



Κατασκευή-προσθέσεις
αντιβραχίου με τεχνολο-
γία προσθετικής κατα-
σκευής

Τμήμα Μηχανικών Σχεδίασης Προϊόντων
και Συστημάτων

Σταμούλος Γεώργιος



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΑΙΓΑΙΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Κατασκευή-προσθέσεις αντιβραχίου με τεχνολογία προσθετικής
κατασκευής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ
Γεωργίου Σταμούλου - dpsd 16101

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Ηλίας Ξυδιάς
1ο Μέλος: Βασίλης Μουλιανίτης
2ο Μέλος: Μόδεστος Σταυράκης

ΣΥΡΟΣ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2024

Δηλώνω υπεύθυνα ότι η διπλωματική εργασία είναι εξ' ολοκλήρου δικό μου έργο και κανένα μέρος της δεν είναι αντιγραμμένο από έντυπες ή ηλεκτρονικές πηγές, μετάφραση από ξενόγλωσσες πηγές και αναπαραγωγή από εργασίες άλλων ερευνητών ή φοιτητών. Όπου έχω βασιστεί σε ιδέες ή κείμενα άλλων, έχω προσπαθήσει, όσο είναι δυνατόν, να το προσδιορίσω σαφώς μέσα από την χρήση αναφορών, ακολουθώντας την ακαδημαϊκή δεοντολογία.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ο βιομηχανικός σχεδιασμός μπορεί να φανεί χρήσιμος σε πολλές περιπτώσεις στην ζωή του ανθρώπου. Τα παραδείγματα ποικίλλουν. Εξετάζοντας απλά εργαλεία μαγειρικής έως και αεροσκάφη εξοπλισμένα με την αιχμή της τεχνολογίας, δεν θα αργούσε κανείς να καταλάβει την σημαντικότητα αυτής της επιστήμης. Όταν όμως έρχεται να αντιμετωπίσει ζητήματα όπως τη δημιουργία ενός τεχνητού μέλους, δεν είναι απλά χρήσιμη, αλλά αναγκαία. Μεταμορφώνεται σε αναγκαίο εργαλείο για να βοηθήσει συνανθρώπους μας που το έχουν ανάγκη, ώστε να έχουν μια 'φυσιολογική ζωή', κάνει πράγματα που μας φαντάζουν απλά, αλλά για κάποιους αδύνατα, δυνατά, αλλάζει την ζωή αυτών των ανθρώπων και κάνει κάποιες από τις βαθύτερες τους επιθυμίες πραγματικότητα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το υπό σχεδίαση σύστημα εξυπηρετεί την ανάγκη προσθετικού χεριού σε άτομα με ακρωτηριασμένο αντιβράχιο. Με την εφαρμογή μυοηλεκτρικών προθέσεων (EMG) θα γίνεται καταγραφή μυϊκών σημάτων από το χρήστη, θα αποκωδικοποιούνται και θα μετατρέπονται σε κινήσεις του χεριού (ενεργοποίηση μηχανισμού των δακτύλων και του μηχανισμού της πηχεοκαρπικής). Το τεχνητό άκρο θα είναι κατασκευασμένο με τεχνολογία προσθετικής κατασκευής.

Αρχικά, θα μελετηθεί βιβλιογραφία σχετικά με το θέμα και υπάρχουσες λύσεις. Αυτή η μελέτη θα βοηθήσει στην καλύτερη κατανόηση του προβλήματος, που θα συμβάλλει στα επόμενα βήματα. Πιο συγκεκριμένα, θα δημιουργηθεί μια βάση που θα καθοδηγήσει τον σχεδιασμό και την επίλυση του προβλήματος. Δηλαδή, θα υπάρξει μια πρώτη εικόνα της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται για υπάρχοντα τεχνητά μέλη, θα γίνει μια σύγκριση τεχνολογιών, θα προκύψουν ανάγκες χρήστη και θα δοθούν προδιαγραφές ώστε το αποτέλεσμα να μπορεί να κριθεί χρήσιμο και λειτουργικό, λύνοντας αυτές τις ανάγκες και διατηρώντας τις προδιαγραφές. Έπειτα, με διάφορες τεχνικές και μεθόδους θα δημιουργηθούν δημιουργικές σχεδιαστικές λύσεις βάση αυτών των αναγκών και προδιαγραφών, με εκμετάλλευση της γνώσης που καταγράφηκε από την προηγούμενη μελέτη. Θα επιλεγθούν υλικά και εξαρτήματα για να φτιαχτεί ένα σύστημα που θα καθιστούν αυτό το project λειτουργικό και παρουσιάσιμο. Ένα από αυτά τα εξαρτήματα θα είναι σχετικό με την τεχνολογία EMG, όπου θα αναλυθεί και θα εξηγηθεί γιατί επιλέχθηκε να είναι η βασική τεχνολογία καθοδήγησης ελέγχου του ρομποτικού βραχίονα. Θα φανούν τα βήματα που θα παρθούν για το προγραμματισμό και την υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος. Επίσης, θα γίνει εντύπωση στην τεχνολογία προσθετικής κατασκευής και πώς θα ωφεληθεί η κατασκευή του βιομηχανικού χεριού με την επιλογή αυτής της μεθόδου κατασκευής. Τέλος, θα γίνει αξιολόγηση όλων των βημάτων και του τελικού αποτελέσματος, εμβαθύνοντας σε μελλοντικά βήματα και προτάσεις, επανεξετάζοντας πώς ένα τέτοιο κατασκευάσμα θα το απορροφήσει η αγορά και τι κοινωνικό αντίκτυπο θα έχει.

SUMMARY

This thesis will focus on the study, design, and implementation of forearm prostheses with additive manufacturing technology. By applying of myoelectric hardware (EMG), muscle signals will be registered by the user, they will be decoded and converted into hand movements (activation of the mechanism of fingers and the mechanism of the wrist). The artificial limb will be made with additive manufacturing technology.

First, literature on the subject and existing solutions will be studied. The outcome of this study will help to better understand the problem, which will contribute to the next steps. More specifically, a foundation will be created to guide the design and construction the hand. That is, there will be sneak peek of the technology used for existing artificial limbs, a comparison of technologies will be made, user needs will arise and specifications will be given so that the result can be considered useful and functional, by solving these needs and maintaining specifications. Then, with various techniques and methods, creative design solutions will be created based on these needs and specifications, exploiting the knowledge recorded from the previous steps. Materials and components will be selected to make a system that will make this project functional and presentable. One of these components will be related to EMG technology, where it will be analyzed and explained why it was chosen to be the main controller technology of the robotic arm. The steps to be taken to plan and implement such a system will be shown. It will also delve into prosthetic manufacturing technology and how the manufacturing of the industrial hand will benefit by choosing this manufacturing method. Finally, all the steps and the final result will be evaluated, delving into future steps and proposals, reviewing how such a construction will be absorbed by the market and what social impact it will have.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Πρόλογος.....	2
Περίληψη	3
SUMMARY	4
Πίνακας περιεχομένων.....	5
1. Περιγραφή του προβλήματος	7
1.1 Περίληψη κεφαλαίου	7
1.2 Περιγραφή του προβλήματος.....	7
1.3 Υπάρχουσες λύσεις.....	9
2. Ανάλυση του προβλήματος	25
2.1 Περίληψη κεφαλαίου	25
2.2 Ανάλυση του προβλήματος	25
2.3 Απαιτήσεις.....	35
2.4 Προδιαγραφές	36
3. Επίλυση του προβλήματος.....	37
3.1 Περίληψη κεφαλαίου	37
3.2 Εξαρτήματα	37
3.2.1 Ανάλυση εξαρτημάτων	37
3.2.2 Λίστα.....	38
3.3 σχεδιαστική πορεία	39
3.4 Προγραμματισμος και συνδεσμολογια	65
3.5 Προσθετική κατασκευή	93
3.6 κατασκευή	107
3.6.1 Εξοπλισμός	107
3.6.2 Εκτέλεση.....	108
3.7 τελικό αποτέλεσμα.....	123
4. Συμπεράσματα	139
4.1 Περίληψη κεφαλαίου	139
4.2 Αξιολόγηση και επόμενα βήματα	139
5. Βιβλιογραφία.....	141
6. Παραπομπές.....	147
6.1 Κατάλογος Εικόνων.....	147
6.1.1 Κατάλογος εικόνων κεφάλαιο 1.....	147
6.1.2 Κατάλογος εικόνων κεφάλαιο 2.....	147
6.1.3 Κατάλογος εικόνων κεφάλαιο 3.....	148
6.2 Κατάλογος πινάκων	151
6.2.1 Κατάλος πινάκων κεφάλαιο 1.....	151
6.2.2 Κατάλος πινάκων κεφάλαιο 2.....	151
6.2.3 Κατάλος πινάκων κεφάλαιο 3.....	151

1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

1.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται το project σε μια εισαγωγή και εξερευνώνται υπάρχουσες λύσεις και εφαρμογές περί του θέματος. Μελετάται ο σκοπός και ανάγκη ενός τέτοιου Project σε πραγματικές συνθήκες, μέσα από σημαντική βιβλιογραφία.

1.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Δυστυχώς, πολλοί συνάνθρωποί μας έχουν τραυματική ή ιατρογενή (χειρουργική) αποκοπή ενός μέλους ή τμήματος του μέλους του σώματος από το υπόλοιπο σώμα. Πιο συγκεκριμένα, διάφορες αναφορές δείχνουν το μέγεθος αυτών το περιπτώσεων. Για παράδειγμα, το 2005, περίπου 541.000 Αμερικάνοι υποφέρανε από δυσκολίες άνω μελών. Είτε εκ γενετής είτε από ακρωτηριασμό. Επίσης, στην Αμερική 15 από 100.000 νεογέννητα είχαν ανωμαλίες στα άνω άκρα τους και 6.000-10.000 άτομα κάθε χρόνο ακρωτηριάζουν κάποιο άνω μέλος τους[1]. Έπειτα, τα προσθετικά χέρια μπορούν όχι μόνο να μην ικανοποιούν τις απαιτούμενες ανάγκες αλλά να είναι και πολύ ακριβά. Τα “body-powered prosthesis” (δηλαδή χειροκίνητα προσθετικά μέλη) κυμαίνονται από \$4.000 με \$8000 δολάρια και τα “externally powered prosthesis” δηλαδή ρομποτικά από \$25.000 με \$50.000 δολάρια[1]. Αυτό τα καθιστά μη προσιτά για πολλούς ανθρώπους, που πραγματικά τα χρειάζονται για να λειτουργήσουν σε ‘απλές’ συνθήκες της καθημερινότητας.

Για αυτό λοιπόν, αυτή η διπλωματική εργασία θα προσπαθήσει να δώσει μια λύση σε αυτό το πρόβλημα δημιουργώντας, όχι μόνο ένα προσθετικό ρομποτικό μέλος σε οικονομική τιμή, με πρόσβαση στον καθένα, αλλά θα καλύψει και τις ανάγκες που χρειάζονται για τον χρήστη του συγκεκριμένου χεριού.

Όπως φαίνεται και στον τίτλο, η κατασκευή των επιμέρους κομματιών του ρομποτικού βραχίονα θα είναι με τεχνολογία προσθετική κατασκευής, δηλαδή τρισδιάστατης εκτύπωσης. Αυτή η τεχνολογία έχει αναπτυχθεί πολύ τα τελευταία χρόνια και πλέον πολλοί ‘καθημερινοί άνθρωποι’ φιλοξενούν μηχανήματα αυτής της τεχνολογίας σπίτι τους. Επίσης, αυτή η τεχνολογία δίνει τη δυνατότητα στον σχεδιαστή να δημιουργήσει περίπλοκες γεωμετρίες που με τις δημοφιλείς κοινές μεθόδους παραγωγής θα ήταν αδύνατο, χρονοβόρο ή αρκετά κοστοβόρο. Πιο συγκεκριμένα, δίνει την δυνατότητα σε προϊόντα που χρειάζονται πολλά διαφορετικά κομμάτια, βίδες, οδηγούς κτλ. να γίνουν ένα μονοκόμματο κομμάτι. Αυτό ξεκλειδώνει αμέτρητες τεχνολογικές και σχεδιαστικές δυνατότητες. Όχι μόνο αυτό αλλά, επίσης, δεν χρειάζεται να διαθέτεις τεράστια βιομηχανικά μηχανήματα, ούτε να συνεργαστείς, με αρκετό κόστος, με κατασκευαστικές εταιρίες για να τα υλοποιήσεις. Το μόνο που χρειάζεται είναι να έχεις πρόσβαση και άδεια σε έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή και η παραγωγή μπορεί να ξεκινήσει, με αρκετά χαμηλό κόστος. Οπότε, δεν υπάρχει λόγος να αναφερθεί πως έχω στην κατοχή μου ένα τέτοιο μηχάνημα. Στη δεκαετία του 1980, οι τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης θεωρούνταν κατάλληλες μόνο για την παραγωγή λειτουργικών ή αισθητικών πρωτοτύπων και ένας καταλληλότερος όρος για αυτήν την εποχή ήταν η ταχεία δημιουργία πρωτοτύπων. Από το 2019, η ακρίβεια, η επαναληψιμότητα και η γκάμα υλικών της τρισδιάστατης εκτύπωσης έχουν αυξηθεί σε σημείο που ορισμένες διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης θεωρούνται βιώσιμες ως τεχνολογία βιομηχανικής παραγωγής. Σε αυτό το πλαίσιο, ο όρος προσθετική κατασκευή μπορεί να

χρησιμοποιηθεί συνώνυμα με την τρισδιάστατη εκτύπωση. Το Fused Deposition Modeling (FDM), το οποίο χρησιμοποιεί ένα συνεχές νήμα από θερμοπλαστικό υλικό, είναι η πιο κοινή διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρησιμοποιείται από το 2020.[2]Αυτού του είδους τεχνολογία είναι και ο εκτυπωτής που θα χρησιμοποιηθεί. Για τους παραπάνω λόγους, επιλέχθηκε αυτός ο τρόπος κατασκευής για το Project αλλά θα αναλυθεί ο λόγος λεπτομερώς σε μεταγενέστερη χρονο.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι χειρισμού ενός προσθετικού μέλους. Επιλέχθηκε ο χειρισμός για το ρομποτικό βραχίονα που θα δημιουργηθεί να γίνει με τεχνολογία EMG. Τι είναι όμως το EMG; «Η ηλεκτρομυογραφία (EMG) είναι μια τεχνική για την αξιολόγηση και την καταγραφή της ηλεκτρικής δραστηριότητας που παράγεται από τους σκελετικούς μύες. Το EMG εκτελείται χρησιμοποιώντας ένα όργανο που ονομάζεται ηλεκτρομυογράφος για να δημιουργήσει ένα αρχείο που ονομάζεται ηλεκτρομυογράφημα. Ένας ηλεκτρομυογράφος ανιχνεύει το ηλεκτρικό δυναμικό που δημιουργείται από τα μυϊκά κύτταρα όταν αυτά τα κύτταρα ενεργοποιούνται ηλεκτρικά ή νευρολογικά.»[3]. Ο λόγος που επιλέχθηκε είναι γιατί οι ανάλογοι σένσορες μπορούν να είναι αρκετά οικονομικοί, με πρόσβαση στον καθένα και με την κατάλληλη ρύθμιση μπορεί ο κάθε χρήστης να τα χειριστεί, καθώς επίσης θυμίζουν τον 'φυσικό' τρόπο χειρισμού του χεριού.

Ο στόχος λοιπόν για τη συγκεκριμένη διπλωματική είναι η υλοποίηση ενός βιομηχανικού χεριού που να καλύπτει τις ανάγκες ατόμων με αποκομμένο χέρι. Η υλοποίηση αυτή είναι μια επίδειξη και απόδειξη ότι η υλοποίηση ενός οικονομικού, χρηστικού και αισθητικά αρεστού χεριού είναι δυνατή, με έλεγχο από τον χρήστη με τεχνολογία EMG και για τρόπο κατασκευής η προσθετική κατασκευή.

Η μεθοδολογία που θα ακολουθήσει είναι απλή. Θα γίνει ανάλυση υπαρχουσών λύσεων και σχετικής βιβλιογραφίας για τη κατανόηση του προβλήματος. Θα γίνει εμβάθυνση σε ανάγκες και προδιαγραφές μέσα από βιβλιογραφία, λαμβάνοντας υπόψιν όλη την υπάρχουσα έρευνα. Βάση των προηγούμενων βημάτων, θα γίνει υλοποίηση του χεριού με ανάλυση και εξέταση κάθε βήματος. Αυτό θα είναι και το μεγαλύτερο μέρος αυτής της διπλωματικής. Τέλος, θα γίνει ανάλυση του αποτελέσματος και μελέτη για επόμενα βήματα.

Το πλαίσιο είναι εξωτερικοί όσο και εσωτερικοί χώροι καθώς, όπως και ένα πραγματικό χέρι, χρησιμοποιείται συνέχεια και παντού. Καθώς όμως δεν θα γίνει ανάπτυξη περικάρπιου το πραγματικό πλαίσιο είναι αίθουσα παρουσίασης με κατάλληλες δομές, καθώς αυτή η διπλωματική άσκηση θα έχει στόχο την επίδειξη λειτουργίας του.

Χρήστες είναι τα άτομα με αποκομμένο χέρι, έως τον καρπό, με τους μύες στον πήχη τους σε καλή λειτουργική κατάσταση. Στην εργασία θα είμαι εγώ ο βασικός χρήστης παρότι δεν έχω αποκομμένο χέρι, καθώς κάθε βιομηχανικό χέρι χρειάζεται προσαρμογή ανάλογα με τον χρήστη.

1.3 ΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΛΥΣΕΙΣ

Καθώς κατανοήσαμε το πρόβλημα μπορούμε να εξερευνήσουμε υπάρχουσες λύσεις για την αξιολογή και την περαιτέρω κατανόηση του προβλήματος, αλλά και για να χαραχθεί πορεία προς την μεθοδολογία και στόχων που θα ακολουθήσουμε για να βρεθεί μια ικανοποιητική λύση.

Η επιστημονική δημοσίευση με τίτλο «On the Use of 3D Printing Technology Towards the Development of a Low-Cost Robotic Prosthetic Arm»[4] προσπαθεί να αποδείξει ότι είναι εφικτό να δημιουργηθεί ένα πρωτότυπο βιομηχανικού προσθετικού χεριού για άτομα που το χρειάζονται, σε οικονομικό κόστος.

Η δημοσίευση εξηγεί ότι υπάρχουν ήδη πολλές υλοποιήσεις ρομποτικών προσθετικών χεριών στην αγορά, αλλά το κόστος είναι μεγάλο. Κυμαίνονται στα \$4.000 με \$20.000 δολάρια. Ο παγκόσμιος οργανισμός υγείας υπολογίζει πως μόνο το 20% από ένα group 30 εκατομμυρίων ανθρώπων έχουν συσκευές προσθετικής ή άλλου είδους συσκευές για να ικανοποιούν τις ανάγκες τους.

Υποστηρίζει ότι το πώς λειτουργεί το ανθρώπινο χέρι έχει μελετηθεί από πολλούς ερευνητές. Το ανθρώπινο χέρι έχει 27 βαθμούς ελευθερίας που του επιτρέπουν να έχει στη διάθεση του διάφορες λαβές και στάσεις. Για τον λόγο αυτό υποστηρίζει πως ρομποτικοί βραχίονες με δύο ή τρία δάχτυλα, αν και πολύ πιο απλοί και εύκολοι στην κατασκευή τους, δεν είναι αρκετά ευέλικτοι για να υποστηρίξουν τις απαιτήσεις των δραστηριοτήτων της καθημερινότητας. Για αυτό λοιπόν, για τα πρωτότυπα του επέλεξε να έχουν 5 αυτόνομα δάχτυλα όπως ένα πραγματικό ανθρώπινο χέρι.

Με βάση τους παραπάνω παράγοντες, εξέτασε τα δύο παρακάτω πρωτότυπα: Πρώτον, ένα ρομποτικό χέρι κατασκευασμένο με 3D εκτυπωτή, που αποτελείται από τον αντίχειρα, τον δείκτη, μεσαίο δάχτυλο, δάχτυλο δακτύλου, μικρό δάχτυλο, παλάμη και δομή βάσης.



Εικόνα 1. 1 υλοποίηση για πρώτο πείραμα βιβλιογραφίας[4]

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, κάθε υπομέρος του κάθε δαχτύλου είναι ξεχωριστό κομμάτι, ώστε να έχει την ανάλογη ελευθερία κίνησης στο τελικό assembly.

Δεύτερων, Στο δεύτερο πρωτότυπο, είναι βασισμένο στο πολύ γνωστό χέρι και πήχη της InMoov. Το μοντέλο για οικονομικούς λόγους έχει ένα βαθμό ελευθερίας ανά δάχτυλο, αλλά θεωρείται αρκετό για τη χρήση που προορίζεται. Είναι κατασκευασμένο και αυτό με τεχνολογία προσθετικής κατασκευής.

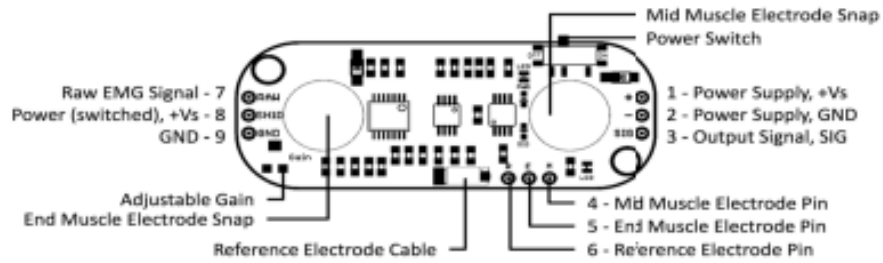


Εικόνα 1. 2 Υλοποίηση InMoov αντιβραχίου για δεύτερο πείραμα βιθλιογραφίας[4]



Εικόνα 1. 3 Ένδειξη μηχανισμού InMoov[4]

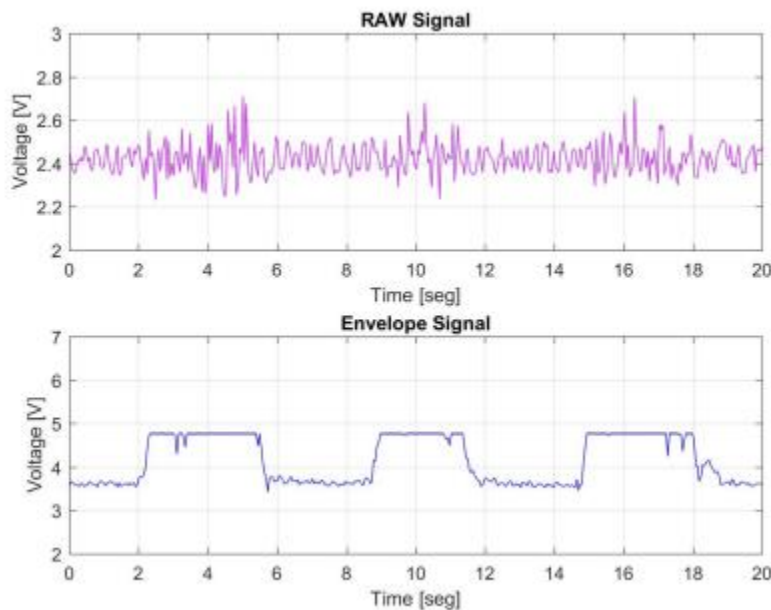
Το σημαντικό σημείο σε αυτό για αυτό το πρωτότυπο είναι ότι χρησιμοποιήθηκε MyoWare Muscle αισθητήρας, δηλαδή τεχνολογία EMG.



Εικόνα 1. 4 Οδηγός για pins πλακέτας MyoWare [4]

Ο αρθρογράφος αναφέρει πως ο αισθητήρας έχει 2 εξόδους, τη “raw” έξοδο(7) και την “envelope”(3). Η “envelope” έξοδος ενισχύει και διορθώνει δίνοντας του την ικανότητα να διαβαστεί αρκετά πιο εύκολα μέσω από ενός micro-controller, κάνοντας τη διάκριση των κινήσεων πολύ πιο εμφανή .

Παράδειγμα ανοίγματος και κλεισίματος χεριού μέσω:



Εικόνα 1. 5 γράφημα από βιβλιογραφία[4]

Έγιναν δύο πειράματα σε τρεις διαφορετικούς ανθρώπους, σε τρία διαφορετικά σημεία τοποθέτησης του αισθητήρα για να παρατηρηθεί συμπεριφορά του αισθητήρα σε αυτές τις διαφορετικές συνθήκες.



Εικόνα 1. 6 θέση αισθητήρα EMG από βιβλιογραφία[4]

Στο πρώτο test οι χρήστες άνοιξαν και έκλεισαν το χέρι τους με διαφορά 2 δευτερολέπτων 10 φορές. Το test αυτό είχε σκοπό να ελέγξει τη ποσότητα και ταχύτητα απόκρισης. Το αποτέλεσμα φαίνεται στον πίνακα 1.1:

Χρήστης	Τοποθεσία αισθητήρα	Σωστή δράση	Λάθος δράση	Ακρίβεια (%)
A	Πήχης	9	1	90
	Δικέφαλα	8	2	80
	Τρικέφαλα	9	1	90
B	Πήχης	10	0	100
	Δικέφαλα	10	0	100
	Τρικέφαλα	9	1	90
C	Πήχης	10	0	100
	Δικέφαλα	10	0	100
	Τρικέφαλα	9	1	90

Πίνακας 1. 1 αποτελέσματα πειράματος βιβλιογραφίας[4]

Φαίνεται πως το πείραμα είχε ικανοποιητική επιτυχία καθώς η ελάχιστη ακρίβεια είναι στο 80%.

Στο δεύτερο test οι χρήστες έκλεισαν τα χέρια τους για 7 δευτερόλεπτα όσο πιο δυνατά μπορούσαν φτάνοντας μικρό-εξαντλητικές συνθήκες του μυ. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 1.2:

Χρήστης	Τοποθεσία αισθητήρα	Μέσο κράτημα μυ(sec)	Κράτημα μυ (%)
A	Πήχης	6.27	89.57
	Δικέφαλα	5.35	76.43
	Τρικέφαλα	7	100
B	Πήχης	6.78	96.86
	Δικέφαλα	6.4	91.43
	Τρικέφαλα	7	100
C	Πήχης	6.53	93.29
	Δικέφαλα	7	100
	Τρικέφαλα	7	100

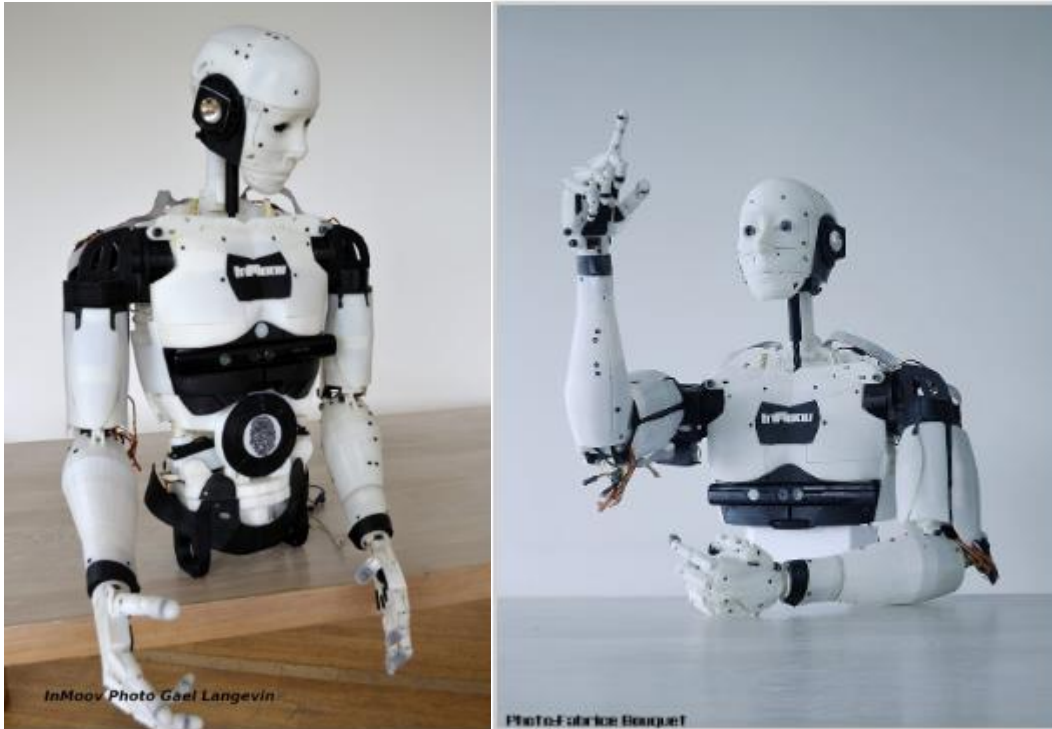
Πίνακας 1. 2 αποτελέσματα πειράματος βιβλιογραφίας[4]

Ξανά, φαίνονται ικανοποιητικά τα αποτελέσματα από τον συγκεκριμένο αισθητήρα, καθώς κατάφερε να παραμείνει ο χειρισμός της κράτησης για πάνω από 76.43% με λίγα σημάδια εξάντλησης από τους χρήστες.

Όλοι οι χρήστες βρήκαν τον τρόπο χειρισμού του χεριού με αυτόν τον τρόπο εύκολο στη χρήση. Ο αισθητήρας EMG παρείχε στη πραγματικότητα τις απαραίτητες ικανότητες για να διαβαστούν οι κινήσεις του μυ και να μεταφερθούν στο ρομποτικό χέρι.

Καταλήγει πως είναι δυνατό να φτιαχτεί ρομποτικό χέρι προσθετικής με τεχνολογία προσθετική κατασκευής με μικρό κόστος και αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ο χειρισμός με τεχνολογία EMG λειτούργησε σωστά και ήταν επαρκής για το χειρισμό των βασικών λειτουργιών του ρομποτικού χεριού.

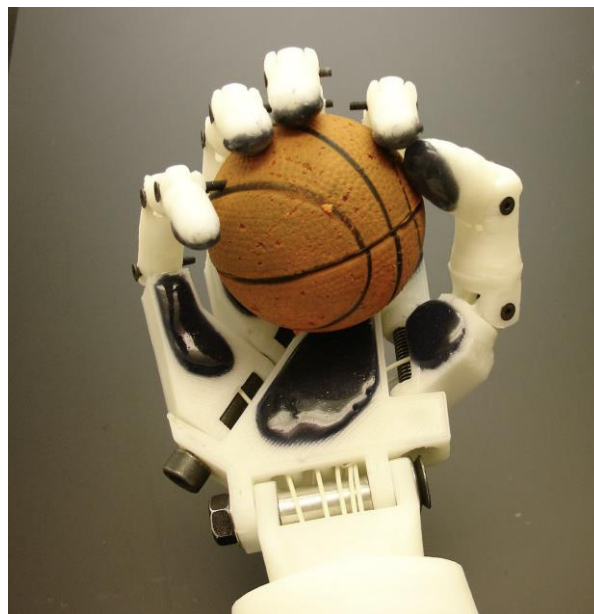
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το InMoov είναι ένα Project από τον Γάλλο σχεδιαστή Gael Langevin που ασχολείται όχι μόνο με τη δημιουργία λειτουργικού βραχίονα, αλλά ολόκληρου ρομπότ κατασκευασμένου με προσθετική κατασκευή.[5] .Πιο συγκεκριμένα, το InMoov είναι ένα open source project που επιτρέπει όχι μόνο να εκτυπώσει όποιος θέλει τα εξαρτήματα αυτού του ρομπότ, αλλά και να τα τροποποιήσει. Το συγκεκριμένο project είναι τόσο πετυχημένο, που με μια αναζήτηση σχετικά με το θέμα δεν θα αργήσει κανείς να βρει υπάρχουσες υλοποιήσεις.



Εικόνα 1. 7 InMoov robot[5]

Εμείς όμως ενδιαφερόμαστε για το χέρι και πήχη που έχει αναπτυχθεί σε αυτό το Project. Αν επισκεφτεί κανείς τη σελίδα μπορεί να βρει ακριβή οδηγό για το τι κομμάτια χρειάζεται να εκτυπωθούν και πώς να κατασκευαστεί αυτός ο βραχίονας.

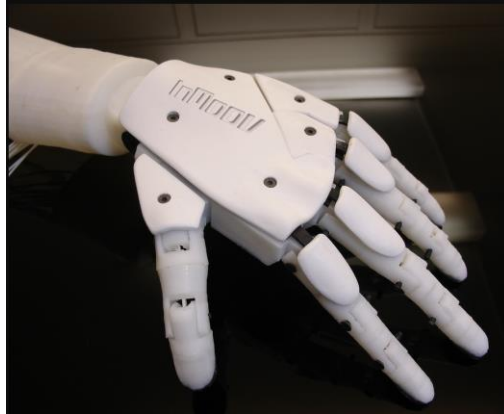
Επιλέγεται από πολλά πειράματα και χομπίστες να το κατασκευάζουν για την ευκολία κατασκευής του, για το πόσο εύκολη πρόσβαση έχει κάποιος σε αυτό και για την ικανοποιητική λειτουργικότητά του. Για παράδειγμα ο βραχίονας έχει την ικανότητα να πιάνει καθημερινά αντικείμενα.



Εικόνα 1. 8 InMoov χέρι με αντικείμενο καθημερινότητας[5]

Διαθέτει 7 βαθμούς ελευθερίας. Ένα σε κάθε δάχτυλο και δύο στον καρπό με Περιστροφή στον Z και X άξονα.

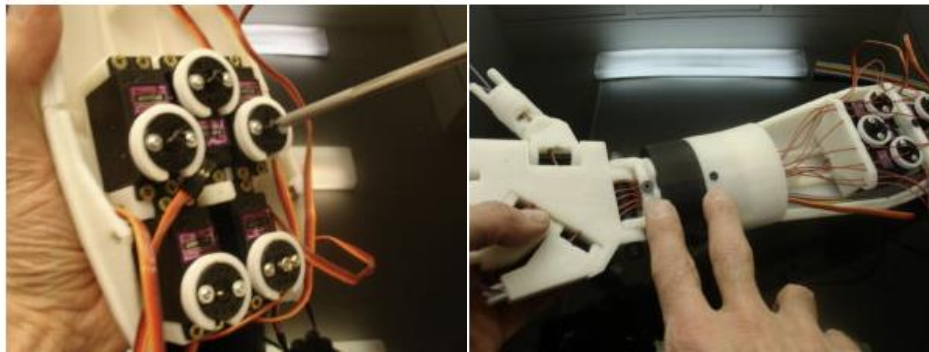
Έχει αισθητική 'ρομποτική' αλλά φέρνοντας χαρακτηριστικά 'ανθρώπινα' και αντιγράφει την ανατομία του ανθρώπινου χεριού.



Εικόνα 1. 9 InMoov χέρι[5]

Διαθέτει κέλυφος για αισθητική και προστασία. Τα λεπτά σκοινιά, υπεύθυνα για την κίνηση των δαχτύλων, είναι 'κρυμμένα' ανάμεσα στα δάχτυλα.

Έχει πέντε servo motors μέσα στον πήχη με ειδικά horn για τον ρότορα του Servo motor ώστε να τραβάει και να αφήνει το λεπτό σκοινί σε κατάλληλη θέση.



Εικόνα 1. 10 κατασκευή αντιβραχίου InMoov[5]

Τα δάχτυλα ενώνονται με κομμάτια από filament. Δηλαδή πλαστικό σε γεωμετρία κατάλληλη για προσθετική κατασκευή.



Εικόνα 1. 11 κατασκευή δαχτύλου InMoov[5]

Η ιδέα είναι ότι τα servo motors είναι παγιωμένα στον πήχη και με την περιστροφή τραβάνε ή αφήνουν τα λεπτά σκοινιά, που είναι παγιωμένα στις μύτες των δαχτύλων. Έτσι το κάθε δάχτυλο ανοίγει ή κλείνει, ανάλογα τη θέση του εκάστοτε servo motor. Έτσι γίνεται ο έλεγχος των δαχτύλων αλλά και ολόκληρης της παλάμης καθώς, αν το χέρι κλείσει σαν γροθιά, τότε επιτρέπει στην παλάμη να περιστραφεί στον Χ άξονα. Υπάρχει και άλλο Servo motor, κάτω ακριβώς από τον καρπό, που επιτρέπει την περιστροφή στον Ζ άξονα.

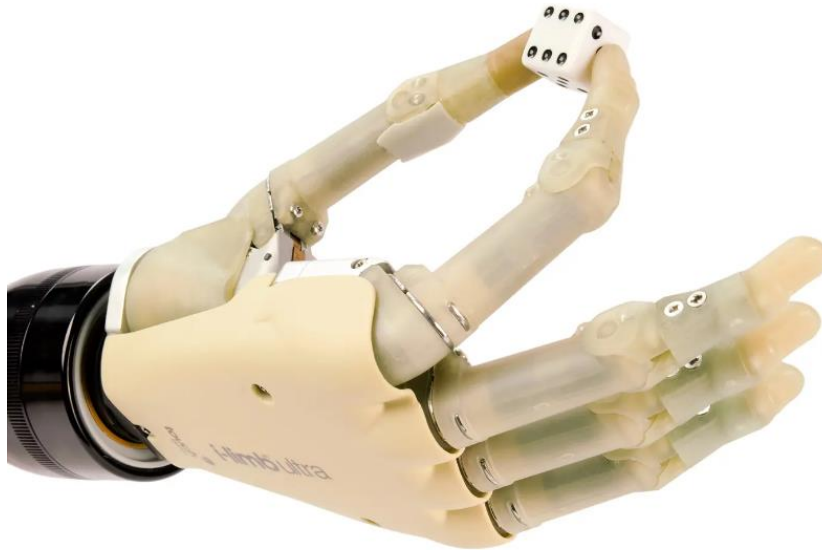
Όπως φαίνεται παραπάνω, το InMoov χέρι είναι η απόδειξη ότι μπορεί να φτιαχτεί βιομηχανικό χέρι με την τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής και με υλικά με πρόσβαση σε όλους. [5] Επίσης, αποδεικνύει ότι είναι εφικτό να φτιαχτεί ένα οικονομικό βιομηχανικό χέρι, καθώς το ολόκληρο ρομπότ κοστίζει κοντά στα \$1.500 δολάρια. [6]

Αλλά φυσικά, αρκετό ενδιαφέρον επίσης έχουν οι υπάρχουσες λύσεις από εταιρίες που πουλάνε σε ευρύ κοινό ανθρώπων.

Ένα γνωστό στην αγορά προσθετικό βιομηχανικό χέρι είναι το χέρι σειράς I-Limb, φτιαγμένο από την εταιρία TouchBionics, που πουλήθηκε στην Össur για £25.5 εκατομμύρια λίρες [7]. «Το i-Limb είναι μια βιονική πρόσθεση σχεδιασμένη για άτομα με ακρωτηριασμένο χέρι. Χρησιμοποιεί αισθητήρες που τοποθετούνται στο δέρμα για να επιτρέπουν στους χρήστες να ελέγχουν τις λειτουργίες του ρομποτικού χεριού τους φυσικά, μέσω μυϊκών σημάτων.» Αυτό το χέρι έχει πέντε δυναμικά ανεξάρτητα δάχτυλα. Μπορεί να επικοινωνεί με υπολογιστή μέσω Bluetooth, για επιλογή features και για παραπάνω επιλογές. Χρησιμοποιεί ηλεκτρόδια δέρματος, όπως είδαμε παραπάνω, για να διαβάζει σήματα των σκελετικών μυών. Έχει πέντε DC motors, ένα για κάθε δάχτυλο. Έχει επτά βαθμούς ελευθερίας, ένα στον καρπό, ένα σε κάθε δάχτυλο, εκτός του αντίχειρα όπου έχει δυο, σύνολο επτά. Είναι φτιαγμένο από αλουμίνιο και πλαστικά υψηλής πυκνότητας. Χρησιμοποιεί 7.4V 1300mAh μπαταρία και κοστίζει κάπου στα \$100.000 δολάρια. Το ακριβές κόστος εξαρτάται από τις απαιτήσεις του ασθενή. Ζυγίζει 0.47 kg. [8]

Οπότε, όπως δείχνουν τα δεδομένα είναι ένα αρκετά ελαφρύ χέρι, με βάση ότι το ανθρώπινο χέρι ενός ενήλικα άνδρα είναι κάπου στα 400 γρ. [9] Οι βαθμοί ελευθερίας φαίνονται ικανοποιητικοί, αν και πρέπει να επισημανθεί ότι μόνο τα δάχτυλα κουνιούνται με τη βοήθεια μοτέρ. Η θέση αντίχειρα και ο καρπός αλλάζουν με τη βοήθεια του χρήστη. Ένα άλλο χαρακτηριστικό, που διαθέτει αυτό το χέρι, είναι πως επιτρέπει στον χρήστη να ανεβάζει σταδιακά την δύναμη στα δάχτυλα καθώς πιάνει. Άλλο ένα εντυπωσιακό χαρακτηριστικό είναι η ακρίβεια που διαθέτει και το ότι επιτρέπει στους χρήστες να πιάνουν μικρά αντικείμενα. [8]

Το σχέδιο φαίνεται να έχει ανθρωπόμορφη γεωμετρία και υποστηρίζει η εταιρία πως είναι το πιο ανατομικά σωστό τεχνητό χέρι διαθέσιμο.



Εικόνα 1. 12 i-Limp Ultra που κρατάει ζάρι[8]

Μπορεί επίσης να του φορεθεί γάντι για περισσότερη τριβή.



Εικόνα 1. 13 i-Limp Ultra που κρατάει κάμερα[8]

Υπάρχουν και άλλες υλοποιήσεις, όπως τα βιομηχανικά χέρια από την Ottobock.



Εικόνα 1. 14 χέρι Ottobock[10]

Κατά την γνώμη μου, ακολουθούν παρόμοια αισθητική με την TouchBionics, διατηρώντας μια ανατομική αντιγραφή του ανθρώπινου χεριού, αλλά με ρομποτικά στοιχεία. Διαθέτουν επίσης γάντια για το χέρι που θυμίζουν αρκετά το ανθρώπινο.



Εικόνα 1. 15 γρεαλιστικό γάντι για χέρι Ottobok[10]

Αυτό, για τα άτομα που θέλουν να 'κρύψουν' το τεχνητό χέρι τους, πρέπει να φαίνεται ιδανικό, αλλά ίσως για άλλους να είναι λίγο τρομακτικό. Κατά την γνώμη μου, κάτι που έρχεται υπερβολικά κοντά σε ανθρώπινο αλλά δεν είναι, συνήθως φέρνει ανεπιθύμητα συναισθήματα. Βέβαια οι γραμμές είναι λεπτές, οπότε κάτι που σε μένα μοιάζει αφύσικο, σε άλλους μπορεί να φαντάζει αληθινό.

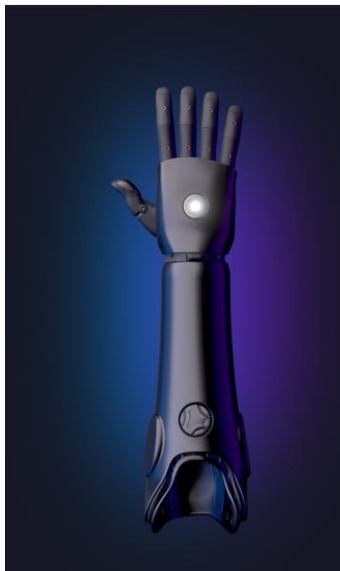
Πολλά άτομα που έχουν χάσει κάποιο άνω μέλος προτιμούν γάντζους, για να εξυπηρετούν τις ανάγκες τους. Ίσως ο λόγος είναι ο οικονομικός, αλλά η Ottobock προσφέρει και για αυτούς τους χρήστες ένα προϊόν.



Εικόνα 1. 16 Γάντζος Ottobock[10]

Παρά την απλή του φύση, δηλαδή άνοιγμα - κλείσιμο, μπορεί να εξυπηρετήσει πολλές ανάγκες του χρήστη. Παρόλα αυτά, δεν θυμίζει πολύ ανθρώπινο χέρι, αν και μπορεί κάποιος να το προτιμήσει.[10]

Μια άλλη εταιρία, που φαίνεται αρκετά ενδιαφέρουσα, είναι η Open bionics. Είναι μια εταιρία που ασχολείται με τον κλάδο της προσθετικής. Πιο συγκεκριμένα, έχει δημιουργήσει το Hero Arm. Το Hero Arm είναι ένας προηγμένος, ελαφρύς, τρισδιάστατος εκτυπωμένος βιονικός βραχίονας, με λειτουργικότητα πολλαπλών λαβών και ενδυναμωτική αισθητική. Κατασκευασμένο στο Ηνωμένο Βασίλειο, είναι πλέον διαθέσιμο σε περισσότερες από 800 τοποθεσίες στις ΗΠΑ, το Ηνωμένο Βασίλειο, την Ευρώπη, την Αυστραλία και τη Νέα Ζηλανδία για άτομα με αναπηρία κάτω από τον αγκώνα. Κατάλληλο για ενήλικες και παιδιά έως 8 ετών.[11]



Εικόνα 1. 17 Hero Arm[11]

Διαθέτει 6 διαφορετικά grip.

1. fist



Εικόνα 1. 18 λαβή Hero Arm Fist[11]

Το Fist Grip είναι η κύρια λαβή ισχύος του Hero Arm. Χρησιμοποιείται για να πιάνει μπουκάλια, διάφορες λαβές ή να σφίγγει το χέρι κάποιου!

2.Hook



Εικόνα 1. 19 λαβή Hero Arm Hook[11]

Το Hook Grip είναι ιδανικό για να μεταφέρει μια τσάντα για ψώνια ή χαρτοφύλακα, αλλά και για χειρονομία μπράβο!

3. Tripod A



Εικόνα 1. 20 λαβή Hero Arm Tripod A[11]

Η λαβή Tripod A παρέχει σταθερή λαβή για μικρά ή λεπτά αντικείμενα, με εκτεταμένα το παράμεσο και μικρό δάχτυλο

4. Tripod B



Εικόνα 1. 21 λαβή Hero Arm Tripod B[11]

Η λαβή Tripod B παρέχει σταθερή λαβή για μικρά ή λεπτά αντικείμενα, με το παράμεσο και μικρό δάχτυλο μαζεμένα.

5. Pinch A



Εικόνα 1. 22 λαθή Hero Arm Pinch A[11]

Χρησιμοποιείται Pinch A για να σηκώνει πολύ μικρά αντικείμενα ή να κάνει μια χειρονομία "OK"! Διατίθεται μόνο σε Medium & Large χέρια.

6. Pinch B



Εικόνα 1. 23 λαθή Hero Arm Pinch B[11]

Το Pinch B για να σηκώνει πολύ μικρά αντικείμενα ή να κάνει μια χειρονομία «έλα εδώ»! Διατίθεται μόνο σε Medium & Large χέρια.

Έχει εύρος περιστροφής καρπού 180 μοίρες, αλλά μόνο στον z άξονα. Επίσης, διαθέτει καλύμματα που βγαίνουν και αλλάζουν, για διαφορετικά στυλ. Εκεί είναι και το αξιοσημείωτο της εταιρίας.



Εικόνα 1. 24 Περικάρτιο Hero Arm[11]

Καθώς αυτή η εταιρία δεν προσπαθεί να δώσει μια αντικατάσταση του ανθρώπινου χεριού που φθάνει κοντά, αλλά να δώσει μια εντελώς διαφορετική οπτική. Πιο συγκεκριμένα, προσπαθεί να κάνει το τεχνικό χέρι εντυπωσιακό και να δημιουργήσει αυτό το γνωστό 'wow effect', ώστε να κάνει και ανθρώπους που δεν το χρειάζονται να το ζηλέψουν. Όπως το λέει και η εταιρία, μεταμορφώνει την αναπηρία σε superpower..

Για παράδειγμα χέρι εμπνευσμένο από τον ήρωα Ironman



Εικόνα 1. 25 Hero Arm IronMan[11]

Αλλά τα παραδείγματα ποικίλλουν



Εικόνα 1. 26 Διαφορετικές επιλογές κελυφών Hero Arm[11]

Αυτό δείχνει μια σχεδιαστική άποψη που δεν προσπαθεί να κρύψει το χέρι, αλλά να το επιβάλλει και το μετατρέπει σε κόσμημα για τον χρήστη και άποψη. Όπως θα φορούσε κάποιος ένα καλοσχεδιασμένο ρολόι.[11]

2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

2.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται το πρόβλημα μέσα από υπάρχουσα βιβλιογραφία και εφαρμογές. Έπειτα, διακρίνονται οι βέλτιστες πρακτικές, ανάγκες και λύσεις και οργανώνονται για να χρησιμοποιηθούν ως χρήσιμο εργαλείο για τα επόμενα κεφάλαια.

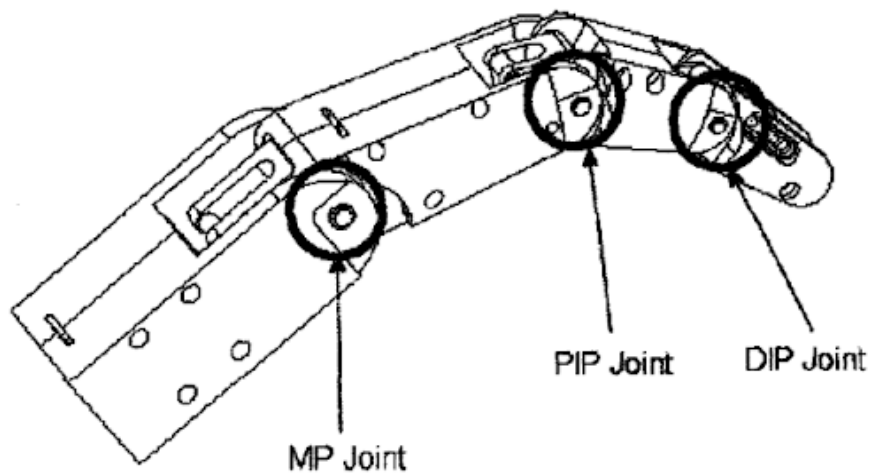
2.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Στο άρθρο «The development of a novel prosthetic hand-ongoing research and preliminary results»[12], στην παράγραφο «Biomechatronic Design», μας δίνει 4 βασικές αρχές που πρέπει να ληφθούν υπόψη έχοντας μεγάλη σημαντικότητα: αισθητική, ικανότητα ελέγχου, έλλειψη θορύβου και ελαφρότητα. Για την αποφυγή "κακής μετάφρασης", θα αναφέρω τους όρους και στην αρχική γλώσσα η οποία είναι η Αγγλική: cosmetics, controllability, noiselessness, lightness. Οπότε τι εννοεί ο αρθρογράφος με αυτούς τους 4 βασικούς όρους;

1. Αισθητική: Ο βραχίονας, για να θεωρηθεί μέλος του ανθρώπινου σώματος, πρέπει ο δέκτης να το αποδεχτεί. Με άλλα λόγια, θα πρέπει το βιομηχανικό χέρι να είναι αισθητικά προσιτό, όπως για παράδειγμα ένα ωραίο παπούτσι ή ρούχο, έτσι ώστε να υπάρχει ένα αίσθημα ικανοποίησης όταν φοριέται από κάποιο άτομο.
2. Ικανότητα ελέγχου: Θα πρέπει να υπάρχουν σημεία ελέγχου, ώστε ο χρήστης να μπορεί να έχει λειτουργίες όσο το δυνατόν όσο ένα πραγματικό χέρι. Αυτά τα σημεία ελέγχου στο ανθρώπινο χέρι λέγονται αρθρώσεις. Οι αρθρώσεις του ανθρώπινου χεριού και του βιομηχανικού θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά.
3. Αθόρυβο: Το χέρι πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο αθόρυβο, καθώς το αληθινό χέρι δεν κάνει κάποιο θόρυβο στη κίνηση.
4. Ελαφρύ: Το χέρι πρέπει να είναι ελαφρύ, ώστε να μην κουράζει τον χρήστη κατά τη χρήση.

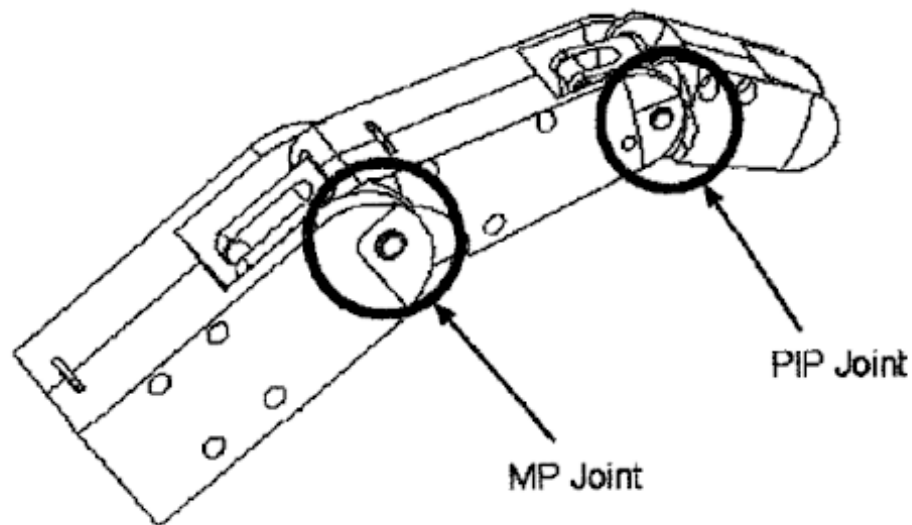
Αν και το επιστημονικό άρθρο είναι γραμμένο το 2002, βοηθάει στην κατανόηση των βασικών ιδεών της ανάπτυξης ενός βραχίονα. Είναι πολύ σημαντικό, σύμφωνα με τον αρθρογράφο, ο χρήστης να νιώθει το τεχνητό χέρι σαν κομμάτι του σώματός του. Εξηγεί ότι ένας βραχίονας πρέπει να μπορεί να αντιγράψει όσο πιο πιστά γίνεται τις κινήσεις ενός πραγματικού χεριού, ώστε να μην υπάρχουν άβολες κινήσεις που καταστρέφουν αυτήν την ψευδαισθήση του χρήστη. Επίσης, σύμφωνα με το άρθρο, πρέπει να αντιγράφονται και άλλα χαρακτηριστικά του πραγματικού βραχίονα, όπως η ικανότητα της αφής, η ικανότητα του πιασίματος αντικειμένων και ένας εύκολος χειρισμός του βραχίονα.

Θα ήθελα όμως, με βάση αυτό το άρθρο, να πάρω τους όρους για τις αρθρώσεις του δαχτύλου που χρησιμοποιεί, που σίγουρα θα φανούν χρήσιμοι παρακάτω:



Εικόνα 2. 1 Ονομασία αρθρώσεων βιβλιογραφίας[12]

Την άρθρωση μεταξύ άκρης και μέσης του δακτύλου την αποκαλεί «DIP», την άρθρωση μεταξύ μέσης και κάτω άκρης του δακτύλου την αποκαλεί «PIP» και την άρθρωση μεταξύ χεριού και δακτύλου την αποκαλεί «MP».



Εικόνα 2. 2 Ονομασία αρθρώσεων βιβλιογραφίας[12]

Το ίδιο ισχύει και για τον αντίχειρα, αλλά χωρίς την άρθρωση DIP. Αυτοί οι όροι θα χρησιμοποιούνται για τις παραπάνω αρθρώσεις.

Στο άρθρο "State of the Art in Artificial Wrists: A Review of Prosthetic and Robotic Wrist Design"[13], ο αρθρογράφος μιλάει για το πώς οι δημιουργοί βιομηχανικών χεριών συνήθως εστιάζουν στο σχεδιασμό των δακτύλων ή καλύτερα στο "grip" του τεχνητού μέλους και όχι τόσο στον καρπό. Ο πιστός, στο πραγματικό χέρι, σχεδιασμός καρπού είναι σημαντικός, καθώς δίνει στον χρήστη την αίσθηση του πραγματικού χεριού και βοηθάει σε μεγάλο βαθμό τη χρήση του ρομποτικού βραχίονα.

Στην παρακάτω εικόνα, μπορούμε να δούμε το μέγιστο εύρος ελευθερίας κινήσεων ενός υγιούς ανθρώπινου καρπού:

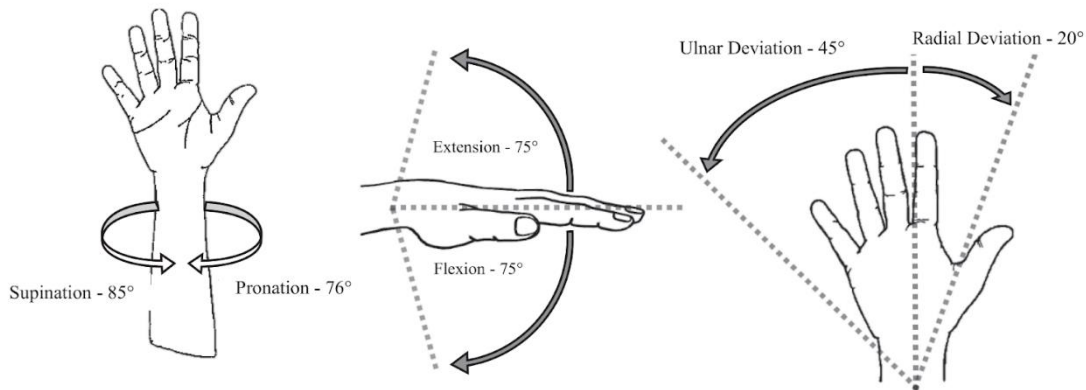


Fig. 1. DOFs of the human wrist and their ranges, shown from a neutral position. From left to right, pronation/supination, flexion/extension, and radial/ulnar deviation.

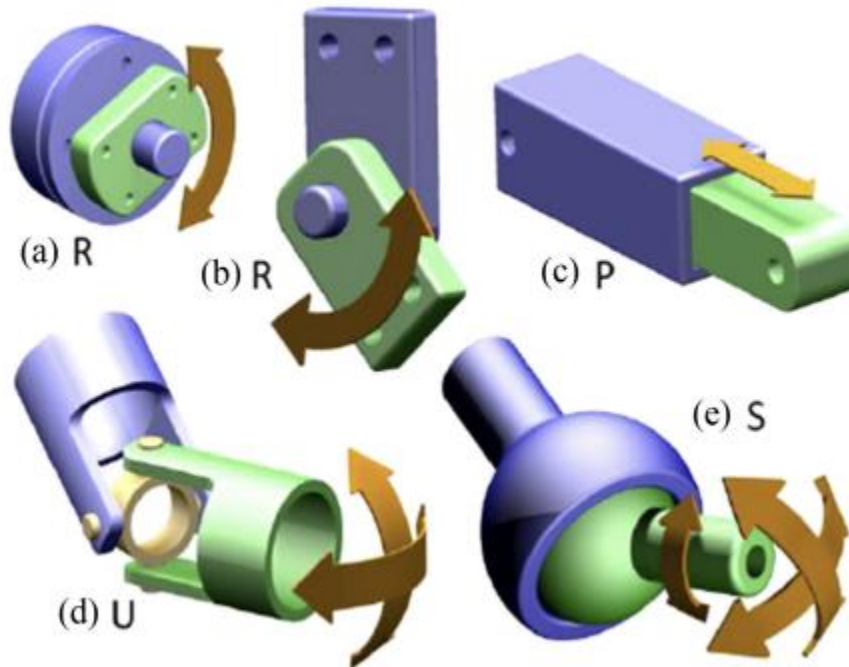
Εικόνα 2. 3 DOFs του καρπού[13]

Τώρα θα ήταν μια καλή στιγμή να μεταφράσουμε, αναλύσουμε και ορίσουμε τους παραπάνω όρους. Στο πρώτο κατά σειρά απεικονιζόμενο χέρι βλέπουμε τους όρους «pronation/supination». Στα ελληνικά λοιπόν, είναι πρηνισμός/υπτιασμός με μέγιστο εύρος πρηνισμού έως 76° μοιρών και υπτιασμού έως 85° μοιρών. Συνεχίζουμε με το δεύτερο απεικονιζόμενο χέρι για τους όρους «flexion/extension», με ελληνική μετάφραση κάμψη/έκταση, με κάμψη 75° και έκταση 75°. Τέλος, «radial/ulnar deviation» με μετάφραση ακτινική/ωλένια απόκλιση, με ακτινική απόκλιση 20° και ωλένια απόκλιση 45°.

Αν και τα μέγιστα εύρη ελευθερίας του ανθρώπου είναι τα παραπάνω, στην εικόνα, στην πραγματικότητα είναι συνηθισμένο να χρησιμοποιούνται μικρότερα εύρη κινήσεων για την ολοκλήρωση καθημερινών εργασιών. Πιο συγκεκριμένα, έως 65°/77° για πρηνισμό/υπτιασμό, έως 50°/70° για κάμψη/έκταση και έως 18°/40° για ακτινική/ωλένια απόκλιση.

Οπότε θα ήταν χρήσιμο για τον χρήστη να έχει τη δυνατότητα αυτών των "χρήσιμων ευρών" του καρπού. Δηλαδή ο καρπός να έχει 3 βαθμούς ελευθερίας με μέγιστο εύρος ελευθερίας κινήσεων αντίστοιχο με τα "χρήσιμα" μέγιστα εύρη κινήσεων: 65°/77°, 50°/70°, 18°/40°.

Συνεχίζει ο αρθρογράφος αναφέροντας αρθρώσεις και συνδέσμους για την εύρεση αρθρώσεων καρπού, με δυνατότητα αυτών των βαθμών ελευθερίας και εύρος κινήσεων που αναζητάμε.



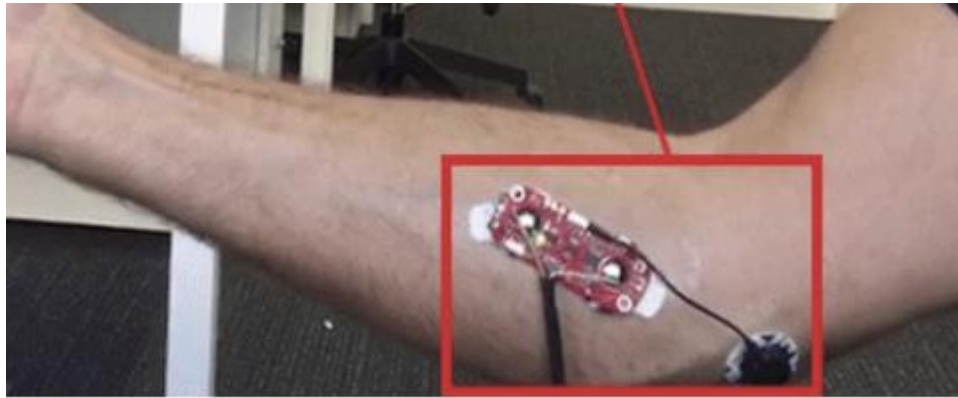
Εικόνα 2. 4 Διάφοροι τύποι αρθρώσεων και συνδέσμων[13]

Εξηγεί ότι υπάρχουν οι εξής αρθρώσεις: Revolute (R), Prismatic (P), Universal (U), and Spherical (S) joints. Θα δανειστούμε κάποιους όρους από το πανεπιστήμιο Θεσσαλίας[14] για να τους εξηγήσουμε. Οι αρθρώσεις a και b είναι περιστροφικές αρθρώσεις. Δηλαδή είναι αρθρώσεις που επιτρέπουν σχετική στροφή μεταξύ δύο γειτονικών συνδέσμων. Δίνουν ένα βαθμό ελευθερίας αφήνοντας το σώμα να περιστραφεί σε ένα επίπεδο και αποκόπτει κάθε άλλη δυνατότητα κίνησης που έχουν τη δυνατότητα της περιστροφής με έναν βαθμό ελευθερίας. Η c είναι πρισματική (ή τηλεσκοπική) άρθρωση που επιτρέπει σχετική μετατόπιση (σε ευθεία γραμμή) μεταξύ δύο γειτονικών συνδέσμων. Οι d και η e είναι σύνθετες αρθρώσεις, δηλαδή αρθρώσεις που αναλύονται γεωμετρικά σε υπέρθεση δύο ή περισσότερων από τις βασικές αρθρώσεις (στροφική και πρισματική). Η d είναι ελεύθερη άρθρωση και δίνει δύο βαθμούς ελευθερίας αφήνοντας δύο περιστροφικές κινήσεις και εμποδίζοντας όλες τις υπόλοιπες. Τέλος η e είναι σφαιρική άρθρωση και δίνει τρεις βαθμούς ελευθερίας αφήνοντας και τις τρεις περιστροφικές κινήσεις ελεύθερες και εμποδίζοντας όλες τις μεταφορικές.

Το να γνωρίζουμε διάφορους τύπους αρθρώσεων θα μας βοηθήσει στην αναζήτηση των βαθμών ελευθερίας και κινήσεων που αναζητούμε. Σίγουρα, όπως φαίνεται και στο άρθρο, υπάρχουν αρκετές επιλογές για την επιτυχία αυτών των στόχων, αλλά πρέπει να ληφθούν υπόψιν περιορισμοί όπως βάρος, κόστος, δυσκολία κατασκευής κτλ.

Υπάρχουν δύο τύποι EMG. EMG επιφάνειας και EMG βελόνας. Το σύστημα EMG επιφάνειας λειτουργεί με την ανάγνωση σημάτων των μυών από το δέρμα του χρήστη με ηλεκτρόδια δέρματος.[15] Για κύριο λόγο την ευκολία χρήσης, αυτό το σύστημα EMG είναι προτιμότερο.

Πρέπει να τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια με ένα να είναι τοποθετημένο στη μέση του μυ, το άλλο πρέπει να βρίσκεται παράλληλα με το χέρι και ευθυγραμμισμένο με την κατεύθυνση του μήκους του. Τέλος, το τρίτο σκέλος, που είναι συνδεδεμένο στον αισθητήρα με καλώδιο, χρειάζεται να τοποθετηθεί σε κόκαλο ή μη σχετικό μυ κοντά στον μυ που δέχεται την μέτρηση για να γίνεται σωστή μέτρηση[4]



Εικόνα 2. 5 Ένδειξη τοποθέτησης Myoware αισθητήρα[16]

Με μετρήσεις από το χέρι μου φαίνεται ότι το χέρι είναι κάπου 20 εκ. και ο πήχης(από τον αγκώνα έως τον καρπό) κάπου στα 27 εκ. Σημαντικό θα ήταν ο βραχίονας που θα κατασκευαστεί να είναι κοντά σε αυτές τις διαστάσεις. Συνήθως τα βιομηχανικά χέρια έχουν μεγαλύτερες διαστάσεις συγκριτικά με τα πραγματικά για λόγους χρήσης και κατασκευής. Αν το χέρι έχει διαστάσεις μεγαλύτερες από 20 εκ. και μικρότερες 25 εκ. μήκος θα είναι ιδανικό.

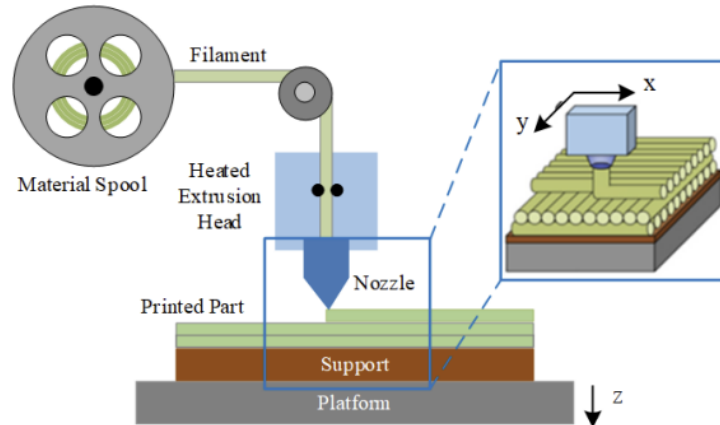
Η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης, επίσης γνωστή ως προσθετική κατασκευή, επιτρέπει τη δημιουργία αντικειμένων με τη στρώση υλικού σε επίπεδα, ακολουθώντας τον ψηφιακό σχεδιασμό μέσω υπολογιστή. Η τεχνολογία αυτή πρωτοεμφανίστηκε εμπορικά το 1980 από τον Charles Hull και αρχικά χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία πρωτότυπων προϊόντων. Πλέον, επεκτείνεται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής τεχνητών αντλιών καρδιάς, κοσμημάτων, κινητήρων πυραύλων PGA, προϊόντων αεροπορικής βιομηχανίας και τροφίμων. [17] Ένα εντυπωσιακό παράδειγμα της εξέλιξης αυτής της τεχνολογίας είναι η πρώτη ατσάλινη γέφυρα που κατασκευάστηκε αποκλειστικά με τη χρήση τρισδιάστατης εκτύπωσης στο Άμστερνταμ και ολοκληρώθηκε το 2018. [18]



Εικόνα 2. 6 Ατσάλινη γέφυρα κατασκευασμένη με προσθετική κατασκευή [18]

Οι διάφορες τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης χωρίζονται σε επτά κατηγορίες, σύμφωνα με το διεθνές πρωτόκολλο ASTM F2792 (2019). Αυτές οι κατηγορίες περιλαμβάνουν την εξώθηση υλικού, την εκτόξευση συνδετικού υλικού, την κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας, την εναπόθεση φύλλων υλικού, τον φωτοπολυμερισμό, τον ψεκασμό υλικού και τη σύντηξη σκόνης σε κλίνη. Κάθε κατηγορία χρησιμοποιείται για διάφορες εφαρμογές, έχει διαφορετικές προδιαγραφές εκτύπωσης και αφορά διαφορετικά υλικά [17].

Η εξώθηση υλικού (Material extrusion) αποτελεί μία δημοφιλή και οικονομική μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης. Αυτή η τεχνολογία είναι κατάλληλη για την εκτύπωση αντικειμένων από πλαστικό, εδώδιμα υλικά και ακόμη και κύτταρα. Κατά τη διαδικασία μοντελοποίησης και εναπόθεσης τήγματος (Fusion Deposition Modelling - FDM), χρησιμοποιείται ένα συνεχές θερμοπλαστικό πολυμερικό νήμα μερικών χιλιοστών διαμέτρου. Το νήμα θερμαίνεται, γίνεται ρευστό και στη συνέχεια εκτοξεύεται μέσω ενός extruder. [17], [19], [20]



Εικόνα 2. 7 Προσθετική κατασκευή τεχνολογίας FDM[20]

Το υλικό για εκτύπωση παραμένει σε μορφή κυλινδρικού νήματος και εισάγεται στη θερμαινόμενη κεφαλή, οδηγούμενο από τον εξωθητή. Το στόμιο κινείται σε θέσεις που καθορίζονται από το σχέδιο εκτύπωσης σε διαφορετικές διαστάσεις (στο επίπεδο x-y και στον άξονα z κατά τα διαδοχικά στρώματα υλικού). Σε κάθε θέση, το τήγμα εξέρχεται από το στόμιο και τοποθετείται σε επιφάνεια χαμηλότερης θερμοκρασίας, στερεοποιώντας εκ νέου και λαμβάνοντας το επιθυμητό σχήμα. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε διαδοχικό στρώμα υλικού, κατά κάθετη κατεύθυνση στην επιφάνεια εναπόθεσης. Συχνά, αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιεί πολυμερή υλικά σε μορφή κυλινδρικής μήτρας.

Η τεχνική εκτόξευσης συνδεδετικού υλικού είναι μια διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρειάζεται λίγο χρόνο και είναι κατάλληλη για τη δημιουργία μεγάλων αντικειμένων. Η διαδικασία ξεκινά με την εναπόθεση υλικού σε μορφή κόκκων σε ολόκληρη την επιφάνεια του επιπέδου. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται μια στρώση συνδεδετικού υλικού σε υγρή μορφή, μόνο στα επιθυμητά σημεία. Αυτό το υλικό διεισδύει μεταξύ των κόκκων και στερεοποιείται, σχηματίζοντας το επιθυμητό αντικείμενο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να δημιουργηθεί το πλήρες αντικείμενο.

Η κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας (DED) αφορά ένα ευρύτερο φάσμα υλικών, όπως κεραμικά, μέταλλα, υβρίδια, και πολυμερή, τα οποία παρουσιάζονται ως νήματα ή σκόνη. Κατά τη διαδικασία αυτή, χρησιμοποιείται μια πηγή ενέργειας, συνήθως ένα λέιζερ, για να λιώσει το υλικό κατά την εναπόθεσή του, επιτυγχάνοντας τη σύνδεση με τον υπόλοιπο όγκο. Αυτή η τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμη και για επισκευές εξαρτημάτων.

Η εναπόθεση φύλλων (sheet lamination) αναφέρεται στη σύνδεση φύλλων υλικού, συνήθως μεταλλικού, τα οποία θερμαίνονται και συμπιέζονται καθώς ταυτόχρονα κόβονται με λέιζερ για τον σχηματισμό του επιθυμητού αντικείμενου. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να δημιουργηθεί το τελικό αντικείμενο. Παραδείγματα αυτής της τεχνολογίας είναι η πολυστρωματική κατασκευή (LOM) και η κατασκευή πρόσθετων μέσω υπερήχων (UAM).

Ο φωτοπολυμερισμός (vat photopolymerization) είναι η πιο κοινή τεχνική σήμερα, όπου φωτοαντιδραστικά πολυμερή σκληρύνουν μέσω λέιζερ. Αυτή η τεχνική περιλαμβάνει μεθόδους όπως η στερεολιθιογραφία (SLA) και η ψηφιακή επεξεργασία φωτός (DLP), όπου τα αντικείμενα σχηματίζονται

στρώμα-προς-στρώμα. Η πηγή υπεριώδους φωτός στερεοποιεί το υλικό μετά τον ψεκασμό του, επιτυγχάνοντας υψηλή ακρίβεια και λείες επιφάνειες.

Η σύντηξη σκόνης σε κλίνη (Powder bed Fusion) αποτελεί μια διαδικασία κατασκευής τρισδιάστατων αντικειμένων, όπου χρησιμοποιείται είτε λέιζερ είτε δέσμη ηλεκτρονίων για να λιώσει σκόνη υλικού. Κατά τη διαδικασία αυτή, οι κόκκοι σκόνης τοποθετούνται στρώμα-πάνω-σε-στρώμα και στη συνέχεια λιώνουν και σκληραίνουν, δημιουργώντας έτσι την τελική τρισδιάστατη δομή του αντικειμένου. Αυτή η τεχνική περιλαμβάνει μεθόδους όπως η τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων (EBM), η επιλεκτική πυροσυσσώματωση με λέιζερ (SLS) και η εκτύπωση επιλεκτικής θερμικής πυροσυσσώματωσης (SHS). Αυτές οι μέθοδοι επιτρέπουν τη γρήγορη εκτύπωση με υψηλή ακρίβεια, ενώ επιτρέπεται και η επιλεκτική επεξεργασία της εξωτερικής επιφάνειας του τελικού αντικειμένου. [17]

Για να υπάρχει μια οργανωμένη και συνοπτική εικόνα, θα δανεισθεί ο παρακάτω πίνακας με τις δημοφιλείς διαδικασίες και τις τεχνολογίες τους για να γίνει και η αξιολόγησή τους.[19]

Διαδικασίες	Τεχνολογίες
Εξώθηση υλικού(Material extrusion)	FDM
Σύντηξη σκόνης σε κλίνη(Powder bed Fusion)	3DP , EBM , SLM , SHS , SLS
Φωτοπολυμερισμός (vat photopolymerization)	SLA , DLP , CLIP
Εναπόθεση φύλλων (sheet lamination)	LOM

Πίνακας 2. 1 Διαδικασίες και τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής[19]

Ο παρακάτω πίνακας δίνει μια συνοπτική σύγκριση μεταξύ των δημοφιλέστερων τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής.[19]

Τεχνολογίες	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
FDM	Ποικιλία χρωμάτων, απλό, ποικιλία υλικών, μεγάλη ταχύτητα	Είναι απαραίτητη η χρήση Support για περίπλοκες γεωμετρίες, αδύναμες μηχανικές ιδιότητες, περιορισμένη ανάλυση, φτωχό φινίρισμα επιφανειών
SLS	Μεγάλα κομμάτια, ποικιλία υλικών, customized προϊόντα, γρήγορη διαδικασία, μεγάλη αντοχή και στιβαρότητα	Απαιτείται μετα-επεξεργασία, ακριβή διαδικασία
SLA	Λιγότερο χρονοβόρο, customized χρώματα, λεπτομερή μεγάλα εκτυπωμένα κομμάτια, υψηλή ποιότητα, λεπτομερής ανάλυση	Περιορισμένα υλικά, πιθανά εύθραυστα εξαρτήματα, ακριβές δομές support για κομμάτια με overhangs
LOM	Μείωση ώρα παραγωγής, ποικιλία υλικών, μεγαλύτερα structures, μείωση κόστος μητρώων	Υποδεέστερη ποιότητα επιφανειών, απαιτείται μετα-επεξεργασία, περιορισμοί για πολύ περίπλοκα σχήματα
DLP	Μεγάλη ακρίβεια, λεπτομερής ανάλυση, ποικιλία υλικών, γρήγορη διαδικασία	Ακριβή διαδικασία, απαιτείται μετα-επεξεργασία

Πίνακας 2. 2 Σύγκριση τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής[19]

Το FDM έχει χαμηλότερο κόστος παραγωγής και αρκετοί από αυτούς τους εκτυπωτές χρησιμοποιούνται για εφαρμογές οικιακής χρήσης. Η κακή επιφάνεια και η περιορισμένη ανάλυση των μοντέλων είναι δύο από τα κύρια μειονεκτήματα.

Με SLS κομμάτια με πολύπλοκη εσωτερική δομή, λεπτομερή ανάλυση και ακρίβεια μπορούν να παραχθούν. Χρησιμοποιείται ευρέως για customized εξαρτήματα, αλλά είναι πιο ακριβή από άλλες τεχνολογίες.

Το SLA από την άλλη είναι μια από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες για την κατασκευή πρωτοτύπων και κατασκευή μοντέλων υψηλής ποιότητας και λεπτομερούς ανάλυσης. Είναι λιγότερο χρονοβόρα από άλλες τεχνολογίες αλλά είναι επίσης ακριβή.

Το LOM μπορεί να έχει μικρότερη ακρίβεια διαστάσεων σε σχέση με τις μεθόδους σκόνης, αλλά είναι μία από τις καλύτερες επιλογές για μεγαλύτερες κατασκευές. Χρησιμοποιεί ποικιλία υλικών, μειώνει τον χρόνο κατασκευής και το κόστος εργαλείων.[19]

Σύμφωνα με την παραπάνω βιβλιογραφία η τεχνολογία SLS, παρότι έχει ποικιλία υλικών, είναι γρήγορη διαδικασία και υψηλής αντοχής και στιβαρότητας, τα μειονεκτήματά της, δηλαδή η υψηλή της τιμή διαδικασίας και μεγάλη μετα-επεξεργασία δεν την κάνουν ιδανική επιλογή. Η τεχνολογία SLA, αρχικά φαίνεται πολύ καλή επιλογή με την υψηλή εκτυπωτική της ποιότητα και λεπτομερή ανάλυση στα μοντέλα, χωρίς ιδιαίτερο χρόνο εκτύπωσης. Επίσης, η ιδέα ότι χρησιμοποιείται αρκετά για

πρωτότυπα είναι σίγουρα κάτι που αξίζει προσοχή. Αλλά, τα μειονεκτήματα, περιορισμένα υλικά, ακριβές δομές support και εύθραυστα κομμάτια σε σχέση με άλλες τεχνολογίες την θέτουν σε πιο χαμηλή θέση της λίστας επιλογής. Η τεχνολογία LOM είναι κατάλληλη για μεγάλα κομμάτια εκτύπωσης και όχι τόσο για μικρά κομμάτια λόγω της μικρότερης της ακρίβειας σε σχέση με άλλες τεχνολογίες. Αυτό την καθιστά μη κατάλληλη για το πρότζεκτ αυτό. Η τεχνολογία DLP είναι γρήγορη, έχοντας υψηλή ακρίβεια και λεπτομερή ανάλυση με ποικιλία υλικών, αλλά όπως και η SLS είναι ακριβή διαδικασία και χρειάζεται αρκετή μετα-επεξεργασία σε σχέση με άλλες τεχνολογίες. Οπότε η ιδανική τεχνολογία είναι η τεχνολογία FDM. Η ποικιλία χρωμάτων της, που θα επιτρέψει την κατάλληλα αισθητικά επιλογή του βιομηχανικού χεριού, η απλότητά της, που λόγω αυτής υπάρχουν μηχανήματα αυτής της τεχνολογίας σε πολλά σπίτια, δίνοντας τους πρόσβαση χιλιάδες μοντέλα σχεδιασμένα με αυτήν την τεχνολογία, η ποικιλία υλικών για αυτήν την τεχνολογία, που επιτρέπουν να επιλεγθεί ιδανικό υλικό για το χέρι και η υψηλή ταχύτητα της που μεταφράζεται σε μείωση κόστους αν το πρότζεκτ έχει επιχειρηματική προοπτική, δεν μπορούν να παραλειφθούν. Από την άλλη τα μειονεκτήματα της μπορούν να βελτιωθούν ή ακόμα και να ξεπεραστούν. Πιο συγκεκριμένα, το μειονέκτημα ότι χρειάζεται Supports για περίπλοκες δομές, μπορεί να λυθεί με σχεδίαση με κριτήριο την μείωση ή την εξάλειψη, για παράδειγμα ένα αρκετά περίπλοκο κομμάτι και δύσκολο για εκτύπωση να χωριστεί σε δύο πιο απλά στην εκτύπωσή τους. Το μειονέκτημα, αδύναμες μηχανικές ιδιότητες θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί με κατάλληλες γεωμετρικές με στόχο την υψηλή αντοχή των εξαρτημάτων του χεριού. Η περιορισμένη ανάλυση μπορεί να φανεί καλή πρόκληση κατά τον σχεδιασμό του χεριού, αλλά καλές σχεδιαστικές αρχές και διαστασιολογικές ανοχές όπως και διαστασιολογικά όρια την θέτουν αρκετή για το πρότζεκτ. Το μειονέκτημα του φτωχού φινιρίσματος μπορεί να βελτιωθεί με την κατάλληλο προσανατολισμό του μοντέλου κατά την εκτύπωση, όπου θα γίνει ανάλυση σε επόμενα κεφάλαια. Φαίνεται πως όλα τα μειονεκτήματα επηρεάζουν τη σχεδίαση και κατασκευή. Οπότε, αν γίνουν τα απαραίτητα βήματα για να εξασφαλίσουν μια σωστή εκτέλεση της τεχνολογίας, μπορεί η διαδικασία εκτύπωσης να επαναληφθεί από χρήστες χωρίς ιδιαίτερη γνώση για το αντικείμενο. Αυτό την καθιστά ιδανική, προσφέροντας προσβασιμότητα στο πρότζεκτ αν επιτευχθεί σε ευρύ κοινό, καθώς και το μικρό κόστος της, η μεγάλη ταχύτητα και τα υπόλοιπα πλεονεκτήματα που συζητήθηκαν παραπάνω.

2.3 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ

Η παραπάνω μελέτη είναι χρήσιμη αλλά, για να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για τα επόμενα βήματα, πρέπει να οργανωθεί και να αναλυθεί. Οπότε θα φτιαχτεί λίστα με απαιτήσεις και προδιαγραφές σαν οδηγός για τα παρακάτω βήματα.

1. Να είναι αισθητικά προσιτό.
2. Να έχει τόσες αρθρώσεις όσες και ένα πραγματικό ανθρώπινο χέρι.
3. Να είναι αθόρυβο.
4. Να είναι ελαφρύ.
5. Να έχει κινήσεις πιστές με ένα πραγματικό χέρι.
6. Εύκολος χειρισμός του βραχίονα.
7. Ικανότητα αφής.
8. Να έχει μέγιστο εύρος ελευθερίας κινήσεων καρπού όπως των χρήσιμων πραγματικών ευρών.
9. Να είναι προσβάσιμο σε ευρύ κοινό.
10. Να είναι κατασκευασμένο με τεχνολογία προσθετικής κατασκευής και συγκεκριμένα FDM
11. Να έχει αρκετή δύναμη για να σηκώνει αντικείμενα της καθημερινότητας
12. Να έχει σωστή εργονομία για να είναι χρηστικό
13. Να είναι οικονομικό
14. Να έχει ανθρώπινα χαρακτηριστικά

2.4 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ

Βάση των αναγκών και της παραπάνω βιβλιογραφίας θα οριστούν προδιαγραφές. Φυσικά δεν είναι εφικτό να καλύπτονται όλες οι ανάγκες με τα 'εργαλεία' που παρέχονται. Αλλά προσεγγίζονται οι πιο σημαντικές.

1. 7 βαθμοί ελευθερίας
 - a. Έναν σε κάθε δάχτυλο
 - b. Δύο στον καρπό με περιστροφή στον Z και X άξονα
2. Αισθητική εμπνευσμένη από τεχνολογικά ανεπτυγμένο ρομπότ
3. Γεωμετρία και αισθητική κοντά στο ανθρώπινο χέρι
4. Βάση για παρουσίαση με παρόμοια αισθητική
5. Μήκος χεριού μικρότερη 20 εκ. και μεγαλύτερη από 25 εκ.
6. Μήκος βάσης μεγαλύτερη από 27 εκ. και μικρότερη από 30 εκ.
7. Εύρος ελευθερίας κινήσεων έως 65°/65° για πρηγισμό/υπτιασμό
8. Εύρος ελευθερίας κινήσεων έως 35°/25° για κάμψη/έκταση
9. Αισθητική εμπνευσμένη από τεχνολογικά ανεπτυγμένο ρομπότ
10. Βάρος χεριού χωρίς βάση κάτω από 0.5 kg
11. Κόστος λιγότερο από 1000 ευρώ
12. Χειρισμός αντιβραχίου με τεχνολογία EMG και συγκεκριμένα τεχνολογία FDM
13. Ικανότητα αυτόματων κινήσεων και όχι χειροκίνητων
14. Εργονομική αρπαγή κατάλληλη για αντικείμενα της καθημερινότητας όπως ένα μπουκάλι
15. Αρκετή δύναμη για αρπαγή αντικειμένων της καθημερινότητας
16. Μέθοδος κατασκευής προσθετική κατασκευή
17. Χρώμα μαύρο και άσπρο και υπο-αποχρώσεις του όπως γκρι
18. Ικανότητα αρπαγής καθημερινών αντικειμένων
19. Ικανότητα προσομοίωσης διαφόρων λαβών για διαφορετικές καταστάσεις και απαιτήσεις

3. ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

3.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Σε αυτό το κεφάλαιο επιλύεται το πρόβλημα, με βάση την έρευνα που έγινε στα προηγούμενα κεφάλαια. Θα χρησιμοποιηθεί προγραμματισμός, σχεδιασμός, κατασκευή και αξιολόγηση, για να έρθει ένα λειτουργικό και χρηστικό αποτέλεσμα αντιβραχίου με τεχνολογία προσθετικής κατασκευής.

3.2 ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ

3.2.1 Ανάλυση εξαρτημάτων

Για μικροεπεξεργαστή, που είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο των ηλεκτρονικών μέσα στο βιομηχανικό χέρι, επιλέχθηκε η πλακέτα Arduino nano CH340 - Atmel Atmega328P-AU, καθώς το μέγεθος, η τιμή και η ισχύ της είναι σχεδόν ιδανικά για το project.

Για αισθητήρα κίνησης του μυ[21], επιλέχθηκε ο πολύ δημοφιλής αισθητήρας της Mgoware. Όπως φάνηκε και παραπάνω, πολλά project και μελέτες επιλέγουν αυτόν τον αισθητήρα καθώς προσφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε οικονομική τιμή. Φυσικά, για να έχει την δυνατότητα ο αισθητήρας να διαβάσει τα σήματα από τους μύες, χρειάζονται ηλεκτρόδια δέρματος. Για να καταγράφονται αυτά τα σήματα και να επεξεργάζονται, χρησιμοποιείται μια πλακέτα Arduino Uno. Ο λόγος που επιλέχθηκε είναι για έχει την απαραίτητη δύναμη που χρειαζόμαστε, είναι από τις πιο, αν όχι η πιο, δημοφιλής πλακέτα Arduino και την είχα ήδη διαθέσιμη.

Η επικοινωνία μεταξύ των δύο μικροεπεξεργαστών γίνεται με τον σένσορα NRF24L01. Ο nRF24L01 είναι ένας πομποδέκτης τσιπ 2,4 GHz με ενσωματωμένο κινητήρα πρωτοκόλλου βασικής ζώνης (Enhanced ShockBurst™), σχεδιασμένο για ασύρματες εφαρμογές εξαιρετικά χαμηλής ισχύος. Το nRF24L01 έχει σχεδιαστεί για λειτουργία στην παγκόσμια ζώνη συχνοτήτων ISM στα 2.400-2.4835 GHz. Μπορεί να λειτουργήσει με ρυθμούς baud από 250 kbps έως 2 Mbps. Εάν χρησιμοποιηθεί σε ανοιχτό χώρο και με χαμηλότερο ρυθμό baud, η εμβέλεια του μπορεί να φτάσει έως και τα 100 μέτρα.[22] Μπορεί να λειτουργεί και σαν πομπός αλλά και σαν δέκτης, οπότε με δύο αισθητήρες nrf24L01 μπορούμε να έχουμε ασύρματη επικοινωνία μεταξύ των Arduino πλακετών.

Επίσης χρησιμοποιήθηκε η πλακέτα Adafruit PCA9685 για ασφαλέστερο χειρισμό των servo motors, αλλά και για καλύτερα οργανωμένο σύστημα, χωρίς να γεμίζει η πλακέτα Arduino με καλώδια και για εξοικονόμηση στις θέσεις.<< Η οδήγηση σερβοκινητήρων με τη βιβλιοθήκη Arduino Servo είναι αρκετά εύκολη, αλλά ο καθένας καταναλώνει μια πολύτιμη θέση pin - για να μην αναφέρουμε κάποια ισχύ επεξεργασίας Arduino. Το Adafruit 16-Channel 12-bit PWM/Servo Driver θα οδηγήσει έως και 16 σερβομηχανισμούς μέσω I2C με μόνο 2 pin. Ο ενσωματωμένος ελεγκτής PWM θα οδηγεί και τα 16 κανάλια ταυτόχρονα χωρίς επιπλέον έξοδα επεξεργασίας Arduino. Επιπλέον, μπορείτε να συνδέσετε έως και 62 από αυτά για να ελέγξετε έως και 992 σερβομηχανισμούς - όλα με τις ίδιες 2 ακίδες! >>[23].

Για την κίνηση των δαχτύλων αλλά και τη περιστροφή του καρπού στον Z άξονα, επιλέχθηκαν servo motors. ο σερβοκινητήρας (ή σερβοκινητήρας ή απλά σερβοκινητήρας) είναι ένας περιστροφικός ή γραμμικός actuator, που επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο της γωνιακής ή γραμμικής θέσης, της ταχύτητας και της επιτάχυνσης σε ένα μηχανικό σύστημα. Αποτελεί μέρος ενός σερβομηχανισμού και

αποτελείται από έναν κατάλληλο κινητήρα συνδεδεμένο με έναν αισθητήρα για ανάδραση θέσης. Απαιτεί επίσης έναν σχετικά εξελιγμένο ελεγκτή, συχνά μια ειδική μονάδα που έχει σχεδιαστεί ειδικά για χρήση με σερβοκινητήρες.[24] Συνήθως τα servo motor έχουν εύρος κίνησης 180 μοιρών. Λόγω της αυξημένης ροπής και οικονομίας και απαιτήσεις τροφοδοσίας τους, σε σχέση με ένα ανάλογο DC motor, αλλά και παραδείγματα υλοποίησης όπως το χέρι της InMoov, επιλέχθηκε να είναι όλοι οι κινητήρες κίνησης στο χέρι servo motors.

Το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί για τις εκτυπώσεις είναι Flimanet (νήμα) PLA. Το Polylactic Acid (PLA) είναι ένας ανακυκλώσιμος, φυσικός θερμοπλαστικός πολυεστέρας που προέρχεται από ανανεώσιμους πόρους όπως το άμυλο καλαμποκιού ή το ζαχαροκάλαμο. Το νήμα είναι βιοδιασπώμενο υπό ορισμένες συνθήκες με υψηλή θερμοχωρητικότητα και υψηλή μηχανική αντοχή. Μπορεί να λιώσει χωρίς σημαντικές βλάβες και δεν εκπέμπει τοξίνες ή αναθυμιάσεις. Με Tensile Strength: 38 - 47.8 MPa και Flexural Strength: \cong 85 MPa[25]. Αυτό και η δημοφιλία του στο χόμπι της 3D εκτύπωσης το καθιστούν ιδανικό, καθώς έχει αρκετή αντοχή, εκτυπώνεται εύκολα σε μικρές θερμοκρασίες και βγαίνει σε πολλά διαφορετικά χρώματα, με μόνο μειονέκτημα την αντοχή του στις εξωτερικές συνθήκες, λόγω του ότι έχει Glass Transition Temp: \cong 53 °C[25].

3.2.2 Λίστα

1. Arduino nano CH340 - Atmel Atmega328P-AU – 7 ευρώ
2. Arduino Uno – 25 ευρώ
3. Adafruit PCA9685 16-Channel Servo Driver - 6.8 ευρώ
4. NRF24L01 X2 – 2 ευρώ το ένα
5. MG996R X6 - 5 με 15 ευρώ το ένα
6. MG90S - 8 ευρώ
7. MyoWare Muscle Sensor – 35 ευρώ
8. Αυτοκόλλητο Ηλεκτρόδιο Καρδιολογικό \varnothing 5.5cm F-55 X 3- 3 ευρώ τα 30
9. DC Power Jack 5.5 x 2.1mm Barrel Female – 0.5 ευρώ
10. Dowel Pin 304 3X18mm X 14 - 8 ευρώ τα 25
11. Precision Shaft - D5mm x L50mm - 0.5 ευρώ
12. D-Shaft (1/4"D x 1.00"L) – 1 ευρώ
13. Ball Bearing - Flanged (1/4" Bore, 1/2" OD) – 5.8 ευρώ τα 2
14. Ρουλεμάν - 605ZZ (5mm Bore, 14mm OD) X 2 - 0.5 ευρώ το ένα
15. Ρουλεμάν - MR83ZZ (3mm Bore, 8mm OD) X 28 – 0.4 ευρώ το ένα
16. Παξιμάδι M5 Μεταλλικό H4mm – 0.2 ευρώ τα 10
17. Βίδα M5 - L20mm DIN912 Μαύρη X 3 – 0.6 ευρώ τα 10
18. Βίδα M2.5 - L8mm DIN7985 X 3 – 1.1 ευρώ τα 100
19. Βίδα M3 - L12mm DIN7985 Μαύρη X 25 – 1.6 ευρώ τα 100
20. Βίδα M2 - L6mm DIN7985 X 5 – 0.8 ευρώ τα 100
21. Για τα Horns χρησιμοποιήθηκαν οι βίδες των μοτέρ
22. Νήμα 0.685 mm 49.3 LB – 20 ευρώ τα 30 μέτρα
23. PLA Filament άσπρο – 19 ευρώ το 1 kg
24. PLA Filament μαύρο – 19 ευρώ το 1 kg
25. Jumper wires – 2 ευρώ τα 10

Σύνολο: 193.1 ευρώ.

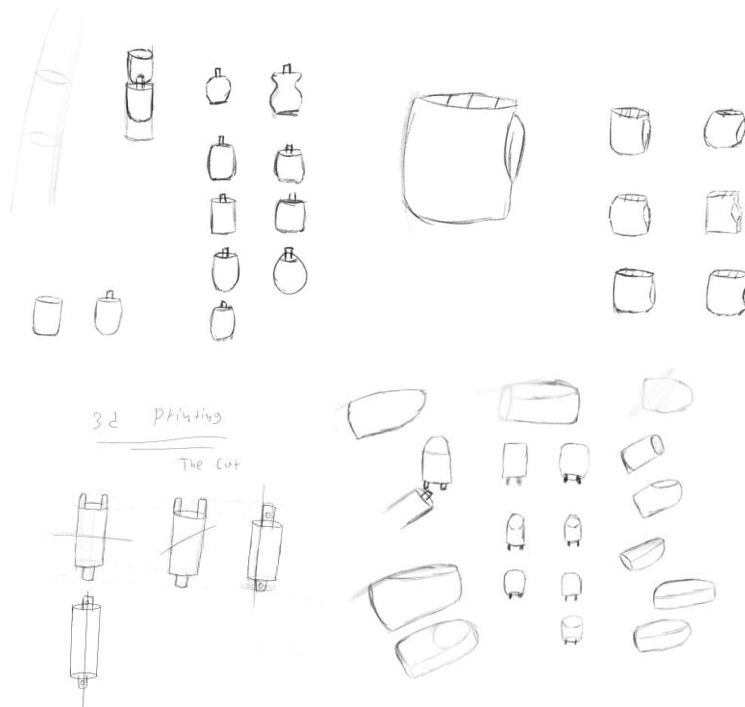
3.3 ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΗ ΠΟΡΕΙΑ

Ο σχεδιασμός στο συγκεκριμένο εγχείρημα λαμβάνει πολύ σημαντικό και καθοριστικό ρόλο, καθώς η λειτουργικότητα, η αισθητική και η προσβασιμότητα είναι κάποια από τα κύρια χαρακτηριστικά, που θα βάσιζε κάποιος την επιλογή του για ένα κατασκεύασμα, που κυριολεκτικά θα ήταν προσθήκη του χεριού του.

Το πρόγραμμα CAD, που χρησιμοποιήθηκε για αυτό το project, είναι το Fusion 360. Το Fusion 360 είναι μια εμπορική εφαρμογή computer-aided design (CAD), computer-aided manufacturing (CAM), computer-aided engineering (CAE) και σχεδιασμού πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος (PCB), που αναπτύχθηκε από την Autodesk. Είναι διαθέσιμο για Windows, macOS και πρόγραμμα περιήγησης ιστού, με απλοποιημένες εφαρμογές διαθέσιμες για Android και iOS. Το Fusion 360 έχει άδεια χρήσης ως συνδρομή επί πληρωμή, με μια δωρεάν περιορισμένη, μη εμπορική προσωπική έκδοση, διαθέσιμη για το σπίτι. [26] Οπότε, όπως φαίνεται από τα παραπάνω, καλύπτει όλες τις απαραίτητες ανάγκες για να δημιουργηθεί ένα μοντέλο βιομηχανικού χεριού με μέθοδο τεχνολογία προσθετικής κατασκευής με επιτυχία. Ο λόγος που επιλέχθηκε, σε σύγκριση με άλλα, είναι γιατί κατά τη γνώμη μου είναι πολύ βοηθητικό πρόγραμμα για την δημιουργία νέων ιδεών και 'ανέχεται' περισσότερα λάθη και αλλαγές σε σχέση με άλλα παραμετρικά σχεδιαστικά προγράμματα. Οπότε, καθώς αυτό το Project έχει μεγάλη απαίτηση σε βαθμό δημιουργικότητας και συνεχών μικρο-αλλαγών, έγινε αυτή η επιλογή.

Η αισθητική είναι ένας από αυτούς τους σημαντικούς παράγοντες, που θα εξασφαλίσουν ότι το project είχε επιτυχή αποτελέσματα. Βάση βιβλιογραφίας[27], υπαρχουσών λύσεων[10], [11] και προσωπικής έρευνας, έγινε αντιληπτό πόσο μεγάλη σημασία έχει η αισθητική σε ένα προσθετικό μέλος και σε ποια χαρακτηριστικά πρέπει να εστιάσει για να γίνει σωστά. Δεν είναι μόνο ένα χαρακτηριστικό που βοηθάει τον πωλητή ή τον κατασκευαστή να έχει περισσότερες πωλήσεις, αλλά στην συγκεκριμένη περίπτωση, είναι ένα εργαλείο που βοηθάει τον χρήστη στην αποφυγή κοινωνικών επιπλοκών. Είναι ένα χαρακτηριστικό που, αν γίνει σωστά, μπορεί να κάνει τον χρήστη να έχει περισσότερη αυτοπεποίθηση χρησιμοποιώντας το προϊόν, να νιώθει καλύτερα και να είναι, κατά μια έννοια, περισσότερο κοινωνικά αποδεκτός. Οπότε, πολλές πηγές[11], [27] ανέφεραν πως όσο πιο πιστό είναι σε ένα αληθινό χέρι, τόσο το καλύτερο, αλλά κάποιες φορές δεν είναι η μοναδική λύση. Το να γίνει ένα πιστό αντίγραφο του ανθρώπινου χεριού είναι σχεδόν αδύνατο, αλλά μπορεί να γίνει μια ζεύξη μεταξύ ανθρώπινου χεριού και ρομποτικής. Αυτό λοιπόν ήταν η πρωτότυπη ιδέα, ένα βιομηχανικό χέρι που έχει τα χαρακτηριστικά του ανθρώπινου χεριού, 5 δάχτυλα, αντίχειρα, πιστές αναλογίες μεγεθών κτλ. Αλλά με αισθητική εμπνευσμένη από βιομηχανικά ρομπότ, που εμπνέουν την αιχμή της τεχνολογίας. Με αυτόν το τρόπο, ο χρήστης δεν θα έχει στην κατοχή του ένα πρόσθετο μέλος που μοιάζει φυσικό, αλλά και ένα τεχνολογικό στολίδι που θα του δίνει χαρακτήρα και κύρος, όπως ένα καλοφτιαγμένο ρολόι.

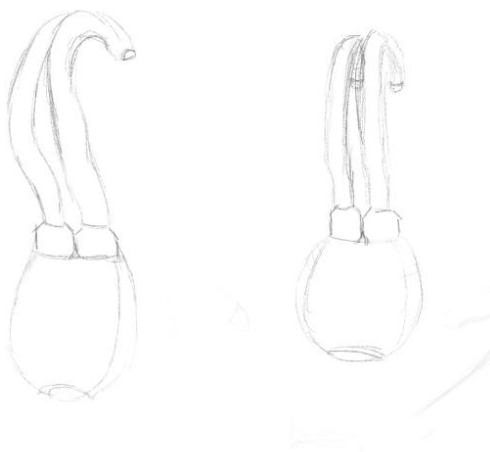
Έμπνευση. Όπως αναφέρεται παραπάνω, η αισθητική είναι από βιομηχανικά ρομπότ που εμπνέουν την αιχμή της τεχνολογίας, με αναλογίες πιστές σε ανθρώπινο χέρι. Έτσι δημιουργήθηκαν κάποια αρχικά σκίτσα για να ξεκινήσουν ιδέες να έρχονται στην επιφάνεια.



Εικόνα 3.1 Μερικά από τα σκίτσα ιδεασμού

Στην συνέχεια έγινε εξερεύνηση σχετικά με την εργονομία του χεριού. Οι τρεις βασικές ιδέες είναι οι εξής: χέρι τύπου γάντζος, χέρι με τρία δάχτυλα και χέρι όπως ένα ανθρώπινο με 5 δάχτυλα.

Αρχικά, ένα χέρι τύπου άγκιστρο μιμείται τη χρήση ενός δαχτύλου. Τα άγκιστρα ή γάντζος είναι παθητικά, χαμηλού κόστους και χαμηλής συντήρησης, μπορούν να είναι ανθεκτικά και ποικίλλουν δραματικά σε διάμετρο και συνολικό μέγεθος, γωνία κάμψης κ.λπ. Ένας γάντζος με δύο άγκιστρα μιμείται δύο δάχτυλα και είναι κατάλληλα για πιο λεπτεπίλεπτες απαιτήσεις, ενώ παραμένουν με χαμηλό κόστος και χαμηλή πολυπλοκότητα. Η αντοχή είναι πλεονέκτημα των γάντζων, ενώ η επιδεξιότητα είναι μειονέκτημα. [27]



Εικόνα 3.2 Σχέδιο χεριού τύπου γάντζου



Εικόνα 3. 3 Παράδειγμα γάντζου [28]

Το βασικό πρόβλημα των γάντζων είναι η αισθητική. Φαίνεται επικίνδυνο και ίσως ανατριχιαστικό. Από την άλλη, καθώς είναι αρκετά οικονομικό και έχει μεγάλη αντοχή, το κάνει μια προσιτή λύση. Επίσης, η απλή του φύση θα κάνει την κατασκευή και τον σχεδιασμό του πολύ εύκολο. Παρόλα αυτά δεν φαντάζει ιδανική λύση καθώς η αισθητική είναι μεγάλος παράγοντας σε αυτό το πρότζεκτ, καθώς όπως έχει προαναφερθεί είναι κυριολεκτικά κομμάτι του χρήστη που συμβάλλει στην κοινωνική του εικόνα.

Στην συνέχεια, θα αναλυθούν χέρια με τρία δάχτυλα. Τέτοιου τύπου χέρια εκμεταλλεύονται συχνά την τριβή για να κρατήσουν ένα αντικείμενο. Για να επιτευχθεί μεγαλύτερη τριβή, είναι συχνά εξοπλισμένες με επιφάνειες δέρματος κατασκευασμένες από πολυουρεθάνη. Για τη μετάδοση κίνησης, θα χρησιμοποιηθούν γρανάζια ή ελατήρια και καλώδια για το άνοιγμα/κλείσιμο της χεριού. Χαμηλό κόστος και απλότητα είναι τα κύρια δυνατά του σημεία, ενώ η ροπή και η επιδεξιότητα είναι βασικά μειονεκτήματα. Χρησιμοποιούνται ευρέως για βασικές λειτουργίες λαβής και σε ορισμένες διαμορφώσεις μπορούν να χωρέσουν σε στενούς χώρους και να είναι ελαφριά. Ωστόσο, η έλλειψη κίνησης στο επίπεδο των δακτύλων περιορίζει σημαντικά τις ικανότητες αρπαγής.[27]



Εικόνα 3. 4 Σκίτσο χεριού με 3 δάχτυλα

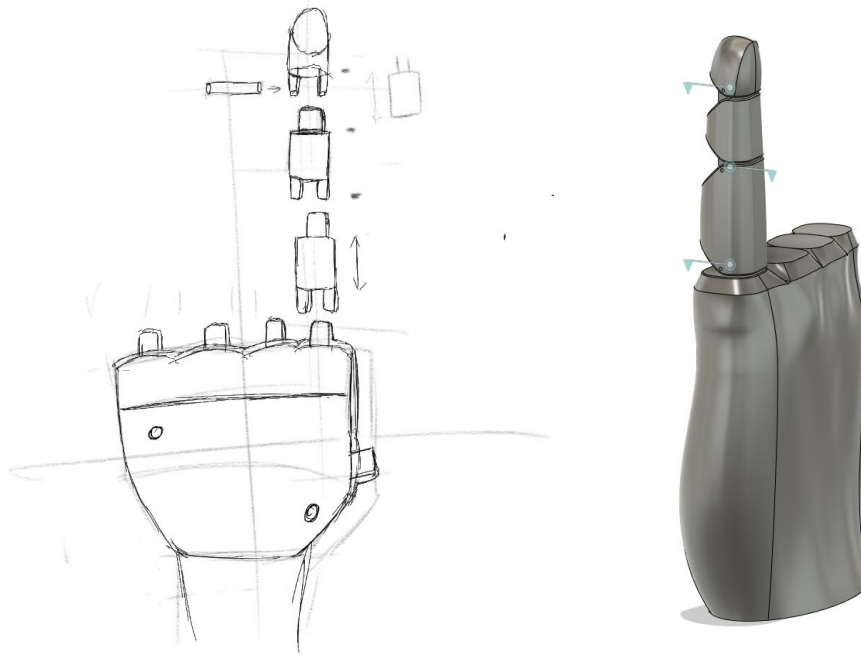
Το χαμηλό κόστος αυτού του χεριού όσο και η αισθητική του φαίνεται να βρίσκονται σε καλή ισορροπία. Δεν φαίνεται περίπλοκη κατασκευή, αλλά φαίνεται να έχει περιορισμούς. Επίσης δεν έχει την ανθρωπόμορφη μορφή και αναλογίες, που είναι επιθυμητά για αυτό το πρότζεκτ.



Εικόνα 3. 5 Παράδειγμα χεριού με 3 δάχτυλα[29]

Τα ρομποτικά χέρια με 5 δάχτυλα μπορούν να έχουν έως και δώδεκα βαθμούς ελευθερίας και πολλαπλούς κινητήρες για ατομική κάμψη δακτύλων και φαλάγγων. Τα ρομποτικά χέρια είναι ο κανόνας στα ανθρωπόμορφα ρομπότ και μπορούν συνήθως να προσαρμόσουν μια ποικιλία δυνάμεων, θέσεων, και ίσως περιλαμβάνουν ανάδραση ανίχνευσης δύναμης. Το μέγεθος και άλλα χαρακτηριστικά μοντελοποιούνται συμβατικά μετά το ανθρώπινο χέρι. Ενώ η επιδεξιότητα και η δύναμη είναι τα δυνατά σημεία των ρομποτικών χεριών, το κόστος και η πολυπλοκότητα είναι τα κύρια μειονεκτήματά τους. Από εργονομική άποψη, τα ρομποτικά χέρια προσφέρουν πολλαπλά σημεία επαφής και πάνω από δώδεκα βαθμούς ελευθερίας, που μεταφράζεται σε σχετικά προηγμένη επιδεξιότητα - αναμφισβήτητα κοντά σε ένα ανθρώπινο αρθρικό χέρι.[27] Με τέτοια επιδεξιότητα κίνησης αλλά και με τα ανθρωπόμορφα χαρακτηριστικά αυτού του ρομποτικού χεριού το κάνουν την προτιμότερη εργονομία. Σίγουρα υπάρχουν αρνητικά, όπως πολυπλοκότητα κατασκευής και μεγάλο κόστος, αλλά δημιουργώντας ένα πιο λιτό μοτερικά χέρι με τεχνολογία προσθετικής κατασκευής που θριαμβεύει στις πολύπλοκες γεωμετρίες και μείωση του κόστους, μπορούν να εξαλειφθούν αυτά τα μειονεκτήματα. Επίσης βάση προηγούμενης βιβλιογραφίας, είναι αρκετά δημοφιλής εργονομία με βασικό αρνητικό το κόστος. Αν επιτευχθεί λοιπόν μια οικονομική κατασκευή τέτοιας εργονομίας, θα είναι ιδανικό.

Δημιουργήθηκε μια πρώτη εικόνα από εξερεύνηση ιδεασμού. Έγινε προσπάθεια 'αντιγραφής' ανθρώπινου χεριού και μελέτη λειτουργικότητας.

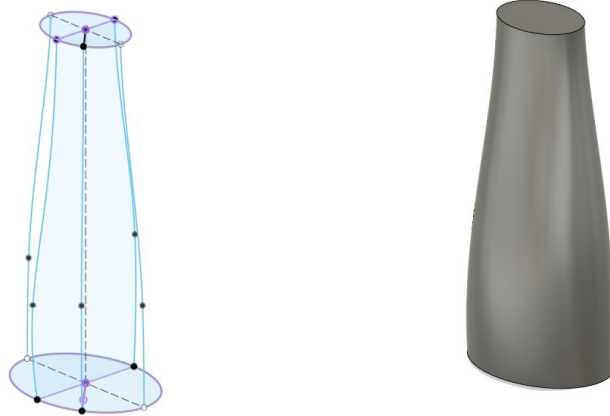


Εικόνα 3. 6 Ιδεασμός ρομποτικού χεριού με 5 δάχτυλα

Μετά ξεκίνησε η λειτουργική εξερεύνηση αυτών των ιδεών. Αρχικά προέκυψε η ερώτηση πώς θα κουνιέται το δάχτυλο στις αρθρώσεις του. Η InMoov έχει δώσει λύση με κομμάτι από filament[5], αλλά δεν φαίνεται ικανοποιητικός τρόπος λύσης, καθώς έχει μικρή αντοχή και θα δημιουργείται τριβή. Μετά από αρκετή εξερεύνηση, αποδείχτηκε πως μια ικανοποιητική λύση είναι δυο ρουλεμάν σε κάθε άρθρωση με πείρο ενδιάμεσα, δίνοντας αβίαστη περιστροφική κίνηση, ικανοποιητική αντοχή και ασφαλή σύνδεση. Επίσης ίδια λογική υπήρξε για την περιστροφή στον άξονα X και Z, δηλαδή και πάλι κατάλληλα ρουλεμάν σε συνεργασία με πείρο. Οπότε καθώς υπήρξε μια ιδέα για τον τρόπο λειτουργίας του, προχώρησε ο σχεδιασμός.

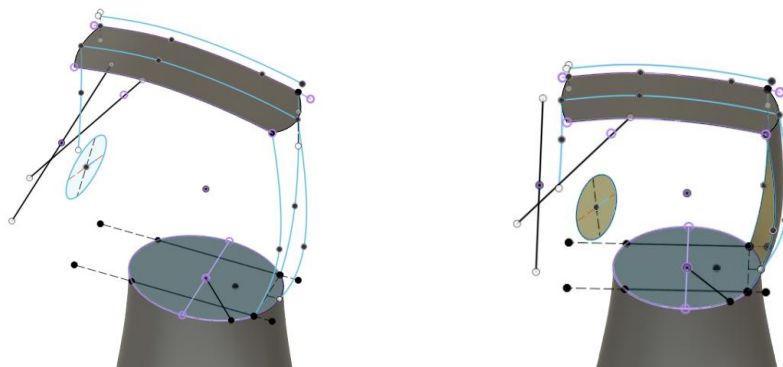
Για να σχεδιαστεί το χέρι, δημιουργήθηκε ένας πήχης που θα μπορούσε να είναι η βάση για αργότερα. Ο σκοπός για το τωρινό στάδιο ήταν να μπορεί να φανεί φυσικό το χέρι στον πήχη/βάση. Για να σχεδιαστεί καταγράφηκαν οι αναλογίες του δικού μου χεριού ως αναφορά. Έπειτα με μια εντολή Loft δημιουργήθηκε ο πήχης/βάση.

Διαστασιολογικό σημείο αναφοράς ήταν το ίδιο μου το χέρι, καθώς κάθε ανθρώπινο χέρι έχει διαφορετικές αναλογίες και πρέπει να ληφθούν υπόψιν κατά τον σχεδιασμό ενός προσθετικού χεριού οι ανάλογες αυτές διαφοροποιήσεις στις διαστάσεις. Για την ώρα το δικό μου χέρι φαίνεται καλό σημείο αναφοράς, καθώς είναι πάντα διαθέσιμο. Επιλέχθηκε το αριστερό για να μπορούν να γίνουν εύκολα πειράματα ως δεξιόχειρας.



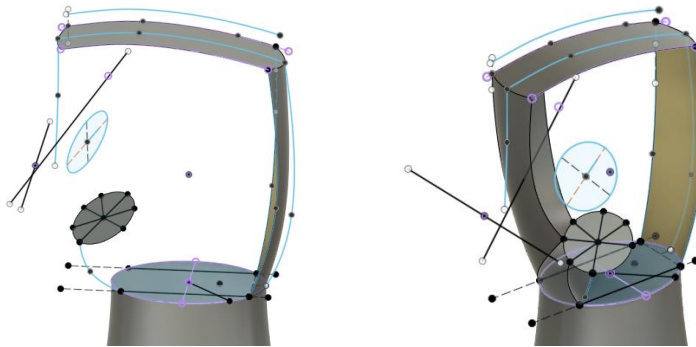
Εικόνα 3. 7 Εικόνα από CAD

Στην συνέχεια, με την χρήση sketch και surfaces και με εντολές όπως surface loft, patches κτλ. δημιουργούνταν σιγά-σιγά το χέρι σαν παζλ. Ξανά, το χέρι μου είναι η αναφορά.



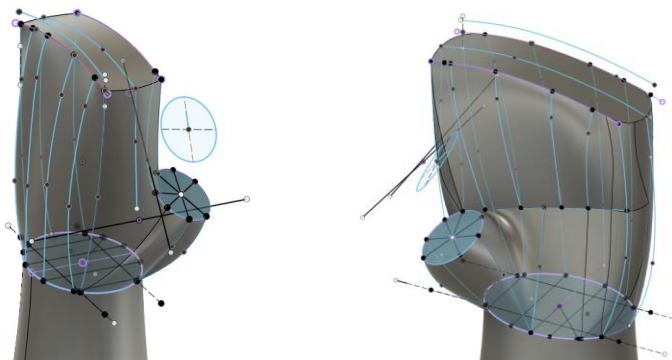
Εικόνα 3. 8 Εικόνα από CAD

Όπως φαίνεται, δημιουργούνται και sketches οδηγοί και planes και points, για να μπορούν να δημιουργηθούν sketches στα κατάλληλα σημεία, για να γίνουν surfaces στην κατάλληλη γεωμετρία.



Εικόνα 3. 9 Εικόνα από CAD

Όλα αυτά, προσπαθώντας να αποτυπώσουν την ανατομία ενός αληθινού χεριού.



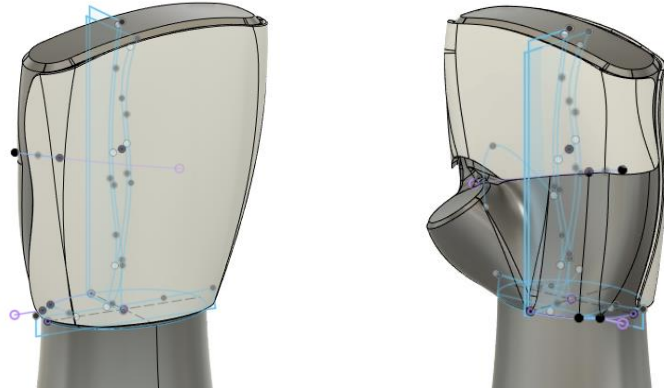
Εικόνα 3. 10 Εικόνα από CAD

Και μετά που έγινε solidify η φόρα, έγιναν τροποποιήσεις με fillet και chamfer.



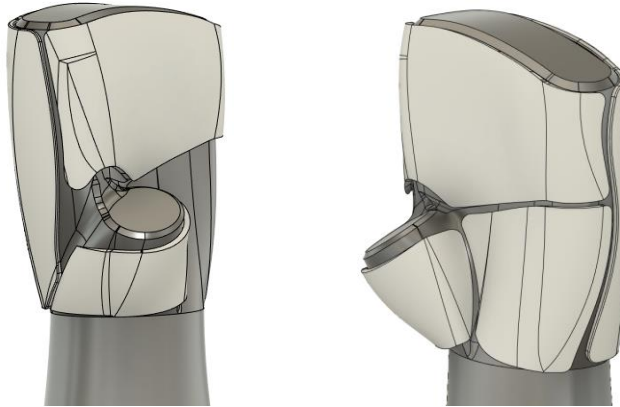
Εικόνα 3. 11 Εικόνα από CAD

Μετά με εντολές όπως surface offset και surface cut και thicken ξεκινάει η δημιουργία των κελυφών.



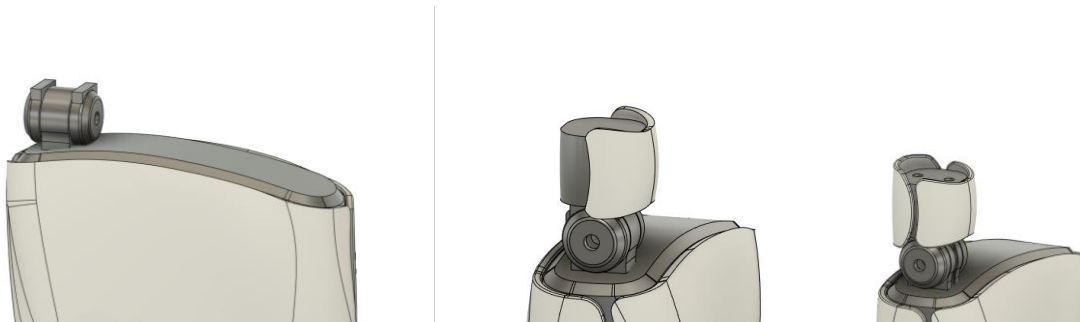
Εικόνα 3. 12 Εικόνα από CAD

Ξανά, πολλές εντολές fillet και chamfer παίρνουν μέρος για βελτίωση της φόρμας.



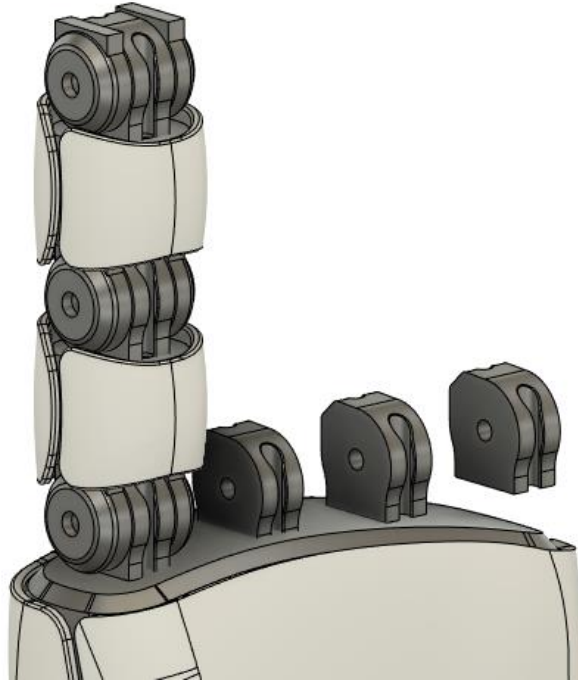
Εικόνα 3. 13 Εικόνα από CAD

Μετά ξεκινάει η διαδικασία των δαχτύλων. Όπου πρώτα ολοκληρώνεται ο δείκτης. Τα κελύφη δημιουργούνται με τον ίδιο τρόπο.



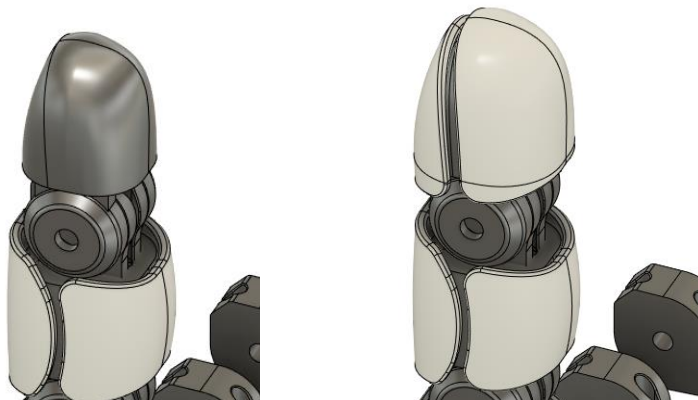
Εικόνα 3. 14 Εικόνα από CAD

Κλέβοντας από το πρώτο κάτω μέρος του δαχτύλου, δημιουργούνται τα υπόλοιπα επιμέρη με εντολή rectangular pattern. Ξεκινάει επίσης η δημιουργία των υπόλοιπων δαχτύλων και πάλι με εντολή rectangular pattern.



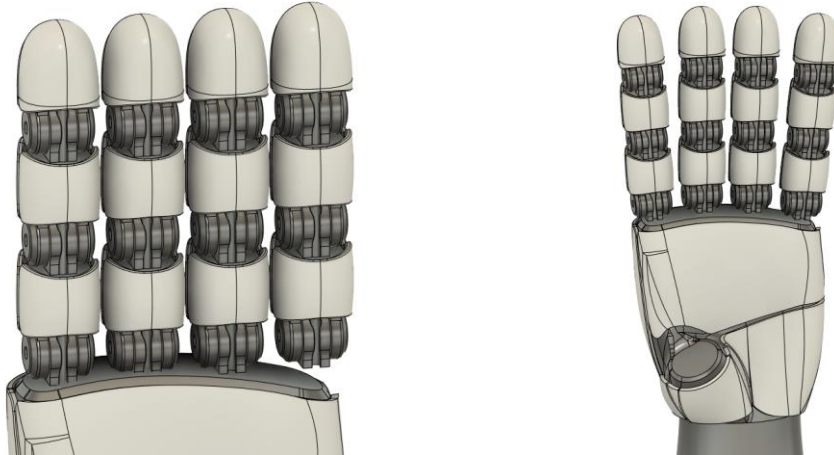
Εικόνα 3. 15 Εικόνα από CAD

Με loft δημιουργείται το πάνω μέρος του δαχτύλου.



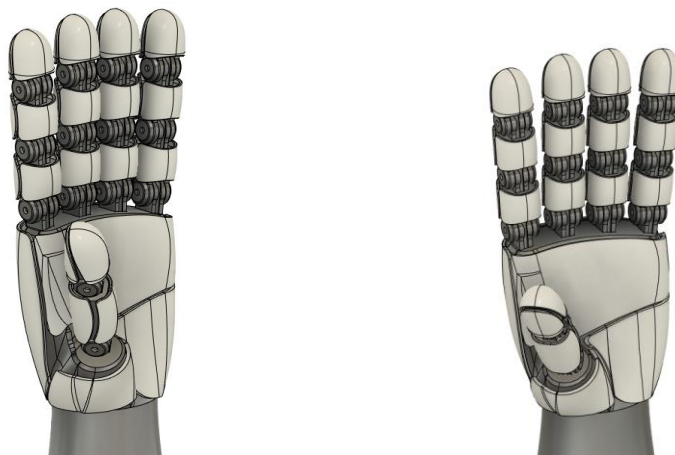
Εικόνα 3. 16 Εικόνα από CAD

Έχει δημιουργηθεί πέρασμα για το νήμα, οδηγοί για το κέλυφος, τρύπες για τους πείρους, αλλά και για τα ρουλεμάν, που θα συζητηθούν παρακάτω, το δάχτυλο μετακινείται στην κατάλληλη θέση με την εντολή move και δημιουργούνται τα υπόλοιπα δάχτυλα, με την εντολή rectangular pattern. Όλες οι λεπτομέρειες στα δάχτυλα έχουν δημιουργηθεί με την βοήθεια της εντολής extrude και planes σε κατάλληλη θέση. Με την εντολή move, έρχονται στην κατάλληλη θέση.



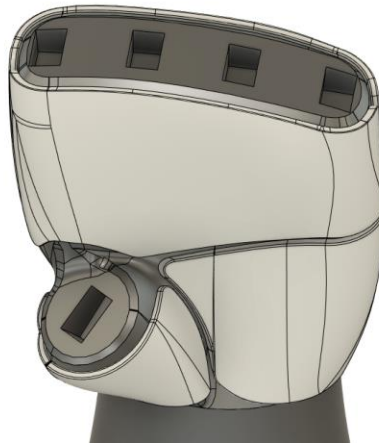
Εικόνα 3. 17 Εικόνα από CAD

Παρόμοια διαδικασία ακολουθείται για τον αντίχειρα. Τελειποιήσεις με εντολές όπως fillet και chamfer παίρνουν θέση.



Εικόνα 3. 18 Εικόνα από CAD

Εξασφαλίστηκαν θέσεις για να μπουν τα δάχτυλα πάλι με την εντολή etrude.



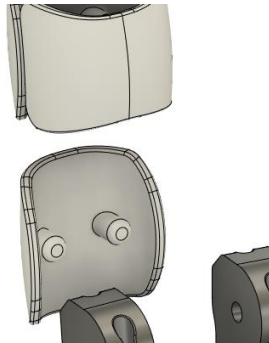
Εικόνα 3. 19 Εικόνα από CAD

Κάθε κομμάτι του δαχτύλου είναι χωρισμένο σε δύο επιμέρους κομμάτια, για να είναι πολύ πιο εύκολη η εκτύπωσή τους και χωρίς να χρειάζεται η χρήση support. Έχουν επίσης δημιουργηθεί θέσεις για οδηγούς/ribs, που υπάρχουν στα κελύφη, για να εξασφαλίζεται η ακριβής τοποθέτησή τους. Φαίνεται και χώρος κατάλληλος για να περνάει το νήμα και το απαραίτητο κενό, για να δένεται και να σταθεροποιείται στην άκρη του δαχτύλου, φτιαγμένα με την βοήθεια της εντολής sweep.



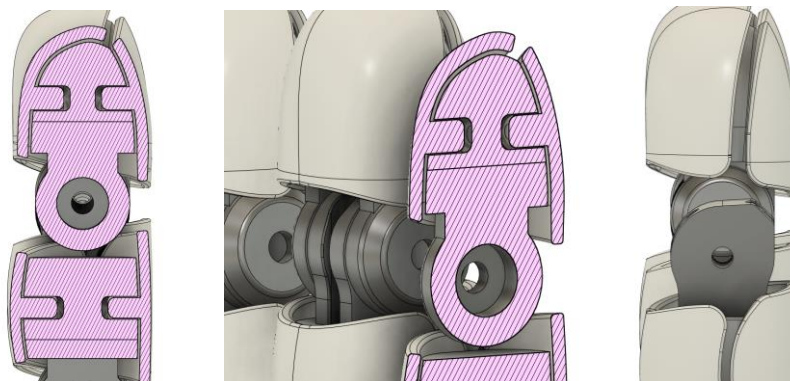
Εικόνα 3. 20 Εικόνα από CAD

Οι οδηγοί υπάρχουν σε κάθε κέλυφος και έχουν φτιαχθεί αφήνοντας το κατάλληλο κενό στο δάχτυλο, για να εξασφαλισθεί η σωστή τοποθέτησή τους, όταν υλοποιηθούν. Διαστασιολογικές ανοχές έχουν υπολογιστεί.



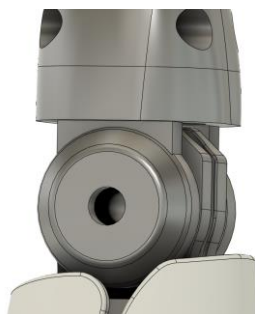
Εικόνα 3. 21 Εικόνα από CAD

Όπως φαίνεται στην φωτογραφία, υπάρχει θέση για ρουλεμάν, δύο σε κάθε άρθρωση, που είναι μετρημένα από παχύμετρο και εκεί 'σφηνώνει' ο πείρος για να επιτρέψει ελευθερία κίνησης.



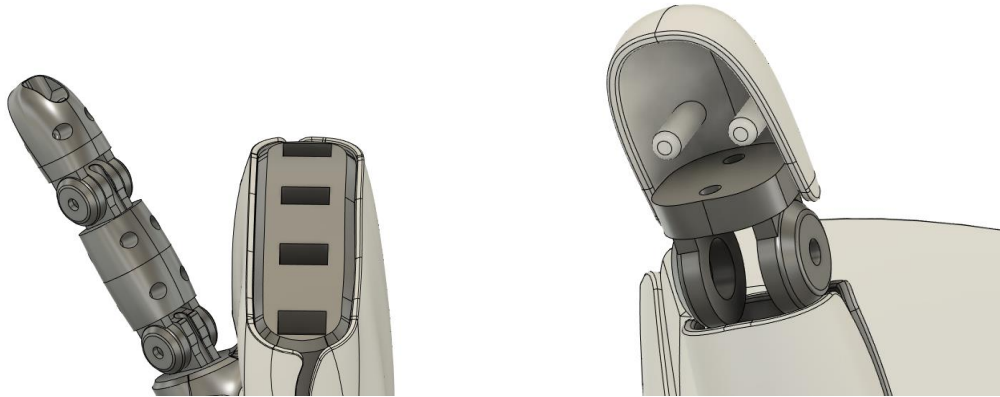
Εικόνα 3. 22 Εικόνα από CAD

Επίσης, στο πίσω μέρος κάθε δαχτύλου, έχουν δημιουργηθεί 'φυσικά' stop με εξογκώματα, για να αποτρέπουν τις αφύσικες κινήσεις του δαχτύλου. Ξανά με την βοήθεια εντολής extrude και για τις λεπτομέρειες εντολή Fillet.



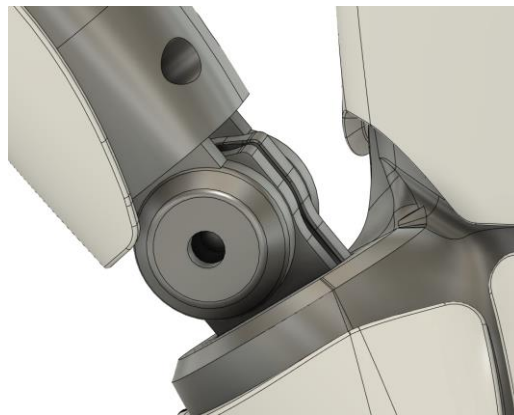
Εικόνα 3. 23 Εικόνα από CAD

Η ίδια τεχνική έχει χρησιμοποιηθεί και για τον αντίχειρα.



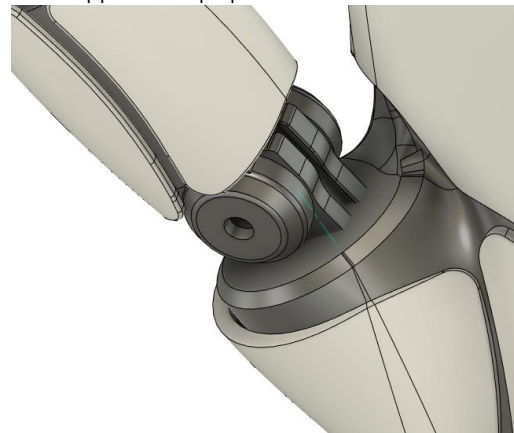
Εικόνα 3. 24 Εικόνα από CAD

Με την διαφορά ότι τα φυσικά φρένα στην βάση του δαχτύλου είναι από την αντίθετη μεριά, καθώς χρειάζεται ο αντίχειρας να έχει μεγάλο άνοιγμα.



Εικόνα 3. 25 Εικόνα από CAD

Για να παραμένει η ακρίβεια, είναι σημαντικό να υπάρχουν άξονες, ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή τοποθέτηση των δαχτύλων κατά τη μετακίνηση.



Εικόνα 3. 26 Εικόνα από CAD

Στην συνέχεια, ξεκίνησε η προσπάθεια σχεδίασης της βάσης. Η προσπάθεια έγινε με την βάση που είχε δημιουργηθεί με shell και extrude cut. Κέλυφος δημιουργήθηκε ξανά με offset surface και thicken.



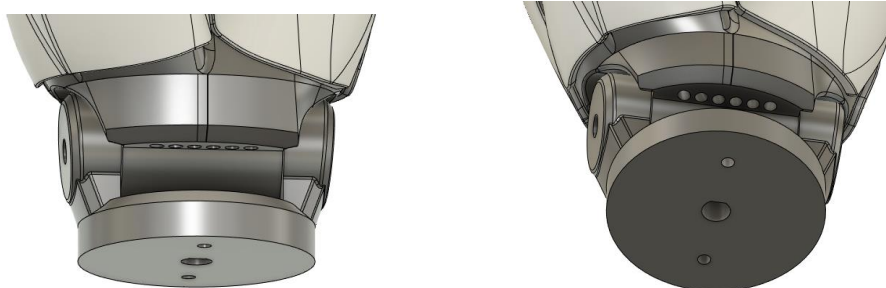
Εικόνα 3. 27 Εικόνα από CAD

Έπειτα, έγινε προσπάθεια για σχεδίαση καρπού με δυνατότητα κίνησης στον X και Z άξονα. Εντολές όπως Axes, extrude, Mirror πήραν μέρος και φυσικά Fillet και Chamfer.



Εικόνα 3. 28 Εικόνα από CAD

Μετά από αρκετές προσπάθειες σχεδίασης του καρπού και της βάσης, δημιουργήθηκε ο καρπός με θέσεις για πείρο περιστροφής και στον X και Z άξονα. Περάσματα για τα νήματα από τα δάχτυλα δημιουργήθηκαν με την βοήθεια της εντολής sweep.



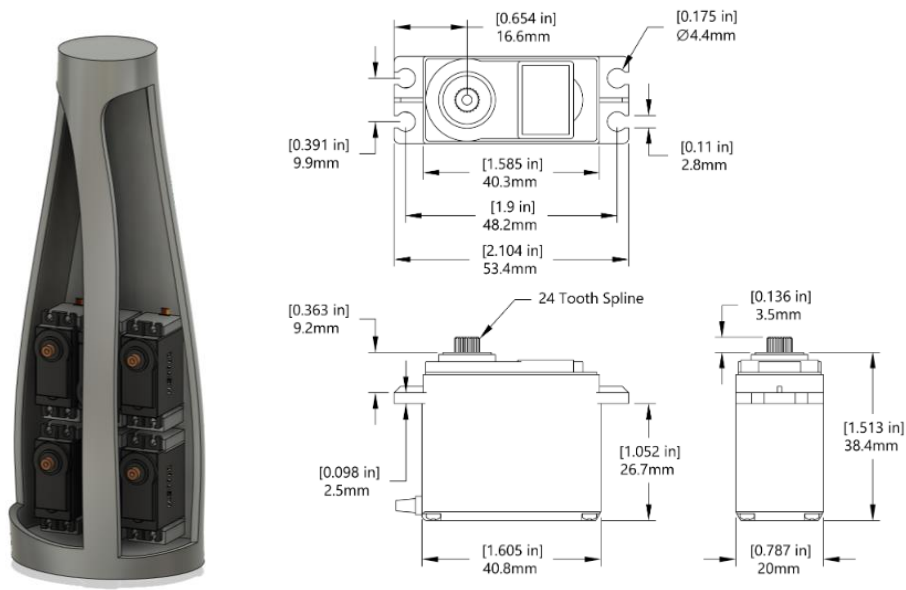
Εικόνα 3. 29 Εικόνα από CAD

Εξαρτόμενη από τις διαστάσεις του καρπού, σχεδιάστηκε μια νέα βάση με φόρμα 'πιο' πιστή σε αυτήν του πήχη μου και πιο οργανική. Με surface Offset extrude cut και combine body, επιτεύχθηκε η δημιουργία αυτής της φόρμας.



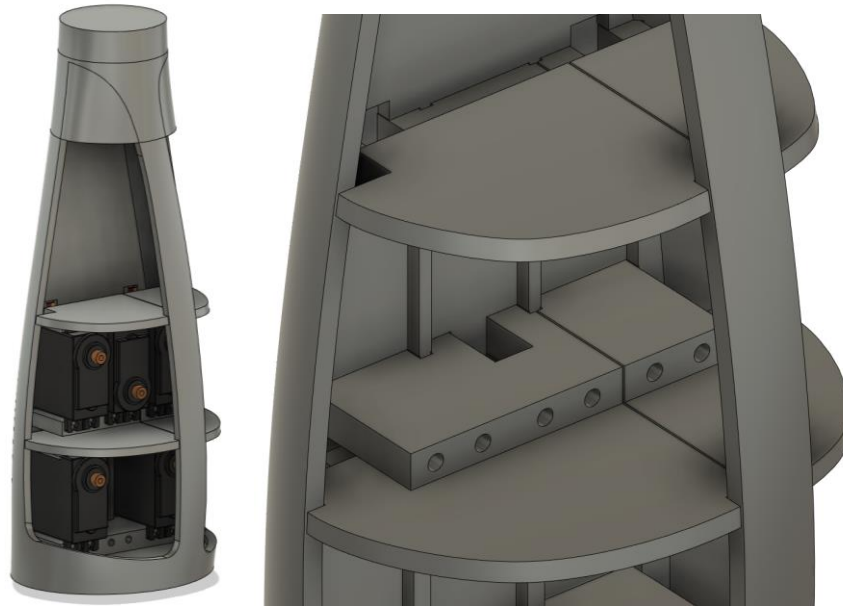
Εικόνα 3. 30 Εικόνα από CAD

Παραμετροποιήσεις έγιναν βάση με σχεδίαση από blueprints και δοκιμές από πιστές αντιγραφές μοντέλα των MG996R motors από την HowToMechatronics[30].



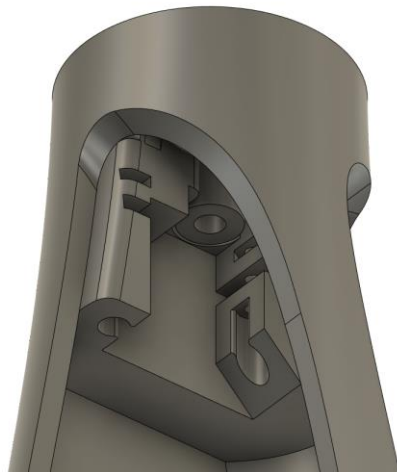
Εικόνα 3. 31 Εικόνα από CAD και διαστάσεις MG996R motor[31]

Δημιουργήθηκαν χωρίσματα μεταξύ των μοτέρ, για καλύτερη οργάνωση χώρου για ανακατεύθυνση των νημάτων. Αυτά τα χωρίσματα δημιουργήθηκαν με αντιγραφή, με την εντολή duplicate body της αρχικής φόρας και αφαίρεση γεωμετρίας με Extrude cut. Με εντολές όπως surface offset, δημιουργήθηκαν τα κατάλληλα κενά για να μπαίνουν στην σωστή θέση, επίσης, για να είναι δυνατή η εισαγωγή τους, χωρίστηκαν σε δυο κομμάτια. Βάσεις για βίδες και τα καλώδια των μοτέρ επίσης δημιουργήθηκαν.



Εικόνα 3. 32 Εικόνα από CAD

Δημιουργήθηκε θέση για MG90S servo motor μετρώντας ένα πραγματικό MG90S servo motor, ώστε να είναι ικανό να κουνάει τον καρπό, χωρίς να κουνάει το ίδιο το μοτέρ.



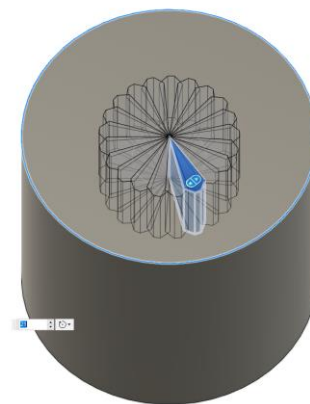
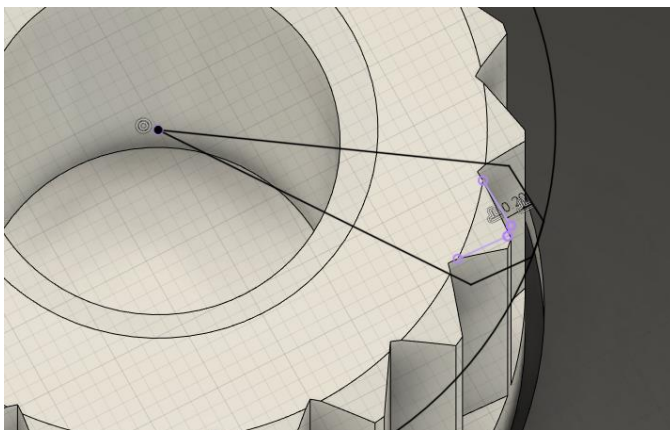
Εικόνα 3. 33 Εικόνα από CAD

Έγινε επιβεβαίωση των διαστάσεων με πιστή αντιγραφή MG90S μοτέρ μοντέλου από το Thingiverse[32].



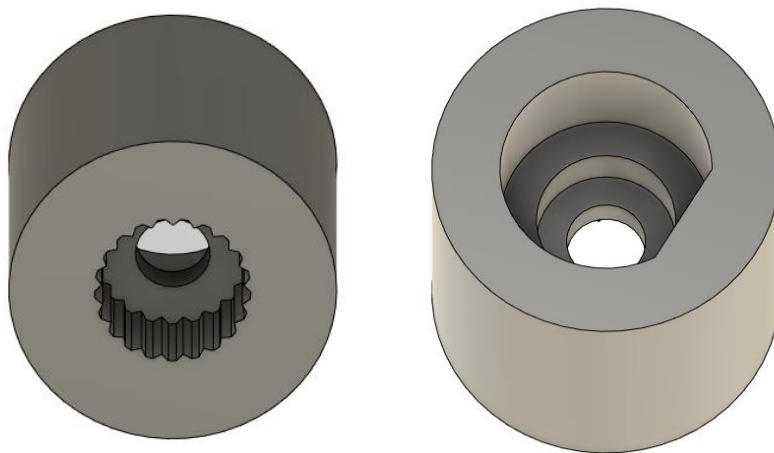
Εικόνα 3. 34 Εικόνα από CAD

Με βάση το μοντέλο για MG90S motor από το Thingiverse[32], δημιουργήθηκε horn με θέση για βίδα και πείρο σχήματος D και βίδα για το ρότορα του μοτέρ. Για να φτιαχτούν τα δοντάκια, που ταιριάζουν με το ρότορα του μοτέρ, έγινε project σε sketch offset 0,2 και έπειτα με την εντολή extrude cut σε έναν κύλινδρο με τις κατάλληλες διαστάσεις, fillet και circular pattern με ποσότητα 21.



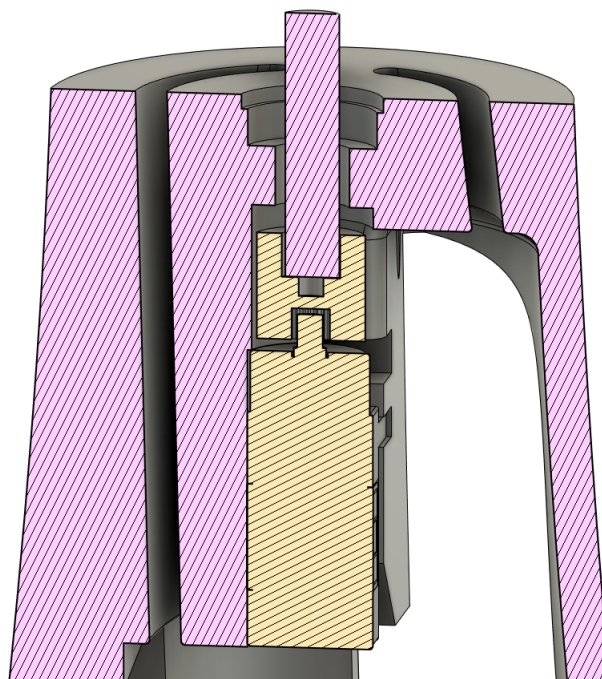
Εικόνα 3. 35 Εικόνα από CAD

Με μετρήσεις και τις διαστάσεις του D πείρου και εντολές όπως extrude cut, δημιουργήθηκε το Horn για το μοτέρ MG90S.



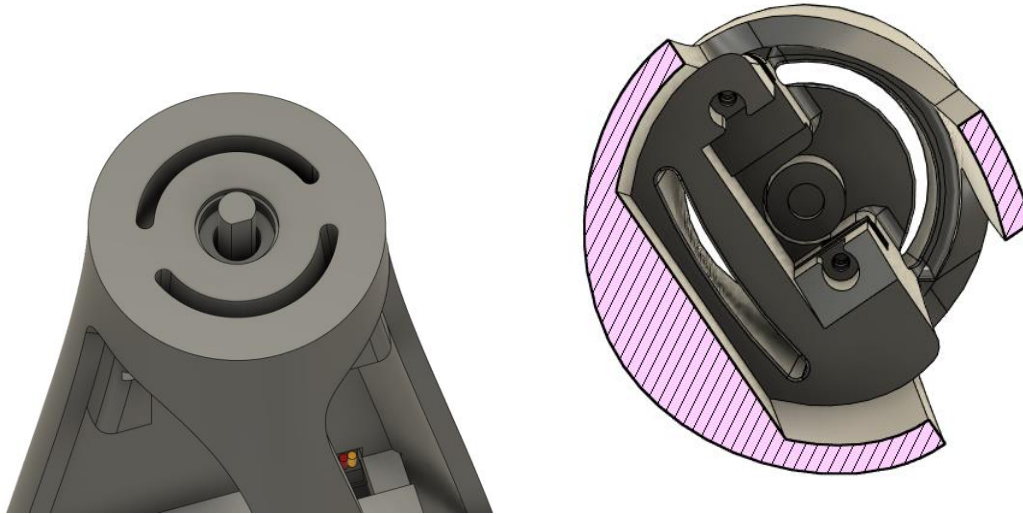
Εικόνα 3. 36 Εικόνα από CAD

Δημιουργήθηκαν θέσεις για ρουλεμάν και υπολογίστηκε η απόσταση του καρπού με το horn του MG90S, για μπει ένα 50mm D πείρος.



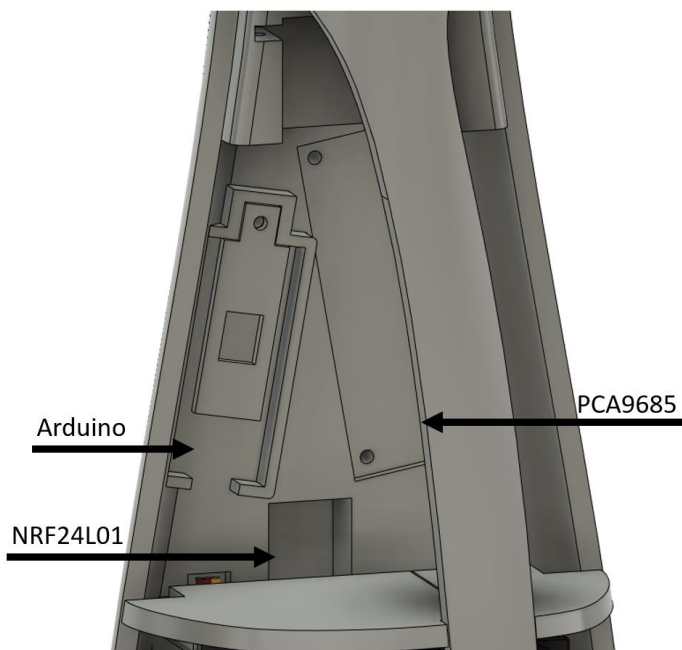
Εικόνα 3. 37 Εικόνα από CAD

Δημιουργήθηκαν κενά για τα νήματα από τα δάχτυλα, κατάλληλα ώστε να επιτρέπουν την περιστροφή του καρπού, χωρίς επιπλοκές στην λειτουργία του χεριού.



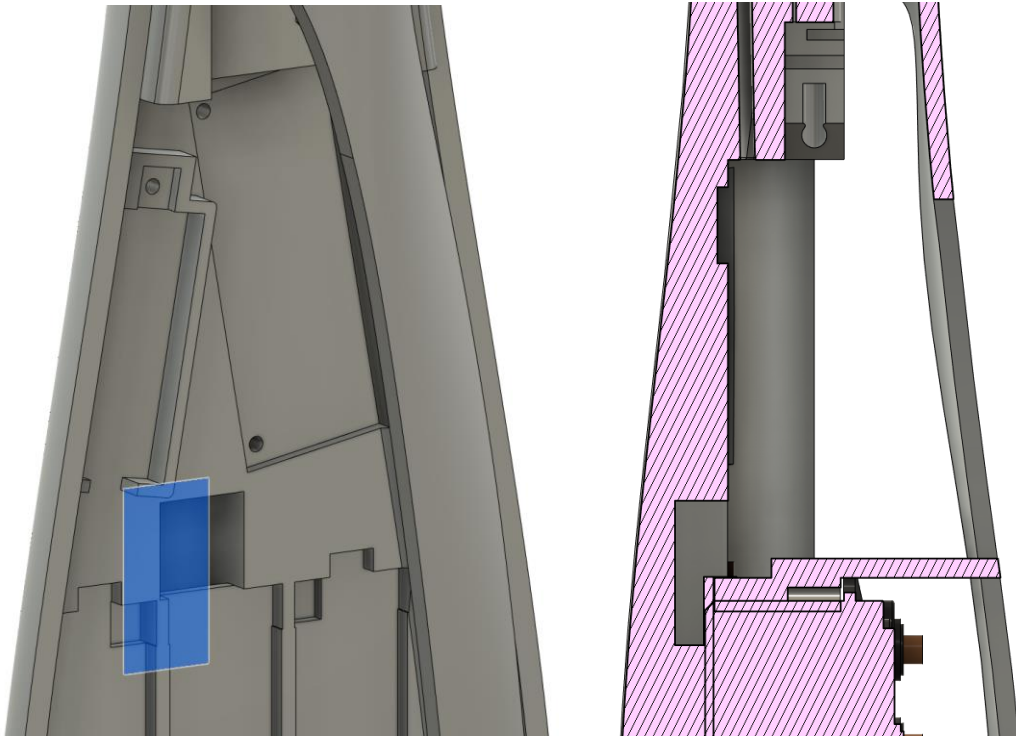
Εικόνα 3. 38 Εικόνα από CAD

Στην συνέχεια, μετά από μετρήσεις των πραγματικών Arduino, PCA9685 πλακέτας και του NRF24L01 radio, δημιουργήθηκαν θέσεις για αυτά μέσα στην βάση. Το Arduino ασφαρίζεται με μικρό καπάκι, χωρίς να δημιουργεί φθορά στην πλακέτα και κουμπώνει με μια βίδα στην πάνω θέση της πλακέτας. Η πλακέτα PCA9685 ασφαρίζεται με δύο βίδες και έχει μελετηθεί ο χώρος, ώστε τα καλώδια και τα νήματα να μην δημιουργούν πιθανότητα για δυσλειτουργία. Στο κάτω μέρος της παρακάτω φωτογραφίας, φαίνεται η θέση για την πλακέτα NRF24L01, η οποία μπαίνει σφηνωτά μέσα στην εγκοπή.



Εικόνα 3. 39 Εικόνα από CAD

Η αρχιτεκτονική της βάσης έχει μελετηθεί, ώστε να υπάρχει χώρος για όλα τα εξαρτήματα, χωρίς να δημιουργείται φθορά και χωρίς να προεξέχουν, κάνοντας πολύ εύκολο να κλείσει το καπάκι/κέλυφος της βάσης.



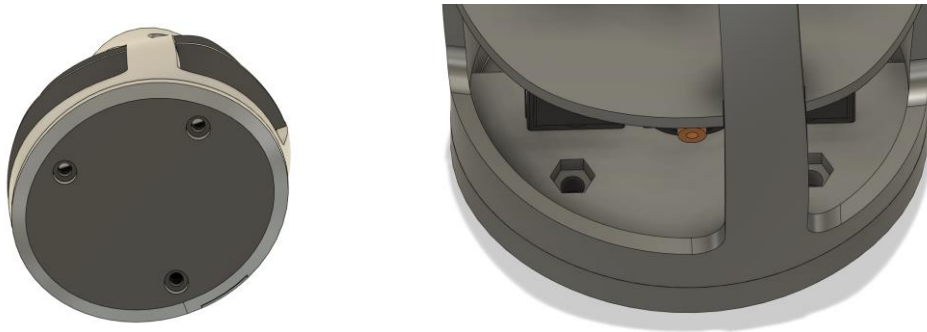
Εικόνα 3. 40 Εικόνα από CAD

Για να έχει μια σταθερή βάση να καλυφθεί το θηλυκό βύσμα και καλώδιο τροφοδοσίας των μοτέρ, δημιουργήθηκε καπάκι για τον πάτο της βάσης.



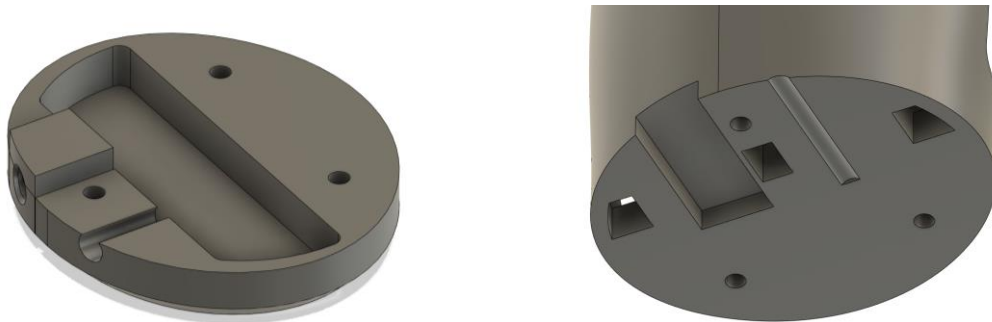
Εικόνα 3. 41 Εικόνα από CAD

Το καπάκι ασφαρίζεται με M5 βίδες και παξιμάδια.



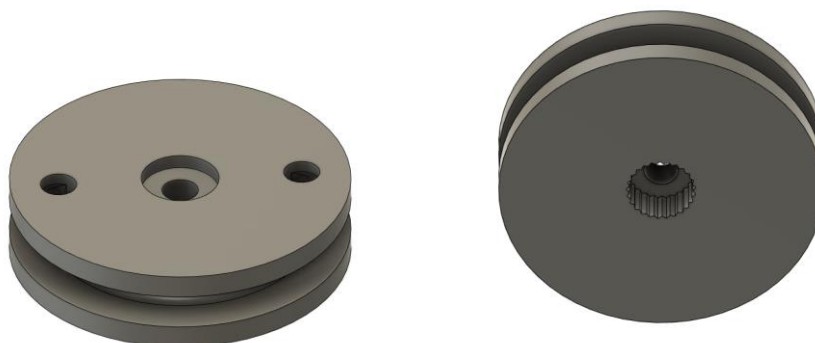
Εικόνα 3. 42 Εικόνα από CAD

Μέσα έχει αρκετό κενό για τα καλώδια, όχι μόνο της τροφοδοσίας, αλλά και το καλώδιο usb του Arduino και για καλύτερη οργάνωση καλωδίων των κάτω μοτέρ της βάσης.



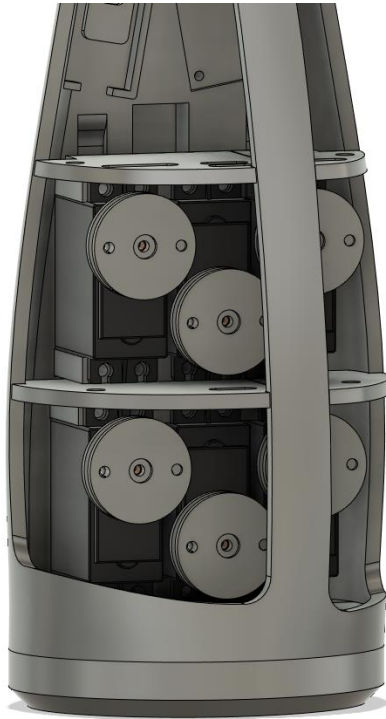
Εικόνα 3. 43 Εικόνα από CAD

Για να μεγαλώσει η περίμετρος, που συνδέει το νήμα γύρω από τον ρότορα κίνησης του servo motr, δημιουργήθηκε horn κατάλληλο και εμπνευσμένο από το ρομποτικό χέρι της InMoos για τον MG996R servo motor. Υπάρχει θέση να τυλιχθεί το νήμα και να δεθεί από πάνω. Έχει θέση για βίδα ώστε να ασφαλισθεί πάνω στο μοτέρ.



Εικόνα 3. 44 Εικόνα από CAD

Όπου εισάγεται πάνω από κάθε μοτέρ.



Εικόνα 3. 45 Εικόνα από CAD

Στα διαχωρίσματα δημιουργήθηκαν οδηγοί για τα νήματα, ώστε να μην δημιουργούνται επιπλοκές. Ο υπολογισμός των σημείων έγινε με 3D sketch, ώστε να προσομοιώσει τα νήματα.



Εικόνα 3. 46 Εικόνα από CAD

Δημιουργήθηκαν κελύφη με οργανικό χαρακτήρα, για να ταιριάζουν με την αισθητική του αντιβραχίου. Με το κέλυφος καλύπτεται το εσωτερικό, αλλά μπορεί να εκτεθεί για την παρουσίαση του χεριού αν αφαιρεθούν.



Εικόνα 3. 47 Εικόνα από CAD

Για αυτό δημιουργήθηκαν υποδομές, ώστε να μπαίνουν τα κελύφη χωνευτά, αλλά να μπορούν να βγουν εύκολα για επίδειξη του εσωτερικού.

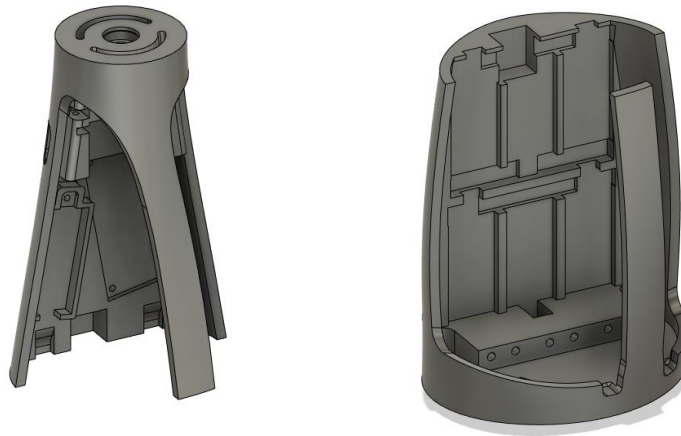


Εικόνα 3. 48 Εικόνα από CAD



Εικόνα 3. 49 Εικόνα από CAD

Με την εντολή split body, χωρίστηκε η βάση, καθώς είναι πολύ μεγάλη για εκτύπωση, αλλά και για τη μείωση χρήσης support.



Εικόνα 3. 50 Εικόνα από CAD

Το όλο σχέδιο ήταν διαδικασία πολλών προσπαθειών, δοκιμών και τροποποιήσεων. Η αισθητική, η λειτουργικότητα και η ευκολία εκτύπωσης των κομματιών αποτέλεσαν υψηλής σημαντικότητας στόχο. Το αποτέλεσμα.



Εικόνα 3. 51 Εικόνα από CAD

Σύνολο Bodies Βασικού μοντέλου 71.

Σύνολο Bodies βάσης 14.

Σύνολο Bodies Horn MG996R 1.

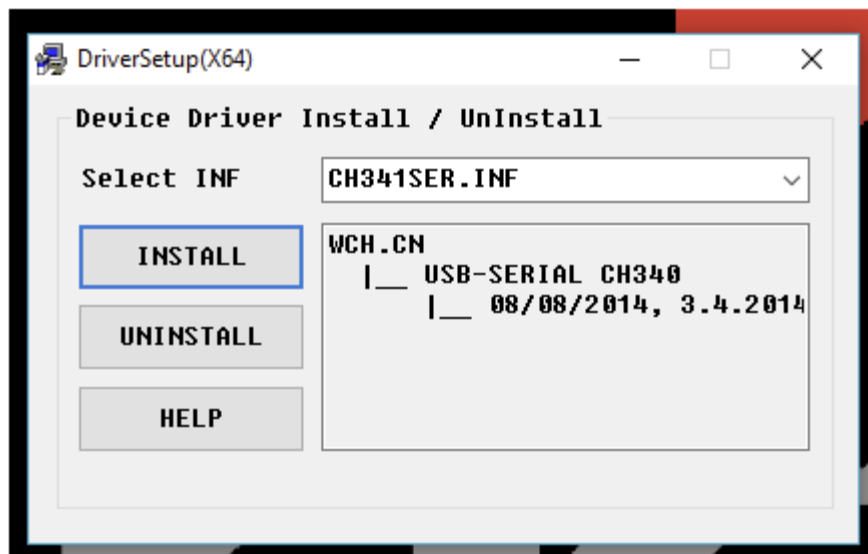
Σύνολο Bodies Horn MG90S 1.

3.4 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ

Ο μικρο-επεξεργαστής, που χρησιμοποιήθηκε, είναι ο Arduino nano με usb c. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε αυτός ο επεξεργαστής είναι γιατί, παρόλο που είναι αρκετά ισχυρός για τις ανάγκες που χρειάζεται το project, καταναλώνει μικρή ενέργεια και είναι αρκετά μικρός σε διαστάσεις, πράγμα που το καθιστά για τις ανάγκες μας ιδανικό. Για λόγους οικονομίας χρησιμοποιήθηκε κλώνος.

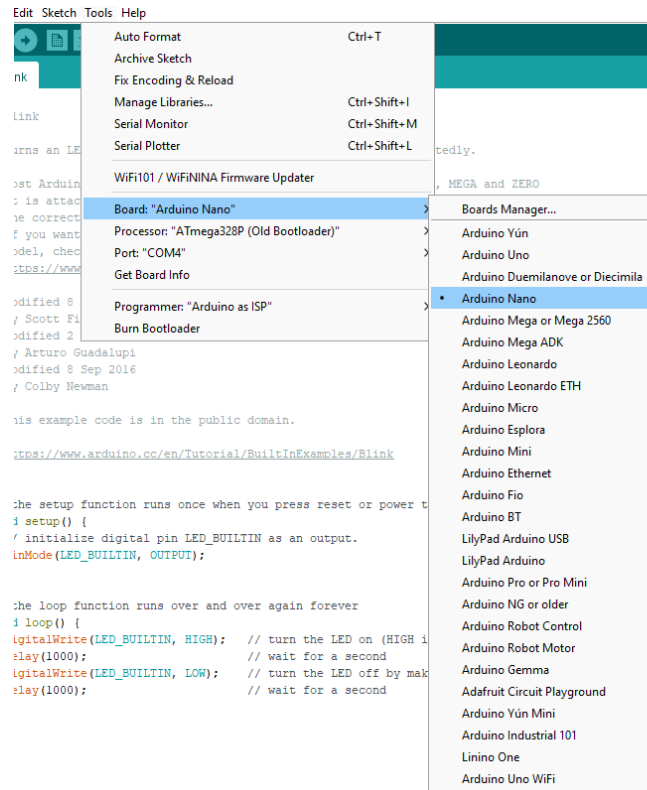
Η πλατφόρμα, που θα χρησιμοποιηθεί για τον προγραμματισμό του Arduino, είναι το Arduino IDE. Το Arduino Integrated Development Environment - ή Arduino Software (IDE) - περιέχει ένα πρόγραμμα επεξεργασίας κειμένου για τη σύνταξη κώδικα, μια περιοχή μηνυμάτων, μια κονσόλα κειμένου, μια γραμμή εργαλείων με κουμπιά για κοινές λειτουργίες και μια σειρά μενού. Συνδέεται με Arduino hardware, για να ανεβάζει προγράμματα και να επικοινωνεί μαζί του. Τα προγράμματα που γράφτηκαν με χρήση λογισμικού Arduino (IDE) ονομάζονται sketches. Αυτά τα sketches γράφονται στο πρόγραμμα επεξεργασίας κειμένου και αποθηκεύονται με την επέκταση αρχείου .ino. Το πρόγραμμα επεξεργασίας έχει δυνατότητες για αποκοπή/επικόλληση και για αναζήτηση/αντικατάσταση κειμένου. Η περιοχή μηνυμάτων παρέχει σχόλια κατά την αποθήκευση και την εξαγωγή και εμφανίζει επίσης σφάλματα. Η κονσόλα εμφανίζει την έξοδο κειμένου από το λογισμικό Arduino (IDE), συμπεριλαμβανομένων πολλών μηνυμάτων σφάλματος και άλλων πληροφοριών. Η κάτω δεξιά γωνία του παραθύρου εμφανίζει τη διαμορφωμένη πλακέτα και τη σειριακή θύρα. Τα κουμπιά της γραμμής εργαλείων επιτρέπουν να επαληθεύουμε και να ανεβάζουμε προγράμματα, να δημιουργούμε, να ανοίγουμε και να αποθηκεύουμε σκίτσα και να ανοίγουμε τη σειριακή οθόνη. [33] Ο λόγος που επιλέχθηκε αυτή η πλατφόρμα είναι γιατί συνεργάζεται αρκετά καλά με τα Arduino και περιέχει αρκετά βοηθητικά παραδείγματα κώδικα.

Για να μπορεί να διαβαστεί το Arduino nano CH340 από τον υπολογιστή, χρειάζεται να γίνει εγκατάσταση CH340 driver[34].



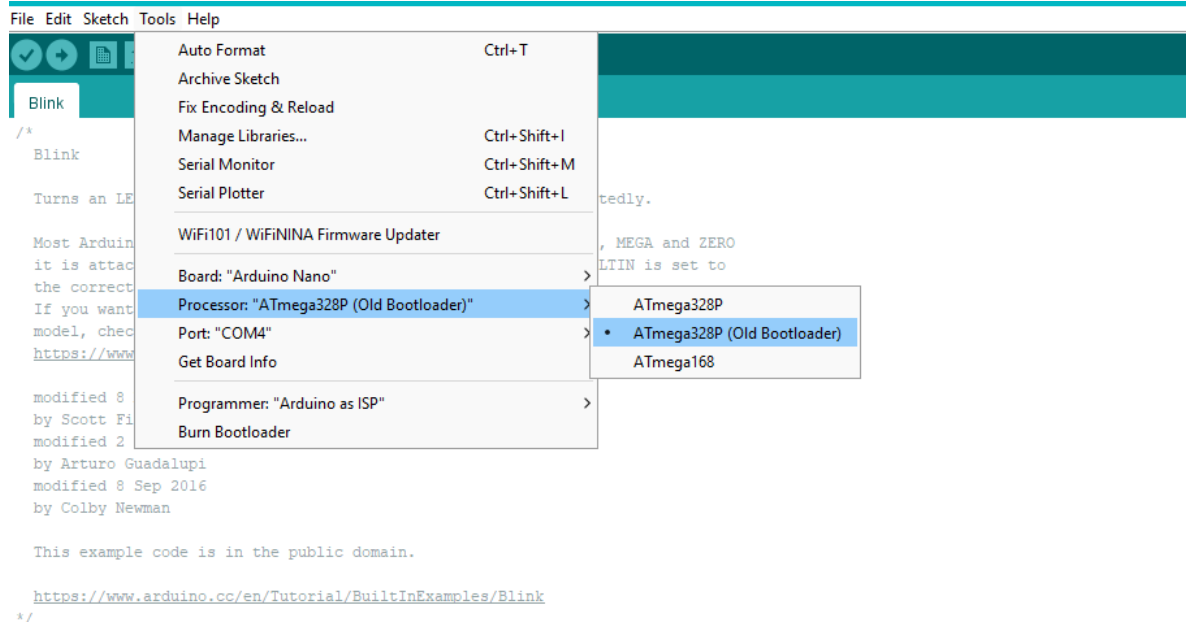
Εικόνα 3. 52 DriverSetup.exe για driver CH340[34]

Μετά την επιτυχή εγκατάσταση, μπορεί να βρεθεί η θύρα και μπορούμε να συνεχίσουμε στα επόμενα βήματα. Αρχικά πρέπει να επιλεγεί για board το Arduino nano, όπως φαίνεται παρακάτω.



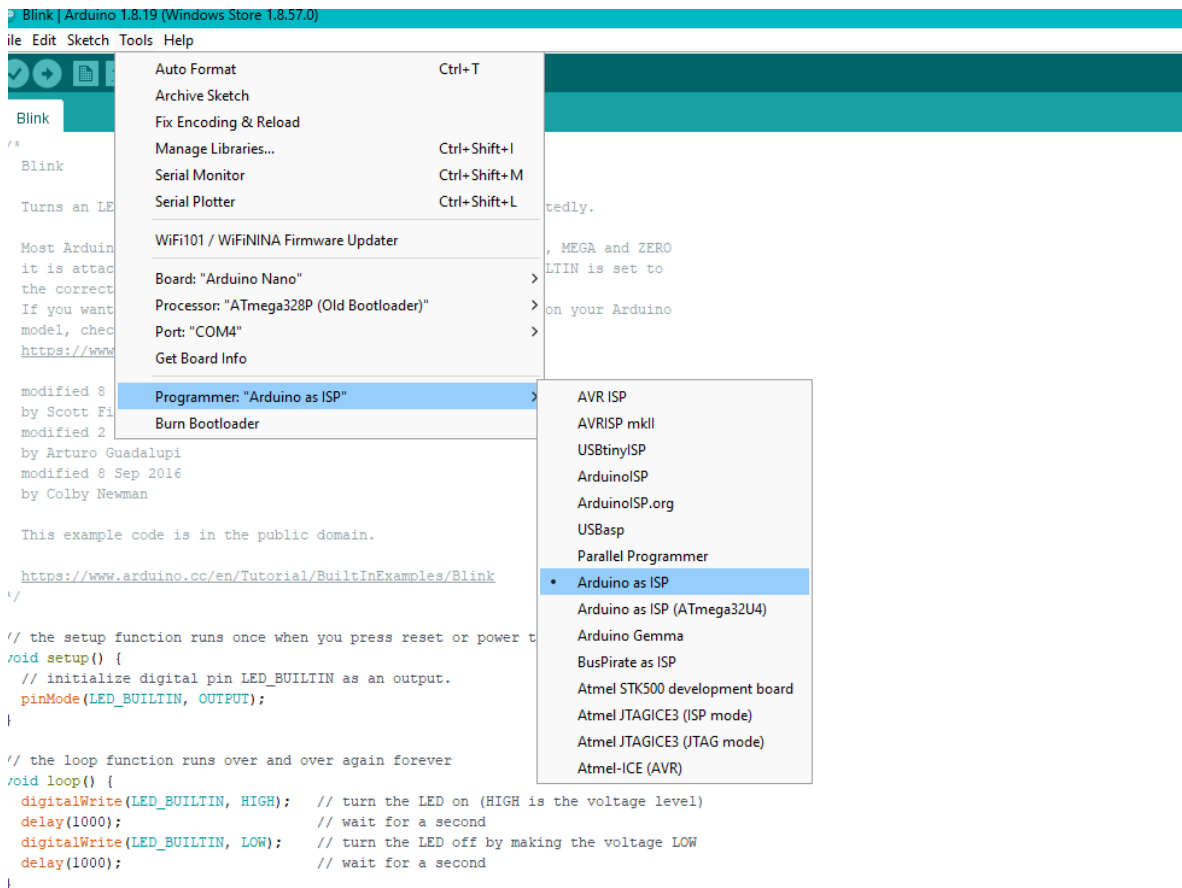
Εικόνα 3. 53 κώδικας

Στην συνέχεια πρέπει να επιλεγεί για processor το ATmega328p με το Old Bootloader.



Εικόνα 3. 54 κώδικας

Τέλος, χρειάζεται να επιλεγεί για programmer το Arduino as ISP.

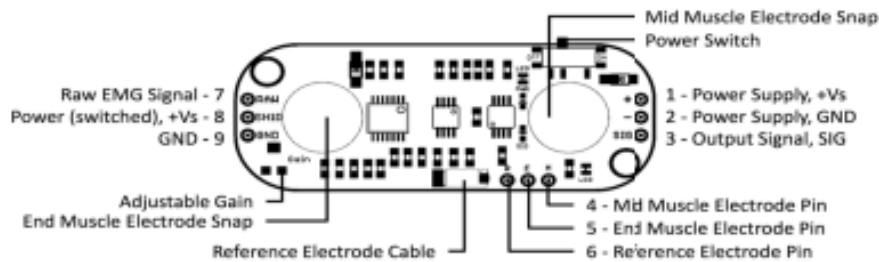


Εικόνα 3. 55 κώδικας

Τώρα μπορούν να περαστούν τα sketches από την arduino πλατφόρμα στο arduino nano.

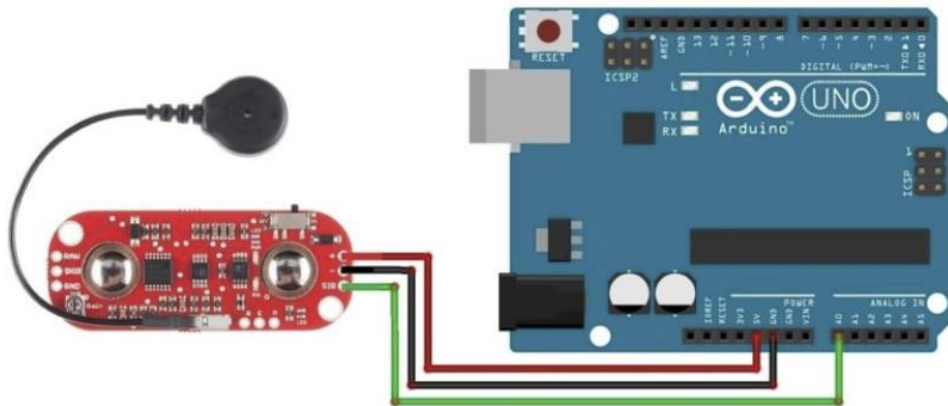
Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για την πλακέτα Arduino UNO, αλλά χωρίς να χρειαστεί να κατεβεί κάποιος περαιτέρω driver. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκε στην επιλογή 'Board' η Arduino UNO πλακέτα και για programmer η επιλογή Arduino as ISP. Οπότε τώρα που μπορούν να σταλούν αρχεία στους μικροεπεξεργαστές, είναι δυνατή η αρχή πειραμάτων των εξαρτημάτων.

Αρχικά έγινε προσπάθεια λειτουργίας του αισθητήρα EMG της Myoware. Η πλακέτα MyoWare διαθέτει δύο θέσεις για ηλεκτρόδια στη μέση και ένα με καλώδιο. Την θέση 1 για τροφοδοσία και την 2 για έδαφος. Στη θέση 3, είναι η θέση για τροποποιημένη και βελτιωμένη εξαγωγή σήματος και στην θέση 7 για raw σήματος. Υπάρχει διακόπτης on/off στην θέση 8 και ακόμα ένα GND. Υπάρχει δυνατότητα μεταβλητού gain για τα microvolt, που δέχεται από τους μύες.



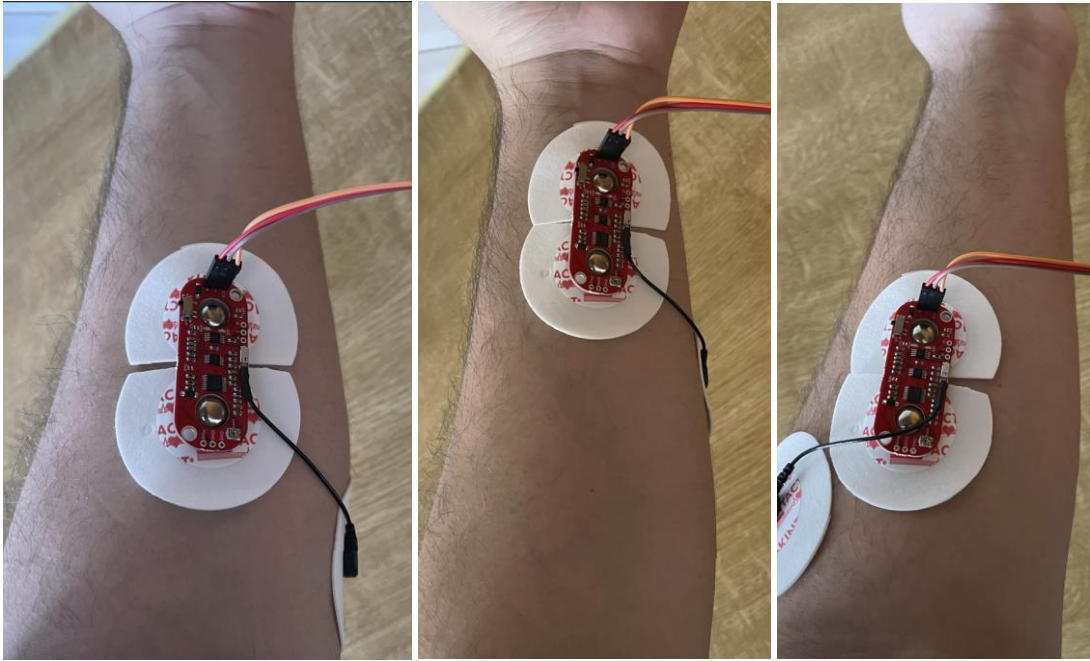
Εικόνα 3. 56 Schematic MyoWare sensor[4]

Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε κώδικας από DroneBot Workshop.[35] Όπως και η συνδεσμολογία από το How2Electronics.[36] Όπως φαίνεται παρακάτω, συνδέθηκε το +Vs από τη πλακέτα MyoWare με το 5V του Arduino Uno, το -GND με ένα από τα GND του arduino UNO και το Signal με το αναλογικό Port A0 του Arduino UNO.



Εικόνα 3. 57 Σύνδεση MyoWare Sensor με Arduino UNO[36]

Στη συνέχεια, έγιναν κάποια πειράματα για να βρεθεί το κατάλληλο σημείο στο χέρι καθώς έχει μεγάλη σημασία. Διαπιστώθηκε, τόσο από τα πειράματα όσο και από την βιβλιογραφία, πως οι μετρήσεις αλλάζουν όχι μόνο από άτομο σε άτομο αλλά και από σημείο σε σημείο. Αυτό δεν είναι κάτι που θα του δοθεί μεγάλη σημασία στο συγκεκριμένο πρότζεκτ, καθώς η μελέτη περικαρπίου δεν είναι στους τωρινούς στόχους αλλά θα μπορούσε να είναι στους μελλοντικούς. Παρόλα αυτά, είναι σημαντικό να υπάρξει επικοινωνία με το βιομηχανικό μας χέρι.



Εικόνα 3. 58 Διάφορες τοποθετήσεις MyoWare Sensor

Ο κώδικας που γράφθηκε ήταν ο παρακάτω. Αν και απλός πολύ χρήσιμος για την κατανόηση του αισθητήρα. Δηλώνεται το A0 port και μία μεταβλητή για να χρησιμοποιηθεί για ανάγνωση των σημάτων. Ξεκινάει η μπάντα 9600 και για να μπορεί να υπάρχει μια σταθερότητα στην ανάγνωση του Plotter γίνονται print το 0 και το 1000. Στη συνέχεια διαβάζει τις τιμές του αισθητήρα και τις κάνει Print.

```
/*
  Myoware Muscle Sensor Test
  myoware-test-plotter.ino
  Demo of Myoware Muscle Sensor
  Output to Serial Monitor
  Use battery-powered computer or USB isolator for safety!
  DroneBot Workshop 2021
  https://dronebotworkshop.com
*/

// Connection to Myoware sensor
#define SENSOR_PIN 0 //Δήλωση A0

// Integer for sensor value
int sensorValue;

void setup() {

  // Set up serial port
  Serial.begin(9600);

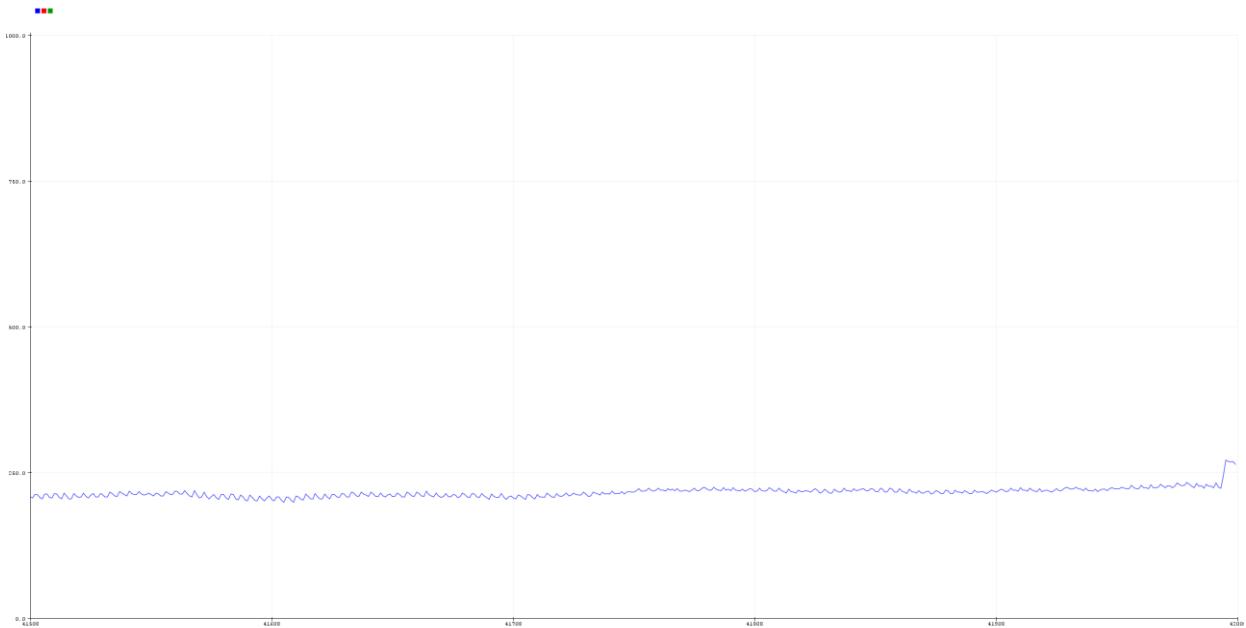
  // Add "fake" plots to stabilize Y axis
  Serial.print(0); // To freeze the lower limit
  Serial.print(" ");
  Serial.print(1000); // To freeze the upper limit
  Serial.print(" ");
}

void loop() {

  sensorValue=analogRead(SENSOR_PIN);
  // Print value to Serial Monitor
  Serial.println(sensorValue);
}
```

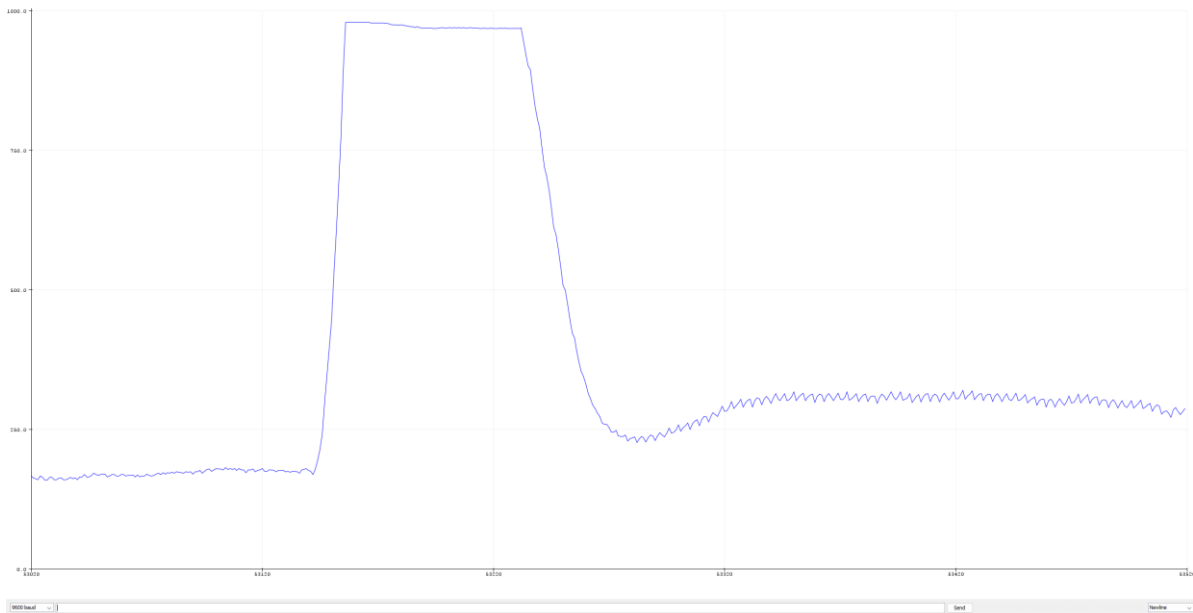
Εικόνα 3. 59 κώδικας

Το serial plotter όντως έχει σταθερές τιμές στον Y άξονα το 0 έως το 1000. Φαίνεται πως στο συγκεκριμένο τοποθετημένο σημείο στο χέρι μου, χωρίς κάποια ενέργεια η τιμή μένει σταθερή κοντά στο 200.

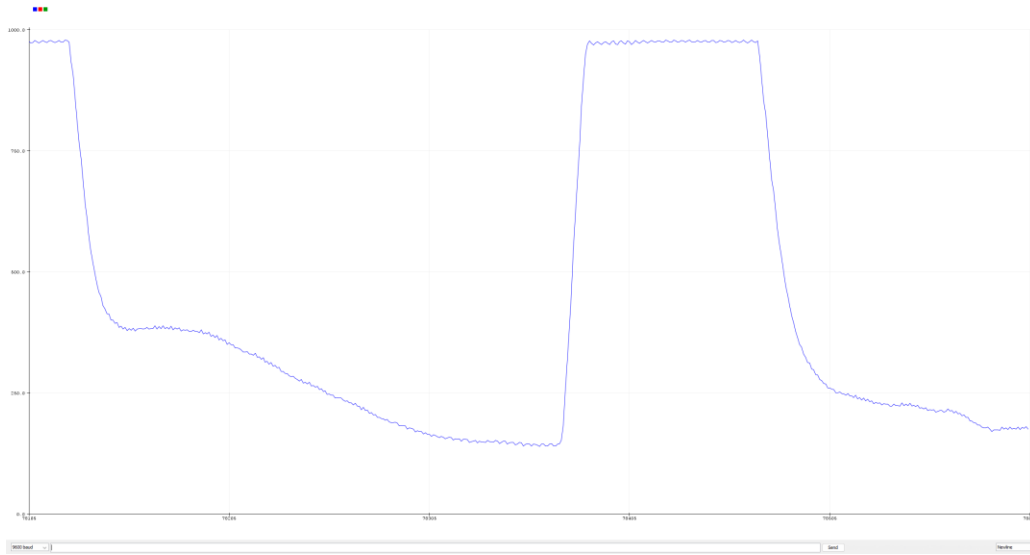


Εικόνα 3. 60 Serial Plotter χωρίς ενέργεια χεριού

Με συστολή του μυ του πήχη φαίνεται να πιάνονται μεγάλες τιμές. Να αναφερθεί ότι δεν πειράχτηκε το gain από την πλακέτα MyoWare καθώς το stock φαινόταν αρεστό.



Εικόνα 3. 61 Serial Plotter με ενέργεια χεριού



Εικόνα 3. 62 Serial Plotter χωρίς ενέργεια χειριού

Στην συνέχεια έγιναν πειράματα με τον αισθητήρα NRF24L01. Αυτός ο αισθητήρας έχει την δυνατότητα να γίνεται πομποδέκτης και παραλήπτης ραδιοκυμάτων.



Εικόνα 3. 63 ένδειξη ασύρματης επικοινωνίας NRF24L01[22]

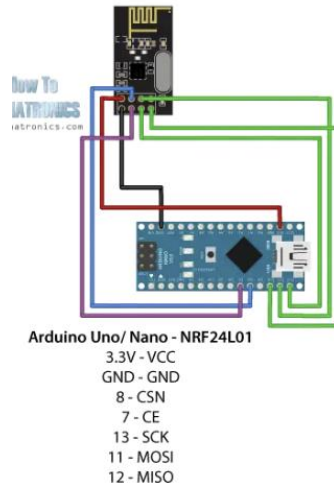
Το εύρος συχνοτήτων είναι μεταξύ 2.4 με 2.5 GHz. Τα data rates του είναι 250Kbs/1Mbs/2Mbs. Η τάση λειτουργίας του στα 1.9V-3.6V. Η μέγιστη κατανάλωση είναι στα 12.3 mA και standby 22μΑ και το εύρος έως 100m σε ανοιχτό χώρο.[22]

Όπως φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία, έχει ένα pin τροφοδοσίας και ένα GND. Τα MOSI, SCK και MISO είναι για επικοινωνία SPI και συνδέονται με τις θύρες SPI του Arduino. Κάθε Arduino έχει διαφορετικές θύρες SPI, οπότε πρέπει να γίνει προσεκτική τοποθέτηση ανά πλακέτα Arduino. Το Serial Peripheral Interface (SPI) είναι ένα σύγχρονο πρωτόκολλο σειριακών δεδομένων που χρησιμοποιείται από μικροελεγκτές για την γρήγορη επικοινωνία με μία ή περισσότερες περιφερειακές συσκευές σε μικρές αποστάσεις[37]. Υπάρχουν δύο Pin CSN και CE που είναι υπεύθυνα για το αν η πλακέτα είναι σε ενεργό ή standby mode και αν είναι σε mode πομποδέκτη ή παραλήπτη. Συνδέονται σε οποιαδήποτε ψηφιακή θύρα της πλακέτας Arduino. Τέλος υπάρχει το pin IRQ που χρησιμοποιείται για λειτουργία interrupt, αλλά δεν χρειάζεται στο πρότζεκτ αυτό να χρησιμοποιηθεί.[22]



Εικόνα 3. 64 NRF24L01 pins[22]

Έγινε η αντίστοιχη συνδεσμολογία.



Εικόνα 3. 65 συνδεσμολογία NRF24L01 με Arduino[22]

Χρειάστηκε να φτιαχθούν δύο sketches κώδικα για το συγκεκριμένο πείραμα, ένα για το πομποδέκτη και ένα για τον παραλήπτη. Για πομποδέκτη θα χρησιμοποιηθεί ο αισθητήρας NRF24 I01 που είναι συνδεδεμένος με το Arduino Uno και για παραλήπτη θα χρησιμοποιηθεί ο αισθητήρας συνδεδεμένος στο Arduino Nano.

```

/*
 * Arduino Wireless Communication Tutorial
 * Example 1 - Transmitter Code
 *
 * by Dejan Nedelkovski, www.HowToMechatronics.com
 *
 * Library: TMRh20/RF24, https://github.com/tmrh20/RF24/
 */

#include <SPI.h>
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>

RF24 radio(7, 8); // CE, CSN

const byte address[6] = "00001";

void setup() {
  radio.begin();
  radio.openWritingPipe(address);
  radio.setPALevel(RF24_PA_MIN);
  radio.stopListening();
}

void loop() {
  const char text[] = "Hello World";
  radio.write(text, sizeof(text));
  delay(1000);
}
    
```

Εικόνα 3. 66 κώδικας

Στον κώδικα του πομποδέκτη χρησιμοποιήθηκαν 3 βιβλιοθήκες. Η SPI.h που δίνει έτοιμες λειτουργίες για την χρήση των SPI θυρών, η NRF24L01.h και RF24.h που δίνουν τη δυνατότητα για εύκολη χρήση εντολών σχετικά με τον αισθητήρα NRF24L01. Έγινε δήλωση των pin CE και CSN στις θύρες 7 και 8 του Arduino Uno. Δηλώνεται address 00001 όπου πρέπει να είναι κοινό και στον παραλήπτη για να γίνει επικοινωνία. Στο Void setup ξεκινάει τον αισθητήρα, τον συγχρονίζει στην διεύθυνση 00001 ως πομποδέκτη, θέτει εύρος και ξεκινάει να ακούει. Ναι, ως πομποδέκτης μπορεί επίσης να δεχτεί και μηνύματα. Στο Void loop δηλώνει ένα char και το γεμίζει με το 'hello world' και το στέλνει όπως και το μέγεθος του ανά 1 δευτερόλεπτο.

```

/*
 * Arduino Wireless Communication Tutorial
 * Example 1 - Receiver Code
 *
 * by Dejan Nedelkovski, www.HowToMechatronics.com
 *
 * Library: TMRh20/RF24, https://github.com/tmrh20/RF24/
 */

#include <SPI.h>
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>

RF24 radio(7, 8); // CE, CSN

const byte address[6] = "00001";

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  radio.begin();
  radio.openReadingPipe(0, address);
  radio.setPALevel(RF24_PA_MIN);
  radio.startListening();
}

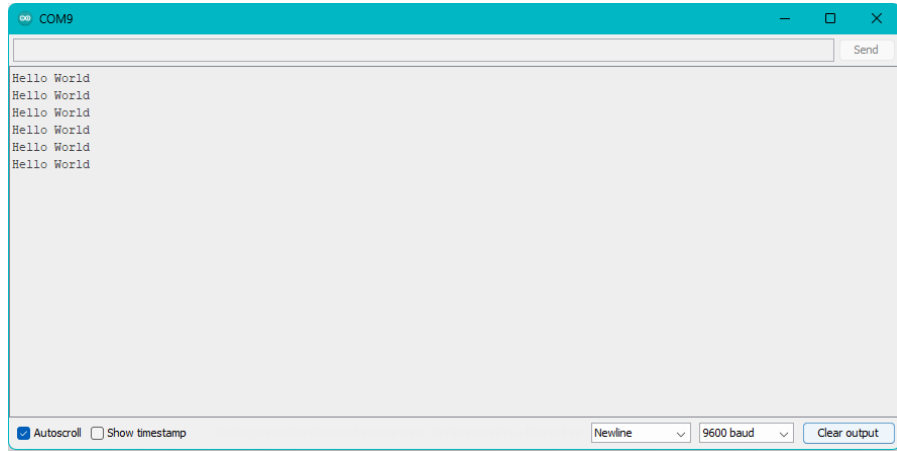
void loop() {
  if (radio.available()) {
    char text[32] = "";
    radio.read(&text, sizeof(text));
    Serial.println(text);
  }
}

```

Εικόνα 3. 67 κώδικας

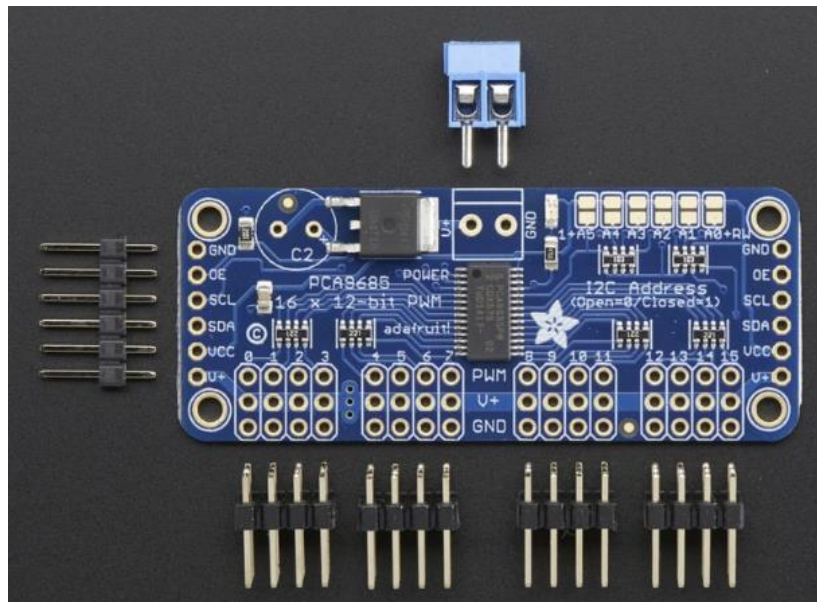
Στον κώδικα του παραλήπτη γίνονται οι ίδιες ακριβώς ενέργειες, παρόλο που είναι διαφορετική πλακέτα με την διαφορά στο void setup αντί για εντολή radio.openWritingPipe είναι radio.openReadingPipe. Αυτή η εντολή μετατρέπει τον αισθητήρα σε παραλήπτη. Στην συνέχεια, αν υπάρχει διαθέσιμο σήμα, διαβάζει το μέγεθος και το περιεχόμενο του και το αποθηκεύει προσωρινά στην μεταβλητή text και την εκτυπώνει στο serial monitor. Αν έχουν γίνει όλα σωστά, θα πρέπει να αναγράφεται Hello World ανά ένα δευτερόλεπτο.[22]

Το πειράματα θεωρούνται πετυχημένα, καθώς λαμβάνεται το κείμενο Hello World στο Arduino Uno από το Arduino Nano.



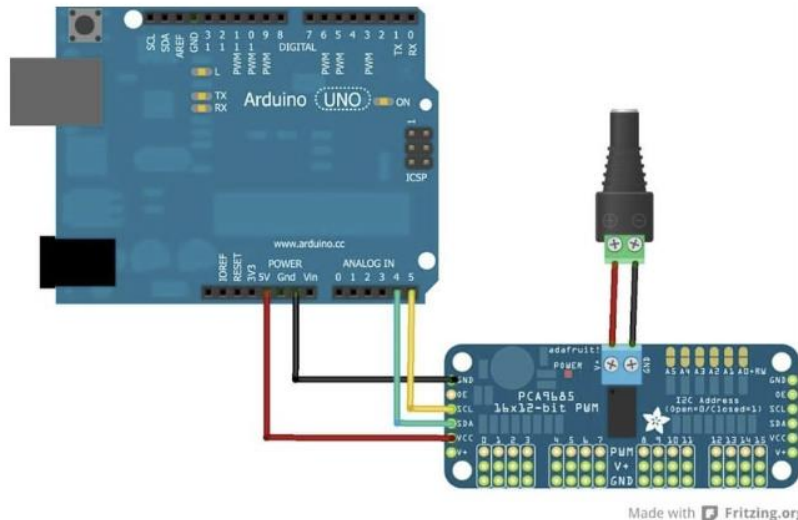
Εικόνα 3. 68 αποτέλεσμα πειράματος NRF24L01

Το τελικό hardware που έπρεπε να εξετασθεί ήταν η πλακέτα PCA9685 και τα servo motor MG996R και MG90S. Η πλακέτα PCA9685 οργανώνει και απλοποιεί τη χρήση πολλών servo motor. Μπορεί να δεχθεί έως και 16 διαφορετικά servo ταυτόχρονα. Οι θύρες αριστερά και δεξιά της πλακέτας είναι πανομοιότυπες. Η θύρα GND είναι το έδαφος, η θύρα OE είναι για την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση των θυρών. Όταν είναι ενεργοποιημένη, απενεργοποιεί όλες τις θύρες εξόδου, όταν είναι απενεργοποιημένη τις ενεργοποιεί. SCL θύρα που είναι το I2C clock pin και συνδέεται με το ανάλογο pin στο Arduino. SDA pin που είναι το I2C data pin όπου επίσης συνδέεται με το I2C data pin του Arduino. Εδώ θέλει προσοχή, καθώς το vcc είναι υπεύθυνο για την τροφοδοσία της πλακέτας και το v+ για την τροφοδοσία των μοτέρ. Υπάρχουν 16 γραμμές θυρών για τα μοτέρ όπου η κάθε μια έχει ένα GND και ένα v+ για την τροφοδοσία και ένα pwm για να δίνει την θέση στα servo motor. Κάθε σειρά έχει ανεξάρτητο pwm pin.



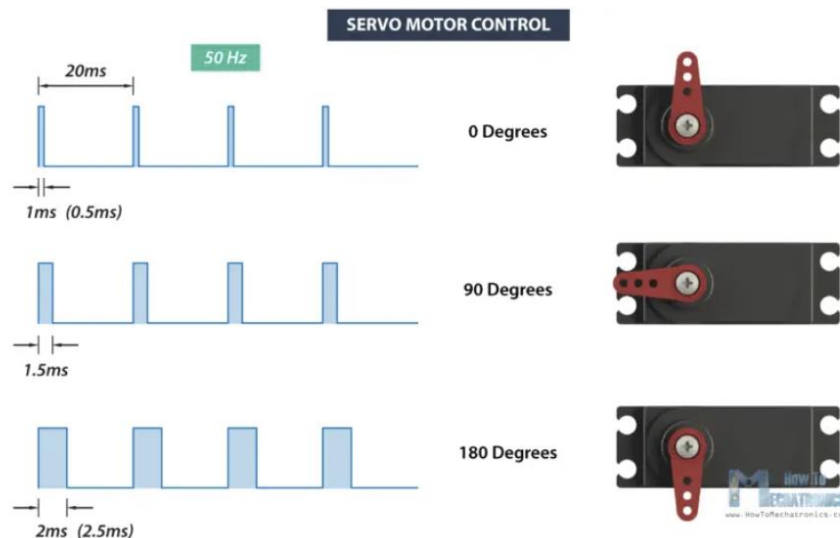
Εικόνα 3. 69 PCA9685[23]

Η σύνδεση με το Arduino nano έγινε όπως φαίνεται παρακάτω. Θα χρησιμοποιηθεί εξωτερική τροφοδοσία της πλακέτας όπως και πάλι φαίνεται παρακάτω καθώς χρησιμοποιούμε αρκετά μοτέρ. Για την ακρίβεια θα χρησιμοποιηθεί τροφοδοτικό 10A και 5V.



Εικόνα 3. 70 συνδεσμολογία PCA9685 με Arduino[23]

Ένας σερβοκινητήρας είναι ένα σύστημα κλειστού βρόχου που χρησιμοποιεί ανάδραση θέσης για να ελέγξει την κίνηση και την τελική του θέση. Υπάρχουν πολλοί τύποι σερβοκινητήρων και το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η δυνατότητα να ελέγχουν με ακρίβεια τη θέση του άξονα τους. Ένας σερβοκινητήρας ελέγχεται στέλνοντας μια σειρά παλμών μέσω της γραμμής σήματος. Η συχνότητα του σήματος ελέγχου πρέπει να είναι 50 Hz ή ένας παλμός πρέπει να εμφανίζεται κάθε 20 ms. Το πλάτος του παλμού καθορίζει τη γωνιακή θέση του σερβομηχανισμού και αυτοί οι τύποι σερβομηχανισμού μπορούν συνήθως να περιστρέφονται 180 μοίρες (έχουν φυσικά όρια διαδρομής). Αυτός ο παλμός παίρνεται από την θύρα pwm, έχοντας άλλες δύο θύρες με 5V και GND.



Εικόνα 3. 71 Ένδειξη λειτουργίας servo[38]

Το κάθε μοτέρ σε λειτουργία καταναλώνει περίπου έως 650 mA, οπότε τόσο μεγάλη τροφοδοσία χρίζει απαραίτητη. Στο πείραμα που έγινε δεν ήταν απλά για καλή λειτουργία των μοτέρ, αλλά και για να βρεθούν τα όρια του κάθε μοτέρ. Κάθε μοτέρ έχει διαφορετικό εύρος μοιρών και σημείο που ξεκινάει και τελειώνει αυτό το εύρος.

```
Pick one up today in the adafruit shop!
-----> http://www.adafruit.com/products/815

These displays use I2C to communicate, 2 pins are required to
interface. For Arduino UNOs, thats SCL -> Analog 5, SDA -> Analog 4

Adafruit invests time and resources providing this open source code,
please support Adafruit and open-source hardware by purchasing
products from Adafruit!

Written by Limor Fried/Ladyada for Adafruit Industries.
BSD license, all text above must be included in any redistribution
*****/

#include <Wire.h>
#include <Adafruit_PWMServoDriver.h>

// called this way, it uses the default address 0x40
Adafruit_PWMServoDriver pwm = Adafruit_PWMServoDriver();
// you can also call it with a different address you want
//Adafruit_PWMServoDriver pwm = Adafruit_PWMServoDriver(0x41);

// Depending on your servo make, the pulse width min and max may vary, you
// want these to be as small/large as possible without hitting the hard stop
// for max range. You'll have to tweak them as necessary to match the servos you
// have!
#define SERVOMIN 200 // this is the 'minimum' pulse length count (out of 4096)
#define SERVOMAX 500 // this is the 'maximum' pulse length count (out of 4096)

// our servo # counter
uint8_t servonum = 0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("16 channel Servo test!");

  pwm.begin();

  pwm.setPWMPFreq(60); // Analog servos run at ~60 Hz updates

  //yield();
}

// the code inside loop() has been updated by Robojax
void loop() {

  //pwm.setPWM(0, 0, 100 );
  // pwm.setPWM(0, 0, 685 );
  delay(1000);
  pwm.setPWM(1, 0, 660);
  delay(1000);
  //pwm.setPWM(6, 0, 400);
  //delay(1000);

}

```

Εικόνα 3. 72 κώδικας

Με την βοήθεια του παραδείγματος της Adafruit δημιουργήθηκε ο παραπάνω κώδικας. Αρχικά εφαρμόστηκαν οι βιβλιοθήκες Wire.h και Adafruit_PWMServoDriver.h. Μετά χρησιμοποιήθηκε η προκαθορισμένη διεύθυνση 0X40 που ταιριάζει με την πλακέτα. Στην συνέχεια καθορίζονται οι μέγιστες και ελάχιστες pulse length. Στην ουσία αυτό δίνει το εύρος κίνησης. Μπορεί να είναι έως 4096 αλλά συνήθως είναι πολύ χαμηλότερο ποσό το μέγιστο εύρος του μοτέρ. Επίσης θέτει τον

αριθμό servo 0. Αυτά δεν θα χρησιμοποιηθούν για εξοικονόμηση χρόνου. Ξεκινάει η void setup ανοίγοντας μπάντα 9600 και ξεκινάει το σήμα pwm με συχνότητα 60Hz. Στο void loop έχουν αφαιρεθεί όλες οι εντολές εκτός από το να στέλνεται σήμα Pwm στην συγκεκριμένη θέση. Το 1 δείχνει το κανάλι σειράς στη πλακέτα PCA9685 και το 660 είναι το pulse length count.[23]

Ένα μοτέρ δυστυχώς ήταν ελατωματικό και χρειάστηκε αντικατάσταση, αλλά κατά τα άλλα το πείραμα θεωρείται επιτυχημένο και βγήκαν τα παρακάτω αποτελέσματα.

Αριθμός	Μοτέρ	Ελάχιστος pulse length count	Μέγιστος pulse length count	Μέση Τιμή	Κατάσταση	Αριθμός στο PCA96885
1	MG996R	100	670	285	Καλή	5
2	MG996R	100	685	292.5	Άριστη	0
3	MG996R	105	690	292.5	Μέτρια	3
4	MG996R	100	690	295	Μέτρια	2
5	MG996R				Κακή	
6	MG90S	100	660	280	Άριστη	1
Mini 1	MG996R	120	630	255	Άριστη	6
7	MG996R	100	660	280	Άριστη	4

Πίνακας 3. 1 αρίθμηση μοτέρ και καταγραφή των ευρών τους

Η αρίθμηση αριστερά έγινε πάνω στα μοτέρ και η αρίθμηση δεξιά είναι το κανάλι στην πλακέτα PCA9685.

Ο τελικός κώδικας χωρίστηκε σε δύο sketches πομποδέκτη και παραλήπτη. Αρχικά ας ξεκινήσουμε με τον πομποδέκτη δηλαδή για το Arduino UNO. Έγιναν παρόμοια βήματα με τα παραδείγματα.

```
#include <SPI.h>
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>

RF24 radio(7, 8); // CE, CSN

const byte address[6] = "00001";
// Connection to Myoware sensor
#define SENSOR_PIN 0

// Integer for sensor value
int sensorValue;
//Integer for switch
int value=0;

void setup() {

  // initialize serial communication:

  Serial.begin(9600);

  radio.begin();
  radio.openWritingPipe(address);
  radio.setPALevel(RF24_PA_MIN);
  radio.stopListening();

}
```

Εικόνα 3. 73 κώδικας

Στην συνέχεια υπάρχει μια switch που αν διαβάσει κάτι δίνει ανάλογη τιμή στη μεταβλητή Value.

```
void loop() {  
  
    sensorValue=analogRead(SENSOR_PIN);// read the sensor:  
  
    if (Serial.available() > 0) {  
  
        int inByte = Serial.read();  
  
        switch (inByte) {  
  
            case 'a':  
  
                //Serial.print("a");  
                value =1;  
                break;  
  
            case 'b':  
  
                value =2;  
  
                break;  
  
            case 'c':  
  
                value =3;  
                break;  
  
            case 'd':  
                value =4;  
                break;  
  
            case 'e':  
  
                value =5;  
  
        }  
    }  
}
```

Εικόνα 3. 74 κώδικας

Αν δεν υπάρχει κάτι για να διαβάσει από το serial monitor, μπαίνει σε μια switch που ανάλογα την τιμή που έχει, αν διαβάσει κίνηση μν θα στείλει “μεταβλητή_moved” αλλιώς θα στείλει “μεταβλητή_not_moved”

```
else{
  //Serial.print(value);
  switch (value) {

    case 1:

      if(sensorValue > 500){

        Serial.println("a_moved");
        const char textA[] = "a_moved";
        radio.write(&textA, sizeof(textA));
        delay(1000);

      }
      else{
        Serial.println("a_not moved");
        const char textB[] = "a_not_moved";
        radio.write(&textB, sizeof(textB));
      }
      break;

    case 2:

      if(sensorValue > 500){

        Serial.println("b_moved");
        const char textA[] = "b_moved";
        radio.write(&textA, sizeof(textA));
        delay(1000);

      }
      else{
        Serial.println("b_not moved");
        const char textB[] = "b_not moved";
        radio.write(&textB, sizeof(textB));
      }
      break;

    case 3:

      if(sensorValue > 500){

        Serial.println("c_moved");
        const char textA[] = "c_moved";
        radio.write(&textA, sizeof(textA));
        delay(1000);

      }
      else{
        Serial.println("c_not moved");
        const char textB[] = "c_not moved";
        radio.write(&textB, sizeof(textB));
      }
      break;

    case 4:

      if(sensorValue > 500){

        Serial.println("d_moved");
        const char textA[] = "d_moved";
        radio.write(&textA, sizeof(textA));
        delay(1000);

      }
      else{
        Serial.println("d_not moved");
        const char textB[] = "d_not moved";
        radio.write(&textB, sizeof(textB));
      }
      break;

    case 5:

      if(sensorValue > 500){

        Serial.println("e_moved");
        const char textA[] = "e_moved";
        radio.write(&textA, sizeof(textA));
        delay(1000);

      }
      else{
        Serial.println("e_not moved");
        const char textB[] = "e_not moved";
        radio.write(&textB, sizeof(textB));
      }
      break;

      }
      delay(100);
    }
  }
}
```

Εικόνα 3. 75 κώδικας

Οπότε για τον παραλήπτη υπάρχει διαφορετικός κώδικας. Αρχικά πρέπει να αναφερθεί ότι έγινε προσπάθεια για smooth κίνησης των servo motor. Με την βοήθεια του καναλιού <<Sam Wane>> φτιάχτηκε η παρακάτω συνάρτηση.[39] Δημιουργεί συνάρτηση που βάζοντας απλά, το κατάλληλο κανάλι του PCA9586, την θέση του μοτέρ, το πού είναι θεμιτό να καταλήξει και το χρόνο, δημιουργείται ομαλή πλοήγηση στον χρόνο που δηλώθηκε.

```
double Movement(int fingerNumber, double startDegreesValue, double endDegreesValue, double tf)
{
    double speed;
    //static unsigned long ts[]={};
    //static double endDegrees[]={};
    //static double currentAngle[]={};
    double t;

    if(endDegrees[fingerNumber] != endDegreesValue)
    {
        ts[fingerNumber] = millis();
        endDegrees[fingerNumber] = endDegreesValue;
    }
    speed = (endDegreesValue-startDegreesValue)/tf;
    t = (double)(millis() - ts[fingerNumber])/1000;

    if (t <= tf)
    {
        currentAngle[fingerNumber] = startDegreesValue + speed*t;
    }
    return currentAngle[fingerNumber];
}
... ..
```

Εικόνα 3. 76 κώδικας

Όπως και στα παραπάνω παραδείγματα μπαίνουν οι ίδιες βιβλιοθήκες και μεταβλητές, με την διαφορά ότι δηλώθηκε για `servomin` η μέγιστη ελάχιστη τιμή και για `servomax` η ελάχιστη μέγιστη τιμή.

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_PWMServoDriver.h>

#include <SPI.h>
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>

RF24 radio(7, 8); // CE, CSN

const byte address[6] = "00001";

// called this way, it uses the default address 0x40
Adafruit_PWMServoDriver pwm = Adafruit_PWMServoDriver();
// you can also call it with a different address you want
//Adafruit_PWMServoDriver pwm = Adafruit_PWMServoDriver(0x41);

// Depending on your servo make, the pulse width min and max may vary, you
// want these to be as small/large as possible without hitting the hard stop
// for max range. You'll have to tweak them as necessary to match the servos you
// have!
#define ServoMin 105 // this is the 'minimum' pulse length count (out of 4096)
#define ServoMax 660 // this is the 'maximum' pulse length count (out of 4096)
```

Εικόνα 3. 77 κώδικας

Έπειτα, δηλώθηκαν όλα τα μοτέρ δαχτύλων και αρθρώσεων. Όπως και συγκεντρώθηκαν σε ένα array. Δημιουργήθηκαν μεταβλητές για την συνάρτηση της smooth κίνησης των μοτέρ και διάφορες μεταβλητές που θα χρησιμοποιηθούν παρακάτω.

```
//variables for fingers and joints:
int indexFinger=5;
int middleFinger=0;
int ringFinger=3;
int littleFinger=2;
int thumb = 1;
int xRotationJoint = 4;
int zRotationJoint = 6;
int fingers[]={indexFinger, middleFinger, ringFinger, littleFinger, thumb};
double pulselength[]={};
//double degreesIndex=0;
double degrees[]={0,0,0,0,0,0,0};
double lastPosition[]={0,0,0,0,0,0,0};
char state;
String movement;
int count=0;

//bool setUp = false; //variable for setting up the starting positions

//variables for smooth movement of servos:
unsigned long ts[]={0,0,0,0,0,0,0};
double endDegrees[]={1,1,1,1,1,1,1};
double currentAngle[]={1,1,1,1,1,1,1};
bool wakeUp = false; //gives the state of first boot
```

Εικόνα 3. 78 κώδικας

Στο Void Setup είναι όπως τα παραδείγματα παραπάνω και γράφεται η συνάρτηση smooth κίνησης μοτέρ.

```

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  radio.begin();
  radio.openReadingPipe(0, address);
  radio.setPALevel(RF24_PA_MIN);
  radio.startListening();

  pwm.begin();

  pwm.setPWMFreq(60); // Analog servos run at ~60 Hz updates
  // pulseLengthIndex = map(degreesIndex, 0, 180, IndexServoMin, IndexServoMax);
  //yield();
  //pulseLength = map(degrees, 0, 180, ServoMin, ServoMax);
  //pwm.setPWM(0, 0, 200);
}

double Movement(int fingerNumber, double startDegreesValue, double endDegreesValue, double tf)
{
  double speed;
  //static unsigned long ts[]={};
  //static double endDegrees[]={};
  //static double currentAngle[]={};
  double t;

  if(endDegrees[fingerNumber] != endDegreesValue)
  {
    ts[fingerNumber] = millis();
    endDegrees[fingerNumber] = endDegreesValue;
  }
  speed = (endDegreesValue-startDegreesValue)/tf;
  t = (double)(millis() - ts[fingerNumber])/1000;

  if (t <= tf)
  {
    currentAngle[fingerNumber] = startDegreesValue + speed*t;
  }
  return currentAngle[fingerNumber];
}

```

Εικόνα 3. 79 κώδικας

Μπαίνοντας στη void loop για την πρώτη εκκίνηση του Arduino έχει δημιουργηθεί η παρακάτω if που αν η wakeup μεταβλητή είναι λάθος τότε το βιομηχανικό χέρι κάνει set up. Φαίνεται η χρήση του Array fingers καθώς τα δάχτυλα 0 έως 3 του δίνεται τιμή θέση 0 μοιρών. Η μετατροπή των pulse length count σε μοίρες επιτυγχάνεται με μια εντολή map. Αποθηκεύεται η τελική θέση των μοτέρ για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί παρακάτω. Καταγράφεται το wakeup ότι είναι πλέον αληθές.

```

void loop() {

  if(wakeup==false){

    for (int i=0; i < 4; i++) {
      degrees[fingers[i]] = 0;
      pulseLength[fingers[i]] = map(degrees[fingers[i]], 0, 180, ServoMin, ServoMax);
      pwm.setPWM(fingers[i], 0, pulseLength[fingers[i]]);
      lastPosition[fingers[i]]=degrees[fingers[i]];
      degrees[thumb] = 120;
      pulseLength[thumb] = map(degrees[thumb], 0, 180, ServoMin, ServoMax);
      pwm.setPWM(thumb, 0, pulseLength[thumb]);
      lastPosition[thumb]=degrees[thumb];

      delay(100);
    }

    wakeup=true;
  }

  else{

```

Εικόνα 3. 80 κώδικας

Μετά αν βρεθεί πακέτο εξάγεται το πρώτο γράμμα ως state και το υπόλοιπο αποθηκεύεται ως movement. Για παράδειγμα αν έρθει πακέτο a_moved, το state θα είναι a και το movement θα είναι a_moved.

```
else{  
  
    if (radio.available()) {  
        char text[32] = "";  
        radio.read(&text, sizeof(text));  
        movement=String(text);  
        Serial.println(text);  
        Serial.println(movement);  
        String myString(movement);  
        state = myString.charAt(0);  
  
        delay(10);  
    }  
}
```

Εικόνα 3. 81 κώδικας

Στην συνέχεια ξεκινάει switch βάσει του state. Στην περίπτωση a γίνεται η λαβή full hand grip. Χρησιμοποιείται η συνάρτηση για smooth κίνηση με την τωρινή θέση την lastPosition, έπειτα οι ανάλογες μοίρες και τέλος ο χρόνος. Μετά την ολοκλήρωση της λαβής αποθηκεύεται ξανά η τελευταία θέση. Αν ξαναγίνει συστολή του μυ από τον χρήστη, το χέρι επιστρέφει στην αρχική κατάσταση. Στην συγκεκριμένη περίπτωση κλείνουν όλα τα δάχτυλα δηλαδή θέση 180 και ανοίγουν ξανά δηλαδή θέση 0.

```

switch (state) {

case 'a': //full hand grip
if(movement=="a_moved"&&degrees[ringFinger]<=179){
while(degrees[ringFinger]<=179){
degrees[indexFinger] = Movement(indexFinger,lastPosition[indexFinger], 180, 6);
degrees[middleFinger] = Movement(middleFinger, lastPosition[middleFinger], 180, 6);
degrees[ringFinger] = Movement(ringFinger, lastPosition[ringFinger], 180, 6);
degrees[littleFinger] = Movement(littleFinger, lastPosition[littleFinger], 180, 6);
degrees[thumb] = Movement(thumb, lastPosition[thumb], 180, 6);
for (int i=0; i < 5; i++) {
pulselength[fingers[i]] = map(degrees[fingers[i]], 0, 180, ServoMin, ServoMax);
pwm.setPWM(fingers[i], 0, pulselength[fingers[i]]);
lastPosition[fingers[i]]=degrees[fingers[i]];
delay(10);
}
}
Serial.print(degrees[ringFinger]);
Serial.print("\t");
delay(1000);
}
else if(movement=="a_moved"&&degrees[ringFinger]>=1) {

while(degrees[ringFinger]>=1){
degrees[indexFinger] = Movement(indexFinger,lastPosition[indexFinger], 0, 6);
degrees[middleFinger] = Movement(middleFinger, lastPosition[middleFinger], 0, 6);
degrees[ringFinger] = Movement(ringFinger, lastPosition[ringFinger], 0, 6);
degrees[littleFinger] = Movement(littleFinger, lastPosition[littleFinger], 0, 6);
degrees[thumb] = Movement(thumb, lastPosition[thumb], 0, 6);
for (int i=0; i < 5; i++) {
pulselength[fingers[i]] = map(degrees[fingers[i]], 0, 180, ServoMin, ServoMax);
pwm.setPWM(fingers[i], 0, pulselength[fingers[i]]);
lastPosition[fingers[i]]=degrees[fingers[i]];
delay(10);
}
}
Serial.print(degrees[ringFinger]);
Serial.print("\t");
delay(1000);

}
else{

break;

}
break;
}

```

Εικόνα 3. 82 κώδικας

Στην επόμενη περίπτωση είναι το pinch grip με δύο δάχτυλα που κλείνουν ο δείκτης και το μεσαίο δάχτυλο, σε διαφορετική ταχύτητα από τον αντίχειρα για να γίνει η λαβή

```

case 'b': //3 fingers grip A
  if(movement=="b_moved"&&degrees[indexFinger]<=179){

  while(degrees[indexFinger]<=179){
degrees[indexFinger] = Movement(indexFinger,lastPosition[indexFinger], 180, 12);
degrees[middleFinger] = Movement(middleFinger, lastPosition[middleFinger], 180, 12);
degrees[ringFinger] = Movement(ringFinger, lastPosition[ringFinger], 0, 6);
degrees[littleFinger] = Movement(littleFinger, lastPosition[littleFinger], 0, 6);
degrees[thumb] = Movement(thumb, lastPosition[thumb], 180, 6);
for (int i=0; i < 5; i++) {
  pulselength[fingers[i]] = map(degrees[fingers[i]], 0, 180, ServoMin, ServoMax);
  pwm.setPWM(fingers[i], 0, pulselength[fingers[i]]);
  lastPosition[fingers[i]]=degrees[fingers[i]];
  delay(10);
}
}
Serial.print(degrees[ringFinger]);
Serial.print("\t");
delay(1000);
}

else if(movement=="b_moved" && degrees[indexFinger]>=1) {

  while(degrees[indexFinger]>=1){
degrees[indexFinger] = Movement(indexFinger,lastPosition[indexFinger], 0, 6);
degrees[middleFinger] = Movement(middleFinger, lastPosition[middleFinger], 0, 6);
degrees[ringFinger] = Movement(ringFinger, lastPosition[ringFinger], 0, 6);
degrees[littleFinger] = Movement(littleFinger, lastPosition[littleFinger], 0, 6);
degrees[thumb] = Movement(thumb, lastPosition[thumb], 0, 6);
for (int i=0; i < 5; i++) {
  pulselength[fingers[i]] = map(degrees[fingers[i]], 0, 180, ServoMin, ServoMax);
  pwm.setPWM(fingers[i], 0, pulselength[fingers[i]]);
  lastPosition[fingers[i]]=degrees[fingers[i]];
  delay(10);
}
}
Serial.print(degrees[ringFinger]);
Serial.print("\t");
delay(1000);

}

else{

  break;

}

break.

```

Εικόνα 3. 83 κώδικας

Στην περίπτωση c θα γίνει περιστροφή του καρπού. Αν δεχθεί την εντολή μια φορά θα πάει στις 140 μοίρες, δεύτερη φορά στις 60 και τρίτη φορά ξανά στις 90 μοίρες.

```

break,
case 'c': //z rotation

for (int i=0; i < 4; i++) {
    degrees[fingers[i]] = 0;
    pulselength[fingers[i]] = map(degrees[fingers[i]], 0, 180, ServoMin, ServoMax);
    pwm.setPWM(fingers[i], 0, pulselength[fingers[i]]);
    lastPosition[fingers[i]]=degrees[fingers[i]];
    degrees[thumb] = 0;
    pulselength[thumb] = map(degrees[thumb], 0, 180, ServoMin, ServoMax);
    pwm.setPWM(thumb, 0, pulselength[thumb]);
    lastPosition[thumb]=degrees[thumb];
    delay(100);
}
if(movement=="c_moved"&&count==0){

    count=count+1;
    degrees[zRotationJoint] = 140;
    pulselength[zRotationJoint] = map(degrees[zRotationJoint], 0, 180, ServoMin, ServoMax);
    pwm.setPWM(zRotationJoint, 0, pulselength[zRotationJoint]);
    delay(100);

}
else if(movement=="c_moved"&&count==1){

    count=count+1;
    degrees[zRotationJoint] = 60;
    pulselength[zRotationJoint] = map(degrees[zRotationJoint], 0, 180, ServoMin, ServoMax);
    pwm.setPWM(zRotationJoint, 0, pulselength[zRotationJoint]);
    delay(100);

}
else if("c_moved"&&count==2){
    count=0;
    degrees[zRotationJoint] = 90;
    pulselength[zRotationJoint] = map(degrees[zRotationJoint], 0, 180, ServoMin, ServoMax);
    pwm.setPWM(zRotationJoint, 0, pulselength[zRotationJoint]);
    delay(100);
}
else{
    break;
}

break;

```

Εικόνα 3. 84 κώδικας

Στην περίπτωση d είναι το grip pinch με ένα δάχτυλο. Όπως και στο pinch με δύο δάχτυλα έτσι και στο pinch με ένα δάχτυλο κλείνει ο δείκτης με διαφορετική ταχύτητα από ότι ο αντίχειρας.

```

case 'd': // 3 finger grip b
  if (movement=="d_moved" && degrees[indexFinger] <= 179) {

    while (degrees[indexFinger] <= 179) {
      degrees[indexFinger] = Movement(indexFinger, lastPosition[indexFinger], 180, 20);
      degrees[middleFinger] = Movement(middleFinger, lastPosition[middleFinger], 0, 6);
      degrees[ringFinger] = Movement(ringFinger, lastPosition[ringFinger], 0, 6);
      degrees[littleFinger] = Movement(littleFinger, lastPosition[littleFinger], 0, 6);
      degrees[thumb] = Movement(thumb, lastPosition[thumb], 180, 6);
      for (int i=0; i < 5; i++) {
        pulselength[fingers[i]] = map(degrees[fingers[i]], 0, 180, ServoMin, ServoMax);
        pwm.setPWM(fingers[i], 0, pulselength[fingers[i]]);
        lastPosition[fingers[i]] = degrees[fingers[i]];
        delay(10);
      }
      Serial.print(degrees[ringFinger]);
      Serial.print("\t");
      delay(1000);
    }

    else if (movement=="d_moved" && degrees[indexFinger] >= 1) {

      while (degrees[indexFinger] >= 1) {
        degrees[indexFinger] = Movement(indexFinger, lastPosition[indexFinger], 0, 6);
        degrees[middleFinger] = Movement(middleFinger, lastPosition[middleFinger], 0, 6);
        degrees[ringFinger] = Movement(ringFinger, lastPosition[ringFinger], 0, 6);
        degrees[littleFinger] = Movement(littleFinger, lastPosition[littleFinger], 0, 6);
        degrees[thumb] = Movement(thumb, lastPosition[thumb], 0, 6);
        for (int i=0; i < 5; i++) {
          pulselength[fingers[i]] = map(degrees[fingers[i]], 0, 180, ServoMin, ServoMax);
          pwm.setPWM(fingers[i], 0, pulselength[fingers[i]]);
          lastPosition[fingers[i]] = degrees[fingers[i]];
          delay(10);
        }
        Serial.print(degrees[ringFinger]);
        Serial.print("\t");
        delay(1000);
      }

    }
  }
  else {
    break;
  }
  break;
}

```

Εικόνα 3. 85 κώδικας

Τέλος στην περίπτωση e είναι το rock grip που κλείνουν απλά το μεσαίο δάχτυλο και ο παράμεσος.

```

case 'e': //rock grip
if(movement=="e_moved"&&degrees[ringFinger]<=179){
while(degrees[ringFinger]<=179){
degrees[indexFinger] = Movement(indexFinger,lastPosition[indexFinger], 0, 6);
degrees[middleFinger] = Movement(middleFinger, lastPosition[middleFinger], 180, 6);
degrees[ringFinger] = Movement(ringFinger, lastPosition[ringFinger], 180, 6);
degrees[littleFinger] = Movement(littleFinger, lastPosition[littleFinger], 0, 6);
degrees[thumb] = Movement(thumb, lastPosition[thumb], 0, 6);
for (int i=0; i < 5; i++) {
pulselength[fingers[i]] = map(degrees[fingers[i]], 0, 180, ServoMin, ServoMax);
pwm.setPWM(fingers[i], 0, pulselength[fingers[i]]);
lastPosition[fingers[i]]=degrees[fingers[i]];
delay(10);
}
}
Serial.print(degrees[ringFinger]);
Serial.print("\t");
delay(1000);
}
else if(movement=="e_moved"&&degrees[ringFinger]>=1) {

while(degrees[ringFinger]>=1){
degrees[indexFinger] = Movement(indexFinger,lastPosition[indexFinger], 0, 6);
degrees[middleFinger] = Movement(middleFinger, lastPosition[middleFinger], 0, 6);
degrees[ringFinger] = Movement(ringFinger, lastPosition[ringFinger], 0, 6);
degrees[littleFinger] = Movement(littleFinger, lastPosition[littleFinger], 0, 6);
degrees[thumb] = Movement(thumb, lastPosition[thumb], 0, 6);
for (int i=0; i < 5; i++) {
pulselength[fingers[i]] = map(degrees[fingers[i]], 0, 180, ServoMin, ServoMax);
pwm.setPWM(fingers[i], 0, pulselength[fingers[i]]);
lastPosition[fingers[i]]=degrees[fingers[i]];
delay(10);
}
}
Serial.print(degrees[ringFinger]);
Serial.print("\t");
delay(1000);

}
else{

break;

}
break;

}
}
}

```

Εικόνα 3. 86 κώδικας

3.5 ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Όπως αναφέρει το wiki, η τρισδιάστατη εκτύπωση ή η προσθετική κατασκευή είναι η κατασκευή ενός τρισδιάστατου αντικειμένου από μοντέλο CAD ή ψηφιακό τρισδιάστατο μοντέλο. Μπορεί να γίνει με μια ποικιλία διεργασιών στις οποίες το υλικό εναποτίθεται, ενώνεται ή στερεοποιείται υπό έλεγχο υπολογιστή, με το υλικό να προστίθεται μαζί (όπως πλαστικά, υγρά ή κόκκοι σκόνης που συντηκονται), συνήθως στρώμα προς στρώμα.[2]

Ο εκτυπωτής προσθετικής κατασκευής που θα χρησιμοποιηθεί είναι το CR10 Mini της Creality3D. Είναι τεχνολογίας FDM, ανοιχτού τύπου, δέχεται νήμα πλαστικού στα 1.75mm πάχος έχει όγκο διαθέσιμης εκτύπωσης 200X220X300.

Για υλικά εκτύπωσης υπάρχουν πολλές επιλογές πλαστικών νημάτων. Κάποιες από τις πιο δημοφιλείς είναι οι παρακάτω:

Polylactic acid (PLA) είναι εύκολα ο πιο δημοφιλής τύπος νήματος τρισδιάστατου εκτυπωτή καθώς εκτυπώνεται εύκολα. Έχει χαμηλότερη θερμοκρασία εκτύπωσης από το ABS και δεν παραμορφώνεται τόσο εύκολα, που σημαίνει ότι δεν απαιτείται θερμαινόμενο κρεβάτι εκτύπωσης (αν και σίγουρα βοηθάει). Ένα άλλο πλεονέκτημα της χρήσης PLA είναι ότι δεν εκπέμπει δυσάρεστη οσμή κατά την εκτύπωση (σε αντίθεση με το ABS). Θεωρείται γενικά ένα άοσμο νήμα, αλλά πολλοί έχουν αναφέρει ότι μυρίζουν γλυκές αναθυμιάσεις που μοιάζουν με καραμέλα ανάλογα με τον τύπο του PLA. Μια άλλη ελκυστική πτυχή του PLA είναι ότι διατίθεται σχεδόν σε ατελείωτη αφθονία χρωμάτων και στυλ. Το PLA είναι, ως ένα σημείο, πιο φιλικό προς το περιβάλλον από πολλά νήματα τρισδιάστατων εκτυπωτών. Θα βιοδιασπαστεί υπό ορισμένες εμπορικά εφικτές συνθήκες.

Σε σύγκριση με άλλους τύπους νήματος τρισδιάστατων εκτυπωτών, το PLA είναι εύθραυστο, επομένως αποφύγετε να το χρησιμοποιείτε όταν φτιάχνετε αντικείμενα που μπορεί να λυγίσουν, να στρίψουν ή να πέφτουν επανειλημμένα, όπως θήκες τηλεφώνου, παιχνίδια με μεγάλη φθορά ή λαβές εργαλείων. Θα πρέπει επίσης να αποφεύγεται η χρήση του σε αντικείμενα που πρέπει να αντέχουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες, καθώς το PLA τείνει να παραμορφώνεται σε θερμοκρασίες 60 °C ή υψηλότερες. Για όλες τις άλλες εφαρμογές, το PLA αποτελεί μια καλή συνολικά επιλογή σε νήμα 3D εκτυπωτή.

Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) είναι λιγότερο δημοφιλές από το PLA. Ωστόσο, όσον αφορά τις ιδιότητες του υλικού, το ABS είναι στην πραγματικότητα ανώτερο από το PLA, παρά το γεγονός ότι είναι πιο δύσκολο στην εκτύπωση - είναι επιρρεπές σε στρέβλωση χωρίς ζεστό κρεβάτι εκτύπωσης και κόλλα κρεβατιού και κλειστού τύπου εκτυπωτή. Το ABS, που χρησιμοποιείται συνήθως στη χύτευση με έγχυση, βρίσκεται σε πολλά κατασκευασμένα οικιακά και καταναλωτικά αγαθά, συμπεριλαμβανομένων των τούβλων LEGO και κράνη ποδηλάτων. Το ABS είναι σκληρό και μπορεί να αντέξει την υψηλή πίεση και τη θερμοκρασία. Είναι επίσης κάπως ευέλικτο, αν και σίγουρα υπάρχουν καλύτερες επιλογές για αυτό. Αυτές οι ιδιότητες κάνουν το ABS ένα καλό νήμα τρισδιάστατου εκτυπωτή γενικής χρήσης, αλλά εκεί που πραγματικά αξίζει η χρήση του είναι με αντικείμενα που χρησιμοποιούνται συχνά, πέφτουν ή θερμαίνονται. Παραδείγματα περιλαμβάνουν θήκες τηλεφώνων, παιχνίδια με μεγάλη φθορά, λαβές εργαλείων, εξαρτήματα επένδυσης αυτοκινήτου και ηλεκτρικά περιβλήματα.

Polyethylene terephthalate (PET) είναι ένα από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα πλαστικά στον κόσμο. Πιο γνωστό ως το πολυμερές που χρησιμοποιείται στα μπουκάλια νερού, βρίσκεται επίσης σε ίνες ρούχων και δοχεία τροφίμων. Ενώ το "ακατέργαστο" PET χρησιμοποιείται σπάνια στην τρισδιάστατη εκτύπωση, η παραλλαγή του PETG είναι ένα όλο και πιο δημοφιλές νήμα 3D εκτυπωτή. Ως

υλικό για τρισδιάστατη εκτύπωση, είναι φυσικά πιο καθαρό, λιγότερο εύθραυστο και, το πιο σημαντικό, πιο εύκολο στην εκτύπωση από τη βασική του μορφή. Για αυτόν τον λόγο, το PETG θεωρείται συχνά μια καλή μέση λύση μεταξύ ABS και PLA, δύο άλλων κοινώς χρησιμοποιούμενων ποικιλιών νήματος προσθετικής κατασκευής FDM - είναι πιο ευέλικτο και ανθεκτικό από το PLA και πιο εύκολο στην εκτύπωση από το ABS. Απορροφά την υγρασία από τον αέρα. Αυτό έχει αρνητική επίδραση στη δυνατότητα εκτύπωσης του υλικού, επομένως φροντίστε να αποθηκεύσετε το νήμα του εκτυπωτή 3D σε δροσερό, ξηρό μέρος και, εάν είναι απαραίτητο, να το στεγνώσετε πριν από τη χρήση. Είναι κολλώδες όταν εκτυπώνεται, καθιστώντας αυτό το νήμα προσθετικής κατασκευής FDM κακή επιλογή για δομές στήριξης, αλλά καλό για πρόσφυση στο στρώμα. Αν και δεν είναι εύθραυστο, το PETG γρατσουνίζεται πιο εύκολα από το ABS.

Thermoplastic elastomers (TPE) είναι ουσιαστικά πλαστικά με ιδιότητες που μοιάζουν με καουτσούκ, καθιστώντας τα εξαιρετικά εύκαμπτα και ανθεκτικά, αλλά, εξάλλου, δεν θα χρειαστεί η κατασκευή τόσο εύκαμπτο υλικό.

Acrylonitrile styrene acrylate (ASA) το οποίο αναπτύχθηκε αρχικά για να είναι ένα υλικό ανθεκτικό στις καιρικές συνθήκες. Χρησιμοποιείται συνήθως στην αυτοκινητοβιομηχανία. Εκτός από το ότι είναι ένα νήμα τρισδιάστατου εκτυπωτή που είναι ισχυρό, άκαμπτο και σχετικά εύκολο στην εκτύπωση, το ASA είναι επίσης εξαιρετικά ανθεκτικό στη έκθεση UV ακτινών και στη θερμότητα. Εξαιρουμένων των ακραίων συνθηκών, γενικά δεν θα αλλάξει σχήμα ή χρώμα. Για παράδειγμα, οι εκτυπώσεις από ABS τείνουν να μετουσιώνονται και να κιτρινίζουν αν αφεθούν σε εξωτερικό χώρο. [40]

Οι επιλογές υλικών στην τεχνολογία FDM ποικίλουν. Το ABS φαίνεται να είναι ιδανική επιλογή για το πρότζεκτ, αλλά η δυσκολία εκτύπωσης του το αποκλείει σαν επιλογή. Καθώς, οι ανώτερες ιδιότητες του δεν χρήζουν απαραίτητες για τις απαιτήσεις του πρότζεκτ, η δυσκολία εκτύπωσης θα είχε μόνο αρνητικά αποτελέσματα. Επίσης το μηχάνημα προσθετικής κατασκευής CR10 mini είναι ανοιχτού τύπου, κάνοντας το μη κατάλληλο για εκτύπωση τέτοιων υλικών. Το ASA είναι σαν βελτιωμένη έκδοση του ABS αλλά και πάλι, καθώς είναι δύσκολο στην εκτύπωσή του, δεν είναι ιδανικό. Εύκαμπτα υλικά όπως το TPE δεν έχουν χρησιμότητα σε αυτό το πρότζεκτ. Μια άλλη καλή επιλογή φαίνεται να είναι το PETG, καθώς είναι αδιάβροχο και έχει καλύτερη αντοχή και ανθεκτικότητα από το PLA. Τα μειονεκτήματά του είναι ότι απορροφά γρήγορα υγρασία, με αυτό να έχει επιπτώσεις κατά την εκτύπωση και, ως κολλώδες υλικό, η μετα-επεξεργασία του γίνεται αρκετά δύσκολη. Αυτά τα χαρακτηριστικά όπως και το ότι χαράζεται σχετικά εύκολα θα έχουν ως αποτέλεσμα κακής ποιότητας φινιρίσμα, άρα και αισθητικής. Το PLA είναι το πιο δημοφιλές, καθώς εκτυπώνεται εύκολα χάρη στο χαμηλό του melting point. Είναι άοσμο κατά την εκτύπωση και βιοδιασπώμενο. Σημαντικό επίσης ότι έχει από τα καλύτερα φινιρίσματα εκτύπωσης και αφθονία στα χρώματα. Τα μειονεκτήματά του είναι πως έχει μικρότερη αντοχή και χαμηλότερη glass transition θερμοκρασία στους 60 °C. Τα συγκεκριμένα μειονεκτήματα δεν φαίνεται να έχουν κάποια συνέπεια στο χέρι καθώς είναι ένα πρότζεκτ για παρουσίαση, που δεν απαιτεί κάποια συγκεκριμένη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Η χαμηλότερη αντοχή του μπορεί να λυθεί με κατάλληλες γεωμετρίες κατά τον σχεδιασμό. Οπότε οι παραπάνω λόγοι, όπως και ότι είναι πλήρως συμβατό υλικό με τον μηχάνημα προσθετικής κατασκευής CR10 mini το καθιστά ιδανικό υλικό για το πρότζεκτ.

Τα βασικά βήματα που χρειάζονται για μια πετυχημένη διαδικασία προσθετικής κατασκευής είναι τα εξής:

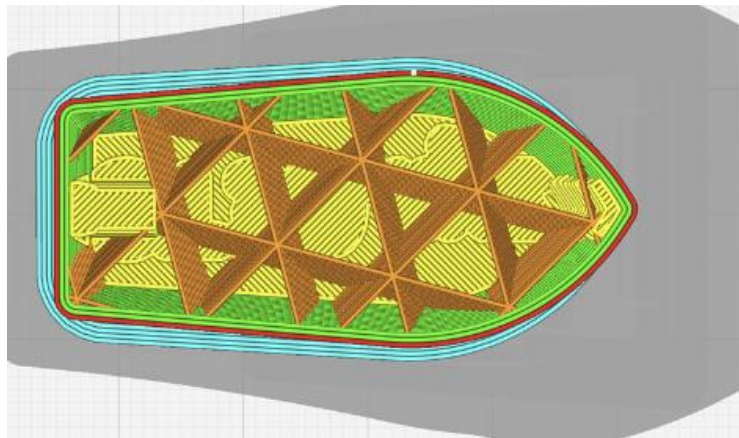
1. Αρχικά χρειάζεται να υπάρχει ένα ψηφιακό μοντέλο CAD όπως σχεδιάστηκε σε προηγούμενα βήματα. Στη συνέχεια, πρέπει να γίνει μετατροπή σε μοντέλο στερεολιθογραφίας (αρχείο STL). Τα περισσότερα σύγχρονα προγράμματα παραμετρικής σχεδίασης έχουν αυτήν την δυνατότητα, δηλαδή να εξάγουν το ψηφιακό μοντέλο σε αρχείο STL.
2. Έπειτα χρειάζεται να γίνει εισαγωγή αυτού του αρχείου στον slicer για να γίνει ο τεμαχισμός του μοντέλου, δηλαδή να ρυθμιστούν όλες οι κατάλληλες παράμετροι για την διαδικασία της εκτύπωσης. Ο slicer είναι ένα λογισμικό δημιουργίας διαδρομής εργαλείων που χρησιμοποιείται στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Διευκολύνει τη μετατροπή ενός μοντέλου τρισδιάστατου αντικειμένου σε συγκεκριμένες οδηγίες για τον εκτυπωτή. Ο slicer μετατρέπει ένα μοντέλο από μορφή STL (Stereolithography) σε εντολές εκτυπωτή σε μορφή G-code.[41] Τα αρχεία τύπου G-code είναι τα αρχεία που δέχονται οι σημερινοί τρισδιάστατοι εκτυπωτές.
3. Για να εκτυπωθεί το μοντέλο πρέπει να του ανατεθούν οι κατάλληλες ρυθμίσεις από τον slicer. Ο Slicer που χρησιμοποιήθηκε είναι το Cura. Το Cura είναι μια εφαρμογή slicer ανοιχτού κώδικα για τρισδιάστατους εκτυπωτές. Δημιουργήθηκε από τον David Braam, τον οποίο αργότερα προσέλαβε η εταιρεία Ultimaker, μια εταιρεία κατασκευής τρισδιάστατων εκτυπωτών, για τη συντήρηση του λογισμικού. Το Cura είναι διαθέσιμο με άδεια LGPLv3. Το Cura κυκλοφόρησε αρχικά με την έκδοση 3 της άδειας ανοιχτού κώδικα Affero General Public License, αλλά στις 28 Σεπτεμβρίου 2017 η άδεια άλλαξε σε LGPLv3. Αυτή η αλλαγή επέτρεψε περισσότερη ενοποίηση με εφαρμογές 3D CAD. Η ανάπτυξη φιλοξενείται στο GitHub. Το Ultimaker Cura χρησιμοποιείται από πάνω από ένα εκατομμύριο χρήστες παγκοσμίως και χειρίζεται 1,4 εκατομμύρια εργασίες εκτύπωσης την εβδομάδα. Είναι το προτιμώμενο λογισμικό τρισδιάστατης εκτύπωσης για εκτυπωτές Ultimaker 3D, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και με άλλους εκτυπωτές.[42] Παρόλο που δεν έχω στην κατοχή μου εκτυπωτή της Ultimaker, το cura είναι αρκετά ισχυρό και οικείο, πράγμα που το κατέστησε ιδανική επιλογή.

Οι παράμετροι τεμαχισμού είναι οι ακόλουθες:

- a. Ύψος επιπέδου(Layer height). Στους κοινούς εκτυπωτές συνήθως κυμαίνεται από 0.05mm έως 0.3mm. Αυτό σημαίνει ότι ανά στρώση εκτύπωσης ο Z άξονας θα ανεβαίνει όσο το καταχωρημένο ύψος επιπέδου. Δηλαδή, για να φτάσει το ύψος του εκάστοτε μοντέλου θα χρειαστεί ανάλογα βήματα. Άρα, αν δεν αλλάξει κάποια άλλη ρύθμιση, ένα μοντέλο θα χρειαστεί σχεδόν, αν όχι ακριβώς, διπλάσιες στρώσεις με 0.1mm ύψος επιπέδου σε σχέση με το ίδιο μοντέλο ρυθμισμένο με 0.2mm ύψος επιπέδου. Το ύψος επιπέδου συνιστάται να είναι το μεταξύ του εύρους 25% με το 75% της διαμέτρου την μύτης εξαγωγής υλικού(nozzle). Δηλαδή, καθώς ο CR10 mini διαθέτει nozzle 0.4mm θα πρέπει να ρυθμίζεται το ύψος επιπέδου μεταξύ 0.1mm με 0.3mm. Μετά από πειραματισμούς αυτό δείχνει να αληθεύει. Θα ήταν ωφέλιμο να αναφερθεί πως όσο μικρότερο το ύψος επιπέδου τόσο μεγαλύτερη η ποιότητα και αντοχή του αντικειμένου, αλλά και ο χρόνος εκτύπωσης. Επίσης η συνήθης

προτιμότερη μέση λύση για μύτη εξαγωγής 0.4mm είναι ύψος επιπέδου ρυθμισμένο στα 0.2mm, καθώς είναι ένας καλός συνδυασμός ταχύτητας, ποιότητας και επιτυχίας εκτύπωσης.[43] Στο πρότζεκτ αυτό ο αισθητικός παράγοντας έχει σημαντικό ρόλο, όσο και η αντοχή, αλλά τόσο και ο χρόνος κατασκευής. Για αυτό το λόγο στα περισσότερα εσωτερικά κομμάτια (μαύρο χρώμα) της κατασκευής, που καλύπτονται κατά το μεγαλύτερο μέρος τους από τα κελύφη (άσπρο χρώμα) επιλέχθηκε 0.2mm ύψος επιπέδου. Για τα κελύφη επιλέχθηκε 0,12mm ύψος επιπέδου, καθώς είναι αρκετά λεπτές γεωμετρίες, που επωφελούνται από την παραπάνω αντοχή και είναι τα κομμάτια της κατασκευής που εκτίθενται περισσότερο. Έτσι υπάρχει μια καλή ισορροπία αντοχής, αισθητικής και ταχύτητας εκτύπωσης.

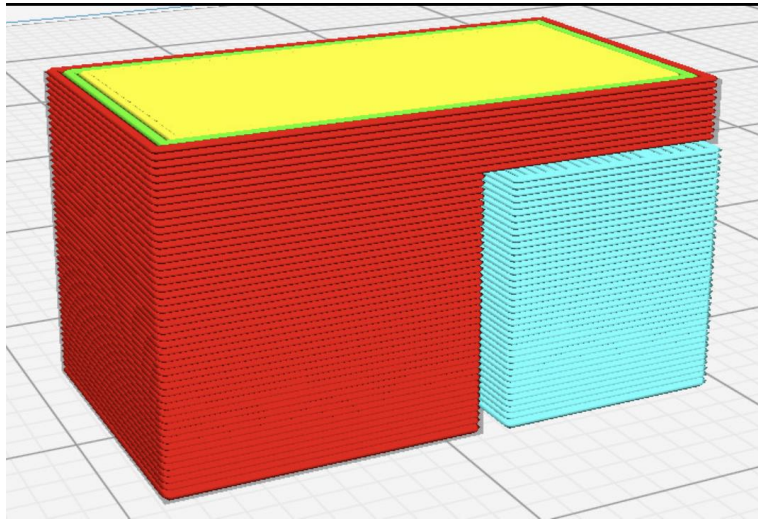
- b. Γέμισμα (infill): Η εκτύπωση στερεών αντικειμένων απαιτεί σημαντική ποσότητα υλικού (όπως νήμα) και χρόνο. Για να μετριαστεί αυτό, οι slicers μπορούν να μετατρέψουν αυτόματα συμπαγείς όγκους σε κούφιους, εξοικονομώντας έτσι κόστος και μειώνοντας ταυτόχρονα τον χρόνο εκτύπωσης. Αυτά τα κούφια αντικείμενα μπορούν να ενισχυθούν με εσωτερικές δομές, όπως εσωτερικά τοιχώματα, για ενίσχυση της στιβαρότητας. Η αναλογία αυτών των δομών, γνωστή ως «infill density», είναι μια βασική παράμετρος που μπορεί να ρυθμιστεί στον slicer.[41] Μεγάλο ρόλο στην αντοχή και στο βάρος του αντικειμένου έχει και το είδος γεμίσματος(infill type). Για είδος γεμίσματος επιλέχθηκε ο τύπος cubic καθώς είναι κατάλληλο για ισχυρά, άκαμπτα και λειτουργικά μέρη (όχι διακοσμητικά)[44]. Με συνδυασμό με 45% infill density για μικρά κομμάτια με ευαίσθητα γεωμετρικά σημεία και 20% infill density για μεγάλα κομμάτια χωρίς κάποιο συγκεκριμένο γεωμετρικά ευαίσθητο σημείο, για μείωση χρόνου εκτύπωσης με ικανοποιητική αντοχή.[45]



Εικόνα 3. 87 cubic infill type[45]

- c. Στήριξη(support): Δεδομένου ότι οι περισσότερες διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης δημιουργούν αντικείμενα στρώμα προς στρώμα, από κάτω προς τα πάνω, κάθε νέο στρώμα εναποτίθεται απευθείας πάνω από το προηγούμενο. Κατά συνέπεια, κάθε μέρος του αντικειμένου πρέπει, σε κάποιο βαθμό, να στηρίζεται σε ένα άλλο μέρος. Για στρώματα που «επιπλέουν»—για παράδειγμα, η επίπεδη οροφή ενός σπιτιού ή ένας οριζόντια εκτεταμένος βραχίονας σε μια φιγούρα—το πρόγραμμα τεμαχισμού(slicer) μπορεί να προσθέσει στηρίγματα. Αυτά τα στηρίγματα, τα ονομαζόμενα support, έχουν σχεδιαστεί για να αγγίζουν το αντικείμενο με τρόπο

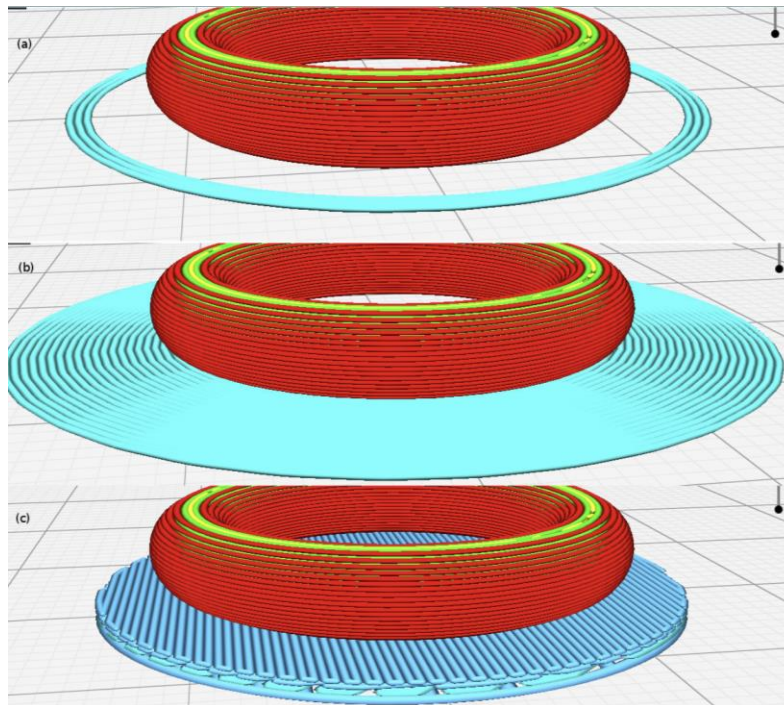
που επιτρέπει την εύκολη αποκόλληση μετά την ολοκλήρωση της παραγωγής του αντικειμένου.[41]



Εικόνα 3. 88 Παράδειγμα δομής support(με χρώμα μπλε)[41]

Κατά το σχεδιασμό, υπήρξε μεγάλη προσοχή στην αποφυγή αυτών των στρωμάτων που «επιπλέουν» για να ελαχιστοποιηθεί η χρήση υλικού, μειώνοντας το κόστος και τον χρόνο κατασκευής.

- d. Rafts, skirts and brims: Στην πρώτη στρώση του αντικειμένου, που έρχεται σε επαφή με το κρεβάτι του εκτυπωτή, παρουσιάζει μοναδικές προκλήσεις, όπως προβλήματα προσκόλλησης, τραχύτητα επιφάνειας και ομαλή εναπόθεση του αρχικού νήματος. Για να μετριαστούν αυτά τα προβλήματα, ο slicer μπορεί να προσθέσει αυτόματα αποσπώμενες δομές. Κοινί τύποι αυτών των δομών βάσης είναι το skirt που είναι μια μονή ταινία που περιβάλλει τη βάση του αντικειμένου, χωρίς να την αγγίζει, το brim, πολλαπλές γραμμές νήματος γύρω από τη βάση του αντικειμένου, που αγγίζουν αλλά όχι κάτω από αυτό, και εκτείνονται προς τα έξω και το raft, αρκετές στρώσεις υλικού που σχηματίζουν μια αποσπώμενη βάση στην οποία τυπώνεται πάνω το αντικείμενο.[41] Χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις εκτυπώσεις skirt, για να εξασφαλίσει την καθαρή εκτύπωση των αντικειμένων και για έλεγχο κατάλληλου ισιωμένου κρεβατιού. Στις περιπτώσεις που ξεκολλούσαν τα αντικείμενα από το κρεβάτι κατά την εκτύπωση, γινόταν η χρήση του brim για να εξασφαλίσει τη θέση του αντικειμένου στο κρεβάτι εκτύπωσης.



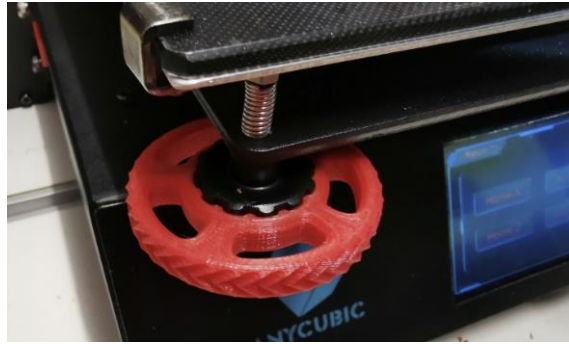
Εικόνα 3. 89 Παράδειγμα a)skirt, b)brim, c) raft[41]

Αναφέρθηκε ο όρος ίσιο κρεβάτι. Το κρεβάτι του εκτυπωτή πρέπει να είναι κάθετο σε σχέση με τη μύτη εκτύπωσης. Αν δεν είναι, μπορεί να προκύψει πρώτη στρώση με την όψη όπως φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία. [46]



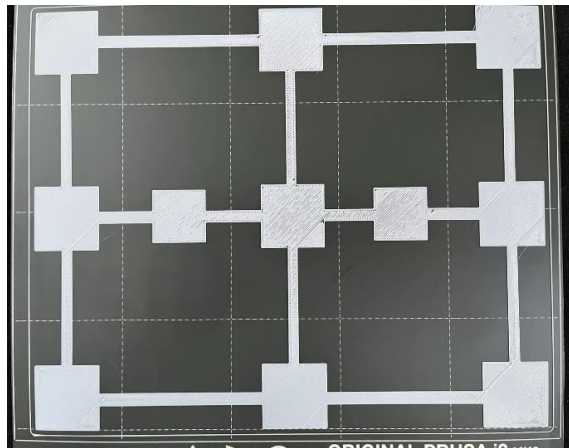
Εικόνα 3. 90 Παράδειγμα μη κάθετου κρεβατιού σε σχέση με το nozzle[46]

Κάποιοι σύγχρονοι εκτυπωτές διαθέτουν αισθητήρα αυτόματου ισιώματος κρεβατιού auto bed leveling (ABL) και δεν απαιτείται κάποια αλληλεπίδραση με τον χρήστη, αλλά ο CR10 mini δεν διαθέτει τέτοιο αισθητήρα, οπότε το κρεβάτι πρέπει να ρυθμιστεί με δεξιόστροφη ή αριστερόστροφη περιστροφή του knob κρεβατιού.



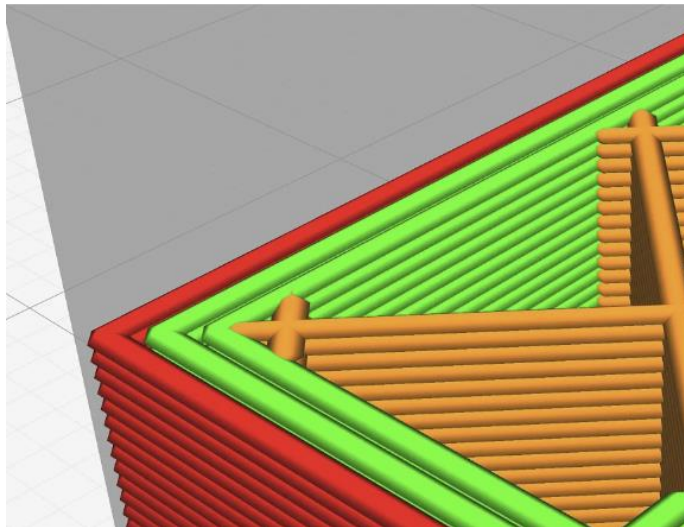
Εικόνα 3. 91 knob κρεβατιού εκτύπωση[46]

Ο τρόπος για να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια, είναι το 'σφήνωμα' μίας κόλλας A4 με καθαρή μύτη εξαγωγής σε κάθε άκρη του κρεβατιού εκτύπωσης. Επίσης κατάλληλα πειράματα εκτύπωσης σίγουρα βοηθάνε.[46]



Εικόνα 3. 92 Εκτύπωση πειράματος ισώματος κρεβατιού[46]

- e. Ποσότητα περιμετρικών τοιχωμάτων(Wall count). Η ποσότητα περιμετρικών τοιχωμάτων καθορίζει πόσες εξωτερικές στρώσεις θα έχει το αντικείμενο. Κάθε παραπάνω στρώση έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερης αντοχής αντικειμένου αλλά και μεγαλύτερη κατανάλωση υλικού και χρόνου.[47] Βάσει πειραμάτων και βιβλιογραφίας, τέσσερα περιμετρικά τοιχώματα δίνουν αρκετή αντοχή στα εκτυπωμένα κομμάτια χωρίς να αυξάνεται περαιτέρω το βάρος, η χρήση υλικού και ο χρόνος.

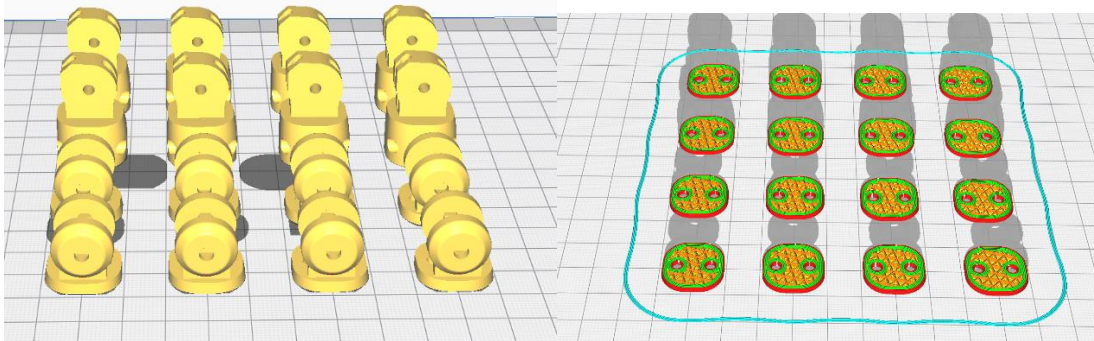


Εικόνα 3. 93 Παράδειγμα Wall count ποσότητας 3[47]

- f. Θερμοκρασία εκτύπωσης(Printing temperature) και θερμοκρασία κρεβατιού (Bed temperature). Αυτές οι ρυθμίσεις συνήθως παρέχονται από τον κατασκευαστή του νήματος. Δίνεται ένα εύρος και μετά από δοκιμές και αποτυχίες βρίσκεται μια αποδεκτή θερμοκρασία εκτύπωσης, ώστε να υπάρχει καλή ένωση στρωμάτων στο αντικείμενο, χωρίς περαιτέρω ατέλειες και αποδεκτή θερμοκρασία κρεβατιού, ώστε να συγκρατεί το αντικείμενο στο κρεβάτι κατά την εκτύπωση χωρίς να αλλοιωθεί ο πάτος του.
- g. Προσανατολισμός κατασκευής. Ο προσανατολισμός του αντικειμένου σε σχέση με το κρεβάτι εκτύπωσης έχει αρκετή σημασία στην αισθητική, αντοχή, χρόνο εκτύπωσης, κατανάλωση υλικού και επιτυχία εκτύπωσης. Πιο συγκεκριμένα, έχοντας μια μεγάλη επιφάνεια ή ιδανικά την μεγαλύτερη επιφάνεια του αντικειμένου να ακουμπάει το κρεβάτι εξασφαλίζει την σταθερότητα και συγκράτηση του αντικειμένου στο κρεβάτι. Από την άλλη, τα αδύναμα σημεία του αντικειμένου πρέπει να είναι σε κατάλληλο προσανατολισμό, ώστε η κατεύθυνση της πιο αδύναμης ασκούμενης δύναμης να είναι παράλληλη με το κρεβάτι, καθώς η οριζόντια κατεύθυνση είναι συνήθως η πιο αδύναμη γιατί βασίζεται στη ζεύξη των στρωμάτων. Επίσης, έχει σημασία για μεγάλα αντικείμενα ο προσανατολισμός να είναι κατάλληλος ώστε να μην βγαίνουν εκτός ορίων εκτύπωσης. Μπορεί να μειώσει το χρόνο εκτύπωσης και τα support οπότε και το χρόνο μετα-επεξεργασίας.[48]

4. Μετά τις κατάλληλες ρυθμίσεις μπορούν να εκτυπωθούν τα κομμάτια.

Τα δάχτυλα για παράδειγμα χωρίστηκαν σε τρία πακέτα. Για την αντοχή στα ευαίσθητα σημεία που είναι στην ένωση των αρθρώσεων χρησιμοποιήθηκε 45% infill όπως και 4 wall count, καθώς η αλλαγή προσανατολισμού θα οδηγούσε σε πολύ περισσότερο χρόνο εκτύπωσης, κατανάλωση υλικού και μετα-επεξεργασίας.



Εικόνα 3. 94 εκτύπωση δαχτύλων

Χρόνος εκτύπωσης: 10 ώρες και 49 λεπτά

Βάρος: 61g

Layer Height: 0.2

Temp: 210

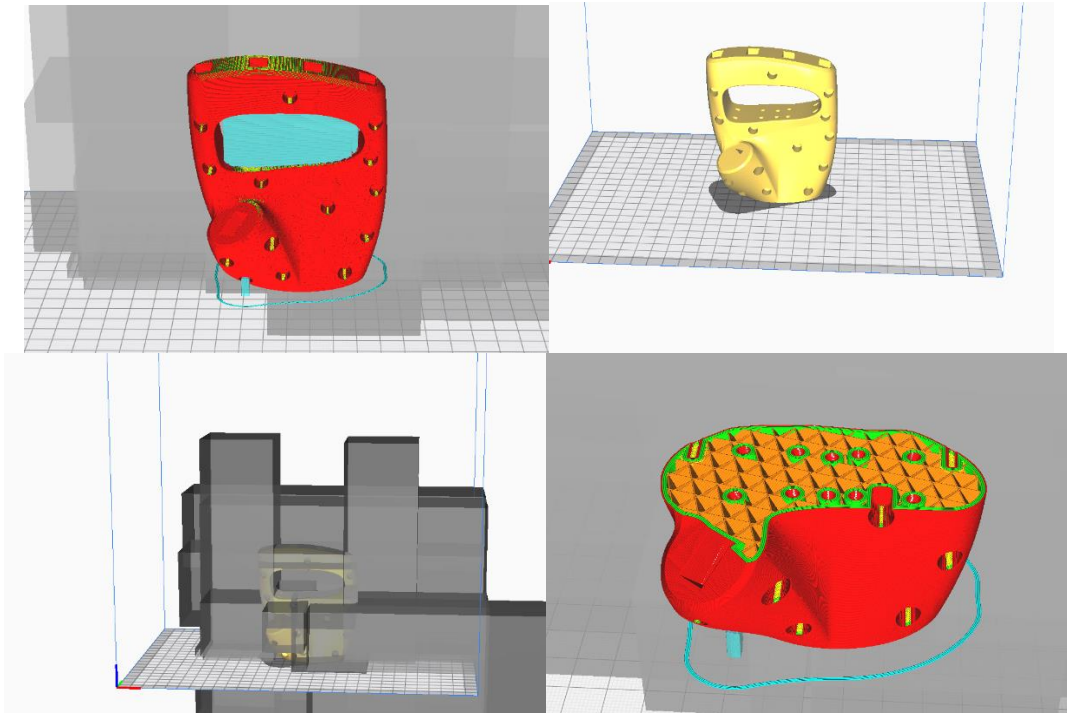
Bed temp: 60

Infill: 45%, cubic

wall count: 4

Support: Όχι

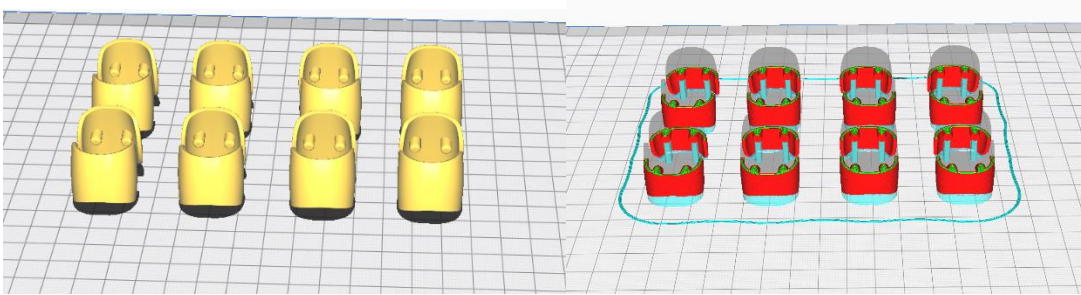
Στην παλάμη χρησιμοποιήθηκαν support για το κενό στην μέση. Καθώς είναι μεγάλη κατασκευή και χρονοβόρα στην εκτύπωση, μήκε 20 infill αλλά με 4 τοίχους περιμετρικά. Οι μαύροι κύβοι είναι για αποτροπή παραπάνω αυτόματων Support



Εικόνα 3. 95 εκτύπωση παλάμης

Χρόνος εκτύπωσης: 25 ώρες και 49 λεπτά
Βάρος: 123g
Layer Height: 0.12
Temp: 210
Bed temp: 60
infill: 20%, cubic
wall count: 4
Support: Ναι
Βάρος χωρίς support: 109g

Στα κελύφη ο βασικός στόχος ήταν υψηλή αισθητική δηλαδή φινίρισμα. Αυτό σημαίνει ότι δόθηκε μεγάλη σημασία στην θέση των μοντέλων στο κρεβάτι του εκτυπωτή. Όλα τα κομμάτια εκτυπώθηκαν με 15-20 μοίρες για διαγώνια layers σε σχέση με το μοντέλο. Αυτό βοηθάει στην καλύτερη αισθητικά εκτύπωση αλλά και στην αντοχή.



Εικόνα 3. 96 εκτύπωση κελυφών

Χρόνος εκτύπωσης: 9 ώρες και 0 λεπτά

Βάρος: 29g

Layer Height: 0.12

Temp: 205

Bed temp: 60

infill: 45%, cubic

wall count: 4

Support: Ναι

Βάρος χωρίς support: 24g

Σύνολο 1,030g. χωρίς με support

Σύνολο 956g. χωρίς με support

Σύνολο χεριού 377g.

Σύνολο 203.38 ώρες εκτύπωσης

5. Στην προσθετική κατασκευή συνηθίζεται να υπάρχει μετα-επεξεργασία για αισθητικούς αλλά και λειτουργικούς παράγοντες. Αρχικά πρέπει να αφαιρεθούν τα support.



Εικόνα 3. 97 Παράδειγμα αφαίρεσης support

Όπως και να αφαιρεθούν ατέλειες, συνήθως προκαλούμενες από Support.



Εικόνα 3. 98 Παράδειγμα αφαίρεσης ατελειών εκτυπωμένου κομματιού

Επίσης μπορούν να υπάρχουν 'κλωστές' υλικού από υψηλή θερμοκρασία όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 3. 99 Παράδειγμα 'κλωστών' από εκτύπωση

Αυτό το σφάλμα μπορεί να διορθωθεί καίγοντας προσεχτικά τις κλωστές με αναπτήρα. Επίσης μπορούν να βελτιωθούν ατέλειες όπως μικρά εξογκώματα.



Εικόνα 3. 100 Παράδειγμα αφαίρεση ατελειών

3.6 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

3.6.1 Εξοπλισμός

3.6.1.1 *Εργαλεία*

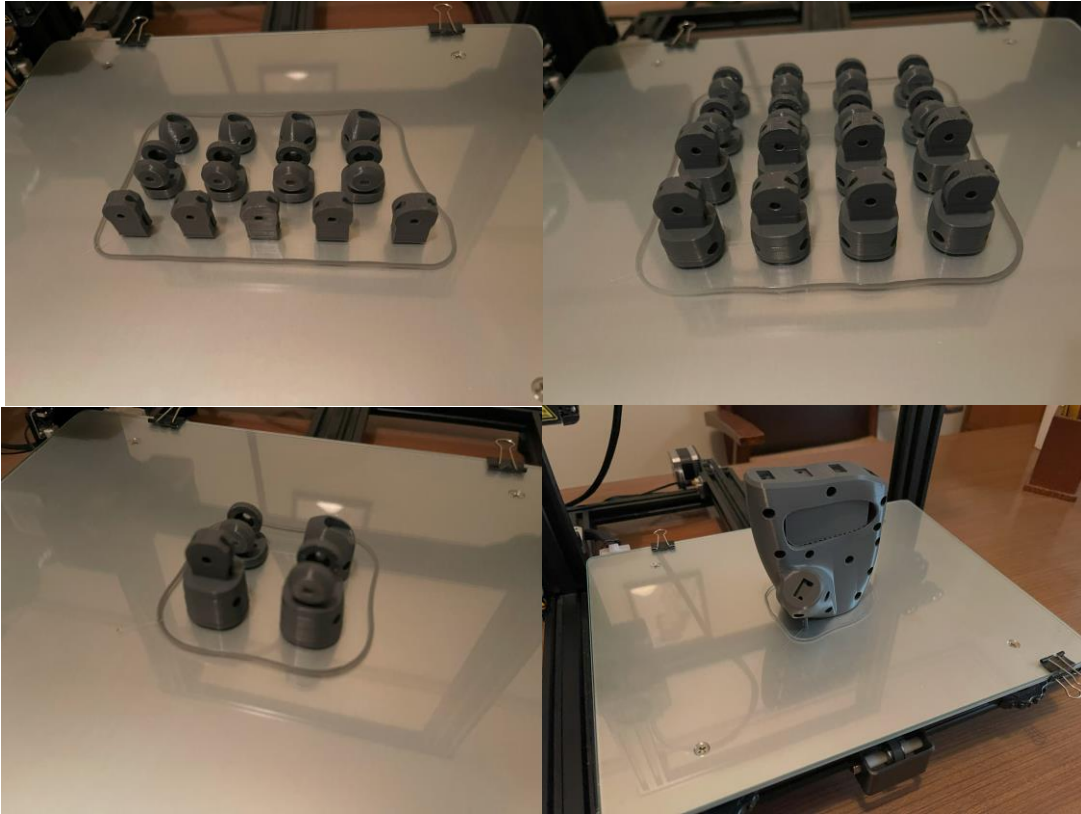
1. Solder Iron
2. Solder
3. Super glue
4. Κατσαβίδι
5. Wire cutter
6. 3D printer

3.6.1.2 *Εξωτερικά Εξαρτήματα*

1. Laptop
2. Power Bank
3. Τροφοδοτικό 5V 10A

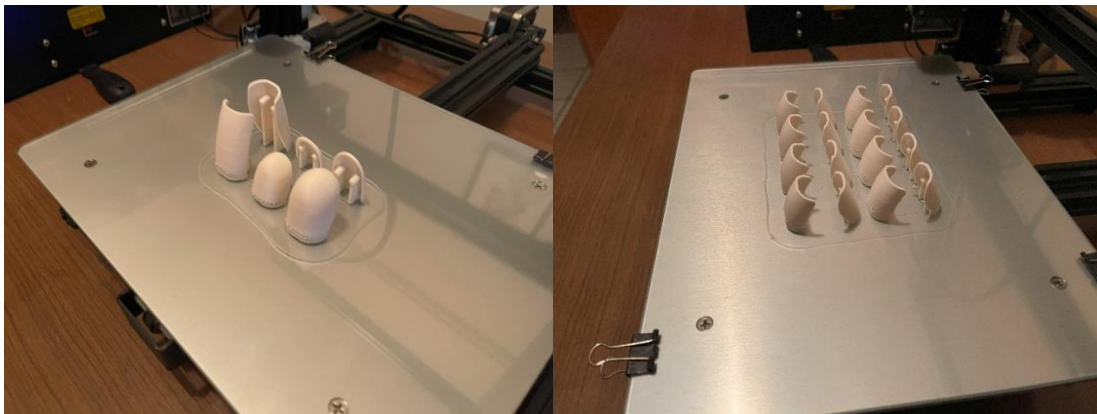
3.6.2 Εκτέλεση

Αρχικά εκτυπώθηκε πρωτότυπο για να γίνουν δοκιμές για διαστασιολογικές ανοχές, την σταθερότητα, την συμβατότητα και αν δουλεύει η ιδέα της κίνησης του δαχτύλου.



Εικόνα 3. 101 κατασκευή

Καθώς και τα κελύφη.



Εικόνα 3. 102 κατασκευή

Τα επί μέρους κομμάτια των δαχτύλων κολλιούνται με super glue.



Εικόνα 3. 103 κατασκευή

Και συναρμολογούνται.



Εικόνα 3. 104 κατασκευή

Σε κάθε επί μέρους μεριά σφηνώνει ρουλεμάν, για την καλύτερη ροή της περιστροφής.



Εικόνα 3. 105 κατασκευή

Περνάει το νήμα από τις τρύπες που έχουν δημιουργηθεί.



Εικόνα 3. 106 κατασκευή

Όπως φαίνεται παρακάτω, το δάχτυλο κλείνει και ανοίγει με άνεση, αλλά κλείνει μέχρι 45 μοίρες. Αυτό δεν είναι φυσικό σε ένα πραγματικό χέρι, οπότε θα πρέπει να βελτιωθεί. Τα καπάκια φαίνεται να εφαρμόζουν κανονικά.



Εικόνα 3. 107 κατασκευή

Παρόλα αυτά, μπορεί να γίνει δοκιμή της κίνησης του μέσω νήματος. Φαίνεται να λειτουργεί με αρκετή άνεση, οπότε μπορεί να περάσει στο τελικό μοντέλο. Από την άλλη, η κλίση του δαχτύλου χρειάζεται τροποποίηση.



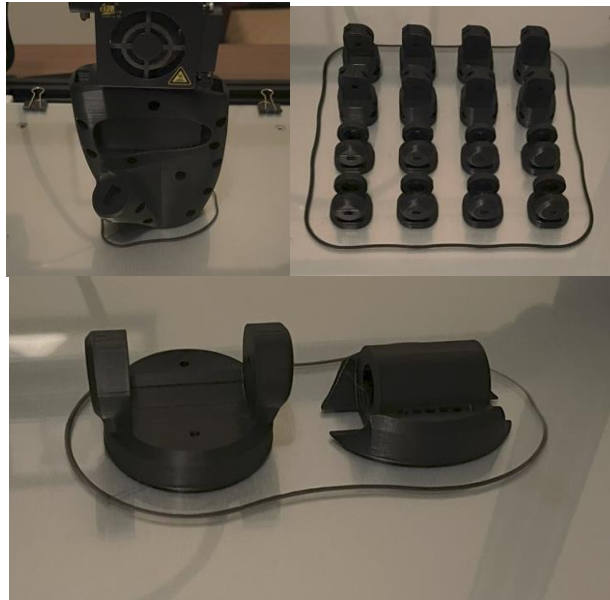
Εικόνα 3. 108 κατασκευή

Τα εκτυπωμένα κομμάτια χρειάζονται καθάρισμα από ατέλειες της εκτύπωσης.



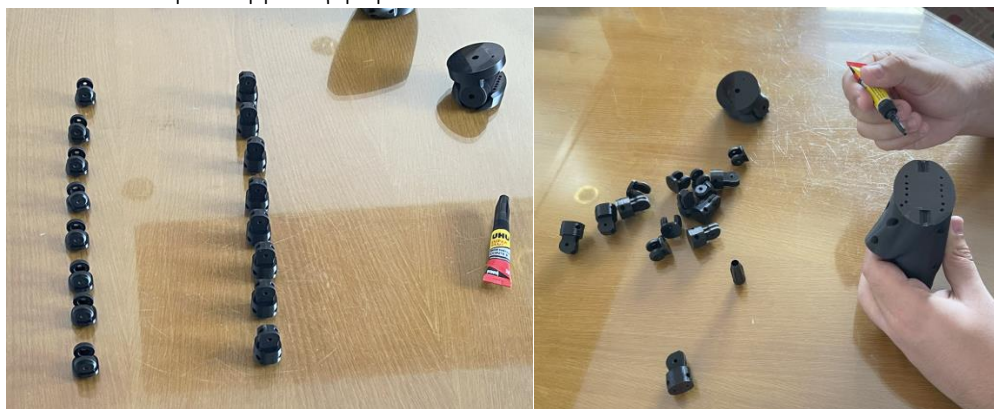
Εικόνα 3. 109 κατασκευή

Στην συνέχεια εκτυπώνεται το μοντέλο στο τελικό χρώμα.



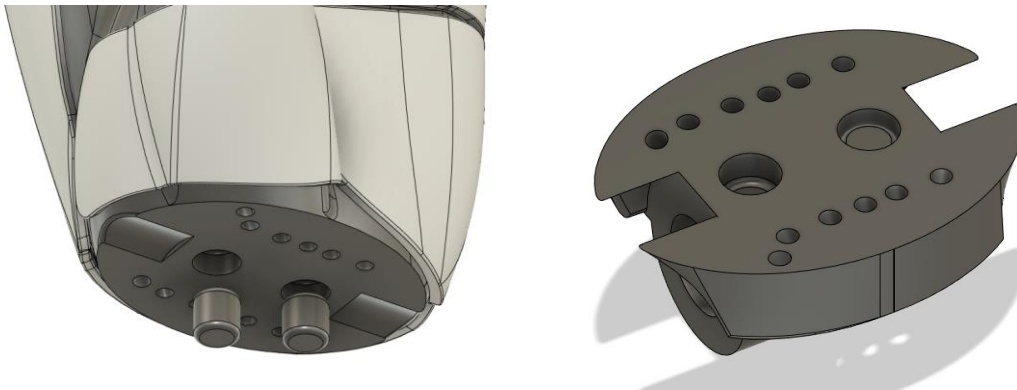
Εικόνα 3. 110 κατασκευή

Και ξεκινάει και πάλι η συναρμολόγηση.



Εικόνα 3. 111 κατασκευή

Αυτή τη φορά όμως, κατά την κόλληση του χεριού με τον καρπό, έγινε λάθος και κολλήθηκε στραβά. Οπότε πρόσθεσα στο σχέδιο οδηγούς για τη συναρμολόγηση.



Εικόνα 3. 112 κατασκευή

Η ιδέα πέτυχε και ο καρπός ενώθηκε με το χέρι. Πέραστηκαν νήματα και εξασφαλίστηκαν με βίδα στο πάνω μέρος του δαχτύλου. Σε κάθε δάχτυλο πέραστηκε ένα αρκετά μακρύ νήμα, που πακτώθηκε στη μέση του με τη βίδα στο πάνω μέρος του δαχτύλου. Έτσι το κάθε δάχτυλο έχει δύο άκρες νήματος, ένα για το κλείσιμο του δαχτύλου και ένα για το άνοιγμά του.



Εικόνα 3. 113 κατασκευή

Επίσης, έγινε προσεκτική αντιστοίχιση στο κενό που έχει αφεθεί στη μέση για μείωση βάρους, αλλά και πιο εύκολο πέρασμα του νήματος. Εκεί όπως φαίνεται, ασφαρίζεται με βίδα το νήμα που είναι υπεύθυνο για την περιστροφή του καρπού στον Χ άξονα.



Εικόνα 3. 114 κατασκευή

Συνεχίστηκαν τα 'πειράματα' με τη βάση. Έγιναν δοκιμές σε ανοχή διαστάσεων, αντοχή σημείων, συμβατότητα κτλ. Και βάσει αυτών, έγιναν πολλές τροποποιήσεις.



Εικόνα 3. 115 κατασκευή

Αρχικά εκτυπώθηκε η βάση.



Εικόνα 3. 116 κατασκευή

Δοκιμές πήραν μέρος για την εξασφάλιση συμβατότητας των εξαρτημάτων με τη βάση.



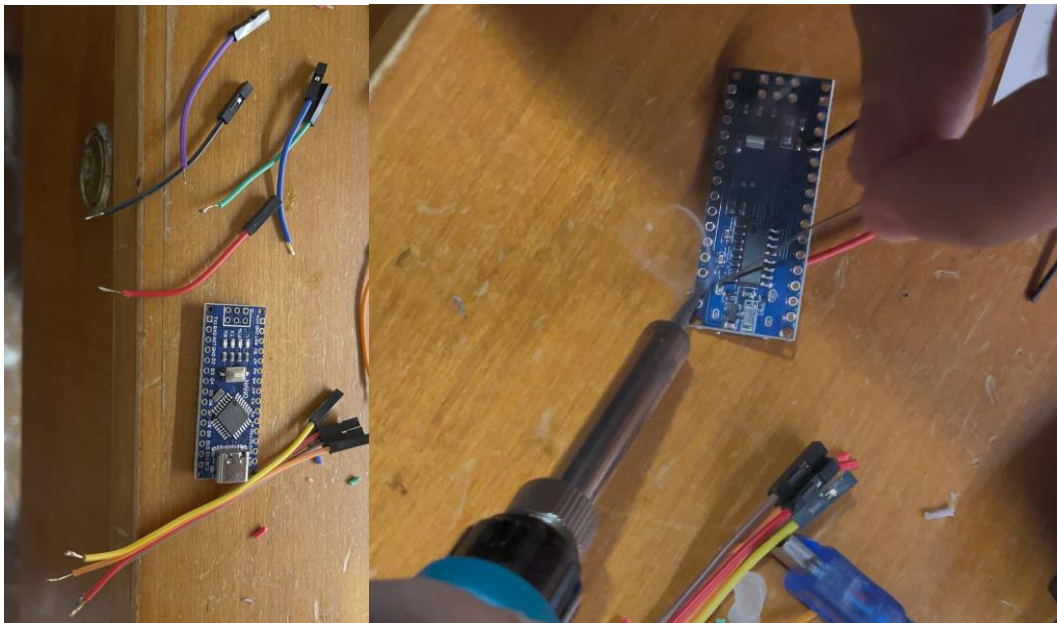
Εικόνα 3. 117 κατασκευή

Μετά από επιτυχία αυτών των δοκιμών, ξεκίνησε η συνδεσμολογία των εξαρτημάτων. Ο υπολογισμός των καλωδίων έγινε με την βοήθεια του φυσικού μοντέλου.



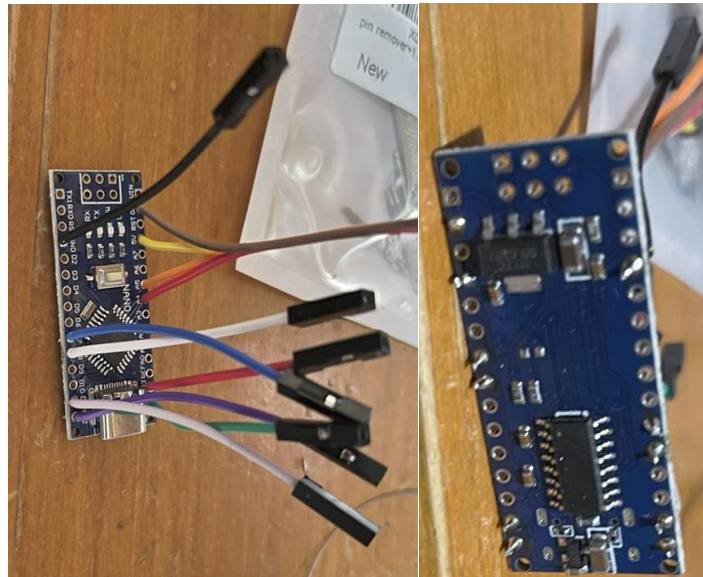
Εικόνα 3. 118 κατασκευή

Η σύνδεση των καλωδίων με το Arduino board έγινε με solder και solder iron. Αρχικά βάζουμε λίγο solder στα καλώδια και έπειτα θερμαίνοντας τη θύρα τα περνάμε μέσα με λίγο παραπάνω solder. Έτσι έγινε η συνδεσμολογία του κάθε καλωδίου στην ανάλογη θύρα. Τα καλώδια κόπηκαν στο κατάλληλο μήκος με wire cutter και αφαιρέθηκε το πλαστικό προστατευτικό προσεκτικά.



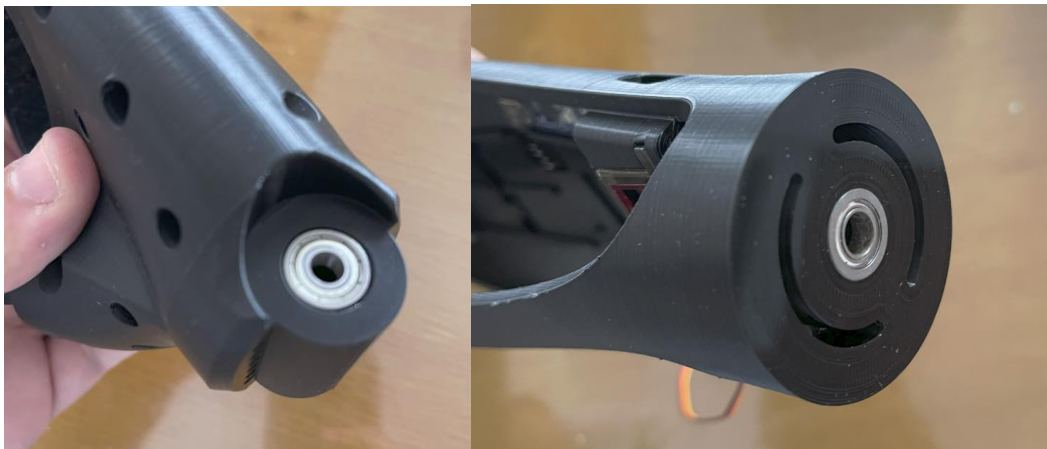
Εικόνα 3. 119 κατασκευή

Χρησιμοποιήθηκαν jumper wires με θηλυκό τελικό, για την εύκολη σύνδεση τους με το υπόλοιπο hardware.



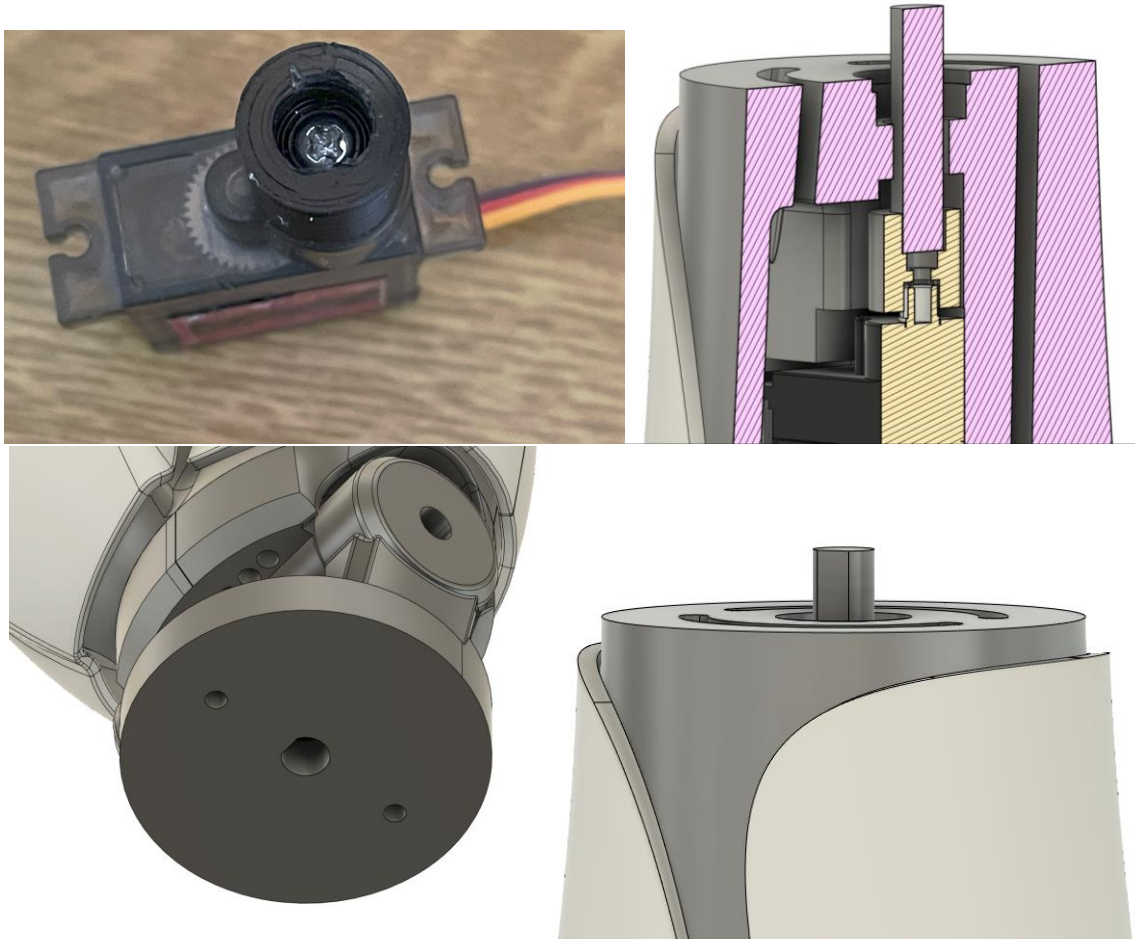
Εικόνα 3. 120 κατασκευή

Η συναρμολόγηση συνεχίζεται με την προσπάθεια ένωσης του καρπού με την βάση. Ο καρπός του αντιβραχίου ενώνεται με πείρους 5X50 mm ανάμεσα από δύο Ρουλεμάν - 605ZZ (5mm Bore, 14mm OD), δηλαδή με εσωτερική διάμετρο 5mm και εξωτερική 14mm, μπαίνουν στα πλάγια. Ρουλεμάν Flanged (1/4" Bore, 1/2" OD), δηλαδή 6.35mm εσωτερική διάμετρο και 12.7mm εξωτερική, μπαίνει χωνευτά στο άνω μέρος της βάσης.



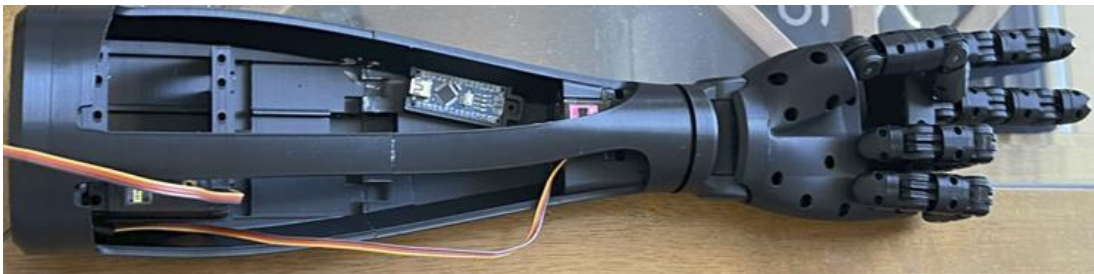
Εικόνα 3. 121 κατασκευή

Ο καρπός ενώνεται με την βάση με πείρους 6.35X25.4mm σχήματος D. Το κάτω μέρος του πείρου είναι πάνω στο Horn του MG90S μοτέρ και το πάνω είναι σε ειδική θέση στον καρπό καθώς διαπερνάει το ρουλεμάν, δίνοντας του αβίαστη περιστροφή.



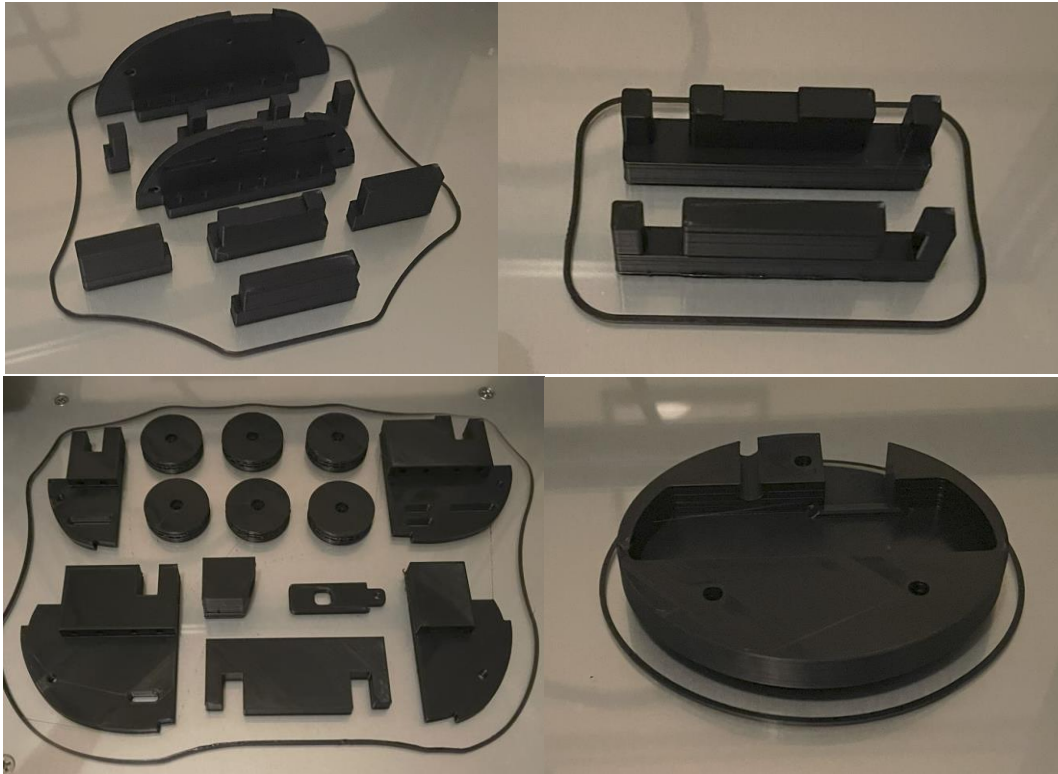
Εικόνα 3. 122 κατασκευή

Μετά από κάποιες προσπάθειες του Horn και η θέση για τον πείρο στο καρπό, ο στόχος επιτεύχθηκε.



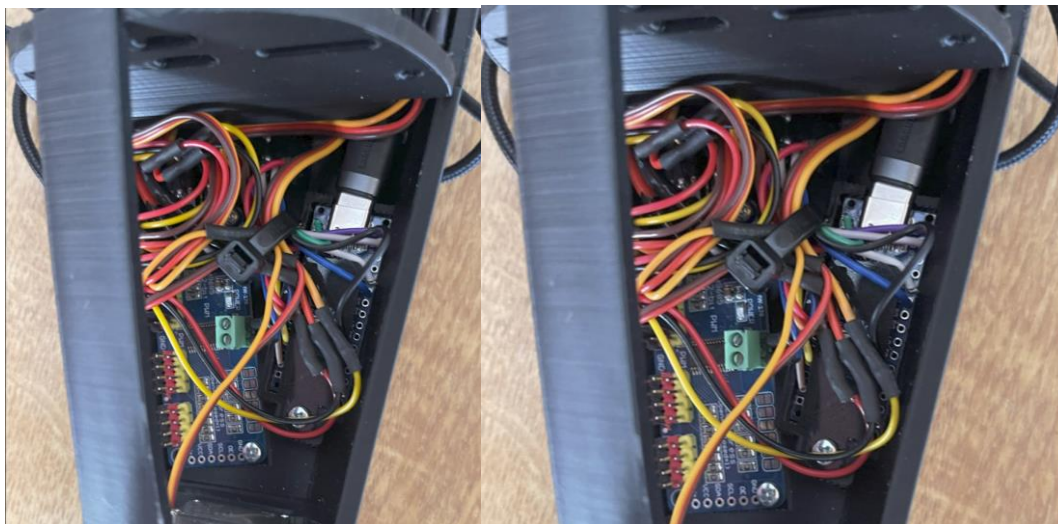
Εικόνα 3. 123 κατασκευή

Η διαδικασία συνεχίζεται με τα εσωτερικά κομμάτια της βάσης, καθώς και με το καπάκι του πάτου της βάσης.



Εικόνα 3. 124 κατασκευή

Τα ηλεκτρονικά εισάγονται μέσα στη βάση και σταθεροποιούνται χωνευτά ή με M2.5 με 8 mm ύψος. Γίνεται οργάνωση καλωδίων με δεματικά. USB C καλώδιο περνάει από κάτω από την βάση, μέχρι να βρει τη θύρα του Arduino nano, μετά ασφαλιζεται το καπάκι του πάτου με 3 βίδες M5X20mm και M5 παξιμάδια με τη κατάλληλη οργάνωση των καλωδίων και την εξασφάλιση του θηλυκού βύσματος τροφοδοσίας στη σχεδιασμένη θέση του.



Εικόνα 3. 125 κατασκευή

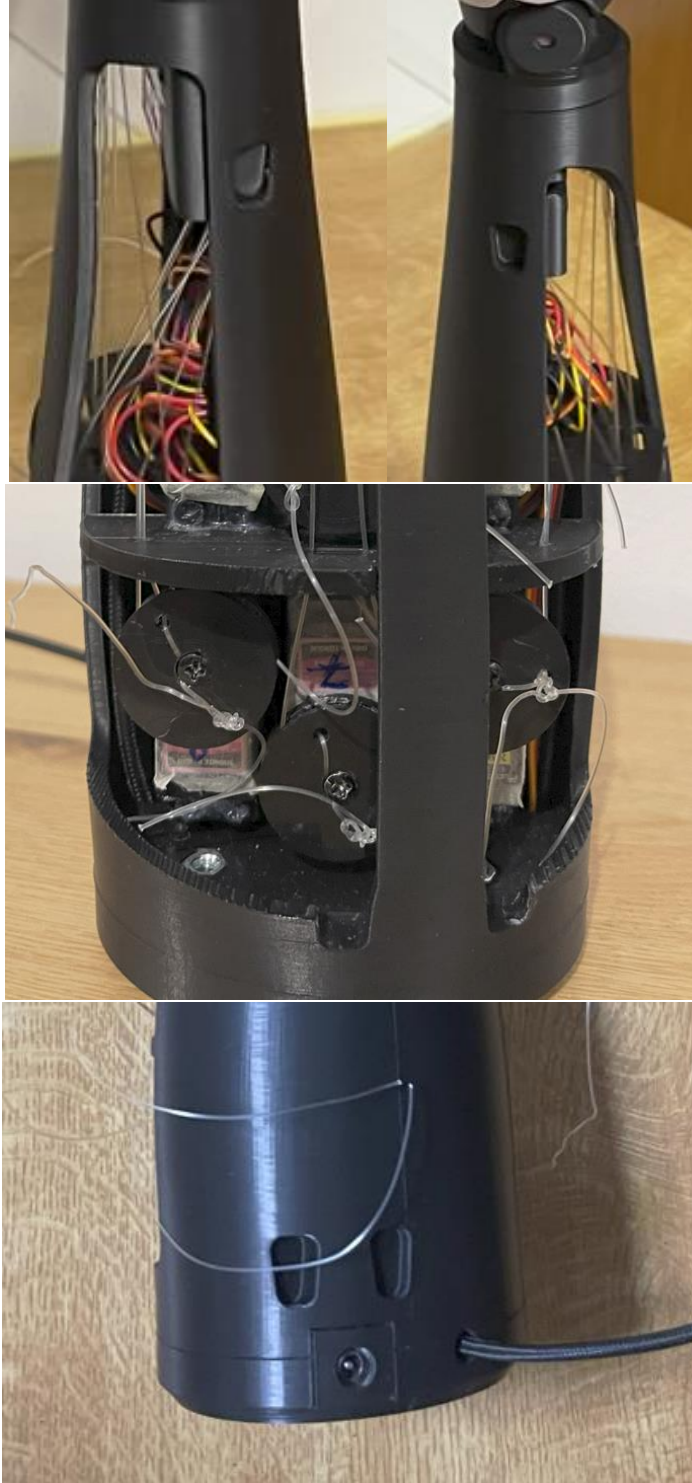
Το ίδιο γίνεται και με τα μοτέρ. Περνάνε τα καλώδια από κάτω και εισάγονται τα διαχωριστικά ενδιάμεσα από τα ρομπότ. Βιδώνοντας τα μοτέρ σταθεροποιούνται και τα διαχωριστικά ταυτόχρονα. Μετά εισάγονται τα ειδικά σχεδιασμένα horns και βιδώνονται πάνω στο μοτέρ, αφήνοντας λίγο

κενό. Περνάνε τα νήματα με την εξής σειρά: Στην πάνω αριστερή θέση δείκτης, στην μεσαία πάνω θέση το μεσαίο δάχτυλο, στο πάνω δεξιά μοτέρ συνδέεται ο παράμεσος, στο κάτω δεξιά το μικρό δάχτυλο, στο κάτω μεσαίο το νήμα που είναι συνδεδεμένο με την μέση του χεριού για την περιστροφή στον X άξονα και στο κάτω αριστερά ο αντίχειρας. Όλα τα νήματα περάστηκαν από κατάλληλες θέσεις που έχουν σχεδιαστεί στα διαχωριστικά, ώστε να μην μπλέκονται μεταξύ τους ή με τα καλώδια του Hardware. Το κάθε νήμα τυλίγεται γύρω από το Horn με την μία άκρη του αριστερόστροφα και την άλλη δεξιόστροφα και στο τέλος κάθε άκρη περνάει από την κατάλληλη τρύπα του horn. Τότε βιδώνοντας παραπάνω τη βίδα, παγιδεύεται το νήμα και κάνοντας τριπλό κόμπο ασφαλιζονται και οι δύο άκρες του νήματος πάνω στο Horn. Για ευκολία προγραμματισμού, τα μοτέρ αριθμήθηκαν. Η θέση των μοτέρ πρέπει να είναι λίγο μετά την αρχή ή λίγο πριν το τέλος του εύρους τους, ανάλογα την κατεύθυνση τους. Το χέρι πρέπει να φτάσει σε ακραία πίσω θέση και τα δάχτυλα όσο πιο τεντωμένα γίνεται. Μετά που έχει αφεθεί λίγο περιθώριο στο μοτέρ, μπορούν να διορθωθούν λάθη που ίσως έχουν προκύψει, ώστε να εξασφαλισθεί το απόλυτο σημείο των δαχτύλων και χεριού.



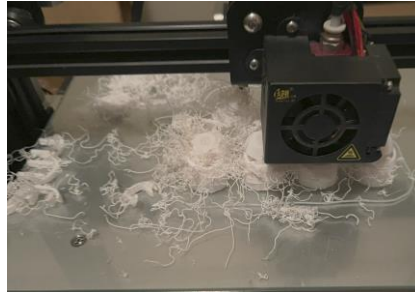
Εικόνα 3. 126 κατασκευή

Τα κελύφη της βάσης είναι σχεδιασμένα ώστε να βγαίνουν και να μπαίνουν εύκολα με κατάλληλες βάσεις και οδηγούς, αλλά χρειάστηκαν κάποιες αλλαγές στα κελύφη για να επιτευχθεί.



Εικόνα 3. 127 κατασκευή

Υπήρξαν και κάποιες άλλες επιπλοκές με τα κελύφη όπως αποτυχημένες εκτυπώσεις ή λάθος διαστάσεις.



Εικόνα 3. 128 κατασκευή

Αλλά ήταν αρκετά εύκολη η επίλυση τους.



Εικόνα 3. 129 κατασκευή

Καθώς το χέρι έχει πάνω τα κατάλληλα κενά για τους οδηγούς των κελυφών η συναρμολόγησή τους θύμιζε τρισδιάστατο παζλ. Μετά που επιβαιβεώθηκε ότι εφαρμόζει το κέλυφος, είναι σφιχτά δεμένα τα νήματα στα μοτέρ και είναι σε σωστό σημείο τα δάχτυλα με αρκετή αντίσταση, μπορούν να κοπούν το περισεύματα των νημάτων.

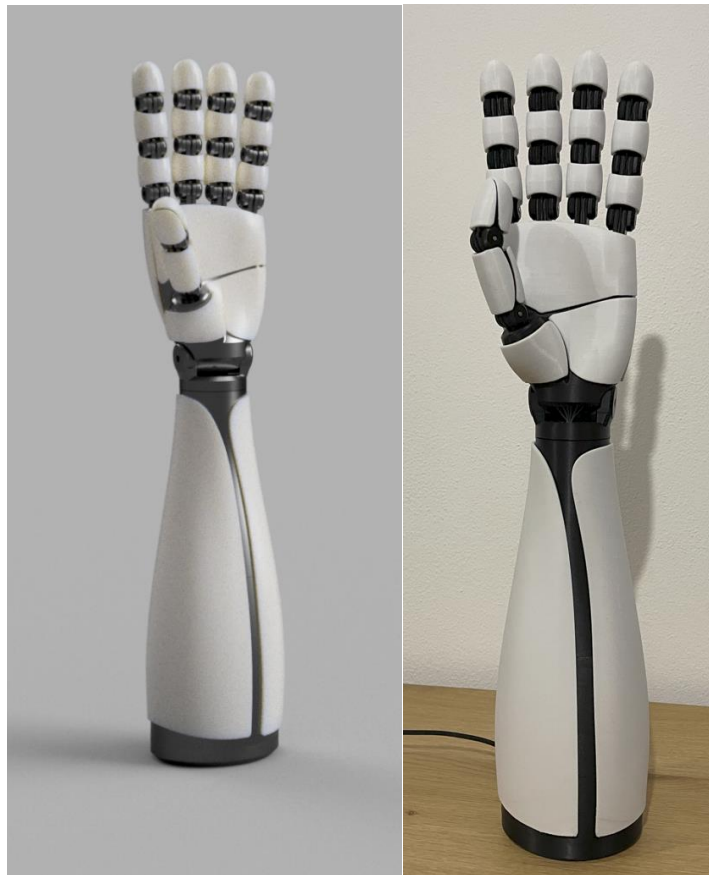


Εικόνα 3. 130 κατασκευή

3.7 ΤΕΛΙΚΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ

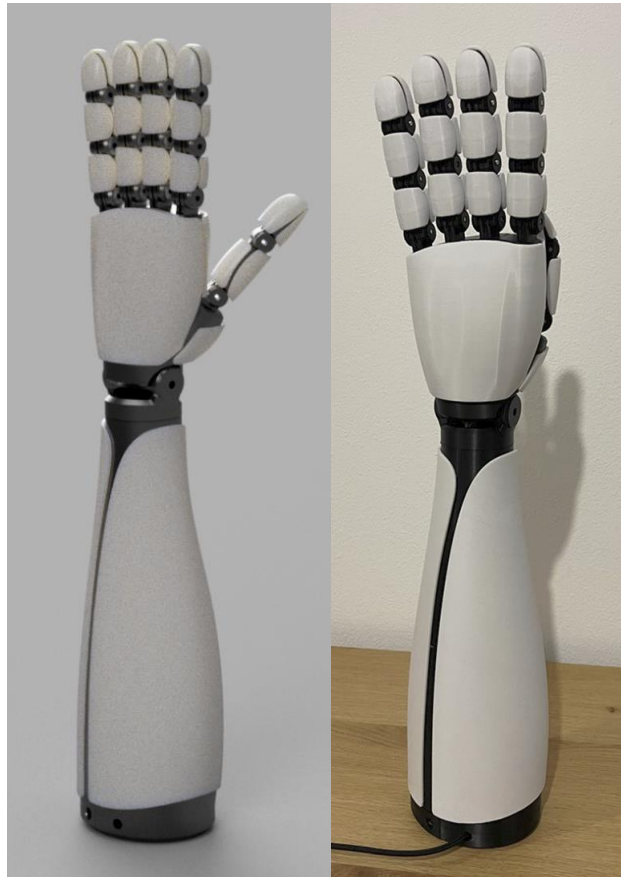
Οπότε όλα τα προηγούμενα στάδια συντέλεσαν ώστε να δημιουργηθεί ένα άρτιο αποτέλεσμα. Μελέτη και έρευνα βοήθησαν στην κατανόηση του προβλήματος και στην δομή αρχών, που πρέπει να εξυπηρετηθούν για να υλοποιηθεί ένα άξιο αποτέλεσμα. Ιδεασμός και σχεδιασμός έδωσαν την φόρμα, τα χαρακτηριστικά και την ζωή στο βιομηχανικό αυτό χέρι, ενώ προγραμματισμός και κατασκευή έφεραν τις ιδέες και τα σχέδια στην ζωή. Όλα τα στάδια ήταν απαραίτητα ώστε να εξασφαλισθεί το παρακάτω αποτέλεσμα.

Μετά από πολλή προεργασία, επιτεύχθηκε η μεταμόρφωση ενός σχεδίου, με αισθητικά άρτιο αποτέλεσμα, σε ένα πραγματικό βιομηχανικό χέρι. Χρειάστηκαν αρκετές ώρες προσεκτικής σχεδίασης και οργάνωσης του project για να μπορεί να είναι εφικτό αυτό το αποτέλεσμα.



Εικόνα 3. 131 render χεριού σύγκριση με πραγματικό

Πολλές παράμετροι συνετέλεσαν σε αυτή την διαδικασία. Προσεκτική αξιολόγηση της αισθητικής, για να μπορεί να 'θυμίζει' ταυτόχρονα ένα υπερσύγχρονο ρομπότ και ένα ανθρώπινο χέρι. Μια ζεύξη, που μόνο με πολλή προσοχή στην λεπτομέρεια και ακόμα πιο πολλή μελέτη θα μπορούσε να είναι εφικτή. Επίσης, μεγάλη έμφαση στην λειτουργικότητα ώστε να μπορεί να καλύψει τις ανάγκες που έχει στην καθημερινότητά του ένα ανάπηρο άτομο, ανάγκες που μπορεί για άλλους να μην φαντάζουν κάτι δύσκολο, αλλά για άτομα χωρίς αυτό το κατασκευάσμα, είναι αδύνατες. Το κόστος, που μελετήθηκε προσεχτικά για μια σωστή ισορροπία λειτουργικότητας και οικονομίας. Το βάρος, που έρχεται σε αντιπαράθεση με την αντοχή και την προσβασιμότητα καθώς υπάρχουν άτομα που το χρειάζονται σε πολύ μακρινές χώρες.

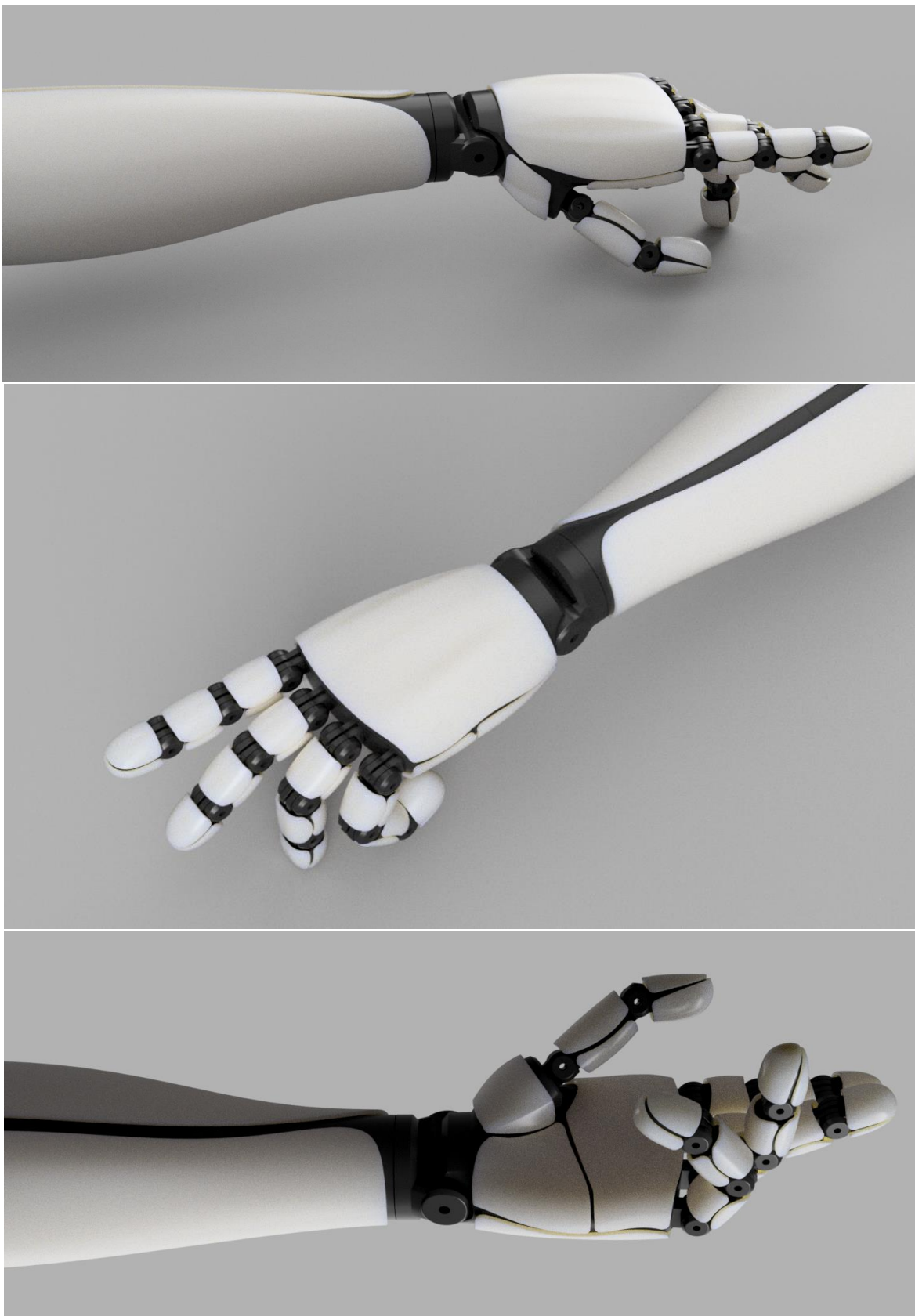


Εικόνα 3. 132 gender χεριού σύγκριση με πραγματικό

Η αισθητική χαρακτηρίζεται από οργανωτικές φόρμες, με έντονη αντίθεση τόσο σε χρώμα όσο και σε γεωμετρίες. Φαίνεται όλα τα έντονα άσπρα κομμάτια να διαχέουν μια χαλαρωτική διάθεση, καθώς τα μαύρα έρχονται σε αντίθεση με μαύρο κυρίαρχο χαρακτήρα με βιομηχανικά χαρακτηριστικά, όπως εμφανή κινούμενα μέρη, αιχμηρές λεπτομέρειες και οργανωμένα μοτίβα. Παρόλα αυτά, οι δύο χαρακτήρες ενώνονται αρμονικά δίνοντας ένα συνολικά ολοκληρωμένο άρτιο αποτέλεσμα. Επίσης, όπως ένας γνωστός ήχος ή μια γνωστή μυρωδιά, το όλο κατασκεύασμα θυμίζει οικείο καθώς μοιράζεται χαρακτηριστικά από 'τα ρομπότ όπως τα ξέρουμε ή φανταζόμαστε'. Η όλη αισθητική δίνει μια σιγουριά, μια οικειότητα στον χρήστη, κάνοντας τον να θέλει να το εξερευνήσει, γνωρίσει και ίσως αγαπήσει το συγκεκριμένο αντιβράχιο. Αυτά τα στοιχεία είναι κρίσιμα για ένα βιομηχανικό χέρι καθώς γίνεται κομμάτι του εαυτού μας όχι μόνο μεταφορικά, αλλά κυριολεκτικά.



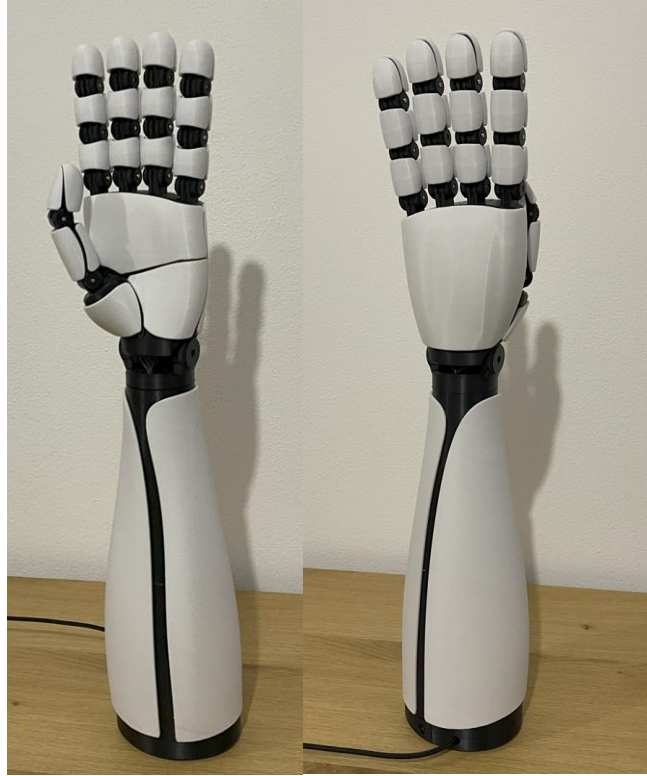
Εικόνα 3. 133 renders



Εικόνα 3. 134 renders

Αν και οι θέσεις του χεριού μπορούν να είναι αμέτρητες, καθώς κάθε δάχτυλο έχει αυτόνομη κίνηση, κάποιες συγκεκριμένες θέσεις επιλέχθηκαν. Κλείνουν όλα τα δάχτυλα

1. Φυσική θέση/ θέση ξεκούρασης. Αυτή η θέση είναι για την περίπτωση που ο χρήστης δεν κάνει κάποια συγκεκριμένη ενέργεια και όταν ενεργοποιείται το χέρι.



Εικόνα 3. 135 φυσική θέση χεριού

2. Full Grip. Ένα από τα πιο δυνατά grip, καθώς συνεργάζονται όλα τα δάχτυλα. Χρησιμοποιείται για πιάσιμο πραγμάτων όπως ένα μπουκάλι ή μια τσάντα.



Εικόνα 3. 136 Full grip

Στο παράδειγμα παρακάτω σηκώνεται μια τσάντα που ζύγιζε περίπου 1.5 κιλό, πιασμένη μόνο από δύο δάχτυλα χρησιμοποιώντας αυτό το grip.



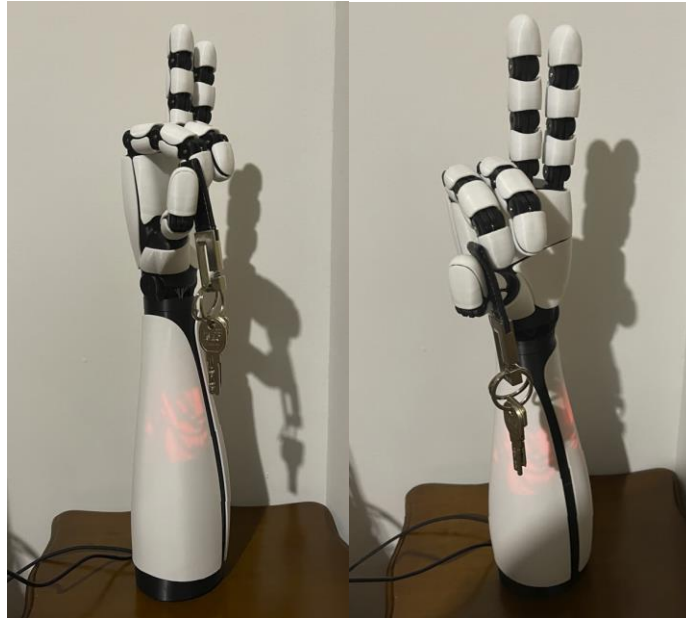
Εικόνα 3. 137 σήκωμα τσάντας

Σε θέση ανοίγματος/χαλάρωσης αυτής της λαβής τα δάχτυλα είναι στην ακραία θέση ανοίγματος.



Εικόνα 3. 138 θέση ανοίγματος

3. Pinch με δύο δάχτυλα. Αυτή η λαβή είναι για το 'άρπαγμα' και σήκωμα μικρών αντικειμένων, αν και θα μπορούσε να υποστεί βελτίωση.



Εικόνα 3. 139 Pinch με δύο δάχτυλα

4. Pinch ενός δαχτύλου. Ό,τι αναφέρθηκε και στην προηγούμενη λαβή, με την διαφορά ότι σε ειδικές περιπτώσεις, όπως στενά περάσματα, μπορεί να έχει άνετη πρόσβαση και ίσως να αναπαραστήσει την Ιταλική χειρονομία 'Chef Kiss'.



Εικόνα 3. 140 Pinch με ένα δάχτυλο

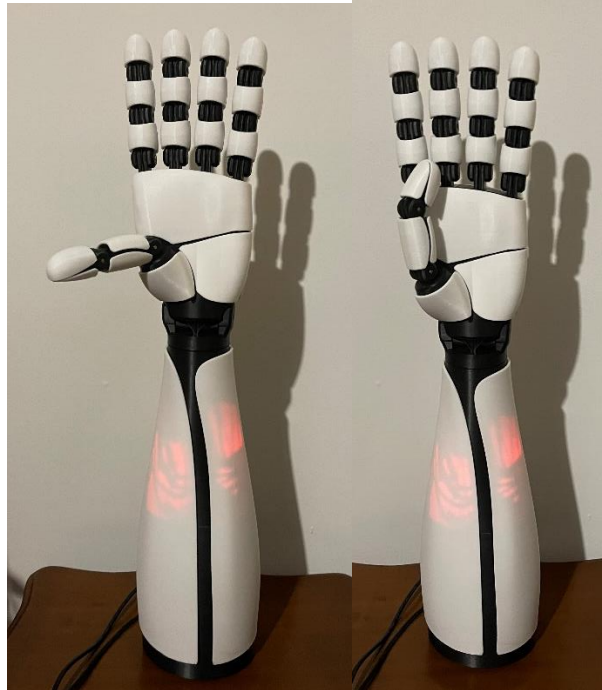
5. Rock Grip. Αυτή η λαβή έχει αστείο χαρακτήρα και δεν έχει κάποια χρηστική χρήση. Παρόλα αυτά, θα φανεί εξαιρετικά χρήσιμη όταν ο χρήστης χρειαστεί να επιδείξει το βιομηχανικό χέρι σε φίλους και συγγενείς.



Εικόνα 3. 141 rock grip

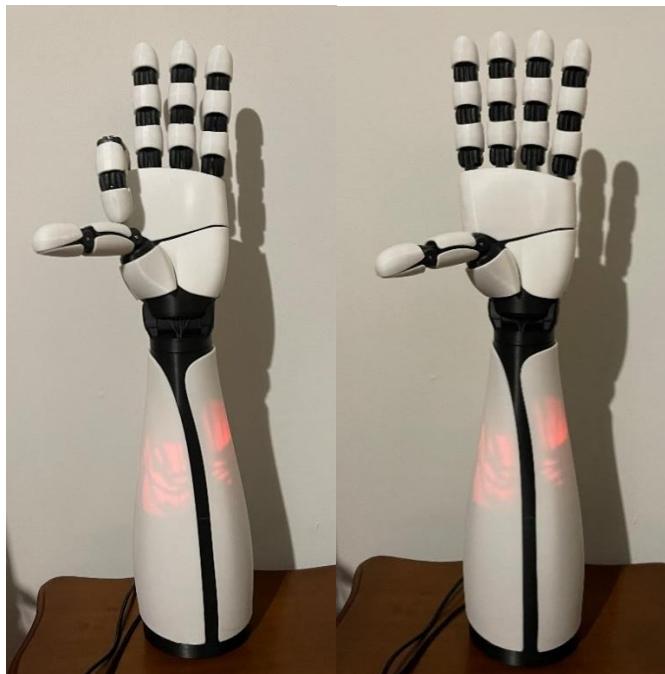
Ο λόγος που είναι εφικτές αυτές οι λαβές είναι γιατί κάθε δάχτυλο διαθέτει αυτόνομη κίνηση και η κλίση τους είναι ανεξάρτητη. Όπως φαίνεται και παρακάτω.

Αντίχειρας:



Εικόνα 3. 142 μετακίνηση δαχτύλου

Δείκτης:



Εικόνα 3. 143 μετακίνηση δαχτύλου

Μεσαίο δάχτυλο:



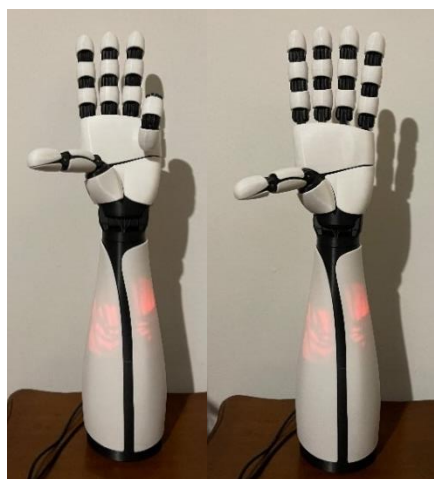
Εικόνα 3. 144 μετακίνηση δαχτύλου

Παράμεσος:



Εικόνα 3. 145 μετακίνηση δαχτύλου

Μικρό δάχτυλο:



Εικόνα 3. 146 μετακίνηση δαχτύλου

Οι λαβές μπορούν να ποικίλλουν, αλλά η χρήση τους σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να είναι δύσκολη, καθώς δεν υπάρχει η σωστή γωνία. Για αυτό λοιπόν, η περιστροφή του καρπού στον Z και X άξονα φαίνεται απαραίτητη.

Η περιστροφή του X άξονα γίνεται επιτυχώς, όπως είχε σχεδιαστεί με εύρος 35 μοίρες μπροστά, 24 μοίρες πίσω, με συνολικό εύρος περιστροφής τις 59 μοίρες. Υπάρχει μια αντίσταση από τα νήματα όταν δεν κουνιούνται τα δάχτυλα, αλλά όταν κινούνται στην ίδια κατεύθυνση η περιστροφή γίνεται αβίαστα.



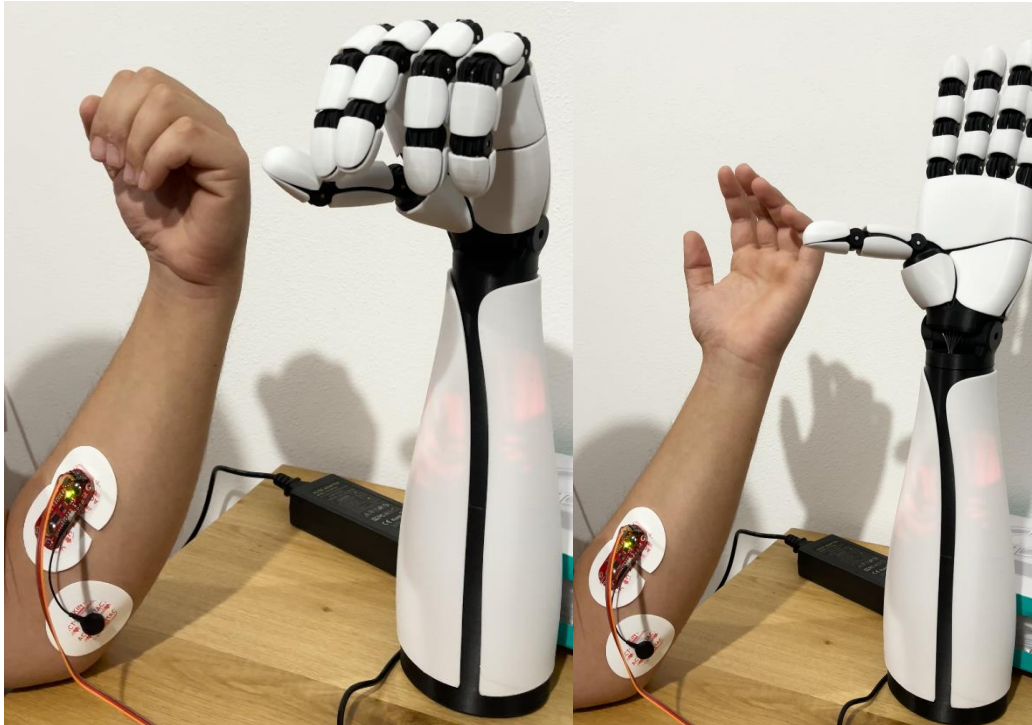
Εικόνα 3. 147 Περιστροφή καρπού στον X άξονα

Από την άλλη, η περιστροφή στον Z άξονα αντιμετωπίζει μεγαλύτερες δυσκολίες. Καθώς η μικρότερη δύναμη του MG90S κινητήρα δεν έχει την ικανότητα να ξεπεράσει την αντίσταση των νημάτων και να φτάσει στο επιθυμητό εύρος των 65 μοιρών pronation και 65 μοιρών supination σύνολο 130 μοιρών εύρος. Χωρίς υποβοήθηση βαρύτητας, το σύστημα μπορεί να φτάσει τις 35 μοίρες supination και 15 μοίρες pronation, με σύνολο 60 μοίρες εύρος περιστροφής.



Εικόνα 3. 148 Περιστροφή καρπού στον Z άξονα

Η τεχνολογία EMG δούλεψε όπως αναμενόταν από την βιβλιογραφία. Καθώς το βιομηχανικό χέρι μπορούσε, με την καθοδήγηση των μυών, να δεχθεί εντολές από το χέρι του χρήστη, όπως άνοιγμα-κλείσιμο χεριού και αρπαγή αντικειμένων. Επιτεύχθηκε η καταγραφή και αποκωδικοποίηση της συστολής και διαστολής των μυών, αλλά δεν ήταν εύκολο να γίνει διαφοροποίηση μυικών ομάδων και ξεχωριστών μυών με ένα MyoWare αισθητήρα. Οπότε προγραμματίστηκε ένα σύστημα τύπου 1 ή 0, δηλαδή το σύστημα καταλάβαινε αν υπάρχει συστολή ή διαστολή των μυών και τα μετέτρεπε σε διάφορα προγραμματισμένα grips, ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες του χρήστη. Θεωρείται η προσπάθεια επιτυχής, καθώς ο χειρισμός του χεριού φάνηκε ικανοποιητικός και εύκολος στην χρήση από διάφορους χρήστες.

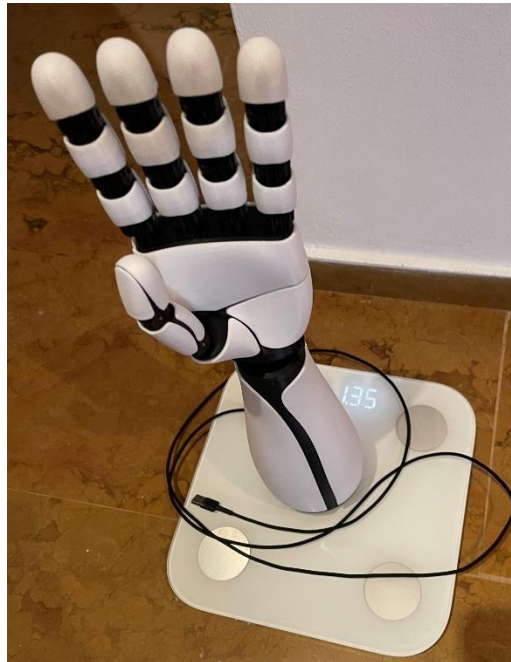


Εικόνα 3. 149 Ολοκληρωμένο πείραμα

Το βάρος του υλικού στο χέρι είναι τα 377 γρ. Οι πείροι των δαχτύλων είναι στα 1.2 γρ το ένα, οπότε τα 14 είναι 16.8 γρ. Τα ρουλεμάν - MR83ZZ (3mm Bore, 8mm OD) είναι 1 γρ το ένα, οπότε τα 28 είναι 28 γρ. Το Precision Shaft - D5mm x L50mm που συνδέει τον καρπό είναι 8 γρ. και τα ρουλεμάν - 605ZZ (5mm Bore, 14mm OD) είναι 4 γρ. το ένα, οπότε 8 γρ. σύνολο. Οι βίδες που χρησιμοποιήθηκαν είναι περίπου 3.6 γρ. σύνολο και το βάρος των νημάτων θεωρείται αμελητέο. Οπότε το συνολικό βάρος του χεριού είναι στα 441.4 γρ.

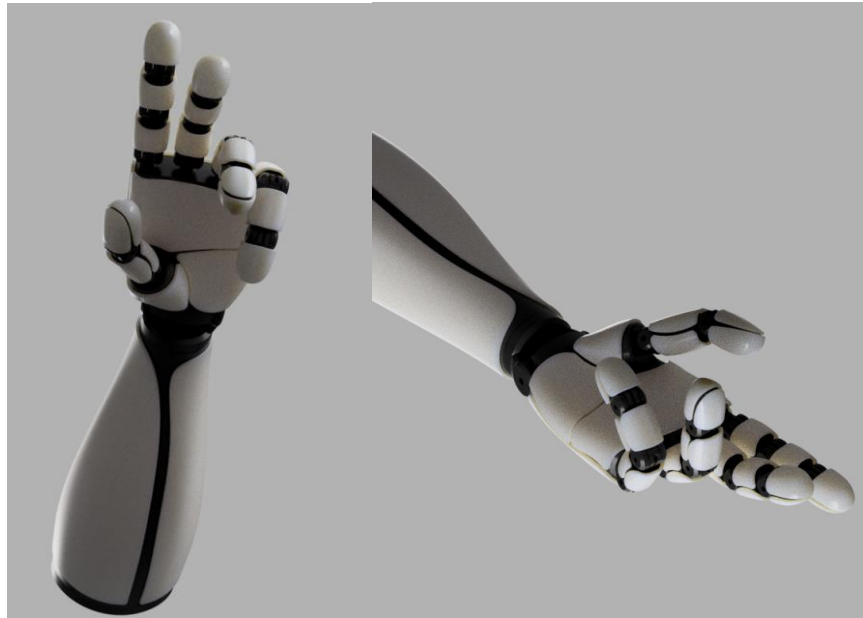
Με βάση τα παραπάνω, το βιομηχανικό χέρι που δημιουργήθηκε θεωρείται ελαφρύ καθώς είναι ελαφρύτερο από το i-Limp της TouchBionics στα 0.47kg και κοντά στο βάρος ενός ανθρώπου που κυμαίνεται κοντά στα 400 γρ. Είναι επίσης εντός του ορίου του στόχου που είχε τεθεί στο μικρότερο από 0.5kg. Άρα σε θέμα βάρους, το βιομηχανικό χέρι που δημιουργήθηκε θεωρείται επιτυχημένο. Βέβαια το συνολικό βάρος είναι χωρίς μοτέρ, ελεγκτές και μπαταρίες που ένα υψηλής τεχνολογίας χέρι συνήθως διαθέτει, οπότε σε μια λύση που θα ήταν εφαρμοσμένα αυτά τα εξαρτήματα μέσα στο χέρι, το βάρος θα ήταν σίγουρα διαφορετικό.

Αν προχωρήσουμε στο συνολικό βάρος της βάσης επίδειξης, μαζί με το χέρι είναι σύνολο στα 1.35 kg. Το συγκεκριμένο βάρος δεν δίνει κάποια πληροφορία υψηλής σημασίας, αλλά είναι καλό να υπάρχει μια αναφορά.

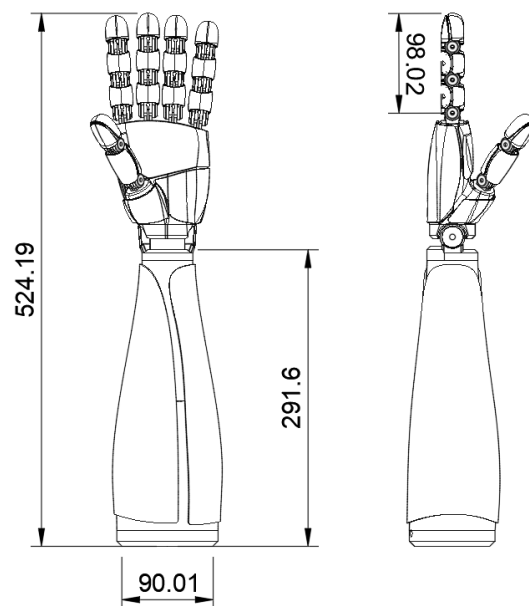


Εικόνα 3. 150 ζύγιση κατασκευής

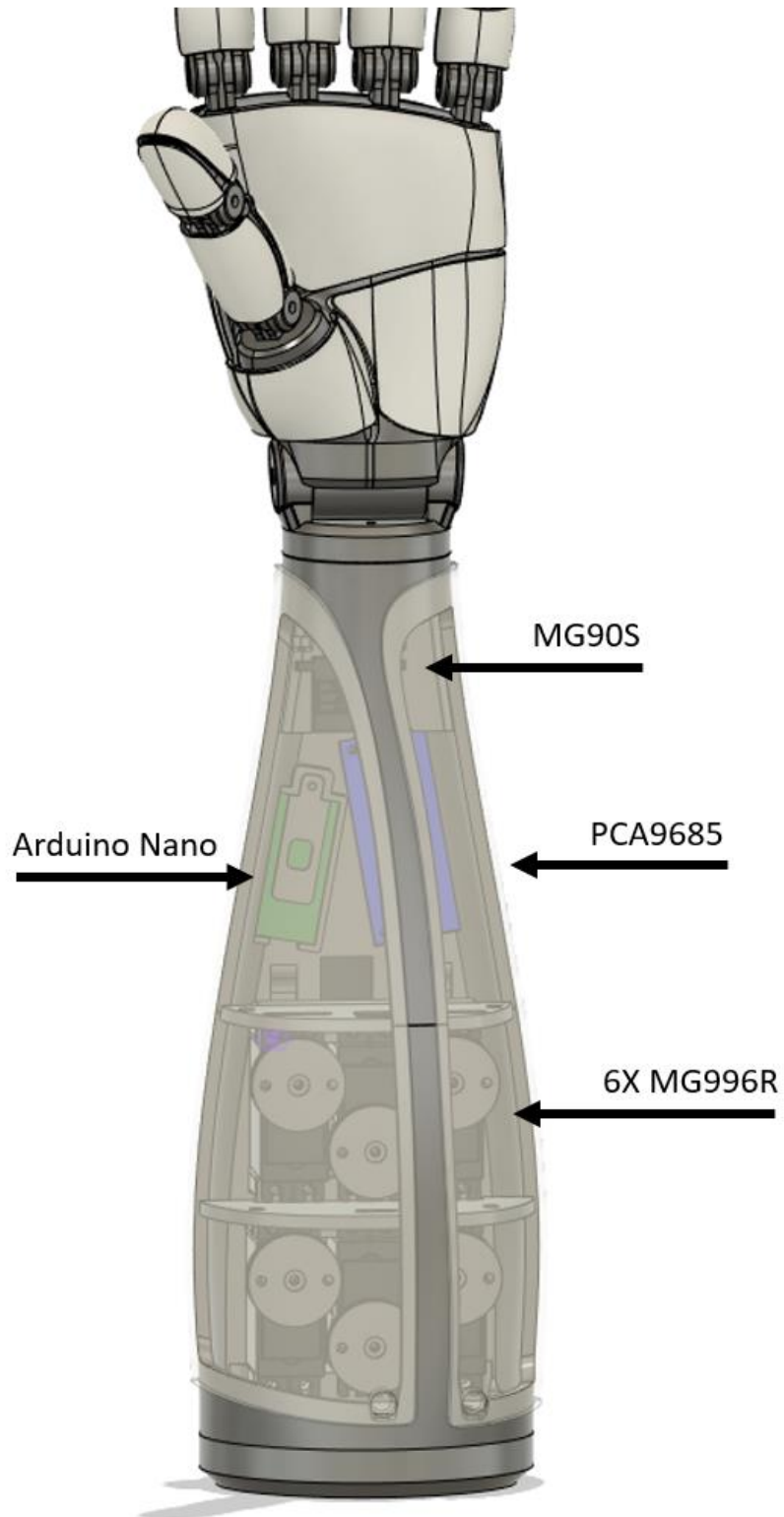
Το κόστος είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας σε όλα τα προϊόντα, πόσο μάλλον σε ένα απαραίτητο εργαλείο για κάποιους που το χρειάζονται για μια ομαλή καθημερινότητα. Όπως είδαμε, κάποια βιομηχανικά χέρια φτάνουν και τα \$100,000 δολάρια. Το βιομηχανικό χέρι αυτής της διπλωματικής εργασίας κατασκευάστηκε με μόλις 193.1 ευρώ. Αυτό είναι ένα πολύ ικανοποιητικό αποτέλεσμα, καθώς ο στόχος ήταν κάτω από 1000 ευρώ. Επίσης αν δοθούν τα αρχεία με σωστές διευκρινίσεις, δεν θα χρειαστούν μεσάζοντες που θα ανυψώσουν την τιμή, γιατί θα υπάρχει δυνατότητα να το φτιάξει κάποιος στο ίδιο του το σπίτι, αγοράζοντας τα κατάλληλα εξαρτήματα.



Εικόνα 3. 151 renders



Εικόνα 3. 152 βασικές διαστάσεις



Εικόνα 3. 153 Τοποθέτηση εξαρτημάτων

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

4.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αξιολογηθεί το project, με κριτική σκέψη δίνοντας συμπεράσματα για το τι επιτεύχθηκε, μελλοντικές προτάσεις, επόμενα βήματα και στόχους.

4.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΟΜΕΝΑ ΒΗΜΑΤΑ

Ένα από τα επόμενα βήματα που χρήζουν ευκαιρίας για αυτό το Project θα ήταν να ενσωματωθούν στο σχέδιο καλύτερα τεχνολογικά μοτέρ, μικρότερου μεγέθους, ώστε να προσαρμοστεί το hardware της βάσης μέσα στο χέρι. Έτσι, χωρίς να ανεβαίνει πολύ το βάρος, θα μπορούσε να γίνει μια ζεύξη της βάσης με το αντιβράχιο.

Σίγουρα το PLA είναι ένα γνωστό υλικό που εύκολα εκτυπώνεται, αλλά έχει κάποια μειονεκτήματα. Η μικρή του αντοχή σε θερμοκρασίες και η, όχι τόσο μεγάλη αντοχή του σε σχέση με άλλα πλαστικά, το κάνουν μη ιδανικό για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Η μελέτη για υλικά με μεγαλύτερη αντίσταση στην εξωτερική χρήση, με μεγαλύτερη αντοχή για καλύτερη εκμετάλλευση της γεωμετρίας, ώστε να μειωθεί ακόμα περισσότερο το βάρος θα ήταν μια ευπρόσδεκτη αναβάθμιση για το υπάρχον βιομηχανικό χέρι. Ένα από αυτά τα υλικά θα μπορούσε να είναι το ASA, καθώς έχει καλύτερες ιδιότητες σε όλες τις ανάγκες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Το μόνο αρνητικό είναι ότι χρειάζεται κλειστού τύπου εκτυπωτές για ικανοποιητική ποιότητα εκτύπωσης και δεν είναι τόσο δημοφιλές ώστε να βρει κάποιος εύκολα πληροφορίες για την χρήση του.

Περισσότερη ανάλυση και αναβαθμισμένος εξοπλισμός τεχνολογίας EMG θα επέτρεπαν στον χρήστη να έχει περισσότερες χειρονομίες στην διάθεσή του για το χειρισμό του αντιβραχίου, καθώς θα μπορούσαν να μελετηθούν διάφορα μυοηλεκτρικά κύματα από διάφορους μύες και να ξεκλείδωναν πολλές παραπάνω κινήσεις, σε σχέση με την τωρινή που είναι 1 ή 0 τύπου χειρισμός. Αυτό θα ήταν χρήσιμο, καθώς το χέρι θα μπορούσε ακόμα και να μιμείται τον χρήστη παρά να φέρεται σαν ο χρήστης να πατάει κάποιο κουμπί με τους μύες του.

Το χαμηλό κόστος της κατασκευής θεωρείται μεγάλη επιτυχία, καθώς είναι στο ένα πέμπτο του στόχου που ανατέθηκε. Αν μπορούν να γίνουν οι παραπάνω ενέργειες χωρίς μεγάλη αύξηση του κόστους ή τουλάχιστον κάτω από τον επιθυμητό στόχο που προαναφέρθηκε θα ήταν κάτι ιδανικό.

Η αισθητική του αντιβραχίου επίσης θεωρείται επιτυχία καθώς υπήρξαν πολλές θετικές κριτικές. Φυσικά η αισθητική είναι κάτι υποκειμενικό, οπότε είναι δύσκολο να κριθεί ο βαθμός επιτυχίας ενός προϊόντος στο θέμα αυτό. Παρόλα αυτά, εκτιμάται πως δεν χρειάζεται κάποια αλλαγή στο συγκεκριμένο κομμάτι.

Αναφορικά με πιο εμπορικές προσεγγίσεις αλλά και χρηστικές, θα ήταν ωφέλιμο να γίνει μια έρευνα στη δημιουργία ειδικού περικάρπιου παρόμοιας αισθητικής που να μπορεί να εφαρμόζεται σε διάφορα μεγέθη πηχών. Αυτή η ενέργεια κρίνεται απαραίτητη, για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί το αντιβράχιο σε άνθρωπο με ακρωτηριασμένο χέρι. Θα μπορούσε να φιλοξενηθεί απλά μια μπαταρία και να μεταφέρει την ενέργεια στο χέρι.

Θα μπορούσαν να φτιαχτούν διαφορετικής κλίμακας χέρια για να εφαρμόζουν σε διάφορους χρήστες, όπως παιδιά, γυναίκες, μικρόσωμους ή μεγαλόσωμους ανθρώπους. Ακόμα καλύτερα, να φτιαχτούν αλγόριθμοι διαστάσεων ώστε να εφαρμόζονται με βάση τις ανάγκες του χρήστη και να δημιουργούνται αυτόματα και εύκολα στο κατάλληλο μέγεθος για τον ανάλογο χρήστη. Αυτό θα ήταν εξαιρετικά χρήσιμο σε παιδιά που καθώς μεγαλώνουν θα χρειάζονται διαφορετικό μέγεθος χέρι.

Εκτός του ότι θα μπορούσαν να μελετηθούν υλικά για καλύτερη αντοχή στις εξωτερικές συνθήκες και καλύτερη αντοχή, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, θα μπορούσαν να προστεθούν κομμάτια σε συγκεκριμένα σημεία, όπως την άκρη του δαχτύλου από καουτσούκ για καλύτερη τριβή που θα βοηθούσε στο πιάσιμο πραγμάτων.

Εν κατακλείδι, ο στόχος κατασκευής ενός προσθετικού χεριού με τεχνολογία προσθετικής κατασκευής επιτεύχθηκε. Έγινε μελέτη, σχεδίαση και υλοποίηση κατασκευής-προθέσεις αντιβραχίου. Έγινε εφαρμογή μυοηλεκτρικών προθέσεων (EMG) και χάρις αυτών καταγραφή μυϊκών σημάτων από το χρήστη, αποκωδικοποιήθηκαν και μετατράπηκαν σε κινήσεις του χεριού. Το κόστος παρέμεινε χαμηλό όπως και το βάρος, αλλά η λειτουργικότητα και η αισθητική ικανοποιητική. Το τεχνητό άκρο κατασκευάστηκε με τεχνολογία προσθετικής κατασκευής.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] K. F. Gretsch, H. D. Lather, K. V. Peddada, C. R. Deeken, L. B. Wall, and C. A. Goldfarb, “Development of novel 3D-printed robotic prosthetic for transradial amputees,” *Prosthet. Orthot. Int.*, vol. 40, no. 3, pp. 400–403, Jun. 2016, doi: 10.1177/0309364615579317.
- [2] “3D printing,” *Wikipedia*. Feb. 04, 2024. Accessed: Feb. 08, 2024. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=3D_printing&oldid=1203041433
- [3] “Electromyography,” *Wikipedia*. Nov. 26, 2023. Accessed: Jan. 22, 2024. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Electromyography&oldid=1187000765>
- [4] A. Cañizares, J. Pazos, and D. Benítez, “On the use of 3D printing technology towards the development of a low-cost robotic prosthetic arm,” in *2017 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, Nov. 2017, pp. 1–6. doi: 10.1109/ROPEC.2017.8261579.
- [5] “InMoov - home,” InMoov. Accessed: Jan. 22, 2024. [Online]. Available: <https://inmoov.fr/>
- [6] “InMoov,” *Wikipedia*. Nov. 03, 2023. Accessed: Jan. 27, 2024. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=InMoov&oldid=1183363900>
- [7] “TouchBionics,” *Wikipedia*. Apr. 08, 2022. Accessed: Jan. 26, 2024. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=TouchBionics&oldid=1081633204>
- [8] “i-Limb,” ROBOTs: Your Guide to the World of Robotics. Accessed: Jan. 26, 2024. [Online]. Available: <https://robotsguide.com/robots/ilimb>
- [9] R. Kaye and S. Konz, “Volume and Surface Area of the Hand,” *Proc. Hum. Factors Soc. Annu. Meet.*, vol. 30, no. 4, pp. 382–384, Sep. 1986, doi: 10.1177/154193128603000417.

- [10] “Welcome to Ottobock.” Accessed: Jan. 26, 2024. [Online]. Available: <https://www.ottobock.com/en-us/home>
- [11] “Open Bionics - Turning Disabilities into Superpowers,” Open Bionics. Accessed: Jan. 26, 2024. [Online]. Available: <https://openbionics.com/homepage-2/>
- [12] M. C. Carrozza, B. Massa, S. Micera, R. Lazzarini, M. Zecca, and P. Dario, “The development of a novel prosthetic hand-ongoing research and preliminary results,” *IEEEASME Trans. Mechatron.*, vol. 7, no. 2, pp. 108–114, Jun. 2002, doi: 10.1109/TMECH.2002.1011247.
- [13] N. M. Bajaj, A. J. Spiers, and A. M. Dollar, “State of the Art in Artificial Wrists: A Review of Prosthetic and Robotic Wrist Design,” *IEEE Trans. Robot.*, vol. 35, no. 1, pp. 261–277, Feb. 2019, doi: 10.1109/TRO.2018.2865890.
- [14] “lesson08_1.pdf.” Accessed: Jan. 29, 2024. [Online]. Available: http://www.eln.teilam.gr/sites/default/files/lesson08_1.pdf
- [15] “Design and Development of EMG Based Prosthetic Arm | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore.” Accessed: Jan. 24, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9074206>
- [16] “Fig. 3. Setup comprising Arduino Uno and MyoWare for EMG data...,” ResearchGate. Accessed: Jan. 29, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Setup-comprising-Arduino-Uno-and-MyoWare-for-EMG-data-collection-which-communicates-with_fig1_328676359
- [17] N. Shahrubudin, T. C. Lee, and R. Ramlan, “An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications,” *Procedia Manuf.*, vol. 35, pp. 1286–1296, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.06.089.
- [18] “Long-awaited 3D-printed stainless steel bridge opens in Amsterdam,” Dezeen. Accessed: Feb. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.dezeen.com/2021/07/19/mx3d-3d-printed-bridge-stainless-steel-amsterdam/>

- [19] M. Ntousia and I. Fudos, “3D Printing Technologies & Applications: An Overview,” in *Proceedings of CAD’19*, CAD Solutions LLC, Jun. 2019, pp. 243–248. doi: 10.14733/cadconfP.2019.243-248.
- [20] T. Tamir, G. Xiong, Q. Fang, X. Dong, and Z. Shen, *A Feedback-based Print Quality Improving Strategy for FDM 3D Printing: An Optimal Design Approach*. 2021. doi: 10.21203/rs.3.rs-695835/v1.
- [21] “MyoWare Muscle Sensor Kit - SparkFun Learn.” Accessed: Jan. 24, 2024. [Online]. Available: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/myoware-muscle-sensor-kit/all>
- [22] Dejan, “nRF24L01 – How It Works, Arduino Interface, Circuits, Codes,” How To Mechatronics. Accessed: Jan. 28, 2024. [Online]. Available: <https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/arduino-wireless-communication-nrf24l01-tutorial/>
- [23] “Adafruit PCA9685 16-Channel Servo Driver,” Adafruit Learning System. Accessed: Jan. 28, 2024. [Online]. Available: <https://learn.adafruit.com/16-channel-pwm-servo-driver/overview>
- [24] “Servomotor,” *Wikipedia*. Dec. 12, 2023. Accessed: Jan. 28, 2024. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Servomotor&oldid=1189594682>
- [25] “Polylactic Acid (PLA) Filament Review,” JuggBot 3D. Accessed: Feb. 01, 2024. [Online]. Available: <https://juggbot3d.com/pla-filament-review/>
- [26] “Fusion 360,” *Wikipedia*. Oct. 27, 2023. Accessed: Jan. 24, 2024. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Fusion_360&oldid=1182167579
- [27] R. Sosa, M. Montiel, E. B. Sandoval, and R. E. Mohan, “ROBOT ERGONOMICS: TOWARDS HUMAN-CENTRED AND ROBOT-INCLUSIVE DESIGN,” in *DS 92: Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference*, 2018, pp. 2323–2334. doi: 10.21278/idc.2018.0137.

- [28] “Hosmer Prosthetic Model 5X Hook, Stainless Steel,” Amputee Store. Accessed: Feb. 12, 2024. [Online]. Available: <https://amputeestore.com/products/hosmer-model-5x-prosthetic-hook>
- [29] “3-Finger Adaptive Robot Gripper,” Robotiq. Accessed: Feb. 12, 2024. [Online]. Available: <https://robotiq.com/products/3-finger-adaptive-robot-gripper>
- [30] *MG996R Servo Motor - 3D Model - 3D model by HowToMechatronics on Thangs*. Accessed: Jan. 29, 2024. [Online Video]. Available: <https://thangs.com/designer/HowToMechatronics/3d-model/MG996R%20Servo%20Motor%20-%203D%20Model-51227>
- [31] “Is it possible to use MG996R servos for the Lynxmotion 6DOF Biped robot?,” RobotShop Community. Accessed: Jan. 29, 2024. [Online]. Available: <http://community.robotshop.com/forum/t/is-it-possible-to-use-mg996r-servos-for-the-lynxmotion-6dof-biped-robot/78026>
- [32] Thingiverse.com, “Servo model, MG90S, Tower Pro by dave_tx.” Accessed: Jan. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:253557>
- [33] “Arduino Integrated Development Environment (IDE) v1 | Arduino Documentation.” Accessed: Jan. 25, 2024. [Online]. Available: <https://docs.arduino.cc/software/ide-v1/tutorials/arduino-ide-v1-basics/>
- [34] “How to Install CH340 Drivers - SparkFun Learn.” Accessed: Jan. 24, 2024. [Online]. Available: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/how-to-install-ch340-drivers/all#windows-710>
- [35] “Tutorials & Projects | DroneBot Workshop | Arduino & Raspberry Pi,” DroneBot Workshop. Accessed: Feb. 08, 2024. [Online]. Available: <https://dronebotworkshop.com/>
- [36] Admin, “Electromyography(EMG) with MyoWare Muscle Sensor & Arduino,” How To Electronics. Accessed: Feb. 08, 2024. [Online]. Available: <https://how2electronics.com/electromyography-emg-with-myoware-muscle-sensor-arduino/>

- [37] “Arduino & Serial Peripheral Interface (SPI) | Arduino Documentation.” Accessed: Feb. 08, 2024. [Online]. Available: <https://docs.arduino.cc/learn/communication/spi/>
- [38] Dejan, “How to Control Servo Motors with Arduino - Complete Guide,” How To Mechatronics. Accessed: Feb. 08, 2024. [Online]. Available: <https://howtomechatronics.com/how-it-works/how-servo-motors-work-how-to-control-servos-using-arduino/>
- [39] *Smooth control of servo motors and drive*, (Dec. 09, 2022). Accessed: Feb. 09, 2024. [Online Video]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=pcfJJxv6q1s>
- [40] “The Main 3D Printer Filament Types of 2023,” All3DP. Accessed: Feb. 12, 2024. [Online]. Available: <https://all3dp.com/1/3d-printer-filament-types-3d-printing-3d-filament/>
- [41] “Slicer (3D printing),” *Wikipedia*. Jan. 16, 2024. Accessed: Feb. 08, 2024. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Slicer_\(3D_printing\)&oldid=1196182316](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Slicer_(3D_printing)&oldid=1196182316)
- [42] “Cura (software),” *Wikipedia*. Dec. 31, 2023. Accessed: Feb. 08, 2024. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Cura_\(software\)&oldid=1192849155](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Cura_(software)&oldid=1192849155)
- [43] M. Dwamena, “Which Layer Height is Best for 3D Printing?,” 3D Printerly. Accessed: Feb. 12, 2024. [Online]. Available: <https://3dprinterly.com/which-layer-height-is-best-for-3d-printing/>
- [44] S. E. published, “Which Infill Pattern Should You Use for 3D Prints?,” Tom’s Hardware. Accessed: Feb. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.tomshardware.com/how-to/choose-infill-pattern-for-3d-prints>
- [45] X. Europe, “Infill in 3D Printing: Definition, Main Parts, and Different Types,” Xometry Europe. Accessed: Feb. 12, 2024. [Online]. Available: <https://xometry.eu/en/infill-in-3d-printing/>
- [46] “3D Printer Bed Leveling: Easy Step-by-Step Guide,” All3DP. Accessed: Feb. 12, 2024. [Online]. Available:

<https://all3dp.com/2/3d-printer-bed-leveling-step-by-step-tutorial/>

[47] M. M. has a M. S. in physics, H. G. M. Y. of E. in I. as a L. Manager, quality assurance manager H. has now tested dozens of 3D printers, and I. H. to S. the C. E. with E. N. Article, “Cura Wall Thickness & Line Count | How to Get Perfect Walls.” Accessed: Feb. 12, 2024. [Online]. Available: <https://the3dprinterbee.com/cura-wall-thickness-line-count/>

[48] “3D Print Orientation: What to Consider for Optimal Results,” All3DP. Accessed: Feb. 12, 2024. [Online]. Available: <https://all3dp.com/2/3d-print-orientation-troubleshooting/>

6. ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ

6.1 ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

6.1.1 Κατάλογος εικόνων κεφάλιο 1

Εικόνα 1. 1 υλοποίηση για πρώτο πείραμα βιβλιογραφίας[4].....	9
Εικόνα 1. 2 Υλοποίηση InMoos αντιβραχίου για δεύτερο πείραμα βιβλιογραφίας[4]	10
Εικόνα 1. 3 Ένδειξη μηχανισμού InMoos[4].....	10
Εικόνα 1. 4 Οδηγός για pins πλακέτας MyoWare [4]	11
Εικόνα 1. 5 γράφημα από βιβλιογραφία[4].....	11
Εικόνα 1. 6 θέση αισθητήρα EMG από βιβλιογραφία[4]	12
Εικόνα 1. 7 InMoos robot[5].....	14
Εικόνα 1. 8 InMoos χέρι με αντικείμενο καθημερινότητας[5]	14
Εικόνα 1. 9 InMoos χέρι[5].....	15
Εικόνα 1. 10 κατασκευή αντιβραχίου InMoos[5]	15
Εικόνα 1. 11 κατασκευή δαχτύλου InMoos[5]	15
Εικόνα 1. 12 i-Limp Ultra που κρατάει ζάρι[8].....	17
Εικόνα 1. 13 i-Limp Ultra που κρατάει κάμερα[8]	17
Εικόνα 1. 14 χέρι Ottobock[10]	18
Εικόνα 1. 15 γρεαλιστικό γάντι για χέρι Ottobok[10]	18
Εικόνα 1. 16 Γάντζος Ottobock[10].....	19
Εικόνα 1. 17 Hero Arm[11]	19
Εικόνα 1. 18 λαβή Hero Arm Fist[11]	20
Εικόνα 1. 19 λαβή Hero Arm Hook[11].....	20
Εικόνα 1. 20 λαβή Hero Arm Tripod A[11].....	21
Εικόνα 1. 21 λαβή Hero Arm Tripod B[11].....	21
Εικόνα 1. 22 λαβή Hero Arm Pinch A[11]	22
Εικόνα 1. 23 λαβή Hero Arm Pinch B[11]	22
Εικόνα 1. 24 Περικάρπιο Hero Arm[11].....	23
Εικόνα 1. 25 Hero Arm IronMan[11]	23
Εικόνα 1. 26 Διαφορετικές επιλογές κελυφών Hero Arm[11]	24

6.1.2 Κατάλογος εικόνων κεφάλιο 2

Εικόνα 2. 1 Ονομασία αρθρώσεων βιβλιογραφίας[12].....	26
Εικόνα 2. 2 Ονομασία αρθρώσεων βιβλιογραφίας[12].....	26
Εικόνα 2. 3 DOFs του καρπού[13]	27
Εικόνα 2. 4 Διάφοροι τύποι αρθρώσεων και συνδέσμων[13].....	28
Εικόνα 2. 5 Ένδειξη τοποθέτησης Myoware αισθητήρα[16].....	29
Εικόνα 2. 6 Ατσάλινη γέφυρα κατασκευασμένη με προσθετική κατασκευή[18].....	30
Εικόνα 2. 7 Προσθετική κατασκευή τεχνολογίας FDM[20]	31

6.1.3 Κατάλογος εικόνων κεφάλιο 3

Εικόνα 3. 1 Μερικά από τα σκίτσα ιδεασμού	40
Εικόνα 3. 2 Σχέδιο χεριού τύπου γάντζου	40
Εικόνα 3. 3 Παράδειγμα γάντζου [28]	41
Εικόνα 3. 4 Σκίτσο χεριού με 3 δάχτυλα.....	41
Εικόνα 3. 5 Παράδειγμα χεριού με 3 δάχτυλα[29].....	42
Εικόνα 3. 6 Ιδεασμός ρομποτικού χεριού με 5 δάχτυλα	43
Εικόνα 3. 7 Εικόνα από CAD	44
Εικόνα 3. 8 Εικόνα από CAD	44
Εικόνα 3. 9 Εικόνα από CAD	45
Εικόνα 3. 10 Εικόνα από CAD	45
Εικόνα 3. 11 Εικόνα από CAD	45
Εικόνα 3. 12 Εικόνα από CAD	46
Εικόνα 3. 13 Εικόνα από CAD	46
Εικόνα 3. 14 Εικόνα από CAD	46
Εικόνα 3. 15 Εικόνα από CAD	47
Εικόνα 3. 16 Εικόνα από CAD	47
Εικόνα 3. 17 Εικόνα από CAD	48
Εικόνα 3. 18 Εικόνα από CAD	48
Εικόνα 3. 19 Εικόνα από CAD	49
Εικόνα 3. 20 Εικόνα από CAD	49
Εικόνα 3. 21 Εικόνα από CAD	50
Εικόνα 3. 22 Εικόνα από CAD	50
Εικόνα 3. 23 Εικόνα από CAD	50
Εικόνα 3. 24 Εικόνα από CAD	51
Εικόνα 3. 25 Εικόνα από CAD	51
Εικόνα 3. 26 Εικόνα από CAD	51
Εικόνα 3. 27 Εικόνα από CAD	52
Εικόνα 3. 28 Εικόνα από CAD	52
Εικόνα 3. 29 Εικόνα από CAD	52
Εικόνα 3. 30 Εικόνα από CAD	53
Εικόνα 3. 31 Εικόνα από CAD και διαστάσεις MG996R motor[31]	53
Εικόνα 3. 32 Εικόνα από CAD	54
Εικόνα 3. 33 Εικόνα από CAD	54
Εικόνα 3. 34 Εικόνα από CAD	55
Εικόνα 3. 35 Εικόνα από CAD	55
Εικόνα 3. 36 Εικόνα από CAD	56
Εικόνα 3. 37 Εικόνα από CAD	56
Εικόνα 3. 38 Εικόνα από CAD	57
Εικόνα 3. 39 Εικόνα από CAD	57
Εικόνα 3. 40 Εικόνα από CAD	58
Εικόνα 3. 41 Εικόνα από CAD	58
Εικόνα 3. 42 Εικόνα από CAD	59
Εικόνα 3. 43 Εικόνα από CAD	59
Εικόνα 3. 44 Εικόνα από CAD	59
Εικόνα 3. 45 Εικόνα από CAD	60
Εικόνα 3. 46 Εικόνα από CAD	60
Εικόνα 3. 47 Εικόνα από CAD	61

Εικόνα 3. 48 Εικόνα από CAD	61
Εικόνα 3. 49 Εικόνα από CAD	61
Εικόνα 3. 50 Εικόνα από CAD	62
Εικόνα 3. 51 Εικόνα από CAD	62
Εικόνα 3. 52 DriverSetup.exe για driver CH340[34]	65
Εικόνα 3. 53 κώδικας.....	66
Εικόνα 3. 54 κώδικας.....	66
Εικόνα 3. 55 κώδικας.....	67
Εικόνα 3. 56 Schematic ΜγοWare sensor[4].....	68
Εικόνα 3. 57 Σύνδεση ΜγοWare Sensor με Arduino UNO[36]	68
Εικόνα 3. 58 Διάφορες τοποθετήσεις ΜγοWare Sensor	69
Εικόνα 3. 59 κώδικας.....	70
Εικόνα 3. 60 Serial Plotter χωρίς ενέργεια χεριού.....	71
Εικόνα 3. 61 Serial Plotter με ενέργεια χεριού.....	71
Εικόνα 3. 62 Serial Plotter χωρίς ενέργεια χεριού.....	72
Εικόνα 3. 63 ένδειξη ασύρματης επικοινωνίας NRF24L01[22]	73
Εικόνα 3. 64 NRF24L01 pins[22].....	73
Εικόνα 3. 65 συνδεσμολογία NRF24L01 με Arduino[22].....	74
Εικόνα 3. 66 κώδικας.....	74
Εικόνα 3. 67 κώδικας.....	75
Εικόνα 3. 68 αποτέλεσμα πειράματος NRF24L01	76
Εικόνα 3. 69 PCA9685[23]	76
Εικόνα 3. 70 συνδεσμολογία PCA9685 με Arduino[23].....	77
Εικόνα 3. 71 Ένδειξη λειτουργίας servo[38].....	77
Εικόνα 3. 72 κώδικας.....	78
Εικόνα 3. 73 κώδικας.....	80
Εικόνα 3. 74 κώδικας.....	81
Εικόνα 3. 75 κώδικας.....	82
Εικόνα 3. 76 κώδικας.....	83
Εικόνα 3. 77 κώδικας.....	84
Εικόνα 3. 78 κώδικας.....	84
Εικόνα 3. 79 κώδικας.....	85
Εικόνα 3. 80 κώδικας.....	85
Εικόνα 3. 81 κώδικας.....	86
Εικόνα 3. 82 κώδικας.....	87
Εικόνα 3. 83 κώδικας.....	88
Εικόνα 3. 84 κώδικας.....	89
Εικόνα 3. 85 κώδικας.....	90
Εικόνα 3. 86 κώδικας.....	91
Εικόνα 3. 87 cubic infill type[45].....	96
Εικόνα 3. 88 Παράδειγμα δομής support(με χρώμα μπλε)[41]	97
Εικόνα 3. 89 Παράδειγμα a)skirt, b)brim, c) raft[41].....	98
Εικόνα 3. 90 Παράδειγμα μη κάθετου κρεβατιού σε σχέση με το nozzle[46].....	98
Εικόνα 3. 91 knob κρεβατιού εκτυπωτή[46]	99
Εικόνα 3. 92 Εκτύπωση πειράματος ισώματος κρεβατιού[46]	99
Εικόνα 3. 93 Παράδειγμα Wall count ποσότητας 3[47]	100
Εικόνα 3. 94 εκτύπωση δαχτύλων	101
Εικόνα 3. 95 εκτύπωση παλάμης.....	102

Εικόνα 3. 96 εκτύπωση κελυφών	103
Εικόνα 3. 97 Παράδειγμα αφαίρεσης support	104
Εικόνα 3. 98 Παράδειγμα αφαίρεσης ατελειών εκτυπωμένου κομματιού	104
Εικόνα 3. 99 Παράδειγμα ‘κλωστών’ από εκτύπωση	105
Εικόνα 3. 100 Παράδειγμα αφαίρεση ατελειών.....	105
Εικόνα 3. 101 κατασκευή	108
Εικόνα 3. 102 κατασκευή	108
Εικόνα 3. 103 κατασκευή	109
Εικόνα 3. 104 κατασκευή	109
Εικόνα 3. 105 κατασκευή	109
Εικόνα 3. 106 κατασκευή	110
Εικόνα 3. 107 κατασκευή	110
Εικόνα 3. 108 κατασκευή	110
Εικόνα 3. 109 κατασκευή	111
Εικόνα 3. 110 κατασκευή	111
Εικόνα 3. 111 κατασκευή	111
Εικόνα 3. 112 κατασκευή	112
Εικόνα 3. 113 κατασκευή	112
Εικόνα 3. 114 κατασκευή	113
Εικόνα 3. 115 κατασκευή	113
Εικόνα 3. 116 κατασκευή	114
Εικόνα 3. 117 κατασκευή	114
Εικόνα 3. 118 κατασκευή	115
Εικόνα 3. 119 κατασκευή	115
Εικόνα 3. 120 κατασκευή	116
Εικόνα 3. 121 κατασκευή	116
Εικόνα 3. 122 κατασκευή	117
Εικόνα 3. 123 κατασκευή	117
Εικόνα 3. 124 κατασκευή	118
Εικόνα 3. 125 κατασκευή	118
Εικόνα 3. 126 κατασκευή	119
Εικόνα 3. 127 κατασκευή	120
Εικόνα 3. 128 κατασκευή	121
Εικόνα 3. 129 κατασκευή	121
Εικόνα 3. 130 κατασκευή	121
Εικόνα 3. 131 render χεριού σύγκριση με πραγματικό	123
Εικόνα 3. 132 render χεριού σύγκριση με πραγματικό	124
Εικόνα 3. 133 renders.....	125
Εικόνα 3. 134 renders.....	126
Εικόνα 3. 135 φυσική θέση χεριού.....	127
Εικόνα 3. 136 Full grip	127
Εικόνα 3. 137 σήκωμα τσάντας	128
Εικόνα 3. 138 θέση ανοίγματος.....	128
Εικόνα 3. 139 Pinch με δύο δάχτυλα.....	129
Εικόνα 3. 140 Pinch με ένα δάχτυλο	129
Εικόνα 3. 141 rock grip	130
Εικόνα 3. 142 μετακίνηση δαχτύλου	131
Εικόνα 3. 143 μετακίνηση δαχτύλου	131

Εικόνα 3. 144 μετακίνηση δαχτύλου	132
Εικόνα 3. 145 μετακίνηση δαχτύλου	132
Εικόνα 3. 146 μετακίνηση δαχτύλου	132
Εικόνα 3. 147 Περιστροφή καρπού στον Χ άξονα	133
Εικόνα 3. 148 Περιστροφή καρπού στον Ζ άξονα	133
Εικόνα 3. 149 Ολοκληρωμένο πείραμα	134
Εικόνα 3. 150 ζύγιση κατασκευής	135
Εικόνα 3. 151 renders.....	136
Εικόνα 3. 152 βασικές διαστάσεις.....	136
Εικόνα 3. 153 Τοποθέτηση εξαρτημάτων.....	137

6.2 ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

6.2.1 Κατάλος πινάκων κεφάλαιο 1

Πίνακας 1. 1 αποτελέσματα πειράματος βιβλιογραφίας[4].....	12
Πίνακας 1. 2 αποτελέσματα πειράματος βιβλιογραφίας[4].....	13

6.2.2 Κατάλος πινάκων κεφάλαιο 2

Πίνακας 2. 1 Διαδικασίες και τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής[19]	32
Πίνακας 2. 2 Σύγκριση τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής[19]	33

6.2.3 Κατάλος πινάκων κεφάλαιο 3

Πίνακας 3. 1 αρίθμηση μοτέρ και καταγραφή των ευρών τους.....	79
---	----