 mA. [8]

Οι πιο δημοφιλείς εκδόσεις του Arduino είναι οι εξής:

- Arduino Uno
- Arduino Mega 2560
- Arduino Nano
- Arduino Lilypad
- Arduino Robot
- Arduino Esplora
- Arduino Intel Galileo

Επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε το Arduino Uno ως μικροελεγκτή. Επιτρέπει έξι εξόδους PWM, μία για κάθε πέντε δάχτυλα και μία για τον καρπό. Επιτρέπει έξι αναλογικές εισόδους, ίσα ίσα για πέντε αισθητήρες δύναμης. Επιπλέον, δεδομένου ότι το Arduino είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη πλατφόρμα ανάπτυξης, υπάρχουν διαθέσιμες βιβλιοθήκες για επικοινωνία με το ROS, συγκεκριμένα μέσω της σειριακής βιβλιοθήκης ROS. Αυτό επιτρέπει την εύκολη επικοινωνία με άλλα ρομποτικά εξαρτήματα που εκτελούν ROS. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μπορεί επίσης να γίνει αναβάθμιση σε Raspberry Pi, εάν μπορεί να προσαρμοστεί στο χρονικό πλαίσιο του έργου. Ωστόσο, δεδομένου ότι το RaspberryPi επιτρέπει μόνο ένα PWM GPIO, ένας εξωτερικός οδηγός PWM θα πρέπει να αγοραστεί για την πολυπλεξία μεταξύ των σερβομηχανισμών. Δεδομένου ότι το ROS μπορεί να τρέξει άμεσα στο Raspbian (Debian παραλλαγή του Linus για το Raspberry Pi), δεν θα χρειαστεί να υπάρχουν βιβλιοθήκες για να καταστεί δυνατή η επικοινωνία.

7.2.2 Κινητήρες

Δεδομένου ότι επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε το σχέδιο του χεριού InMoov, θα κάνουμε επιλογές μεταξύ των σερβοκινητήρων. Πέντε πανομοιότυποι σερβοκινητήρες απαιτούνται για τα δάχτυλα και ένας για τον καρπό. Δεδομένου ότι διαπιστώσαμε ότι το εύρος κίνησης κάθε δακτύλου μπορεί να επιτευχθεί με σερβομηχανές 90 μοιρών, επιλέξαμε σερβομηχανές HK15298, οι οποίες επιτρέπουν μέγιστη ροπή 15 kg-cm (208 oz-in) στα 7,6V. Δεδομένου ότι θέλουμε ο καρπός μας να μπορεί να περιστρέφεται κατά 180 μοίρες, έχουμε επιλέξουμε το MG646R που επιτρέπει μέγιστη ροπή 12 kg-cm (166 oz-in) στα 6V. Προκειμένου οι τένοντες να είναι σε θέση να αντέξουν τη ροπή που ασκείται από τους κινητήρες, επιλέγονται επίσης να έχουν μέγιστο 22 kg αντοχή σε εφελκυσμό. Εξετάστηκαν διάφοροι τύποι τενόντων: επιλέχθηκε το πλεγμένο χαλύβδινο καλώδιο έναντι πετονιάς επειδή δεν τεντώνεται όταν πιέζεται.

7.2.3 Αισθητήρες

Από τις τρεις διαθέσιμες επιλογές αισθητήρων που διερευνήθηκαν, αποφασίσαμε ότι οι αισθητήρες αντίστασης μικρής δύναμης από το SparkFun και οι αισθητήρες DIY θα ήταν αυτοί που θα δοκιμάζονταν. Ο κύριος λόγος πίσω από τον αποκλεισμό του αισθητήρα Flexy οφείλεται στην τιμή του. Δεδομένου ότι το κόστος είναι μία από τις απαιτήσεις του σχεδιασμού, η χρήση Flexy δεν θα ικανοποιούσε την απαίτηση του σχεδιασμού. Ο αισθητήρας DIY έχει δοκιμαστεί για να δώσει μέγιστη αντίσταση 125kΩ για μηδενική δύναμη και την ελάχιστη αντίσταση 35kΩ για μέγιστη δύναμη. Παρόλο που το μέγεθος αυτών των αισθητήρων DIY είναι μικρό και μπορεί εύκολα να χωρέσει στο μοντέλο μας, ο χρόνος απόκρισης αυτών των αισθητήρων είναι πραγματικά αργός, γεγονός που δεν τον καθιστά ιδανική επιλογή. Έτσι, αναζητούμε την άλλη επιλογή της δοκιμής των μικρών αντιστάσεων δύναμης αισθητήρων από την SparkFun. Εάν μπορούμε να προσαρτήσουμε αυτούς τους αισθητήρες στο μοντέλο χωρίς να επηρεάσουμε τη λειτουργικότητά του, θα επιλέξουμε αυτούς τους αισθητήρες.

7.3 Επιλογές λογισμικού

7.3.1 Προσομοίωση ελέγχου κλειστού βρόχου

Για να χρησιμοποιήσουμε τα κατάλληλα κέρδη για το σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου, θα πρέπει πρώτα να προσομοιώσουμε το σύστημα. Το simulink του MATLAB προσφέρει εργαλεία για την προσομοίωση και τον υπολογισμό των απαιτούμενων κερδών για τον έλεγχο PID. Μετά από τη διεύθυνση τον υπολογισμό του χρόνου απόκρισης του αισθητήρα της επιλογής μας, θα τον προσομοιώσουμε στο MATLAB και θα υπολογίσουμε τα επιθυμητά κέρδη για τα αντικείμενα δοκιμής (πρότυπο κυλινδρικό βάρος 200 g). Στη συνέχεια, θα πραγματοποιηθούν διάφορες δοκιμές σε άλλα αντικείμενα για να δούμε αν απαιτείται παραλλαγή στις τιμές των κερδών.

7.3.2 Υπηρεσία ROS και πέρασμα μηνυμάτων

Για να διευκολύνουμε την ενσωμάτωση του ROS, αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε τον τύπο `rosmmsg` για τη δημοσίευση των μηνυμάτων "fingerPos" τα οποία περιέχουν έναν πίνακα με τη θέση κάθε δακτύλου σε `uint8` από 0 έως 90 (για τα δάκτυλα) και 0 έως 180 (για τον καρπό). Αυτός θα είναι επίσης ο τύπος δεδομένων των μηνυμάτων που μετατρέπονται από τις εντολές του χρήστη που το χέρι θα εγγραφεί. Στόχος μας ήταν επίσης να υλοποιήσουμε `rosservices` για τους αισθητήρες δύναμης, που θα επιτρέπουν άλλους κόμβους να γνωρίζουν ότι ένας από τους αισθητήρες έχει χτυπήσει το κατώφλι δύναμης.

7.3.3 ROSserial

Δεδομένου ότι η σειριακή επικοινωνία υποστηρίζεται εύκολα από τον μικροελεγκτή μας, αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε το ROSserial ως μέσο επικοινωνίας μεταξύ του μικροελεγκτή και του υπολογιστή που εκτελεί το ROS. Πρόκειται για ένα πακέτο γραμμένο σε χαμηλού επιπέδου κώδικα C που δημιουργεί έναν αυτόνομο κόμβο ROS για σειριακή επικοινωνία. Αυτό θα επιτρέψει τη δημοσίευση και την εγγραφή `rosmmsg` από και προς τον μικροελεγκτή και τον υπολογιστή.

7.3.4 Οδηγός ROS-MYO

Εφόσον αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε τον ελεγκτή MYO για την αποστολή εντολών ελέγχου μέσω του ROS, χρειαζόμαστε έναν οδηγό υποστήριξης για τον MYO. Ευτυχώς, οι υπάρχοντες οδηγοί ROS-MYO έχουν γίνει ανοικτού κώδικα και είναι διαθέσιμοι στο διαδίκτυο. Δεδομένου ότι ο ελεγκτής MYO διαθέτει αισθητήρες όχι μόνο για ηλεκτρομυογραφικά σήματα, αλλά και για γυροσκοπικά σήματα, έπρεπε να γίνουν προσαρμογές ώστε να μεταφράζονται μόνο τα σχετικά μηνύματα σε εντολές.

8^ο Τελικός σχεδιασμός και υλοποίηση

8.1 Δομή και συναρμολόγηση

Όπως αναφέρεται στην ενότητα 7.1, το προτεινόμενο τρισδιάστατο μοντέλο CAD του χεριού από το έργο InMoov υλοποιήθηκε με μικρές παραλλαγές. Η παλάμη και τα δάχτυλα του μοντέλου CAD περιέχουν εσωτερικά κανάλια που επιτρέπουν την ομαλή διέλευση των καλωδίων τάνυσης. Δεδομένου ότι οι διαστάσεις αυτών των καναλιών επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό όταν εκτυπώνονται στους MakerBot Replicators, η παλάμη και τα δάχτυλα εκτυπώθηκαν με τη χρήση του Connex 500 Stratasys εκτυπωτή, ο οποίος παρέχει υψηλή ανάλυση. Το αντιβραχιόνιο και ο καρπός εκτυπώθηκαν με τη χρήση του MakerBot, δεδομένου ότι μπορεί να ανεχθεί τις ανακρίβειες που προκύπτουν από την εκτύπωση. Στην εικόνα 29, φαίνεται ότι το λευκό χρώμα προέκυψε από τον Stratasys εκτύπωση και η εκτύπωση μαύρου χρώματος από τον MakerBot. Μια άλλη αλλαγή από τον προτεινόμενο προκαταρκτικό σχεδιασμό είναι τα καλώδια τάσης. Τα πλεγμένα χαλύβδινα καλώδια προτάθηκαν ως καλώδια τάνυσης στον προκαταρκτικό σχεδιασμό, δεδομένου ότι δεν τεντώνονται υπό τάση. Ωστόσο, κατά τη συναρμολόγηση, διαπιστώθηκε ότι τα χαλύβδινα καλώδια απαιτούν εξειδικευμένα εργαλεία για να μπορέσουν να περάσουν στα δάχτυλα και τις τροχαλίες, καθιστώντας την επιλογή αυτή εξαιρετικά άβολη. Πλεγμένες πετονιές ψαρέματος παρόμοιας αντοχής, αλλά μικρότερης διαμέτρου, ήταν εύκολο να περαστεί με σπείρωμα. Το αντιστάθμισμα ήταν η ανθεκτικότητα των καλωδίων τάνυσης, δεδομένου ότι η πετονιά μπορεί εύκολα να σκιστεί μετά από επανειλημμένη τριβή. Οι τροχαλίες που συνοδεύουν το αρχικό μοντέλο αλλάζουν επίσης. Ο λόγος είναι επειδή υπάρχει μια αξιοσημείωτη διαφορά στο μήκος της διαδρομής του καλωδίου τάνυσης μεταξύ της έκτασης και της συστολής του δακτύλου. Η κίνηση συστολής απαιτεί μεγαλύτερο μήκος νήματος από την έκταση, αφήνοντας έτσι το καλώδιο τάσης χαλαρό μεταξύ κινήσεις. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η χρήση της τροχαλίας με δύο διαφορετικές διαμέτρους αντί για μια απλής τροχαλίας (όπως φαίνεται στην εικόνα 29). Οι τροχαλίες με διπλή ράγα εκτυπώθηκαν τρισδιάστατα και δοκιμάστηκαν για να αποδώσουν καλύτερα από την τροχαλία μονής ράγας



Εικόνα 29: Άνω όψη του συναρμολογημένου χεριού με τον αντιβραχίονα ανοιχτό, όπου φαίνονται τα σερβομηχανήματα στο εσωτερικό του.

Η τελευταία προσαρμογή του υλικού, που σχετίζεται με την επιλογή του αισθητήρα, που έγινε είναι η προσθήκη σιλικόνης των δακτύλων. Εξυπηρετούν τον διπλό σκοπό όχι μόνο της αύξησης της τριβής μεταξύ των άκρων των δακτύλων και του αντικειμένου που πιάνεται, αλλά και να περικλείουν τους αισθητήρες δύναμης στην άκρη των δακτύλων (όπως φαίνεται στην εικόνα 30β). Τα δάχτυλα σιλικόνης κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας το τρισδιάστατο εκτυπωμένο καλούπι που παρουσιάζεται στην εικόνα 30α.



α) 3D εκτυπωμένο καλούπι για τις άκρες των δακτύλων σιλικόνης, με δάχτυλο με άκρες στην θέση τους.



β) Τρισδιάστατο εκτυπωμένο άκρο δακτύλου αντίχειρα, εφοδιασμένο με άκρο δακτύλου σιλικόνης που περικλείει τον αισθητήρα δύναμης.

Εικόνα 30: Σχήματα του άκρου του δακτύλου σιλικόνης

8.2 Ηλεκτρικά εξαρτήματα

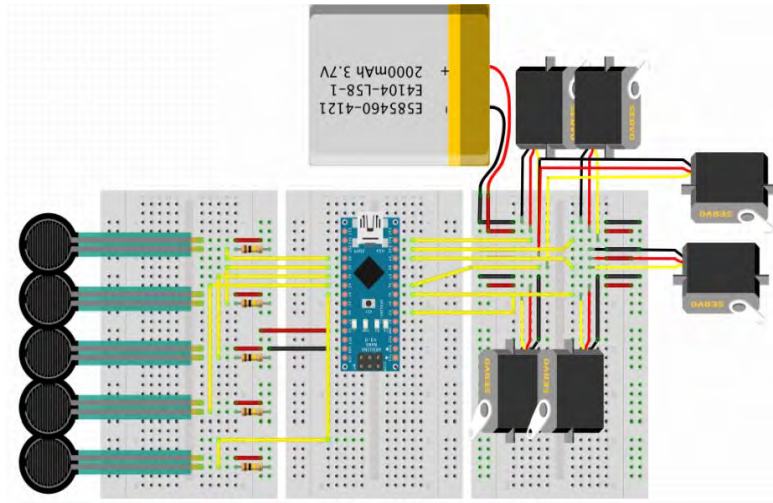
Στα ηλεκτρικά εξαρτήματα έγιναν ελάχιστες αλλαγές σε σχέση με τον προκαταρκτικό σχεδιασμό. Ένα Arduino Nano χρησιμοποιήθηκε αντί για Arduino UNO λόγω μεγέθους (και τα δύο έχουν την ίδια βασική λειτουργικότητα). Κατά τη δοκιμή του διαπιστώθηκε ότι οι σερβομηχανισμοί για τα δάχτυλα είναι επίσης σερβομηχανισμοί 180 μοιρών και όχι 90 μοιρών. Αυτό δεν επηρεάζει το σχεδιασμό. Για αισθητικούς λόγους, οι βραχύχρονες αντιστάσεις Force Sensitive Resistors (FSRs) της Pololu (που φαίνονται στην εικόνα 31) χρησιμοποιήθηκαν αντί των FSR μακράς ουράς της SparkFun (που φαίνονται στην εικόνα 30β).



Εικόνα 31: Short-tail FSR από Pololu citepololu-sensor.

8.2.1 Σχηματικά

Αφού συγκεντρωθούν όλα τα απαραίτητα στοιχεία του συστήματος, κάθε στοιχείο ελέγχεται ως προς τη λειτουργικότητά του πριν από την κατασκευή του πρωτοτύπου του συστήματος. Αφού πραγματοποιηθούν όλες οι προκαταρκτικές δοκιμές, ένα πρωτότυπο του συστήματος κατασκευάστηκε σύμφωνα με τα σχηματικά διαγράμματα που παρουσιάζονται στην εικόνα 33. Οι FSR είναι διατεταγμένοι ως διαιρέτες τάσης με μια αντίσταση 100kΩ. Η διαιρεμένη τάση από κάθε αισθητήρα συνδέεται στον ADC του Arduino. Το FSRs λαμβάνουν τροφοδοσία 5V που ρυθμίζεται από το Arduino. Δεδομένου ότι το ρεύμα που διαρρέει κάθε αισθητήρα είναι μόνο $\sim 0,05\text{mA}$ (και το Arduino μπορεί να τροφοδοτήσει 200mA), το κύκλωμα προστασίας δεν είναι απαραίτητο. Όλα τα σερβομηχανήματα μοιράζονται μια ξεχωριστή πηγή τροφοδοσίας που μπορεί να αποβάλλει 6A συνεχούς ρεύματος. Οι ακροδέκτες σήματος των σερβομηχανισμών είναι συνδεδεμένοι στους έξι ακροδέκτες PWM που διαθέτει το Arduino.



Εικόνα 32: Σχηματική απεικόνιση του πρωτοτύπου συστήματος ρομποτικού χεριού που σχεδιάστηκε με τη χρήση του Fritzing.

8.2.2 Βαθμονόμηση αισθητήρα

Οι αισθητήρες βαθμονομούνται χρησιμοποιώντας την πρότυπη μάζα 50 g. Η μάζα τοποθετείται στην περιοχή ανίχνευσης του FSR η οποία είναι τοποθετημένη επίπεδη. Για την ανάγνωση των τιμών του αισθητήρα με το βάρος της μάζας χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος κώδικας που εφαρμόζεται στον αισθητήρα. Στη συνέχεια, οι τιμές αποθηκεύονται και κανονικοποιούνται.

```
for pin in SENSOR_PINS:
```

```
    board.enable_analog_reporting(pin)
```

```
while 1:
```

```
    data = []
```

```
for pin in SENSOR_PINS:
```

```
    data.append(board.analog_read(pin))
```

```
print data
```

8.2.3 Βαθμονόμηση σερβομηχανημάτων

Κατά τη δοκιμή, διαπιστώθηκε ότι τα σερβομηχανήματα HK15298 δεν ανταποκρίνονται σε όλο το εύρος από 0 έως 180 μοίρες. Αντιθέτως, ανακαλύφθηκε ότι οι αισθητήρες ανταποκρίνονται μόνο σε τιμές PWM από 35

έως 145. Αυτές οι τιμές ήταν χρησιμοποιήθηκαν ως τα σκληρά κωδικοποιημένα εσωτερικά όρια για τα δάχτυλα. Για να υπολογιστούν οι τιμές, χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος κώδικας για τον προσδιορισμό αυτών των τιμών.

```
servo = input("Enter Servo: ")
```

```
board.servo_config(servo)
```

```
while 1:
```

```
pos = input("Enter a val: ")
```

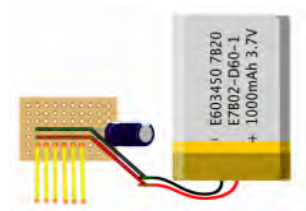
```
board.analog_write(servo,pos)
```

Ο χρήστης επιλέγει τον σερβομηχανισμό που θα βαθμονομηθεί και δοκιμάζει τις οριακές τιμές αυξάνοντας και μειώνοντας τη θέση. Το αποτέλεσμα είναι ένας πίνακας οριακών τιμών παρόμοιος με τον ακόλουθο:

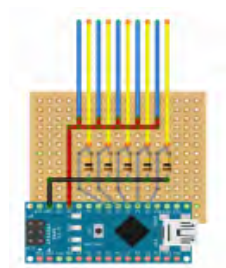
```
LIMITS = [(34,120),(34,140),(35,150),(35,150),(35,140),(0,180)]
```

8.2.4 Μεταφορά στο Perfboard

Αφού δοκιμαστεί και βαθμονομηθεί όλο το κύκλωμα στην πλακέτα, στη συνέχεια μεταφέρεται στην perfboard για μικροποίηση. Τα σχηματικά διαγράμματα για τα perfboards μπορείτε να τα δείτε στις εικόνες 33α και 33β.



α) Σχηματική αναπαράσταση του perfboard για σερβομηχανισμούς 3 ακίδων



β) Σχηματική αναπαράσταση της πλακέτας perfboard για αισθητήρες δύναμης FSR

Εικόνα 33: Σχηματική απεικόνιση σχεδίων perfboard σχεδιασμένων στο Fritzing.

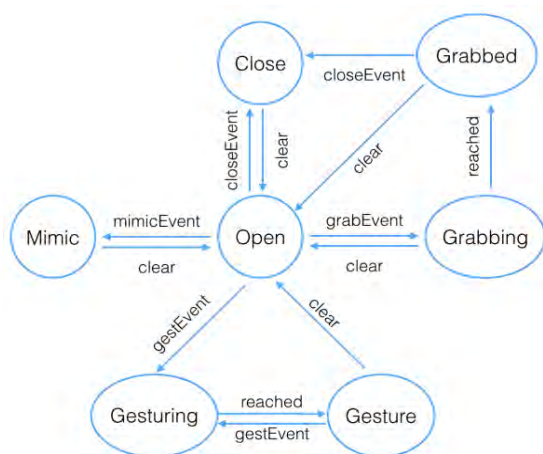
8.3 Σχεδιασμός λογισμικού

Στον τελικό σχεδιασμό του λογισμικού έγιναν πολλαπλές αλλαγές. Η κυριότερη αλλαγή μπορεί να γίνει αντιληπτή με το αλγόριθμο ελέγχου. Παρόλο που το έργο στόχευε στην υλοποίηση ενός πιο εξελιγμένου αλγορίθμου όπως ο PID, υλοποιήθηκε ένας πιο χονδροειδής αλγόριθμος ανίχνευσης κατωφλίου. Αυτό σημαίνει ότι οι προσομοιώσεις MATLAB για τον αλγόριθμο PID δεν χρειάστηκε να είναι όπως είχε προβλεφθεί στον προκαταρκτικό σχεδιασμό. Αρχικά, το λογισμικό για το χέρι σχεδιάστηκε μόνο να είναι μια απλή επικοινωνία εισόδου/εξόδου με τον μικροελεγκτή στο πλαίσιο ενός βρόχου ελέγχου, αργότερα αποφασίστηκε ότι το χέρι θα έπρεπε να υλοποιηθεί ως αυτόνομη μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων (όπως αναφέρεται στο υποτήμα 8.3.1). Η σειριακή επικοινωνία μεταξύ του ROS και του Arduino αποφασίστηκε να πραγματοποιείται με τη χρήση το πακέτο ROSserial, το οποίο επιτρέπει στο Arduino να είναι ένας αυτόνομος κόμβος ROS. Ωστόσο, αυτό σημαίνει ότι το λογισμικό χαμηλού επιπέδου πρέπει να γραφτεί χωριστά από τον κώδικα ελέγχου υψηλού επιπέδου του ROS.

8.3.1 Μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων

Στο σχήμα 1 παρουσιάζεται η σχεδιασμένη μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων με την κατάσταση ηρεμίας "Open". Από την κατάσταση "Open", εάν το χέρι λάβει ένα "mimicEvent", θα μεταβεί σε κατάσταση μίμησης και θα μιμηθεί χειρονομίες που εκτελούνται μέσω ενός χειριστή (MYO ή LeapMotion ή KeyBoard) από το ανθρώπινο χέρι. Εάν το χέρι λάβει ένα "gestEvent", θα μεταβεί σε κατάσταση "Gesturing", όπου θα περιμένει μια συγκεκριμένη χειρονομία που θα εκτελεστεί. Οι χειρονομίες είναι μια ακολουθία σκληρά κωδικοποιημένων τιμών των θέσεων σερβομηχανισμού που αποθηκεύονται από τη βιβλιοθήκη χειρονομιών. Μόλις εκτελεστεί η χειρονομία, ενεργοποιείται ένα συμβάν "reached", που φέρνει το χέρι σε κατάσταση "Χειρονομία", κατάσταση όπου στη συνέχεια θα δεχθεί την επόμενη χειρονομία με το επόμενο "gestEvent". Ομοίως, εάν το χέρι λάβει ένα "grabEvent", το χέρι θα μεταβεί σε κατάσταση "Αρπαγμα", όπου θα χρησιμοποιήσει τους αισθητήρες

στην άκρη του δακτύλου και θα αρπάξει ένα αντικείμενο σύμφωνα με τον αλγόριθμο ελέγχου χωρίς να το συνθλίψει. Ένα συμβάν "reached" ενεργοποιείται μόλις τα σερβομηχανήματα φτάσουν στο μέγιστο όριο ή μόλις ο αισθητήρας του δακτύλου ανιχνεύσει ένα αντικείμενο. Παρά τις ομοιότητές τους, η κύρια διαφορά μεταξύ του "χειρονομίας" και του "άρπαξε" είναι ότι, μόλις το χέρι βρίσκεται στην κατάσταση "Αρπαγή", μπορεί μόνο είτε να λάβει ένα "closeEvent" που αναγκάζει το χέρι να συνθλίψει το αντικείμενο που άρπαξε, μεταβαίνοντας στην κατάσταση "Close", είτε ένα συμβάν "clear" που θα επαναφέρει το χέρι στην κατάσταση ηρεμίας, κατάσταση "Open". Οποιαδήποτε κατάσταση, εκτός από τις καταστάσεις "Χειρονομία" και "Αρπαγή" (και οι δύο είναι καταστάσεις μπλοκαρίσματος), θα επιστρέψει στην κατάσταση ηρεμίας "Open" μετά τη λήψη ενός συμβάντος "clear". Όλα αυτά υλοποιούνται στο ROS με τη συγγραφή ενός σεναρίου rpython που ενθυλακώνει ολόκληρο το χέρι ως αντικείμενο FSMHand.

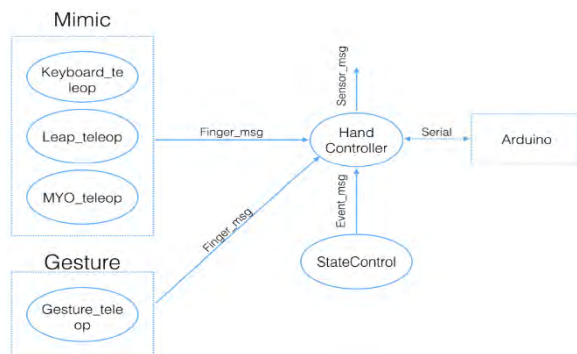


Σχήμα 1: Διάγραμμα κατάστασης της μηχανής πεπερασμένων καταστάσεων που σχεδιάστηκε για το ρομποτικό χέρι.

8.3.2 Εφαρμογή ROS

Μόλις καθοριστεί ο σχεδιασμός της μηχανής καταστάσεων, η υλοποίηση της μηχανής καταστάσεων στο ROS γίνεται διαισθητική, καθώς οι κόμβοι ROS μπορούν να ενθυλακώσουν τις καταστάσεις. Στο σχήμα 2 παρουσιάζονται οι κόμβοι και τα αντίστοιχα μηνύματά τους που δημοσιεύονται ή εγγράφονται. Ο κόμβος "Hand Controller" υλοποιεί τη μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων, παρακολουθεί την εσωτερική κατάσταση του χεριού χρησιμοποιώντας το αντικείμενο FSMHand και επικοινωνεί απευθείας με τον το Arduino μέσω

σειριακής επικοινωνίας. Εάν το χέρι βρίσκεται στην κατάσταση "Mimic", θα εγγραφεί στο θέμα "Finger msg" από κόμβους μεταφραστές, όπως "Keyboard teleop", "Leap teleop" ή "MYO teleop". Εάν το χέρι βρίσκεται στην κατάσταση "Gesture", θα εγγραφεί στο θέμα "Finger msg" από τη χειρονομία βιβλιοθήκης, με το όνομα "Gesture teleop". Όλα τα γεγονότα/μεταβάσεις που ενεργοποιούν τη μηχανή κατάστασης τροφοδοτούνται στον κόμβο "Hand Controller" από τον κόμβο "StateControl" μέσω του θέματος "Event msg". Ο κόμβος "Hand Controller" δημοσιεύει επίσης το θέμα "Sensor msg" για τους χρήστες που θα ήθελαν να το έχουν echoed/subscribed, για πρόσθετη λειτουργικότητα. Όλα τα θέματα είναι ειδικά κατασκευασμένα μηνύματα που υλοποιούνται στο ROS. "Finger msg" και το θέμα "Sensor msg" είναι και τα δύο τύπου uint16[] και το θέμα "Event msg" είναι τύπου string.



Σχήμα 2: Διάγραμμα κόμβων της μηχανής πεπερασμένων καταστάσεων που υλοποιήθηκε στο ROS, που δείχνει πώς οι κόμβοι επικοινωνούν μέσω μεταβίβασης μηνυμάτων.

9^ο Εκτιμήσεις επιδόσεων και αποτελέσματα

9.1 Μέγεθος

Η επιλογή του τρισδιάστατου σχεδιασμού μας επιτρέπει στο χέρι να βρίσκεται εντός του απαιτούμενου ορίου μεγέθους περίπου των 50 εκατοστών μήκος και κύλινδρο διαμέτρου 10 εκατοστών, όπως και το αντιβραχίονα.

9.2 Συγκράτηση

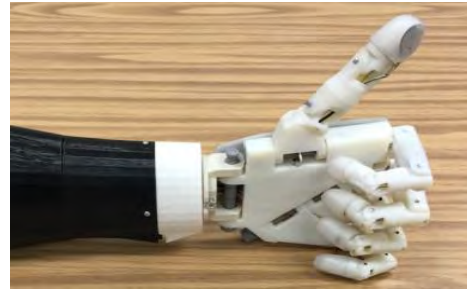
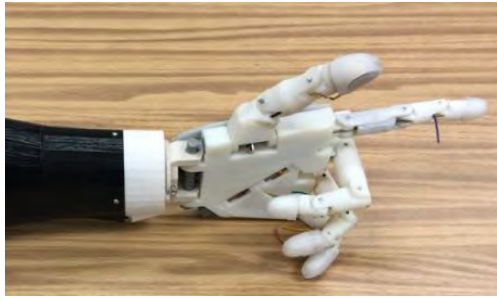
Με βάση το μέγιστο όριο του επιθυμητού βάρους που θα θέλαμε να πιάσουμε, πραγματοποιήσαμε μια δοκιμή πιάνοντας ένα τυπικό κυλινδρικό βάρος 200 g. Ωστόσο, λόγω του σχήματος του διαθέσιμου κυλινδρικού βάρους, το χέρι δεν μπορούσε να εκτελέσει αποτελεσματική λαβή. Έτσι, επιλέχθηκε άλλος κύλινδρος.

9.3 Κινήσεις

Με βάση τις χειρονομίες που ορίζονται από τις σχεδιαστικές μας απαιτήσεις, κατασκευάσαμε έναν κόμβο που χρησιμεύει ως βιβλιοθήκη χειρονομιών που περιέχει πέντε βασικές χειρονομίες κατανοητές από τον άνθρωπο. Μπορεί κανείς να δημοσιεύσει θέμα χειρονομίας, τύπου συμβολοσειράς, ενώ το χέρι βρίσκεται στην κατάσταση "Gesture" ή "Open" (όπως αναλύεται στο υποκεφάλαιο 8.3). Η εικόνα 34 δείχνει το τρισδιάστατο εκτυπωμένο χέρι που εκτελεί τις πέντε χειρονομίες.



α) Λέγοντας "γεια" με κάθετο άνοιγμα χέρι. Δείχνει "εντάξει" χρησιμοποιώντας το δείκτη και αντίχειρα. Σήμα "ειρήνης" με χρήση του δείκτη και του μεσαίου δακτύλου



β) Χειρονομία υπόδειξης με χρήση του δείκτη. Σήμανση έγκρισης με τον αντίχειρα προς τα πάνω

Εικόνα 34: Πέντε σχήματα χειρονομιών κατανοητά από τον άνθρωπο που εκτελούνται από το τρισδιάστατο εκτυπωμένο χέρι ενώ βρίσκεται σε κατάσταση "Χειρονομία".

10° Οδηγίες κατασκευής ρομποτικού χεριού

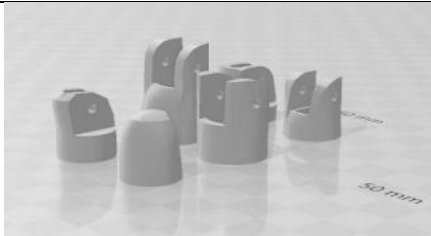
Στη συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζεται η κατασκευή του ρομποτικού χεριού όπως επίσης και όλων των κομματιών που χρησιμοποιήθηκαν. Υπάρχουν δύο κύρια μέρη της κατασκευής: το μηχανολογικό κομμάτι (hardware) και το κομμάτι του προγραμματισμού (software) [33] MertArduino, How to Make Wireless / Gesture Control Robotic Hand, hackster, 2018, [<https://www.hackster.io/mertarduino/how-to-make-wireless-gesture-control-robotic-hand-cc7d07>, ανακτήθηκε 19/02/2024].

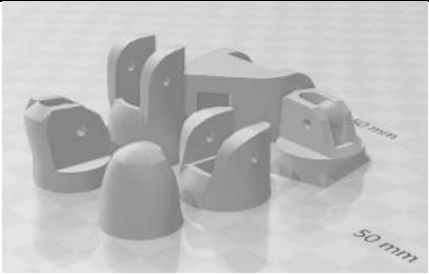
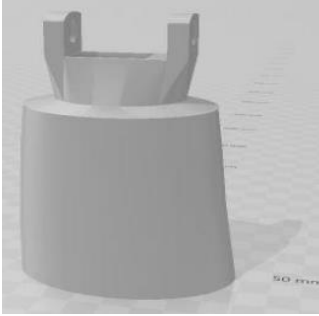
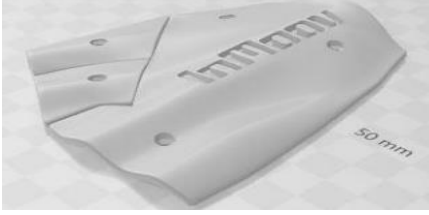
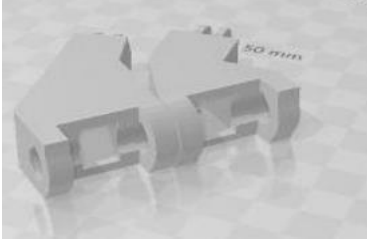
10.1 3D εκτύπωση – Σχέδιο και κομμάτια

Για την δημιουργία της κατασκευής της ρομποτικής παλάμης χρησιμοποιήθηκε 3D εκτυπωτής. Συγκεκριμένα η ρομποτική κατασκευή αποτελείται από 10 κομμάτια προς εκτύπωση. Παρακάτω παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της 3D εκτύπωσης.

- a) Πάχος στρώσης (layer height) : 0,3mm.
- b) Υλικό κατασκευής: Pla άσπρο, πορτοκαλί, κίτρινο, μαύρο.
- c) Infill : 20%.
- d) Θερμοκρασία εκτύπωσης (μύτη εκτυπωτή): 210°C
- e) Θερμοκρασία τραπεζιού εκτύπωσης: 70°C
- f) Ταχύτητα εκτύπωσης: 40 mm/s
- g) Πυκνότητα υποστήριξης (Support density): 10%

Πίνακας 7: Απεικόνιση των κομματιών που δόθηκαν για 3D εκτύπωση

A/A	Φωτογραφία
1) Ποσότητα 4	

2) Ποσότητα 1	
3) Ποσότητα 1	
4) Ποσότητα 1	
5) Ποσότητα 1	
6) Ποσότητα 1	



Εικόνα 35: Απεικόνιση ολοκληρωμένου χεριού

11^ο Συμπέρασμα

Με κίνητρο το υψηλό κόστος των προηγμένων ανθρωποειδών ρομποτικών χεριών, ο στόχος αυτού του έργου ήταν η κατασκευή ενός φθηνού τρισδιάστατου εκτυπωμένου ρομποτικού χεριού που να μπορεί να αναπαράγει όσο το δυνατόν περισσότερες από τις λειτουργίες των προηγμένων χεριών, ελαχιστοποιώντας παράλληλα το κόστος. Αυτό το σύστημα θα επιτρέψει σε περισσότερους χρήστες, συμπεριλαμβανομένων των ερευνητών, των ερασιτεχνών και των ακρωτηριασμένων, οι οποίοι δεν μπορούν να αντέξουν οικονομικά το ακριβό προηγμένο χέρι, να είναι σε θέση να πειραματιστούν και να επεκτείνουν τη χρήση τους. Το σύστημα αποτελείται μόνο από τρισδιάστατα εκτυπωμένα εξαρτήματα, σερβομηχανισμούς, αισθητήρες και έναν μικροελεγκτή. Προδιαγραφές και λειτουργικότητες που επιθυμούμε να αναπαράγουμε καθορίστηκαν και επιλέχθηκε ο σχεδιασμός που πληροί τα κριτήρια. Ο μικροελεγκτής επικοινωνεί με τον υπολογιστή μέσω σειριακής επικοινωνίας και ελέγχου συντεταγμένων και την απόκριση από τα σερβομηχανήματα και τους αισθητήρες. Έχοντας το σύστημα κατασκευασμένο με τη χρήση πλαισίων ROS επιτρέπει την περαιτέρω επέκταση του συστήματος από ερασιτέχνες ή ερευνητές. Καθορίζονται σαφείς προδιαγραφές και λειτουργίες που επιθυμούμε να αναπαραχθούν. Σχεδιασμός CAD και επιλέχθηκαν και δοκιμάστηκαν τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα που θα ικανοποιούν αυτές τις απαιτήσεις. Η μηχανική συναρμολόγηση του χεριού εμπόδισε την ανάπτυξη του λογισμικού, αλλά αν κάποιος επιθυμεί να αναπαράγει αυτό το έργο, μπορεί να ακολουθήσει το επιταχυνόμενο σχέδιο. Οι καθορισμένες λειτουργίες δοκιμάστηκαν και αποσφαλματώθηκαν. Το χέρι ικανοποιεί τον απαιτούμενο περιορισμό του κόστους, μπορεί να εκτελεί πιάσιμο καθορισμένων αντικειμένων, μπορεί να σχηματίζει χειρονομίες όπως προβλέπεται, μπορεί να ασκεί ελεγχόμενη δύναμη με μεμονωμένα δάχτυλο και επιτρέπει την ενσωμάτωση σε μεγαλύτερο ρομποτικό σύστημα ROS.

Συμπερασματικά, το τρισδιάστατα εκτυπωμένο ρομποτικό χέρι χρησιμεύει ως ένα βιώσιμο προϊόν για χρήση από τους ερευνητές της Union ή ερασιτέχνες της ρομποτικής λόγω της σχετικά φθηνής τιμής του. Παρόλο που το σύστημα μπορεί να μην είναι τόσο ανθεκτικό, αποδίδει πολύ κοντά στις λειτουργίες ενός

προηγμένου χεριού, επιτρέπει την εύκολη ενσωμάτωσή του στο ROS και ελέγχεται διαισθητικά με διάφορους ελεγκτές. Ελπίζουμε ότι αυτό το έργο θα εμπνεύσει μελλοντική έρευνα στη ρομποτική Ένωση.

11.1 Μελλοντική δουλειά

Οι μελλοντικές εργασίες του έργου περιλαμβάνουν αναβαθμισμένο μηχανικό υλικό. Οι κύριοι λόγοι για τους οποίους ο αρνητικός αλγόριθμος ανατροφοδότησης δεν μπόρεσε να εφαρμοστεί ήταν η ευαίσθητη απόκριση των αισθητήρων δύναμης και οι ανακρίβειες του σερβομηχανισμού τοποθέτησης λόγω χαλαρού καλωδίου τάσης. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση εξειδικευμένες τροχαλίες για τους σερβομηχανισμούς και πιο ανθεκτικά καλώδια εφελκυσμού. Επιπλέον, λόγω του περιορισμού της κίνησης του αντίχειρα, το χέρι περιορίζεται στο σχήμα των αντικειμένων που μπορεί να πιάσει. Αυτό μπορεί να διορθωθεί με αναβάθμιση του αντίχειρα ώστε να ενεργοποιείται με ένα πρόσθετο σερβομηχανισμό για πλευρική κίνηση. Δεδομένου ότι το έργο αφορά μόνο την αναπαραγωγή της λειτουργικότητας ενός ρομποτικού χεριού, το βάρος δεν ήταν ένα από τις απαιτήσεις, αλλά ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη σε μελλοντικές εργασίες. Δεδομένου ότι το χέρι αναμένεται να επεκταθεί σε μεγαλύτερα συστήματα, έχουν ελαχιστοποιήσει το βάρος του χεριού θα έχει ως αποτέλεσμα την ευκολότερη αναβάθμιση σε ένα χέρι που δεν απαιτεί ενεργοποιητές υψηλής ισχύος. Επιπλέον, η μείωση του βάρους θα προσελκύσει τους χρήστες που επιθυμούν να εφαρμόσουν το χέρι ως προσθετικό. Σε αυτό το έργο, υλοποιούνται χειρονομίες που απαιτούν μόνο μία ακολουθία εντολών, δηλαδή οι χειρονομίες είναι στατικές. Ωστόσο, δεδομένου ότι το FSMHand επιτρέπει μια κατάσταση "αρπαγής" το χέρι μπορεί επίσης να υλοποιήσει δυναμικές χειρονομίες, όπως μια κίνηση "έλα εδώ" με το κούμπωμα και την έκταση των τεσσάρων δακτύλων, διατηρώντας τον αντίχειρα στατικό. Δεδομένου ότι το έργο έκανε χρήση ενός προηγμένου συστήματος τρισδιάστατης εκτύπωσης εντός της πανεπιστημιοποίησης, το κόστος για την τρισδιάστατη εκτύπωση ήταν υψηλότερο από το αναμενόμενο.

Τέλος, έχοντας μελετήσει διάφορες 3D ρομποτικές κατασκευές στο διαδίκτυο, μια μελλοντική επέκταση θα μπορούσε να είναι η τοποθέτηση αισθητήρα

πίεσης. Θα μπορούσε να τοποθετηθεί σε ειδική θέση σχεδιάζοντάς το σε 3D εκτυπωτή για να ενσωματωθεί στην κατασκευή. Με τον αισθητήρα πίεσης, δίνεται η δυνατότητα μέτρησης της πίεσης που ασκείται στην ρομποτική παλάμη. Αυτή η δύναμη προσομοιώνεται στο γάντι του χειριστή μέσω ενός μοτέρ δόνησης. Έτσι μέσω του γαντιού ο χειριστής θα αντιλαμβανόταν την αίσθηση της αφής και θα είχε καλύτερο έλεγχο της ρομποτικής παλάμης πιάνοντας διάφορα αντικείμενα πιο σταθερά. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας ενός αισθητήρα πίεσης.[34] Kappasson, Z., Corrales, J., Systems, A., Perdereau, V., (2015) Accepted Manuscript.

Βιβλιογραφία

- [1] Σούλη, Π. (2009) *Ανάπτυξη Άνω Άκρου*, Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Φυσικοθεραπείας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- [2] Sushant, N., Suresh, D., Sharma, K.R., (2014), Basics and applications of rapid prototyping medical models, *Rapid Prototyping Journal*, 20 (3), 256-267.
- [3] Baronio, G., Harran, S. and Signoroni, (2016), A critical analysis of a hand orthosis reverse engineering and 3D printing process, *Applied Bionics and Biomechanics*, 7.
- [4] Abdallah, I.B., Bouteraa, Y., Rekik, C., (2017), DESIGN AND DEVELOPMENT OF 3D PRINTED MYOELECTRIC ROBOTIC EXOSKELETON FOR HAND REHABILITATION, *INTERNATIONAL JOURNAL ON SMART SENSING AND INTELLIGENT SYSTEMS*, 10 (2), 341-346.
- [5] Onen,U., Botsalı F.M., Kalyoncu, M., Tinkır, M., Yılmaz, N., Şahin, Y., (2014), Design and Actuator Selection of a Lower Extremity Exoskeleton, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19, 623-632.
- [6] Buchholz, B., Armstrong, T. J., (1992), A kinematic model of the human hand to evaluate its prehensile capabilities. Working paper, Department of Occupational Environment, University of Mass. Lowell, Lowell, MA, USA Department of Environmental and Industrial Health, University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA, *J Biomech*, 25, 149-62.
- [7] Baker, M.D., McDonough, M.K., McMullin, E.M., Swift, M., BuSha, B.F., Orthotic Hand-Assistive Exoskeleton, The College of New Jersey, *IEEE 37th Annual Northeast Bioengineering Conference (Nebec)*, Troy, NY, USA, May 27,2011,[\[https://ieeexplore.ieee.org/document/5778523\]](https://ieeexplore.ieee.org/document/5778523),ανακτήθηκε 11/01/2024].
- [8] Useok, Jeong, Hyun-Ki, In, Kyu-Jin, Cho, (2013), Implementation of various control algorithms for hand rehabilitation exercise using wearable robotic hand, *Intelligent Service Robotics*, 6, 181-189.

[9] Trachana, Z.D., (), *Manipulation Planning for an Underactuated Hand Performing Manipulation Tasks*, Diploma, School of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens.

[10] <https://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-11886/#gallery/28915>

[11] Pitarch, E.P., (2010), *Virtual Human Hand: Grasping Strategy and Simulation*, Academic Dissertation for the Degree of PhD, University Polytechnical of Catalunya.

[12] Kapandji, A. I., *Fisiología Articular: Esquemas Comentados de Mecanica Humana*, 6th edition, Editorial Medica Panamericana, Madrid, Spain, 2006.

[13] Delph, M. A., Fischer, S. A., Gauthier, P. W., Luna, C. H. M., Clancy, E. A., Fischer, G. S., (2013), A soft robotic exomusculature glove with integrated sEMG sensing for hand rehabilitation. *In Proceedings of the IEEE 13th International Conference on Rehabilitation Robotics*, June 24-26, 2013,

[\[https://ieeexplore.ieee.org/document/6650426\]](https://ieeexplore.ieee.org/document/6650426), ανακτήθηκε 31/01/2024].

[14] Tondu B., (2009) Kinematic modelling of anthropomorphic robot upper limb with human-like hands. *In Proceedings of the International Conference on Advanced Robotics*, Munich, Germany, June 2009.

[\[https://ieeexplore.ieee.org/document/5174764?arnumber=5174764\]](https://ieeexplore.ieee.org/document/5174764?arnumber=5174764),

ανακτήθηκε 31/01/2024].

[15] Bekey, G.A., Tomovic, R., Zeljkovic I., *Control Architecture for the Belgrade/USC Hand, Dextrous Robot Hands*, S.T. Venkataraman, T. Iberall. Springer-Verlag, New York Inc, 136-149, 1990. Ο σχεδιασμός βασίζεται στο προσθετικό χέρι Belgrade.

[16] Tomovic, R., Boni, G., *An Adaptive Artificial Hand*, *IRE Transactions on Automatic control*, AC-7, 3-10 1962.

[17] Bekey, G.A., Tomovic R., *Robot control by reflex actions*, *Proceedings 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, CA, 240-247, 1986.

[18] Jacobsen, S.C., Iversen, E.K., Knutti, D.F., Johnson, R.T., Biggers, K.B., Design of the Utah/M.I.T. Dextrous Hand, Proc, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, CA, USA, April 07-10, 1986,

[<https://ieeexplore.ieee.org/document/1087395>, ανακτήθηκε 05/02/2024].

[19] Lovchik, C.S., Diftler, M.A., The Robonaut hand: a dexterous robot hand for space, Robotics and Automation, Proceedings, *IEEE International Conference*, Detroit, MI, USA, May 10-15, 1999, [<https://ieeexplore.ieee.org/document/772420>, ανακτήθηκε 05/02/2024].

[20] Folgheraiter, M., Giuseppina, C., G., (2001), Human-like hierarchical reflex control for an artificial hand, *Proc. IEEE Humanoids*, 2001, Tokyo, Japan, November 2001.

[21] Martell, J., W., Giuseppina, G., (2007), Robotic Hands: Design Review and Proposal of New Design Process, *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.*, 587-592.

[22] Haridra Gazzela, Bhagyashree Shirkar, Neetu Yadav, Nutan Malekar, (2021), Prosthetic Arm for Amputees, *VIVA-Tech International Journal for Research and Innovation*, 1 (4), 1-6.

[23] Cal`i, J., Calian, D., A., Amati, C., Kleinberger, R., Steed, A., Kautz, J., Weyrich, T., (2012), 3d-printing of non-assembly articulated models, *ACM Transactions on Graphics*, 31, 130:1–130:8.

[24] De Laurentis, K., J., Mavroidis, C., (2004) Rapid fabrication of a non-assembly robotic hand with embedded components, *Assembly Automation*, 24 (4), 394–405.

[25] Borghesan, G., Palli, G., Melchiorri, C., (2010) Design of tendon-driven robotic fingers: Modeling and control issues, in Robotics and Automation (ICRA), *2010 IEEE International Conference on*, Anchorage, AK., 3-8, 2010, [https://kuleuven.limo.libis.be/discovery/fulldisplay?docid=lirias653415&context=SearchWebhook&vid=32KUL_KUL:Lirias&lang=en&search_scope=lirias_pr

[ofile&adaptor=SearchWebhook&tab=LIRIAS&query=any,contains,LIRIAS653415&offset=0](#), ανακτήθηκε 13/02/2024].

[26] The raptor hand, [<https://enablingthefuture.org/upper-limb-prosthetics/the-raptor-hand/>], ανακτήθηκε 13/02/2024].

[27] The flexy hand and flexy hand 2, [<https://enablingthefuture.org/upper-limb-prosthetics/the-flexy-hand/>], ανακτήθηκε 13/02/2024]

[28] Open hand project, [<https://inmoov.fr/inmoov-prosthetic-hand-almost-ready/>], ανακτήθηκε 13/02/2024].

[29] Open hand project, [<https://inmoov.fr/inmoov-prosthetic-hand-almost-ready/>], ανακτήθηκε 13/02/2024].

[30] Quigley, M., Conley, K., Gerkey, B., Faust, J., Foote, T., Leibs, J., Wheeler, R., Ng, N., A., Ros: an opensource robot operating system, *in ICRA workshop on open source software*, 3, 5, 2009.

[31] Deimel, R., Brock, O., A novel type of compliant, underactuated robotic hand for dexterous grasping, *in Proceedings of Robotics: Science and Systems*, Berkeley, USA, July 2014.

[32] Πογαρίδης Δ., Ενσωματωμένα Συστήματα, οι Μικροελεγκτές AVR και ARDUINO, (2015), *Εκδόσεις Δισίγμα*.

[33] Deimel, R., Brock, O., A novel type of compliant, underactuated robotic hand for dexterous grasping, *in Proceedings of Robotics: Science and Systems*, Berkeley, USA, July 2014.

[34] Kappassov, Z., Corrales, J., Systems, A., Perdereau, V., (2015) Accepted Manuscript.