



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

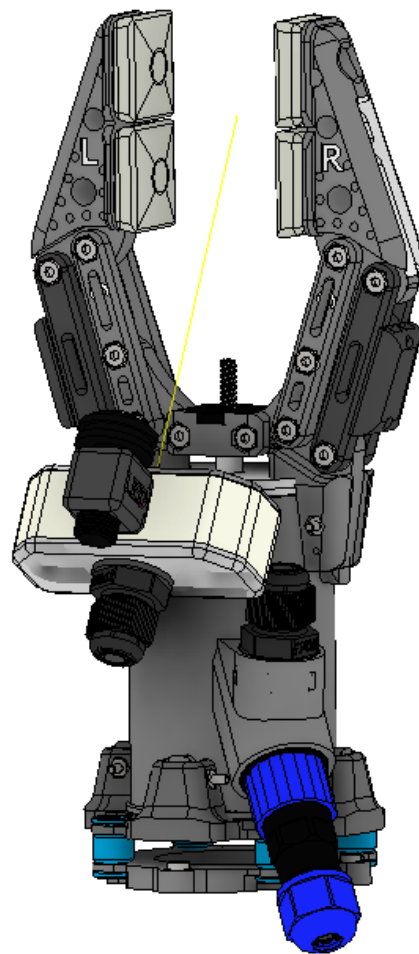
ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ ΜΕΝΕΓΑΣ

Επιβλέπων Καθηγητής:
Κωνσταντίνος Κυριακόπουλος

Μεταπτυχιακή Εργασία

«Σχεδιασμός και Ανάπτυξη Ακροδέκτη για Υποβρύχιο Ρομποτικό Βραχίονα»

“Design and Development of an End-Effector for an
Underwater Manipulator”



ΑΘΗΝΑ 2020

(κενή σελίδα)

Περίληψη

Η εργασία αυτή περιγράφει την διαδικασία σχεδιασμού κι ανάπτυξης τελικού στοιχείου δράσης, ενός βαθμού ελευθερίας, για χρήση με τους βραχίονες που αναρτώνται στα υποβρύχια οχήματα (U-ROV) του εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου του Ε.Μ.Π. Οι βασικές προδιαγραφές που τίθενται είναι: η ικανότητα χειρισμού αντικειμένων μάζας περί τα 500g (εκτός νερού), με μέγιστο πλάτος χειρισμού περί τα 50mm και δυνατότητα ανίχνευσης της επαφής ή της ασκούμενης δύναμης, εξασφαλίζοντας παράλληλα τη συμβατότητα με τους βραχίονες και μάζα λίγων εκατοντάδων γραμμαρίων. Καθώς οι πειραματικές διαδικασίες του εργαστηρίου περιλαμβάνουν καταστάσεις όπου το στοιχείο δράσης θα είναι πλήρως υπό βύθιση, τίθεται επίσης η προδιαγραφή της ασφαλούς λειτουργίας εντός νερού, σε βάθος περί το 1.5m και κατ' ελάχιστο για 30min. Τέλος, ως επιπλέον στοιχεία, γίνεται προσπάθεια ενσωμάτωσης κάποιας μορφής ενδοτικότητας, καθώς και συστήματος οπτικής παρακολούθησης (κάμερα).

Για την επίτευξη των προδιαγραφών σχεδιάζεται σύστημα με στεγανό περίβλημα, εντός του οποίου περικλείονται τα ηλεκτρικά μέρη του μηχανισμού, εκτός από τους αισθητήρες αφής που τοποθετούνται στις επιφάνειες συγκράτησης. Για την κατασκευή των μερών χρησιμοποιείται 3D-εκτυπωτής τύπου FFF και CNC-φρέζα / τόρνος. Η κίνηση των επιφανειών γίνεται μέσω συστήματος DC μοτέρ - κοχλία - περικόχλιου, με δυνατότητα παρακολούθησης της θέσης. Αναπτύσσεται λογισμικό ελέγχου, βασισμένο στον 8-bit μικροελεγκτή ATmega32U4, όπου ενσωματώνονται εντολές υψηλού επιπέδου για την αλληλεπίδραση με τον χρήστη, με τη διασύνδεση να γίνεται μέσω του πρωτόκολλου USB. Σχεδιάζεται σχήμα ελέγχου της ασκούμενης δύναμης, κλειστού βρόχου, με ανάδραση από τέσσερις αισθητήρες τύπου Force Sensitive Resistor, οι οποίοι βαθμονομούνται στις δεδομένες συνθήκες ενσωμάτωσης στο μηχανισμό. Συμπεριλαμβάνεται επίσης μονάδα μέτρησης αδράνειας έξι βαθμών ελευθερίας. Τέλος, μαζί με το υλικό του μηχανισμού, αναπτύσσεται εκτενές εγχειρίδιο με τεχνικά σχέδια των μερών, οδηγίες για την κατασκευή, τη συναρμολόγηση και τη χρήση του συστήματος.

Abstract

In this thesis the process of designing and developing an end-effector is described. The single degree-of-freedom end-effector is meant to be used with the manipulators mounted on the underwater ROV of the Control Systems Laboratory (CSL) of NTUA. The main specifications set are: the ability to handle items with about 500g of mass (weighted out of water), a maximum gripping width of about 50mm, along with the ability to detect contact or measure gripping force, while ensuring compatibility with the manipulators and having a mass of a few hundred grams. Since the experiments performed in the CSL consist of procedures in full immersion, the additional specification of protection against water damage in depth of about 1.5m and for at least 30min is set. Finally, as extra features, the incorporation of a form of compliance and a camera monitoring system is attempted.

In order to achieve the aforementioned specifications a water-tight shell is designed, where the electrical parts of the mechanism are enclosed, except for the tactile sensors which are placed on the gripping surfaces. To manufacture the parts a FFF 3D-printer and a CNC-mill / lathe are employed. The motion of the gripping surfaces is based on a DC motor - lead screw/nut combination, with position sensing support. The control software is developed on a 8-bit ATmega32U4 microcontroller and includes high-level commands for user interaction, over a USB interface. A closed-loop force-control scheme is applied, with feedback coming from four Force Sensitive Resistors, which are calibrated on the specific mounting conditions. A six degrees-of-freedom inertial measurement unit is also included. To complete the project, along with the mechanism hardware, an extensive manual is compiled, including technical drawings of the parts, manufacturing, assembly and usage instructions.

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Abstract.....	4
Περιεχόμενα.....	5
Εισαγωγή.....	9
1 Τεχνική περιγραφή του προβλήματος	15
1.1 Προδιαγραφή 1: Συμβατότητα με τους υπάρχοντες βραχίονες.....	15
1.2 Προδιαγραφή 2: Μέγιστο πλάτος ανοίγματος	17
1.3 Προδιαγραφή 3: Μέγιστη μάζα συγκράτησης.....	17
1.4 Προδιαγραφή 4: Αισθητήρια επαφής/ασκούμενης δύναμης	17
1.5 Προδιαγραφή 5: Οπτικό μέσο (camera)	17
1.6 Προδιαγραφή 6: Ταχύτητα μεταβολής κατάστασης συγκράτησης	18
1.7 Προδιαγραφή 7: Παθητική ενδοτικότητα.....	18
1.8 Προδιαγραφή 8: Ηλεκτρική τροφοδοσία & έλεγχος λειτουργίας.....	19
1.9 Προδιαγραφή 9: Προστασία από επαφή με το νερό.....	19
2 Σχεδιασμός, Ανάπτυξη & Περιγραφή του Μηχανισμού.....	22
2.1 Εισαγωγή στη σχεδιαστική διαδικασία	22
2.2 Κινώντας τα δάκτυλα.....	26
2.3 Προστασία από το νερό και αίσθηση «αφής».....	31
2.4 Σύνδεση με το βραχίονα και ενδοτικότητα	43
2.5 Το οπτικό σύστημα.....	46
2.6 Κατασκευή-συναρμολόγηση των μερών και τεχνικά σχέδια.....	48
3 Ηλεκτρολογικό Υλικό & Λογισμικό Ελέγχου	49
3.1 Στοιχεία εσωτερικά του μηχανισμού.....	49
3.2 Διασυνδέσεις εσωτερικών στοιχείων.....	67
3.3 Στοιχεία εξωτερικά του μηχανισμού, διασύνδεση με απομακρυσμένο Η/Υ, τροφοδοσία	71
3.4 Λογισμικό ελέγχου: επισκόπηση και αλγοριθμική προσέγγιση	74
3.5 Λογισμικό ελέγχου: κώδικας σε γλώσσα C/C++ (Arduino)	83
4 Πειραματικές Διαδικασίες.....	101
4.1 Βαθμονόμηση των αισθητήρων «αφής» (Force Sensitive Resistors)	101

4.2	Προσέγγιση κατάλληλων συντελεστών K_p και K_i για το σχήμα ελέγχου	108
4.3	Επίδειξη της ικανότητας συγκράτησης αντικειμένων ποικίλης γεωμετρίας και μάζας 122	
4.4	Μελέτη της στεγανότητας	124
5	Συμπεράσματα & Εξέλιξη	129
5.1	Σύνοψη των αποτελεσμάτων	129
5.2	Ζητήματα και προτάσεις στα μηχανικά μέρη	132
5.3	Ζητήματα και προτάσεις στα ηλεκτρικά μέρη	134
5.4	Ζητήματα και προτάσεις στο λογισμικό ελέγχου	136
	Παράρτημα Α (technical drawings of parts)	137
	(A) - Finger assemblies	139
	(B) - Rod Link assembly	160
	(C) - Casing Top Plug assembly	165
	(D) - Motor Casing assemblies	171
	(E) - Casing Bottom Plug assembly	187
	(F) - Manipulator Base assembly	197
	(G) - Camera assemblies	203
	(H) - LED Lamp assembly	222
	(I) - Cable Host Buoy assembly	227
	(J) - "UndEE" System assembly	235
	Παράρτημα Β (electrical manual)	242
	Παράρτημα Γ (manufacture manuals)	248
	Γ1. Τα μέρη που κατασκευάζονται μέσω 3D-εκτύπωσης	249
	Γ2. Τα μέρη που κατασκευάζονται μέσω CNC-φρέζας και τόρνου:	267
	Γ3. Τα καλύμματα των αισθητήρων FSR: χύτευση σε καλούπι	282
	Παράρτημα Δ (assembly manuals)	284
	(A) - Finger assemblies	285
	(B) - Rod Link assembly	289
	(C) - Casing Top Plug assembly	291
	(D) - Motor Casing assemblies	293
	(E) - Casing Bottom Plug assembly	296
	(F) - Manipulator Base assembly	299
	(G) - Camera assemblies	301
	(H) - LED Lamp assembly	305

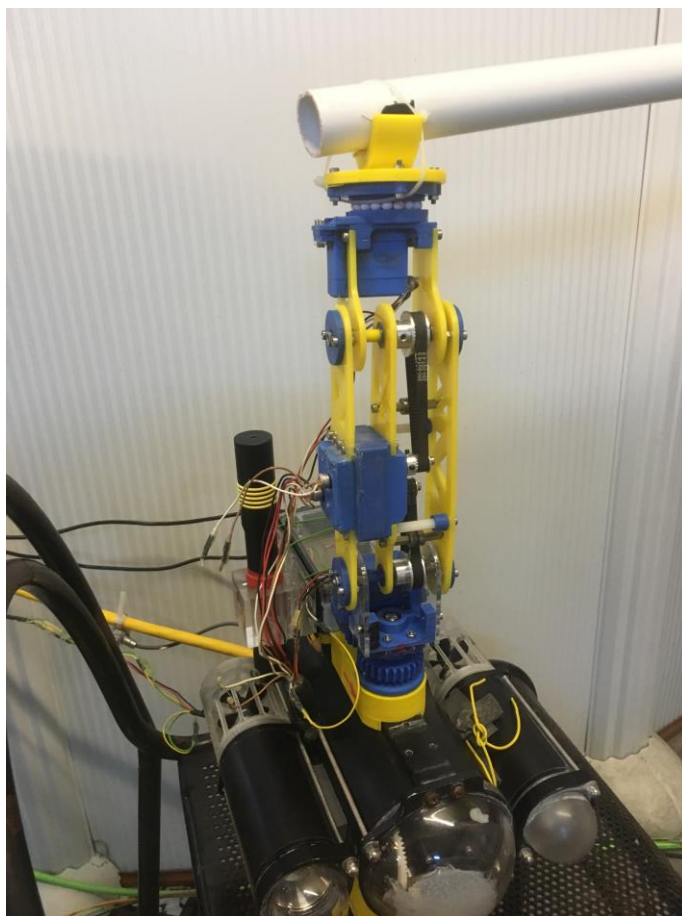
(I) - Cable Host Buoy assembly	307
(J) - "UndEE" System assembly.....	309
Παράρτημα Ε (συνάρτηση πλάτους ανοίγματος - γωνίας στροφής μοτέρ)	313
Παράρτημα Στ (ενδεικτικό κοστολόγιο).....	319
Παράρτημα Ζ (κατάλογος αρχείων).....	323
Βιβλιογραφικές αναφορές	325

(κενή σελίδα)

Εισαγωγή

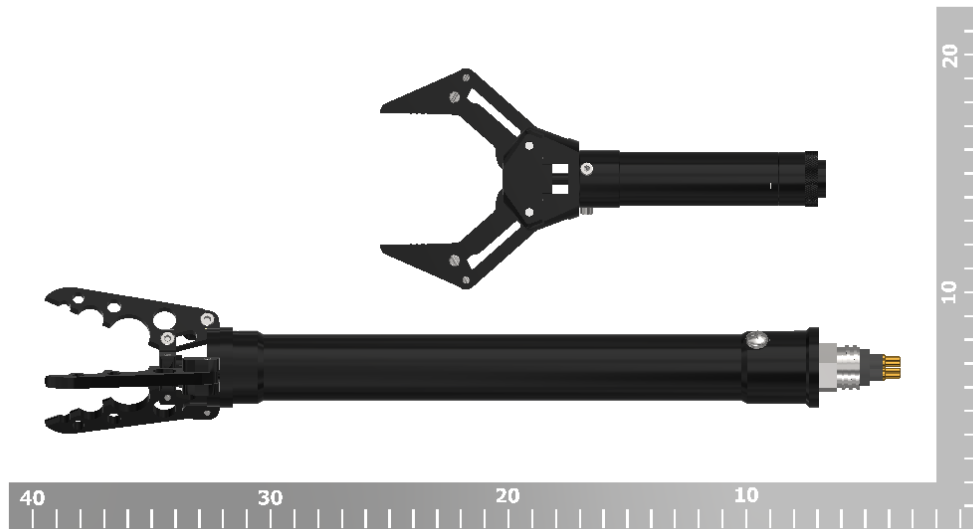
Το τμήμα υποβρύχιας ρομποτικής του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου (εφεξής: Ε.Α.Ε.) διαθέτει δύο υποβρύχια οχήματα απομακρυσμένου ελέγχου (ROV). Για τις ανάγκες των ερευνητικών δραστηριοτήτων του εργαστηρίου, είχαν αναπτυχθεί στο παρελθόν ρομποτικοί βραχίονες τεσσάρων (στροφικών) βαθμών ελευθερίας (εικόνα 1), οι οποίοι προσαρμόστηκαν στα εν λόγω οχήματα και χρησιμοποιούνταν έως τώρα, χωρίς ωστόσο την παρουσία κάποιου οργανωμένου τελικού στοιχείου δράσης.

Με τα υπάρχοντα στο Ε.Α.Ε. μέσα υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής γενικευμένων ή και προσαρμοσμένων στο εκάστοτε πρόβλημα βάσεων για τον βραχίονα, ώστε να είναι δυνατή η πρόσδεση αντικειμένων διαφορετικών μεγεθών ή γεωμετριών, με σχετικά γρήγορο κι εύκολο τρόπο (π.χ. μέσω 3D-printing). Ωστόσο η πρακτική αυτή μπορεί να αποδειχθεί άβολη, ενώ είναι εγγενώς περιοριστική ως προς τη δυνατότητα χειρισμού αντικειμένων. Ακόμα κι αν μπορούσε να αναπτυχθεί μια βάση που να εξυπηρετεί όλα τα αντικείμενα που χρησιμοποιούνται (αφαιρώντας την παράμετρο εναλλαγής βάσεων), για κάθε διαδικασία το όχημα θα πρέπει να απομακρύνεται από το χώρο του πειράματος, ώστε να τοποθετηθεί το εκάστοτε αντικείμενο στη βάση. Είναι εμφανές ότι με τον τρόπο αυτό αποκλείεται κάθε είδους αυτονομία στο χειρισμό. Για παράδειγμα, οι τυπικές για έναν ρομποτικό χειριστή κινήσεις τύπου “pick-and-place” είναι αδύνατες.



Εικόνα 1 - Ο ένας από τους βραχίονες που προϋπήρχαν στο εργαστήριο, αναρτημένος σε ένα από τα υποβρύχια ROV.

Σημειώνεται εδώ ότι για τα δύο ROV υπάρχουν στο εργαστήριο δύο διαφορετικού τύπου τελικά στοιχεία δράσης (ενός βαθμού ελευθερίας – “grippers”), τα οποία ωστόσο δεν παρέχουν κάποια πληροφορία για την θέση των επιφανειών συγκράτησης, την ασκούμενη δύναμη ή έστω την επαφή με τα προς χειρισμό αντικείμενα. Ταυτόχρονα -όντας μεταλλικά- είναι αρκετά μαζικά (περίπου 250g και 500g, με το δεύτερο μάλιστα να είναι και ιδιαίτερα επίμηκες) και είναι σχεδιασμένα ώστε να αναρτώνται από κάποιου είδους βάση στο σώμα του οχήματος κι όχι στο άκρο ενός βραχίονα. Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών τους είναι σχετικά δύσχρηστα και δεν ικανοποιούν τη ζητούμενη ευελιξία. Τα δύο αυτά συστήματα απεικονίζονται στο ακόλουθο γραφικό.



Εικόνα 2 - Οι δύο grippers (Seabotix 3-fingered grabber, Inuktun Micromanip) που υπήρχαν στο Ε.Α.Ε. μαζί με μια κλίμακα (cm) για την αντίληψη των διαστάσεών τους.

Στα πλαίσια λοιπόν της επέκτασης της ικανότητας των ROV για χειρισμό αντικειμένων σε υποβρύχιες συνθήκες και της εκτέλεσης περισσότερων πειραματικών διαδικασιών, με την ευελιξία που παρέχουν οι βραχίονες, αναδύθηκε η ανάγκη προσθήκης τελικών στοιχείων δράσης, με την ιδέα ότι η ανάπτυξη και η εξέλιξή τους θα πραγματοποιηθεί εντός του εργαστηρίου.

Για το πρώτο στάδιο αυτής της εξελικτικής διαδικασίας, στο οποίο αφορά και η παρούσα εργασία, επιλέχθηκε η απλούστερη δυνατή μορφή: ένας βαθμός ελευθερίας - δύο επιφάνειες συγκράτησης, κινούμενες παράλληλα (parallel gripper). Η έμφαση θα πρέπει να δοθεί στην ενσωμάτωση των χαρακτηριστικών που απουσιάζουν από τα δύο προηγούμενα συστήματα, τα οποία μπορούν να συνοψισθούν ως εξής:

- Ικανότητα χειρισμού αντικειμένων αντίστοιχων ή μεγαλύτερων διαστάσεων
- Μικρή μάζα / όγκος
- Συμβατότητα με τους βραχίονες
- Δυνατότητα ανίχνευσης της επαφής με τα αντικείμενα / μέτρησης της ασκούμενης δύναμης
- Ευελιξία στην αλληλεπίδραση με το χρήστη
- Ενσωμάτωση συστήματος οπτικής παρακολούθησης (camera)
- Ενσωμάτωση κάποιου βαθμού (παθητικής) ενδοτικότητας

Βεβαίως, δεν θα πρέπει να αμεληθεί το σημαντικότερο χαρακτηριστικό της λειτουργίας εντός νερού ή υπό βύθιση, που τα δύο άλλα συστήματα εξασφαλίζουν.

Εφόσον είναι δυνατή η δημιουργία ενός συστήματος με τα ανωτέρω χαρακτηριστικά, οι δυνατότητες των ROV και των βραχιόνων, όσον αφορά στο χειρισμό αντικειμένων, θα βελτιωθούν σημαντικά, δίνοντας χώρο στα μέλη του εργαστηρίου για την εκτέλεση διαφορετικών και συνθετότερων πειραμάτων και την ενσωμάτωση πληρέστερων σχημάτων ελέγχου, εγγύτερων σε ρεαλιστικές εφαρμογές.

Καταρχάς, ήδη σε σύγκριση με τα δύο συστήματα της εικόνας 2, η χρήση ενός στοιχείου δράσης που μπορεί να αναρτηθεί στο άκρο των βραχιόνων, αυξάνει δραματικά το πεδίο δράσης των ROV. Παράλληλα, μέσω της αίσθησης «αφής» (είτε ποιοτική είτε ποσοτική) δίνεται η δυνατότητα συγκράτησης αντικειμένων με μεγαλύτερη ακρίβεια, χωρίς την πιθανότητα πρόκλησης φθοράς ή καταστροφής τους. Σε κάποιο βαθμό, είναι δυνατή επίσης η προσαρμογή σε εξωτερικές διαταραχές, αν υποθεθεί ποσοτική αίσθηση «αφής».

Αν το σύστημα ελέγχεται τοπικά από κάποια λογική μονάδα (π.χ. έναν μικροελεγκτή), όλες οι εντολές προς τα υποσυστήματα μπορούν να κωδικοποιηθούν σε μορφή υψηλού επιπέδου, προς διευκόλυνση του χρήστη. Η χρήση ενός τέτοιου «ενδιάμεσου» θα επιτρέπει την αποδέσμευση της λειτουργίας του στοιχείου δράσης από τις ενέργειες που επιθυμεί να εκτελέσει ο χρήστης και, συνεπακόλουθα, την κατάστροψη σχημάτων ελέγχου σε υψηλότερο επίπεδο. Μια λογική μονάδα μπορεί ακόμη να χρησιμοποιηθεί ως μονάδα συλλογής, επεξεργασίας και αποστολής δεδομένων από πολλαπλούς αισθητήρες που μπορούν να ενσωματωθούν στο μηχανισμό.

Η ύπαρξη μιας κάμερας με οπτικό πεδίο στο χώρο εργασίας του στοιχείου δράσης μπορεί να διευκολύνει την προσέγγιση του αντικειμένου και την τοποθέτηση των επιφανειών συγκράτησης με κατάλληλο τρόπο, ώστε η συγκράτηση να είναι η βέλτιστη δυνατή. Αντίστοιχα πλεονεκτήματα ισχύουν και για την εναπόθεση του αντικειμένου κατά την ολοκλήρωση της διαδικασίας χειρισμού. Εφόσον η κάμερα μάλιστα διαθέτει ικανή πηγή φωτός, μπορεί κανείς να ισχυριστεί την εφαρμογή των παραπάνω και σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού ή (σχετικά) μειωμένης καθαρότητας του νερού.

Τέλος, με την ενσωμάτωση του χαρακτηριστικού της ενδοτικότητας, τόσο το σύστημα όσο και η λειτουργία της συγκράτησης μπορούν να γίνουν πιο ανθεκτικά κι αξιόπιστα σε εξωτερικές διαταραχές, όπως σφάλματα ή ανακρίβειες στην τοποθέτηση του βραχίονα ή του οχήματος, συγκρούσεις κ.α. Σημαντικό είναι επίσης το πλεονέκτημα σε εφαρμογές συνεργατικής μεταφοράς αντικειμένων, όπου τα προαναφερθέντα προβλήματα αναμένονται εντονότερα.

Ωστόσο πρέπει κανείς να αναλογιστεί το χρόνο και το κόστος εξέλιξης ενός τέτοιου συστήματος, σε σύγκριση με τη διαθεσιμότητα (ή μη) έτοιμων συστημάτων που καλύπτουν τις ζητούμενες προδιαγραφές, είτε σε εμπορικό είτε σε εργαστηριακό επίπεδο. Για τα μεν το κόστος κτήσης ίσως να αντισταθμίζει το χρόνο και το κόστος εξέλιξης ενός συστήματος εκ του μηδενός, προσφέροντας τη δυνατότητα άμεσης χρήσης σε πειράματα, αυξημένη αξιοπιστία και πιθανόν παροχή τεχνικής υποστήριξης ή και εγγύησης λειτουργίας. Για τα δε, αν και κατά πάσα πιθανότητα δεν θα ισχύουν τα τελευταία στοιχεία (τεχνική υποστήριξη, εγγύηση λειτουργίας), το κόστος μπορεί να περιοριστεί μόνο στην αγορά τεχνικών σχεδίων, την προμήθεια υλικών και στο χρόνο επεξεργασίας και συναρμολόγησης, διατηρώντας το χαρακτηριστικό της λειτουργικότητας και της αξιοπιστίας (υπό την έννοια ότι δεν εξελίσσεται ένα σύστημα από το μηδέν, αλλά είναι σε κάποιο βαθμό δοκιμασμένο).

Όσον αφορά λοιπόν στο πρώτο είδος (εμπορικά προϊόντα), υπάρχουν κάποια διαθέσιμα συστήματα, όπως για παράδειγμα τα:

- SEAMOR Dual Function Gripper (<https://seamor.com/products/dual-function-gripper/>)
- Newton Subsea Gripper (<https://bluerobotics.com/store/rov/bluerov2-accessories/newton-gripper-asm-r1-rp/>)
- Blueprintlab Subsea Grabber (<https://blueprintlab.com/products/rotating-grabber/>),

όπως και τα δύο μοντέλα που υπάρχουν στο εργαστήριο. Είναι αρκετά σύνηθες ωστόσο τα τελικά στοιχεία δράσης να πωλούνται σε συνδυασμό με ολοκληρωμένα συστήματα βραχιόνων, όπως για παράδειγμα αυτά της Eca robotics (<https://www.ecagroup.com/en/solutions/subsea-electrical-manipulator-arms>) και πληθώρα άλλων, τα οποία στην πλειοψηφία τους είναι επενεργούμενα με υδραυλικά μέσα (π.χ. <http://www.hydro-lek.com/manipulators.php>).

Στο σύνολό τους σχεδόν όλα τα εμπορικά συστήματα είναι σχεδιασμένα για χρήση σε ανοικτή θάλασσα και μεγάλα βάθη, με στιβαρή αλλά αυξημένης μάζας κατασκευή και υψηλό κοστολόγιο. Επίσης, σχεδόν από όλα απουσιάζει η αίσθηση της επαφής ή της ασκούμενης δύναμης με άμεσο τρόπο (πιθανόν να υπολογίζεται έμμεσα από το μοντέλο του συστήματος, παρακολουθώντας τη ροή ενέργειας στον εκάστοτε επενεργητή). Μια εκτενής αναφορά στα διαθέσιμα συστήματα μπορεί να αναζητηθεί στο άρθρο “*Underwater manipulators: A review*”, του περιοδικού Ocean Engineering¹.

Αντιθέτως, στο πεδίο των συστημάτων που αναπτύσσονται από ερευνητικά ιδρύματα, υπάρχουν παραδείγματα τελικών στοιχείων δράσης που ενσωματώνουν αισθητήρες ανίχνευσης της αφής και της ασκούμενης δύναμης. Ένα παράδειγμα είναι το σύστημα “SeeGrip Manipulator” του ιδρύματος DFKI Robotics Innovation Center (<https://robotik.dfki-bremen.de/en/research/robot-systems/seegrip-manipulator.html>), το οποίο διαθέτει επτά βαθμούς ελευθερίας και πολυάριθμους αισθητήρες αφής. Ένα άλλο, παλαιότερο σύστημα με πολλαπλούς βαθμούς ελευθερίας και αισθητήρες ενσωματωμένους στα «δάκτυλα» του στοιχείου δράσης είναι το “HEU Hand II”, μια περιγραφή του οποίου γίνεται στο άρθρο “*Dexterous Underwater Robot Hand: HEU Hand II*” της IEEE². Αισθητήρες αφής ενσωματώνονται και στους grippers των προγραμμάτων AMADEUS και TRIDENT. Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει ο σχεδιασμός του συστήματος “Red Sea Hand”, το οποίο χρησιμοποιεί οπτικούς αισθητήρες³. Δυστυχώς, τα συστήματα αυτά είναι αρκετά συνθετότερα από το ζητούμενο, καθιστώντας ιδιαίτερα δύσκολη την αναπαραγωγή τους, πολλώ δε μάλλον των αισθητήρων.

Μια εντελώς διαφορετική προσέγγιση που μοιάζει να ενδιαφέρει την κοινότητα και αξίζει ίσως αναφοράς είναι τα συστήματα με ευέλικτες επιφάνειες συγκράτησης (“soft/flexible/compliant grippers”). Στα συστήματα αυτά οι τυπικές άκαμπτες επιφάνειες συγκράτησης (είτε αρθρωτές είτε όχι), αντικαθίστανται από ελαστικά υλικά, τα οποία, με παθητικό ή ενεργητικό τρόπο, τείνουν να «αγκαλιάσουν» το αντικείμενο προς χειρισμό, εξασφαλίζοντας συχνά καλύτερη επαφή και αποφυγή τυχόν φθοράς σε αυτό. Υπάρχουν ποικίλα άρθρα που αναφέρονται σε αυτό τον τύπο στοιχείων δράσης. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι επιφάνειες που βασίζονται στο φαινόμενο “Fin-Ray”, μια εφαρμογή του οποίου μπορεί να αναζητηθεί στην ιστοσελίδα της εταιρίας Festo⁴.

¹ Vol. 163, 1 September 2018, σελίδες 431-450

² <https://ieeexplore.ieee.org/document/4026307>

³ Το γενικότερο project μπορεί να αναζητηθεί στην ιστοσελίδα <http://bdml.stanford.edu/Main/KaustRedSea>, ενώ η μέθοδος μέτρησης αναπτύσσεται στο άρθρο “*Force Sensing with Compliant Joints*”, των Leif P. Jentoft και Robert D. Howe.

⁴ <https://www.festo.com/group/en/cms/10221.htm>

Γίνεται εμφανές ότι, αν και συστήματα υπάρχουν, οι ιδιότητες τους είναι σε διαφορετικό επίπεδο από το ζητούμενο του εργαστηρίου: είτε από άποψη μάζας/όγκου είτε από άποψη κόστους είτε από άποψη πολυπλοκότητας. Αν και υπάρχουν εφαρμογές τελικών στοιχείων δράσης ενός βαθμού ελευθερίας, οι οποίες ενσωματώνουν απλούστερες διατάξεις αισθητήρων, με χαμηλή μάζα και όγκο, δεν διαθέτουν το χαρακτηριστικό της προστασίας από νερό σε λειτουργία υπό βύθιση. Σε αυτό το πλαίσιο βρίσκει θέση το σύστημα της εργασίας, ο σχεδιασμός του οποίου γίνεται σε προσπάθεια να ικανοποιήσει τις ιδιότητες που αναφέρθηκαν στην αρχή του κεφαλαίου.

Πρώτο απ' όλα, υιοθετώντας εσωτερικές του εργαστηρίου μεθόδους κατασκευής (3D-printing, CNC-milling), είναι δυνατός ο σχεδιασμός ώστε να εξασφαλίζεται εξ αρχής η συμβατότητα με τους υπάρχοντες βραχίονες. Επίσης, χρησιμοποιώντας αυτά τα μέσα κατασκευής κι επιλέγοντας και τα υπόλοιπα δομικά μέρη με αντίστοιχη φιλοσοφία, το κόστος περιορίζεται πρακτικά στο κόστος κτήσης των υλικών.

Τα χαρακτηριστικά αυτά βεβαίως επεκτείνονται και στο σύνολο των στοιχείων του μηχανισμού, τα οποία μπορούν να επιλεγθούν και να σχεδιαστούν με τρόπο που να ικανοποιούν τις ειδικές ανάγκες του εργαστηρίου, όπως για παράδειγμα:

- Η τροφοδοσία
- Το πρωτόκολλο επικοινωνίας με τον χρήστη
- Το μέγιστο πλάτος και η μέγιστη δύναμη συγκράτησης
- Ο όγκος και η μάζα του συστήματος (σε κάποιο βαθμό)

Κάνοντας χρήση των απλούστερων αισθητήρων «δύναμης» (επίπεδες αντιστάσεις, μεταβλητές με την ασκούμενη δύναμη) το σύστημα λήψης και επεξεργασίας τιμών για την ασκούμενη δύναμη διατηρείται εξαιρετικά απλό, πλην όμως χρηστικό.

Ακόμη, αν και το κύριο σχήμα ελέγχου που χρησιμοποιείται αφορά στον έλεγχο της δύναμης, ο επενεργητής διαθέτει αισθητήρα μετατόπισης (rotary encoder), ο οποίος δυνητικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον έλεγχο της θέσης ή της ταχύτητας των επιφανειών συγκράτησης, αυξάνοντας τις δυνατότητες στο σύστημα.

Τέλος, η ενσωμάτωση του οπτικού συστήματος και του χαρακτηριστικού της ενδοτικότητας (στη βάση του μηχανισμού), αν και εντελώς βασικά, προσδίδουν στη λειτουργικότητα του συστήματος και την επέκταση των δυνατοτήτων του.

Συνολικά, το αποτέλεσμα που συντίθεται είναι σε αρκετά πρώιμο στάδιο και χρίζει διαφόρων βελτιώσεων. Ωστόσο καλύπτει ικανοποιητικά τις ανάγκες του εργαστηρίου, με χαμηλό κόστος, ενώ εξασφαλίζει τη δυνατότητα συντήρησης ή και εξέλιξης από τα ίδια τα μέλη του, καθώς το σύνολο της πληροφορίας για το σχεδιασμό και την κατασκευή του είναι διαθέσιμο.

Όσον αφορά στη δομή του κειμένου που ακολουθεί, έχει ως εξής:

Στο *πρώτο κεφάλαιο* της εργασίας διατυπώνονται οι προδιαγραφές που ορίστηκαν για το σύστημα, από τις ιδιότητες του μηχανισμού έως τη διασύνδεσή του με το χρήστη και τα παρελκόμενα στοιχεία.

Στο *δεύτερο κεφάλαιο* γίνεται η περιγραφή της σχεδιαστικής διαδικασίας και των μερών του μηχανισμού, με σκοπό την αιτιολόγηση των επιλογών και των λύσεων που υιοθετήθηκαν στην ανάπτυξή των μερών του.

Το σύνολο του ηλεκτρολογικού υλικού, καθώς και του λογισμικού ελέγχου, περιγράφεται σε τεχνικό επίπεδο στο *τρίτο κεφάλαιο*. Επίσης γίνεται προσπάθεια αιτιολόγησης των διαφόρων επιλογών.

Στο *τέταρτο κεφάλαιο* περιγράφονται οι διαδικασίες που αφορούν στη βαθμονόμηση των αισθητήρων, την επιλογή των παραμέτρων του σχήματος ελέγχου και τον έλεγχο της στεγανότητας του μηχανισμού υπό βύθιση.

Στο *πέμπτο κεφάλαιο* γίνεται μία αποτίμηση των αποτελεσμάτων, περιγράφονται οι αδυναμίες του συστήματος και προτείνονται ιδέες για την περαιτέρω βελτίωση κι εξέλιξή του.

Στο τέλος της εργασίας παρατίθεται μια σειρά από βοηθητικά *παραρτήματα*, όπου δίνονται:

- στο παράρτημα Α τα τεχνικά σχέδια όλων των υποσυστημάτων, ανά ενότητα
- στο παράρτημα Β οδηγίες για τις συνδεσμολογίες του ηλεκτρολογικού υλικού
- στο παράρτημα Γ οδηγίες για την κατασκευή των μερών, ανά μέθοδο
- στο παράρτημα Δ οδηγίες για την συναρμολόγηση των μερών, ανά ενότητα
- στο παράρτημα Ε μια αναλυτική σχέση της γωνίας στροφής του επενεργητή και του πλάτους ανοίγματος των επιφανειών συγκράτησης
- στο παράρτημα Στ ένα ενδεικτικό κοστολόγιο
- στο παράρτημα Ζ κατάλογος όλων των αρχείων (πολυμέσα, αρχεία CAD κ.λπ.) που συνοδεύουν την εργασία.

1 Τεχνική περιγραφή του προβλήματος

Οι προδιαγραφές που ορίστηκαν ως συνεπακόλουθο των αναγκών και των συνθηκών που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, ήταν ως επί των πλείστων ποιοτικές, αφήνοντας έτσι μεγάλη ελευθερία στο σχεδιασμό, τη χρήση μεθόδων και υλικών κατασκευής. Ένα ακόμη στοιχείο που δικαιολογεί αυτή την οπτική ήταν οι αρχικές γνώσεις και δεξιότητες του γράφοντος κατά την ανάληψη της εργασίας.

Οι προδιαγραφές αυτές συνοψίζονται στην ακόλουθη λίστα και αναλύονται περαιτέρω στη συνέχεια.

- Χαμηλή μάζα, τάξης λίγων εκατοντάδων γραμμαρίων (εκτός νερού)
- Συμβατότητα με τους υπάρχοντες βραχίονες (συναρμολόγηση, κινητικότητα)
- Μέγιστο πλάτος συγκράτησης περίπου 50 mm
- Μέγιστη μάζα συγκράτησης, τάξης μερικών εκατοντάδων γραμμαρίων
- Ενσωμάτωση αισθητηρίων, κατ' ελάχιστο, ανίχνευσης της επαφής με το αντικείμενο προς χειρισμό – ιδανικά, καταγραφής της ασκούμενης δύναμης στο αντικείμενο
- Ενσωμάτωση ενός ή και δύο οπτικών μέσων (cameras), ανάλογα με την ικανότητα κάλυψης του πεδίου δράσης
- Σχετικά γρήγορη μεταβολή κατάστασης συγκράτησης ($\Delta t_{open-to-close} \leq 2s$)
- Ενσωμάτωση κάποιου βαθμού παθητικής ενδοτικότητας (compliance)
- Τροφοδοσία από εξωτερική πηγή
- Έλεγχος λειτουργίας (high-level) από εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή (H/Y)
- Η υψηλότερη δυνατή προστασία των ευαίσθητων μερών από την επαφή με το νερό.

1.1 Προδιαγραφή 1: Συμβατότητα με τους υπάρχοντες βραχίονες

Το ζήτημα της συμβατότητας μπορεί να αναλυθεί σε δύο υποκατηγορίες:

- 1) Κινηματική-δυναμική⁵ συμβατότητα
- 2) Συμβατότητα συναρμογής

Δεδομένου ότι οι υπάρχοντες βραχίονες είναι αρκετά ελαφρές κατασκευές από άποψη μάζας, στιβαρότητας και ικανότητας χειρισμού φορτίων, η μάζα και οι διαστάσεις του στοιχείου δράσης θα έπρεπε επίσης να διατηρηθούν σε σχετικά χαμηλά επίπεδα. Μια αρχική χονδροειδής εκτίμηση ήταν μάζα της τάξεως των 100 g με 200 g (εκτός νερού):

$$m_{ee_target_net} \in \sim (100,200) g$$

Οι διαστάσεις του βραχίονα εμφανίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

⁵Με την ποιοτική έννοια των όρων.

TABLE I
DENAVIT-HARTENBERG PARAMETERS OF THE ROBOTIC ARM

Link	d_i	θ_i	a_i	α_i
1	L_1	q_1	0	$-\frac{\pi}{2}$
2	0	$q_2 - \frac{\pi}{2}$	L_2	0
3	0	$q_3 + \frac{\pi}{2}$	$-L_3$	$\frac{\pi}{2}$
4	L_4	q_4	0	0

TABLE II
PARAMETERS OF THE ROBOTIC ARM

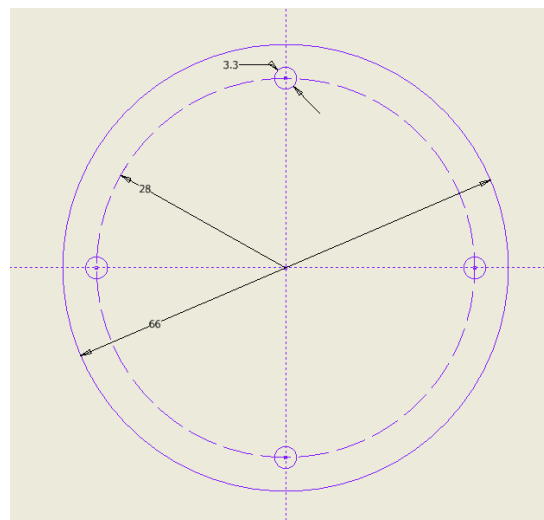
Parameter	Value	Unit
Link 1 Length(L_1)	0.077	m
Link 2 Length(L_2)	0.147	m
Link 3 Length(L_3)	0.028	m
Link 4 Length(L_4)	0.075	m
Link 1 Mass	0.1	kg
Link 2 Mass	0.2	kg
Link 3 Mass	0.1	kg
Link 4 Mass	0.12	kg
Link Diameter	0.06	m

Εικόνα 1.2 - Οι παράμετροι του κινηματικού μοντέλου και οι μάζες των συνδέσμων του βραχίονα.

Αναλυτική μελέτη για την κινηματική ή τη δυναμική του συστήματος [βραχίονας, τελικό στοιχείο δράσης] δεν ζητήθηκε.

Αν και δεν ορίστηκε ρητά, ένας επιπλέον στόχος ήταν το συνολικό σύστημα του τελικού στοιχείου δράσης να έχει *ουδέτερη* ή *ελαφρά θετική* πλευστότητα.

Όσον αφορά τη συμβατότητα συναρμογής, το βασικότερο στοιχείο ήταν η δυνατότητα προσάρτησης του στοιχείου δράσης στη βάση που βρισκόταν στο άκρο του βραχίονα. Ενδεικτικά, οι διαστάσεις αυτής της βάσης φαίνονται στην ακόλουθη εικόνα. Σημειώνονται και οι διαθέσιμες σπές για τυχόν βίδες στερέωσης.



Εικόνα 1.3 - Οι διαστάσεις της προϋπάρχουσας βάσης στο άκρο του βραχίονα.

1.2 Προδιαγραφή 2: Μέγιστο πλάτος ανοίγματος

Η συνθήκη που τέθηκε ήταν η ικανότητα χειρισμού αντικειμένων μέγιστου πλάτους 50 mm. Επιτρέποντας ένα περιθώριο 5 mm, ώστε να είναι δυνατή η τοποθέτηση των επιφανειών συγκράτησης γύρω από το αντικείμενο, ορίζεται ως μέγιστο πλάτος ανοίγματος το διάστημα:

$$S_{open-to-close} = 60 \text{ mm}$$

Επίσης, για το πλάτος των ίδιων των επιφανειών συγκράτησης ορίστηκε η τιμή 20 mm.

1.3 Προδιαγραφή 3: Μέγιστη μάζα συγκράτησης

Ως μέγιστο φορτίο ορίστηκε μάζα περί τα 500 g (εκτός νερού).

Ενδεικτικά, η πυκνότητα ενός τέτοιου υποθετικού σώματος, με την υπόθεση κυβικής γεωμετρίας ακμής 50 mm προκύπτει ίση με 4000 kg/m^3 , ενώ με σφαιρική γεωμετρία αντίστοιχης διαμέτρου περίπου ίση με 7600 kg/m^3 . Σε συνθήκες ισορροπίας εντός νερού (όχι στον πυθμένα), το φαινόμενο βάρος θα ήταν ίσο με 3.7 N και 4.3 N αντίστοιχα.

Σε συνδυασμό με μια εκτίμηση του συντελεστή τριβής μεταξύ των επιφανειών συγκράτησης και του αντικειμένου, τα μεγέθη αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μία εκτίμηση της (μέγιστης) επιθυμητής δύναμης συγκράτησης.

1.4 Προδιαγραφή 4: Αισθητήρια επαφής/ασκούμενης δύναμης

Η προσθήκη αισθητήρων για την ανίχνευση της επαφής ή, ιδανικά, και της ασκούμενης δύναμης στο αντικείμενο κρίθηκε αναγκαία για την εξυπηρέτηση δύο σκοπών:

- 1) Την αποτελεσματικότερη συγκράτηση των αντικειμένων προς χειρισμό
- 2) Την αποτελεσματικότερη ολοκλήρωση των δύο μεταβατικών διεργασιών στην λειτουργία του στοιχείου δράσης (σύσφιξη και αποσύσφιξη αντικειμένου)

Δεδομένης αυτής της πληροφορίας είναι εν γένει δυνατός ο σχεδιασμός νόμου ελέγχου, που θα διέπει το σύνολο του κύκλου λειτουργίας, κάτι που σε αντίθετη περίπτωση θα μπορούσε να γίνει μόνο ποιοτικά και μόνο με οπτικά μέσα.

1.5 Προδιαγραφή 5: Οπτικό μέσο (camera)

Η προδιαγραφή αυτή τέθηκε αφενός διότι πολλά από τα ερευνητικά αντικείμενα του εργαστηρίου περιλαμβάνουν τεχνικές Machine Vision, αφετέρου γιατί ο μηχανισμός (όπως και τα ROV) δεν είναι αυτόνομα συστήματα.

Η ύπαρξη ενός οπτικού μέσου θα μπορεί να λειτουργεί συνεπικουρικά με τους αισθητήρες αφής⁶ στην κατάσπρωση νόμων ελέγχου για το σύνολο των διαδικασιών των πειραμάτων.

Αναλόγως της ικανότητας κάλυψης του χώρου στο οποίο τοποθετείται το αντικείμενο προς χειρισμό, ορίστηκε η πιθανότητα να χρειαστούν δύο οπτικά μέσα. Η ικανότητα αυτή διέπεται από τις γωνίες θέασης⁷ του φακού που χρησιμοποιείται στο οπτικό μέσο.

Τέλος, ενώ δεν δόθηκε κάποια επιπλέον προδιαγραφή ως προς την ποιότητα της εικόνας (α της ανάλυσης του αισθητήρα του οπτικού μέσου), θεωρήθηκε ως ελάχιστη η συνήθης ανάλυση $640 \times 480 \text{ pixels}$, με συχνότητα 30 fps .

Σημειώνεται ότι καθοριστικός παράγοντας αποδείχθηκε και η ικανότητα αναγνώρισης/ανάγνωσης του οπτικού μέσου στο πακέτο λογισμικού Robot Operating System (ROS, εκδ. 18) κάτι που μοιάζει να μην ισχύει για κάποια ανώνυμα, χαμηλού κόστους οπτικά μέσα.

1.6 Προδιαγραφή 6: Ταχύτητα μεταβολής κατάστασης συγκράτησης

Αν και σχετικά ήσσονος σημασίας, η παράμετρος αυτή ορίστηκε για την συνολικά καλύτερη εμπειρία χρήσης του μηχανισμού και την αύξηση της παραγωγικότητας του. Ως συνθήκη για το χρονικό διάστημα που απαιτείται για μετακίνηση από την πλήρως ανοικτή στην πλήρως κλειστή θέση τέθηκε η εξής:

$$\Delta t_{open-to-close} \leq 2 \text{ s}$$

Λαμβάνοντας υπ' όψιν την προδιαγραφή 2 (μέγιστο πλάτος ανοίγματος) και αμελώντας τους χρόνους επιτάχυνσης-επιβράδυνσης, η απαιτούμενη γραμμική ταχύτητα της επιφάνειας συγκράτησης υπολογίζεται :

$$u_{grip_linear} \geq \frac{S_{open-to-close}}{\Delta t_{open-to-close}} = \frac{60}{2} = 30 \text{ mm/s} \text{ ή } 0.03 \text{ m/s}$$

Η ταχύτητα αυτή θα χρησιμοποιηθεί και στην επιλογή των λόγων μετάδοσης, όπως θα περιγραφεί στο επόμενο στο κεφάλαιο.

1.7 Προδιαγραφή 7: Παθητική ενδοτικότητα

Το χαρακτηριστικό της ενδοτικότητας ζητήθηκε ως μέτρο προσαρμογής του στοιχείου δράσης σε εξωτερικά ασκούμενες δυνάμεις. Τέτοιες δυνάμεις μπορεί να οφείλονται για παράδειγμα σε λανθασμένη ή ανακριβή τοποθέτηση σε σχέση με το αντικείμενο προς χειρισμό, διαταραχές/μεταβολές της θέσης ή του προσανατολισμού του αντικειμένου σε συνθήκες συνεργατικής μεταφοράς, την απροσδόκητη επαφή με τρίτα σώματα, διαταραχές στο μέσο στο οποίο βυθίζεται το όχημα και άλλα.

⁶ Υπό τη γενική έννοια της ανίχνευσης επαφής και ασκούμενης δύναμης.

⁷ Angle of View, με εναλλακτικό τον γενικότερο όρο Field of View

Θεωρήθηκε ότι το πρακτικότερο σημείο για την ενσωμάτωση αυτού του χαρακτηριστικού θα ήταν το σημείο σύνδεσης του στοιχείου δράσης στο βραχίονα.

Και πάλι δεν δόθηκε κάποια ποσοτική συνθήκη, ούτε ορίστηκε η ανάγκη αναλυτικής περιγραφής σε αυτό το πλαίσιο. Αν κάποιες τέτοιες συνθήκες μπορούσαν να προκύψουν διαισθητικά, αυτές θα ήταν ίσως οι εξής:

- ικανότητα στροφής γύρω από τον άξονα της τελευταίας στροφικής άρθρωσης του βραχίονα (ο κάθετος στο επίπεδο σύνδεσης) κατά 15 – 20 μοίρες
- ικανότητα κατακόρυφης απόκλισης από τον ίδιο άξονα κατά 5 – 10 μοίρες.

1.8 Προδιαγραφή 8: Ηλεκτρική τροφοδοσία & έλεγχος λειτουργίας

Τόσο η ηλεκτρική τροφοδοσία του συστήματος, όσο και ο έλεγχος της λειτουργίας του δεν θα μπορούσαν να γίνουν από το όχημα στο οποίο εγκαθίσταται ή από την γραμμή (tether) που χρησιμοποιείται γι' αυτό - το ίδιο ίσχυε και για τους βραχίονες. Η μεν τροφοδοσία θα έπρεπε να γίνει μέσω εξωτερικής πηγής (τροφοδοτικό Η/Υ), με τάση +12V :

$$V_{supply} = +12 V$$

ο δε έλεγχος λειτουργίας μέσω εξωτερικού Η/Υ και κάποιου συνήθη διαύλου επικοινωνίας (USB, RS232).

Οι δίαυλοι αυτοί δεν είναι οι πλέον πρακτικοί από άποψη αριθμού απαιτούμενων καλωδίων -ιδιαιτέρα για την εξυπηρέτηση πολλαπλών συσκευών-, σε αντίθεση π.χ. με τον δίαυλο CAN⁸. Οστόσο είναι ιδιαίτερα διαδεδομένοι και σχετικά εύχρηστοι. Δεδομένου μάλιστα ότι η ανάπτυξη του γενικότερου συστήματος είναι στο πλέον πρώιμο στάδιο, θα ήταν δυνατόν να επωφεληθεί κανείς από ευρέως χρησιμοποιούμενα, ολοκληρωμένα υποσυστήματα (development boards, cameras κ.α.), τα οποία χρησιμοποιούν συνήθως ακριβώς αυτούς τους διαύλους.

1.9 Προδιαγραφή 9: Προστασία από επαφή με το νερό

Τέλος, σχετικά με την αξιόπιστη λειτουργία εντός νερού, ως κριτήριο έπρεπε να ληφθεί η μέγιστη πιθανή διάρκεια ενός πειράματος. Η παράμετρος αυτή μπορεί να χωριστεί

- στο μέγιστο χρόνο παραμονής των ROV εντός της πισίνας και
- στο μέγιστο χρονικό διάστημα πριν την ολοκλήρωση μιας πειραματικής διαδικασίας, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει πολλαπλούς κύκλους εντός-εκτός πισίνας.

Το πρώτο χρονικό διάστημα – έστω υπό το συμβολισμό $\Delta t_{underwater}$ – είναι καθοριστικής σημασίας για την αξιόπιστη λειτουργία του μηχανισμού. Είναι προφανές ότι, για το σύνολο αυτού του χρονικού διαστήματος, δεν θα πρέπει να υπάρχει καμία δυσλειτουργία από την επαφή με το νερό σε κατάσταση βύθισης.

⁸ Για περισσότερες πληροφορίες : https://en.wikipedia.org/wiki/CAN_bus

Ο χρόνος αυτός ορίστηκε εμπειρικά σε περίπου 30 λεπτά :

$$\Delta t_{underwater} \sim 30 \text{ min}$$

Το δεύτερο χρονικό διάστημα – έστω $\Delta t_{experiment}$ – σχετίζεται με την αξιόπιστη λειτουργία του μηχανισμού, αλλά έμμεσα. Στον αρχικό σχεδιασμό συμπεριλήφθηκε η πιθανότητα να χρειαστούν ενδιάμεσες περίοδοι συντήρησης του μηχανισμού (στέγνωμα & έλεγχος), εφόσον αυτό θα ήταν αναγκαίο. Έτσι στα πλαίσια του συνολικού χρόνου ενός πειράματος, θα έπρεπε να υπάρχει η δυνατότητα πρόσβασης σε τυχόν ευάλωτα μέρη, με όσο το δυνατόν ευκολότερη και ταχύτερη αποσυναρμολόγηση/συναρμολόγηση και το μικρότερο δυνατό κίνδυνο βλάβης ή ζημιάς από αυτή τη διαδικασία.

Επίσης εμπειρικά, ο χρόνος αυτός ορίστηκε σε περίπου 4 ώρες :

$$\Delta t_{experiment} \sim 4 \text{ h}$$

Για το συστηματικό χαρακτηρισμό του βαθμού προστασίας για περιβλήματα (enclosures) χρησιμοποιείται ο κωδικός **IP** κατά το πρότυπο EN (ή IEC) 60529⁹, ο οποίος χαρακτηρίζεται από 2 κύρια αριθμητικά ψηφία και δύο προαιρετικά:



Εικόνα 1.4 - Ψηφία στον κωδικό προστασίας IP.

Το πρώτο αριθμητικό ψηφίο αφορά στην προστασία από δυνητικά επικίνδυνα υλικά, βάσει διαστάσεων (π.χ. σκόνη). Το δεύτερο ψηφίο αφορά στην προστασία από την εισροή νερού, βάσει του χρόνου έκθεσης και της ποσότητας του ύδατος. Τα δύο επίπεδα στα οποία εμπίπτουν οι χρόνοι που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι το **7** και το **8**, τα οποία αφορούν σε συνθήκες προσωρινής και συνεχούς βύθισης αντίστοιχα και ορίζονται ως εξής:

⁹ Όλες οι πληροφορίες που ακολουθούν μέχρι το τέλος του υποκεφαλαίου προέρχονται από την ιστοσελίδα https://en.wikipedia.org/wiki/IP_Code σε ελεύθερη μετάφραση.

Επίπεδο	Προστασία από	Αποτελεσματικό σε	Λεπτομέρειες δοκιμής
7	Βύθιση, έως 1 m βάθος	Εισροή νερού σε επιβλαβή ποσότητα δεν θα είναι δυνατή, ενόσω το περίβλημα θα είναι βυθισμένο σε νερό, υπό ορισμένες συνθήκες πίεσης και χρόνου (βύθιση έως 1 m).	Διάρκεια δοκιμής: 30 min. Δοκιμή με το χαμηλότερο σημείο του περιβλήματος 1000 mm κάτω από την επιφάνεια του νερού ή το υψηλότερο σημείο 150 mm κάτω από την επιφάνεια - το βαθύτερο εκ των δύο.
8	Βύθιση, 1 m βάθος ή περισσότερο	Το περίβλημα είναι κατάλληλο για συνεχή βύθιση σε νερό, υπό συνθήκες οριζόμενες από τον κατασκευαστή. Ωστόσο, για συγκεκριμένους τύπους περιβλημάτων, σημαίνει ότι είναι πιθανή η εισροή νερού, αλλά με τρόπο που δεν έχει επιβλαβείς συνέπειες. Το βάθος και η διάρκεια της δοκιμής αναμένονται μεγαλύτερα από τις συνθήκες του επιπέδου IPx7, και άλλου είδους επιδράσεις μπορούν να προστεθούν, όπως κύκλοι θέρμανσης-ψύξης πριν τη βύθιση.	Διάρκεια δοκιμής: οριζόμενη από κατασκευαστή Βάθος οριζόμενο από κατασκευαστή, γενικά έως 3 m

Πίνακας 1.1 - Κατηγορίες προστασίας IPx7 και IPx8.

2 Σχεδιασμός, Ανάπτυξη & Περιγραφή του Μηχανισμού

2.1 Εισαγωγή στη σχεδιαστική διαδικασία

Είναι ωφέλιμο να γνωρίζεις κανείς τις υπάρχουσες λύσεις πριν αντιμετωπίσει ένα πρόβλημα. Μελετώντας τις προσεγγίσεις που έχουν οδηγήσει κάποιους άλλους σε (μερική ή ολική) λύση ίσως μοιάζει με αντιγραφή, αλλά αν γίνει με ελευθερία σκέψης και αναλυτικό πνεύμα μπορεί να αποδειχθεί εποικοδομητικό: αφενός κερδίζεται χρόνος στην αναγνώριση τυχόν εμποδίων, αφετέρου μπορεί να οδηγήσει σε μια καλύτερη λύση, προσαρμοσμένη στις «τοπικές» ιδιαιτερότητες και περιορισμούς του προβλήματος.

Βάσει των προδιαγραφών που ορίστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, ξεκίνησα μια αναζήτηση για τη συλλογή όσο το δυνατόν περισσότερων σχετικών πληροφοριών. Δυστυχώς, ο αριθμός των συστημάτων που προορίζονται για υποβρύχια χρήση είναι αρκετά περιορισμένος, έτσι οι πηγές μου αφορούσαν κυρίως σε μηχανισμούς για «κανονική» χρήση.

Σε ακαδημαϊκό επίπεδο υπάρχουν για σημαντικά μεγάλο διάστημα (από την δεκαετία του 2000 ή και νωρίτερα) διάφορα projects που ασχολούνται με τον τομέα του “underwater manipulation”, αλλά, επίσης δυσανάλογα μικρή βιβλιογραφία που να εξετάζει τον σχεδιασμό εκ του μηδενός, τις δυσκολίες και τις λύσεις σε καίρια ζητήματα, όπως για παράδειγμα η αδιαβροχοποίηση.

Νομίζω ότι η έλλειψη αυτή και η στροφή προς τους μη υποβρύχιους μηχανισμούς για αναζήτηση έμπνευσης, αποδείχθηκε χρήσιμη πρακτική. Οι τεχνολογίες που ενσωματώνονται σε αυτούς τους μηχανισμούς είναι σαφώς πιο ... πληθωρικές (ελλείπει ανάγκης αδιαβροχοποίησης, αν μη τι άλλο). Το γεγονός αυτό επιτρέπει την διοχέτευση της όποιας εφευρετικότητας και φαντασίας, περισσότερο στη μετατροπή τέτοιων τεχνολογιών σε υποβρύχιες ή στις ειδικές ανάγκες του προβλήματος, παρά στην εκ του μηδενός σύλληψη και ανάπτυξή τους - διαδικασία χρονοβόρα, κουραστική και συχνά απογοητευτική.

Μέσα από αυτή την διαδικασία αναζήτησης λοιπόν, κι έχοντας κατά νου τα ζητούμενα του δικού μου συστήματος, έκανα τις εξής ποιοτικές διακρίσεις μεταξύ διαφόρων συστημάτων τελικών στοιχείων δράσης:

- κατασκευές ακαδημαϊκού/ερασιτεχνικού προσανατολισμού <> κατασκευές βιομηχανικού προσανατολισμού
- ένας βαθμός ελευθερίας <> πολλαπλοί βαθμοί ελευθερίας
- λειτουργία σε χαμηλές συνθήκες πίεσης (βάθη λίγων μέτρων) <> λειτουργία σε υψηλές συνθήκες πίεσης (βάθη πολλών δεκάδων ή εκατοντάδων μέτρων)
- κατασκευές από μεταλλικά υλικά (αλουμίνιο, ανοξείδωτο ατσάλι κ.α.) <> κατασκευές από πλαστικά υλικά
- χρήση servo motors ως βασικών επενεργητών <> χρήση DC motors + μετάδοσης ως βασικών επενεργητών ¹⁰ <> χρήση υδραυλικών επενεργητών

¹⁰ Προφανώς τα δύο είδη δεν διαφέρουν στη χρήση των DC motors ως μονάδων «επενέργησης». Ο διαχωρισμός έγκειται στο γεγονός ότι ένα servo αποτελεί μια κλειστή λύση, η οποία περιλαμβάνει τον επενεργητή, τη μετάδοση,

- χρήση επίπεδων επιφανειών συγκράτησης <> χρήση κοίλων επιφανειών συγκράτησης
- χρήση αισθητήρων «αφής» τύπου πίεσης <> τύπου strain gauge <> άλλου εξειδικευμένου ή πειραματικού τύπου αισθητήρες

Αναφέρω εδώ πως η πρότερη εμπειρία και οι γνώσεις μου στον τομέα της κατασκευής μηχανικών (ή μηχανοτρονικών στη συγκεκριμένη περίπτωση) συστημάτων ήταν περιορισμένη σε δημιουργίες οικιακού χαρακτήρα και έκτασης - το ακαδημαϊκό μου υπόβαθρο δεν είναι αυτό του μηχανικού. Η διαθεσιμότητα δύο 3D εκτυπωτών¹¹ στο Ε.Α.Ε. αποτέλεσε την σημαντικότερη επιρροή, τόσο στο σχεδιασμό όσο και την μέθοδο κατασκευής του ζητούμενου.

Σε δεύτερο στάδιο, μέσα από αυτές τις διακρίσεις έγινε ευκολότερο να αποφασίσω κάποιες κατευθύνσεις ως προς τις ακόλουθες παραμέτρους (μαζί με μια σύντομη περιγραφή των επιδράσεων τους):

⇒ *Η κατασκευή θα είναι ακαδημαϊκού χαρακτήρα.*

Η συνθήκη αυτή επιτρέπει (χωρίς ωστόσο να γίνεται δικαιολογία για) κάποιο βαθμό απόκλισης από το βέλτιστο σε πολυάριθμους τομείς, με τους βασικότερους, κατά τη γνώμη μου, να είναι:

- Η ευκολία & η ταχύτητα κατασκευής των μερών
- Η ευκολία & η ταχύτητα συναρμολόγησης/αποσυναρμολόγησης
- Η αποκλειστική χρήση ευρέως διαδεδομένων/τυποποιημένων συνθετικών στοιχείων
- Εν μέρει η διάρκεια του κύκλου λειτουργίας/συντήρησης
- Εν μέρει η διάρκεια ζωής των μερών
- Εν μέρει ο βαθμός εμπλοκής του τελικού χρήστη στις χαμηλού επιπέδου διεργασίες του μηχανισμού

⇒ *Οι βαθμοί ελευθερίας και οι συνθήκες υδροστατικής πίεσης αυτομάτως περιορίζονται από τις προδιαγραφές που ορίστηκαν νωρίτερα σε: έναν και $P_{υδρ} \leq 1.15 \text{ atm}$ ¹².*

Η συνθήκη αυτή υπαγορεύει τη χρήση ενός μόνο επενεργητή. Το δεύτερο σκέλος εξαλείφει επίσης την ανάγκη χρήσης μεταλλικών μερών σε αυτό το στάδιο ανάπτυξης, κάτι που οδηγεί στο εξής:

⇒ *Κύριο υλικό κατασκευής των μερών μπορούν να αποτελέσουν τα 3D-printed θερμοπλαστικά.*

κάποιου είδους αισθητήρα θέσης (κατ' ελάχιστον), τη μονάδα ελέγχου. Αυτό, πέραν των θετικών στοιχείων, έχει το μειονέκτημα της αδυναμίας ρύθμισης των επιμέρους υποσυστημάτων στην περίπτωση που δεν εξυπηρετούν τις εκάστοτε ειδικές ανάγκες.

¹¹ Lulzbot TAZ 4, με αναβαθμισμένη all-metal κεφαλή εκτύπωσης και firmware (TAZ 5). Διεργασία τύπου "Fused Filament Fabrication" (FFF), γνωστή επίσης κι ως "Fused Deposition Modeling" (FDM) : https://en.wikipedia.org/wiki/Fused_filament_fabrication

¹² $P_{υδρ} = \rho h g$, με ρ την πυκνότητα του ρευστού, h την απόσταση από την επιφάνεια, g την επιτάχυνση της βαρύτητας. Ο υπολογισμός γίνεται υπό τις προσεγγίσεις: 1) καθαρό νερό, 2) $h \sim 1.5 \text{ m}$ – το βάθος της δεξαμενής που υπάρχει στο Ε.Α.Ε.

Η χρήση 3D εκτυπωτών επιτρέπει την κατασκευή σχεδόν οποιασδήποτε γεωμετρίας μπορεί κανείς να φανταστεί και να σχεδιάσει σε κάποιο σύστημα CAD (αν και η υιοθέτηση μιας τέτοιας πρακτικής ενέχει μεγάλο κίνδυνο κατά τη μετάβαση σε άλλες μεθόδους κατασκευής). Η χρήση του εκτυπωτή είναι ιδιαίτερα εύκολη και παρέχει τη δυνατότητα της -σχετικά- γρήγορης και ανώδυνης εξέλιξης/βελτιστοποίησης των μερών.

Τα είδη θερμοπλαστικών που υπήρχαν διαθέσιμα προς χρήση ήταν : ABS, PLA και κάποιου είδους TPU.

Σημειώνεται εδώ ότι είναι σημαντικό να αντιληφθεί κανείς τους περιορισμούς των μεθόδων rapid prototyping και δει των FFF¹³ 3D εκτυπωτών. Εν προκειμένου, η χρήση αυτής της μεθόδου δημιούργησε σημαντικά προβλήματα στην στεγανότητα περιβλημάτων σε κατάσταση βύθισης και για σημαντικά χρονικά διαστήματα (> 10 – 15 min).

⇒ Ως επενεργητής θα χρησιμοποιηθεί ένα DC motor, σε συνδυασμό με την απαιτούμενη μετάδοση.

Θα έλεγα ότι η παράμετρος αυτή διαμόρφωσε σε πολύ μεγάλο βαθμό και την σχεδιαστική μου προσέγγιση. Η εικόνα που σχημάτισα παρατηρώντας τα διαφορετικά συστήματα grippers ήταν ότι οι μεν ερασιτεχνικές και χαμηλών δυνατοτήτων εφαρμογές χρησιμοποιούσαν σχεδόν αποκλειστικά servo motors¹⁴, οι δε βιομηχανικές ή υψηλότερων προδιαγραφών εφαρμογές απλά DC motors, συνδυασμένα με στοιχεία μετάδοσης και ελέγχου, προσαρμοσμένα στο εκάστοτε σύστημα - ή υδραυλικά συστήματα, σε συνδυασμό με βραχίονες.

Θεώρησα λοιπόν ότι η υιοθέτηση της δεύτερης κατηγορίας λύσης, παρότι συνθετότερη στην ανάπτυξή της, θα λειτουργήσει ως καλύτερη βάση, με μεγαλύτερη ευελιξία και περισσότερες δυνατότητες παραμετροποίησης.

⇒ Η κίνηση των επιφανειών συγκράτησης θα είναι παράλληλη.

Στη διαδικασία του robotic grasping, μπορεί να διακρίνει κανείς δύο βασικές «μεθόδους» συγκράτησης¹⁵, οι οποίες αναφέρονται ως: α) “force closure” και β) “form closure”.

Σε μια προσπάθεια να εκμεταλλευτώ -έστω μερικώς- τα θετικά στοιχεία του form closure, σκέφτηκα ότι οι επιφάνειες συγκράτησης θα μπορούσαν να σχεδιαστούν σε περισσότερες από μία μορφές. Από την περιγραφή που ακολουθεί σχετικά με την επιλογή των αισθητήρων «αφής», τα δάκτυλα¹⁶ θα αποτελούνταν από δύο «φάλαγγες», χωρίς απαραίτητα κάποια άρθρωση μεταξύ τους (και σε καμία περίπτωση ενεργητική). Έτσι λοιπόν προσπάθησα να υλοποιήσω δάκτυλα σε ποικίλες γεωμετρίες : δύο φάλαγγες σε επίπεδη διάταξη, δύο φάλαγγες υπό γωνία μεταξύ τους (κοίλη διάταξη), δύο φάλαγγες με άρθρωση με ελαστικότητα. Επίσης, ιδιαίτερα μεγάλη εντύπωση μου έκανε το φαινόμενο “Fin Ray”¹⁷ και η εφαρμογή του στην δημιουργία soft grippers, διάταξη την οποία προσπάθησα να αναπαραγάγω, ως μια επιπλέον επιλογή δακτύλων.

¹³ Βλ. και υποσημείωση 7

¹⁴ Εννοώντας πιο συγκεκριμένα τα RC servo και σε ελάχιστες περιπτώσεις servo υψηλότερων δυνατοτήτων (και κόστους).

¹⁵ Ή, όπως μαρτυρά και η ονομασία τους (closure), «περίκλεισης» του αντικειμένου από τα εκάστοτε «δάκτυλα».

¹⁶ Εφεξής θα αναφέρω ως τέτοια τις επιφάνειες συγκράτησης, ως μια εύληπτη συντόμευση του όρου.

¹⁷ Περισσότερες πληροφορίες: <https://www.festo-didactic.com/int-en/learning-systems/mechatronics-and-factory-automation/the-fin-ray-paper-kit.htm>

- ⇒ Για την ικανότητα «αφής» των δακτύλων θα χρησιμοποιηθούν αισθητήρες δύναμης, τύπου “Force Sensitive Resistor” ή εν συντομία FSR.

Οι λόγοι που οδήγησαν σε αυτή την επιλογή είναι συνδυασμός του χαμηλού τους κόστους και των χαμηλών απαιτήσεων σε επιπλέον υλικό και επεξεργαστική ισχύ, σε σύγκριση με τους αισθητήρες τύπου strain gauge. Επίσης, σημαντικό πλεονέκτημα είναι η ευκολότερη στερέωση τους συγκριτικά με την ειδική εφαρμογή που απαιτείται στην περίπτωση των strain gauges.

Τέλος, σχετικά με την ενδοτικότητα του βραχίονα, υιοθέτησα μια διάταξη που προτάθηκε από το εργαστήριο, την οποία δεν συνάντησα μεν σε κάποιο τελικό στοιχείο δράσης, αλλά είναι πολύ συνηθισμένη στην ανάρτηση οπτικών συστημάτων σε οχήματα, για την απόσβεση κραδασμών. Μια εναλλακτική λύση από ελαστικό θερμοπλαστικό (TPU) θα παρουσιαστεί στο τέλος του υποκεφαλαίου 2.4.

- ⇒ Η ενσωμάτωση χαρακτηριστικού ενδοτικότητας στο σύστημα θα υλοποιηθεί με την ανάρτηση του όλου συστήματος σε δευτερεύουσα βάση, μέσω αντικραδασμικών κυλίνδρων.

Τα αντικραδασμικά αυτά στοιχεία φαίνονται στην ακόλουθη εικόνα. Σημειώνεται ότι δεν έγινε αναλυτική εκτίμηση της προκύπτουσας ελαστικότητας.



Εικόνα 2.1 - Αντικραδασμικά στοιχεία από ελαστικό υλικό (δεξιά) & εφαρμογή σε ανάρτηση κάμερας σε όχημα (αριστερά).

Πριν περάσω στο επόμενο υποκεφάλαιο, θέλω να σημειώσω πως προσπάθησα, ώστε όσο το δυνατόν περισσότερα συνθετικά στοιχεία να είναι αυτόνομες οντότητες. Αυτή η προσέγγιση («δομοστοιχειωτός σχεδιασμός»¹⁸) παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως:

- ευκολότερος σχεδιασμός των μερών

¹⁸ αγγλιστί : “modularity”

- ευκολότερη -αν και περισσότερο κοπιώδης- συναρμολόγηση/αποσυναρμολόγηση των μερών
- ευκολότερη/οικονομικότερη αντικατάσταση μερών με βλάβη
- ευκολότερη ανάλυση των λειτουργιών, τόσο από τον αρχικό σχεδιαστή όσο και από τρίτους
- δυνατότητα για στοχευμένες βελτιώσεις κι εξέλιξη

αλλά και κάποια μειονεκτήματα:

- αυξημένος αριθμών μερών – αυξημένος αριθμός συνδέσμων
- πολυπλοκότητα
- αυξημένες διαστάσεις/όγκος (ιδιαίτερα στην περίπτωση ηλεκτρικών/ηλεκτρονικών συστημάτων και των διασυνδέσεών τους)

Πιστεύω ότι, στο παρόν στάδιο εξέλιξης, τα μειονεκτήματα αυτά δικαιολογούνται.

2.2 Κινώντας τα δάκτυλα

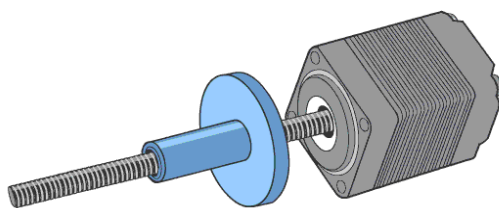
Το σύστημα κίνησης των δακτύλων είναι το κέντρο του στοιχείου δράσης και η σχεδίασή του αναπτύχθηκε γύρω από αυτό. Στο υποκεφάλαιο αυτό θα περιγράψω τον τρόπο μετάδοσης της κίνησης στα δάκτυλα καθώς και -με σχετική συντομία- τον επενεργητή που επιλέχθηκε (αναλυτικά χαρακτηριστικά θα δοθούν στο κεφάλαιο 3). Επίσης, θα σχολιάσω την εξέλιξη της γεωμετρίας και των διαστάσεων των μερών του μηχανισμού¹⁹.

Η απόφαση για την επιλογή ενός απλού brushed DC motor ως επενεργητή ήταν σχεδόν ταυτόχρονη με την υιοθέτηση της μετάδοσης της κίνησης μέσω ενός συστήματος “power screw” (lead screw & nut). Ως “lead screw” περιγράφεται ένας κοχλίας, συνήθως με τυποποιημένο τραπεζοειδές σπείρωμα, που χρησιμοποιείται για την μετάδοση ισχύος και την ταυτόχρονη μετατροπή γωνιακής από/σε γραμμική μετατόπιση. Υπό την περιστροφή του κοχλίου, το περικόχλιο -εφόσον περιορίζεται από την εκτέλεση ιδιοπεριστροφικής κίνησης μαζί με τον κοχλίο- μετατοπίζεται γραμμικά κατά μήκος του άξονα του κοχλίου, τόσες μονάδες μήκους όσο το βήμα (pitch²⁰) του σπειρώματος.

Η ακόλουθη εικόνα αναπαριστά αυτή την αρχή:

¹⁹ Αυτοί οι κύκλοι «σχεδιασμού-δοκιμής-εξέλιξης» είναι μεν χρήσιμο, αλλά και κουραστικό για τον αναγνώστη να αναφερθούν. Συνεπώς, θα προσπαθήσω να δώσω έμφαση μόνο στα σημεία εκείνα που πιστεύω ότι συνεισφέρουν στην κατανόηση των όποιων σχεδιαστικών επιλογών και τη διόρθωση πιθανών ατοπημάτων σε επόμενες εκδόσεις.

²⁰ Η “lead” στην περίπτωση όπου υπάρχουν περισσότερες από μια σπείρες στον κοχλίο.



Εικόνα 2.2 - Αρχή λειτουργίας μετάδοσης κίνησης μέσω lead screw & nut. Ο κοχλίας είναι στη θέση του άξονα ενός τυπικού servo motor. Η περιστροφή του κοχλία θέτει σε γραμμική κίνηση το περικόχλιο κατά μήκος του άξονα του. Πηγή: <https://www.linengineering.com/resources/white-papers/selecting-the-right-linear-actuator-to-improve-operating-efficiency/>

Πλεονεκτήματα της χρήσης αυτού του τύπου μετάδοσης είναι:

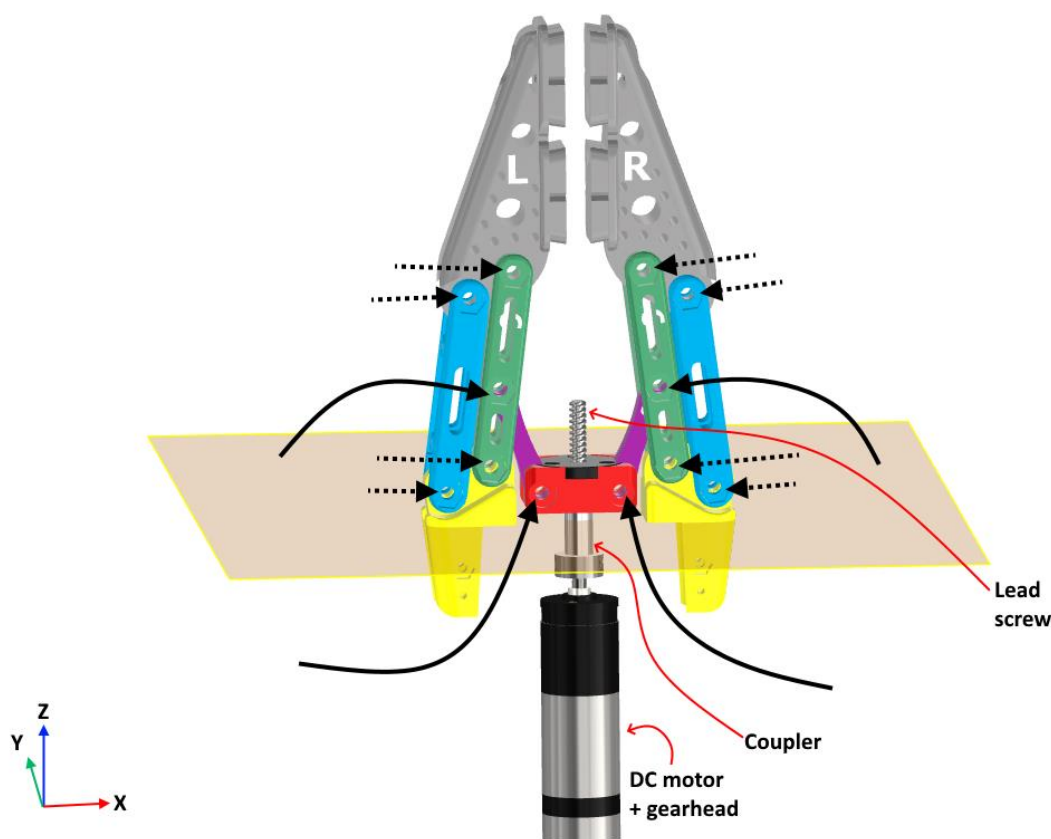
- Μικρές διαστάσεις
- Μικρός αριθμός μερών -> αυξημένη αξιοπιστία, χαμηλό κόστος & συντήρηση
- Μεγάλο μηχανικό πλεονέκτημα
- Ακριβής έλεγχος
- Ομαλή και αθόρυβη λειτουργία
- Self-locking

με κυριότερο μειονέκτημα το χαμηλό συντελεστή απόδοσης.

Ιδιαίτερης μνείας χρήζει η τελευταία ιδιότητα (self-locking). Το πολύ σημαντικό αυτό χαρακτηριστικό σημαίνει ότι δεν απαιτείται συνεχής άσκηση ροπής για την διατήρηση της θέσης του περικόχλιου (και των δακτύλων, όπως θα φανεί αμέσως παρακάτω). Κατόπιν τοποθέτησής στη θέση συγκράτησης, ουσιαστικά η παροχή ενέργειας προς τον επενεργητή μπορεί να διακοπεί, χωρίς τη μεταβολή από αυτή τη θέση²¹. Αυτό σημαίνει επίσης, ότι μπορεί κανείς να εκμεταλλευτεί σχεδόν την μέγιστη αποδιδόμενη ροπή (stall torque) του επενεργητή, χωρίς την πιθανότητα βλάβης, εφόσον επαρκεί η εφαρμογή της στιγμιαία.

Μια αναπαράσταση του πως θα χρησιμοποιηθεί αυτού του τύπου η μετάδοση στην παράλληλη κίνηση δύο δακτύλων απεικονίζεται παρακάτω:

²¹ Στην ιδανική περίπτωση, όπου αγνοούμε τυχόν backlash στο μηχανισμό και τις αρθρώσεις. Και φυσικά πριν την καταστροφική βλάβη των μερών. Στην πραγματικότητα βέβαια αυτή η δήλωση δεν έχει γενική ισχύ, καθώς το «ανεπίστροφο» εξαρτάται από την κλίση του σπειρώματος και συνεπακόλουθα του βήματος (pitch) – αυτό που εμποδίζει την κίνηση προς τα πίσω δεν είναι παρά η τριβή μεταξύ κοχλία-περικόχλιου.



Εικόνα 2.3 – Ο μηχανισμός κίνησης των δακτύλων.

Στην εικόνα 2.3 φαίνεται ο επενεργητής (DC motor+gearhead), με τον άξονα του οποίου είναι ενωμένος ο κοχλίας (lead screw), μέσω ενός μεταλλικού συνδέσμου (coupler). Το περικόχλιο (διακρίνεται με μαύρο χρώμα) είναι στερεωμένο στο κόκκινο τμήμα, στα άκρα του οποίου ενώνονται, μέσω στροφικής άρθρωσης, δύο σύνδεσμοι (βιολετί). Οι σύνδεσμοι συνδέονται πάλι με στροφική άρθρωση με τα πράσινα στοιχεία, τα οποία καταλήγουν στις δύο επιφάνειες συγκράτησης (γκρίζο χρώμα). Με διακεκομμένες γραμμές σημειώνονται τα υπόλοιπα σημεία όπου υπάρχουν (στροφικές) αρθρώσεις.

Η λειτουργία των επιμέρους στοιχείων μπορεί να γίνει κατανοητή αν φανταστούμε αρχικά το μηχανισμό χωρίς τα μπλε και κίτρινα στοιχεία.

Στα γκρι, πράσινα και βιολετί στοιχεία ασκείται η ελάχιστη δύναμη, ώστε να παραμένουν σε αυτή τη διαμόρφωση.

Έστω ότι το σώμα του μοτέρ είναι ακινητοποιημένο.

Έστω επίσης ότι στο κόκκινο στοιχείο ασκείται δύναμη με γ-συνιστώσα, που το αποτρέπει από την εκτέλεση στροφής γύρω από τον άξονα του κοχλίας.

- Υπό την λειτουργία του μοτέρ, ο κοχλίας περιστρέφεται και οδηγεί το περικόχλιο, μαζί με το κόκκινο στοιχείο, σε κατακόρυφη κίνηση στον Z άξονα - έστω με φορά προς τα πάνω.

- Αυτή η κίνηση τείνει με τη σειρά της να κινήσει τους πράσινους συνδέσμους στο ΧΖ επίπεδο, απομακρύνοντάς τους²², λόγω της στροφής των βιολετί συνδέσμων γύρω από τις αρθρώσεις τους στο κόκκινο στοιχείο.
- Τα δάκτυλα (γκρι), όπως άλλωστε και οι πράσινοι σύνδεσμοι, κινούνται σχεδόν ελεύθερα στο ΧΖ επίπεδο, καθώς περιορίζονται μόνο από τις αρθρώσεις μεταξύ τους και με τα βιολετί στοιχεία.

Για να περιορίσουμε την κίνηση των πράσινων συνδέσμων, εισάγουμε τις κίτρινες βάσεις, τις οποίες πακτώνουμε στο σκιασμένο επίπεδο (παράλληλο στο ΧΥ επίπεδο). Η ενέργεια αυτή εξαναγκάζει τον κάθε σύνδεσμο σε στροφή επί του ΧΖ επιπέδου, γύρω από το σταθερό κέντρο της άρθρωσης με την κίτρινη βάση. Επίσης, εξασφαλίζει τη δύναμη, που υποθετικά ασκούσαμε προηγουμένως, ώστε το κόκκινο στοιχείο να εκτελεί μόνο γραμμική κίνηση.

Ωστόσο, υπάρχει ακόμη το εξής πρόβλημα: οι επιφάνειες συγκράτησης δεν εκτελούν την επιθυμητή κίνηση, δηλαδή παράλληλη μετατόπιση επί της x-διεύθυνσης. Υπάρχει ακόμα η στροφική ελευθερία γύρω από το κέντρο της άρθρωσής τους με τους πράσινους συνδέσμους.

Ο περιορισμός αυτός εισάγεται από τα μπλε στοιχεία-συνδέσμους, τα οποία πρέπει να έχουν το ίδιο μήκος (μεταξύ των κέντρων των αρθρώσεων) με τους πράσινους συνδέσμους.

Η υπό κλίση στερέωση των πράσινων και μπλε συνδέσμων στη βάση (και συνεπακόλουθα στα δάκτυλα) εξυπηρετεί στην ανύψωση του κόκκινου στοιχείου και του περικόχλιου από το επίπεδο στερέωσης. Αυτό επιτρέπει την χρήση μακρύτερων συνδέσμων (βιολετί), επιτυγχάνοντας μεγάλη μετατόπιση των δακτύλων, με μικρότερη απόσταση της άρθρωσης των συνδέσμων από τον άξονα περιστροφής του κοχλία - κι έτσι πιο συμπαγείς διαστάσεις.

Ο μόνος περιορισμός ο οποίος δεν εξασφαλίζεται από την διάταξη είναι αυτός που αποτρέπει το σώμα του μοτέρ από στροφή ή γραμμική μετατόπιση. Η συνθήκη αυτή θα εξασφαλιστεί στη συνέχεια της περιγραφής του συστήματος, στο υποκεφάλαιο 2.3. Συνεχίζω λοιπόν με την επιλογή της μετάδοσης και του επενεργητή.

Εν γένει, οι τραπεζοειδείς κοχλίες έχουν τυποποιημένη διάμετρο και τιμές βήματος σε λίγες παραλλαγές, ενώ συχνά κατασκευάζονται με περισσότερα από ένα σπειρώματα (ίδιου βήματος) γύρω από τον ίδιο άξονα. Στην περίπτωση αυτή το ολικό βήμα (lead) προκύπτει από το βήμα των σπειρωμάτων (pitch), επί τον αριθμό τους.

Επέλεξα την μικρότερη δυνατή διάμετρο που βρήκα διαθέσιμη (3.5mm), ώστε η ροπή αδράνειας, η μάζα και ο όγκος να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερα. Σε αυτή τη διάμετρο, οι τιμές βήματος (lead) που υπήρχαν ήταν:

$$L = \begin{cases} 0.61 \\ 1.2 \\ 2.4 (1.2 * 2) \end{cases} \text{ mm}$$

Η γεωμετρία και οι διαστάσεις των συνδέσμων του μηχανισμού όπως φαίνεται στην εικόνα 2.3, καθορίζουν το ποσό της κατακόρυφης μετατόπισης του περικόχλιου, ώστε να εξασφαλίζεται η προδιαγραφή 2 ($S_{open-to-close} = 60 \text{ mm}$).

²² Ορθότερα, απομακρύνοντας τα σημεία τους όπου συνδέονται τα βιολετί στοιχεία.

Οι παράμετροι αυτοί σχεδιάστηκαν με την εξής φιλοσοφία:

- Να εξασφαλίζεται η προδιαγραφή 2 – ως προς το άνοιγμα και το πάχος (Υ-διεύθυνση στην εικόνα 2.3) των δακτύλων
- Το πλάτος του μηχανισμού (Χ-διεύθυνση στην εικόνα 2.3) να είναι κατά το δυνατόν μικρό -> ευκολία στο χειρισμό, μικρότερο αποτύπωμα²³ στο workspace

Η μετατόπιση προέκυψε περίπου ίση με:

$$\Delta z_{nut_{open-to-close}} \cong 8 \text{ mm}$$

Έτσι, βάσει αυτών των τιμών, η απαιτούμενη ταχύτητα περιστροφής ω_{motor} του μοτέρ, ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη της προδιαγραφής 6 ($\Delta t_{open-to-close} \leq 2 \text{ s}$), υπολογίζεται σε στροφές ανά δευτερόλεπτο (revolutions per second) και ανά λεπτό (\sim per minute):

$$\omega_{motor} \geq \frac{1}{L} \frac{\Delta z_{nut_{open-to-close}}}{\Delta t_{open-to-close}} = \begin{cases} 6.56 \text{ rps}, & \text{για } L = 0.61 \\ 3.33 \text{ rps}, & \text{για } L = 1.2 \\ 1.67 \text{ rps}, & \text{για } L = 2.4 \end{cases} = \begin{cases} 393 \text{ rpm}, & \text{για } L = 0.61 \\ 200 \text{ rpm}, & \text{για } L = 1.2 \\ 100 \text{ rpm}, & \text{για } L = 2.4 \end{cases}$$

Φυσικά αυτή η ταχύτητα περιστροφής προκύπτει από ένα DC motor συνδυασμένο με κάποια κεφαλή-μειωτήρα (gearhead).

Θεώρησα ότι η μεγαλύτερη τιμή ($L = 2.4 \text{ mm}$) θα εξυπηρετήσει καλύτερα τις προδιαγραφές του συστήματος ή τουλάχιστον θα δώσει περισσότερη ευελιξία στην επιλογή του DC motor: όπως φαίνεται, υπό ένα μεγάλο λόγο μετάδοσης, η ανάγκη να είναι υψηλή η ταχύτητα περιστροφής του μοτέρ περιορίζεται.

Η επιλογή αυτή υποστηρίζεται κι από τα εξής δεδομένα:

- ο συντελεστής απόδοσης (έστω η_{power_screw}) αυτού του τύπου μετάδοσης είναι ανάλογος του βήματος του κοχλία²⁴
- ο συντελεστής απόδοσης των κεφαλών μείωσης (έστω $\eta_{gearhead}$) είναι αντιστρόφως ανάλογος του λόγου μείωσης²⁵

Ως μειονέκτημα αυτής της επιλογής θα μπορούσε κανείς να αναφέρει την εγγενώς μικρότερη ανάλυση στην θέση των δακτύλων. Σημειώνω ότι, όπως θα περιγραφεί αργότερα στο κεφάλαιο 3, σε αυτή την έκδοση του στοιχείου δράσης δεν θα χρησιμοποιηθεί έλεγχος θέσης για κάποια από τις λειτουργίες του.

Η επιλογή του επενεργητή έγινε με γνώμονα χαρακτηριστικά όπως:

- η αποδιδόμενη ροπή
- οι διαστάσεις (μήκος, διάμετρος)
- η συνολική μάζα
- η ποιότητα κατασκευής
- το κόστος απόκτησης
- (δευτερευόντως) η ύπαρξη αισθητήρα θέσης (encoder)

²³ Δηλαδή ο όγκος που καταλαμβάνει το στοιχείο δράσης (footprint).

²⁴ $\eta_{power_screw} = \frac{F_{out}L}{2\pi T_{in}}$, πηγή: [2], σελ. 403

²⁵ Όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει στα τεχνικά φυλλάδια των κατασκευαστών επενεργητών (π.χ. https://www.maxongroup.com/medias/sys_master/root/8831027281950/2018EN-328.pdf).

Όπως ίσως γνωρίζει κάποιος που έχει πρότερη εμπειρία στην χρήση DC motors+gearheads, οι τιμές για την προμήθεια επώνυμων συστημάτων είναι υψηλές²⁶. Η αρχική επιλογή ήταν ένα DC motor, τύπου N20²⁷, σύνηθες σε “hobby” κατασκευές, με πολύ μικρές διαστάσεις. Αν και εξαιρετικά βολικό στο σχεδιασμό ενός μικρού περιβλήματος (θα περιγραφεί στο αμέσως επόμενο υποκεφάλαιο), η αποδιδόμενη ροπή του αποδείχθηκε ανεπαρκής όταν τέθηκαν τα ζητήματα της αδιαβροχοποίησης, της ακρίβειας της συναρμογής και του ποσού εκκεντρότητας στην περιστροφή του άξονά του.

Τελικά επιλέχθηκαν επώνυμα συστήματα μοτέρ-μειωτήρα-αισθητήρα Escap/Portescap²⁸ από την αγορά μεταχειρισμένων, με κύρια χαρακτηριστικά:

- Διάμετρος 16 mm, συνολικό μήκος 50 mm
- Ονομαστική ισχύς 4.2 W
- Μέγιστη αποδιδόμενη ροπή περίπου 0.327 N*m (0.0121 N*m * 27 – ο λόγος μετάδοσης)
- Ονομαστική ταχύτητα περιστροφής, χωρίς φορτίο, περίπου 350 rpm σε τροφοδοσία 12 V
- Αισθητήρα θέσης τύπου Hall σχετικά υψηλής ανάλυσης (128 παλμοί/περιστροφή, προ του μειωτήρα)

Το σύστημα αυτό φαίνεται στην εικόνα 2.3 (κάτω).

Αν και πάνω από τις προδιαγραφές και με σημαντικά μεγαλύτερες διαστάσεις/μάζα, θεώρησα ότι ο λόγος κόστους/απόδοσης & χαρακτηριστικών είναι πολύ μεγαλύτερος από τις υπόλοιπες διαθέσιμες επιλογές. Επίσης, θεώρησα ότι η πιθανώς μειωμένη αξιοπιστία είναι μικρής σημασίας, δεδομένων της συχνότητας χρήσης, του κόστους-ευκολίας αντικατάστασης και φυσικά των επιπλέον χαρακτηριστικών.

Υποθέτω πως η επιλογή αυτή θα κριθεί στην πορεία... Βέβαια πάντα υπάρχει η δυνατότητα αντικατάστασης με ένα καινούριο αντίστοιχο προϊόν σε μετέπειτα εκδόσεις, εφόσον το παραγόμενο έργο δικαιολογεί την αγορά του.

2.3 Προστασία από το νερό και αίσθηση «αφής»

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα σχολιάσω πως σχεδιάστηκε στη συνέχεια ο μηχανισμός, ώστε να μπορεί να λειτουργεί υπό βύθιση σε νερό. Θα εξηγήσω πώς τα δάκτυλα με τους συνδέσμους, ο επενεργητής και τα παρελκόμενά του ηλεκτρονικά συστήματα, αλλά και τα καλώδια (εσωτερικής κι εξωτερικής διασύνδεσης) ενσωματώνονται σε αυτό το σχεδιασμό, με απώτερο στόχο το όσο το δυνατόν μικρότερο αποτύπωμα.

Υπενθυμίζω τις δύο (εμπειρικές) παραμέτρους της προδιαγραφής 9 :

$$\begin{aligned}\Delta t_{underwater} &\sim 30 \text{ min} \\ \Delta t_{experiment} &\sim 4 \text{ h},\end{aligned}$$

²⁶ περί τα €100, χωρίς αισθητήρα θέσης

²⁷ Ενδεικτικά χαρακτηριστικά (για τάση τροφοδοσίας 12V και λόγο μείωσης 100) στη σελίδα <http://www.ttmotor.com/productshow.php?sid=208&id=102>. Το μοτέρ που προμηθεύτηκα δεν ήταν από τον συγκεκριμένο κατασκευαστή, αλλά ανώνυμο, με αντίστοιχα χαρακτηριστικά.

²⁸ Escap 16G88-214E brushed DC motor / B16 gearhead (27:1 ratio) / MR2 magnetic encoder(128 lines per revolution). Αναλυτικά στοιχεία στο κεφάλαιο 3.

όπου το πρώτο χρονικό διάστημα αφορά στον αναμενόμενο χρόνο που ο μηχανισμός θα βρίσκεται εντός της πισίνας και το δεύτερο στον αναμενόμενο χρόνο διάρκειας ενός πειράματος, με πιθανά πολλαπλούς κύκλους εντός-εκτός πισίνας.

Ο στόχος λοιπόν είναι εξασφαλισμένη προστασία από το νερό για τουλάχιστον 30 λεπτά, σε βάθος 1 μέτρο (IPx7), και ιδανικά για τον πλήρη χρόνο ενός πειράματος (IPx8).

Η πρώτη μου προσέγγιση στο ζήτημα ήταν η περίκλειση του μοτέρ (και όποιων άλλων ευαίσθητων μερών) σε κάποιο έτοιμο περίβλημα. Θεώρησα πως ένα περίβλημα με κυλινδρική συμμετρία θα εξυπηρετούσε καλύτερα την υδροδυναμική συμπεριφορά του συστήματος -στο βαθμό που αυτή ίσως επηρεάζει τις πειραματικές διεργασίες.

Επίσης, θα ήταν σχετικά κομψότερο σε σύγκριση με ένα ορθογώνιο περίβλημα – παράμετρο, χωρίς βέβαια λειτουργική σημασία, που προσπάθησα να ενσωματώσω σε όλα τα στοιχεία.

Σημαντικό προαπαιτούμενο: το περίβλημα να επιτρέπει την, κατά το δυνατόν, εύκολη και γρήγορη αποσυναρμολόγηση και επανασυναρμολόγησης του. Για την περίπτωση ενός κυλινδρικού περιβλήματος, αυτό μπορεί να εξασφαλιστεί με δύο αφαιρούμενα καπάκια στις βάσεις του κυλίνδρου.

Η προσέγγιση αυτή ανέδειξε τέσσερα σημαντικά ζητήματα:

- 1) οι συνδέσεις «καπάκι-περίβλημα» θα πρέπει να είναι στεγανές
- 2) πρέπει να υπάρχουν σημεία σύνδεσης των δακτύλων
- 3) πρέπει να υπάρχει σημείο εξόδου-σύνδεσης του άξονα του μοτέρ με τον κοχλία, ο οποίος, υπό τον σχεδιασμό του υποκεφαλαίου 2.2, θα βρίσκεται εκτός περιβλήματος
- 4) πρέπει να υπάρχουν σημεία εξόδου των καλωδίων για τις απαραίτητες ηλεκτρικές διασυνδέσεις των ευαίσθητων μερών

Στο σημείο αυτό λοιπόν κάνω μια μικρή παρένθεση, για να αναφέρω συνοπτικά αυτά τα μέρη και τις απαιτούμενες διασυνδέσεις (εκτενέστερη περιγραφή στο κεφάλαιο 3).

- ⇒ Για την οδήγηση του DC motor χρησιμοποιήθηκε μια υλοποίηση του ολοκληρωμένου DRV8801 (H-bridge motor driver).
- ⇒ Για την διασύνδεση των τεσσάρων αισθητήρων «αφής» FSR (δύο ανά δάκτυλο), χρησιμοποιήθηκε μια ενδιάμεση πλακέτα με τέσσερα όμοια κυκλώματα διαιρετών τάσης (R-divider board).
- ⇒ Ως έξτρα, πιθανά χρήσιμο στοιχείο ενσωματώθηκε μια μονάδα επιταχυνσιόμετρου-γυροσκόπιου (IMU), βασισμένη στο ολοκληρωμένο LSM6DS3.
- ⇒ Για την συντονισμένη λειτουργία των παραπάνω και την επικοινωνία με τον τελικό χρήστη, χρησιμοποιήθηκε μια πλακέτα Arduino Pro Micro (ATmega 32U4).

Η λειτουργία των στοιχείων αυτών προϋποθέτει φυσικά ηλεκτρικές διασυνδέσεις, οι οποίες μπορούν να χωριστούν σε: *τοπικές* (ή *εσωτερικές*) και *απομακρυσμένες* (ή *εξωτερικές*). Οι μεν είναι εντός του συστήματος του στοιχείου δράσης, οι δε γίνονται με το περιβάλλον του.

Οι τοπικές διασυνδέσεις είναι:

- Μεταξύ DC motor & motor driver (DRV8801)
- Μεταξύ Arduino & motor driver
- Μεταξύ Arduino & IMU (LSM6DS3)
- Μεταξύ Arduino & R-divider
- Μεταξύ R-divider & FSR

Απομακρυσμένες διασυνδέσεις είναι:

- Μεταξύ Arduino & εξωτερικού Η/Υ (δεδομένα + τροφοδοσία, μέσω USB 2.0)
- Εξωτερική τροφοδοσία +12 V για το DC motor

Για την υλοποίηση αυτών των διασυνδέσεων επέλεξα να χρησιμοποιήσω, σε όσο το δυνατόν περισσότερες περιπτώσεις, ηλεκτρικούς συνδέσμους. Αυτή η πρακτική εμπίπτει ακριβώς στην προσέγγιση του δομοστοιχειωτού σχεδιασμού, με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του.

Η χρήση ενός έτοιμου κυλινδρικού περιβλήματος λοιπόν, που να εξασφαλίζει και τα τρία ζητήματα με λειτουργικό και, γιατί όχι, κομψό τρόπο²⁹, αποδεικνύεται προβληματική. Για την ενσωμάτωση όλων των χαρακτηριστικών θα πρέπει να σχεδιαστεί ένα περίβλημα προσαρμοσμένο στις ειδικές αυτές απαιτήσεις.

Όπως ανέφερα στο πρώτο κεφάλαιο, για την κατασκευή των όποιων στοιχείων του μηχανισμού υπήρχε διαθέσιμος 3D εκτυπωτής, τεχνολογίας “Fused Filament Fabrication” (FFF)³⁰. Έχοντας έτσι κατά νου την ελευθερία υλοποίησης σύνθετων γεωμετριών, θεώρησα ότι μια ενδιάμεση λύση θα ήταν η εξής

- ⇒ Σχεδίαση και κατασκευή ενός κυλινδρικού περιβλήματος, που να εξασφαλίζει τα ζητήματα 1, 2 και 4.
- ⇒ Χρήση δύο έτοιμων καπακιών, συμβατών με το ζήτημα 1, κι ένα εξ’ αυτών προσαρμοσμένο στο ζήτημα 3.

Τέτοια καπάκια μπορεί κανείς να βρει σε είδη ύδρευσης και αποχέτευσης. Οι διαστάσεις τους είναι τυποποιημένες ωστόσο, βάσει της εξωτερικής διαμέτρου της αντίστοιχης σωλήνωσης: 32, 40, 50, 75, 90 mm κλπ.

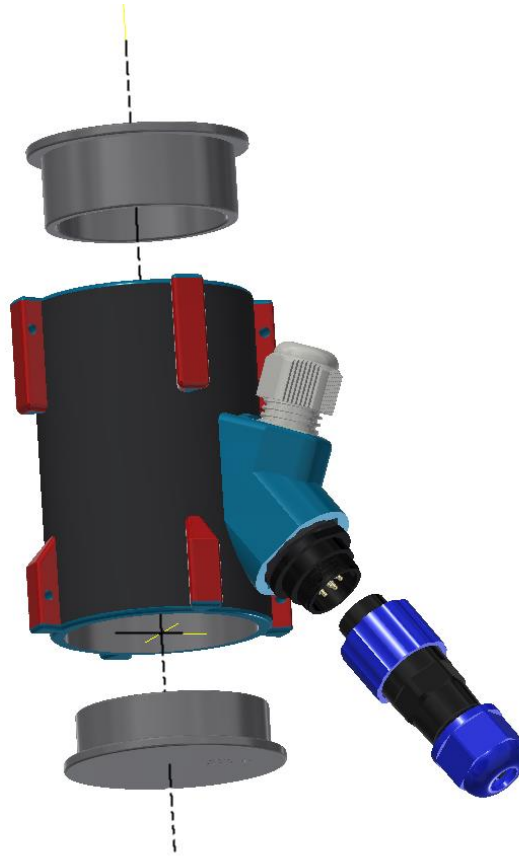
Μετά από μια πρόχειρη διαστασιολόγηση, θεώρησα ότι η χρήση της διαμέτρου των 40 mm επαρκεί για την περίκλιση όλων των ευαίσθητων μερών. Αντίστοιχα, βάσει του μεγαλύτερου μήκους (DC motor, περί τα 50 mm) κι επιτρέποντας ένα περιθώριο 15 mm, το μήκος του του περιβλήματος θα ήταν περί τα 65 mm (χωρίς τα καπάκια). Στην πράξη αυτό το μήκος «αναβαθμίστηκε» σε 70 mm, για τη δημιουργία λίγο περισσότερου χώρου. Το περίβλημα αυτό, στην τελευταία του εκδοχή, φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.

²⁹ Υπό την έννοια ότι δεν χρειάζεται να κοπούν ή να κολληθούν νέες γεωμετρίες σε αυτό - να τροποποιηθεί εν γένει.

³⁰ Συνοπτικά: η μέθοδος αυτή δημιουργεί την τρισδιάστατη γεωμετρία, τέμνοντας την αρχικά σε παράλληλα επίπεδα (layers), σε έναν από τους τρεις κύριους άξονες -όπως π.χ. κόβουμε μια πατάτα σε λεπτά τσιπς.

Έπειτα μέσω της εναπόθεσης λεπτών «νημάτων» θερμοπλαστικού, σχηματίζει την δισδιάστατη γεωμετρία που προκύπτει για κάθε επίπεδο-τομή.

Η εναπόθεση αυτών των 2D σχημάτων κατά μήκος του άξονα που έγιναν οι τομές, σχηματίζει τη 3D γεωμετρία -όπως π.χ. θα στοιβάζαμε τα τσιπς για να «ξαναφτιάξουμε» την πατάτα.



Εικόνα 2.4 – Το περίβλημα στην 3D-printed εκδοχή.

Αναλύοντας τα εικονιζόμενα χαρακτηριστικά λουπόν:

- ⇒ Δύο αφαιρούμενα καπάκια από πολυπροπυλένιο (PP, γκρι χρώμα) κλείνουν τα ανοίγματα του κυλίνδρου. Η στεγανότητα της σύνδεσης εξασφαλίζεται με την χρήση ενός λεπτού στρώματος φλατζόκολλας στα σημεία επαφής με το χείλος του περιβλήματος (ζήτημα 1)
- ⇒ Στο εξέχον τμήμα (δεξιά, περίπου στη μέση, μπλε χρώμα) ενσωματώνονται υποδοχές για την στερέωση:
 - 1) [κάτω] ηλεκτρικού συνδέσμου 7 αγωγών (USB 2.0: 4 αγωγοί | τροφοδοσία +12 V: 2 αγωγοί | 1 ελεύθερος για πιθανή σύνδεση με τη θωράκιση του καλωδίου USB)
 - 2) [πάνω] στυπιοθλίπτη, δια μέσω του οποίου εξέρχεται το καλώδιο διασύνδεσης με τους αισθητήρες FSR³¹

Αμφότερα τα στοιχεία έχουν ονομαστικό βαθμό προστασίας IP68. Η στεγανότητα της σύνδεσής τους με τις υποδοχές στο περίβλημα εξασφαλίζεται και πάλι με χρήση φλατζόκολλας. Φυσικά, υπάρχει αντίστοιχη οπή στην παράπλευρη επιφάνεια του κυλίνδρου, ώστε τα καλώδια να εισέρχονται στο εσωτερικό. Οι υποδοχές σχεδιάστηκαν με τη μικρότερη δυνατή γωνία σε σχέση με την παράπλευρη επιφάνεια³², ώστε να ελαχιστοποιούνται οι προεξοχές από το περίβλημα.
- ⇒ Προεξοχές (κόκκινο χρώμα) για την σύνδεση των δακτύλων³³.

³¹ Βλ. τέλος υποκεφαλαίου για τον τρόπο ανάρτησής τους στα δάκτυλα.

³² 20° για την υποδοχή του στυπιοθλίπτη, 37.5° για την υποδοχή του συνδέσμου των 7 αγωγών.

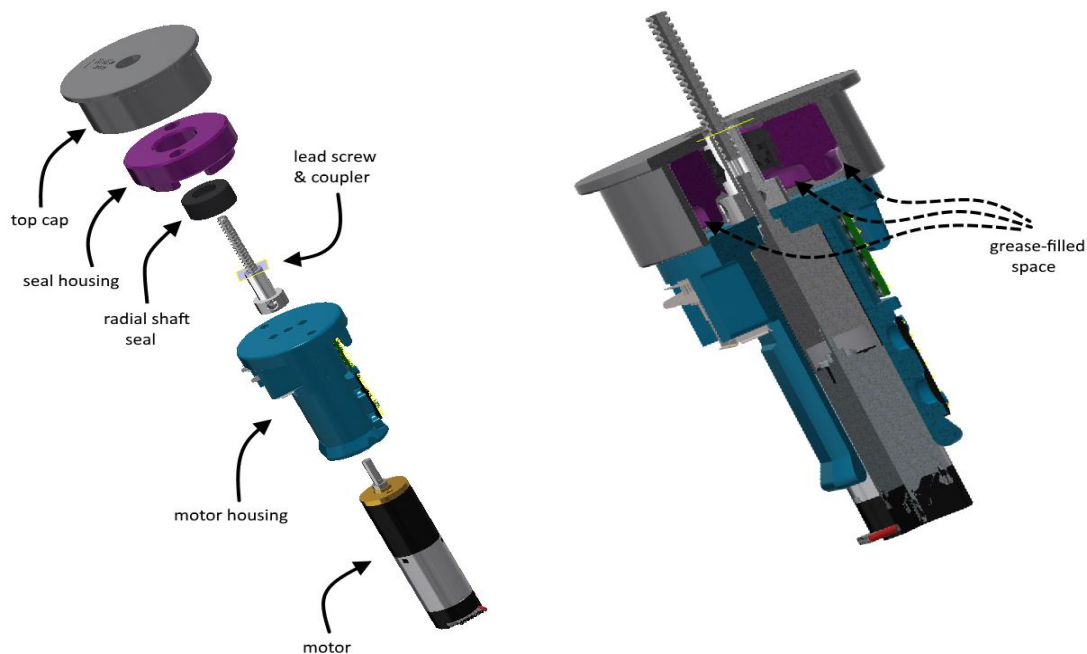
³³ Βλ. τέλος υποκεφαλαίου για περισσότερες λεπτομέρειες.

Όσον αφορά τώρα το ζήτημα 3 (στεγανή σύνδεση του άξονα του μοτέρ με τον κοχλία), η πρώτη -υπεραισιόδοξη και ανεπιτυχής- προσέγγιση ήταν η δημιουργία μιας οπής στο άνω καπάκι, μέσα από την οποία θα περνούσε ο μεταλλικός σύνδεσμος ("coupler" στην εικόνα 2.3) με ελάχιστες ανοχές. Κατόπιν αποτυχίας, σχεδιάστηκε λοιπόν μία εσωτερική βάση, στην οποία μπορεί να τοποθετηθεί μια τσιμούχα περιστροφής, μέσα από την οποία θα περνάει ο σύνδεσμος. Σημειώνω ότι ο σύνδεσμος τροποποιήθηκε ώστε να έχει τη μικρότερη δυνατή διάμετρο στο σημείο που διέρχεται από την τσιμούχα (6mm) και διατηρήθηκε η αρχική διάμετρος (10mm) στο κάτω μέρος του, όπου στερεώνεται ο άξονας του μοτέρ μέσω παράπλευρης βίδας.

Η τσιμούχα που βρέθηκε να έχει τις μικρότερες δυνατές διαστάσεις μετρά: 6 mm εσωτερική διάμετρο, 15 mm εξωτερική διάμετρο, 4 mm ύψος.

Επειδή στις πρώτες δοκιμές και μέχρι να «ωριμάσει» η μέθοδος κατασκευής στον 3D εκτυπωτή αντιμετώπισα σημαντική εκκεντρότητα στην περιστροφή του συνδέσμου, θεώρησα χρήσιμο να προσθέσω ένα επιπλέον μέτρο προστασίας. Αφήνοντας ένα μικρό περιθώριο από το σημείο ένωσης του συνδέσμου στον άξονα του μοτέρ μέχρι το σημείο εισόδου στην τσιμούχα, δημιούργησα μια κοιλότητα. Γεμίζοντας αυτή την κοιλότητα με ένα ρευστό με υψηλότερο ιξώδες από το νερό, εμποδίζεται η ροή διαμέσου αυτού³⁴. Για λόγους λίπανσης του συστήματος άξονα-τσιμούχα, επιλέχθηκε η χρήση γράσου κατάλληλου για θαλάσσιες εφαρμογές.

Η σχεδίαση αυτή φαίνεται στην επόμενη εικόνα. Σημειώνονται τα εξής στοιχεία: άνω καπάκι (top cap, γκρι), βάση τσιμούχας (seal housing, βιολετί), τσιμούχα (radial shaft seal, μαύρο), κοχλίας & σύνδεσμος (lead screw & coupler, μεταλλικό), βάση μοτέρ³⁵ (motor housing, μπλε) και μοτέρ (motor). Με διακεκομμένες γραμμές σημειώνεται επίσης η κοιλότητα που γεμίζεται με γράσο (grease-filled space).



Εικόνα 2.5 - Ανάλυση του συστήματος στεγανοποίησης της σύνδεσης μεταξύ άξονα μοτέρ και κοχλία [αριστερά]. Τομή ¼ του ίδιου συστήματος σε συναρμολόγηση [δεξιά].

³⁴ Βιβλιογραφική αναφορά [3]

³⁵ Η βάση αυτή σχεδιάστηκε -πέρα από την στήριξη του μοτέρ- ώστε να διευκολύνει την οργάνωση και την τοποθέτηση των ηλεκτρονικών στοιχείων, που αναφέρθηκαν νωρίτερα, μέσα σε αυτόν τον οριακά επαρκή χώρο.

Παρόλες αυτές τις προσπάθειες, τα αποτελέσματα σε συνθήκες βύθισης ήταν κυμαινόμενα στην καλύτερη περίπτωση, αποτρεπτικά στην χειρότερη. Οι δοκιμές αυτές, που καταγράφονται αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 4, ανέδειξαν τα εξής προβλήματα στην κατασκευή του περιβλήματος μέσω 3D εκτύπωσης με τη μέθοδο FFF³⁶:

- 1) Η διακύμανση στην ποιότητα εκτύπωσης λόγω ορισμένων παραμέτρων (ποιότητα και παλαιότητα των αναλώσιμων, μικροκολλήματα στη λειτουργία κ.α.) έχει ως αποτέλεσμα κυμαινόμενη προστασία από το νερό, στο βαθμό που αυτή είναι εξ' αρχής δυνατόν να επιτευχθεί.
- 2) Η απορρόφηση υγρασίας από το θερμοπλαστικό με την πάροδο του χρόνου (χρησιμοποιήθηκε ABS, PLA και PETG), σχεδόν ανεξάρτητα από τον χρησιμοποιούμενο βαθμό πλήρωσης³⁷, καθώς και οι μικροσπές που δημιουργούνται ενδιάμεσα των επιπέδων εκτύπωσης, οδηγούν εν τέλει στην συγκέντρωση σημαντικής ποσότητας νερού στο εσωτερικό του περιβλήματος³⁸. Ο χρόνος αυτός, βάσει των δοκιμών, κυμαίνεται από 0 (!) έως 15 λεπτά -ωστόσο δεν έγιναν δοκιμές με μικρότερο χρονικό βήμα από 15 λεπτά, καθώς αναζητήθηκε διαφορετική λύση.
- 3) Η επίστρωση/βαφή των παράπλευρων επιφανειών του περιβλήματος (εσωτερικά κι εξωτερικά)³⁹ δεν φαίνεται να εξαλείφει εντελώς το πρόβλημα.

Κατόπιν αυτών των αποτελεσμάτων, δοκιμάστηκε μια τροποποίηση στο σχεδιασμό του περιβλήματος, με την προσθήκη ενός εσωτερικού κυλίνδρου από συμπαγές θερμοπλαστικό. Ένας τέτοιος κύλινδρος ήταν εύκολο να κοπεί από τον αντίστοιχων διαστάσεων σωλήνα με τα καπάκια – η εσωτερική διάμετρος του περιβλήματος ήταν ήδη σχεδιασμένη γι' αυτά.

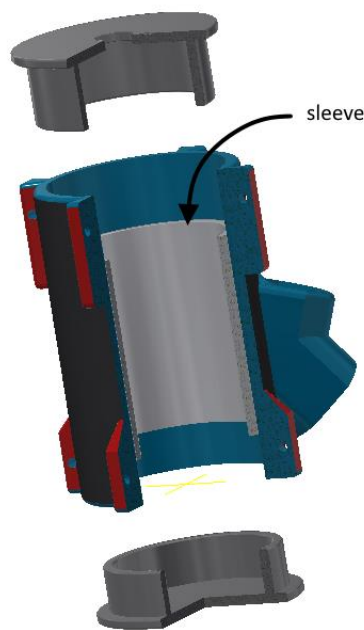
Η στεγανοποίηση με τα καπάκια έγινε και πάλι με χρήση φλατζόκολλας, εσωτερικά πλέον, στα σημεία επαφής τους με το σωλήνα. Μια μικρή οπή ανοίχθηκε στο σημείο που προηγουμένως εισέρχονταν οι καλωδιώσεις. Μια εικόνα του περιβλήματος υπό αυτή την τροποποίηση είναι η ακόλουθη, όπου σημειώνεται το κομμάτι σωλήνα στο εσωτερικό (sleeve, ανοιχτό γκρι):

³⁶ κι ως μην παραληφθεί ως παράμετρος: με τις δυνατότητες και την απόδοση που προσφέρει ο συγκεκριμένος εκτυπωτής (Lulzbot TAZ 4)

³⁷ Δοκιμάστηκε ποσοστό έως και 90%. Το ποσοστό αυτό ωστόσο αυξάνει το χρόνο εκτύπωσης σε τέτοιο βαθμό που εμφανίζονται άλλα προβλήματα, όπως διακοπές λειτουργίας και κολλήματα – και φυσικά οδηγούν την εκτύπωση σε αποτυχία.

³⁸ Σημειώνω βέβαια πως αυτό δεν είναι παρά το πιο πιθανό συμπέρασμα που εγώ μπόρεσα να εξαγάγω από τα δεδομένα. Πιθανόν να υπάρχει διαφορετική ή αναλυτικότερη εξήγηση.

³⁹ Δοκιμάστηκε η επάλειψη με εποξειδική κόλλα δύο συστατικών, σε μία και σε δύο στρώσεις. Επίσης, στο περίβλημα από ABS, δοκιμάστηκε η βαφή με ακετόνη, η οποία -ως διαλύτης του εν λόγω θερμοπλαστικού- τείνει να δημιουργήσει μια λεία επιφάνεια, «κολλώντας» φαινομενικά τις εξωτερικές στρώσεις μεταξύ τους.



Εικόνα 2.6 - Τροποποιημένο περίβλημα με την προσθήκη εσωτερικού κυλίνδρου από συμπαγές θερμοπλαστικό (PVC).

Ο βαθμός στεγανοποίησης βελτιώθηκε έτσι κάπως και ίσως, σε ιδανικές συνθήκες συναρμογής των μερών, να έτεινε στην ικανοποίηση της χρονικής συνθήκης $\Delta t_{underwater}$ (30 min υπό βύθιση), δεχόμενοι ένα μικρό ποσό νερού στο εσωτερικό (μερικά mL)⁴⁰. Βέβαια η ικανοποίηση και της δεύτερης συνθήκης ($\Delta t_{experiment} \sim 4 h$) ήταν πρακτικά αδύνατη, εφόσον ακόμα κι αν αποσυναρμολογούνταν ο μηχανισμός για να στεγνωθεί/καθαριστεί, η επανασυναμολόγησή του με χρήση φλατζόκολλας απαιτεί τουλάχιστον 24 h για να ολοκληρωθεί η διαδικασία βουλκανισμού.

Ένα άλλο μειονέκτημα της προσθήκης του εσωτερικού σωλήνα ήταν η μείωση της «ωφέλιμης» εσωτερικής διαμέτρου του περιβλήματος κατά περίπου 4 mm (το πάχος των σωλήνων είναι περί τα 2 mm), πράγμα που δυσκόλεψε πολύ την διαχείριση των καλωδίων και των ηλεκτρονικών.

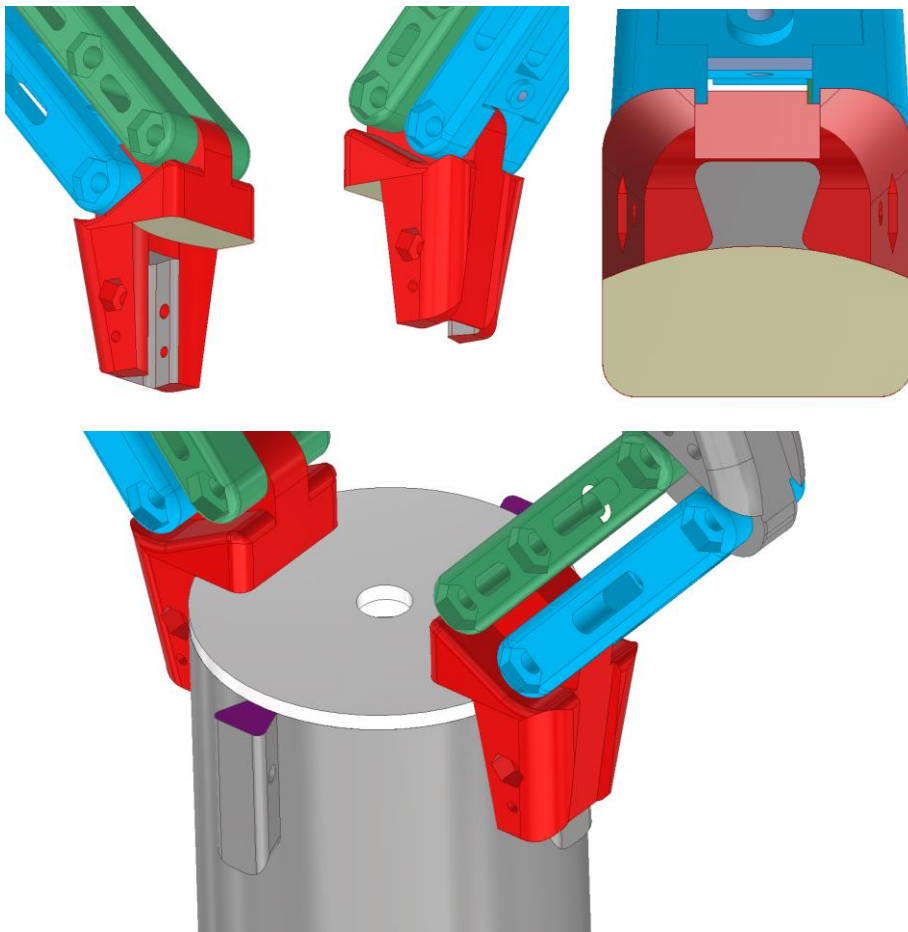
Ο συνδυασμός αυτός λοιπόν εγκαταλείφθηκε ως εναλλακτική/δευτερεύουσα λύση και το περίβλημα προσεγγίστηκε με μια διαφορετική μέθοδο κατασκευής: την κοπή σε CNC mill (φρέζα). Όλα τα υπόλοιπα μέρη του συστήματος διατηρήθηκαν με ελάχιστες τροποποιήσεις ή συνέχισαν να εξελίσσονται με τον ίδιο τρόπο όπως και με το αρχικό περίβλημα. Ακόμα και το ίδιο το περίβλημα, με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά που θα περιγραφούν στη συνέχεια, διατηρήθηκε σχεδόν αυτούσιο σαν σχεδιασμός και στην κατασκευή στην φρέζα. Σημειώνω πως στην κατασκευή αυτή ο σύνδεσμος των καλωδίων και ο στυπιοθλίπτης στερεώνονται πλέον βιδωτά στο περίβλημα, μέσω αντίστοιχων σπειρωμάτων. Η κατασκευή στη CNC φρέζα θα περιγραφεί αναλυτικότερα στο Παράρτημα Γ.

⁴⁰ Το οποίο θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί σε ένα βαθμό, με τη βοήθεια αδιαβροχοποιητικής βαφής στα ηλεκτρονικά και κάποιου σπογγώδους υλικού, ώστε να μην κυκλοφορεί το νερό.

Μετά κι από αυτή την παρένθεση και πριν ολοκληρώσω την περιγραφή του περιβλήματος, θα αναφερθώ σε δύο στοιχεία που άφησα για το τέλος, δεδομένου ότι έμειναν πρακτικά αμετάβλητα στην μετάβαση από την μια κατασκευαστική μέθοδο στην άλλη:

- 1) τον τρόπο ανάρτησης των δακτύλων πάνω στο περίβλημα,
- 2) τον τρόπο ενσωμάτωσης των αισθητήρων «αφής» FSR στα δάκτυλα (που έτσι κι αλλιώς διατηρήθηκαν στην 3D-printed εκδοχή τους).

Όσον αφορά στα δάκτυλα⁴¹, θεώρησα ότι η παράπλευρη στερέωσή τους στο περίβλημα μπορεί να εξοικονομήσει λίγο όγκο και ύψος από τον μηχανισμό – σε σύγκριση με την στερέωσή τους σε κάποια βάση στο άνω καπάκι. Ο τρόπος σύνδεσης που χρησιμοποίησα φαίνεται στην εικόνα 2.7 – σύνδεση που ονομάζεται «σύνδεση χελιδονοουρά»⁴² και χρησιμοποιείται κατά κόρον στην επιπλοποιία και την ξυλουργική.



Εικόνα 2.7 - Στερέωση των δακτύλων παραπλεύρως του περιβλήματος, με dovetail joints. Διακρίνεται με μωβ χρώμα το προφίλ της προεξοχής με σχήμα τραπέζιου.

Η μέθοδος αυτή εξασφαλίζει την στερέωση βάσει γεωμετρίας και τριβής, κάνοντας χρήση μιας μόνο βίδας (υπό ακόμα μικρότερες ανοχές, ούτε αυτή είναι απαραίτητη, αλλά τότε η

⁴¹ σαν σύστημα, δηλαδή: τα δάκτυλα, οι σύνδεσμοι και οι βάσεις τους

⁴² “dovetail joint”, λόγω της ομοιότητας της με την ουρά του πτηνού

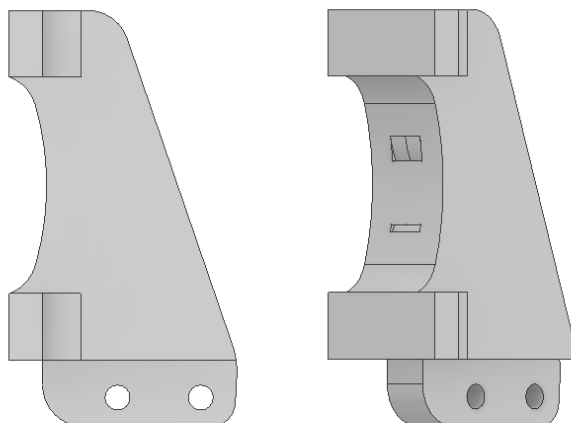
συναρμογή αποκτά λίγο πιο ... μόνιμο χαρακτήρα από τον επιθυμητό). Σε αντίθετη περίπτωση, η όποια βάση θα έπρεπε να στηριχθεί στο άνω καπάκι, δημιουργώντας πιθανό πρόβλημα στην στεγανότητά του ή αυξάνοντας τον αριθμό των απαιτούμενων μερών. Τέλος, πέραν των δύο προεξοχών που απαιτούνται για την στήριξη των δακτύλων, σχεδιάζονται δύο ακόμη υπό στροφή 90° (γύρω από τον διαμήκη άξονα του κυλίνδρου), οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάρτηση διαφόρων εξαρτημάτων (οπτικά συστήματα, πηγές φωτός, αισθητήρες εγγύτητας κλπ) - ή ακόμα δύο δακτύλων, με τις ανάλογες τροποποιήσεις.

Θεωρώ πως ένα ακόμα πλεονέκτημα αυτής της σύνδεσης είναι η ευκολία με την οποία μπορεί να τροποποιηθεί το σχέδιο στο περιβάλλον CAD, ώστε να περιλαμβάνει όσες προεξοχές επιθυμεί ο χρήστης - π.χ. τρεις, για μια ενδεχόμενη εκδοχή του μηχανισμού με τρία δάκτυλα.

Από την άλλη όψη βέβαια, το ιδιαίτερο αυτό σχήμα δεν αποτελεί την πλέον ευκολότερη γεωμετρία για κατεργασία σε φρέζα, εφόσον δεν προμηθευτεί το ανάλογο κοπτικό. Δυστυχώς στα πλαίσια αυτής της εργασίας, οι διαστάσεις του συνδέσμου (5 mm στην ακτινική διεύθυνση, 8mm πλάτος στην έξω «εφαπτόμενη» βάση και 70° για την γωνία των τοιχωμάτων) δεν τροποποιήθηκαν για την μετάβαση στην μέθοδο κατεργασίας με CNC mill και δεν αντιστοιχούν σε κάποιο από τα κοπτικά που μπόρεσα να βρω⁴³.

Στην εικόνα 2.7 φαίνονται οι κατάλληλα διαμορφωμένες εσοχές (γκρι) στις βάσεις των συνδέσμων (κόκκινο), καθώς και η σύνδεσή τους στο περίβλημα (γκρι). Με βιολετί χρώμα σημειώνεται το προφίλ της αντίστοιχα διαμορφωμένης προεξοχής στο περίβλημα. Επίσης, διακρίνονται οι οπές για τις βίδες στήριξης (οι πάνω οπές), με τις εξαγωνικές εσοχές για το παξιμάδι τους. Το κενό που υπάρχει στη βάση μεταξύ της εσοχής και της επίπεδης επιφάνειας στο πάνω μέρος (υπόλευκο χρώμα) είναι ουσιαστικά το πάχος του καπακιού. Αυτή η επίπεδη επιφάνεια προκύπτει από την μετακίνηση του σημείου ανάρτησης των συνδέσμων προς τον κατακόρυφο άξονα του περιβλήματος, για την μείωση του όγκου του μηχανισμού. Στην μέθοδο κατασκευής μέσω 3D εκτύπωσης, εξυπηρετεί και στην σύσφιξη του καπακιού στο περίβλημα.

Τέλος, σχετικά με την ενσωμάτωση των αισθητήρων FSR στα δάκτυλα, προσπάθησα να γίνει όσο το δυνατόν πιο οργανικά, χωρίς ωστόσο να αναγκαστώ να χρησιμοποιήσω (πολλές) επιπλέον βιδωτές συνδέσεις ή να τα διαιρέσω σε περισσότερα τμήματα. Αυτή η “monoblock” προσέγγιση απορρέει εν μέρει κι από την εξελικτική διαδικασία σχεδιασμού των δακτύλων, η αρχική μορφή των οποίων ήταν κάπως έτσι:



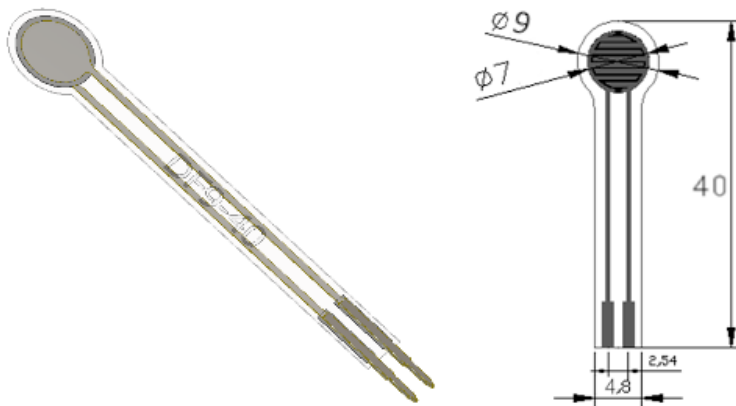
Εικόνα 2.8 - Μια από τις πρώτες μορφές των δακτύλων.

⁴³ Εννοώντας συγκεκριμένα τα κοπτικά με προφίλ σχήματος τραπεζίου.

Πιθανόν η κατεργασιμότητα, η λειτουργικότητα, αλλά και η ευκολία συναρμολόγησης να επωφελούνταν από μια ριζική επανασχεδίαση ή τη διαίρεση τμημάτων - ωστόσο οι σκέψεις αυτές θα αναπτυχθούν προς το τέλος της εργασίας, στο 5^ο κεφάλαιο.

Όπως λοιπόν έχει ήδη αναφερθεί, οι εν λόγω αισθητήρες δεν είναι παρά μεταβλητές αντιστάσεις. Για την διασύνδεσή τους με τον A/D μετατροπέα του μικροελεγκτή απαιτείται ένα απλό κύκλωμα διαιρέτη τάσης (που στην συγκεκριμένη περίπτωση υλοποιείται σε μια πλακέτα για όλους τους αισθητήρες και τοποθετείται εσωτερικά του περιβλήματος), συνεπώς δύο καλώδια ανά αισθητήρα προς το εσωτερικό⁴⁴.

Δεδομένων των προδιαγραφών, τα δάκτυλα σχεδιάστηκαν ώστε να έχουν περίπου 50mm μήκος και περίπου 20mm πλάτος. Οι επώνυμοι αισθητήρες έχουν τυπικά διαστάσεις περί τα 6mm, 12.5mm (1/2") και 20mm ή 25mm (1"). Δηλαδή κάθε επιφάνεια συγκράτησης θα έπρεπε να «καλυφθεί» από τουλάχιστον δύο αισθητήρες ώστε να εξασφαλίζεται μια ικανοποιητική αίσθηση «αφής». Αυτό μεταφράζεται σε τέσσερις αισθητήρες ανά στοιχείο δράσης, επί δύο συν ένα εφεδρικό, συνολικά δώδεκα αισθητήρες. Σε μια προσπάθεια να διατηρηθεί χαμηλά το συνολικό κόστος σε αυτή την πρώτη έκδοση, οι αισθητήρες που επιλέχθηκαν, υπό τον κωδικό DF9-40, είναι ανώνυμοι, όμοιων ωστόσο χαρακτηριστικών με τα επώνυμα ανάλογα⁴⁵. Οι διαστάσεις τους σημειώνονται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 2.9 - Αισθητήρας FSR, υπό την κωδική ονομασία DF9-40 και οι διαστάσεις του.

Οι αισθητήρες FSR κατασκευάζονται συνήθως με δύο τρόπους, αμφότεροι ωστόσο βασίζονται στην ροή φορτίου που αναπτύσσεται, υπό εξωτερική διέγερση, μεταξύ των δύο ακροδεκτών τους, με τιμή αντίστασης που καθορίζεται από το μέτρο της διέγερσης.⁴⁶ Στην πραγματικότητα οι FSR είναι αισθητήρες πίεσης (πίεση = δύναμη/επιφάνεια) και γι' αυτό είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στη γεωμετρία του μέσου διέγερσης: ίδιο ποσό δύναμης, ασκούμενο σε διαφορετική επιφάνεια, οδηγεί σε διαφορετική απόκριση.

Πρακτικά, η απόκριση y (αντίσταση) μπορεί να περιγραφεί ως μια συνάρτηση της διέγερσης x (δύναμης) της μορφής :

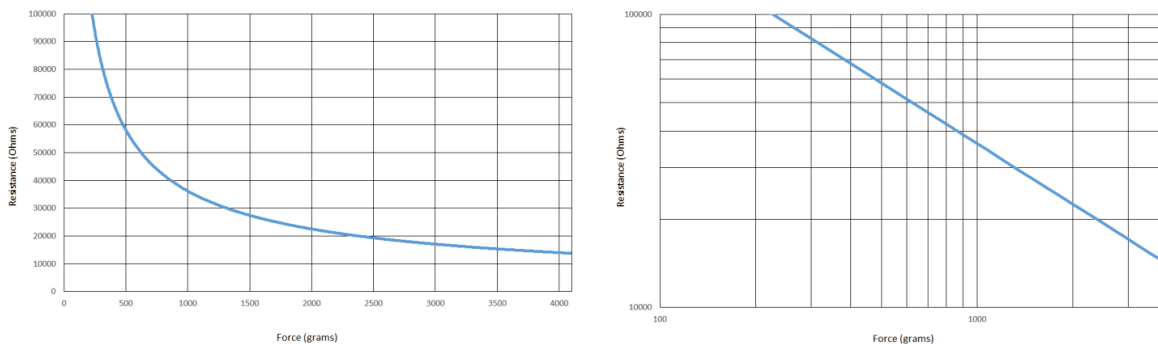
$$y = ax^{-b}$$

η οποία παρουσιάζει γραμμικότητα αν σχεδιαστεί σε λογαριθμική κλίμακα. Η συμπεριφορά αυτή προσομοιάζει στην αίσθηση της ανθρώπινης αφής.

⁴⁴ Πρακτικά επαρκούν $N+1$ καλώδια για N αισθητήρες, δεδομένου ότι ένας εκ των δύο ακροδεκτών ανά αισθητήρα τίθεται σε κοινό δυναμικό για όλους, κι εφόσον η απόστασή τους επιτρέπει μια τέτοια διασύνδεση.

⁴⁵ Λιγότερο από 1/4 της αξίας αντίστοιχων επώνυμων αισθητήρων (πχ Interlink, Sensitronics)

⁴⁶ Μια ακριβέστερη εξήγηση της λειτουργίας τους μπορεί να βρεθεί στην πηγή [5]



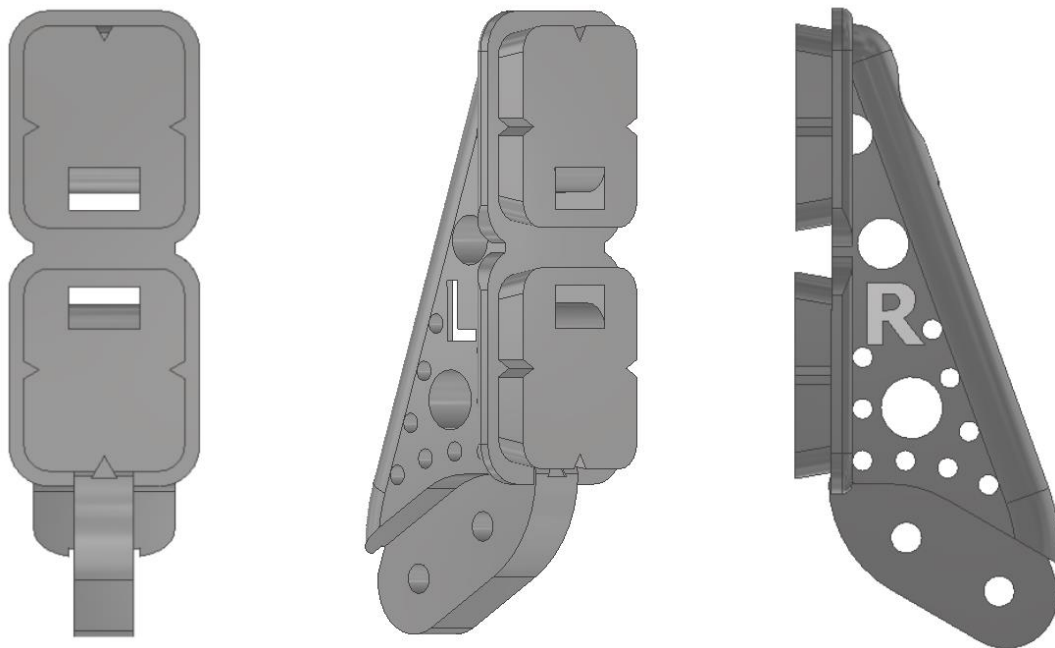
Εικόνα 2.10 - Παράδειγμα χαρακτηριστικής καμπύλης αντίστασης-δύναμης αισθητήρα FSR. Δεξιά σε λογαριθμική κλίμακα.

Λόγω αυτού του χαρακτηριστικού ευαισθησίας, οι κατασκευαστές αναφέρουν τα εξής σημεία προσοχής:

- ⇒ Η βαθμονόμησή τους με χρήση σταθερών ποσών μάζας (πρότυπα βάρη) είναι πρακτικά ανώφελη, καθώς το σημείο εφαρμογής είναι απίθανο να παραμένει σταθερό.
- ⇒ Η στερέωσή τους σε επίπεδη και στιβαρή επιφάνεια είναι προτιμότερη, αλλά μπορεί να γίνει και σε κυλινδρικές επιφάνειες. Είναι θεμιτό να χρησιμοποιείται ταινία διπλής όψης κι όχι κόλλα.
- ⇒ Ιδανικά η επιφάνεια του μέσου διέγερσης δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη της «ενεργής» επιφάνειας του αισθητήρα (7mm στο εν λόγω μοντέλο - βλ. εικόνα 2.9). Σε αντίθετη περίπτωση οι μετρήσεις μπορεί να είναι λανθασμένες.
- ⇒ Η παρεμβολή λεπτού ελαστικού μέσου μεταξύ της επιφάνειας του αισθητήρα και του μέσου διέγερσης βοηθάει στην εξάλειψη σφαλμάτων και διακυμάνσεων από κύκλο σε κύκλο.
- ⇒ Τυχόν καμπύλωση της «ουράς» του αισθητήρα μπορεί να προκαλέσει την προφόρτισή του - συνίσταται η ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας να υπερβαίνει τα περίπου 3mm.
- ⇒ Σημειώνεται επίσης α) ότι η διακύμανση της καμπύλης απόκρισης από αισθητήρα σε αισθητήρα είναι της τάξης του 10%, β) ότι παρατηρούνται φαινόμενα υστέρησης και διολίσθησης λόγω θερμοκρασιακών διακυμάνσεων και γ) ότι ο χρόνος αποκατάστασης είναι τάξης δευτερολέπτου.

Λαμβάνοντας υπόψιν αυτά τα δεδομένα, στη σχεδίαση των δακτύλων -τα οποία χωρίζονται σε δύο φάλαγγες όπως έχει αναφερθεί- ενσωματώνονται ελαστικά καλύμματα, τα οποία καταλήγουν σε μια στρογγυλή επιφάνεια διαμέτρου περίπου 7 mm (όση η ενεργή διάμετρος του αισθητήρα). Επίσης, σαν υποβοήθηση στο κεντράρισμα του αισθητήρα στην επιφάνεια του δακτύλου, προστίθεται εγκοπές στα άκρα τους.

Μερικές φωτογραφίες αναδεικνύουν καλύτερα αυτά τα χαρακτηριστικά.

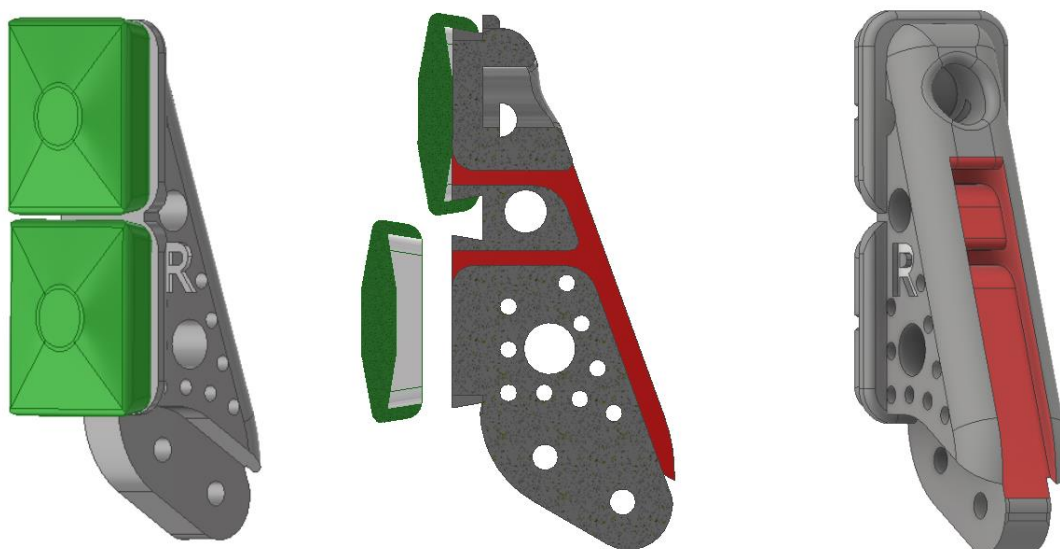


Εικόνα 2.11 - Η σχεδίαση των δακτύλων από διαφορετικές οπτικές γωνίες. Διακρίνονται οι δύο φάλαγγες, οι τριγωνικές εγκοπές για την ακριβέστερη τοποθέτηση των αισθητήρων στο κέντρο των επιφανειών και η προεξέχουσα επιφάνεια περιμετρικά, η οποία χρησιμεύει στην στερέωση των ελαστικών καλυμμάτων.

Σημειώνω την σχεδίαση των επιφανειών ανάρτησης των αισθητήρων (φάλαγγες), όπου η παράπλευρη επιφάνεια έχει ανάποδη κλίση. Αυτό το στοιχείο ενσωματώθηκε ώστε τα ελαστικά καλύμματα, τα οποία έχουν ελαφρά μικρότερες εσωτερικές διαστάσεις, να «κλειδώνουν» στη θέση τους υπό εφελκυστική τάση.

Στην επόμενη εικόνα (2.12) φαίνονται τα δάκτυλα μαζί με τα ελαστικά τους καλύμματα (πράσινο). Στην μεσαία απεικόνιση είναι λίγο περισσότερο εμφανείς οι μειωμένες διαστάσεις στην εσωτερική πλευρά τους, καθώς και η δημιουργία προεξοχής, ώστε το μέρος που εφάπτεται στον αισθητήρα να έχει μέγεθος ανάλογο της ενεργής επιφάνειας του (~7 mm). Για το λόγο αυτό η τοποθέτησή τους στο κέντρο της φάλαγγας είναι αυξημένης σημασίας, οπότε και υπάρχουν οι εγκοπές.

Δεδομένου του μήκους των συγκεκριμένων αισθητήρων και σε μια προσπάθεια καλύτερης διαχείρισης και στερέωσης των διασυνδέσεων προς τη μονάδα ελέγχου, σχεδίασα δύο αυλάκια (κόκκινο χρώμα στην τομή), τα οποία οδηγούν τις απολήξεις στο πίσω μέρος των δακτύλων. Στην πίσω επιφάνεια ενσωματώνεται εσοχή (επίσης με κόκκινο), ώστε οι απολήξεις και τα καλώδια να μην προεξέχουν από τα δάκτυλα. Το πλάτος αυτού του καναλιού είναι ρυθμισμένο ώστε να συνεισφέρει σε κάποιο βαθμό στην στερέωση των καλωδίων. Επιπλέον σταθερότητα μπορεί να επιτευχθεί με την πρόσδεσή τους με λεπτό νήμα, μέσω των μικρών οπών. Σημειώνεται η καμπύλωση της γωνίας (fillet) στο σημείο που οι αισθητήρες εισέρχονται στο αυλάκι τους.



Εικόνα 2.12 - Απεικόνιση των δακτύλων μαζί με τα ελαστικά καλύμματα των αισθητήρων (πράσινο).

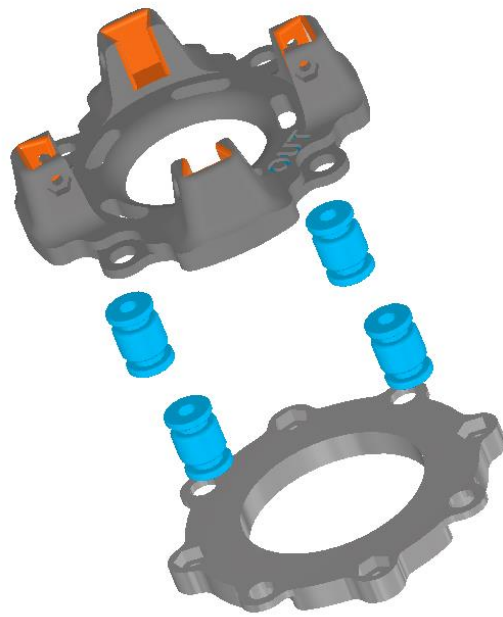
2.4 Σύνδεση με το βραχίονα και ενδοτικότητα

Σχεδόν όλα τα απαραίτητα δεδομένα για την περιγραφή της σύνδεσης του στοιχείου δράσης με τον βραχίονα έχουν ήδη αναφερθεί. Το ίδιο και για την ενσωμάτωση του στοιχείου της ενδοτικότητας, με τη χρήση των αντικραδασμικών και της δευτερεύουσας βάσης.

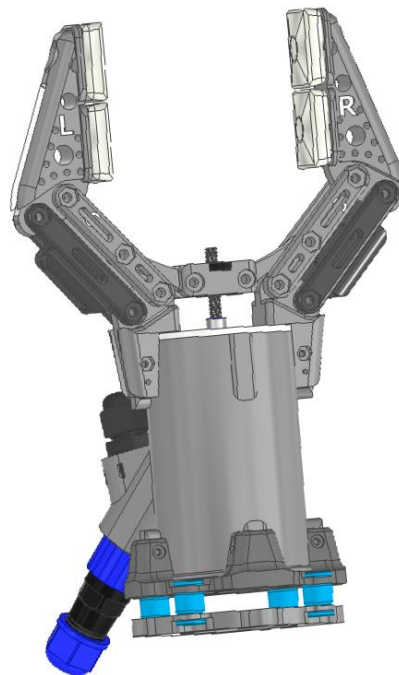
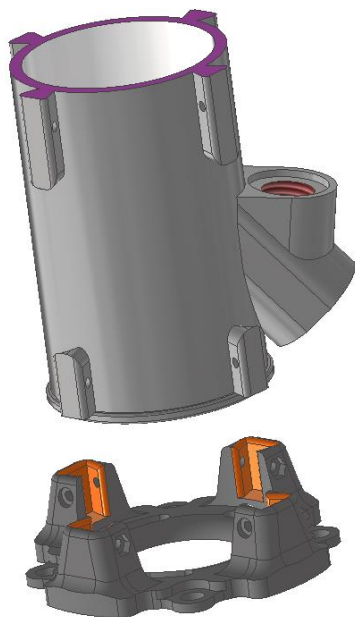
Η βάση αυτή σχεδιάστηκε ώστε να συνδέεται με το περίβλημα με τον ίδιο τρόπο που συνδέονται οι βάσεις των δακτύλων (“dovetail joints”). Το όφελος αυτής της επιλογής βέβαια είναι ότι η σχεδίαση/τροποποίηση στο περιβάλλον CAD και η κατεργασία για την κατασκευή⁴⁷ μπορεί να γίνει με τον ίδιο ακριβώς τρόπο.

Το σύστημα των βάσεων φαίνεται στις ακόλουθες δύο εικόνες. Διακρίνονται με πορτοκαλί οι εσοχές σε σχήμα “dovetail” και οι οπές για τις βίδες και τα παξιμάδια στερέωσης, καθώς και τα αντικραδασμικά στοιχεία (γαλάζιο). Εσοχές για παξιμάδια έχουν σχεδιαστεί και στην κάτω βάση, η οποία συνδέεται με το άκρο του βραχίονα, ώστε να μην περιορίζεται ιδιαίτερα η διαδρομή των ελαστικών κυλίνδρων. Όσο το δυνατόν περισσότερο υλικό έχει αφαιρεθεί από το κέντρο για την μείωση της μάζας των βάσεων.

⁴⁷ Εννοώ την κατεργασία στο περίβλημα, η οποία γίνεται σε CNC mill.



Εικόνα 2.13 - Οι βάσεις σύνδεσης με τον βραχίονα, με τα στοιχεία ενδοτικότητας

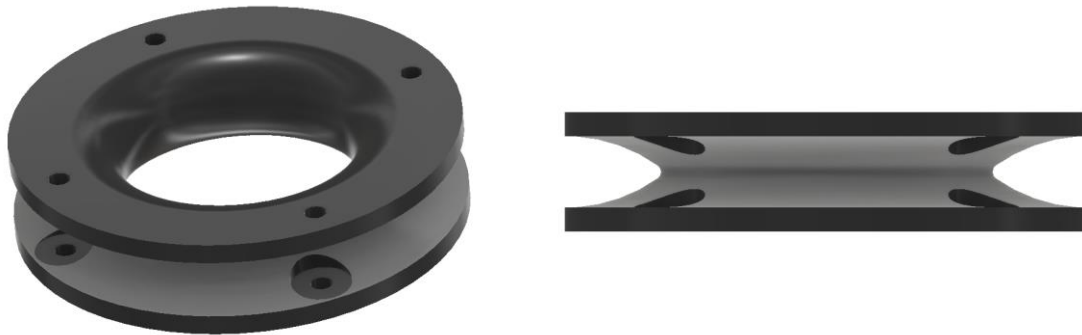


Εικόνα 2.14 - Το περίβλημα με το πάνω μέρος της βάσης σε ανάλυση [αριστερά] και το σύστημα με την βάση του και όλα σχεδόν τα υπόλοιπα στοιχεία [δεξιά]

Θα μπορούσε κανείς να προσέξει ότι η χρήση ένωσης “dovetail” είναι άχρηστη σε αυτή την περίπτωση, καθώς ο μόνος βαθμός ελευθερίας του περιβλήματος στην συναρμολογημένη κατάσταση είναι επί του άξονα του κυλίνδρου - δεν υπάρχει ο β.ε. στην ακτινική διεύθυνση όπως στις βάσεις των δακτύλων. Η ελευθερία αυτή αίρεται με τη χρήση των βιδών στερέωσης.

Συνεπώς, μια προεξοχή ορθογώνιας διατομής θα ήταν εξίσου αποτελεσματική και αρκετά ευκολότερη στην καταργασία της. Η διατήρηση της προηγούμενης γεωμετρίας είναι ένα ακόμα κατάλοιπο της εξελικτικής διαδικασίας με τον 3D εκτυπωτή ως μέσο κατασκευής. Εν γένει, το άνω μέρος της βάσης θεωρώ πως είναι ένα άκομψο στοιχείο και θα μπορούσε να επωφεληθεί από μια διαφορετική προοπτική σχεδίασης.

Παρεμπιπτόντως, μιλώντας για διαφορετική προοπτική σχεδίασης, ένα εναλλακτικό σύστημα για την απόδοση ενδοτικότητας στη βάση είναι το εξής:

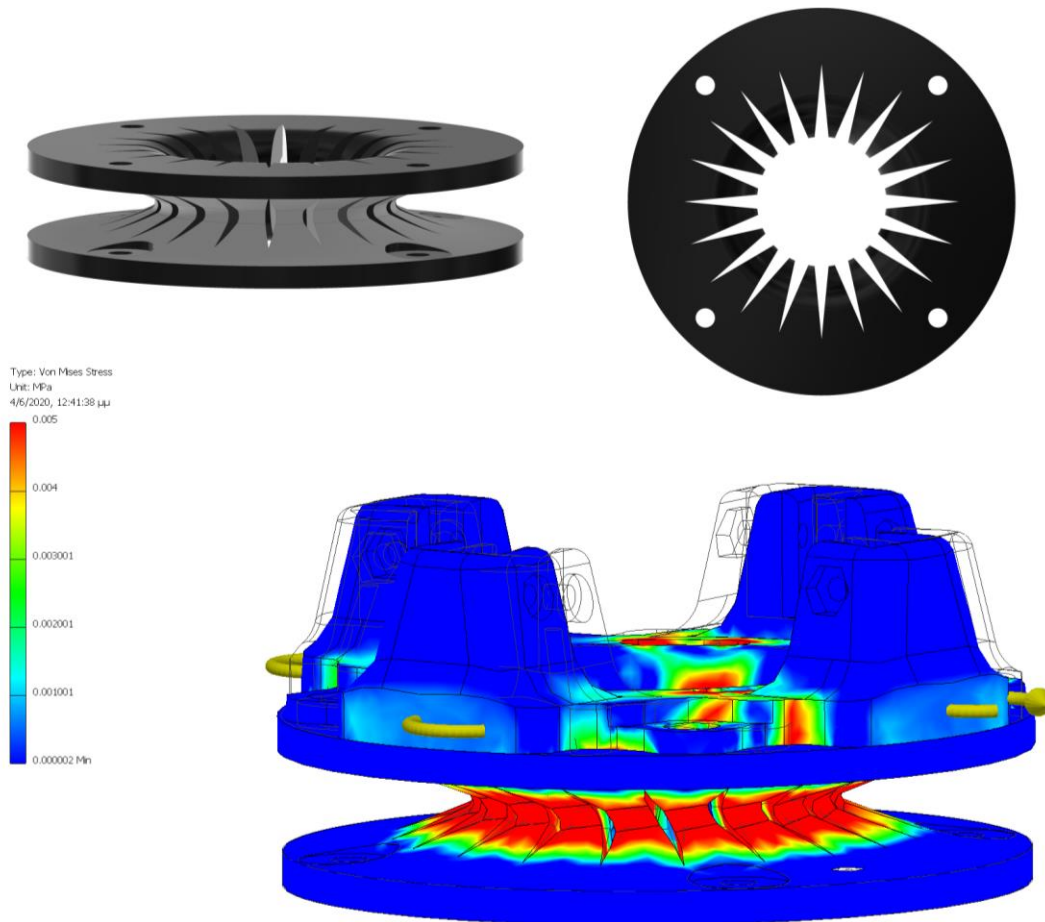


Εικόνα 2.15 - Εναλλακτικό μέσο ενδοτικότητας από TPU, για κατασκευή σε 3D εκτυπωτή

Το στοιχείο αυτό, το οποίο κατασκευάζεται στον 3D εκτυπωτή από ελαστικό θερμοπλαστικό (TPU), μπορεί να παρεμβληθεί μεταξύ της άνω βάσης και του άκρου του βραχίονα, εξαλείφοντας τα αντικραδασμικά και την κάτω βάση. Οι εσοχές γύρω από τις οπές είναι μεγαλύτερης διαμέτρου, ώστε να χρησιμοποιηθούν μεταλλικές ροδέλες μαζί με το παξιμάδι -καθώς το τελευταίο μπορεί να εισχωρήσει στην οπή υπό τάση, λόγω ελαστικότητας του υλικού.

Μέσω του τοροειδούς σχήματος είναι δυνατόν να μεταβληθεί το ποσό της ενδοτικότητας, μεταβάλλοντας μόνο την εσωτερική διάμετρο.

Σημειώνεται ωστόσο ότι η μορφή αυτή προσδίδει ενδοτικότητα με ένα «βαθμό ελευθερίας», καθώς δεν επιτρέπει τη στροφή γύρω από τον κατακόρυφο άξονα. Μια πιθανή μετατροπή που θα μπορούσε να εξασφαλίσει και αυτόν το β.ε. είναι η εξής (η οποία όμως δεν δοκιμάστηκε πρακτικά):



Εικόνα 2.16 - Εναλλακτικό μέσο ενδοτικότητας από TPU. Οι εγκοπές σχεδιάζονται ώστε να προσδίδουν και 2^ο βαθμό ελευθερίας (στροφή γύρω από τον κατακόρυφο άξονα - τον άξονα συμμετρίας της βάσης). Στο κάτω μέρος της εικόνας προσομοιώνεται η παραμόρφωση του μέσου, υπό ροπή ασκούμενη στην περιφέρεια της βάσης. Διακρίνεται η στροφή ως προς την αρχική θέση, το περίγραμμα της οποίας φαίνεται με μαύρες ακμές.

2.5 Το οπτικό σύστημα

Ανέφερα στο υποκεφάλαιο 1.5 ότι καθοριστικός παράγοντας στην επιλογή του οπτικού μέσου ήταν η συμβατότητά του με το λογισμικό ROS. Ενώ λοιπόν υπάρχουν στην αγορά αρκετά οικονομικές κάμερες HD (720p) ή FHD (1080p), με ικανοποιητικό framerate (30 ή 60 fps) και σε πολύ μικρό σχήμα (βλ. εικόνα 2.16) και εγγενή προστασία IP68, η αναγνώρισή τους στο ROS δεν κατέστη δυνατή μέχρι τη στιγμή που γράφεται αυτό το κείμενο.

Επιλέχθηκαν λοιπόν οι εξής δύο web-κάμερες που υπήρχαν διαθέσιμες από παλαιότερες εφαρμογές, με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Creative Live! Cam Sync HD⁴⁸ : 720p, 30fps, USB2.0
- Hercules Dualpix HD720p Emotion⁴⁹ : 720p, 30fps, USB 2.0

⁴⁸ Επίσημη ιστοσελίδα κατασκευαστή: <https://en.creative.com/p/peripherals/live-cam-sync-hd>

⁴⁹ Επίσημη ιστοσελίδα κατασκευαστή: <https://support.hercules.com/en/product/dualpixhd720pemotion-en/>

από τις οποίες αφαιρέθηκε το πλαστικό περίβλημα, ώστε η ηλεκτρονική πλακέτα (PCB) με το φακό και τον αισθητήρα να προσαρμοστεί σε αυτοσχέδιο αδιάβροχο πλέον περίβλημα και, ει δυνατόν, να εξοικονομηθεί κάπως μάζα και όγκος.

Για λόγους απλότητας, τα περιβλήματα κατασκευάστηκαν με τον εξής τρόπο: Σχεδιάστηκε για κάθε PCB μια κατά το δυνατόν λεπτή βάση. Από το προφίλ αυτής της βάσης, τυπώθηκε στον 3D εκτυπωτή ένα καλούπι με ύψος περί τα 20mm.

Στην συνέχεια -και καθώς συγκυριακά οι διαστάσεις το επέτρεψαν- με τα καλούπια αυτά διαμορφώθηκαν, σε θερμοκρασία περί τους 80°C, κομμάτια σωλήνα PCV διαμέτρου 40mm, ώστε να πάρουν το εξωτερικό σχήμα από τα καλούπια.

Κατόπιν, κόπηκαν από δύο «καπάκια» plexiglass (πάχους 2mm και 3mm) για κάθε περίβλημα, τα οποία κολλήθηκαν με εποξειδική κόλλα στις άκρες τους.

Τα καλώδια USB από τις κάμερες περάστηκαν μέσα από στυπιοθλίπτες, ώστε να αποφευχθεί η κοπή τους σε περίπτωση μελλοντικής επέμβασης.⁵⁰

Σημειώνεται ότι και οι δύο κάμερες είχαν από μια μικρή λυχνία LED στο PCB τους. Τα LED αυτά δεν αφαιρέθηκαν μιας και είναι μάλλον χρήσιμο να φαίνεται η λειτουργία της κάμερας, ακόμα και σε αυτή την περίπτωση. Ωστόσο μέσα στο κλειστό περίβλημα, η θερμότητά δημιουργούσε συμπύκνωση επάνω στα διαφανή καπάκια, με αποτέλεσμα τη μειωμένη ορατότητα. Για τον λόγο αυτό, εντός των περιβλημάτων τοποθετήθηκαν σφαιρίδια απορρόφησης της υγρασίας (silica gel – σύνηθες σε περιβλήματα ηλεκτρονικών ειδών κ.α.).

Για την ανάρτηση των καμερών στο περίβλημα του στοιχείου δράσης χρησιμοποιήθηκαν ενώσεις τύπου dovetail, όπως και στις βάσεις των δακτύλων. Η κλίση υπό την οποία τοποθετείται το περίβλημα της κάμερας στο σώμα του στοιχείου δράσης, καθώς και η απόστασή της βάσης της από το άνω καπάκι, ρυθμίστηκαν ώστε το κέντρο του οπτικού πεδίου να βρίσκεται περίπου στο μέσο των δακτύλων.

Ως επιπλέον πηγή φωτός, για την περίπτωση όπου αυτή θα είναι χρήσιμη, σχεδιάστηκε μια μικρή βάση στην οποία μπορεί να τοποθετηθεί μια λυχνία LED. Επιλέχθηκε μια λυχνία με ίδια τάση λειτουργίας με την τροφοδοσία του συστήματος (12V) και ισχύ 9W (περί τα 150lm, σύμφωνα με τον κατασκευαστή), η οποία έχει ονομαστικό δείκτη προστασίας IP68. Σημειώνεται ότι, ελλείψει πειραματικής επιβεβαίωσης, επιλέχθηκε η σχετικά ουδέτερη θερμοκρασία χρώματος 6500K (“cool white”). Μια ακόμη υψηλότερη θερμοκρασία ίσως να είναι καλύτερη, δεδομένου ότι ο συντελεστής απορρόφησης του νερού ευνοεί τα χαμηλότερα μήκη κύματος⁵¹ (αντιστοιχία σε θερμοκρασία χρώματος >10000K).

⁵⁰ Στην αντίθετη περίπτωση που θα είχαν περαστεί μέσα από κάποιο κυλινδρικό σχήμα και γεμιστεί με εποξειδική κόλλα, ώστε να εξασφαλιστεί η αδιαβροχοποίηση.

⁵¹ https://en.wikipedia.org/wiki/File:Water_absorption_coefficient_large.gif



Εικόνα 2.17 - Webcam Creative Live!Cam [αριστερά]. Φαίνεται το PCB με τον αισθητήρα & το φακό, μέσα στο περίβλημα από PVC και τα δύο διαφανή καπάκια από ακρυλικό πλαστικό. Στην παράπλευρη επιφάνεια φαίνεται η βάση για το περίβλημα του στοιχείου δράσης και η επιπλέον λυχνία LED, στο πίσω μέρος. Στο κάτω μέρος διακρίνεται με μαύρο χρώμα ο στυπιοθλίπτης. Ενδοσκοπική κάμερα μικρών διαστάσεων IP68, 720p (7mm διάμετρος, 50mm μήκος) [δεξιά].

2.6 Κατασκευή-συναρμολόγηση των μερών και τεχνικά σχέδια

Πριν ολοκληρώσω το κεφάλαιο, θα ήθελα να εισαγάγω τους οδηγούς κατασκευής και συναρμολόγησης για τις δύο χρησιμοποιούμενες μεθόδους (3D εκτυπωτή και CNC mill). Οι οδηγοί αυτοί περιέχουν και κάποιες επιπλέον λεπτομέρειες σχετικές με το σχεδιασμό και την ανάπτυξη του συστήματος, στις οποίες επέλεξα να μην αναφερθώ αναλυτικά έως τώρα, καθώς θεωρώ πως θα ήταν κουραστικό. Επί τη ευκαιρία, εισάγω και τα υπόλοιπα παραρτήματα, όπου δίνονται επιπλέον χρήσιμες πληροφορίες.

Καταρχάς, βασικές διαστάσεις και αναπαραστάσεις όλων των επιμέρους τμημάτων του μηχανισμού μπορούν να βρεθούν στο [Παράρτημα Α](#).

Στο [Παράρτημα Β](#) συντάσσονται αναλυτικά τα κυκλωματικά διαγράμματα του μηχανισμού.

Στο [Παράρτημα Γ](#) παρουσιάζονται οι μέθοδοι κατασκευής των επιμέρους τμημάτων του μηχανισμού. Γίνεται διάκριση μεταξύ των δύο μεθόδων (3D printing και CNC milling).

Στο [Παράρτημα Δ](#) δίνονται αναλυτικές οδηγίες, σχηματικές και περιγραφικές, για την ορθή συναρμολόγηση κι αποσυναρμολόγηση του μηχανισμού. Επίσης, σε συνδυασμό με το Παράρτημα Β, δίνονται οδηγίες για την ενσωμάτωση των ηλεκτρικών μερών του συστήματος.

Στο [Παράρτημα Ε](#) επιχειρείται μια αναλυτική περιγραφή της συνάρτησης μεταξύ της γωνίας στροφής του άξονα του επενεργητή και του πλάτους ανοίγματος των δακτύλων.

Τέλος, στο [Παράρτημα ΣΤ](#) παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό κοστολόγιο ανά μονάδα τελικού στοιχείου δράσης και στο [Παράρτημα Ζ](#) ένα πλήρες ευρετήριο των αρχείων που παραδίδονται με την εργασία.

3 Ηλεκτρολογικό Υλικό & Λογισμικό Ελέγχου

Το κεφάλαιο αυτό χωρίζεται σε δύο τμήματα: α) την αναλυτική περιγραφή των ηλεκτρικών/ηλεκτρονικών μερών του μηχανισμού και β) το λογισμικό λειτουργίας και ελέγχου του μηχανισμού.

Όσον αφορά στο πρώτο μέρος (υποκεφάλαια 3.1 έως 3.3), δεδομένου ότι η συλλογιστική πίσω από την επιλογή τους δεν αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (εκτός ίσως από τον επενεργητή), σκοπός μου είναι να αναφερθώ στα τεχνικά χαρακτηριστικά των επιμέρους στοιχείων και τις διασυνδέσεις τους. Θα αναφερθώ επίσης στον τρόπο σύνδεσης του μηχανισμού με τον απομακρυσμένο Η/Υ. Για την ευκολότερη εποπτεία των μερών κάνω τη διάκριση μεταξύ:

- εσωτερικών του μηχανισμού στοιχείων (επενεργητής, μονάδα ελέγχου, motor driver, IMU & αισθητήρες αφής)
- εξωτερικών του μηχανισμού στοιχείων (οπτικό μέσο, πηγή φωτός & διασύνδεση με απομακρυσμένο Η/Υ)

Στο δεύτερο μέρος (υποκεφάλαια 3.4 και 3.5) θα ξεκινήσω με τις απαιτήσεις του λογισμικού, αιτιολογώντας κατά το δυνατόν τον τρόπο προσέγγισης που επέλεξα για τα διάφορα θέματα. Θα προσπαθήσω να συντάξω αλγοριθμικά τις διαδικασίες ελέγχου. Στη συνέχεια θα παρουσιάσω τμηματικά τον κώδικα ελέγχου, ο οποίος είναι γραμμένος μέσω του Arduino IDE. Τέλος, θα δώσω μερικά παραδείγματα λειτουργιών του μηχανισμού.

3.1 Στοιχεία εσωτερικά του μηχανισμού

Σύμφωνα με την παραπάνω διάκριση, τα στοιχεία που ταξινομούνται ως «εσωτερικά» του μηχανισμού είναι:

1. Portescap 16G88 / B16 gearhead / MR2 encoder [DC motor -brushed]

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2, η επιλογή του μοτέρ έγινε υπό περιορισμούς, με βάση την υψηλότερη αναλογία κόστους/απόδοσης και χαρακτηριστικών των προϊόντων που ήταν διαθέσιμα στην αγορά.

Το εν λόγω σύστημα επιλέχθηκε κυρίως λόγω του επώνυμου του κατασκευαστή του, της χαμηλής τιμής (περί τα €12 / σύστημα), της υψηλής επιτρεπόμενης ισχύος (5W ονομαστικά) και της ενσωμάτωσης encoder ικανοποιητικής ανάλυσης (16 παλμοί/περιστροφή στο μοτέρ).

Μια ανάλυση των απαιτήσεων του μηχανισμού ως προς την προδιαγραφή του υποκεφαλαίου 1.6 ($\Delta t_{open-to-close} \leq 2\text{ s}$) έγινε στο υποκεφάλαιο 2.2, όπου δείχθηκε ότι το σύστημα αυτό είναι τουλάχιστον επαρκές.

Σημειώνω πως η ανάλυση του encoder πολλαπλασιάζεται με τον λόγο μείωσης, συνεπώς προκύπτει για την περιστροφή του κοχλίου ίση με:

$$128 * 27 = 3456 \frac{\text{παλμοί}}{\text{περιστροφή}}$$

Η ανάλυση αυτή μεταφράζεται σε μοίρες περιστροφής του κοχλίου:

$$360/3456 = 0.104^\circ/\text{παλμό}$$

Σημειώνω επίσης, ότι το μέγιστο πλάτος ανοίγματος (περίπου 60mm) διαγράφεται σε περίπου 3.2 περιστροφές του κοχλίου (από τη μηδενική θέση)⁵².

Η εξίσωση που περιγράφει το πλάτος ανοίγματος συναρτήσει της γωνίας στροφής του μοτέρ υπολογίζεται στο Παράρτημα Ε.



Εικόνα 3.1 - Γραφικό του επενεργητή που επιλέχθηκε (DC motor, gearhead, encoder).

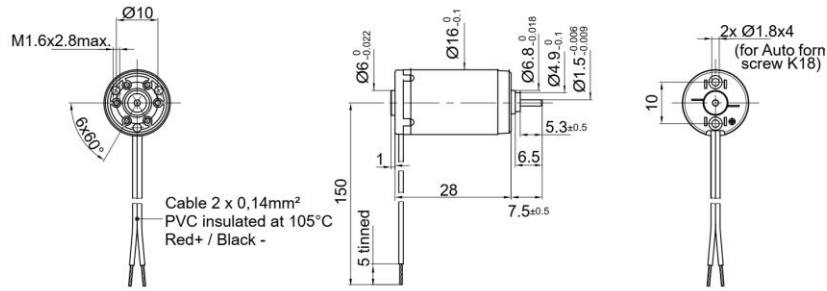
Αντιγράφεται από τον κατάλογο του κατασκευαστή ο πίνακας με τα χαρακτηριστικά του μοτέρ και στη συνέχεια οι αντίστοιχοι πίνακες που αφορούν την κεφαλή μείωσης και τον ενσωματωμένο αισθητήρα.

Όπως σημειώνεται στην εικόνα 3.2, η ονομαστική τάση του μοτέρ είναι 8V. Εν γένει οποιοδήποτε DC μοτέρ μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλο το εύρος τάσεων που ορίζει ο κατασκευαστής (π.χ. εν προκειμένου από 3V έως 32V), δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες ανά περίπτωση, καθώς η αντίσταση της περιέλιξης ("Terminal Resistance" στον πίνακα της εικόνας 3.2) διαφέρει από μοτέρ σε μοτέρ με διαφορετική ονομαστική τάση.

⁵² όπου οι ακραίες επιφάνειες των δύο δακτύλων (συμπεριλαμβανομένων των ελαστικών καλυμμάτων) εφάπτονται.

16G88

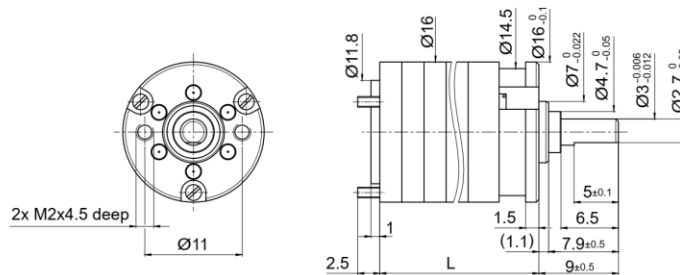
Ø 16 mm • Precious metal commutation • 5.8 mNm



Dimensions in mm.

Electrical Data	Symbol	16G88 **** .1						Unit
		220P	214E	213E	211E	210E	205E	
1 Nominal Voltage	V	3	8	9	12	15	32	Volt
2 No-Load Speed	n_0	11,025	9,250	7,980	8,690	9,000	8,150	rpm
3 No-Load Current	I_0	45.0	10.0	8.0	6.5	5.5	2.0	mA
4 Terminal Resistance	R	0.5	5.4	7.6	13.0	19.5	135.0	Ω
5 Output Power	P_{2max}	4.1	4.2	4.6	4.2	4.2	2.5	W
6 Stall Torque	mNm	16 (2.27)	12.1 (1.72)	12.7 (1.8)	12.1 (1.72)	12.2 (1.73)	8.8 (1.25)	mNm (oz-in)
7 Efficiency	η_{max}	83	84	84	84	84	82	%
8 Max Continuous Speed	$n_{e max}$	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	rpm
9 Max Continuous Torque	$M_{e max}$	5.5 (0.76)	5.3 (0.76)	5.8 (0.83)	5.4 (0.77)	5.4 (0.77)	4.8 (0.68)	mNm (oz-in)
10 Max Continuous Current	$I_{e max}$	2.20	0.66	0.55	0.42	0.35	0.13	A
11 Back-EMF Constant	k_E	0.27	0.86	1.12	1.37	1.65	3.90	mV/rpm
12 Torque Constant	k_M	2.58	8.20	10.70	13.10	15.80	37.20	mNm/A
13 Motor Regulation	R/k^2	75.1	80.3	66.4	75.75	78.11	97.55	10 ³ /Nms
14 Friction Torque	T_F	0.12 (0.02)	0.08 (0.02)	0.09 (0.02)	0.09 (0.02)	0.09 (0.02)	0.07 (0.01)	mNm (oz-in)
15 Rotor Inductance	L	0.01	0.12	0.15	0.26	0.40	1.70	mH
16 Mechanical Time Constant	τ_m	6.0	6.4	5.3	6.1	5.8	7.8	ms
17 Rotor Inertia	J	0.80	0.80	0.80	0.80	0.74	0.80	g-cm ²
General Data								
18 Thermal Resistance (rotor/body)	R_{th1}/R_{th2}	8/35						°C/W
19 Thermal Time Constant (rotor/stator)	t_{th1}/t_{th2}	6/500						S
20 Operating Temperature Range:	motor	-30°C to 85°C (-22°F to 185°F)						°C (°F)
	rotor							100°C (212°F)
21 Shaft Load Max.: (5 mm. from bearing)	-radial	With sleeve bearings						N (oz)
	-axial	1.5 (5.4)						N (oz)
	-radial	100 (359.6)						mm (inch)
22 Shaft Play:	-radial	<0.03 (0.0012)						mm (inch)
	-axial	0.15 (0.0059)						mm (inch)
23 Weight	g	24 (0.85)						g (oz)

Εικόνα 3.2 - Τεχνικά χαρακτηριστικά του μοτέρ. Ο κωδικός του μοτέρ (214E) αντιστοιχεί σε ονομαστική τάση 8V και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της αντιστοιχίας στήλης.



Dimensions in mm.

Ratio	5	9	15	27	45	81	135	141	243	405	729	1215	2187
1 Number of Gear Stages	2	2	3	3	4	4	5	5	5	6	6	7	7
2 Direction of Rotation	=	=	≠	≠	=	=	≠	≠	≠	=	=	≠	≠
3 Efficiency	0.81	0.81	0.73	0.73	0.65	0.65	0.59	0.59	0.59	0.53	0.53	0.48	0.48
4 L (mm)	10.5	10.5	13	13	15.5	15.5	18	18	18	20.5	20.5	23	23
5 Weight	g	7	7	8	8	9	9	10	10	10	11	11	12
	(oz)	(0.246)	(0.246)	(0.282)	(0.282)	(0.317)	(0.317)	(0.352)	(0.352)	(0.352)	(0.388)	(0.388)	(0.423)

6 Available with Motor – L2 - Length with motor (mm)	5	9	15	27	45	81	135	141	243	405	729	1215	2187
16C18	29.2	29.2	31.7	31.7	34.2	34.2	36.7	36.7	36.7	39.2	39.2	41.7	41.7
16N78	41.5	41.5	44	44	46.5	46.5	49	49	49	51.5	51.5	54	54
16G88	41.5	41.5	44	44	46.5	46.5	49	49	49	51.5	51.5	54	54
17S78	32.2	32.2	34.7	34.7	37.2	37.2	39.7	39.7	39.7	42.2	42.2	44.7	44.7
17N78	39.4	39.4	41.9	41.9	44.4	44.4	47.9	47.9	47.9	49.4	49.4	51.9	51.9
P110	29.5	29.5	32	32	34.5	34.5	37	37	37	39.5	39.5	42	42
16DCP/16DCT/17DCT CB	39.5	39.5	42	42	44.5	44.5	47	47	47	49.5	49.5	52	52
16DCP/16DCT/17DCT PM	39	39	41.5	41.5	44	44	46.5	46.5	46.5	49	49	51.5	51.5

Characteristics	5	B16 • 0 •	B16 2R • 0 •
7 Shaft Bearings		Sleeve	Ball Bearing
8 Maximum Static Torque	Nm (oz-in)	0.3 (42)	0.3 (42)
9 Maximum Radial Force @ 8mm from mounting face	N (lb)	5 (1.1)	10 (2.2)
10 Maximum Axial Force	N (lb)	5 (1.1)	10 (2.2)
11 Maximum Press Fit Force	N (lb)	100 (23)	100 (23)
12 Average Backlash @ no-load		1.5°	1.5°
13 Average Backlash @ 0.3 Nm		3°	3°
Shaft Play:			
14 -radial	µm	≤ 20	≤ 10
15 -axial	µm	50-150	≤ 100
16 Maximum Recommended Input Speed	rpm	8000	8000
17 Operating Temperature Range:	°C (°F)	-30 to +65 (-22 to +150)	

Εικόνα 3.3 - Τεχνικά χαρακτηριστικά της κεφαλής μείωσης. Η κεφαλή του παρόντος συστήματος έχει λόγο μείωσης 27:1 και τα χαρακτηριστικά που σημειώνονται στην αντίστοιχη στήλη.

Στο κάτω δεξιά μέρος της εικόνας 3.4 (επόμενη) φαίνεται η συνδεσμολογία του συστήματος, η οποία περιλαμβάνει συνολικά έξι⁵³ καλώδια, σε ένα σύνδεσμο τύπου Molex PicoBlade (1.25mm pitch):

- δύο καλώδια για την τροφοδοσία του μοτέρ: **Motor+** [pin 1] & **Motor-** [pin 6]
- δύο καλώδια για την τροφοδοσία του encoder, η οποία είναι σε τάση 5V: **Vcc** [pin 2] & **GND** [pin 5]
- δύο καλώδια για την έξοδο των σημάτων του encoder, τα οποία είναι τετραγωνικοί παλμοί (50% ονομαστικό duty cycle), με ονομαστική διαφορά φάσης 90°: **Channel A** [pin 3] & **Channel B** [pin 4]

⁵³ Ο σύνδεσμος που απεικονίζεται στην 3.4 είναι ένας διαφορετικού τύπου (2x5pin, 2.54mm pitch). Το pin 7 αντιστοιχεί στο δυναμικό κανάλι Z (**Channel Z**) του encoder, το οποίο υπάρχει μόνο σε συγκεκριμένες εκδοχές του. Στην παρούσα εκδοχή δεν υπάρχει.

Σημειώνεται ότι η μέγιστη τιμή της έντασης ρεύματος στον encoder είναι:

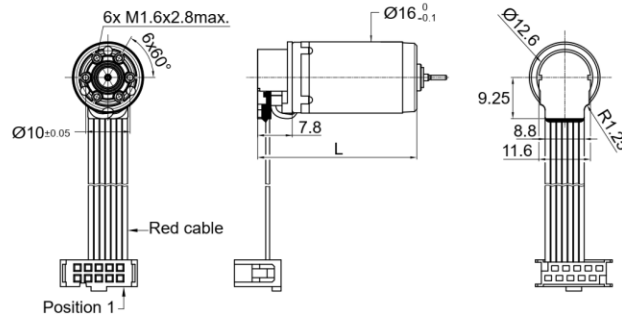
$$I_{enc} = 25 \text{ mA}$$

Encoders

Portescap

MR2

Integrated Magnetic Encoder

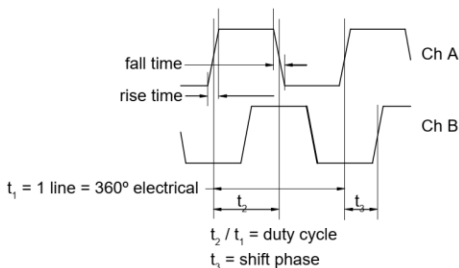


Dimensions in mm.

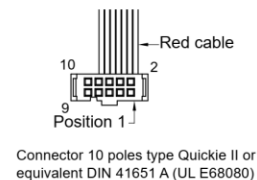
Electrical Data	Characteristics @ 22° C		Unit
1 Number of Lines Available	512, 500, 400, 256, 250, 200, 160, 128, 100, 80, 64, 50, 40, 32, 20, 16, 8, 4		LPR
2 Supply Voltage	5 ± 10%		Volt
3 Supply Current	Typical/Maximum	20/25	mA
4 Rise Time	60		ns
5 Fall Time	60		ns
6 Maximum Count Frequency	1.28		MHz
7 Electrical Phase Shift	90 ± 45		degree
8 Duty Cycle	50 ± 15		%
9 Maximum Speed @ 512	37,500		rpm
10 Operating Temperature Range:	-25 to +85		°C (°F)
11 Weight	Varies by motor size. Contact us.		g (oz)

Available on Motor Types*	12G88	13N88	16G88	16N98	17S98	17N98
Length with motor mm (in)	33.8 (1.33)	34.35 (1.35)	35.8 (1.41)	33.2 (1.31)	23.9 (0.94)	31.1 (1.22)

Output signals:



Encoder Connections	
1	Motor+
2	Vcc
3	Channel A
4	Channel B
5	GND
6	Motor -
7	Channel Z



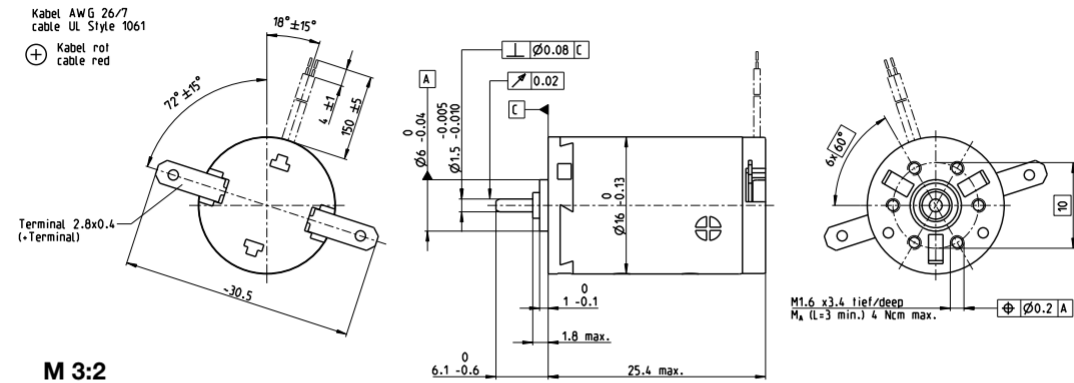
Εικόνα 3.4 - Τεχνικά χαρακτηριστικά του encoder. Εξάγει δύο σήματα τετραγωνικής παλμοσειράς, με διαφορά φάσης 90 μοιρών. Η ανάλυση του παρόντος μοντέλου είναι 128 παλμοί ανά περιστροφή του άξονα του μοτέρ.

Τα τεχνικά φυλλάδια σε μορφή .pdf υπάρχουν στο αρχείο της εργασίας:

{:\UndEE_electrical\~Datasheets\}

Σημειώνω ότι στα πειράματα που έγιναν, ένα από τα μοτέρ Portescap εμφάνισε δυσλειτουργία στον encoder. Για το λόγο αυτό, στο ανταλλακτικό αντίτυπο του συστήματος τοποθετήθηκε εφάμιλλος συνδυασμός μοτέρ-κεφαλής μείωσης-encoder της Maxon, με τα εξής χαρακτηριστικά:

A-max 16 Ø16 mm, Graphite Brushes, 2 Watt



M 3:2

- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

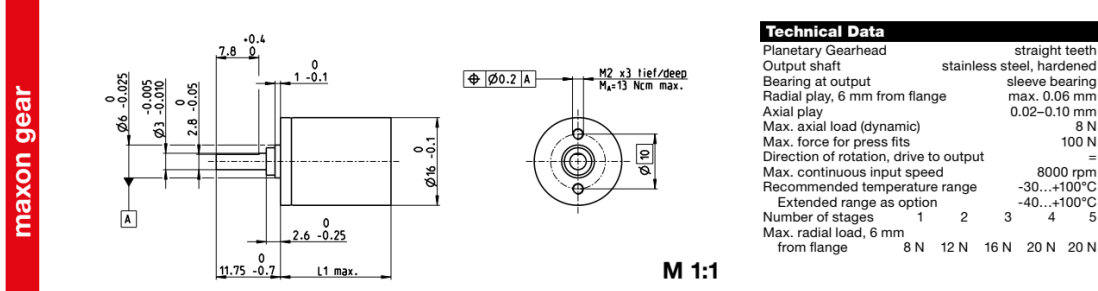
Part Numbers

	110061	110062	110063	110064	110065	110066	110067	110068	110069	110070
with terminals										
with cables	139821	352853	352854	352855	325083	352856	205903	352857	266076	352858

Motor Data											
Values at nominal voltage											
1 Nominal voltage	V	1.5	3	6	9	12	14	15	18	21	30
2 No load speed	rpm	10200	11500	9360	11500	11500	11500	11000	10900	11300	10500
3 No load current	mA	282	164	65.6	54.6	41	35.1	31.1	25.9	23	15
4 Nominal speed	rpm	9010	8060	3280	5510	5460	5500	4860	4810	5100	4180
5 Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	0.579	1.29	2.42	2.36	2.34	2.35	2.35	2.33	2.28	2.24
6 Nominal current (max. continuous current)	A	0.72	0.72	0.495	0.394	0.293	0.253	0.224	0.186	0.162	0.105
7 Stall torque	mNm	5.36	4.65	4.05	4.84	4.78	4.82	4.54	4.48	4.49	4.04
8 Stall current	A	4.1	2.03	0.727	0.704	0.521	0.451	0.378	0.311	0.276	0.164
9 Max. efficiency	%	54	51	49	52	52	52	51	51	50	48
Characteristics											
10 Terminal resistance	Ω	0.366	1.48	8.25	12.8	23	31.1	39.7	57.9	76.1	183
11 Terminal inductance	mH	0.017	0.052	0.306	0.467	0.83	1.13	1.42	2.05	2.61	6.01
12 Torque constant	mNm/A	1.31	2.29	5.57	6.88	9.17	10.7	12	14.4	16.3	24.7
13 Speed constant	rpm/V	7290	4170	1720	1390	1040	893	795	663	587	387
14 Speed / torque gradient	rpm/mNm	2040	2690	2540	2580	2620	2590	2630	2660	2750	2880
15 Mechanical time constant	ms	22.6	23.1	23.1	23.2	23.3	23.3	23.5	23.4	23.5	23.9
16 Rotor inertia	gcm ²	1.06	0.82	0.868	0.859	0.849	0.859	0.852	0.838	0.816	0.793

Εικόνα 3.5 - Τεχνικά χαρακτηριστικά του μοτέρ Maxon, με κωδικό 110064.

Planetary Gearhead GP 16 A Ø16 mm, 0.1–0.3 Nm



M 1:1

- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

Part Numbers

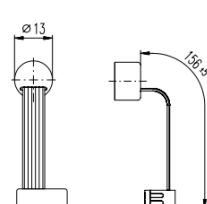
	110321	110322	110323	118186	110324	134782	110325	134785
Gearhead Data								
1 Reduction	4.4:1	19:1	84:1	157:1	370:1	690:1	1621:1	3027:1
2 Absolute reduction	57/13	3249/169	185193/2197	19685/125	1055600/2861	1121931/1625	601692057/371293	63960067/21125
3 Max. motor shaft diameter	mm	2	2	1.5	2	2	2	2
Part Numbers								
1 Reduction	118184	134777	134778		134780	118187	134783	134786
2 Absolute reduction	5.4:1	24:1	104:1		455:1	850:1	1996:1	3728:1
3 Max. motor shaft diameter	mm	1.5	2		2	1.5	2	2
Part Numbers								
1 Reduction	29:1	128:1	561:1		134781	134784	118188	
2 Absolute reduction	729/25	41553/325	236882/4225		135005697/54925	14348807/3125		
3 Max. motor shaft diameter	mm	1.5	2		2	2	1.5	
4 Number of stages	1	2	3	3	4	4	5	5
5 Max. continuous torque	Nm	0.10	0.15	0.20	0.25	0.25	0.30	0.30
6 Max. intermittent torque at gear output	Nm	0.150	0.225	0.300	0.300	0.375	0.450	0.450
7 Max. efficiency	%	90	81	73	73	65	59	59
8 Weight	g	20	23	27	27	31	35	35
9 Average backlash no load	°	1.4	1.6	2.0	2.0	2.4	3.0	3.0
10 Mass inertia	gcm ²	0.07	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05
11 Gearhead length L1	mm	15.5	19.1	22.7	22.7	26.3	29.9	29.9


Εικόνα 3.6 - Τεχνικά χαρακτηριστικά της κεφαλής μείωσης Maxon, με κωδικό 134779.

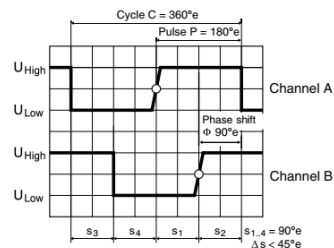
maxon A-max

maxon gear

Encoder MEnc 13 16 CPT, 2 Channels





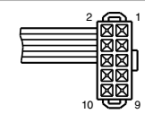


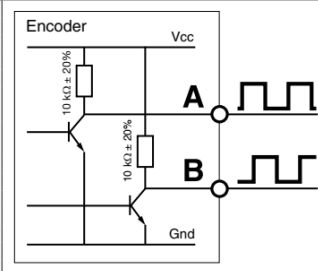
Direction of rotation cw (definition cw p. 60)

Part Numbers	
	110778

Type	
Counts per turn	16
Number of channels	2
Max. operating frequency (kHz)	20
Max. speed (rpm)	75000

Technical Data	
Supply voltage V_{CC}	3.8 - 24 V
Typical current draw	6 mA
Output signal $V_{CC} = 5$ VDC	TTL compatible
Phase shift ϕ	$90^\circ \pm 45^\circ$
Power input at $V_{CC} = 5$ VDC	max. 8 mA
Inertia of the magnetic disc	0.07 gcm ²
Operating temperature range	-20...+80 °C
Open collector output with integrated pull-up resistance	10 kΩ ± 20%

Pin Allocation	
	<ul style="list-style-type: none"> 1 Motor + 2 V_{CC} 3 Channel A 4 Channel B 5 GND 6 Motor - <p style="font-size: small;">Pin type DIN 41651/EN 60603-13 (Type 3M 89110-0101 HA) flat band cable AWG 28</p>

Connection example	
	<p>Encoder</p> <p style="text-align: center;">V_{CC}</p> <p style="text-align: center;">A</p> <p style="text-align: center;">B</p> <p style="text-align: center;">Gnd</p>

maxon sensor

Εικόνα 3.7 - Τεχνικά χαρακτηριστικά του encoder Maxon, με κωδικό 110778.

Παρατηρεί κανείς ότι συνδυασμός αυτός υστερεί ως προς την αποδιδόμενη ισχύ (2W έναντι 4.2) και την ανάλυση του encoder (16 παλμοί ανά περιστροφή έναντι 128), ενώ έχει και χαμηλότερη ταχύτητα περιστροφής λόγω υψηλότερης σχέσης μείωσης (128:1 έναντι 27:1). Δυστυχώς, ενώ οι συνδυασμοί Portescap εμφανίζονταν σε αφθονία από ποικίλους πωλητές κατά την αρχική προμήθεια εξαρτημάτων, μερικούς μήνες μετά είχαν εξαντληθεί ή πωλούνταν σε πολλαπλάσια τιμή. Αν και με αναλογικά μειωμένες δυνατότητες, πιστεύω ότι ο συνδυασμός Maxon θα καλύψει τις ανάγκες του εφεδρικού αντίτυπου.

Τα πλήρη τεχνικά φυλλάδια υπάρχουν στο αρχείο της εργασίας:
 {\UndEE_electrical\~Datasheets\}

2. Texas Instruments DRV8801, Pololu breakout board [motor driver -full bridge]

Για την οδήγηση του μοτέρ χρησιμοποιείται το ολοκληρωμένο Texas Instruments DRV8801, σε μια υλοποίηση της Pololu Robotics & Electronics⁵⁴, η οποία συνθέτει το ολοκληρωμένο με τα απαραίτητα περιφερειακά στοιχεία σε ένα μικρό DIP12 πακέτο, διαστάσεων περίπου 15.3X15.3mm.

Η χρήση τέτοιων πλακετών για ολοκληρωμένα (breakout boards) διευκολύνει σε πολύ μεγάλο βαθμό την ενσωμάτωσή τους σε διάφορα συστήματα, έχει ωστόσο και κάποια μειονεκτήματα, χαρακτηριστικά τα οποία συνοψίζονται παρακάτω:

⁵⁴ <https://www.pololu.com/>

- + προσχεδιασμένο και δοκιμασμένο κύκλωμα, με τοποθετημένα περιφερειακά και διασυνδέσεις, που συνθέτουν ένα πλήρως λειτουργικό υποσύστημα, εξοικονομώντας χρόνο και πόρους
- + μικρές συνολικές διαστάσεις λόγω μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωσης των χρησιμοποιούμενων περιφερειακών και της τεχνικής συγκόλλησης/διασύνδεσης
- + συμβατότητα με το σύνηθες πακέτο DIP (2.54mm pitch), κάτι που διευκολύνει τη διασύνδεση και τη δοκιμή της λειτουργίας του μαζί με άλλα υποσυστήματα
- + χαμηλό κόστος
- δεν επιτρέπει τροποποιήσεις σε περίπτωση εξειδικευμένων αναγκών
- δεν υποστηρίζονται πάντα όλα τα χαρακτηριστικά/δυνατότητες του ολοκληρωμένου, χάριν μείωσης του μεγέθους ή του κόστους
- η ενσωμάτωση σε πακέτο DIP μπορεί να αποτελεί μειονέκτημα σε περιπτώσεις όπου το μέγεθος είναι πολύ κρίσιμος παράγοντας

Όσον αφορά στην επιλογή του συγκεκριμένου H-bridge driver, η βασικότερη συνθήκη ήταν η ενσωμάτωση αισθητήρα για την ένταση του ρεύματος που διαρρέει το μοτέρ⁵⁵, παράμετρος η οποία θεωρήθηκε αρχικώς απαραίτητη για την σχεδίαση νόμου ελέγχου για την ασκούμενη δύναμη από τα δάκτυλα στο προς χειρισμό αντικείμενο.

Στη συγκεκριμένη υλοποίηση, η τιμή της έντασης προκύπτει ως η πτώση τάσης σε γνωστή αντίσταση (0.1Ω) και η σχέση αναλογίας είναι:

$$\frac{V_{\text{propri}}}{i_{\text{motor_winding}}} = 500 \frac{mV}{A}$$

Ένα δεύτερο πλεονέκτημα του ολοκληρωμένου είναι η χρήση ενός μόνο σήματος PWM για την λειτουργία του (σε συνδυασμό με μια λογική θύρα). Το μεν σήμα PWM χρησιμοποιείται για την αυξομείωση της ταχύτητας περιστροφής, το δε λογικό σήμα για τον ορισμό της φοράς της. Σε αντίθεση, εναλλακτικές επιλογές (π.χ. το ολοκληρωμένο Toshiba TB9051FTG) προϋποθέτουν τη χρήση δύο σημάτων PWM. Η τεχνική αυτή (PWM + logic input) δεν εγείρει κάποιο περιορισμό στα πλαίσια της παρούσας εφαρμογής, αντίθετα απλοποιεί σημαντικά τη λειτουργία και τη σύνδεση του οδηγητή με τον μικροελεγκτή, απελευθερώνοντας μια θύρα σήματος PWM⁵⁶ στην πλακέτα Arduino.

Υποστηρίζονται τάσεις τροφοδοσίας για το μοτέρ από 8V έως 36V, καλύπτοντας τόσο την προδιαγραφή 8 ($V_{\text{supply}} = 12V$), όσο και την ονομαστική τάση τροφοδοσίας του συγκεκριμένου μοντέλου του μοτέρ που επιλέχθηκε ($V = 8V$ - εικόνα 3.2, γραμμή 1), σε περίπτωση που υιοθετηθεί κάποια αντίστοιχη διαφοροποίηση της τροφοδοσίας σε μελλοντική έκδοση του συστήματος. Η λογική τροφοδοσία είναι 3.3V έως 6.5V.

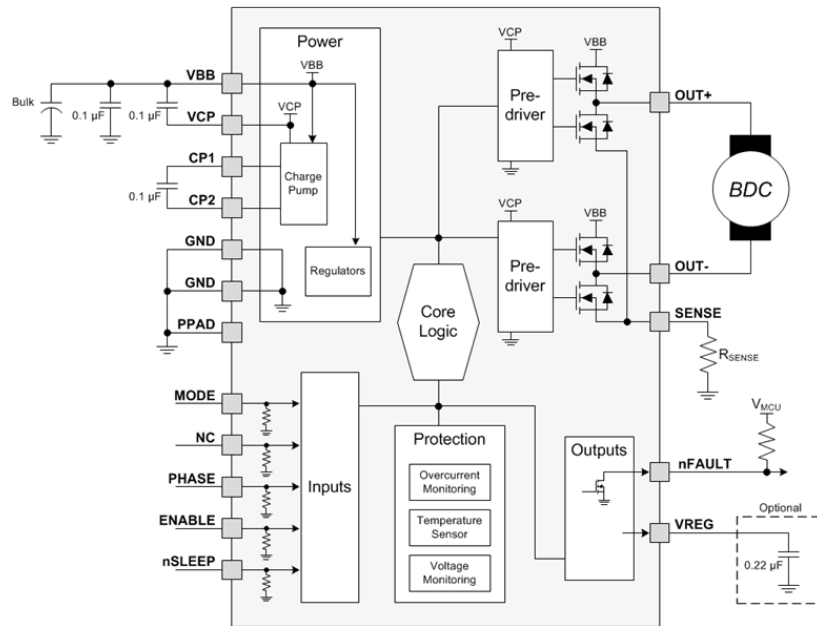
Άλλες λειτουργίες που ενσωματώνονται είναι η προστασία από υπερθέρμανση, under-voltage και over-current, οι οποίες αναπαρίστανται από κοινού σαν διαγνωστικό σφάλμα, μέσω της λογικής θύρας εξόδου (nFAULT). Τέλος, υπάρχει λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης (sleep mode).

Σύμφωνα με τους κατασκευαστές του ολοκληρωμένου και της πλακέτας, είναι δυνατή η διαχείριση τροφοδοσίας με συνεχείς τιμές ρεύματος έως 2.8A (για μερικά δευτερόλεπτα κατά την Pololu), χωρίς τη χρήση επιπλέον θερμικού απαγωγού (ψύκτρας). Δεδομένου ότι η μέγιστη

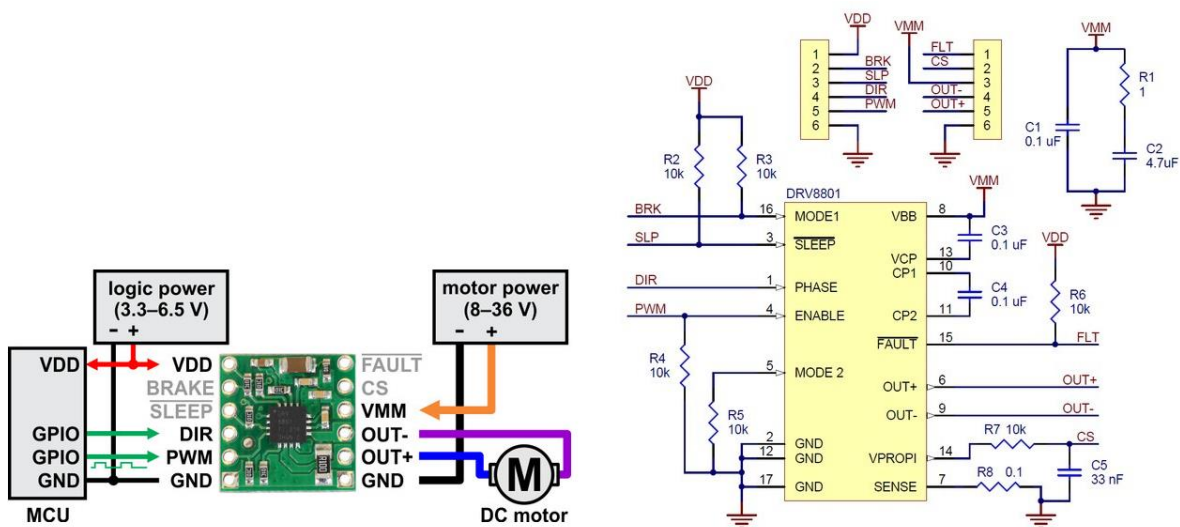
⁵⁵ Εναλλακτικές επιλογές ήταν ολοκληρωμένα που -σε αντίστοιχες υλοποιήσεις- κοστίζουν σημαντικά (TB9051FTG) ή πολύ περισσότερο. Π.χ. από την Pololu : <https://www.pololu.com/category/11/brushed-dc-motor-drivers>.

⁵⁶ Εν προκειμένου, η χρήση μιας δεύτερης θύρας PWM δεν αποτελεί περιορισμό, καθώς όπως θα φανεί και στη συνέχεια «περισσεύει». Ωστόσο, μπορεί να ισχυριστεί κανείς ότι είναι σχεδιαστικά -αν και μάλλον όχι ενεργειακά- οικονομικότερη η χρήση μίας μόνο θύρας PWM, σε συνδυασμό με μια ψηφιακή θύρα.

συνεχής ένταση ρεύματος για το επιλεγμένο μοτέρ είναι 0.66A (*Max Continuous Current* - εικόνα 3.2, γραμμή 10), δεν προστέθηκε κάτι αντίστοιχο στο σύστημα.



Εικόνα 3.8 - Το λειτουργικό block διάγραμμα του ολοκληρωμένου DRV8801.



Εικόνα 3.9 - Ελάχιστη συνδεσμολογία και φυσική απεικόνιση της υλοποίησης της Pololu [αριστερά]. Ηλεκτρικό διάγραμμα της ίδιας υλοποίησης [δεξιά].

Αναλυτικά χαρακτηριστικά του ολοκληρωμένου μπορούν να αναζητηθούν στο αντίστοιχο datasheet `{:\UndEE_electrical\~Datashets\}` και για την υλοποίηση της Pololu στην ιστοσελίδα:

<https://www.pololu.com/product/2136>

Σημειώνεται ότι η μέγιστη τιμή της έντασης ρεύματος στη θύρα VDD (όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.9) ορίζεται ως το άθροισμα των εντάσεων των θυρών *MODE1* και *nSLEEP* του ολοκληρωμένου, οι οποίες είναι:

$$I_{mode} = 20 \mu A (V_{IN} = VDD = 2 V)$$
$$I_{nSleep} = 50 \mu A (V_{IN} = VDD = 2.7 V)$$

3. STMicroelectronics LSM6DS3, breakout board [Inertial Measurement Unit]

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2, στο σύστημα ενσωματώθηκε μια IMU, χωρίς όμως να υπάρχει κάποια προδιαγραφή για τα χαρακτηριστικά της. Θεώρησα ότι στο πλαίσιο της φιλοσοφίας του “sensor fusion”, πληροφορία που αφορά στις επιταχύνσεις στις οποίες υπόκειται ο μηχανισμός θα μπορούσε να είναι χρήσιμη. Δεδομένου ότι στη αγορά υπάρχουν τέτοια υποσυστήματα σε ολοκληρωμένη μορφή, με σχετικά χαμηλό κόστος και μικρές διαστάσεις (περίπου 18x13 mm), πιστεύω ότι η ενσωμάτωσή της δεν επηρεάζει αρνητικά με κάποιο τρόπο το σύστημα.

Συνήθως οι IMU χαρακτηρίζονται από τους βαθμούς ελευθερίας (“Degrees of Freedom” - DoF) επί των οποίων μπορούν να μετρήσουν επιταχύνσεις. Για παράδειγμα ως 3-DoF IMU ορίζεται η μονάδα που μπορεί να μετρήσει επιταχύνσεις (γραμμικές) στους τρεις κύριους άξονες x, y, z (επιταχυνσιόμετρο, accelerometer). Μια 3-DoF μονάδα μπορεί εναλλακτικά να μετρήσει τις γωνιακές επιταχύνσεις γύρω από τους τρεις κύριους άξονες (γυροσκόπιο, gyroscope). Ο συνδυασμός τους ορίζεται ως μονάδα 6-DoF. Καταχρηστικά, ως 9-dof και 10-dof IMU ορίζονται οι μονάδες οποίες περιλαμβάνουν επίσης μέτρηση του μαγνητικού πεδίου στους τρεις άξονες (μαγνητόμετρο) και της ατμοσφαιρικής πίεσης (βαρόμετρο) ή/και θερμοκρασίας.

Υπό αυτά τα στοιχεία θεώρησα πως σημαντικές μεταβλητές στα πλαίσια του συγκεκριμένου συστήματος είναι οι γραμμικές/γωνιακές επιταχύνσεις, οπότε επέλεξα μια μονάδα 6-DoF (επιταχυνσιόμετρο και γυροσκόπιο).

Μη έχοντας άλλη προδιαγραφή⁵⁷, επέλεξα μια υλοποίηση της μονάδας STMicroelectronics LSM6DS3 (breakout board) από τρίτο κατασκευαστή, η οποία βρέθηκε άμεσα διαθέσιμη σε χαμηλή τιμή. Σημαντική συνθήκη επίσης αποτέλεσε το γεγονός ότι η συγκεκριμένη IMU υλοποιείται και από την SparkFun⁵⁸, η οποία παρέχει μια ολοκληρωμένη βιβλιοθήκη για την ενσωμάτωσή της σε συστήματα Arduino. Μια εναλλακτική επιλογή είναι το ολοκληρωμένο TDK MPU6050.

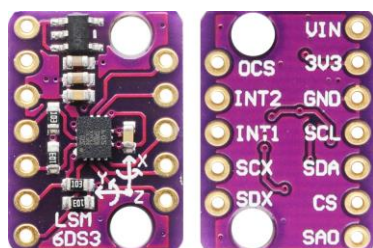
Δεδομένου ότι η χρησιμότητα της IMU είναι υποθετική στο σύστημα στην παρούσα χρονική στιγμή, δεν θα επιχειρήσω την αναλυτική περιγραφή των λειτουργιών της, καθώς άλλωστε δεν γνωρίζω να το πράξω με συνέπεια. Αναλυτικότερες πληροφορίες υπάρχουν στο τεχνικό φυλλάδιο του ολοκληρωμένου {:\UndEE_electrical\~Datasheets\}. Ένα παράδειγμα άντλησης δεδομένων μέσω της προαναφερθείσας βιβλιοθήκης περιγράφεται σε επόμενο υποκεφάλαιο, όπου εξετάζεται ο κώδικας ελέγχου του μικροελεγκτή.

Μερικά σημεία άξια αναφοράς είναι τα εξής:

⁵⁷ Μια ενδιαφέρουσα σύγκριση επιδόσεων μεταξύ (9-DoF) IMU από διαφορετικούς κατασκευαστές υπάρχει στην ιστοσελίδα: <https://github.com/kriswiner/MPU6050/wiki/9-DoF-Motion-Sensor-Bakeoff>

⁵⁸ <https://learn.sparkfun.com/tutorials/lsm6ds3-breakout-hookup-guide/all>

- παρότι το ολοκληρωμένο δέχεται τάση τροφοδοσίας μέχρι 3.6V, η συγκεκριμένη υλοποίηση επιτρέπει την τροφοδοσία της με τάση μέχρι 6.5V⁵⁹, καθιστώντας τη συμβατή με την τάση τροφοδοσίας από την πλακέτα Arduino.
- η μονάδα είναι συμβατή τα πρωτόκολλα επικοινωνίας I²C και SPI. Το μεν είναι δυνατό να λειτουργήσει με λογικά σήματα 5V, το δε μάλλον όχι⁶⁰ - συνεπώς δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί με μονάδες λογικής τάσης 5V, χωρίς τη χρήση κάποιου level shifter.
- διατίθενται δύο προγραμματιζόμενες θύρες για Interrupts, βασισμένες στις τιμές του επιταχυνσιόμετρου και του γυροσκοπίου και σε άλλες λειτουργίες του ολοκληρωμένου.



Εικόνα 3.10 - Breakout board για την 6-DoF IMU LSM6DS3. Στη εμπρόσθια όψη [αριστερά] διακρίνονται οι θετικές φορές των αξόνων σε σχέση με τη γεωμετρία της πλακέτας (π.χ. ο x-άξονας είναι παράλληλος στην επιμήκη πλευρά της πλακέτας, με θετική φορά προς τα πάνω). Οι δύο οπές που φαίνονται εξυπηρετούν στην σταθερή τοποθέτηση της πλακέτας, ώστε να υπάρχει συνέπεια στις κατευθύνσεις των αξόνων.

Η τοποθέτηση της πλακέτας στο μηχανισμό γίνεται ώστε ο X-άξονας να είναι παράλληλος με τον κατακόρυφο άξονα του κυλινδρικού περιβλήματος, με θετική φορά από τη βάση (σύνδεση με το βραχίονα) προς τα δάκτυλα.

Σημειώνεται επίσης ότι η μέγιστη τιμή της έντασης ρεύματος στη θύρα τροφοδοσίας (VIN - εικόνα 3.10), για αμφότερα το επιταχυνσιόμετρο και το γυροσκόπιο σε κατάσταση υψηλής απόδοσης, είναι:

$$I_{dd_{HP}} = 1.25 \text{ mA}$$

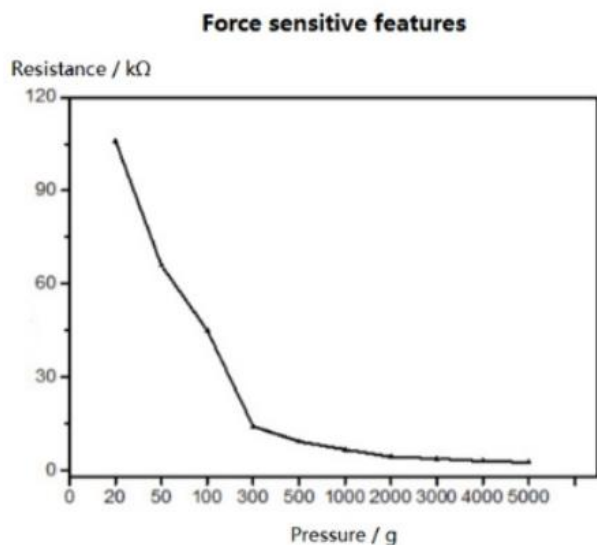
4. DF9-40 Force Sensitive Resistor

Η περιγραφή των αισθητήρων αφής έχει προηγηθεί στο υποκεφάλαιο 2.3. Κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά και η προτεινόμενη από τον κατασκευαστή καμπύλη βαθμονόμησης, $R_{FSR}(F)$, φαίνονται στην ακόλουθη εικόνα 3.11 ($R_{FSR} [k\Omega]$ η αντίσταση στα άκρα του αισθητήρα, $F [gF]$ η ασκούμενη δύναμη). Υπενθυμίζω ότι συνολικά χρησιμοποιούνται δύο ζεύγη αισθητήρων (ένας σε κάθε φάλαγγα του κάθε δακτύλου), με ονομαστικό εύρος μέτρησης (0, 5] $kg(-f)$ ⁶¹. Οι αισθητήρες αυτοί περιγράφονται από τον κατασκευαστή ως «αδιάβροχοι», χωρίς ωστόσο περαιτέρω στοιχεία για τον όρο.

⁵⁹ Στην πλακέτα υπάρχει το ολοκληρωμένο Micro One ME6211 (voltage regulator), το οποίο μπορεί να παρέχει ρεύμα έντασης μέχρι και 500mA ($V_{out} = 3.3V$). Η θύρα 3V3 (εικόνα 3.7) συνδέεται με την έξοδο του regulator.

⁶⁰ Βλ. υπερσύνδεσμο στην υποσημείωση 52.

⁶¹ Το εύρος (0,2] $kg-f$ θα εξυπηρετούσε καλύτερα το σύστημα, δεν ήταν ωστόσο διαθέσιμο την περίοδο της αγοράς.

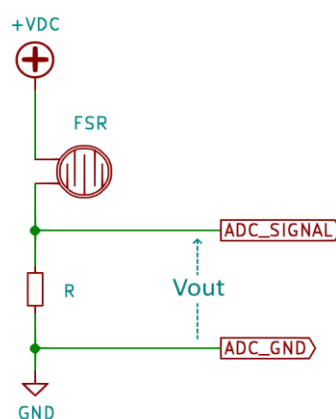


Performance	Parameters
Range	500g/2kg/5kg/10kg/20kg
Thickness	<0.25mm
Appearance size	see the size chart
Response point	10g
Repeatability	<±9.7% (60% load)
Accuracy	±2.5% (85% range)
Durability	>1 million times
Initial resistance	>10MΩ (no load)
Response time	<1ms
Recovery time	<15ms
Test voltage	Typical Value:DC 3.3V
Operating temperature	-20°C to 60°C
Electromagnetic interference EMI	No
Electrostatic discharge EDS	No

Εικόνα 3.11 - Τεχνικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων FSR, όπως δίνονται από τον κατασκευαστή. Στο αριστερό μέρος της εικόνας φαίνεται η καμπύλη βαθμονόμησης που παρέχεται (ορθά όσον αφορά τη λειτουργία του αισθητήρα ο οριζόντιος άξονας ονομάζεται "Pressure", αλλά λανθασμένα ως προς την καμπύλη βαθμονόμησης, η οποία αφορά στη συσχέτιση της αντίστασης στα άκρα του [kΩ] με την ασκούμενη δύναμη [gram-force]).

Όντας μεταβλητές αντιστάσεις, για τη λήψη μετρήσεων οι αισθητήρες πρέπει να συνδεθούν σε μια μονάδα αναλογικής-ψηφιακής μετατροπής (Analog to Digital Converter, ADC εφεξής). Αν και υπάρχουν περισσότερες από μια τεχνικές για την διασύνδεση αυτή⁶², επέλεξα την απλούστερη, χάριν οικονομίας στοιχείων και χώρου: τη δημιουργία τεσσάρων διαιρετών τάσης, με την τάση εξόδου να λαμβάνεται από την σταθερή αντίσταση (όχι από τον αισθητήρα), ώστε η συναρτησιακή σχέση μεταξύ ασκούμενης δύναμης και τάσης εξόδου να είναι αύξουσα. Η συσχέτιση αυτή είναι λίγο περισσότερο εύληπτη διαισθητικά, χωρίς όμως να έχει κάποια άλλη σημασία.

Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να αναλυθεί ως εξής: έστω ο διαιρέτης τάσης της εικόνας 3.12, ο οποίος αποτελείται από την μεταβλητή αντίσταση FSR και την σταθερή αντίσταση R. Ως τάση εξόδου (το σήμα του ADC) λαμβάνεται η τάση V_{out} , όπως σημειώνεται.



Εικόνα 3.12 - Διαιρέτης τάσης για την λήψη μετρήσεων μέσω του αισθητήρα FSR.

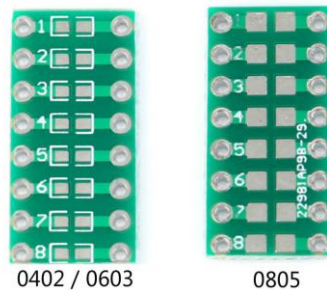
⁶² π.χ. βλέπε βιβλιογραφικές αναφορές [4] και [5]

Η τάση V_{out} δίνεται από την σχέση :

$$V_{out} = VDC \frac{R}{R + FSR}$$

Δεδομένου ότι η συνάρτηση $FSR(F)$ είναι φθίνουσα, μπορεί να δειχθεί ότι η $V_{out}(F)$ είναι αύξουσα συνάρτηση. Στην περίπτωση που ο αισθητήρας συνδεόταν στη γείωση GND , αντί στην πηγή τάσης $+VDC$, η συνάρτηση $V_{out}(F)$ θα πρόκυπτε φθίνουσα.

Επειδή οι αισθητήρες βρίσκονται εξωτερικά του περιβλήματος, στα δάκτυλα, για την δημιουργία των τεσσάρων διαιρετών χρησιμοποιήσα αντιστάσεις SMD φόρμα 2013 (0805 σε imperial σύστημα), σε μια πλακέτα μετατροπής (breakout board) από SMD σε DIP (2.54mm pitch), 8 θέσεων. Η πλακέτα αυτή διευκολύνει τη σύνδεση των καλωδίων μεταξύ ADC και αισθητήρων και αποτελεί μια μικρών διαστάσεων λύση (περίπου 20.3mm x 10mm).



Εικόνα 3.13 - Breakout board 8 θέσεων για μετατροπή από το πακέτο SMD 2012 (0805) σε DIP (2.54mm pitch). Στην οπίσθια όψη [αριστερά] υπάρχουν θέσεις και για στοιχεία SMD 1005 (0402) και 1608 (0603).

Πριν προχωρήσω θέλω να αναφερθώ σε δύο σημαντικά σημεία σχετικά με την λήψη μετρήσεων από τους αισθητήρες μέσω του ADC:

- i. Εγγενώς, η διαδικασία μετατροπής του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό προϋποθέτει τη σύγκριση του με μια σταθερή τάση αναφοράς (reference voltage). Η τάση τροφοδοσίας των αισθητήρων $FSR (+VDC)$ μπορεί να επιλεγθεί ώστε να ισούται με την τάση αναφοράς⁶³. Με την επιλογή αυτή εκμεταλλεύεται κανείς πλήρως την ανάλυση του μετατροπέα.
- ii. Η επιλογή της τιμής της σταθερής αντίστασης R ορίζεται πρωτίστως από το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα που μπορεί να διέλθει από τον αισθητήρα (παράμετρος που δεν δίνεται για τους συγκεκριμένους)⁶⁴:

$$I_{max} = \frac{VDC}{R + FSR_{min}}$$

Μια τιμή αυτής της παραμέτρου δίνεται για τους αντίστοιχους αισθητήρες της Sensitronics και της Intelink⁶⁵ :

$$I_{max} = 1 \sim 10 \text{ mA}$$

Όμως για κάθε τιμή της R δημιουργείται μια διαφορετική καμπύλη $V_{out}(F)$. Όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα 3.14, η επιλογή τιμής της R επηρεάζει δραστικά την

⁶³ Εν γένει, οι περισσότερες μονάδες ADC διαθέτουν την επιλογή ορισμού της τάσης αναφοράς από εξωτερική πηγή. Ωστόσο, αν δεν υπάρχει συγκεκριμένη προδιαγραφή, κάτι τέτοιο κάνει συνήθως το κύκλωμα συνθετότερο. Στη γενική περίπτωση, όπου η τάση τροφοδοσίας του αισθητήρα είναι δεδομένη, η τάση αναφοράς είναι αυτή που ορίζεται ώστε να ισούται με την τάση τροφοδοσίας.

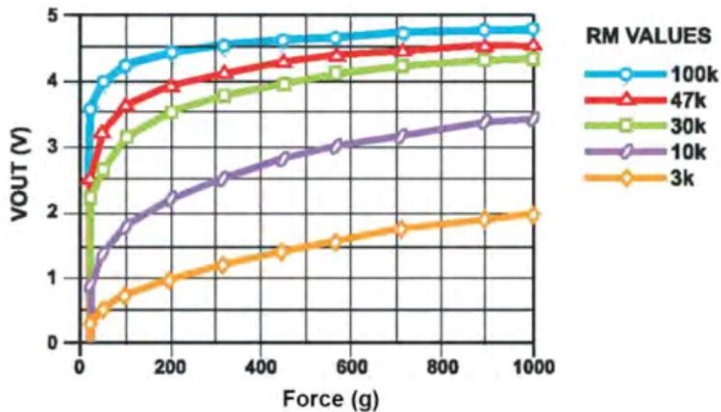
⁶⁴ Θεωρώντας άπειρη αντίσταση εισόδου στη θύρα του ADC.

⁶⁵ Βιβλιογραφικές αναφορές: [4], σελ. 16 και [5], σελ. 12.

απόκριση του αισθητήρα. Θεώρησα ότι, ποιοτικά, η καμπύλη για $R = 10k\Omega$ ($\mu\omega\beta$) θα εξυπηρετήσει καλύτερα τις ανάγκες του συστήματος, σαν ενδιάμεση επιλογή, δεδομένου ότι δεν υπάρχει κάποια προδιαγραφή που να δίνει έμφαση (επομένως κι ανάγκη για υψηλότερη ανάλυση) στις υψηλές ή τις χαμηλές τιμές δύναμης. Σημειώνεται ότι υπό αυτή την τιμή, η μέγιστη ένταση του ρεύματος που διαρρέει τους αισθητήρες είναι:

$$I_{FSR_max} = \frac{VDC}{10} \text{ mA}$$

iii.



Εικόνα 3.14 - Απόκριση αισθητήρα FSR εύρους μέτρησης ~0-2kg, για διαφορετικές τιμές της σταθερής αντίστασης R (εδώ “RM”) στο διαιρέτη τάσης. Πηγή: [4], σελ. 19

5. Omron D2HW (FL291DA452 AQ) limit switch [SPDT switch]

Έχοντας εξηγήσει τη σχεδίαση και τα μέρη του μηχανισμού στο κεφάλαιο 2, καθώς και το σύστημα του επενεργητή (με τον αισθητήρα -σχετικής- θέσης), τη μονάδα motor driver (με τον αισθητήρα ρεύματος) και τους αισθητήρες αφής, είναι μάλλον εύληπτο το πώς μπορεί να λειτουργήσει σαν σύνολο, υπό τον έλεγχο ενός μικροελεγκτή, για την εκτέλεση των επιθυμητών κινήσεων.

Οστούσο εντοπίζονται δύο λεπτά σημεία που εξετάστηκαν μόνο μερικώς στο κεφάλαιο 2, τα οποία αφορούν:

- στον περιορισμό της κίνησης των δακτύλων στο επιθυμητό εύρος (μέγιστο άνοιγμα περίπου 60mm)
- στην αρχικοποίηση της θέσης των δακτύλων

Υπενθυμίζω ότι μέσω της γεωμετρίας του εξωτερικού συνδέσμου των δακτύλων επιτυγχάνεται ένα μηχανικό στοπ στην κίνησή τους, το οποίο είναι σχεδιασμένο ώστε να «ενεργοποιείται» όταν το άνοιγμα είναι λίγο μικρότερο από 60mm. Δυστυχώς, αυτός ο περιορισμός στην κίνηση αφενός δεν είναι ιδιαίτερα αξιόπιστος (τα πλαστικά μέρη θα φθαρούν γρήγορα αν λειτουργούν ως φρένα στην ροπή του μοτέρ⁶⁶), αφετέρου δεν αποδίδει καμία πληροφορία στη μονάδα ελέγχου.

⁶⁶ η οποία μάλιστα είναι αρκετά υψηλή, ώστε να μπλοκάρει μόνιμα τους συνδέσμους και τα δάκτυλα ή τις βάσεις σε κάποια από τις ακραίες θέσεις.

Από την άλλη, η πληροφορία ότι τα δάκτυλα βρίσκονται στην πλέον ανοικτή θέση μπορεί να ληφθεί από μέτρηση του ρεύματος μέσω του motor driver. Το ίδιο και για την πλέον κλειστή θέση, στην οποία μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί μέτρηση από τους αισθητήρες FSR.

Παρότι και οι δύο αυτές μέθοδοι αρχικοποίησης και περιορισμού της κίνησης είναι εφαρμόσιμες και χρηστικές, το γεγονός ότι βασίζονται στην -μεσοπρόθεσμα καταστροφική- επαφή των δομικών μερών του μηχανισμού ως φρένο παραμένει.

Γι' αυτό το λόγο θέλησα να ενσωματώσω και μια εναλλακτική μέθοδο αρχικοποίησης, η οποία -όπως και η προηγούμενη βέβαια-, σε συνδυασμό με τον αισθητήρα θέσης του μοτέρ, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον περιορισμό της κίνησης στο επιθυμητό εύρος. Η μέθοδος αυτή δεν είναι παρά η χρήση ενός διακόπτη (limit switch), ο οποίος θα ενεργοποιείται σε μία από τις ακραίες θέσεις.

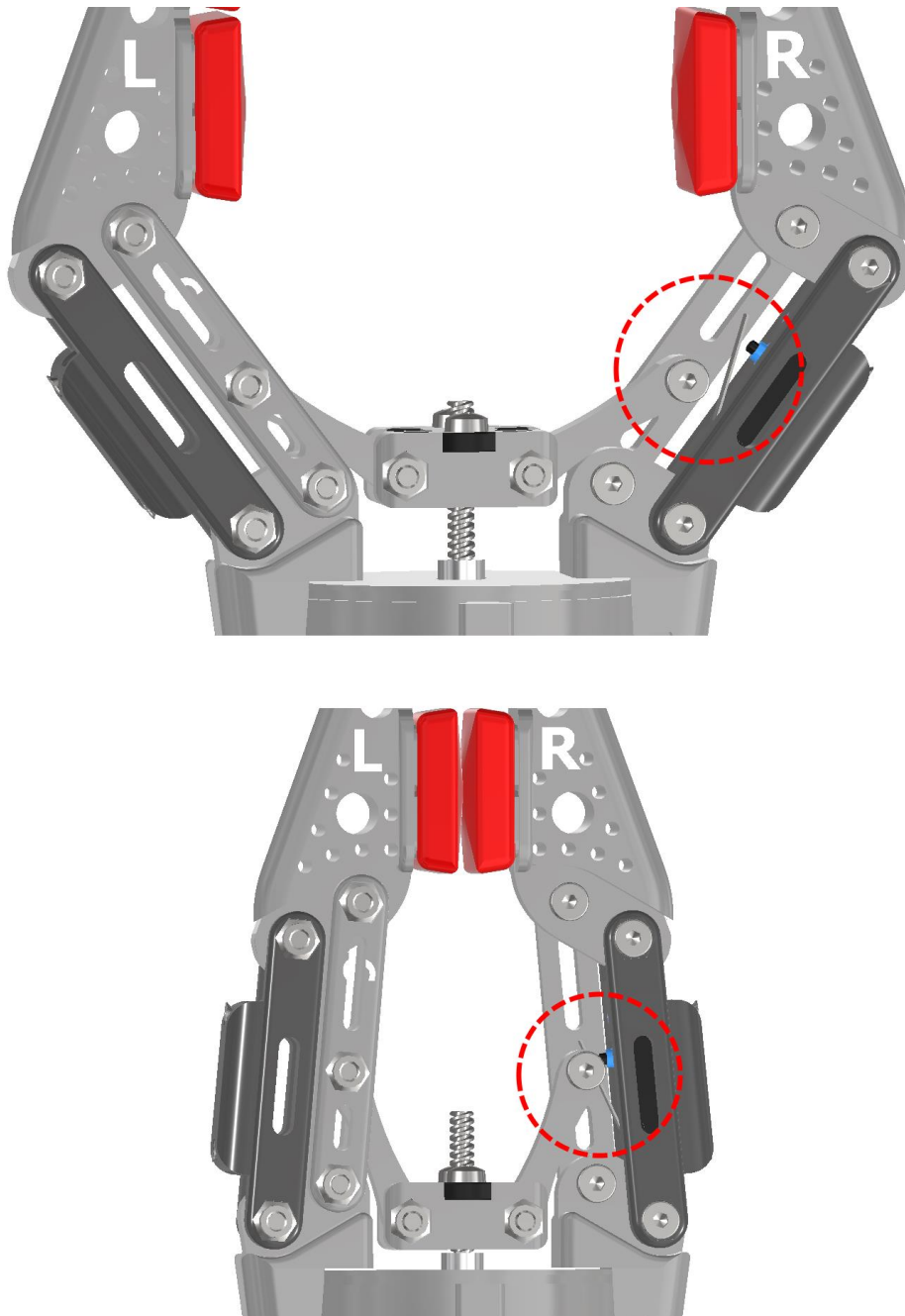


Εικόνα 3.15 - Omron DH2W IP67 limit switch

Ελλείψει κάποιας καλύτερης επινόησης, τοποθέτησα «χωνευτά» τον διακόπτη σε έναν από τους εξωτερικούς συνδέσμους των δακτύλων, με την ενεργοποίησή του να γίνεται από τον σύνδεσμο μεταξύ δακτύλου και της βάσης όπου εδράζεται το περικόχλιο (βλ. εικόνα 3.16 και 3.17). Η θέση του είναι ρυθμισμένη ώστε το σημείο ενεργοποίησης να αντιστοιχεί με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια στην θέση όπου τα δάκτυλα είναι εντελώς κλειστά.



Εικόνα 3.16 - Ο εξωτερικός σύνδεσμος των δακτύλων, στον οποίο ενσωματώνεται ο διακόπτης. Σε τομή [δεξιά] φαίνεται η βάση του διακόπτη.



Εικόνα 3.17 - Ο τρόπος ενεργοποίησης του διακόπτη αρχικοποίησης της θέσης των δακτύλων, από τον σύνδεσμο που τα ενώνει με τη βάση του περικόχλιου (σημειώνεται στον κόκκινο διακεκομμένο κύκλο). Στην ανοικτή θέση [πάνω] το έλασμα που πιέζει το διακόπτη είναι στη θέση «ηρεμίας». Όταν τα δάκτυλα είναι σχεδόν εντελώς κλειστά [κάτω], ο σύνδεσμος πιέζει το έλασμα, το οποίο με τη σειρά του κλείνει το διακόπτη.

Δυστυχώς, το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι ο διακόπτης έχει βαθμό προστασίας **IP67** (αντοχή σε βύθιση έως 1m, για μέγιστο χρονικό διάστημα 30min). Πρακτικά στις δοκιμές δεν εμφανίστηκε κάποια δυσλειτουργία, ίσως επειδή ο διακόπτης (αλλά και τα υπόλοιπα ηλεκτρικά στοιχεία και συνδέσεις, όπως θα περιγραφεί στο επόμενο υποκεφάλαιο), επεξεργάζονται με αδιαβροχοποιητικό βερνίκι. Ωστόσο, ο βαθμός προστασίας του μηχανισμού, ονομαστικά τουλάχιστον, υποβαθμίζεται.

Παραπομπή στο αρχείο για τα τεχνικά φυλλάδια `{:\UndEE_electrical\~Datasheets\}`.

6. Pro Micro (ATmega 32U4) [development board - control unit]

Η μονάδα ελέγχου είναι μια μικρών διαστάσεων⁶⁷ πλακέτα ανάπτυξης Arduino βασισμένη στο μικροελεγκτή Atmel ATmega32U4. Αν και δεν αποτελεί επίσημη υλοποίηση⁶⁸ της Arduino, είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη από τρίτους κατασκευαστές. Ο μικροελεγκτής (εφεξής MCU) είναι μια αναβάθμιση του «κλασικού» ATmega328P (Arduino Uno κ.α.), καθώς ενσωματώνει μονάδα USB (v. 2.0, full speed) πέραν της τυπικής σειριακής μονάδας. Η επικοινωνία με τον εξωτερικό Η/Υ μέσω θύρας USB γίνεται απ' ευθείας με τον MCU, αναιρώντας την ανάγκη χρήσης κάποιου επιπλέον ολοκληρωμένου στην πλακέτα.

Εν γένει, είναι ένας MCU που λειτουργεί σε λογική τάση 5V. Ενσωματώνει 32KB μνήμης Flash (μνήμη προγραμμάτων), 2KB SRAM (προσωρινή μνήμη) και 1KB EEPROM για μόνιμη αποθήκευση δεδομένων. Διαθέτει μονάδα Analog-Digital Converter (εφεξής ADC) ακρίβειας 10-bit (9 κανάλια), τέσσερις μονάδες Timer/Counter (δύο εκ των οποίων ακρίβειας 16-bit), με πολλαπλά κανάλια σήματος PWM, μονάδα αναλογικού συγκριτή κ.α.

Οι δυνατότητες της εν λόγω πλακέτας είναι πάνω-κάτω παρόμοιες με των υπολοίπων σε αυτή την κατηγορία και κρίνονται επαρκείς για την κάλυψη των αναγκών του μηχανισμού, οι οποίες συνοψίζονται ως εξής βάσει του υλικού που αναφέρθηκε έως τώρα:

- 4+1 κανάλια ADC, για τη λήψη τιμών από τους αισθητήρες FSR και την λήψη τιμής από τον αισθητήρα ρεύματος του motor driver
- 1 κανάλι σήματος PWM συχνότητας τάξης 10KHz⁶⁹, για τον έλεγχο του motor driver (ταχύτητα περιστροφής, μέσω της θύρας PWM)
- 1 ψηφιακή θύρα, επίσης για τον έλεγχο του motor driver (φορά περιστροφής, μέσω της θύρας DIR)
- 1+1 ψηφιακές θύρες, με Interrupt ρουτίνες, για τη διασύνδεση με τον αισθητήρα θέσης του μοτέρ και τον διακόπτη αρχικοποίησης στα δάκτυλα
- δυνατότητα διασύνδεση με υποσυστήματα, βάσει του πρωτόκολλου επικοινωνίας I²C

και δυνητικά:

- +2 ψηφιακές θύρες για τον έλεγχο των θυρών nSLEEP, BRAKE του motor driver
- +1 ψηφιακή θύρα, με Interrupt ρουτίνα για την διασύνδεση με τη θύρα nFault του motor driver
- +2 ψηφιακές θύρες, με Interrupt ρουτίνες για την διασύνδεση με τις θύρες INT1, INT2 της IMU

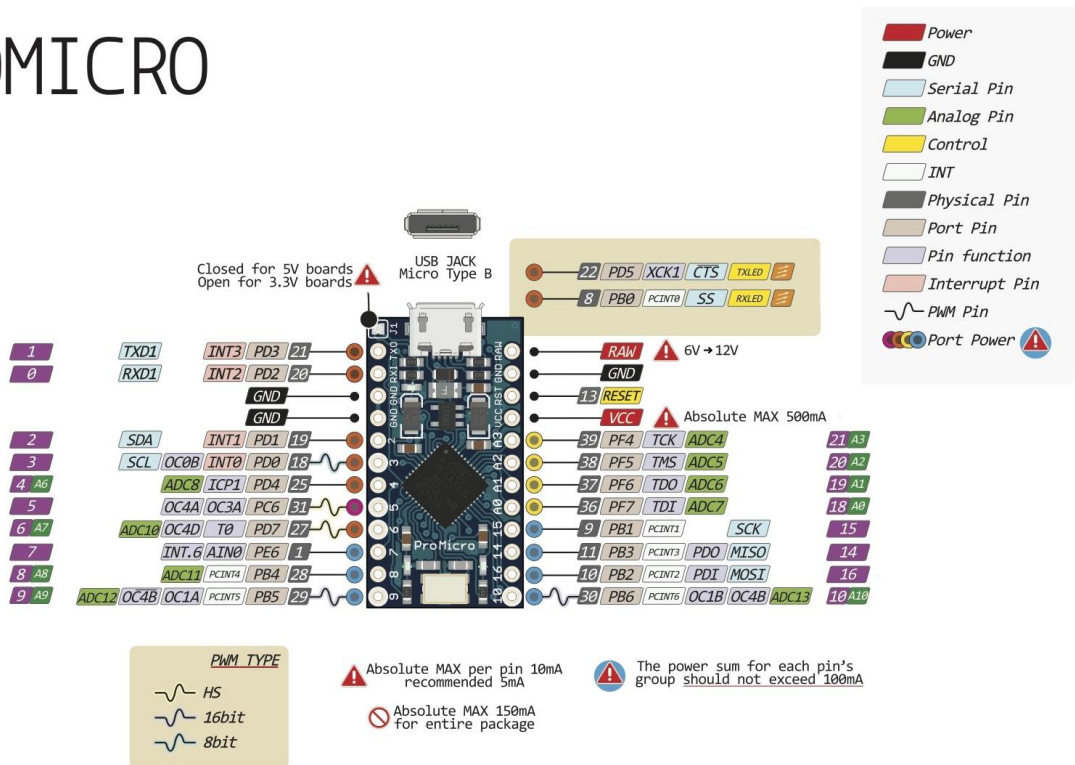
Λόγω μεγαλύτερης συχνότητας λειτουργίας της MCU, επιλέχθηκε η έκδοση με τάση λειτουργίας 5V (16MHz, έναντι 8MHz της έτερης έκδοσης με 3.3V), εφόσον και τα υπόλοιπα υποσυστήματα είναι συμβατά με αυτή την τάση. Μια εναλλακτική λύση υψηλότερων δυνατοτήτων, για την περίπτωση όπου αυτό καταστεί απαραίτητο σε μελλοντικές εκδόσεις, αναφέρεται στο κεφάλαιο 5.

⁶⁷ Περίπου 35mm x 18mm.

⁶⁸ Η επίσημη πλακέτα έχει το όνομα "[Leonardo](#)" και οι διαστάσεις της είναι αντίστοιχες αυτής της πλακέτας "Uno" (68.6mm X 53.3mm). Η συγκεκριμένη πλακέτα (Pro Micro) αποτελεί υλοποίηση της ομώνυμης πλακέτας της Sparkfun (<https://www.sparkfun.com/products/12640>) από τρίτο κατασκευαστή.

⁶⁹ Η χρήση υψηλότερης συχνότητας βοηθάει στην ομαλότερη και πιο αθόρυβη λειτουργία του μοτέρ. Το DRV8801 επιτρέπει συχνότητες έως και 20kHz.

PROMICRO



Εικόνα 3.18 - Απεικόνιση της πλακέτας Pro Micro (ATmega32u4 MCU). Σημειώνονται οι βασικές και εναλλακτικές λειτουργίες των διαθέσιμων θυρών (επεξήγηση στο υπόμνημα στο δεξιό μέρος). Επίσης, σημειώνονται οι μέγιστες επιτρεπτές τιμές ρεύματος των θυρών.

Εφόσον η τάση λειτουργίας της μονάδας ελέγχου είναι 5V, οι αισθητήρες FSR τροφοδοτούνται με αυτή την τάση και συνεπώς:

$$VDC_{FSR} = 5V \rightarrow I_{FSR,max} = \frac{5}{10} = 0.5mA$$

δηλαδή εντός ασφαλούς ορίου (< 1mA).

Η συνολική κατανάλωση ρεύματος όλων των υποσυστημάτων που τροφοδοτούνται από την μονάδα ελέγχου (θύρα VCC - εικόνα 3.14) ισούται με το άθροισμα:

$$I_{max_total} = I_{enc} + I_{mode} + I_{nSleep} + I_{ddHP} + 4 * I_{FSR,max} < 30mA$$

οπότε και πάλι εντός ασφαλούς ορίου. Σημειώνεται ότι η μέγιστη ένταση από την θύρα VCC δεν είναι ακριβώς 500mA, καθώς ένα μέρος καταναλώνεται στο κύκλωμα ενίσχυσης του σήματος στο καλώδιο USB (βλ. κι επόμενο κεφάλαιο).

Παραπομπή στο αρχείο για το τεχνικά φυλλάδιο {:\UndEE_electrical\~Datasheets\}.

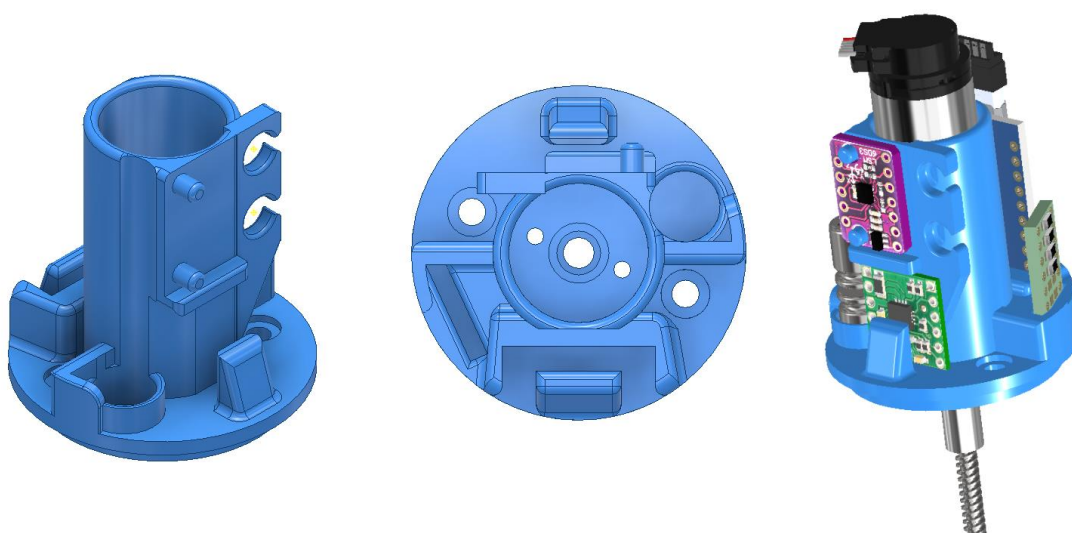
3.2 Διασυνδέσεις εσωτερικών στοιχείων

Γνωρίζοντας πρέπει να συνδεθούν μεταξύ τους τα στοιχεία, η πραγμάτωση αυτών των διασυνδέσεων φαίνεται σχετικά εύκολη. Υπάρχουν όμως δύο παράμετροι οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψιν:

- όλα τα στοιχεία με τις διασυνδέσεις τους πρέπει να εσωκλείονται σε ένα κυλινδρικό χώρο $\varnothing 40\text{mm} \times 70\text{mm}$
- το σύστημα, έστω σε κάποιο βαθμό, πρέπει να είναι αποσυναρμολογούμενο κι επισκευάσιμο, πράγμα που σημαίνει ότι η -προσεκτική- προσπάθεια αποσυναρμολόγησής του δεν θα πρέπει να απαιτεί την κοπή αγωγών

Δυστυχώς, οι δύο αυτές συνθήκες δεν είναι εύκολο να ικανοποιηθούν.

Ξεκινώ υπενθυμίζοντας ότι το βασικό στοιχείο, το σύστημα του επενεργητή, τοποθετείται σε μια βάση εντός του περιβλήματος, η οποία εφαρμόζει στο άνω καπάκι του (περιβλήματος). Περιμετρικά αυτής της βάσης έχουν σχεδιαστεί προεξοχές στήριξης ή στερέωσης των υπόλοιπων στοιχείων -για το λόγο αυτό η βάση κατασκευάζεται αποκλειστικά μέσω 3D εκτύπωσης⁷⁰. Η βάση αυτή φαίνεται στην εικόνα 3.19.



Εικόνα 3.19 - Η βάση του επενεργητή και των ηλεκτρικών στοιχείων εσωτερικά του μηχανισμού σε δύο όψεις [αριστερά, μέση]. Διακρίνονται οι διάφορες προεξοχές παραπλευρώς του κεντρικού κυλινδρικού τμήματος. Η ίδια βάση με τον επενεργητή και όλα τα στοιχεία τοποθετημένα [δεξιά]. Διακρίνεται στο πίσω μέρος η μονάδα ελέγχου Pro Micro.

Εκτός αυτών μεταξύ των στοιχείων, διασυνδέσεις υπάρχουν επίσης μεταξύ των τεσσάρων αισθητήρων FSR (επί των δακτύλων), του διακόπτη αρχικοποίησης και μεταξύ του συνδέσμου που προορίζεται για τη διασύνδεση με τον απομακρυσμένο Η/Υ (βλ. υποκεφάλαιο 2.3 - εικόνα 2.7). Σχετικά με τις δύο αυτές διασυνδέσεις:

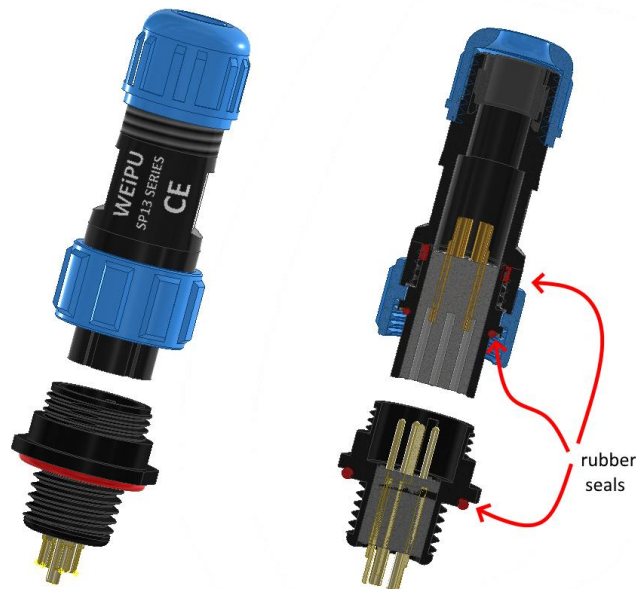
- Για την διασύνδεση του συστήματος με τον απομακρυσμένο Η/Υ, όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, απαιτείται ένας δίαυλος USB (4 αγωγοί) και ένας δίαυλος για την παροχή τροφοδοσίας (+12 V) στον επενεργητή (2 αγωγοί). Εάν ληφθεί υπόψιν και η θωράκιση του διαύλου USB, το σύνολο των αγωγών γίνεται επτά. Επέλεξα λοιπόν έναν

⁷⁰ Η τουλάχιστον μέχρι να προκύψει κάποια απλοποιημένη εκδοχή της, που να κατασκευάζεται σχετικά εύκολα και μέσω CNC milling.

κυλινδρικό ηλεκτρικό σύνδεσμο της εταιρίας Weipu, 7 θέσεων, ο οποίος παρέχει προστασία IP68, σε χαμηλή τιμή. Δυστυχώς, οι διαστάσεις αυτού του τύπου συνδέσμων δεν είναι οι μικρότερες δυνατές⁷¹, με αποτέλεσμα να προεξέχει αρκετά από το περίβλημα, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.7.

- ii. Η διασύνδεση των τεσσάρων αισθητήρων FSR με την πλακέτα που σχηματίζονται οι διαιρέτες τάσης απαιτεί τη χρήση τεσσάρων (σήμα εξόδου) και τεσσάρων (τροφοδοσία) καλωδίων. Για την τροφοδοσία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας αγωγός (ή δύο -ένας ανά πλευρά), ο οποίος διακλαδώνεται σε τέσσερις (ή αντίστοιχα δύο ανά πλευρά) με εξωτερικές συνδέσεις. Επίσης δύο καλώδια χρειάζονται για τον διακόπτη αρχικοποίησης. Επειδή η απόσταση μεταξύ δακτύλων και περιβλήματος δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη, η χρήση ενός συνδέσμου όπως προηγουμένως δεν μπορεί να είναι πρακτική. Μια λύση θα ήταν η διέλευση των αγωγών μέσα από μια οπή (ή έναν διάτρητο σύνδεσμο μικρού μήκους, π.χ. μια βίδα), με τη στεγανότητα να επιτυγχάνεται μέσω εποξειδικής κόλλας - τεχνική που εφαρμόζεται και σε εμπορικά συστήματα υποβρύχιων εφαρμογών⁷². Το πρόβλημα είναι όμως ότι η μέθοδος αυτή δεν επιτρέπει την αποσυναρμολόγηση ή την επιδιόρθωση της σύνδεσης. Επίσης, το υλικό του περιβλήματος (POM-C) δεν επιτρέπει την αξιόπιστη χρήση εποξειδικής (ή άλλης γνωστής σε μένα) κόλλας. Η ενδιάμεση λύση που υιοθέτησα ήταν η χρήση ενός στυπιοθλίπτη, διαμέσου του οποίου θα εξέρχεται μια καλωδιοσταινία δέκα αγωγών -μιας και ... χωρούσαν- κάτι που επέτρεψε την αποφυγή εξωτερικών διακλαδώσεων. Οι στυπιοθλίπτες προσφέρουν προστασία IP68.

Σημειώνω ότι η στερέωση του συνδέσμου και του στυπιοθλίπτη στο περίβλημα γίνεται κοχλιωτά, με ταινία τεφλόν και o-rings για να διασφαλιστεί η στεγανότητά της.

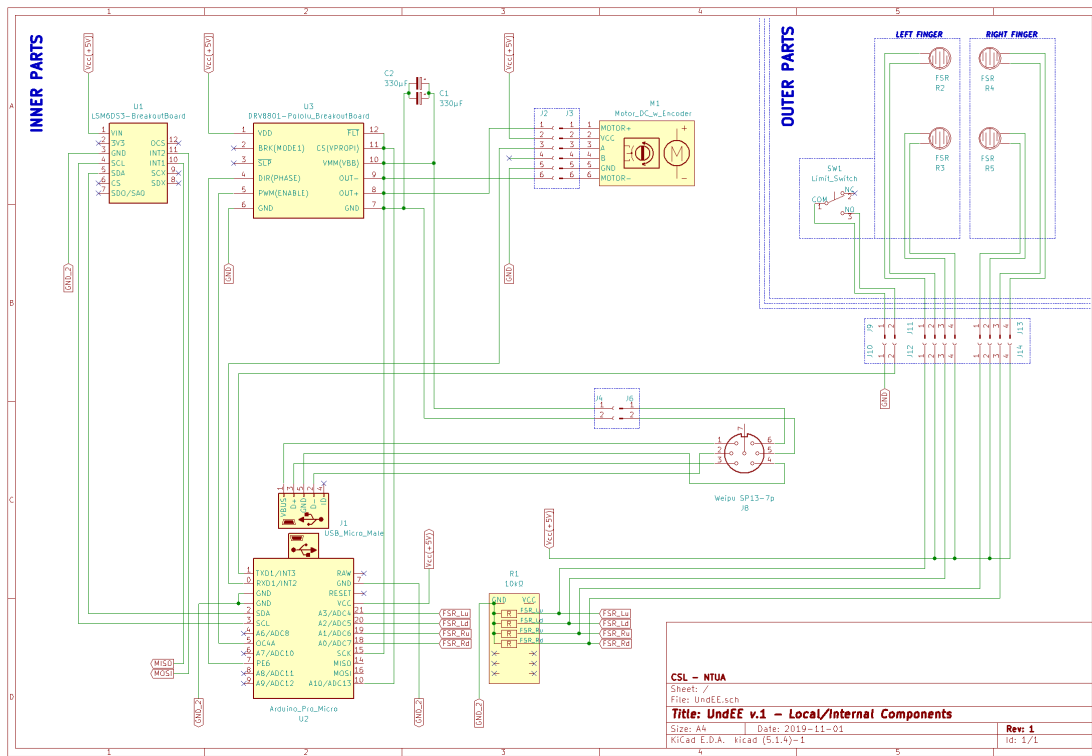


Εικόνα 3.20 - Σύνδεσμος 7 αγωγών με δείκτη προστασίας IP68. Η στεγανοποίηση επιτυγχάνεται με ελαστικά στοιχεία (o-rings) στα σημεία όπου γίνονται οι επαφές, καθώς και ταινία τεφλόν επί του σπειρώματος. Στο δεξιό μέρος ο σύνδεσμος σε τομή.

⁷¹ Το μήκος αρσενικού+θηλυκού συνδέσμου, από το σημείο πρόσδεσής τους στο περίβλημα, είναι περίπου 48mm και η μέγιστη διάμετρος περί τα 19mm. Εναλλακτικές λύσεις, γι' αυτή αλλά και την διασύνδεση των αισθητήρων FSR αναφέρονται στο κεφάλαιο 5.

⁷² "potting" / "encapsulation"

Το σύνολο αυτών των διασυνδέσεων παρουσιάζεται σε μορφή κυκλωματικού διαγράμματος στην επόμενη εικόνα, ενδεικτικά. Η εικόνα σε πλήρες μέγεθος μπορεί να βρεθεί στο Παράρτημα Β και στο αρχείο της εργασίας.



Εικόνα 3.21 - Κυκλωματικό διάγραμμα του συνόλου των εσωτερικών του μηχανισμού στοιχείων και διασυνδέσεων. Το project file στο πρόγραμμα KICAD μπορεί να βρεθεί στο αρχείο `{:\UndEE_electrical\UndEE(KICAD)}`.

Για αμφότερες τις διασυνδέσεις των αισθητήρων/διακόπτη και του συνδέσμου της Weiru χρησιμοποιήθηκαν σύνδεσμοι *Molex PicoBlade* (1.25mm pitch - οι μικρότεροι διαχειρίσιμοι), οι οποίοι χωρίζουν τους αγωγούς σε δύο τμήματα εσωτερικά του περιβλήματος. Είναι έτσι δυνατή η αποσύνδεσή τους, και μαζί με την αποσύνδεση του συνδέσμου/στυπιοθλίπτη από το περίβλημα, η -σχεδόν- πλήρης αποσυναρμολόγηση των ηλεκτρικών στοιχείων.

Ένα πολύ σημαντικό σημείο αφορά τη μεταφορά ισχύος από την εξωτερική πηγή προς τον επενεργητή: Όπως θα αναφέρω στο επόμενο υποκεφάλαιο, που αφορά τις εξωτερικές διασυνδέσεις του συστήματος, ως προδιαγραφή τέθηκε η λειτουργία του μηχανισμού σε απόσταση περίπου 9m από τον απομακρυσμένο Η/Υ και την πηγή τάσης. Λόγω αυτού του αυξημένου μήκους του αγωγού, αντιμετωπίστηκε πρόβλημα με την πλακέτα του motor driver : η αυξημένη αυτεπαγωγή⁷³ του προκαλεί την εμφάνιση υπερ-υψηλής τάσης στους εσωτερικούς διακόπτες (DFET) της H-bridge, οδηγώντας στην καταστροφή τους. Σύμφωνα και με την υπόδειξη στο τεχνικό φυλλάδιο του ολοκληρωμένου `{:\UndEE_electrical\~Datasheets\}`, λύση σε αυτό το πρόβλημα μπορεί να δοθεί με την προσθήκη χωρητικότητας, παράλληλα στην θύρα τροφοδοσίας κι όσο το δυνατόν εγγύτερα στο ολοκληρωμένο. Πέραν την χωρητικότητας που έχει

⁷³ Περίπου 17.9μH, για το χρησιμοποιούμενο καλώδιο, διατομής 0.5mm² (<https://www.eeweb.com/tools/wire-inductance>)

ενσωματωθεί στην πλακέτα από την Pololu (4.7μF), προστέθηκαν δύο SMD πυκνωτές 330μF/25V σε παράλληλη σύνδεση.

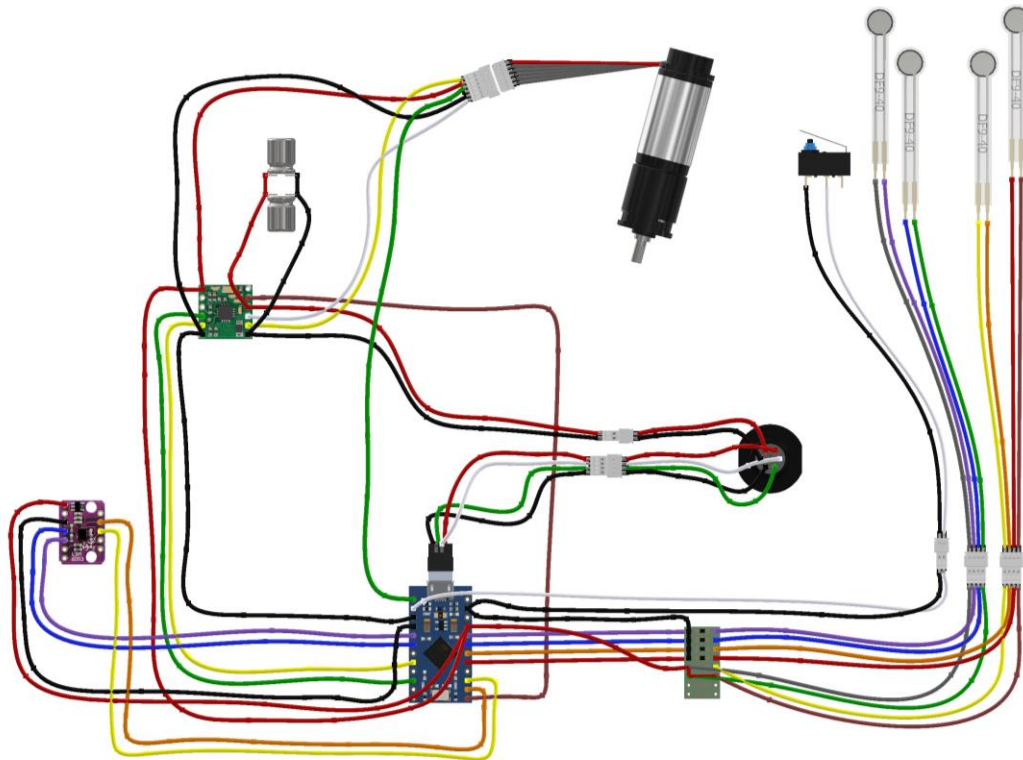
Επιπλέον στοιχεία των διασυνδέσεων σε μορφή λίστας είναι:

- χρησιμοποιήθηκαν αγωγοί διατομής περίπου 0.08 mm² (AWG28)
- για το ζεύγος που φέρει την τροφοδοσία του επενεργητή στην πλακέτα motor driver, χρησιμοποιήθηκαν αγωγοί διατομής περίπου 0.13 mm² (AWG26) για την αυξημένη ικανότητα μεταφοράς ρεύματος (έως 1.3A)⁷⁴
- δεν δόθηκε σημασία στο υλικό της μόνωσης των αγωγών
- χρησιμοποιήθηκαν -κατά το δυνατό- διαφορετικού χρώματος αγωγοί, ώστε να διευκολύνεται η αναγνώριση των διασυνδέσεων
- κατόπιν ολοκλήρωσης των διασυνδέσεων, ολόκληρες οι πλακέτες και οι επαφές περάστηκαν με προστατευτικό βερνίκι (conformal coating) σε σπρέι, κατάλληλο για ηλεκτρονικά⁷⁵
- στα άκρα των εκτεθειμένων συνδέσεων μεταξύ καλωδίων και συνδέσμων προστέθηκε μικρή ποσότητα ελαστικής κόλλας (βενζινόκολλα), για την βελτίωση της αντοχής σε μηχανικές καταπονήσεις
- όπου ήταν δυνατόν, εφαρμόστηκε θερμοσυστελλόμενο περίβλημα για τον ίδιο λόγο με από πάνω
- στις εξωτερικές του περιβλήματος διασυνδέσεις (π.χ. επαφές αισθητήρων FSR) εφαρμόστηκε θερμοσυστελλόμενο με κόλλα, η οποία συμβάλλει στο βαθμό στεγανοποίησης της ένωσης.

⁷⁴ Μια συσχέτιση των μεγεθών μπορεί να βρεθεί στην ιστοσελίδα:

https://en.wikipedia.org/wiki/American_wire_gauge

⁷⁵ Cramolin Plastik - {\UndEE_electrical\~Datasheets\}



Εικόνα 3.22 - Επίπεδη απεικόνιση της συνδεσμολογίας των εσωτερικών του μηχανισμού ηλεκτρικών στοιχείων. Διακρίνονται με τη σειρά (πάνω προς κάτω, δεξιά προς αριστερά): 1) οι τέσσερις αισθητήρες FSR με τους συνδέσμούς τους, 2) ο διακόπτης αρχικοποίησης με το σύνδεσμό του, 3) ο σύνδεσμος 7-θέσεων για τον δίαυλο USB και την τροφοδοσία +12V με τους συνδέσμούς του, 4) η πλακέτα των διαιρετών τάσης, 5) ο επενεργητής με το σύνδεσμό του, 6) η πλακέτα ελέγχου Pro Micro με τον σύνδεσμο USB Micro, 7) η πλακέτα motor driver DR8801 με τους επιπλέον πυκνωτές στη θύρα τροφοδοσίας, 8) η πλακέτα IMU LSM6DS3.

3.3 Στοιχεία εξωτερικά του μηχανισμού, διασύνδεση με απομακρυσμένο Η/Υ, τροφοδοσία

Τα στοιχεία που ταξινομούνται ως «εξωτερικά» του μηχανισμού είναι:

1. Creative Live! Cam Sync HD / Hercules Dualpix HD720p Emotion (οπτικά μέσα)
2. Λυχνία LED 9W (φωτεινή πηγή)

για τα οποία δεν θα δοθούν περισσότερες πληροφορίες από αυτές που ήδη αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 2.5 - είναι άλλωστε αυτόνομα, “plug-n-play” υποσυστήματα.

Το σημαντικότερο εξωτερικό «στοιχείο» είναι οι διασυνδέσεις του συνολικού πλέον συστήματος (μηχανισμός + οπτικά μέσο + πηγή φωτός) με τον απομακρυσμένο Η/Υ, μέσω του οποίου γίνεται ο -υψηλού επιπέδου- έλεγχός του, και φυσικά την πηγή τροφοδοσίας.

Υπενθυμίζω ότι όλες οι διασυνδέσεις για τη μεταφορά δεδομένων γίνονται μέσω διαύλου USB και η πηγή τροφοδοσίας έχει τάση +12 V και καθ' όλα επαρκή παροχή ρεύματος. Η μέγιστη προβλεπόμενη απόσταση από τον χρήστη (H/Y & τροφοδοσία) είναι 9m⁷⁶.

Από το σύστημα λοιπόν πρέπει να ξεκινούν οι ακόλουθοι:

- 6 αγωγοί (4 USB + 2 τροφοδοσία +12V) [μηχανισμός]
- 4 αγωγοί (USB) [οπτικό μέσο - κάμερα]
- 2 αγωγοί (τροφοδοσία +12V) [πηγή φωτός - λυχνία LED]

και να καταλήγουν στην πλευρά του χρήστη⁷⁷ σε:

- 1 σύνδεσμο USB-A/male [μηχανισμός]
- 1 σύνδεσμο USB-A/male [οπτικό μέσο - κάμερα]
- 1 ακροδέκτη 2 θέσεων (κλέμμα) [κοινή τροφοδοσία]

Για την έκδοση 2.0 του προτύπου USB το μέγιστο επιτρεπτό μήκος καλωδίου είναι 5m⁷⁸. Για την δημιουργία διασυνδέσεων με μήκος > 5m είναι απαραίτητη η χρήση ενός USB repeater (συνήθως ως αντάπτορας USB male/female ή ενσωματωμένο σε καλώδιο).

Επειδή η απόσταση των πέντε μέτρων είναι περίπου στα μισά της προδιαγραφής που τέθηκε και απαιτούνται δύο μονάδες repeater (μηχανισμός, οπτικό μέσο), η προσέγγισή μου ήταν η δημιουργία ενός αδιάβροχου περιβλήματος, εντός του οποίου θα γίνεται αυτή η παρεμβολή.

Ανατρέχοντας και πάλι στα είδη υδραυλικών/αποχετευτικών εγκαταστάσεων, επιλέχθηκε ένας ευθύς σύνδεσμος σωληνώσεων πολυπροπυλενίου, σε συνδυασμό με πώματα (τάπες) σε αμφότερες τις πλευρές. Η στεγανότητα εξασφαλίζεται από ενσωματωμένες τσιμούχες. Πάνω στα πώματα μπορούν να ανοιχτούν οπές και να βιδωθούν στυπιοθλίπτες, μέσω των οποίων τα καλώδια περνούν στο εσωτερικό και συνδέονται με τα repeaters.

Ισχύει και πάλι ότι οι διάμετροι είναι τυποποιημένες (40mm, 50mm, 75mm, 90mm κλπ), οπότε -ελλείψει διαθεσιμότητας σε διάσταση 75mm- επιλέχθηκαν σύνδεσμοι διαμέτρου 50mm. Αν και η χωρητικότητα είναι επαρκής, η μεγαλύτερη διάσταση θα διευκόλυνε τη χωροταξία και την συναρμολόγηση/αποσυναρμολόγηση των στοιχείων. Σημαντική παράμετρος ωστόσο, όσον αφορά στο μέγεθος, είναι η υδροδυναμική συμπεριφορά τους, καθώς αναμένεται ότι θα κινούνται εντός ή στην επιφάνεια της δεξαμενής με την κίνηση των υποβρύχιων ROV.

Σημειώνω ότι αδιάβροχα περιβλήματα για τέτοιες εφαρμογές υπάρχουν διαθέσιμα στην αγορά. Ωστόσο αυτά με δείκτη προστασίας IP68 και κατάλληλες διαστάσεις είναι ιδιαίτερα κοστοβόρα, κι άλλωστε βασίζονται στην ίδια αρχή (τσιμούχες+στυπιοθλίπτες)⁷⁹.

⁷⁶ Με την απόσταση αυτή επιχειρείται να καλυφθεί κίνηση του υποβρύχιου σε όλο το πλάτος/βάθος της δεξαμενής, με κάποιο επιπλέον περιθώριο βέβαια για τη σύνδεση με τον H/Y και την τροφοδοσία.

⁷⁷ Οι σύνδεσμοι αυτοί στην πλευρά του χρήστη επιλέχθηκαν για προφανείς λόγους όσον αφορά τα USB και κατόπιν συνεννόησης με τον υπεύθυνο του εργαστηρίου όσον αφορά τον ακροδέκτη τροφοδοσίας. Βεβαίως, δεν υπάρχει λόγος χρήσης ξεχωριστών ακροδεκτών τροφοδοσίας, καθώς η τάση είναι κοινή.

⁷⁸ Είναι ενδιαφέρον ότι ο περιορισμός δεν προκύπτει ακριβώς από την πτώση τάσης του σήματος, όπως περιγράφεται στην ιστοσελίδα: <https://web.archive.org/web/20110118225750/http://www.usb.org/developers/usbfaq/#cab1>

⁷⁹ Το κόστος ενός συνδέσμου πολυπροπυλενίου, μαζί με δύο πώματα και έξι στυπιοθλίπτες, δεν ξεπερνά τα €5.



Εικόνα 3.23 - Σύνδεσμος σωλήνων πολυπροπυλενίου, με πώματα επί των οποίων στερεώνονται στυπιοθλίπτες, σε κλειστή [αριστερά] και ανοικτή θέση [δεξιά]. Λειτουργεί ως περίβλημα για τα USB repeaters που παρεμβάλλονται στη διασύνδεση συστήματος-χρήστη. Η στεγανότητα στα πώματα εξασφαλίζεται με την περιεχόμενη τσιμούχα (διακρίνεται με μαύρο χρώμα στο κάτω χείλος).

Αν και οι στυπιοθλίπτες τοποθετούνται με ελαστικές ροδέλες στη βάση τους, δυστυχώς αποδεικνύεται ότι δεν είναι επαρκείς για την στεγανοποίηση της επαφής, οπότε βιδώνονται στα πώματα με ένα μικρό ποσό φλατζόκολλας.

Για τη διασύνδεση του μηχανισμού επέλεξα να χρησιμοποιήσω ένα καλώδιο που να περιλαμβάνει όλους τους αγωγούς που απαιτούνται, ώστε να είναι δυνατή η χρήση ενός μόνο συνδέσμου, αυτού των επτά θέσεων που αναφέρθηκα προωτέρω.

- [A]. Καλώδιο συναγερμού 6+2 αγωγών, με θωράκιση και χάλκινη γείωση (λευκό). Πολύκλωνοι αγωγοί, 100% χάλκινοι. Διατομή αγωγών $6 \times 0.22\text{mm}^2$ και $2 \times 0.5\text{mm}^2$. Εξωτερική διάμετρος 5.6mm. Μόνωση αγωγών και μανδύας από PVC, θωράκιση φύλλου αλουμινίου. Αντίσταση $0.22\text{mm}^2 - 140\Omega / \text{km}$, $0.5\text{mm}^2 - 62\Omega / \text{km}$. Χρώματα λευκό, πράσινο, κόκκινο, κίτρινο, γκρι, πορτοκαλί (0.22mm^2) και κόκκινο, μαύρο (0.5mm^2).

Οι δύο αγωγοί (πορτοκαλί, κίτρινο) δεν χρησιμοποιούνται.

Για τη διασύνδεση της κάμερας και της λυχνίας LED χρησιμοποιούνται δύο ξεχωριστά καλώδια, ένα τυπικό καλώδιο USB 2.0 και ένα καλώδιο δύο αγωγών για την τροφοδοσία της λυχνίας. Το δεύτερο έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- [B]. Καλώδιο εύκαμπτο NYLHY H03VV-F, 2 αγωγών (λευκό). Πολύκλωνοι αγωγοί, 100% χάλκινοι. Διατομή αγωγών $2 \times 0.5\text{mm}^2$. Εξωτερική διάμετρος 5mm. Μόνωση αγωγών και μανδύας από PVC. Αντίσταση $62\Omega / \text{km}$. Χρώματα μπλε και καφέ.

Δεδομένου ότι έτσι κι αλλιώς απαιτείται η διακοπή των γραμμών USB, ώστε να παρεμβληθούν τα USB repeaters, υιοθετώ της εξής συνδεσμολογία:

Εκκινώντας από την πλευρά του χρήστη (απομακρυσμένος Η/Υ, τροφοδοσία) χρησιμοποιείται μία μόνο γραμμή για την τάση +12V, η οποία περιέχεται στο καλώδιο 6 αγωγών που αναφέρθηκε. Εντός του περιβλήματος, η γραμμή διακλαδώνεται πριν συνεχίσει στην έξοδο, ώστε να συνδεθεί το καλώδιο της λυχνίας LED σε αυτή. Η γραμμή του μηχανισμού συνεχίζεται κανονικά εντός του καλωδίου 6 αγωγών.

Μελλοντικά, κι εφόσον η λυχνία LED αποδειχθεί χρήσιμη, οι γραμμές της κάμερας (USB) και της λυχνίας (τροφοδοσία) θα μπορούσαν να ενσωματωθούν σε ένα καλώδιο, σε παρόμοια φιλοσοφία αυτής του καλωδίου του μηχανισμού.

3.4 Λογισμικό ελέγχου: επισκόπηση και αλγοριθμική προσέγγιση

Ο άξονας γύρω από τον οποίο αναπτύσσεται το πρόγραμμα ελέγχου είναι η εξής λειτουργία:

*Δεδομένων από τον τελικό χρήστη
α) εντολής κίνησης και β) τιμής δύναμης συγκράτησης,
ο μηχανισμός πρέπει να κλείνει γύρω από το προς χειρισμό αντικείμενο
ασκώντας την δεδομένη δύναμη.*

Για την επίτευξη αυτής της λειτουργίας με προβλέψιμο τρόπο και με επαναληψιμότητα είναι απαραίτητη η εφαρμογή μιας μεθόδου ελέγχου: ένας Proportional-Integral (PI) ελεγκτής, με είσοδο την δύναμη που ασκείται στο αντικείμενο, μετρούμενη μέσω των αισθητήρων FSR, και έξοδο τη τάση οδήγησης του μοτέρ⁸⁰. Δεν επιλέχθηκε κάποια συνθετότερη μέθοδος ελέγχου λόγω εμπειρίας του γράφοντος και για να μειωθεί ο όγκος εργασίας.

Δεδομένου ότι ο μηχανισμός - σε αυτό το στάδιο ανάπτυξης τουλάχιστον - δεν θα λειτουργεί αυτόνομα όσον αφορά στην κεντρική λειτουργία⁸¹, ο τελικός χρήστης θα πρέπει να «οδηγεί» και τις αντίστοιχες συνοδευτικές λειτουργίες (π.χ. αρχικοποίηση της θέσης, άνοιγμα δακτύλων κ.λπ.). Αυτός ο «υψηλού επιπέδου» έλεγχος πρέπει να γίνεται μέσω της σειριακής θύρας (διάυλος USB).

Θεώρησα ότι αυτή η ανταλλαγή πληροφορίας πρέπει να είναι, κατά το δυνατόν⁸², εύχρηστη και ενστικτώδης, γι' αυτό θέλησα να ενσωματώσω στο πρόγραμμα ελέγχου μια λειτουργία τύπου «γραμμής εντολών» (“command line interface”). Δηλαδή μέσω λεκτικών ή φραστικών εντολών, ο χρήστης να είναι σε θέση να εκτελέσει τόσο τη βασική όσο και δευτερεύουσες λειτουργίες, όπως για παράδειγμα να λάβει τη διαθέσιμη από τους αισθητήρες του συστήματος πληροφορία και να επηρεάσει όσο το δυνατόν περισσότερες από τις διαθέσιμες παραμέτρους του⁸³. Το σύνολο αυτών των λειτουργιών μπορεί να αναλυθεί στις εξής δύο κατηγορίες:

1. Λειτουργίες που αλληλεπιδρούν με τον τελικό χρήστη (δίνουν ή/και λαμβάνουν πληροφορία από αυτόν) – καταχρηστικά «λειτουργίες υψηλού επιπέδου»
2. Λειτουργίες που αφορούν στην αρχικοποίηση, τον έλεγχο και το συντονισμό εσωτερικών διαδικασιών – αντίστοιχα «λειτουργίες χαμηλού επιπέδου».

⁸⁰ Συγκεκριμένα το duty cycle του PWM σήματος που οδηγεί το ολοκληρωμένο DRV8801 (H-bridge).

⁸¹ Όπως π.χ. θα μπορούσε να γίνει σε συνδυασμό με την οπτική πληροφορία από την κάμερα.

⁸² Βάσει των δυνατοτήτων του υλικού και του ... προγραμματιστή, αλλά και του διαθέσιμου χρονικού πλαισίου.

⁸³ Σε αντίθεση με μια απλοϊκότερη προσέγγιση, όπου η αποστολή/λήψη πληροφοριών μέσω της σειριακής επικοινωνίας θα γινόταν με ελέγχους-δομές “IF” επί εισαγόμενων μονογράμματος εντολών, τρόπος όχι εξίσου διαισθητικός για το χρήστη, περιοριστικός και άκομπος για τον προγραμματιστή.

Υπενθυμίζω ότι οι διαθέσιμες από το σύστημα πληροφορίες (εξαιρουμένης της οπτικής πληροφορίας από την κάμερα) είναι:

- τιμή ασκούμενης δύναμης στο αντικείμενο (εφόσον υπάρχει επαφή) από τέσσερα (συμμετρικά) σημεία του ζεύγους επιφανειών συγκράτησης, μέσω των αισθητήρων FSR
- τιμή γραμμικής και γωνιακής επιτάχυνσης του σώματος του μηχανισμού στο χώρο, καθώς και θερμοκρασίας εντός αυτού, μέσω της IMU
- τιμή έντασης ρεύματος που διαρρέει τον επενεργητή, μέσω αισθητήρα στον οδηγητή
- κατάσταση διακόπτη αρχικοποίησης (limit switch)

ενώ οι εσωτερικές διαδικασίες αφορούν σε:

- αρχικοποίηση των θυρών διασύνδεσης της MCU με τα περιφερειακά υποσυστήματα (αισθητήρες FSR, limit switch, motor driver, IMU, motor encoder)
- αρχικοποίηση της σειριακής θύρας
- αρχικοποίηση του ADC
- αρχικοποίηση της μονάδας timer/counter που θα παράγει το PWM σήμα για την οδήγηση της H-bridge
- λήψη και επεξεργασία τιμών από τους αισθητήρες, μέσω του ADC
- λήψη και επεξεργασία των εντολών από το χρήστη, μέσω της σειριακής θύρας
- εκτέλεση των υπολογισμών εισόδου/εξόδου του σχήματος ελέγχου
- οδήγηση του επενεργητή βάσει των εντολών χρήστη και του σχήματος ελέγχου, μέσω της H-bridge
- αποστολή ζητούμενων πληροφοριών προς το χρήστη, μέσω της σειριακής θύρας

Όπως μπορεί κανείς να φανταστεί από την περιγραφή των υποσυστημάτων στο υποκεφάλαιο 3.1, το πρόγραμμα ελέγχου συντάχθηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον Arduino (Arduino IDE), κάνοντας χρήση της αντίστοιχης γλώσσας (η οποία βασίζεται στις γλώσσες C και C++).

Η επιλογή αυτή έγινε διότι το περιβάλλον είναι σχετικά εύχρηστο και, κυρίως, ιδιαίτερα διαδεδομένο, με πλήθος λειτουργιών να έχουν ήδη αναπτυχθεί σε μορφή βιβλιοθηκών από την κοινότητα των χρηστών. Καθώς οι προγραμματιστικές ικανότητές μου είναι σχετικά περιορισμένες, θεώρησα ότι μπορώ να επωφεληθώ από τέτοιου είδους κομμάτια κώδικα για την ενσωμάτωση λειτουργιών σε πιο σύνθετη και παραμετροποιήσιμη μορφή.

Επίσης, η ίδια η γλώσσα αποκρύπτει πολλές από τις απαραίτητες εντολές αρχικοποίησης και λειτουργίας υποσυστημάτων του μικροελεγκτή (π.χ. σειριακή θύρα, ADC, timers κ.α.), οι οποίες αφορούν στον ορισμό ψηφίων σε αντίστοιχους καταχωρητές (registers). Ο κώδικας γίνεται έτσι πιο εύληπτος και ευανάγνωστος από κάποιον που δεν είναι εξοικειωμένος με τη λογική των καταχωρητών και συγκεκριμένα των μικροελεγκτών της Atmel (πλέον Microchip).

Τέλος, ένα σημαντικό στοιχείο του περιβάλλοντος είναι, κατά τη γνώμη μου, το γεγονός ότι επιτρέπει την ανάμιξη εντολών από όλες τις διαθέσιμες γλώσσες (Arduino, C, C++, Assembly), εξυπηρετώντας εξειδικευμένες ανάγκες που δεν καλύπτονται με την ίδια ευκολία από τη μία ή την άλλη γλώσσα.

Το πρόγραμμα λοιπόν δομήθηκε με τη φιλοσοφία της λειτουργίας μέσω γραμμής εντολών, κάνοντας χρήση τριών βιβλιοθηκών που αφορούν :

1. στην ενσωμάτωση της γραμμής εντολών – βιβλιοθήκη “SimpleCLI”⁸⁴
2. στην ενσωμάτωση του PI ελεγκτή – βιβλιοθήκη “AutoPID”⁸⁵
3. στην επικοινωνία (μέσω I²C διαύλου) και την λήψη τιμών από την IMU – βιβλιοθήκη “SparkFunLSM6DS3”⁸⁶

Ακολουθεί μια συνοπτική επεξήγηση των λειτουργιών της κάθε βιβλιοθήκης και στη συνέχεια εξηγούνται οι εντολές που διέπουν τη λειτουργία του μηχανισμού:

- βιβλιοθήκη “Simple CLI” (SpaceHuhn):

Η έκδοση που χρησιμοποιήθηκε είναι η 1.0.5.

Παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας εντολών (commands) σε συνδυασμό με παραμέτρους (arguments), οι οποίες εισάγονται από το χρήστη ως συμβολοσειρές (strings) μέσω της σειριακής επικοινωνίας. Οι εντολές μπορούν να εκτελούν δικές τους υποσυναρτήσεις. Υποστηρίζεται πολλαπλή ονοματοδότηση (μια εντολή μπορεί να κληθεί με διαφορετικά ονόματα).

Οι παράμετροι μπορούν να είναι μία ή περισσότερες ανά εντολή. Μια παράμετρος μπορεί να έχει και χαρακτήρα λογικής μεταβλητής (boolean).

Επίσης, δίνεται η δυνατότητα διαχείρισης σφαλμάτων κατά την εισαγωγή εντολών/παραμέτρων, με την εμφάνιση αντίστοιχων μηνυμάτων.

Ο αριθμός των εντολών/παραμέτρων που μπορούν να δημιουργηθούν περιορίζεται από την διαθέσιμη μνήμη του μικροελεγκτή.

Αναλυτικότερες πληροφορίες για τη σύνταξη και τις λειτουργίες της βιβλιοθήκης μπορούν να ευρεθούν στη ιστοσελίδα της υποσημείωσης 76. Προς διατήρηση της τρέχουσας πληροφορίας, η σελίδα -όπως φαίνεται τη στιγμή που συντάσσεται το κείμενο- αποθηκεύεται σε μορφή pdf.

Μαζί με το βίντεο “SimpleCLI - Command Line on Arduino”⁸⁷, και φυσικά την παρούσα έκδοση της βιβλιοθήκης, βρίσκονται στα συνοδευτικά αρχεία της εργασίας `{:\UndEE_firmware\libraries\}`.

- βιβλιοθήκη “AutoPID” :

Η έκδοση που χρησιμοποιήθηκε είναι η 1.0.3.

Πέρα από την κύρια λειτουργία, δηλαδή τον υπολογισμό της εξόδου του ελεγκτή, η βιβλιοθήκη ενσωματώνει κάποιες χρήσιμες επιπλέον λειτουργίες.

Καταρχάς, εφόσον τεθεί σε κατάσταση λειτουργίας, οι υπολογισμοί και η ανανέωση των τιμών γίνεται «αυτόματα» με το προκαθορισμένο χρονικό βήμα.

Όλες οι μεταβλητές εισόδου/ελέγχου/εξόδου περνούν στη βιβλιοθήκη ως δείκτες, συνεπώς όποια μεταβολή τους στο κυρίως πρόγραμμα λαμβάνεται αυτόματα υπόψιν στον αμέσως επόμενο υπολογισμό.

Παρέχονται συναρτήσεις που επιτρέπουν τη μεταβολή των κερδών εντός του προγράμματος, του χρονικού βήματος εκτέλεσης των υπολογισμών, καθώς επίσης και τον ορισμό της ελάχιστης και μέγιστης τιμής της εξόδου του ελεγκτή.

Τέλος, ενσωματώνεται λειτουργία αναγνώρισης εάν η είσοδος έχει φτάσει στο επιθυμητό σημείο (με δυνατότητα ορισμού πλευρικής απόκλισης ή ενός εύρους γύρω από αυτήν) και η

⁸⁴ <https://github.com/spacehuhn/SimpleCLI>

⁸⁵ <https://r-downing.github.io/AutoPID/>

⁸⁶ https://github.com/sparkfun/SparkFun_LSM6DS3_Arduino_Library/

⁸⁷ Δημοσιευμένο στη σελίδα: <https://www.youtube.com/watch?v=UyW-wlCdnKo>

λειτουργία “bang-bang”⁸⁸, η οποία θέτει την έξοδο στη μέγιστη ή την ελάχιστη τιμή της, εφόσον η απόκλιση από την επιθυμητή τιμή (σφάλμα) είναι κάτω ή πάνω από μια (οριζόμενη) τιμή.

Μικρή τροποποίηση γίνεται, ώστε να υποστηρίζεται η επιλογή διαφορετικών τιμών για την έξοδο ελέγχου κατά την λειτουργία “bang-bang”.

Αναλυτικότερες πληροφορίες μπορούν να ευρεθούν στην ιστοσελίδα της υποσημείωσης 77. Η σελίδα μαζί με την παρούσα έκδοση της βιβλιοθήκης βρίσκονται στα συνοδευτικά αρχεία της εργασίας `{:\UndEE_firmware\libraries\}`. Η τροποποιημένη έκδοση αποθηκεύεται στον φάκελο `{:\UndEE_firmware\libraries\AutoPID(undEE)}`, όπου οι αλλαγές στον κώδικα (αρχείο .cpp) σημειώνονται με το σχόλιο “ //EV Jan2020”.

- βιβλιοθήκη “SparkFunLSM6DS3”:

Η έκδοση που χρησιμοποιήθηκε είναι η 1.0.0.

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, η IMU είναι ένα αρκετά σύνθετο υποσύστημα, το οποίο ενσωματώνεται στο μηχανισμό «δοκιμαστικά». Στο πρόγραμμα ελέγχου χρησιμοποιείται μόνο η απλούστερη λειτουργία που υλοποιείται μέσω της βιβλιοθήκης, αυτή της λήψης τιμών επιταχύνσεων στους έξι βαθμούς ελευθερίας (και θερμοκρασίας). Η βιβλιοθήκη παρέχει σημαντικές επιπλέον λειτουργίες, (όπως για παράδειγμα πρόσβαση στις ρουτίνες Interrupt της IMU), με τις οποίες δεν ασχολείται καθόλου η εν λόγω εργασία.

Αναλυτικότερες πληροφορίες μπορούν να ευρεθούν στην ιστοσελίδα της υποσημείωσης 78. Η παρούσα έκδοση της βιβλιοθήκης βρίσκεται στα συνοδευτικά αρχεία της εργασίας `{:\UndEE_firmware\libraries\}`.

Οι εντολές (commands), οι οποίες υλοποιούνται μέσω της βιβλιοθήκης “Simple CLI”, είναι:

- ⇒ **help**
- ⇒ **print**
- ⇒ **controller**
- ⇒ **initialize**
- ⇒ **release**
- ⇒ **open**
- ⇒ **close**
- ⇒ **stop**

Σίγουρα δεν είναι το μοναδικό σετ εντολών που μπορεί να αναπτυχθεί, γι’ αυτό θα προσπαθήσω να αναπτύξω σχετικά σύντομα την προβληματική και το σκεπτικό μου περί χρησιμότητας της καθεμιάς. Σημειώνω ότι εφεξής θα χρησιμοποιώ την γραμματοσειρά `Consolas` για όλες τις λέξεις ή φράσεις που εμφανίζονται αυτούσια όπως στο πρόγραμμα ελέγχου.

Καταρχάς, ένα από τα βασικά ζητούμενα του προγράμματος, όπως αναφέρθηκε, είναι να μπορεί να δώσει στο χρήστη τη διαθέσιμη από τους αισθητήρες του συστήματος πληροφορία. Η λειτουργία αυτή επιτελείται μέσω της εντολής **print**. Για να είναι δυνατή η λήψη τιμών από μεμονωμένους αισθητήρες, υιοθετούνται τέσσερις συν μία παράμετροι (arguments), με όνομα ενδεικτικό της πληροφορίας:

- **imu** : τιμές επιτάχυνσης στους 6 β.ε. της IMU, συν θερμοκρασία

⁸⁸ Μια συνοπτική περιγραφή: https://en.wikipedia.org/wiki/Bang-bang_control

- **fsr** : τιμές των τεσσάρων αισθητήρων «αφής»
- **controller** : τιμές εισόδου, εξόδου, «ρύθμισης» (setpoint) του ελεγκτή (και δυνητικά όλων των σχετικών μεταβλητών στις οποίες παρέχει πρόσβαση η βιβλιοθήκη “AutoPID”)
- **current** : τιμή του ρεύματος που διαρρέει τον επενεργητή
- **stop**

Όλες οι παράμετροι ορίζονται ως μεταβλητές-σημαίες (boolean), συνεπώς η αναφορά τους μετά την εντολή ενεργοποιεί την μετάδοση της αντίστοιχης πληροφορίας προς το χρήστη μέσω της σειριακής θύρας. Αν και αμφιβάλλω για το πόσο συχνά μπορεί ο χρήστης να καλεί αυτή τη συνάρτηση απλά και μόνο για να διαβάσει τις τιμές στην οθόνη του⁸⁹, θεωρώ πως χρησιμότερο είναι να γίνεται με συνεχή τρόπο. Για το λόγο αυτό η παράμετρος **stop** χρησιμοποιείται για τη διακοπή της μετάδοσης.

Η εντολή **controller** δίνει στο χρήστη πρόσβαση στις παραμέτρους του ελεγκτή. Εν γένει, η λειτουργία αυτή μπορεί να γίνει μεταβάλλοντας τις τιμές τους απευθείας στον κώδικα του προγράμματος, αλλά απαιτεί τον επαναπρογραμματισμό της μονάδας Arduino πριν την καταχώρηση κάθε μεταβολής. Για αυτό εισήγαγα την εν λόγω εντολή. Πέραν φυσικά των δύο κερδών K_p , K_i θεώρησα χρήσιμη την πρόσβαση σε πραγματικό χρόνο και στην τιμή της απόκλισης από το επιθυμητό σημείο⁹⁰. Επίσης, θεώρησα υπαρκτή την πιθανότητα ο χρήστης να θελήσει να ενεργοποιήσει/απενεργοποιήσει τον ελεγκτή (τους υπολογισμούς του) σε αυθαίρετο χρόνο, οπότε συνολικά πέντε παράμετροι συνοδεύουν την εντολή:

- **kp** : επιτρέπει τον ορισμό του κέρδους K_p , με την αναφορά της επιθυμητής τιμής μετά την παράμετρο
- **ki** : επιτρέπει τον ορισμό του κέρδους K_i , με την αναφορά της επιθυμητής τιμής μετά την παράμετρο
- **thres** : επιτρέπει τον ορισμό της μεταβλητής `threshold`, με την αναφορά της επιθυμητής τιμής μετά την παράμετρο
- **on** : ενεργοποιεί τον ελεγκτή (παράμετρος-σημαία)
- **off** : απενεργοποιεί τον ελεγκτή (παράμετρος-σημαία)

Και στις τρεις μεταβλητές (K_p , K_i , `threshold`) εκχωρείται η αρχική τους τιμή⁹¹, εφόσον δεν αναφερθεί τιμή από το χρήστη μετά την παράμετρο.

Νομίζω ότι οι εναπομείνουσες παράμετροι στις οποίες δίνει πρόσβαση η βιβλιοθήκη (βήμα χρόνου, όρια τιμών εξόδου, όρια τιμών λειτουργίας “bang-bang” κ.λπ.) δεν θα χρειαστεί να μεταβληθούν τακτικά κατά τη λειτουργία του μηχανισμού, γι’ αυτό δεν ενσωματώνονται στην εντολή `controller` - είναι ωστόσο πολύ εύκολο να γίνει αν παρουσιαστεί τέτοια ανάγκη.

Οι εντολές που αφορούν στην **κίνηση** του μηχανισμού και η χρήση τους παρουσιάζουν μια σχετική πολυπλοκότητα, καθώς εξαρτώνται από την «ικανότητα» του μηχανισμού και του προγράμματος να γνωρίζουν την (απόλυτη) θέση των δακτύλων. Υπενθυμίζω ότι η πληροφορία θέσης που υπάρχει στο σύστημα, όπως έχει σχεδιαστεί, είναι:

- από τον encoder στη βάση του μοτέρ (σχετική **μετατόπιση** δακτύλων - με επαρκέστατη ανάλυση)

⁸⁹ Η προβολή «ωμής» της πληροφορίας των αισθητήρων είναι σίγουρα χρήσιμη στο πλαίσιο ανάπτυξης ενός συστήματος. Όταν η ορθή λειτουργία του είναι σε κάποιο βαθμό εξασφαλισμένη ωστόσο, η πληροφορία αυτή είναι μάλλον πιθανότερο να συλλέγεται για εκ των υστέρων επεξεργασία, παρά για παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο. Η ρουτίνα συλλογής αυτών των δεδομένων βέβαια, με το δεδομένο υλικό, πρέπει να γίνει στον απομακρυσμένο Η/Υ.

⁹⁰ “`threshold`” κατά τη βιβλιοθήκη

⁹¹ Παραπομπή στο κεφάλαιο 4 για τον τρόπο επιλογής των τιμών αυτών.

- από το διακόπτη αρχικοποίησης στα δάκτυλα (θέση «πλήρως κλειστά δάκτυλα»).

Το πρόβλημα που δημιουργείται μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό μέσα από την ανάλυση των εξής υποθετικών καταστάσεων λειτουργίας:

- α. Ο μηχανισμός είναι στην πλήρως κλειστή θέση για $t = 0$. Απαιτείται εντολή να ανοίξουν τα δάκτυλα (έστω πλήρως), ώστε σε επόμενο σχεδιασμό να τοποθετηθεί γύρω από κάποιο αντικείμενο.
- β. Ο μηχανισμός είναι σε *τυχαία* θέση, άλλη από την πλήρως κλειστή ή πλήρως ανοικτή, χωρίς κάποιο αντικείμενο για $t = 0$. Απαιτείται εντολή να ανοίξουν ή να κλείσουν τα δάκτυλα (έστω πάντοτε πλήρως), ανεξαρτήτως επόμενου σχεδιασμού.
- γ. Ο μηχανισμός είναι σε *τυχαία* (αλλά επαρκώς ανοικτή) ή στην πλήρως ανοικτή θέση, χωρίς κάποιο αντικείμενο για $t = 0$. Απαιτείται εντολή να κλείσουν τα δάκτυλα, ώστε να συγκρατηθεί πλέον κάποιο αντικείμενο.
- δ. Ο μηχανισμός είναι σε *τυχαία* θέση, άλλη από την πλήρως ανοικτή (ή κλειστή, αν υπάρχει τέτοιο ενδεχόμενο!), συγκρατώντας ένα αντικείμενο για $t = 0$. Απαιτείται εντολή να ανοίξουν τα δάκτυλα, ώστε να απελευθερωθεί το αντικείμενο.

Υιοθετώντας μια σύμβαση χάριν ευκολίας, η κίνηση προς την πλήρως κλειστή θέση αποκαλείται «έσω» κίνηση, ενώ η κίνηση προς την πλήρως ανοικτή θέση «έξω» κίνηση.

Από την περίπτωση α. είναι φανερό ότι πρέπει να εισαχθεί κάποιο μέτρο περιορισμού της έξω κίνησης, ειδάλλως ο επενεργητής θα συνεχίσει να κινείται οδηγώντας τα δάκτυλα στο μηχανικό τους «στοπ» - καταστρέφοντάς τα. Δεδομένου ότι η εκκίνηση γίνεται από την πλήρως κλειστή θέση και ότι για πλάτος ανοίγματος περί τα 60mm, ο κοχλίας έχει περιστραφεί περί τις 3.2 φορές⁹², ο περιορισμός αυτός μπορεί να εξασφαλιστεί μέσω του encoder. Με έναν απεριθμητή, μετρούνται οι παλμοί του και όταν συμπληρωθούν οι 3.2 περιστροφές του κοχλίου (αντιστοιχούν σε περίπου 11000 παλμούς), το μοτέρ απενεργοποιείται.

Από την περίπτωση β. ανακύπτει επιπλέον το πρόβλημα ότι: οποιασδήποτε κίνησης του μηχανισμού πρέπει να προηγείται κάποιου είδους αρχικοποίηση. Αυτό είναι αναγκαίο για δύο λόγους. Πρώτον, η εκκίνηση δεν θα γίνεται πάντα από την πλήρως κλειστή θέση και, δεύτερον, δεν υπάρχει δυνατότητα αποθήκευσης της τυχαίας, προηγούμενης θέσης στη γενική περίπτωση⁹³. Π.χ. ο απεριθμητής της περίπτωσης α. θα μηδενιστεί μετά από διακοπή της τροφοδοσίας στον μικροελεγκτή. Στην επαναφορά της τροφοδοσίας η θέση των δακτύλων δεν θα είναι βεβαίως η «μηδενική». Αν ακολουθήσει έσω κίνηση, ο μηχανισμός θα ενεργοποιηθεί τελικά τον διακόπτη και θα σταματήσει. Αν ακολουθήσει όμως έξω κίνηση, η χρήση του απεριθμητή δεν θα οδηγήσει σε έγκαιρη απενεργοποίηση. Για την περίπτωση λοιπόν που ο μηχανισμός ξεκινά τη λειτουργία του από *τυχαία* θέση, αν πριν από την εντολή κίνησης προηγηθεί μια εντολή *αρχικοποίησης*, η οποία θα τον οδηγήσει στην

⁹² βλ. υποκεφάλαιο 3.1.1

⁹³ Για την ακρίβεια υπάρχει, με δύο τρόπους (απ' όσο γνωρίζω): Ο πρώτος αφορά στην εγγραφή της ζητούμενης τιμής στη (μη-πτητική) EEPROM ανά τακτά διαστήματα ή ακόμα ίσως και πριν την ανίχνευση κατάστασης προβληματικής τροφοδοσίας. Δεδομένου του χαμηλού επιτρεπόμενου αριθμού εγγραφών σε αυτού του τύπου μνήμη της MCU (χωρίς την αλλοίωσή της), τέτοιους είδους σενάρια δεν είναι πρακτικό να κάνουν χρήση αυτής της μεθόδου. Ο δεύτερος αφορά στην εγγραφή της τιμής σε μια μεταβλητή στη μνήμη προγράμματος (FLASH), η οποία είναι μια σύνθετη διαδικασία ("self-programming"), την οποία δεν γνωρίζω να εφαρμόσω σε ένα πρόβλημα με αυτά τα χαρακτηριστικά (συχνότητα, υψηλή προτεραιότητα). Αν δεν απατώμαι, διαφορετικές αρχιτεκτονικές επεξεργαστών επιτρέπουν τέτοιου είδους εγγραφές αμεσότερα. Μια άλλη λύση (με μετατροπή του υλικού ωστόσο) είναι η χρήση ενός ποτενσιόμετρου σε κάποια από τις αρθρώσεις.

πλήρως κλειστή θέση, ο διακόπτης θα μηδενίζει σωστά τον απαριθμητή σε κάθε περίπτωση - μέχρι στιγμής.

Την λειτουργία αυτή επιτελεί η εντολή **initialize**.

Η **περίπτωση γ.** εξετάζει την συγκράτηση ενός αντικειμένου. Το πρώτο ζήτημα εδώ είναι ότι η έσω αυτή κίνηση θα πρέπει να διέπεται από το σχήμα ελέγχου, ώστε η δύναμη συγκράτησης να είναι η επιθυμητή. Από την άλλη, δεν πρέπει όλες οι έσω κινήσεις να διέπονται από το σχήμα ελέγχου: κάποιες απαιτείται να οδηγούν απλά στην πλήρως κλειστή θέση και η χρήση ελέγχου δύναμης γι' αυτές είναι «λανθασμένη»⁹⁴. Συνεπώς, εμφανίζεται η ανάγκη διαχωρισμού της έσω κίνησης σε: μία με στόχο τη συγκράτηση κάποιου αντικειμένου (υπό το σχήμα ελέγχου) και μία, τρόπο τινά, ελεύθερη.

Για την επιτέλεση των τριών κινήσεων (έξω ελεύθερη, έσω ελεύθερη, έσω ελεγχόμενη) προστίθενται οι εντολές **open** και **close**, με τη συνοδευτική παράμετρο:

- **speed** : επιτρέπει τον ορισμό της ταχύτητας (ελεύθερης) κίνησης, με την αναφορά μιας τιμής στο εύρος [1,100] μετά την παράμετρο - όπως ίσως φαντάζεται κανείς, η τιμή είναι ένα ποσοστό επί τοις εκατό της μέγιστης ταχύτητας κίνησης

Για την ελεγχόμενη έσω κίνηση, η εντολή `close` εφοδιάζεται με δύο επιπλέον παραμέτρους, μία μεταβλητή-σημαία (boolean) για το διαχωρισμό της κίνησης από την αντίστοιχη ελεύθερη και μία για τον ορισμό της επιθυμητής τιμής δύναμης συγκράτησης:

- **pi** : ενεργοποιεί με την αναφορά της την έσω κίνηση υπό έλεγχο δύναμης (παράμετρος-σημαία) και συνοδεύεται με την ακόλουθη παράμετρο
- **force** : επιτρέπει τον ορισμό της επιθυμητής δύναμης συγκράτησης του αντικειμένου προς χειρισμό, με την αναφορά της επιθυμητής τιμής μετά την παράμετρο - η οποία αποδίδεται στη μεταβλητή ρύθμισης (setpoint) του ελεγκτή

Προφανώς, η παράμετρος `speed` δεν έχει νόημα να οριστεί στην περίπτωση ελεγχόμενης κατά δύναμη κίνησης.

Ένα δεύτερο ζήτημα θα μπορούσε να προκύπτει και πάλι από την περίπτωση της τυχαίας θέσης εκκίνησης. Ωστόσο, δεδομένου ότι ο στόχος είναι πλέον σαφής (έσω κίνηση για την συγκράτηση αντικειμένου με δεδομένη δύναμη), θεωρώ πως δεν προκύπτει ανάγκη παρακολούθησης της θέσης των δακτύλων: η κίνηση ορίζεται αποκλειστικά από την ανάδραση δύναμης. Το πρόβλημα εμφανίζεται όμως στο σενάριο που αναπόδραστα ακολουθεί.

Στην **περίπτωση δ.** ο χρήστης έχει κατά πάσα πιθανότητα ολοκληρώσει το χειρισμό του αντικειμένου και επιθυμεί να το αποδεσμεύσει από το μηχανισμό. Εφόσον η θέση πριν την αποσύσφιξη είναι, εν γένει, τυχαία, κατά το άνοιγμα ο μηχανισμός δεν διαθέτει κάποια πληροφορία για το πότε πρέπει να διακόψει την έξω κίνηση.

Ας υποθεθεί ότι ο απαριθμητής που μέχρι τώρα χρησιμοποιούνταν, διατηρείται και στην περίπτωση γ. - μετρώντας αντίστροφα⁹⁵- μέχρι το τυχαίο σημείο αλλά και στην ελεγχόμενη έσω κίνηση. Οπότε -έστω με κάποιο σφάλμα- η θέση του μηχανισμού παραμένει γνωστή στο σημείο

⁹⁴ Θα μπορούσε κανείς να πει ότι έλεγχος δύναμης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση της πλήρως κλειστής θέσης (όπου τα δάκτυλα εφάπτονται μεταξύ τους), αλλά κάτι τέτοιο δεν καλύπτει τη γενική περίπτωση. Υπό την απουσία κάμερας ή συνειδητότητας του χρήστη για τις εντολές του, το σύστημα πώς θα γνωρίζει τη διαφορά στην επαφή μεταξύ δακτύλων κι αντικειμένων προς χειρισμό;

Φυσικά, το επιχείρημα αυτό δεν αποκλείει μια τέτοια προσέγγιση, καθώς με αντίστοιχες συνοδευτικές συνθήκες ή εντολές/παραμέτρους νομίζω πως είναι εφικτή. Η γνώμη μου στην παρούσα στιγμή είναι ότι αυτή η προσέγγιση είναι αρκετά πιο σύνθετη στην υλοποίησή της.

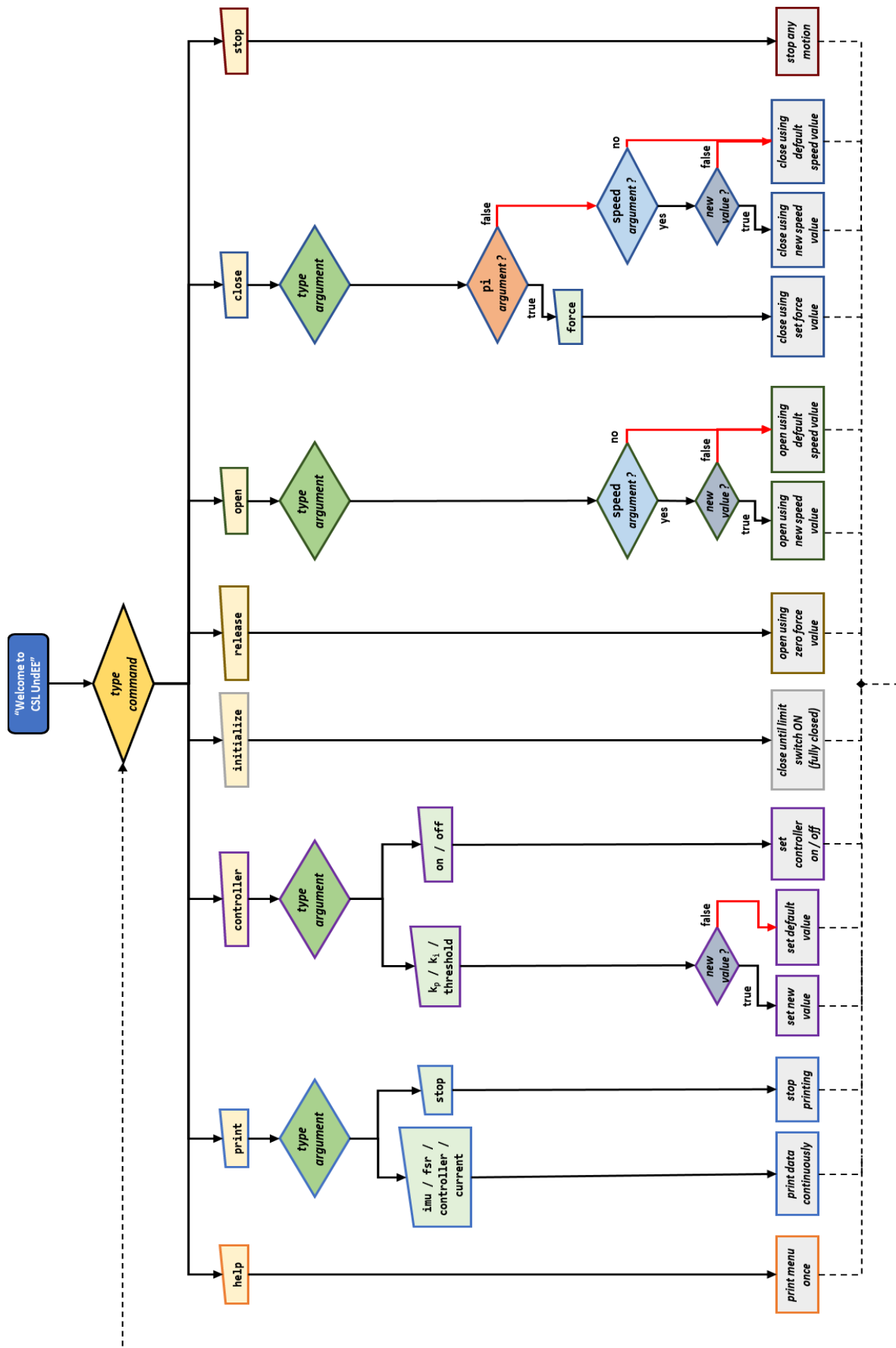
⁹⁵ κατόπιν μιας κίνησης αρχικοποίησης και πλήρους ανοίγματος

όπου ζητείται η αποσυγκράτηση. Κανείς δεν εγγυάται ωστόσο ότι μια διακοπή τροφοδοσίας δεν θα αφήσει το μηχανισμό σε κατάσταση σύσφιξης και τον απαριθμητή μηδενισμένο. Η δική μου προσέγγιση στο πρόβλημα είναι η προσθήκη μιας επιπλέον εντολής, ονόματι **release**, η οποία κάνει χρήση του σχήματος ελέγχου με τιμή `setpoint` μηδέν⁹⁶. Η επιστροφή σε κατάσταση «ετοιμότητας» μπορεί να γίνει φυσικά με τη χρήση της `initialize`.

Έχοντας καλύψει τα βασικά ζητήματα κίνησης και ανάγνωσης πληροφορίας από το μηχανισμό, προσθέτω δύο ακόμα εντολές για διευκόλυνση του χρήστη: Η εντολή **stop** λειτουργεί ως γενικός διακόπτης κίνησης, ανεξαρτήτως αν είναι ελεύθερη ή ελεγχόμενη, σαν μέτρο ασφάλειας. Η εντολή **help** έχει παρόμοιο ρόλο με την εντολή `print` και αναλαμβάνει να τυπώσει (μία φορά) ένα είδος σύντομου εγχειριδίου των διαθέσιμων εντολών/παραμέτρων και των λειτουργιών τους.

Παρατηρεί κανείς ότι με αυτό το σετ εντολών δεν δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να οδηγήσει έσω ή έξω κίνηση των δακτύλων κατά βούληση (με ορισμένη μετατόπιση). Μια τέτοια λειτουργία θα απαιτούσε κάποιας μορφής έλεγχο θέσης, είτε με ανάδραση είτε χωρίς (δεδομένου ότι οι ανοχές του μηχανισμού είναι αρκετά αυξημένες σε σχέση με την ακρίβεια του `encoder`). Αν και δίνεται η σχέση που εκφράζει τον αριθμό των παλμών του `encoder` συναρτήσει της απόστασης των επιφανειών συγκράτησης (βλ. Παράρτημα Ε), η ενσωμάτωση της λειτουργίας αυτής αφήνεται για επόμενες εκδόσεις του συστήματος.

⁹⁶ Σε αντίστοιχο πνεύμα με την εντολή `close`, η έξω κίνηση με σκοπό την αποδέσμευση αντικειμένου θα μπορούσε να ενσωματωθεί σαν παράμετρος στην εντολή `open`. Επέλεξα να την αφήσω χωριστά μόνο για τον διαισθητικό διαχωρισμό των δύο λειτουργιών στην πλευρά του χρήστη. Εφόσον αυτό δεν καθίσταται πλέον αναγκαίο, η τροποποίηση μπορεί εύκολα να γίνει - μειώνοντας ελαφρά και την πολυπλοκότητα.



Εικόνα 3.24 - Διάγραμμα ροής του προγράμματος οδήγησης του μηχανισμού μέσω εντολών (commands) και παραμέτρων (arguments).

Η διαμόρφωση των παραπάνω εντολών-λειτουργιών σε μορφή κώδικα και η σύνδεσή τους με τις υπόλοιπες αρχικοποιήσεις και διαδικασίες που αναφέρθηκαν στην αρχή του υποκεφαλαίου, παρουσιάζεται ακολούθως.

3.5 Λογισμικό ελέγχου: κώδικας σε γλώσσα C/C++ (Arduino)

Θα ήθελα να αποφύγω τον κουραστικό σχολιασμό επί των διαφόρων στοιχείων του - σχετικά εκτενούς- κώδικα και στη συνέχεια την παράθεσή του εξ ολοκλήρου. Η παρουσίαση θα γίνει τμηματικά και οι όποιες παρατηρήσεις κι επεξηγήσεις θα δοθούν μέσω των σχολίων⁹⁷, που συνοδεύουν τις γραμμές κώδικα.

Έδωσα προσοχή στα ονόματα των μεταβλητών και των συναρτήσεων, ώστε να είναι αντιπροσωπευτικά της χρήσης και λειτουργίας τους, έστω σε βάρος της έκτασής τους. Νομίζω πως αυτό θα βοηθήσει και τον αναγνώστη να προσεγγίσει το πρόγραμμα. Τα τμήματα στα οποία διαχωρίζω το λογισμικό είναι τα εξής:

1. definitions & headers
2. variables & initialization
3. interrupts
4. (sub) functions
5. setup
6. main (function)

Στο πρώτο μέρος καταχωρούνται ονόματα στις φυσικές θύρες της μονάδας ελέγχου και καλούνται οι βιβλιοθήκες που θα χρησιμοποιηθούν.

Στο δεύτερο μέρος δηλώνονται οι μεταβλητές που θα χρησιμοποιηθούν στο πρόγραμμα και εκχωρούνται οι αρχικές τους τιμές.

Στο τρίτο μέρος αναφέρονται οι δύο Interrupt Service Routines (ISR), επιφορτισμένες με τον έλεγχο του απαριθμητή για τον encoder και του διακόπτη αρχικοποίησης.

Στο τέταρτο μέρος αναφέρονται οι υπορουτίνες του προγράμματος, οι οποίες ενσωματώνουν το σύνολο των λειτουργιών που θεώρησα ότι μπορούν να εξαλειφθούν από την κύρια συνάρτηση (loop στη γλώσσα Arduino ή main για τη C), χάριν ενός τακτικότερου και πιο ευανάγνωστου προγράμματος.

Στο πέμπτο μέρος (setup στη γλώσσα Arduino) γίνονται οι αρχικοποιήσεις που αφορούν στα λειτουργικά υποσυστήματα της μονάδας ελέγχου και ορίζονται οι εντολές χρήστη.

Στο έκτο και τελευταίο μέρος συντάσσεται η κύρια συνάρτηση, όπου υλοποιείται και το κεντρικό κομμάτι του σχήματος ελέγχου.

⁹⁷ Σημειώνω ότι τα σχόλια αυτά είναι εξ ολοκλήρου στην αγγλική γλώσσα, καθώς θεωρώ άκομψη την χρήση λατινικών χαρακτήρων με ελληνική γραμματική-συντακτικό (ή τη μετάφραση ορολογίας), σε ένα περιβάλλον που έτσι κι αλλιώς εκφράζεται αποκλειστικά στην αγγλική.

1. definitions & headers

```
#define DIR_PIN 7           // pin definitions for DRV8801 motor driver
#define PWM_PIN 5
#define CS_PIN A10
#define FAULT_PIN 12

#define FSR_Rd_PIN A0      // pin definitions for FSR sensors
#define FSR_Ru_PIN A1
#define FSR_Ld_PIN A2
#define FSR_Lu_PIN A3

#define encoderA_PIN 1     // pin definitions for motor encoder & limit switch
#define limSwitch_PIN 0

// -----

#include <Wire.h>           // libraries
#include <AutoPID.h>
#include <SimpleCLI.h>
#include <SparkFunLSM6DS3.h>
```

2. variables & initialization

```
volatile byte pwm_value = 0; // DRV8801 variables
int currentSense = 0;
float currentValue = 5.0;
int currentLimit = 650;
int softCurrentLimit = 750; // for initialize, release, open, close (no control) motions
int hardCurrentLimit = 1350; // for close (controlled) motion

volatile int count_encA = 0; // motor encoder variables
volatile int count_sign = +1;
bool fullyOpen_flag = false;
bool fullyClosed_flag = false;

unsigned int fsr_Ld = 0; // Left-up FSR: violet
unsigned int fsr_Lu = 0; // Left-down FSR: blue
unsigned int fsr_Ru = 0; // Right-down FSR: orange
unsigned int fsr_Rd = 0; // Right-up FSR: red

double control_input = 0; // PI controller variables
double control_setpoint = 0;
double control_output = 0;
```

```

double coef_Kp = 1.2;
double coef_Ki = 0.05;
double integral_term = 0.0;
unsigned int setpoint_threshold = 50;
bool setpoint_flag = false;
bool controller_state = false;
bool forceReached_printOnce_flag = false;

bool printIMU_flag = false;          // printMode_switch function variables
bool printFSR_flag = false;
bool printController_flag = false;
bool printCurrent_flag = false;
bool printStop_flag = false;

// -----
//AutoPID :: AutoPID(double *input, double *setpoint, double *output, double outputMin,
double outputMax, double Kp, double Ki, double Kd)//
AutoPID myPID(&control_input, &control_setpoint, &control_output, -
190, 190, coef_Kp, coef_Ki, 0);

LSM6DS3 myIMU;                      //Default constructor is I2C, addr 0x6B
SimpleCLI cli;

Command cmdHelp;
Command cmdPrint;
Command cmdController;
Command cmdInitialize;
Command cmdRelease;
Command cmdOpen;
Command cmdClose;
Command cmdGenStop;

```

Η δήλωση των μεταβλητών και η αρχικοποίηση των τιμών τους δεν παρουσιάζει κάποιο σημείο προσοχής. Οι ίδιες οι μεταβλητές και η χρήση τους θα αναδειχθεί στην συνέχεια μέσα στις συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται.

Όσον αφορά την εντολή δημιουργίας του αντικειμένου AutoPID, η γενική της μορφή όπως εμφανίζεται στη βιβλιοθήκη είναι :

```

AutoPID(double *input, double *setpoint, double *output, double outputMin, double output
Max, double Kp, double Ki, double Kd)

```

Φαίνονται με τη σειρά οι τρεις μεταβλητές εισόδου, αναφοράς και εξόδου (οι οποίες ορίζονται ως δείκτες), οι δύο μεταβλητές ορισμού του εύρους της εξόδου (min, max) και οι τρεις μεταβλητές που εκφράζουν τα κέρδη του ελεγκτή (αναλογικό Kp, ολοκληρωτικό Ki, διαφορικό Kd).

Η έξοδος - η οποία είναι το duty cycle του σήματος PWM που οδηγεί το DRV8801, σε αναπαράσταση 8-bit integer⁹⁸ - ορίζεται στο εύρος [-255, 255]. Οι αρνητικές τιμές εξόδου εκφράζουν κίνηση με αντίθετη φορά (έξω κίνηση κατά την σύμβαση του υποκεφαλαίου 3.4), για παράδειγμα όταν το σφάλμα στο σχήμα ελέγχου γίνεται αρνητικό. Σημειώνω ότι ενώ η έξοδος είναι στο εύρος που ορίστηκε, δεν γίνεται να εκχωρηθούν αρνητικές τιμές στην εντολή που δημιουργεί το PWM σήμα. Κατόπιν υπολογισμού της εξόδου ελέγχου, ελέγχεται το πρόσημο και ενεργοποιείται αντίστοιχα ένα digital pin συνδεδεμένο με το DIR pin του DRV8801. Το Kd ορίζεται εξαρχής μηδέν καθώς ο ελεγκτής δεν έχει διαφορικό όρο.

3. interrupts

```
void encoderA_ISR()
{
  // ESCAP 16G88_B16_MR2 encoder outputs 128PPR and gearhead has a ratio of 27:1 --
  > 3456 pulses per revolution.
  // for a 0-
  60mm finger travel: about 7.7mm Lead screw nut travel, with 2.4mm travel per revolution
  --> about 3.2 revolutions
  // max pulse counter value: about 3.2*3456 --> 11060
  // degrees per count: 360/3456 --> 0.1042
  // counts per degree: 9.6

  count_encA = count_encA + count_sign;           // increment counter: +1(openi
ng) | -1(closing)
  //if ((count_encA%25)==0) Serial.println(count_encA);

  if (count_encA > 11000)      // set counter to max value & return. an attempt to correc
t overshoot.
  {
    count_encA = 11060;
    return;
  }

  if (count_encA == 11000)    // **!!OVERSHOOTS about 60 pulses @ 50% speed!!
  {
    analogWrite(PWM_PIN, 0);
    fullyOpen_flag = true;    // used in openCallback to avoid damage from {open} comman
ds while in fully open position.
    count_encA = 11000;
    Serial.println("** FULLY OPEN GRIP **\n"); // **!! case "closing" after counter ove
rflow (value=2^15), yields same message - WRONG !!**
  }
}
// -----
```

⁹⁸ τιμές 0 έως 255

```

void limSwitch_ISR()
{
    // When gripper is fully closed the limit switch closes, driving PIN1 HIGH and activating this ISR.
    // Setting the encoder pulse counter to '0' initializes the positioning system.

    static unsigned long last_ISR_time = 0;
    unsigned long ISR_time = millis();

    // If interrupts come faster than 150ms, assume it's a bounce and ignore
    if (((ISR_time-last_ISR_time) > 150) && (fullyClosed_flag == false))
    {
        analogWrite(PWM_PIN, 0);
        count_encA = 0;
        fullyClosed_flag = true;
        Serial.println("** FULLY CLOSED GRIP **\n");
    }
    last_ISR_time = ISR_time;
}

```

Η πρώτη ρουτίνα (encoderA_ISR) αφορά στην καταμέτρηση των παλμών από το (μαγνητικό) encoder (το κανάλι A) του επενεργητή. Χρησιμοποιείται η μεταβλητή count_sign για την αύξηση/μείωση του αριθμού, αναλόγως αν η κίνηση των δακτύλων είναι προς την ανοικτή ή την κλειστή θέση.

Ο καταμετρητής χρησιμοποιείται για την παύση της κίνησης όταν τα δάκτυλα φτάσουν στην πλήρως ανοικτή θέση (11000 παλμοί), με την αρχικοποίησή του (μηδενισμός) να γίνεται μέσω της δεύτερης ρουτίνας, limSwitch_ISR. Η ρουτίνα αυτή ενεργοποιείται με το κλείσιμο του διακόπτη που τοποθετείται στο σύνδεσμο των δακτύλων, στην πλήρως κλειστή θέση των δακτύλων.

Σημειώνεται ότι, καθώς δεν γίνεται έλεγχος θέσης στην κίνηση του μηχανισμού, παρατηρείται μια υπερακόντιση στην τιμή του απαριθμητή παλμών. Μια προσπάθεια να παρακαμφθεί το ζήτημα αυτό γίνεται με το πρώτο IF της ρουτίνας encoderA_ISR.

4. (sub) functions

```

double force_to_control_setpoint(double user_setpnt)
{
    double converted_setpnt = 0;

    // calibration function: y = -57 +0.817*x -0.000465*x^2 +1.06E-07*x^3
    // for x = ~73, y = 0 -> this is the per-sensor minimum force in g-f

    user_setpnt = user_setpnt/4;    // per sensor equivalent value

```

```

    converted_setpnt = -57 +0.817*user_setpnt -
0.000465*user_setpnt*user_setpnt +0.00000106*user_setpnt*user_setpnt*user_setpnt;
    converted_setpnt = converted_setpnt*4;    // total equivalent value

    return converted_setpnt;
}
// -----

```

Η υπορουτίνα `force_to_control_setpoint` χρησιμοποιείται για την μετατροπή της τιμής δύναμης εισόδου (σε g-f) που δίνει ο χρήστης στην τιμή που εισάγεται στο σχήμα ελέγχου (`control setpoint`), σε μονάδες ADC.

Ο αλγόριθμος μετατροπής και η συνάρτηση βαθμονόμησης περιγράφονται αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 4.1.

```

void printmode_switch()
{
    if (printIMU_flag == true)
    {
        Serial.print("\nAccelerometer:\n");
        Serial.print(" X = ");
        Serial.println(myIMU.readFloatAccelX(), 4);
        Serial.print(" Y = ");
        Serial.println(myIMU.readFloatAccelY(), 4);
        Serial.print(" Z = ");
        Serial.println(myIMU.readFloatAccelZ(), 4);

        Serial.print("\nGyroscope:\n");
        Serial.print(" X = ");
        Serial.println(myIMU.readFloatGyroX(), 4);
        Serial.print(" Y = ");
        Serial.println(myIMU.readFloatGyroY(), 4);
        Serial.print(" Z = ");
        Serial.println(myIMU.readFloatGyroZ(), 4);

        Serial.print("\nThermometer:\n");
        Serial.print(" Degrees C = ");
        Serial.println(myIMU.readTempC(), 4);
        Serial.println("");
        Serial.println("-----");
        return;
    }
    else if (printFSR_flag == true)
    {
        Serial.print("\n Finger Left:");
        Serial.print("\t\t\t Finger Right:\n");
        Serial.print("up = ");
    }
}

```



```

Serial.print(fsr_Lu);
Serial.print("\t\t\t");
Serial.print("up = ");
Serial.println(fsr_Ru);
Serial.print("down = ");
Serial.print(fsr_Ld);
Serial.print("\t\t\t");
Serial.print("down = ");
Serial.println(fsr_Rd);
Serial.println();
Serial.println("-----");
return;
}
else if (printController_flag == true)
{
    Serial.print("\n Control Input = ");
    Serial.print(control_input);
    Serial.print("\n Control Setpoint = ");
    Serial.print(control_setpoint);
    Serial.print("\n Control Output = ");
    Serial.print(control_output);
    Serial.print("\n Coef. Kp = ");
    Serial.print(coef_Kp);
    Serial.print("\n Coef. Ki = ");
    Serial.print(coef_Ki);
    Serial.print("\n Integral term = ");
    Serial.print(integral_term);
    Serial.print("\n Setpoint flag = ");
    Serial.print(setpoint_flag);
    Serial.println();
    Serial.println("-----");
    return;
}
else if (printCurrent_flag == true)
{
    Serial.print("\n current (mA) = ");
    Serial.print(currentValue);
    Serial.println();
    Serial.println("-----");
    return;
}
}
// -----

```

Η υπορουτίνα `printmode_switch` αναλαμβάνει να εκτυπώσει δεδομένα από τους αντίστοιχους αισθητήρες, κατόπιν χρήσης της εντολής `print` και βάσει των αντίστοιχων παραμέτρων που χρησιμοποιούνται σε αυτή (`imu`, `fsr`, `controller`, `current`, `stop`).

```

void helpCallback (cmd* cmdPtr)
{
  Serial.println(F("\n\nPrint commands"));
  Serial.println(F("> {h/elp} prints a list of all commands."));

  Serial.println(F("> {p/rint ...} continuously prints data from:"));
  Serial.println(F("  -imu -> accelerometer, gyroscope, temperature"));
  Serial.println(F("  -fsr -> force sensors"));
  Serial.println(F("  -co/ntrol/ler -> controller input, setpoint, output, Kp, Ki"));
  Serial.println(F("  -cu/rrent -> motor current sensor"));

  Serial.println(F("> {p/rint -s/top} stops data printing."));

  Serial.println(F("\n\nController commands"));
  Serial.println(F("> {c/ontrol/ler -kp [val]} sets new Kp coef. value. Default: 2.0"));
  Serial.println(F("> {c/ontrol/ler -ki [val]} sets new Ki coef. value. Default: 0.2"));
  Serial.println(F("> {c/ontrol/ler -
thres [val]} sets new setpoint threshold value. Default: 50"));
  Serial.println(F("NOTE: omit [val] after arguments to set default values."));
  Serial.println(F("> {c/ontrol/ler -on|off} sets (force) controller on|off."));
  Serial.println(F("> {c/ontrol/ler -reset} resets controller integral calculation."));

  Serial.println(F("\n\nMotion commands"));
  Serial.println(F("> {init/iliaze} sets closing motion until limit switch ON (fully clo
sed). Initializes encoder value to zero. Motion speed: 50 (half speed)"));
  Serial.println(F("> {r/el/ease} starts closing motion setting target closing force to
zero g-f. Used to release previously grasped objects."));
  Serial.println(F("> {o/pen -
s/peed [val]} starts opening motion. Speed argument (percentage of full speed) is option
al. Default speed: 50 (half speed)"));
  Serial.println(F("> {c/lose -
speed [val]} starts closing motion. Speed argument (percentage of full speed) is optiona
l. Default speed: 50 (half speed)"));
  Serial.println(F("> {c/lose -pi -
f/orce [val]} starts closing motion and sets target closing force in g-
f (value must be defined). Allowed: [1,2000]."));
  Serial.println(F("NOTE: expect an error of ±50 g-f in closing force value."));

  Serial.println(F("> {a,z,x,s/top} stops all motions and data printing and sets control
ler off. An emergency measure or just a general stop command."));

  Serial.println(F(""));
  Serial.println(F("-----"));
}
// -----

```

Η υπορουτίνα `helpCallback` «αντιδρά» στην εντολή χρήση **help** και παρουσιάζει μια λίστα με τις διαθέσιμες εντολές και τις παραμέτρους τους.

Χρησιμοποιείται το επίθεμα `F` στις εντολές `Serial.print` για την αποθήκευση των χαρακτήρων στην μνήμη προγράμματος (Flash), εξοικονομώντας χώρο στη μνήμη SRAM.

```
void printCallback (cmd* cmdPtr)
{
    Command cmd(cmdPtr);
    Argument argIMU = cmd.getArgument("imu");           // Get arguments
    Argument argFSR = cmd.getArgument("fsr");
    Argument argController = cmd.getArgument("controller");
    Argument argCurrent = cmd.getArgument("current");
    Argument argStop = cmd.getArgument("stop");

    printIMU_flag = argIMU.isSet();                     // Get values
    printFSR_flag = argFSR.isSet();
    printController_flag = argController.isSet();
    printCurrent_flag = argCurrent.isSet();
    printStop_flag = argStop.isSet();
}
// -----
```

Η υπορουτίνα `printCallback` «αντιδρά» στην εντολή χρήση **print** και ενεργοποιεί τις μεταβλητές σημαίες που χρησιμοποιεί η υπορουτίνα `printmode_switch`, ανάλογα με τις παραμέτρους της εντολής (**`imu`**, **`fsr`**, **`controller`**, **`current`**, **`stop`**).

```
void controllerCallback (cmd* cmdPtr)
{
    Command cmd(cmdPtr);

    Argument argKp = cmd.getArgument("kp");           // Get arguments
    Argument argKi = cmd.getArgument("ki");
    Argument argThreshold = cmd.getArgument("thres");
    Argument argOn = cmd.getArgument("on");
    Argument argOff = cmd.getArgument("off");
    Argument argReset = cmd.getArgument("reset");

    double new_coef_Kp = argKp.getValue().toDouble(); // Get values
    double new_coef_Ki = argKi.getValue().toDouble();
    int new_thres = argThreshold.getValue().toInt();
    bool control_on = argOn.isSet();
    bool control_off = argOff.isSet();
    bool control_reset = argReset.isSet();
}
```

```

if ((new_coef_Kp!=coef_Kp) || (new_coef_Ki!=coef_Ki) || (new_thres!=setpoint_threshold
))
{
  if (new_coef_Kp!=coef_Kp)
  {
    coef_Kp = new_coef_Kp;
  }
  if (new_coef_Ki!=coef_Ki)
  {
    coef_Ki = new_coef_Ki;
  }
  if (new_thres!=setpoint_threshold)
  {
    if ((new_thres>500) || (new_thres<1))      // validity check for setpoint thresho
ld input value
    {
      Serial.println("\n* Threshold value must be between 1 and 500");
      return;
    }
    setpoint_threshold = new_thres;
  }

  myPID.setGains(coef_Kp, coef_Ki, 0);
  Serial.println("\n* new controller parameters set! *");
  Serial.print(" Kp = ");
  Serial.print(coef_Kp);
  Serial.print("\tKi = ");
  Serial.print(coef_Ki);
  Serial.print("\tsetpoint threshold = ");
  Serial.println(setpoint_threshold);
  Serial.print("\n");
}

// complimentary controller on/off 'switch', independent of controlled motion operatio
n.
if (control_on == true)
{
  controller_state = true;
  myPID.run();    //set the PI controller ON
  Serial.println("*** Controller is ON ***");
  Serial.println("-----");
}
if (control_off == true)
{
  controller_state = false;
  myPID.stop();   //set the PI controller OFF
  Serial.println("*** Controller is OFF ***");
  Serial.println("-----");
}

```

```

}
if (control_reset == true)
{
  myPID.reset(); //reset the integral calculation
  Serial.println("** Controller I-term is reset **");
  Serial.println("-----");
}
}
// -----

```

Η υπορουτίνα `controllerCallback` «αντιδρά» στην εντολή χρήση **controller** και καταχωρεί τιμές στις παραμέτρους του σχήματος ελέγχου (**kp**, **ki**, **thres**, **on/off**), βάσει των προτιμήσεων του χρήστη. Μη αναφορά τιμών μετά τις παραμέτρους **kp**, **ki**, **thres** οδηγεί στην καταχώρηση των προεπιλεγμένων τιμών. Πριν την έξοδο από την υπορουτίνα τυπώνονται οι τελευταίες τιμές των παραμέτρων.

```

void initializeCallback (cmd* cmdPtr) // set closing motion until limit SW marks
FULL CLOSED pos - used to initialize encoder/counter value to 0.
{
  Command cmd(cmdPtr);
  Serial.println("\n Initializing ...");

  //count_encA = 0;
  count_sign = -1;
  fullyOpen_flag = false;
  controller_state = false;
  currentLimit = softCurrentLimit;

  digitalWrite(DIR_PIN, HIGH); //set CLOSING
  analogWrite(PWM_PIN, 100); //motion at ~40% speed
}
// -----

```

Η υπορουτίνα `initializeCallback` «αντιδρά» στην εντολή χρήση **initialize** και οδηγεί τα δάκτυλα σε κίνηση προς την κλειστή θέση, μέχρι να ενεργοποιηθεί ο διακόπτης (και η ρουτίνα `interrupt`) αρχικοποίησης. Η κίνηση γίνεται με μειωμένη ταχύτητα για λόγους ασφάλειας. Σημειώνεται η τιμή -1 στη μεταβλητή προσήμου `count_sign` του καταμετρητή.

```

void releaseCallback (cmd* cmdPtr) // set opening motion until fsr value are below
a threshold, i.e. object is released
{
  Command cmd(cmdPtr);
  Serial.println("\n Releasing object ...");

  count_sign = +1;
  fullyOpen_flag = false;
}

```

```

controller_state = true;
currentLimit = softCurrentLimit;

digitalWrite(DIR_PIN, LOW); //set OPENING
control_setpoint = 0;
return;
}
// -----

```

Η υπορουτίνα `releaseCallback` «αντιδρά» στην εντολή χρήση **release** και οδηγεί τα δάκτυλα σε κίνηση υπό το σχήμα ελέγχου, με μηδενική τιμή `setpoint`. Η κίνηση γίνεται με το 1/3 της πλήρους ταχύτητας.

```

void openCallback (cmd* cmdPtr) // set opening motion until encoder marks FULL OPEN
pos (11060 counts)
{
  Command cmd(cmdPtr);

  if (fullyOpen_flag == false)
  {
    Argument argSpeed = cmd.getArgument("speed"); // Get arguments

    int speedVal = argSpeed.getValue().toInt(); // Get values

    if ((speedVal>100) || (speedVal<1)) // validity check for speed input value
    {
      Serial.println("\n* Enter a value between 1 and 100! *");
      return;
    }

    Serial.print("\n Grip opening ... ");
    Serial.print("\t speed: ");
    Serial.print(speedVal);
    Serial.print("%");
    Serial.println("\t control OFF");

    fullyClosed_flag = false;
    controller_state = false;
    currentLimit = softCurrentLimit;
    speedVal = map(speedVal,1,100,1,255); // transform speed value (percentage) to PWM
value (byte)
    digitalWrite(DIR_PIN, LOW); // set OPENING
    count_sign = +1;
    analogWrite(PWM_PIN, speedVal);
  }
  else if (fullyOpen_flag == true)
  {

```

```

Serial.println("\n** Gripper fully open! **");
return;
}
// -----

```

```

void closeCallback (cmd* cmdPtr)           // set closing motion, either free or force-
controlled
{
  Command cmd(cmdPtr);

  Argument argSpeed = cmd.getArgument("speed");           // Get arguments
  Argument argPI = cmd.getArgument("pi");
  Argument argForce = cmd.getArgument("force");

  int speedVal = argSpeed.getValue().toInt();           // Get values
  double force_setpoint = argForce.getValue().toDouble();
  bool controlled_closing = argPI.isSet();

  if (controlled_closing == false)
  {
    if ((speedVal>100) || (speedVal<1))           // validity check for speed input value
    {
      Serial.println("\n* Enter a value between 1 and 100! *");
      return;
    }

    Serial.print("\n Grip closing ...");
    Serial.print("\t speed: ");
    Serial.print(speedVal);
    Serial.print("%");
    Serial.println("\t control OFF");
    controller_state = false;
    currentLimit = softCurrentLimit;
    speedVal = map(speedVal,1,100,1,255);           // transform speed value (percentage) to PW
M value (byte)
    digitalWrite(DIR_PIN, HIGH);           // set CLOSING
    count_sign = -1;
    analogWrite(PWM_PIN, speedVal);
    fullyOpen_flag = false;
    return;
  }

  if (controlled_closing == true)
  {
    if ((force_setpoint>2000) || (force_setpoint<300))           // validity check for force
input value

```

```

{
  Serial.println("\n* Enter a value between 300 and 2000! *");
  return;
}
Serial.print("\n Grip closing ...");
Serial.print("\t target force: ");
Serial.print(force_setpoint);
Serial.print("g-f");
Serial.println("\t control ACTIVE");
controller_state = true;
currentLimit = hardCurrentLimit;
control_setpoint = force_to_control_setpoint(force_setpoint);
fullyOpen_flag = false;
delay(100);
Serial.println("\t.\n");
delay(100);
Serial.println("\t.\n");
delay(100);
Serial.println("\t.\n");
delay(300); //wait 0.6s before closing
return;
}
}
// -----

```

```

void genStopCallback (cmd* cmdPtr)
{
  Command cmd(cmdPtr);

  myPID.stop();
  analogWrite(PWM_PIN, 0);
  controller_state = false;
  fullyOpen_flag = false;
  printStop_flag = true;
  Serial.println("\n\n *** GENERAL STOP ***\n\n");
  return;
}

```


5. Setup

```
void setup()
{
  pinMode(DIR_PIN, OUTPUT);           // LOW = closing | HIGH = opening
  pinMode(encoderA_PIN, INPUT);
  pinMode(limSwitch_PIN, INPUT_PULLUP);
  //pinMode(FAULT_PIN, INPUT);

  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(encoderA_PIN), encoderA_ISR, RISING);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(limSwitch_PIN), limSwitch_ISR, FALLING);

  // set timer4 (-> drv8801 pwm) prescaler value to 2 (PWMfreq=16MHz*2/prescaler/2^10) -
-> ~15.6kHz
  TCCR4B = 0b00000010;

  // call .begin() to configure the IMU
  myIMU.begin();

  // set the PI controller parameters
  myPID.setTimeStep(11);             //(ms)
  //AutoPID::setBangBang(double bangOn, double bangOff, double bangOutMin, double bangOu
tMax)//
  myPID.setBangBang(300, 50, -
16, 85);                             // If input below (setpoint - bangOn), output -> bangOutMax
                                       // If input above (setpoint + bangOff), output -> bangOutMin

  // define commands and arguments
  cmdHelp = cli.addCommand("h/elp", helpCallback);
  cmdPrint = cli.addCommand("p/rint", printCallback);
  cmdPrint.addFlagArgument("imu");
  cmdPrint.addFlagArgument("fsr");
  cmdPrint.addFlagArgument("co/ntr/ler");
  cmdPrint.addFlagArgument("cu/rrent");
  cmdPrint.addFlagArgument("s/top");
  cmdController = cli.addCommand("control/ler", controllerCallback);
  cmdController.addArgument("kp", "1.2");
  cmdController.addArgument("ki", "0.05");
  cmdController.addArgument("thres", "50");
  cmdController.addFlagArgument("on");
  cmdController.addFlagArgument("off");
  cmdController.addFlagArgument("reset");
  cmdInitialize = cli.addCommand("init/ialize", initializeCallback);
  cmdRelease = cli.addCommand("r/el/ease", releaseCallback);
  cmdOpen = cli.addCommand("o/p/en", openCallback);
  cmdOpen.addArgument("s/peed", "50");
  cmdClose = cli.addCommand("c/lose", closeCallback);
  cmdClose.addFlagArgument("pi");
```

```

    cmdClose.addArgument("s/peed", "50");
    cmdClose.addArgument("f/orce", "0");
    cmdGenStop = cli.addCommand("a,z,x,s/top",genStopCallback);

    // begin serial connection
    Serial.begin(115200);
    while (!Serial);
    Serial.println("Welcome to CSL UndEE!\n\n");
}

```

6. main (function)

```

void loop()
{
    // -----
    fsr_Lu = analogRead(FSR_Lu_PIN);
    fsr_Ld = analogRead(FSR_Ld_PIN);
    fsr_Ru = analogRead(FSR_Ru_PIN);
    fsr_Rd = analogRead(FSR_Rd_PIN);

    currentSense = analogRead(CS_PIN);
    currentValue = (5.0/1024)*currentSense*2000;    // 9.765 mA per ADC unit

    if (currentValue>currentLimit)    // prevent DC motor overccurent: ESCAP 16G88-
214E (Istall=1.485A)
    {
        analogWrite(PWM_PIN, 0);
        Serial.print("** STOPPED - overcurrent! **");
        Serial.println("\t\tentering inactivity for 1000ms");
        Serial.println("\t.\n");
        Serial.println("\t.\n");
        Serial.println("\t.\n");
        delay(1000);
    }
    // -----

    if (Serial.available() > 0)    // CLI library
    {
        String serial_input = Serial.readStringUntil('\n');    // **! works with "NewLine"
option in serial monitor !**
        Serial.println("\n> " + serial_input);
        cli.parse(serial_input);
    }
    // -----
}

```

```

    setpoint_flag = myPID.atSetPoint(setpoint_threshold);    // check if target force va
Lue(+/- setpoint_thres) is reached
    integral_term = myPID.getIntegral();                    // get integral term of con
trol signal
    control_input = fsr_Ld + fsr_Lu + fsr_Rd + fsr_Ru;

    if ((controller_state == true) && (setpoint_flag == false))
    {
        myPID.run();          // set the PI controller ON
        forceReached_printOnce_flag = true;                // flag to print "force reached"-
message once is set
        //set direction based on PID output (error) sign
        if (control_output>0)          // case: POS error [closing]
        {
            digitalWrite(DIR_PIN, HIGH);
            count_sign = -1;
            pwm_value = control_output;
            analogWrite(PWM_PIN, pwm_value);
        }
        else if (control_output<0)     // case: NEG error [opening]
        {
            digitalWrite(DIR_PIN, LOW);
            count_sign = +1;
            pwm_value = -control_output;
            analogWrite(PWM_PIN, pwm_value);
        }
    }
    else if ((controller_state == true) && (setpoint_flag == true))
    {
        analogWrite(PWM_PIN, 0);
        control_output = 0.0;
        //myPID.stop();          // set the PI controller OFF -
> stops control after "force-reached", but disables...
        //controller_state = false;    // ...release command functionality
        if (forceReached_printOnce_flag == true)          // use a flag to print following mes
sage only once
        {
            Serial.println("\n** STOPPED - target closing force reached! **\n");
            forceReached_printOnce_flag = false;          // after printing message, flag is cl
eared
        }
    }
    // -----

    // ##FUTURE: perform a check&report for FSR(+LimSW?) functionality!?

    if (!printStop_flag)
    {

```

```
    printmode_switch();  
}  
  
delay(100);  
//delayMicroseconds(7250)  
}
```

Στο κεφάλαιο αυτό θα παραθέσω τις μετρήσεις και τις δοκιμές που εκτελέστηκαν για την επιβεβαίωση της λειτουργίας του μηχανισμού, υπό τις προδιαγραφές που τέθηκαν. Οι διαδικασίες αυτές αφορούν σε:

1. Βαθμονόμηση των αισθητήρων «αφής» (Force Sensitive Resistors)
2. Προσέγγιση κατάλληλων τιμών για τα κέρδη K_p και K_i του σχήματος ελέγχου
3. Μελέτη (ποιοτική) της ικανότητας συγκράτησης αντικειμένων διαφορετικών γεωμετριών, χωρίς εξωτερικές διαταραχές.
4. Μελέτη της στεγανότητας του συστήματος (3D-printed και CNC-milled εκδοχή) σε συνθήκες βύθισης, σε βάθος 1 έως 1.5 m.

4.1 Βαθμονόμηση των αισθητήρων «αφής» (Force Sensitive Resistors)

Υπενθυμίζω ότι ο μηχανισμός έχει τέσσερις αισθητήρες «αφής» (δύο ανά δάκτυλο, ένας σε κάθε φάλαγγα), οι οποίοι είναι μεταβλητές αντιστάσεις εξαρτημένες από την ασκούμενη δύναμη⁹⁹. Οι αισθητήρες καλύπτονται με ειδικά διαμορφωμένα προστατευτικά από σιλικόνη (βλ. υποκεφάλαιο 2.3). Στην πραγματικότητα είναι αισθητήρες πίεσης, καθώς η απόκρισή τους εξαρτάται από την επιφάνεια στην οποία ασκείται η δύναμη. Το ονομαστικό τους εύρος είναι $(0,5] \text{ kg-f}$ ή περίπου $(0,50) \text{ N}$. Σημειώνω ότι ζητούμενο είναι η συσχέτιση της ασκούμενης δύναμης και της τιμής (τάσης) που καταγράφεται στον A/D μετατροπέα της μονάδας ελέγχου (ATmega 32U4). Αναζητούνται δεδομένα που αφορούν μόνο την απόκριση σε κατάσταση ηρεμίας.

Όπως αναφέρθηκε πρωτίτερα, σύμφωνα με τους κατασκευαστές αισθητήρων τύπου FSR, το χαρακτηριστικό αυτό (ότι είναι αισθητήρες πίεσης) καθιστά την βαθμονόμηση με συμβατικά μέσα (πρότυπα βάρη) προβληματική. Και η δική μου προσπάθεια βαθμονόμησης με πρότυπα βάρη αποδείχθηκε ανώφελη, καθώς οι τιμές εμφάνισαν υπερβολική διακύμανση για να εξαχθεί κάποιο χρήσιμο δεδομένο¹⁰⁰. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η επιφάνεια που «ενεργοποιείται» είναι αρκετά διαφορετική από μέτρηση σε μέτρηση.

Μέσα από αυτή την πρώτη προσπάθεια έγινε φανερό επίσης, ότι οι αισθητήρες (τουλάχιστον τα τεμάχια που εγώ είχα στη διάθεσή μου) παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση στην απόκριση από δείγμα σε δείγμα. Οι διαφορές, όπως φαίνεται και από τα δεδομένα παρακάτω, φτάνουν και το 30% στο ονομαστικό τους εύρος¹⁰¹.

⁹⁹ Force Sensitive Resistor DF9-40, χωρίς συγκεκριμένη επωνυμία κατασκευαστή.

¹⁰⁰ Μέτρηση εφαρμόζοντας τα πρότυπα βάρη απευθείας επάνω στο ελαστικό κάλυμμα, κατά το δυνατόν στο κέντρο της επιφάνειας. Αντίστοιχα ήταν και τα αποτελέσματα με την εφαρμογή των βαρών στην επιφάνεια των αισθητήρων, χωρίς την παρεμβολή των καλυμμάτων. Παρατηρείται ότι σε αυτή την περίπτωση οι τιμές ανά μονάδα βάρους εμφανίζονται ελαφρά αυξημένες.

¹⁰¹ Σημειώνω ότι οι αντιστάσεις που χρησιμοποιούνται στους διαίρετες τάσεις μετρήθηκαν στην τιμή $10\text{k}\Omega \pm 1\%$, οπότε δεν θα μπορούσαν να είναι το αίτιο των παρατηρήσεων αυτών. Οι υπερμεγέθεις αυτές διακυμάνσεις είναι ίσως απόρροια του χαμηλού τους κόστους (χαμηλή ποιότητα παραγωγής;).

Η βέλτιστη πρακτική θα ήταν ίσως η προσπάθεια εξαγωγής και η χρήση ξεχωριστής καμπύλης/συνάρτησης βαθμονόμησης για κάθε αισθητήρα. Αυτό ωστόσο έχει τα εξής μειονεκτήματα:

- Το υπολογιστικό κόστος για το μετασχηματισμό της τιμής τεσσάρων αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο, ειδικά με μια σχετικά σύνθετη συνάρτηση βαθμονόμησης (ιδανικά, μια τριτοβάθμια πολυωνυμική ή εκθετική/λογαριθμική) και με το παρόν υλικό (ATmega 32U4), είναι υψηλό.
- Το πρόγραμμα ελέγχου χάνει το χαρακτηριστικό της «γενικής» συμβατότητάς του με το υλικό, καθώς κάθε μηχανισμός (με το σετ αισθητήρων του) πρέπει να προγραμματιστεί με διαφορετικές συναρτήσεις βαθμονόμησης.
- Βασική προϋπόθεση είναι να υπάρχει και μια εξασφαλισμένη αξιοπιστία στο σύστημα. Για παράδειγμα σε όλη την διαδικασία εξέλιξης και κατασκευής χρειάστηκε τρεις φορές να αντικαταστήσω κάποιο καμένο αισθητήρα. Αν αυτό έπονταν της παράδοσης των μηχανισμών, η «εξατομικευμένη» συνάρτηση θα ήταν προφανώς άχρηστη και, κατόπιν αντικατάστασης, θα έπρεπε να εξαχθεί εκ νέου από τον εκάστοτε χρήστη, δημιουργώντας πολλά πρακτικά προβλήματα.

Λαμβάνοντας υπόψιν τις παραπάνω παρατηρήσεις και αναλογιζόμενος ότι η υψηλή ακρίβεια δεν είναι επιτακτική ανάγκη στα πλαίσια αυτής της εργασίας¹⁰², θεώρησα περισσότερο πρακτική τη χρήση μιας μόνο συνάρτησης βαθμονόμησης για όλους τους αισθητήρες των μηχανισμών.

Εφόσον χρησιμοποιηθεί μία κοινή συνάρτηση βαθμονόμησης, αντί της μετατροπής των τιμών των αισθητήρων από μονάδες του A/D μετατροπέα σε μονάδες δύναμης, πιο ωφέλιμο είναι να γίνει το ανάποδο.

Η δύναμη συγκράτησης που ορίζει ο χρήστης ως τιμή αναφοράς στο νόμο ελέγχου, μεταφράζεται στο άθροισμα τεσσάρων δυνάμεων, αυτών που ασκούνται από τις φάλαγγες των δακτύλων στο εκάστοτε αντικείμενο. Οι δυνάμεις αυτές είναι φυσικά οι δυνάμεις που μετρούν οι αντίστοιχοι αισθητήρες FSR.

Διαιρώντας τη δύναμη αναφοράς δια τέσσερα και στη συνέχεια μετασχηματίζοντας την τιμή σε μονάδες του A/D μετατροπέα, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν απευθείας οι τιμές των αισθητήρων όπως τις «βλέπει» η μονάδα ελέγχου. Σαν τιμή αναφοράς στο νόμο ελέγχου τίθεται η μετασχηματισμένη τιμή, πολλαπλασιασμένη επί τέσσερα, και σαν μεταβλητή εισόδου το άθροισμα των τιμών των αισθητήρων ως 10-bit integers.

Με το τρόπο αυτό η μετατροπή γίνεται μία φορά, για την τιμή αναφοράς, όταν την ορίσει ο χρήστης. Σε αντίθετη περίπτωση θα έπρεπε να γίνεται τέσσερις φορές, για την τιμή κάθε αισθητήρα, σε κάθε κύκλο του σχήματος ελέγχου.

Η διαδικασία των μετρήσεων που ακολούθησα για την εξαγωγή αυτής της συνάρτησης έχει ως εξής:

- Από ένα σύνολο δώδεκα αισθητήρων, επέλεξα τυχαία έξι (6) δείγματα.
- Οι μετρήσεις αφορούν στην καταγραφή της τιμής του αισθητήρα (τάση V_{FSR}), όπως καταγράφεται από τον A/D μετατροπέα, για δεδομένη τιμή ασκούμενης δύναμης. Η ανάλυσή του είναι 10-bit, συνεπώς οι τιμές στο σύνολο [0,1023].

¹⁰² Έτσι κι αλλιώς η επαναληψιμότητα των μετρήσεων με τον ίδιο αισθητήρα, σύμφωνα με τον κατασκευαστή (βλ. εικόνα 3.7), είναι περίπου 10% (στο 60% του φορτίου) - τα ίδια τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα τον κάνουν να μην ενδείκνυται για μετρήσεις ακριβείας.

- Η ασκούμενη δύναμη μετρήθηκε με τη βοήθεια ηλεκτρονικής ζυγαριάς, ακρίβειας 5 g, σε εύρος που συμπίπτει με το ονομαστικό των αισθητήρων (0,5] kg-f. Οι τιμές δύναμης που επιλέχθηκαν είναι πυκνότερες μέχρι την τιμή των 2 kg-f, όπου αναμένεται υψηλότερος ρυθμός αύξησης των τιμών απόκρισης .
- Η δύναμη εφαρμόστηκε κάθετα, μέσω τεχνητού υλικού που προσομοιάζει στο φελλό, με κυλινδρικό σχήμα (διάμετρος περίπου 25 mm, ύψος περίπου 20 mm). Η επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με το ελαστικό κάλυμμα του αισθητήρα είναι καμπύλη, ώστε η δύναμη να συγκεντρώνεται στην επιφάνεια του αισθητήρα, μεγιστοποιώντας την ασκούμενη πίεση (καμπυλότητα περίπου 0.02 mm^{-1}).
- Η καθετότητα και η τοποθέτηση στο κέντρο εξασφαλίστηκαν ποιοτικά.
- Στις μετρήσεις καταγράφονται ενδεικτικά και σφάλματα, τα οποία λαμβάνονται ως η διακύμανση της τιμής του A/D μετατροπέα σε χρονικό διάστημα περίπου 5 s (από τη στιγμή σταθεροποίησης της τιμής της ασκούμενης δύναμης).
- Για κάθε δείγμα λήφθηκαν μετρήσεις τέσσερις (4) φορές και εξάχθηκε ο μέσος όρος, καθώς και το μέσο απόλυτο σφάλμα.
- Από το σύνολο των δειγμάτων εξάγεται η μέση τιμή για κάθε τιμή ασκούμενης δύναμης και το μέσο απόλυτο σφάλμα. Από το σύνολο των σημείων αυτών εξάγεται η προσεγγιστική καμπύλη βαθμονόμησης με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

Είναι εμφανές ότι ο τρόπος μέτρησης δυνητικά εισάγει σημαντικότερα σφάλματα, εξαρτώμενα από την καθετότητα της ασκούμενης δύναμης και την ακρίβεια εφαρμογής της στο κέντρο της ενεργής επιφάνειας του αισθητήρα¹⁰³. Για τον λόγο αυτό σε κάθε αισθητήρα αναζητείται αρχικά η μέγιστη δυνατή τιμή σε κάθε σημείο δύναμης. Έχοντας καθιερώσει ένα κατά προσέγγιση μέγιστο, μετρήσεις που καταφανώς δίνουν μικρότερες τιμές λόγω κακής τοποθέτησης απορρίφθηκαν. Η πρακτική αυτή βέβαια εγείρει διάφορα ερωτήματα, τα οποία θα εκφραστούν στη συνέχεια.

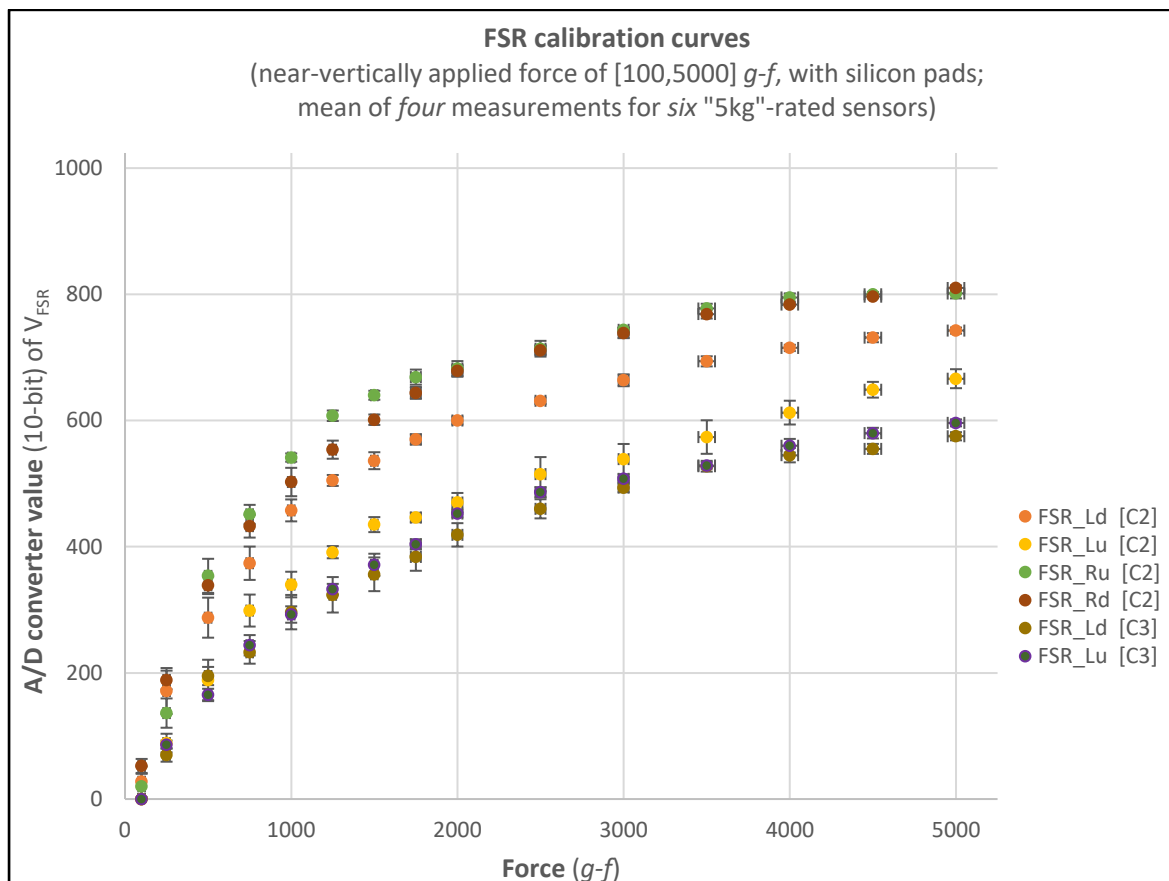
Ο μέσος όρος των μετρήσεων για κάθε ένα από τα έξι δείγματα¹⁰⁴, συνοδευόμενος από το αντίστοιχο μέσο απόλυτο σφάλμα, φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα 4.1. Τα έξι σετ μετρήσεων αποτυπώνονται γραφικά στην εικόνα 4.1.

¹⁰³ Μια πιο σύνθετη μέθοδος βαθμονόμησης μέσω αισθητήρα δύναμης τύπου "load cell", η οποία εξετάζει και δυναμικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων μπορεί να αναζητηθεί στο άρθρο "Calibration of force sensing resistors (fsr) for static and dynamic applications" των J. A. Flórez και A. Velásquez (<https://ieeexplore.ieee.org/document/5633120>)

¹⁰⁴ Το σύνολο των μετρήσεων στο EXCEL "experimentals" {\Thesis Report\excel\}.

F (g-f)	mean	FSR_Ld [C2]	FSR_Lu [C2]	FSR_Ru [C2]	FSR_Rd [C2]	FSR_Ld [C3]	FSR_Lu [C3]
scale_val ±		adc_val ±	adc_val ±	adc_val ±	adc_val ±	adc_val ±	adc_val ±
100	20	28 ± 24	0 ± 0	20 ± 20	53 ± 11	0 ± 0	0 ± 0
250	20	171 ± 36	89 ± 15	136 ± 23	189 ± 15	70 ± 11	86 ± 7
500	20	288 ± 32	189 ± 32	354 ± 27	339 ± 14	195 ± 14	165 ± 10
750	20	374 ± 26	299 ± 25	451 ± 15	433 ± 18	233 ± 18	244 ± 16
1000	20	458 ± 17	340 ± 20	541 ± 7	503 ± 23	296 ± 27	293 ± 13
1250	20	505 ± 9	391 ± 10	608 ± 8	554 ± 14	324 ± 28	333 ± 9
1500	20	536 ± 13	435 ± 12	640 ± 7	601 ± 8	356 ± 27	371 ± 18
1750	30	570 ± 8	446 ± 7	669 ± 12	644 ± 9	384 ± 22	404 ± 8
2000	30	600 ± 6	470 ± 15	683 ± 12	679 ± 9	419 ± 19	453 ± 6
2500	30	631 ± 5	515 ± 27	714 ± 12	711 ± 7	460 ± 15	486 ± 8
3000	30	664 ± 9	539 ± 24	744 ± 4	739 ± 8	494 ± 7	508 ± 3
3500	50	694 ± 8	574 ± 27	778 ± 8	769 ± 7	528 ± 9	529 ± 5
4000	50	715 ± 5	613 ± 19	795 ± 6	784 ± 2	545 ± 11	560 ± 11
4500	50	731 ± 7	649 ± 12	800 ± 4	796 ± 2	555 ± 8	580 ± 8
5000	50	743 ± 5	666 ± 15	801 ± 8	810 ± 4	575 ± 6	596 ± 6

Πίνακας 4.1 - Τιμές απόκρισης (τάσεις) των έξι μετρούμενων αισθητήρων FSR (*adc_val*), για τιμές ασκούμενης δύναμης *F* στο ονομαστικό εύρος τους [0,5] g-f. Οι τιμές προκύπτουν ως η μέση τιμή τεσσάρων επαναλήψεων. Δεξιά από τις τιμές σημειώνονται τα αντίστοιχα μέσα απόλυτα σφάλματα.



Γράφημα 4.1 - Γραφική αναπαράσταση της απόκρισης έξι αισθητήρων FSR σε ασκούμενη δύναμη τιμής [0,5000] g-f, ως η μέση τιμή τεσσάρων επαναλήψεων. Σημειώνονται τα μέσα απόλυτα σφάλματα.

Παρατηρούνται τα εξής:

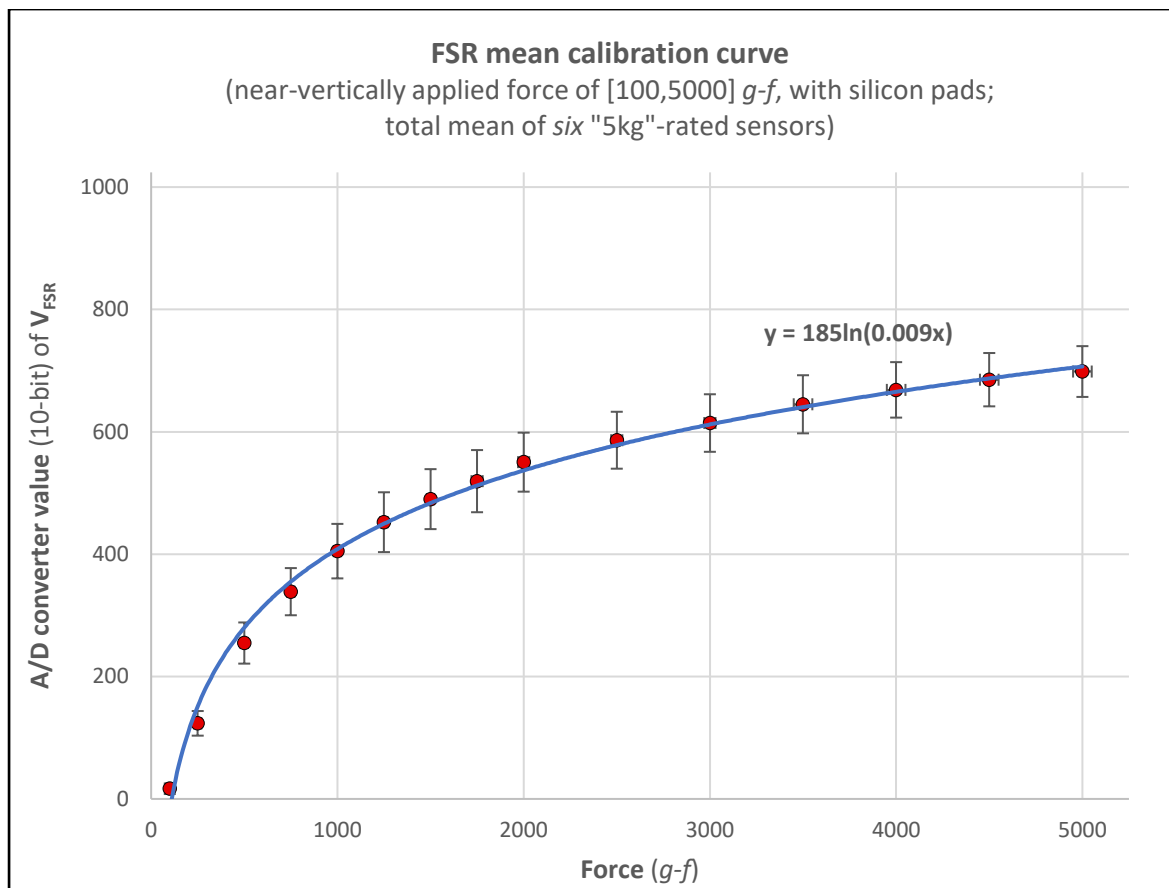
- υπάρχει υψηλότερη διακύμανση στις χαμηλές τιμές του μετρούμενου εύρους - γεγονός αναμενόμενο από τις τυπικές καμπύλες απόκρισης αισθητήρων FSR
- η στάθμη δύναμης 100 g-f είναι οριακά μη ανιχνεύσιμη και η στάθμη 250 g-f παρουσιάζει σημαντική διακύμανση
- το μέσο απόλυτο σφάλμα στις στάθμες δύναμης > 250 g-f είναι σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις μικρότερο του 10%
- μεταξύ των έξι δειγμάτων, δύο και δύο (στήλες 3 & 4 και στήλες 5 & 6) αποκρίνονται με όμοιο τρόπο μεταξύ τους, ενώ τα υπόλοιπα δύο έχουν εντελώς διαφορετική απόκριση
- αν και το ονομαστικό εύρος των αισθητήρων είναι (0,5] kg-f, υπάρχει σημαντική αναντιστοιχία στην απόκριση ως προς το μέγιστο (η μέγιστη δύναμη δεν προκαλεί απόκριση κοντά στη μέγιστη τιμή του A/D μετατροπέα - 600 έως 800 μονάδες έναντι περίπου 1000)

Η μέση τιμή των αποκρίσεων των έξι δειγμάτων και τα αντίστοιχα μέσα απόλυτα σφάλματα καταγράφονται στον πίνακα 4.2 και αναπαρίστανται στο γράφημα 4.2. Σημειώνεται επίσης η βέλτιστη λογαριθμική καμπύλη που διέρχεται από τα σημεία και περιγράφεται από την εξίσωση:

$$y = 185 \ln(0.009x)$$

F (g-f)		FSR_mean	
scale_val	±	adc_val	±
100	20	17	9
250	20	124	20
500	20	255	34
750	20	339	39
1000	20	405	45
1250	20	452	49
1500	20	490	49
1750	30	519	51
2000	30	550	48
2500	30	586	47
3000	30	614	47
3500	50	645	47
4000	50	669	45
4500	50	685	44
5000	50	699	42

Πίνακας 4.2 - Μέση τιμή απόκρισης των έξι μετρούμενων αισθητήρων FSR (**adc_val**), για τιμές ασκούμενης δύναμης **F** στο ονομαστικό εύρος τους (0,5] g-f. Οι τιμές προκύπτουν ως η μέση τιμή των έξι σετ μετρήσεων του πίνακα 4.1. Δεξιά από τις τιμές σημειώνονται τα αντίστοιχα μέσα απόλυτα σφάλματα.



Γράφημα 4.2 - Γραφική αναπαράσταση της μέσης απόκρισης έξι αισθητήρων FSR σε ασκούμενη δύναμη τιμής (0,5000] g-f. Σημειώνονται τα μέσα απόλυτα σφάλματα. Η βέλτιστη καμπύλη που εκφράζει τα σημεία -σημειώνεται με μπλε χρώμα- ορίζεται από την λογαριθμική συνάρτηση: $y = 185 \ln(0.009x)$.

Η προσέγγιση με λογαριθμική συνάρτηση δίνει μικρότερη απόκλιση από τις μετρήσεις συγκριτικά με μια εκθετική ή τριτοβάθμια πολυωνυμική συνάρτηση (RMSE 16.1, έναντι 17.8 και 21.9 αντίστοιχα).

Σημειώνω ότι η ικανότητα άσκησης δύναμης του μηχανισμού καθορίζεται πρωτίστως από την ισχύ του μοτέρ και το σύστημα μετάδοσης. Πειραματικά, η ισχύς αυτή αποδεικνύεται ανεπαρκής για την άσκηση δύναμης κοντά στο μέγιστο που μπορούν να μετρήσουν οι αισθητήρες (4*5 kg-f). Επίσης, η άσκηση υψηλών τιμών δύναμης καταπονεί τα μέρη των δακτύλων, η αντοχή των οποίων δεν είναι η ιδανική, λόγω υλικού και μέσου κατασκευής. Μια λογικότερη μέγιστη δύναμη θα ήταν περί τα 1.5 kg-f. Συνεπώς, αν χρησιμοποιηθούν οι στάθμες δύναμης μέχρι 1.75 kg-f, μπορεί να εξαχθεί μια καλύτερη συνάρτηση βαθμονόμησης. Τέτοιες συναρτήσεις είναι:

$$y = -630e^{-0.0013x} + 575 \quad (\text{εκθετική} - RMSE 6.2)$$

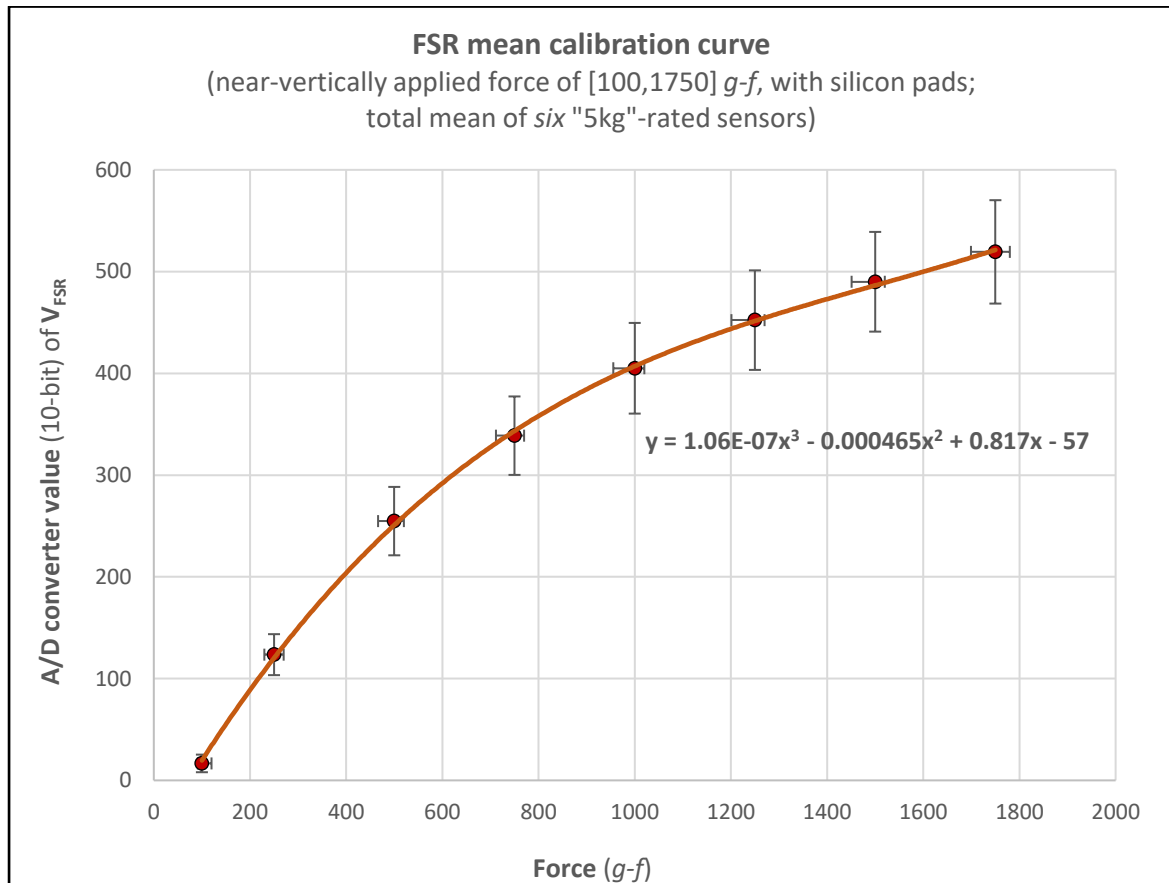
$$y = 1.06E - 07x^3 - 0.000465x^2 + 0.817x - 57 \quad (\text{πολυωνυμική 3ου βαθμού} - RMSE 5.8)$$

Μια σύντομη δοκιμή με τη βοήθεια της συνάρτησης `micros()`¹⁰⁵ της γλώσσας Arduino, αποδεικνύει ότι η διαφορά στο χρόνο υπολογισμού μεταξύ των δύο προηγούμενων συναρτήσεων είναι στα όρια της ακρίβειας της συνάρτησης: και οι δύο υπολογισμοί εκτελούνται στον ελάχιστο μετρήσιμο χρόνο των 4μs. Επιλέγεται λοιπόν η τριτοβάθμια πολυωνυμική, που περιγράφει ελαφρώς καλύτερα τα πειραματικά δεδομένα.

¹⁰⁵ <https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/time/micros/>

Συνοψίζοντας λοιπόν, επιλέγεται μία κοινή συνάρτηση βαθμονόμησης για όλους τους αισθητήρες. Η συνάρτηση μετασχηματίζει την τιμή της δύναμης αναφοράς που δίνεται από το χρήστη (διαιρεμένη δια τέσσερα), έστω F_{perFSR} ($g-f$), σε ακέραιο αριθμό ακρίβειας 10 bit (τιμές $[0,1023]$). Το σχήμα ελέγχου συγκρίνει το άθροισμα των τιμών των τεσσάρων αισθητήρων, με τον αριθμό που υπολογίστηκε, (επανα)πολλαπλασιασμένο επί τέσσερα.

$$V_{perFSR} = 1.06E - 07F_{perFSR}^3 - 0.000465 F_{perFSR}^2 + 0.817F_{perFSR} - 57$$



Γράφημα 4.3 - Γραφική αναπαράσταση της μέσης απόκρισης έξι αισθητήρων FSR, περιορισμένη στο εύρος ασκουμένης δύναμης $(0,1750]$ $g-f$. Σημειώνονται τα μέσα απόλυτα σφάλματα. Η βέλτιστη καμπύλη που εκφράζει τα σημεία -σημειώνεται με πορτοκαλί χρώμα- ορίζεται από την πολυωνυμική συνάρτηση: $y = 1.06E - 07x^3 - 0.000465x^2 + 0.817x - 57$

Τονίζω ότι η χρήση της συγκεκριμένης συνάρτησης, καθώς δεν διέρχεται από την αρχή των αξόνων, επιβάλλει ένα ελάχιστο στις δυνάμεις που μπορούν να εισαχθούν από το χρήστη. Εν προκειμένω, το σημείο τομής του x -άξονα είναι περίπου $73 g-f$, δηλαδή το ελάχιστο στην επιτρεπτή δύναμη συγκράτησης είναι (το τετραπλάσιο) $292 g-f$.

Θεωρώ πως η τιμή αυτή είναι αρκετά μικρή για τα δεδομένα χρήσης του μηχανισμού και ότι δεν θα αποτελέσει περιορισμό για κάποιο πείραμα. Επίσης, όπως φάνηκε κι από τις μετρήσεις προηγουμένως, οι τιμές $< 100 g-f$ δύσκολα είναι ανιχνεύσιμες από τους αισθητήρες και με σημαντικό σφάλμα. Βέβαια πρέπει να λάβει κανείς υπ' όψιν την πιθανότητα η δύναμη

αυτή να ασκείται στο μεγαλύτερο ποσοστό από μια ή δύο μόνο φάλαγγες, οπότε μια τιμή περί τα 150 $g\text{-}f$ ανά αισθητήρα είναι σίγουρα ανιχνεύσιμη.

Αν προστεθεί και το (0,0) στο σύνολο των σημείων, μια εναλλακτική συνάρτηση βαθμονόμησης (τριτοβάθμια πολυωνυμική) μειώνει αυτό τον περιορισμό στα 120 $g\text{-}f$ περίπου, με χειρότερη ακρίβεια προσέγγισης ωστόσο. Η συνάρτηση αυτή είναι η εξής:

$$y = 4E - 08x^3 - 0.000267 x^2 + 0.650x - 19 \quad (RMSE \ 15.6)$$

4.2 Προσέγγιση κατάλληλων συντελεστών K_p και K_i για το σχήμα ελέγχου

Καθώς δεν έχει εξαχθεί η μαθηματική περιγραφή του μηχανισμού στα πλαίσια αυτής της εργασίας, για τον προσδιορισμό των συντελεστών, ή «κερδών», K_p και K_i , προσπάθησα να εφαρμόσω διαφορετικές μεθόδους. Αφενός από περιέργεια, μιας και δεν είχα προηγούμενη εμπειρία, αφετέρου γιατί τα αποτελέσματα ήταν ποικίλα κι όχι σε όλες τις περιπτώσεις ικανοποιητικά.

Οι μέθοδοι αυτοί¹⁰⁶ αφορούν σε μετρήσεις στο σύστημα κλειστού βρόχου και είναι οι εξής:

- Μέθοδος “Ultimate Gain”, *Ziegler & Nichols (1942)*
- Μέθοδος “Tyreus-Luyben” (ως παραλλαγή της προηγούμενης), *Luyben & Luyben (1997)*
- Μέθοδος “Relay”, *Åström & Hägglund (1995)*
- Μέθοδος “Setpoint Overshoot”, *Shamsuzzoha et al. (2010)*
- Μέθοδος “Good Gain”, *Haugen (2010)*

Οι τρεις πρώτες μέθοδοι συνίστανται στην θέση του συστήματος κλειστού βρόχου σε συνθήκες οριακής ευστάθειας, όπου εκτελεί αμείωτες ταλαντώσεις. Οι μεν μέθοδοι “Ultimate Gain” και “Tyreus-Luyben”, κάνοντας χρήση ενός P-ελεγκτή επαρκούς συντελεστή K_{pU} (εκ του “ultimate”) και μετρώντας την περίοδο των ταλαντώσεων P_U εξαγάγουν τιμές για τους συντελεστές K_p και K_i . Η μέθοδος “Relay” κάνει χρήση ενός ελεγκτή «διακόπτη», όπου το σήμα ελέγχου τίθεται εναλλάξ στη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή του, εγείροντας την ταλαντωτική συμπεριφορά, με περίοδο περίπου ίση της μεθόδου των Ziegler-Nichols.

Οι υπόλοιπες δύο μέθοδοι αποφεύγουν την κατάσταση οριακής ευστάθειας, αντλώντας δεδομένα από (βηματική) απόκριση του συστήματος με επαρκή υπερακόντιση, υπό τη χρήση P-ελέγχου. Μέσω του συντελεστή K_p και των χαρακτηριστικών της απόκρισης (ποσό υπερακόντισης, χρονικές μεταβολές), υπολογίζονται τα τελικά κέρδη K_p και K_i .

Για την μελέτη της απόκρισης χρησιμοποίησα τη λειτουργία “serial plotter” του Arduino IDE, η οποία επιτρέπει τη γραφική αναπαράσταση δεδομένων που «τυπώνονται» στη σειριακή θύρα. Στην λειτουργία αυτή ο οριζόντιος άξονας δεν είναι εγγενώς στο πεδίο του χρόνου, αλλά μετρά τον αριθμό των δειγμάτων που στέλνονται. Για την αναπαράσταση μιας χρονικής κλίμακας τίθεται κατάλληλη τιμή καθυστέρησης (delay) στον κύριο βρόχο, οπότε τα δείγματα

¹⁰⁶ Μια συγκριτική μελέτη αυτών, καθώς και άλλων μεθόδων, σε μια πειραματική διάταξη ελέγχου θερμοκρασίας (PI έλεγχος) μπορεί να αναζητηθεί στην βιβλιογραφική αναφορά [6] – η μεθοδολογία που ακολουθείται στο παρόν υποκεφάλαιο αντλείται από την εν λόγω δημοσίευση. Σημειώνω ότι ο συγγραφέας χρησιμοποιεί την έκφραση $u(t) = K_c [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau]$ για το νόμο ελέγχου. Η αντιστοίχιση με τους συντελεστές K_p, K_i είναι :

$$K_p = K_c \text{ και } K_i = K_c / T_i$$

στέλνονται με προκαθορισμένο ρυθμό. Σημαντική ίσως παρατήρηση είναι ότι στη ρύθμιση της τιμής καθυστέρησης συνυπολογίζεται η επιπλέον καθυστέρηση που προκύπτει από τις υπόλοιπες διεργασίες πέραν της σειριακής επικοινωνίας (π.χ. υπολογισμός σήματος ελέγχου).

Ξεκινώντας λοιπόν με τη μέθοδο “**Ultimate Gain**”, η πρακτική που ακολουθείται έχει ως εξής:

- Στο σύστημα κλειστού βρόχου διατηρείται μόνο ο Ρ-όρος και ο συντελεστής K_p τίθεται αναγνωριστικά στην τιμή 1.
- Εξετάζεται η απόκριση του συστήματος και, μεταβάλλοντας κατάλληλα την τιμή του K_p αναζητείται ο συντελεστής εκείνος για τον οποίο το σύστημα εμφανίζει συνεχείς ταλαντώσεις, χωρίς απόσβεση, είναι δηλαδή οριακά ευσταθές, χωρίς όμως το σήμα ελέγχου να φθάνει σε κορεσμό.
- Το κέρδος αυτό αποτυπώνεται ως ψ και η μετρούμενη περίοδος των ταλαντώσεων P_U .
- Γνωρίζοντας τα δύο αυτά μεγέθη, οι προτεινόμενες τιμές για τα κέρδη K_p και K_i του τελικού PI-ελεγκτή δίνονται από τις σχέσεις:

$$K_p = 0.45K_{pU}$$

$$K_i = 0.45K_{pU} \frac{1.2}{P_U}$$

Η μέθοδος “**Tyres-Luyben**” ακολουθεί την ίδια διαδικασία, αλλά προτείνει συντηρητικότερες τιμές για τον ελεγκτή, σε προσπάθεια επίτευξης ισχυρότερης ευστάθειας:

$$K_p = 0.31K_{pU}$$

$$K_i = K_{pU}/(2.2P_U)$$

Η μέθοδος “**Relay**” από την άλλη χρησιμοποιεί, για τον ίδιο σκοπό, έναν ελεγκτή τύπου on-off, με την εξής διαδικασία:

- Υπό το δικατάστατο σήμα ελέγχου το σύστημα τίθεται σε συνθήκες οριακή ευστάθειας. Στο σύστημα της εργασίας αυτό επιτυγχάνεται μέσω της λειτουργίας BangBang της βιβλιοθήκης AutoPID, ορίζοντας ως όριο ενεργοποίησης απόκλισης μίας μονάδας από την τιμή αναφοράς.
- Ορίζεται ως πλάτος του “relay” ελεγκτή η ημι-διαφορά μέγιστης και ελάχιστης τιμής του σήματος ελέγχου. Στο παρόν σύστημα τα σήματα αυτά είναι 8-bit integers, δηλαδή σε τιμές [0,255].

$$A = (u_{max} - u_{min})/2 = [255 - (-255)]/2 = 255$$

- Το κέρδος K_{pU} υπολογίζεται από τη σχέση:

$$K_{pU} = \frac{A_u}{A_e} \approx \frac{4A}{\pi E}$$

όπου A_u είναι το πλάτος του σήματος ελέγχου $u(t)$ (control output) και $A_e = E$ το πλάτος του σφάλματος $e(t)$ (control input). Η τιμή $4A/\pi$ προκύπτει ως ο πρώτος αρμονικός όρος του σήματος ελέγχου (τετραγωνικό παλμός) σε ανάπτυξη Fourier.

- Η περίοδος P_U μετριέται όπως και πριν.
- Από τα δύο μεγέθη K_{pU} και P_U υπολογίζονται οι συντελεστές του PI-ελεγκτή με σχέσεις όπως της μεθόδου Ziegler-Nichols, Tyres-Luyben ή άλλες.

Για τη μέθοδο “**Setpoint Overshoot**” :

- Ελεγκτής με P-όρο μόνο ρυθμίζεται με κέρδος K_{c0} τέτοιο ώστε η απόκριση του συστήματος κλειστού βρόχου σε βηματική είσοδο πλάτους Δy_{SP} , εμφανίζει επαρκές ποσοστό υπερακόντισης.
- Από την απόκριση καταγράφονται το πλάτος y_{max} της εμφανιζόμενης κορυφής, ο χρόνος t_p μέχρι αυτή την επίτευξη αυτής και η τιμή του σήματος στην μόνιμη κατάσταση $y(\infty)$. Έστω y_0 η τιμή της εξόδου πριν την εφαρμογή της βηματικής εισόδου.
- Το πλάτος της υπερακόντισης θα είναι:

$$S = \frac{y_{max} - y(\infty)}{y(\infty) - y_0}$$

και η σχετική μεταβολή της εξόδου στη μόνιμη κατάσταση:

$$b = \frac{y(\infty) - y_0}{\Delta y_{SP}}$$

- Ορίζονται επίσης οι παράμετροι:

$$F = 1$$

$$A = 1.152 S^2 - 1.607 S + 1.0$$

- Τα κέρδη του προκύπτωντος ελεγκτή υπολογίζονται τελικά με τις σχέσεις:

$$K_p = K_{p0} \frac{A}{F}$$

$$K_i = K_p \frac{1}{\min \left[0.86 A t_p \frac{b}{1-b}, 2.44 t_p F \right]}$$

Τέλος, η μέθοδος “**Good Gain**”, όπως και η μέθοδος Setpoint Overshoot, χρησιμοποιεί ένα P-ελεγκτή με στόχο την επίτευξη οριακά επαρκούς ευστάθειας της απόκρισης σε βηματική είσοδο, μέσω επαναλαμβανόμενων δοκιμών:

- Ως επαρκής ευστάθεια ορίζεται απόκριση με μικρή υπερακόντιση και μία μόλις διακρινόμενη κορυφή στην αρνητική φορά.
- Η χρονική διαφορά μεταξύ των δύο κορυφών προσδιορίζεται ως T_{ou}
- Το κέρδος που εμφανίζεται αυτή η συμπεριφορά ορίζεται ως K_{CGG}
- Η τιμή του κέρδους K_i που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον PI-ελεγκτή υπολογίζεται ως:

$$K_i = K_p \frac{1}{1.5 T_{ou}}$$

- Καθώς η προσθήκη του I-όρου εξασθενεί σε ένα βαθμό την ευστάθεια του συστήματος, προτείνεται η χρήση αναλογικού όρου με μειωμένη τιμή, περί το 80% της τιμής K_{CGG} :

$$K_p = 0.8 K_{pGG}$$

Οι αποκρίσεις που παρατηρούνται από τις πειραματικές δοκιμές παρουσιάζονται στις επόμενες σελίδες. Η διάρκεια εκτέλεσης του βρόχου του προγράμματος ελέγχου ρυθμίζεται ώστε η μονάδα του οριζόντιου άξονα των διαγραμμάτων να είναι $10 \pm 0.1 ms$. Ο κατακόρυφος

άξονας απεικονίζει τις τιμές δύναμης, όπως μετασχηματίζονται σύμφωνα με το προηγούμενο υποκεφάλαιο, κι όχι σε μονάδες $g-f$ ¹⁰⁷. Το αντικείμενο που χρησιμοποιείται στη συγκράτηση είναι ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο κομμάτι ξύλου (έλατο), με διαστάσεις $70 \times 45 \times 18 \text{ mm}$, με τις επιφάνειες των δακτύλων παράλληλες στην μεγαλύτερη πλευρά του.

Η διαδικασία έχει εν γένει την εξής μορφή:

- ⇒ Ορίζεται το σύστημα κλειστού βρόχου μόνο με αναλογικό όρο, με τιμή εκκίνησης ίση με 1.0
- ⇒ Το σύστημα σταθεροποιείται σε τιμή περί τα $350 \sim 400 \text{ g-f}$, με την εφαρμογή αντίστοιχης βηματικής εισόδου και την παρατήρηση της απόκρισης μέχρι να εξασφαλιστεί η ηρεμία.
- ⇒ Στη συνέχεια εφαρμόζεται εκ νέου βηματική είσοδος με σχετικά μικρή διαφορά από την προηγούμενη τιμή ($500 \sim 600 \text{ g-f}$), σε προσπάθεια να αποφευχθεί ο κορεσμός του σήματος ελέγχου. Για την εύρεση της απόκρισης που αναζητείται στις μεθόδους Setpoint Overshoot και Good Gain εφαρμόζονται και υψηλότερες τιμές (800 g-f).
- ⇒ Η διαδικασία επαναλαμβάνεται με τη σταδιακή αύξηση (ή μείωση) του συντελεστή K_p μέχρι να παρατηρηθεί η ζητούμενη μορφή απόκρισης.
- ⇒ Για τη μέθοδο Relay ακολουθούνται τα δύο πρώτα βήματα και στη συνέχεια, αφού ο ελεγκτής τεθεί στη λειτουργία BangBang με όριο ενεργοποίησης ± 1 από την τιμή αναφοράς, εφαρμόζεται η ανάλογη βηματική είσοδος.

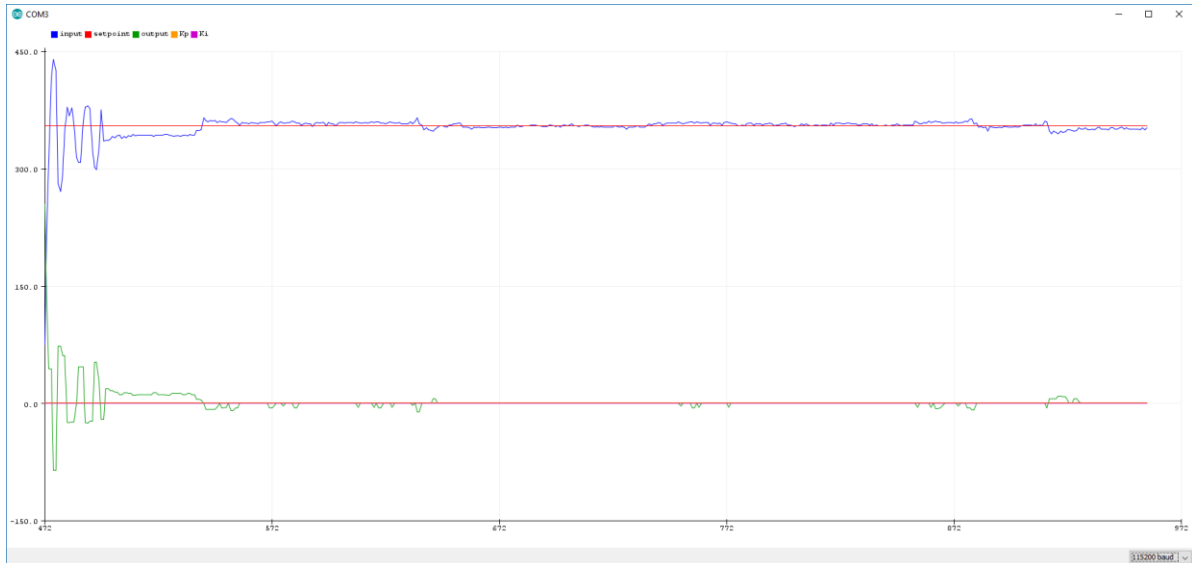
Στα διαγράμματα η απόκριση του συστήματος αναπαρίσταται με **μπλε** χρώμα, το σήμα ελέγχου με **πράσινο** και η τιμή αναφοράς με **κόκκινο**.

Δυστυχώς, η λειτουργία serial plotter δεν παρέχει δυνατότητα μεταβολής της κλίμακας του κατακόρυφου άξονα, του πάχους των γραμμών, εστίασης σε περιοχή κ.λπ. (τουλάχιστον στην παρούσα έκδοση 1.8.10 του IDE). Επίσης, δεν επιτρέπεται η λειτουργία ταυτόχρονα με τη γραμμή εντολών, οπότε τα γραφήματα ξεκινούν μετά την εντολή μεταβολής της εισόδου (για το λόγω αυτό εισάγεται μια καθυστέρηση πριν την εκκίνηση του νέου βρόχου).

Επομένως από τις εικόνες, όπως παρουσιάζονται εδώ, ο αναγνώστης μπορεί να συμπεράνει μόνο ποιοτικά χαρακτηριστικά της απόκρισης. Τιμές μεγεθών δίνονται, όπου κρίνεται αναγκαίο, είτε στις λεζάντες είτε στο κείμενο. Όλες οι εικόνες μπορούν να ευρεθούν σε πλήρες μέγεθος στο αρχείο της εργασίας `{:\Thesis Report\controller_response_plots\}`. Σημειώνω ότι η κλίμακα του κατακόρυφου άξονα είναι στις «μονάδες» δύναμης που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα ελέγχου (καταχρηστικά, μονάδες "mcu") και όχι σε $g-f$.

Ως σημείο αναφοράς λοιπόν ορίζεται η απόκριση σε βηματική διέγερση πλάτους 400 g-f και τιμή κέρδους $K_p = 1.0$:

¹⁰⁷ απεικονίζει δηλαδή την τιμή της εισόδου όπως τη «διαβάζει» η MCU.

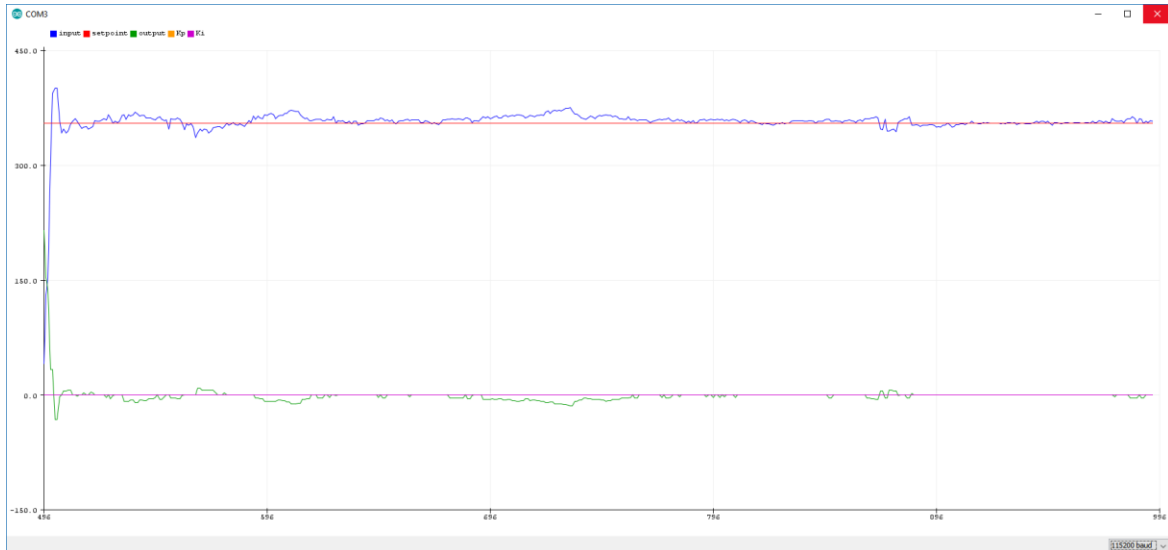


Γράφημα 4.4 - Απόκριση σε βηματική είσοδο τιμής 800 g-f, κατόπιν ηρεμίας του συστήματος στην τιμή 400 g-f. Διακρίνεται η ταλαντωτική συμπεριφορά στην αρχή.

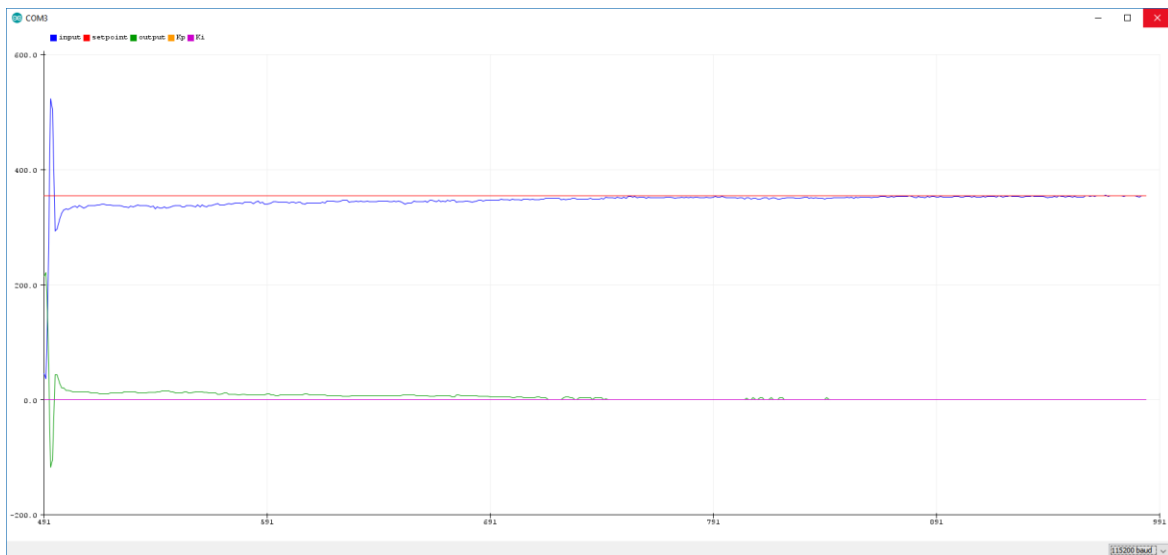
Παρατηρείται η εκδήλωση ταλαντωτικής συμπεριφοράς με μειούμενο πλάτος, οπότε αναμένεται ότι για την επίτευξη της μορφής που αναζητείται από τις μεθόδους Setpoint Overshoot και Good Gain, το κέρδος πρέπει να μειωθεί. Αντίθετα, για την κατάσταση οριακής ευστάθειας των μεθόδων Ziegler-Nichols, το κέρδος πρέπει να αυξηθεί. Δοκιμάζω πρώτα την μείωση της τιμής του κέρδους. Θεωρώ πως η απόκριση του συστήματος έχει τη ζητούμενη μορφή στην τιμή:

$$K_p = K_{p0} = K_{pGG} = 0.69$$

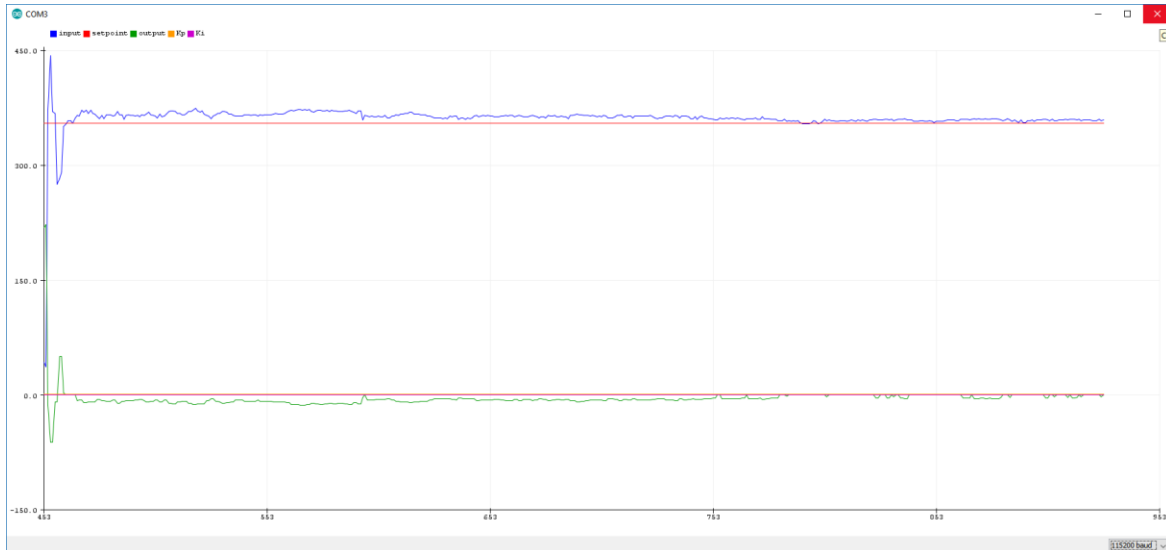
Στα επόμενα γραφήματα, 4.5 έως 4.7, παρουσιάζονται οι κυματομορφές για τις τιμές 0.68, 0.69 και 0.70. Για την αμέσως μικρότερη τιμή η αρνητική υπερακόντιση είναι σχεδόν ανύπαρκτη ή χάνεται στο θόρυβο του σήματος, ενώ για την αμέσως μεγαλύτερη εμφανίζεται αυξημένη. Εντύπωση προκαλεί το γεγονός ότι το πλάτος της θετικής υπερακόντισης για την ενδιάμεση τιμή είναι μεγαλύτερο από *αμφότερες* τις δύο γειτονικές - φαινόμενο που παρατήρησα κατ' επανάληψη. Επίσης αξιοσημείωτο είναι το, πρακτικά μηδενικό, σφάλμα μόνιμης κατάστασης, ακόμα και χωρίς τη χρήση ολοκληρωτικού όρο στον ελεγκτή.



Γράφημα 4.5 - Απόκριση σε βηματική είσοδο τιμής 800 g-f, κατόπιν ηρεμίας του συστήματος στην τιμή 350 g-f, με τιμή κέρδους $K_p = 0.68$.



Γράφημα 4.6 - Απόκριση σε βηματική είσοδο τιμής 800 g-f, κατόπιν ηρεμίας του συστήματος στην τιμή 350 g-f, με τιμή κέρδους $K_p = 0.69$. Η βέλτιστη απόκριση για την εφαρμογή των μεθοδολογιών *Setpoint Overshoot* και *Good Gain* θεωρώ ότι εμφανίζεται γι' αυτό το κέρδος.



Γράφημα 4.7 - Απόκριση σε βηματική είσοδο τιμής 800 g-f, κατόπιν ηρεμίας του συστήματος στην τιμή 350 g-f, με τιμή κέρδους $K_p = 0.68$.

Για τη μέθοδο Setpoint Overshoot τα συμπληρωματικά μεγέθη έχουν τιμές:

$$S = \frac{y_{max} - y(\infty)}{y(\infty) - y_0} = \frac{521 - 363}{363 - 43} \cong 0.438 \quad (mcu)$$

$$b = \frac{y(\infty) - y_0}{\Delta y_{SP}} = \frac{363 - 43}{310.6} \cong 1.03 \quad (mcu)$$

$$A = 1.152 S^2 - 1.607 S + 1.0 \cong 0.487 \quad (mcu)$$

$$t_p \cong 0.0321 \text{ s}$$

και για τη μέθοδο Good Gain, η απόσταση μεταξύ των δύο κορυφών ισούται με:

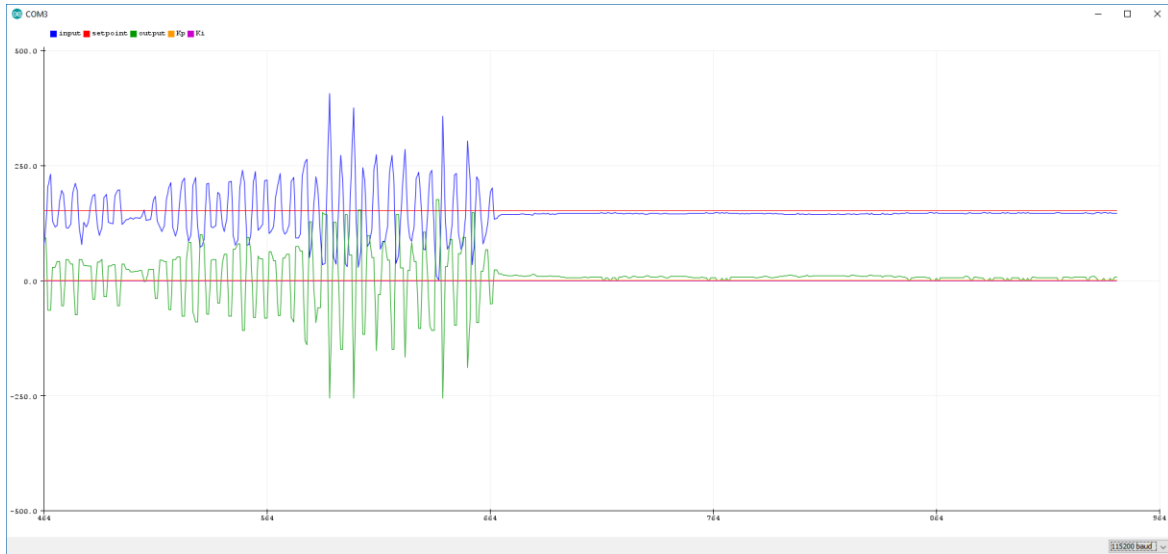
$$T_{ou} \cong 0.0262 \text{ s}$$

Συνεχίζω με την αναζήτηση της απόκρισης που περιγράφεται στις μεθόδους που βασίζονται στη συνθήκη οριακής ευστάθειας (Ultimate Gain), αυξάνοντας σταδιακά το κέρδος K_p .

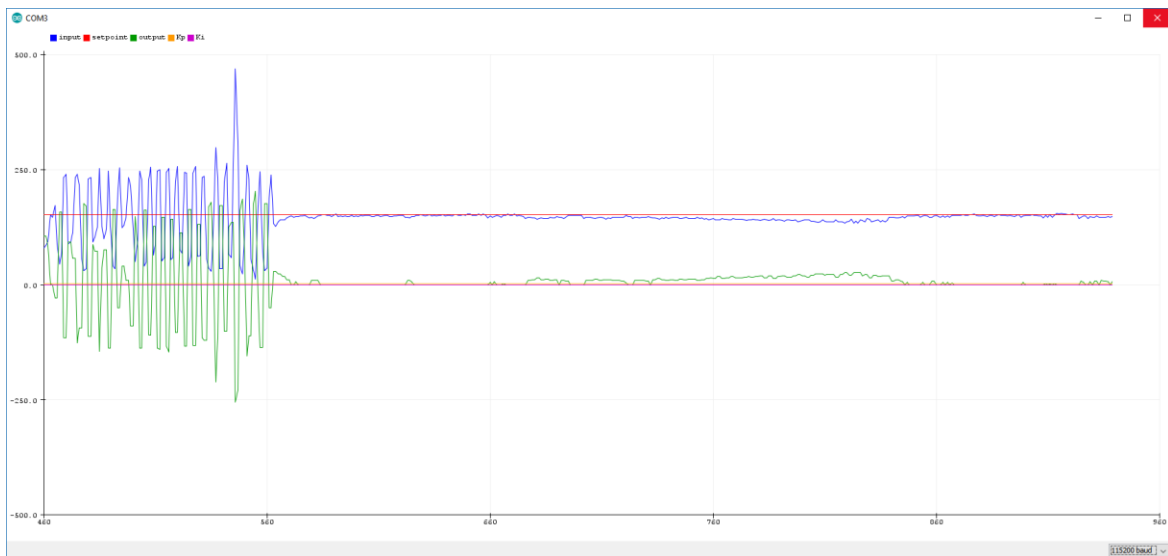
Στα επόμενα γραφήματα (4.8 έως 4.10) απεικονίζονται αποκρίσεις σε βηματική είσοδο πλάτους 500 g-f, με τιμές $K_p = 1.25$, $K_p = 1.45$ και $K_p = 1.5$. Το σύστημα έχει σταθεροποιηθεί προηγουμένως στην τιμή 400 g-f. Για την τιμή 1.25 εμφανίζεται ταλαντωτική συμπεριφορά, η οποία ωστόσο εν τέλει εξασθενεί. Αντίστοιχα και για την τιμή 1.45, για την οποία μεν το σύστημα φθάνει σε ηρεμία ταχύτερα, αλλά παρατηρείται υψηλότερη συχνότητα στις ταλαντώσεις. Νομίζω ότι οι ταλαντώσεις πριν την ηρεμία στη τιμή 1.25 οφείλονται σε διακυμάνσεις της τιμής των αισθητήρων. Στην τιμή 1.50 του αναλογικού κέρδους το σύστημα μεταπίπτει σε κατάσταση οριακής ευστάθειας, όπως απεικονίζεται στο τελευταίο διάγραμμα.

Σημειώνω οι δοκιμές έγιναν αρχικά με βηματική είσοδο τιμής 800 g-f. Όμως, λόγω ότι η υψηλή αυτή μεταβολή προκαλούσε σήματα ελέγχου με τη μέγιστη τιμή (οι κορυφές -spikes- που εμφανίζονται στο αρνητικό μέρος του σήματος και συνεπακόλουθα στο θετικό της απόκρισης), η τιμή της εισόδου μειώθηκε σταδιακά. Δεν κατάφερα να βρω κάποια τιμή που να εξαλείφει εντελώς τον κορεσμό της εξόδου ελέγχου. Η μέθοδος προτείνει για τη βηματική διέγερση τη

χρήση τιμών πλάτους περί το 10% του εύρους, ώστε να αποφευχθεί αυτό το φαινόμενο. Η χρησιμοποιούμενη μεταβολή από 400 *g-f* σε 500 *g-f* είναι αρκετά χαμηλότερα¹⁰⁸ (το 5% του εύρους των 2000 *g-f*), χωρίς όμως το βέλτιστο αποτέλεσμα..

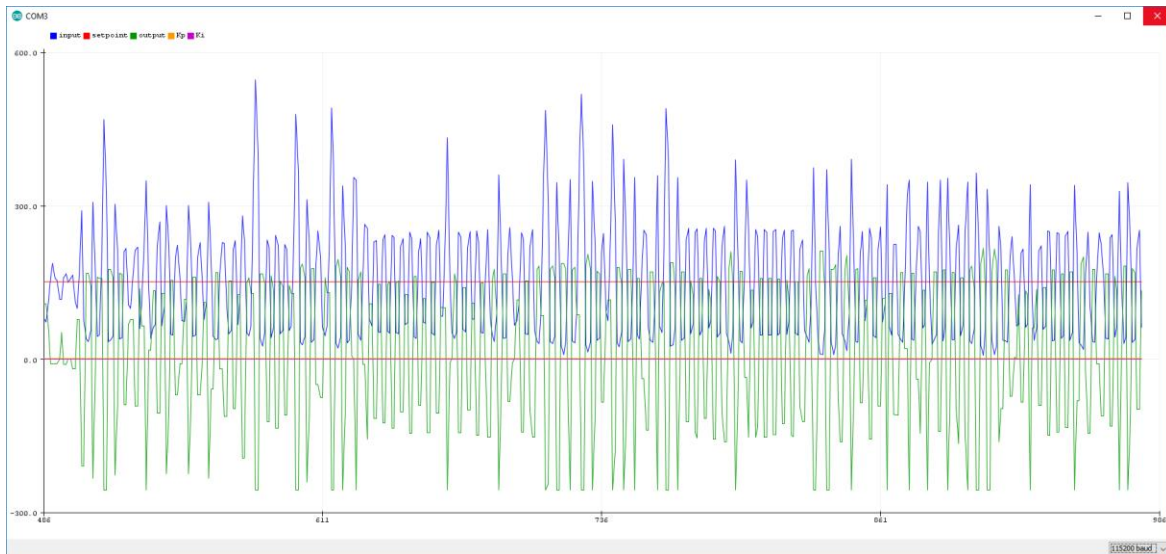


Γράφημα 4.8 - Απόκριση σε βηματική είσοδο τιμής 500 *g-f*, κατόπιν ηρεμίας του συστήματος στην τιμή 400 *g-f*, με τιμή κέρδους $K_p = 1.25$.



Γράφημα 4.9 - Απόκριση σε βηματική είσοδο τιμής 500 *g-f*, κατόπιν ηρεμίας του συστήματος στην τιμή 400 *g-f*, με τιμή κέρδους $K_p = 1.45$.

¹⁰⁸ Βηματική πλάτους 200 *g-f* είχε ακόμα χειρότερα αποτελέσματα σχετικά με τον κορεσμό του σήματος ελέγχου.



Γράφημα 4.10 - Απόκριση σε βηματική είσοδο τιμής 500 g-f, κατόπιν ηρεμίας του συστήματος στην τιμή 400 g-f, με τιμή κέρδους $K_p = 1.50$.

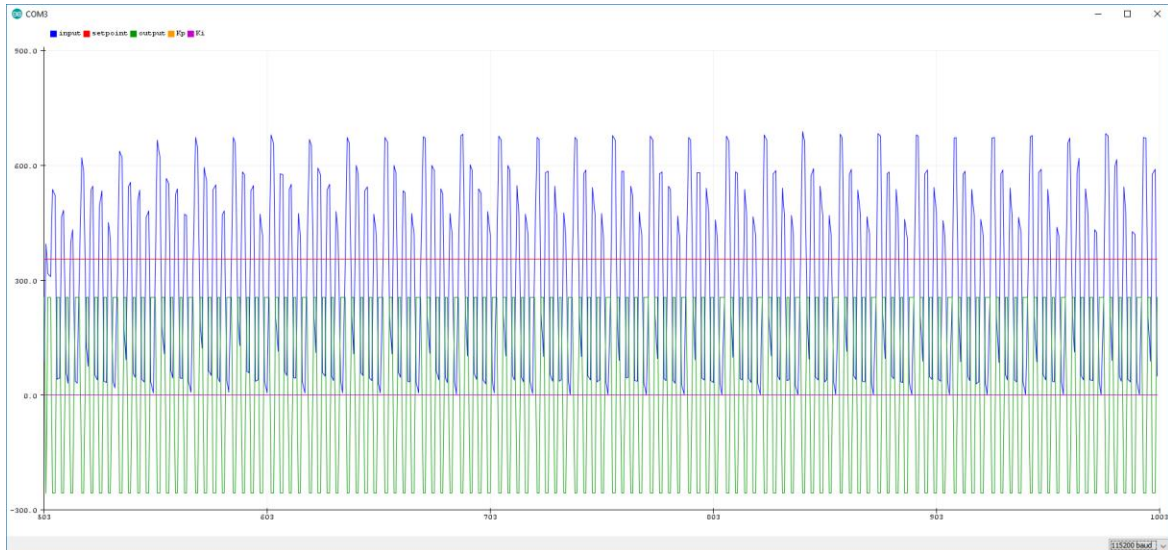
Η τιμή της περιόδου για τις μεθόδους Ultimate Gain και Tyurus-Lyuben προκύπτει από την καταμέτρηση των πλήρων ταλαντώσεων:

$$54 \text{ ταλαντώσεις σε διάστημα } 200 * 10\text{ms} \Leftrightarrow 27 \text{ Hz} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow P_U \cong 0.037 \text{ s}$$

Η αντίστοιχη συμπεριφορά στα πλαίσια της μεθόδου Relay απεικονίζεται στο γράφημα 4.11, όπου η καταμέτρηση των πλήρων ταλαντώσεων δίνει την τιμή:

$$\sim 70.5 \text{ ταλαντώσεις σε διάστημα } 300 * 10\text{ms} \Leftrightarrow 23.5 \text{ Hz} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow P_U \cong 0.0426 \text{ s}$$

Στο διάγραμμα διακρίνονται δύο ειδών περιοδικότητες, μια «γρήγορη» και μια «αργή». Οι παλμοί που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της περιόδου P_U αφορούν στην πρώτη. Η δεύτερη ίσως οφείλεται σε κάποιο συντονισμό του συστήματος;



Γράφημα 4.11 - Απόκριση σε βηματική είσοδο τιμής 800 g-f, κατόπιν ηρεμίας του συστήματος στην τιμή 400 g-f. Πριν την εφαρμογή της εισόδου, ο ελεγκτής τίθεται σε λειτουργία «διακόπτη», με δύο τιμές εξόδου, -255 και 255 ($-5V, 5V$ σε μονάδες τάσης).

Για τον προσδιορισμό του μεγέθους A_e υπολογίζω τη μέση τιμή του πλάτους των τεσσάρων παλμών που εμφανίζονται στην «αργή» περιοδικότητα (σε διαστάσεις "ms"):

$$A_e \cong 524.6/2 = 262.3 \text{ (ms)}$$

Ολοκληρώνοντας τις μετρήσεις, το σύνολο των βοηθητικών μεγεθών καταγράφεται στον πίνακα 4.3. Οι τιμές των κερδών K_p και K_i για τον προτεινόμενο PI-ελεγκτή, σύμφωνα με τις πέντε μεθόδους, συνοψίζονται στον πίνακα 4.4. Μια πιο εύληπτη αναπαράσταση των μεγεθών αποτυπώνεται στο γράφημα 4.12.

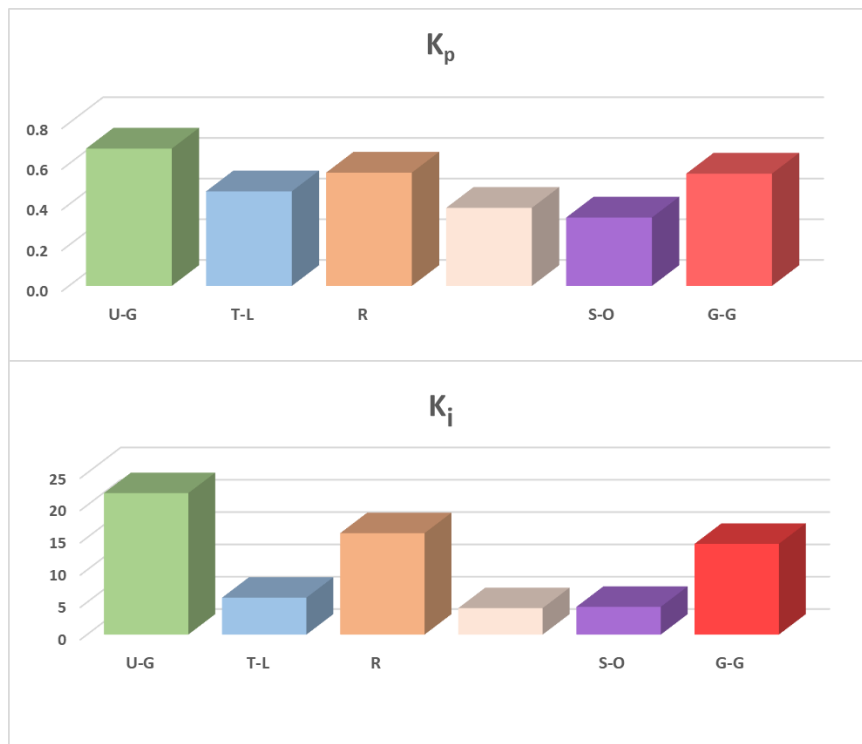
Εφιστώ την προσοχή στο εξής: ο συγγραφέας του άρθρου της βιβλ/κης αναφοράς [6], απ' όπου αντλείται η μεθοδολογία που προηγήθηκε, χρησιμοποιεί στις μεθόδους που εμπλέκονται τα πλάτη των σημάτων (Relay, Setpoint Overshoot) τις φυσικές τους μονάδες (Volt, °C). Εδώ χρησιμοποιώ τις μονάδες "ms", καθώς αυτές χρησιμοποιούνται στο σχήμα ελέγχου.

Μέθοδος	K_p	(τιμή)	K_i	(τιμή)
"Ultimate Gain"	$0.45 * K_{pU}$	0.68	$K_p * 1.2 / P_U$	21.89
"Tyreus-Luyben"	$0.31 * K_{pU}$	0.47	$K_p / (2.2 * P_U)$	5.71
"Relay"	$0.45 * K_{pU}$	0.56	$K_p * 1.2 / P_U$	15.69
	$0.31 * K_{pU}$	0.38	$K_p / (2.2 * P_U)$	4.09
"Setpoint Overshoot"	$K_{p0} * A/F$	0.34	$K_p / \min[(0.86 * A * t_p * b / 1-b , 2.44 * t_p * F)]$	4.29
"Good Gain"	$0.8 * K_{pGG}$	0.55	$K_p / (1.5 * T_{ou})$	14.05

Πίνακας 4.3 - Τιμές των συμπληρωματικών μεγεθών για καθεμία από τις πέντε χρησιμοποιούμενες μεθόδους.

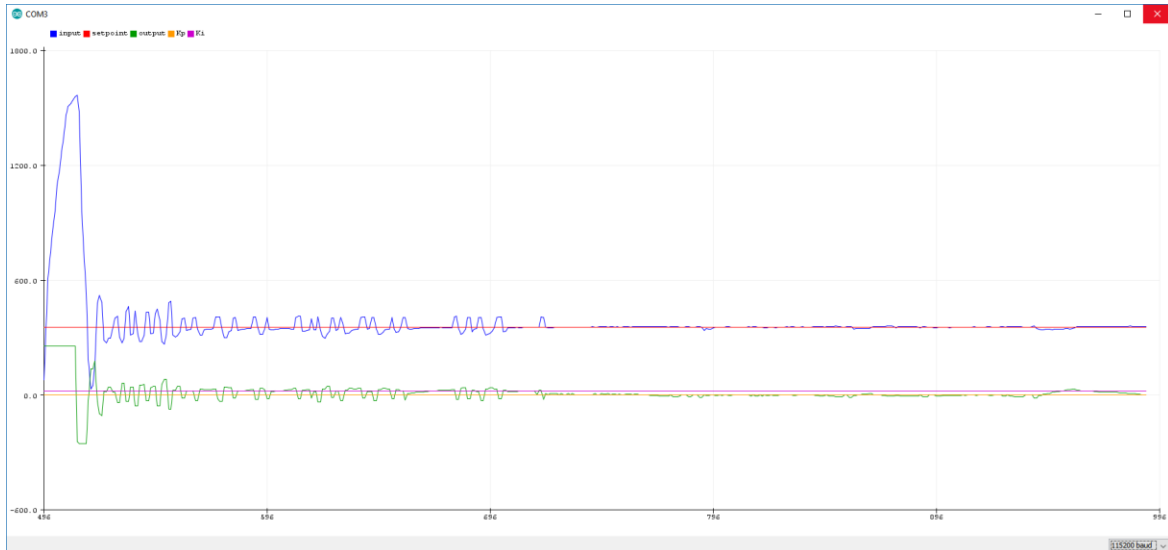
Μέθοδος	$K_{pU} / K_{p0} / K_{pGG}$	P_U	A	A_U	$A_e = E$	S	b	F	t_p / T_{ou}
U-G	1.50	0.0370							
T-L	1.50	0.0370							
R	1.24	0.0426	255	324.7	262.3				
S-O	0.69		0.461			0.5620	1.020	1	0.0321
			0.487			0.4938	1.030		
G-G	0.69								0.0262

Πίνακας 4.4 - Τιμές των κερδών K_p και K_i του προτεινόμενου PI-ελεγκτή σύμφωνα με καθεμία από τις πέντε χρησιμοποιούμενες μεθόδους.

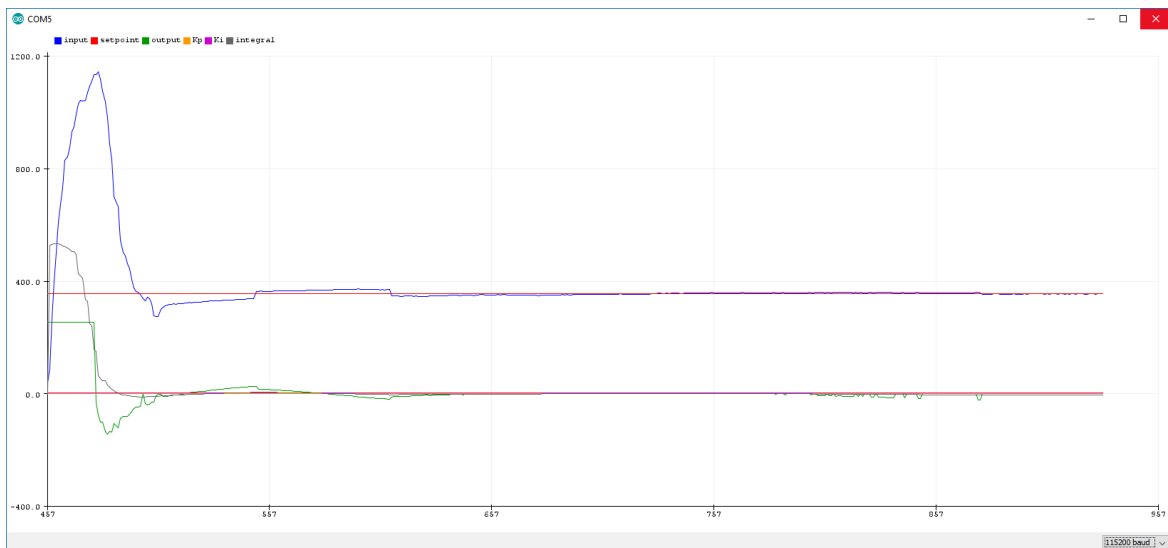


Γράφημα 4.12 - Απεικόνιση των τιμών K_p και K_i του πίνακα 4.4 σε μορφή ιστογράμματος.

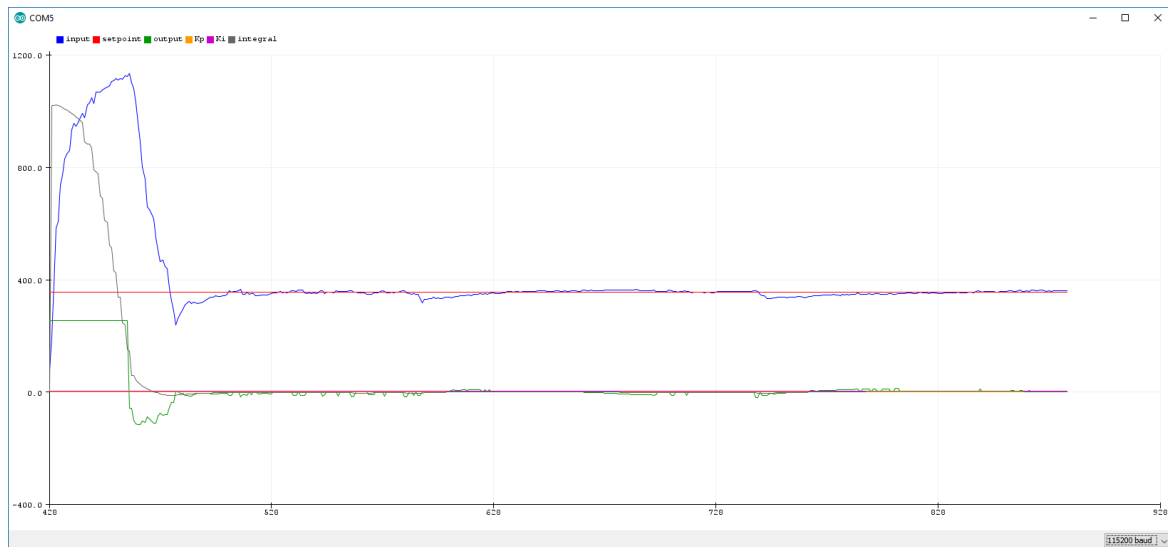
Παρατηρείται ότι οι τιμές των συντελεστών K_i έχουν ιδιαίτερα αυξημένες τιμές, ειδικά στις μεθόδους Ultimate Gain και Good Gain. Εφαρμόζοντας τον PI-ελεγκτή στο σύστημα, εξετάζεται η απόκριση για τις διαφορετικές τιμές των κερδών. Εμφανίζονται με τη σειρά οι μέθοδοι: Ultimate Gain (γράφημα 4.13), Tygeus-Luyben (γράφημα 4.14), Relay (γράφημα 4.15) και Setpoint Overshoot (γράφημα 4.16). Όπως και προηγουμένως, με **μπλε** χρώμα σημειώνεται η τιμή της δύναμης όπως μετρείται από του αισθητήρες FSR, με **πράσινο** το σήμα ελέγχου και **κόκκινο** η τιμή αναφοράς. Πλην του γραφήματος της μεθόδου Ultimate Gain, με **γκρίζο** χρώμα καταγράφεται επίσης η τιμή του ολοκληρώματος του σφάλματος. Ενδεικτικά, στην τελευταία παράσταση (Setpoint Overshoot) σημειώνεται και η τιμή του ρεύματος που διαρρέει το μοτέρ, σε μονάδες mA (**γαλάζιο** χρώμα).



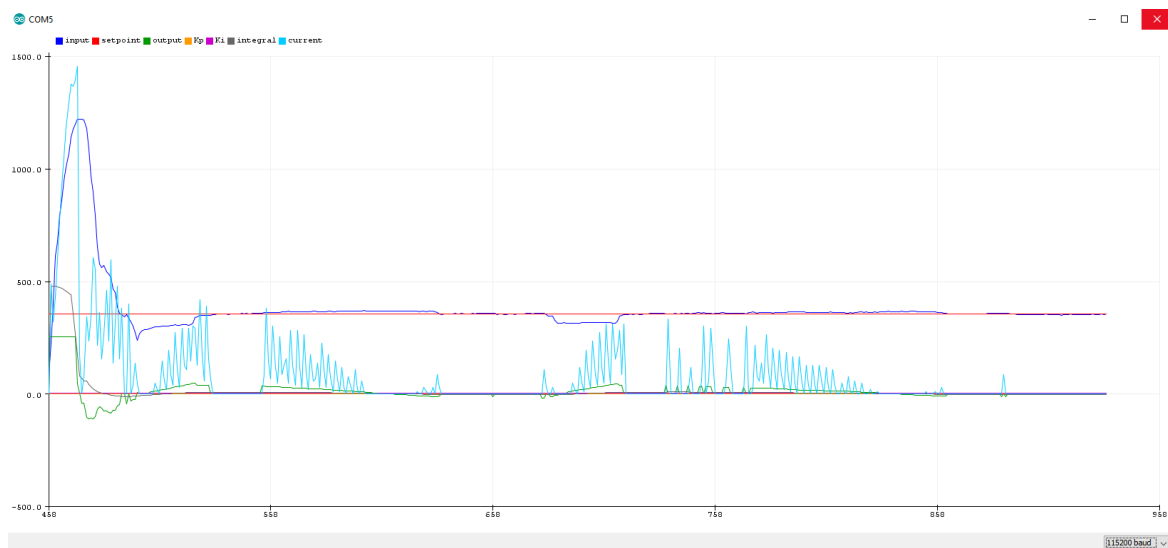
Γράφημα 4.13 - Απόκριση του συστήματος με ελεγκτή PI και τιμές συντελεστών $K_p = 0.68$, $K_i = 21.89$ (σύμφωνα με τη μέθοδο Ultimate Gain).



Γράφημα 4.14 - Απόκριση του συστήματος με ελεγκτή PI και τιμές συντελεστών $K_p = 0.47$, $K_i = 5.71$ (σύμφωνα με τη μέθοδο Tyreus-Luyben).



Γράφημα 4.15 - Απόκριση του συστήματος με ελεγκτή PI και τιμές συντελεστών $K_p = 0.38$, $K_i = 4.09$ (σύμφωνα με τη μέθοδο Relay).



Γράφημα 4.16 - Απόκριση του συστήματος με ελεγκτή PI και τιμές συντελεστών $K_p = 0.34$, $K_i = 4.29$ (σύμφωνα με τη μέθοδο Setpoint Overshoot). Με γαλάζιο σημειώνεται η τιμή του ρεύματος που διαρρέει το μοτέρ.

Όπως είναι εμφανές, και τα τέσσερα ζεύγη τιμών προκαλούν υπερμεγέθεις υπερακοντίσεις ($> 200\%$) – παρά το γεγονός ότι επιτυγχάνεται η ευστάθεια στο σημείο αναφοράς. Η συμπεριφορά αυτή καταπονεί ιδιαίτερα τα μέρη του μηχανισμού¹⁰⁹ και γι' αυτό το λόγο δεν πραγματοποιήθηκαν δοκιμές των συντελεστών που προκύπτουν από τη μέθοδο Relay (κατά Zigler-Nichols) και τη μέθοδο Good Gain. Νομίζω ότι καμία από αυτές τις μορφές απόκρισης δεν είναι κατάλληλη προς χρήση. Αυτό μάλλον οφείλεται σε διαφορές μεταξύ των προϋποθέσεων που θέτουν οι μέθοδοι και του μοντέλου που χαρακτηρίζει το μηχανισμό. Εν τέλει, θεωρώ πως μια πιο αναλυτική μελέτη είναι απαραίτητη, για να γίνει μια τεκμηριωμένη

¹⁰⁹ Μάλιστα η χρήση των συντελεστών της μεθόδου Ultimate Gain οδήγησε σε καταστροφική φθορά του μεσαίου συνδέσμου (εκεί όπου συνδέεται το περικόχλιο) σε μία από τις δοκιμές..

επιλογή των κερδών του ελεγκτή. Η εξαγωγή ενός μοντέλου για το μηχανισμό πιθανόν να είναι η καλύτερη οδός.

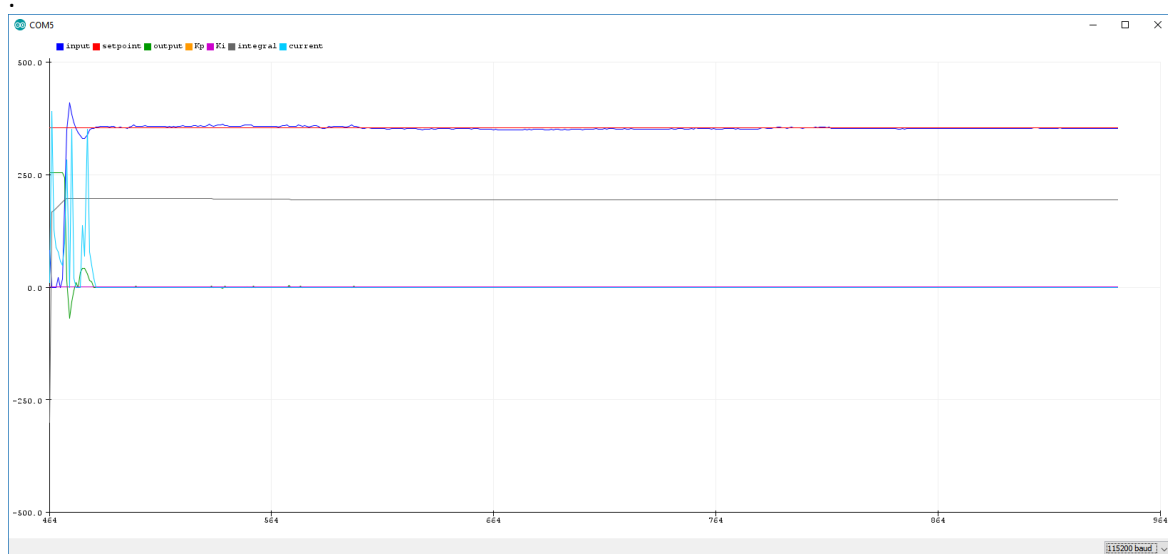
Ορμώμενος ωστόσο από αυτή την πρόταση, θέλω να τονίσω το εξής: Η φύση, τα υλικά και οι μέθοδοι κατασκευής, οι ανοχές και η καταπόνηση των μερών, ο τρόπος ανάρτησης και ενεργοποίησης των αισθητήρων, όλα αποτελούν πηγές θορύβου και σφαλμάτων, τα οποία φαίνεται να έχουν μεγάλη επίδραση στη διαδικασία των μετρήσεων. Για παράδειγμα, σε κάποια από τις δοκιμές χρειάστηκε να αντικατασταθεί ο κεντρικός σύνδεσμος του μηχανισμού (όπου στερεώνεται το περικόχλιο), ενώ σε κάποια άλλη αποσυναρμολογήθηκε κι επανασυνδέθηκε το σύστημα μοτέρ-coupler-lead screw. Η συνέχιση των πειραμάτων ήταν πρακτικά αδύνατη, καθώς με τις ίδιες τιμές των συντελεστών, η απόκριση ήταν διαφορετική απ' ότι προηγουμένως. Το ίδιο φαινόμενο, σε μικρότερο βαθμό, παρατηρήθηκε και μεταξύ ίδιων τιμών κερδών. Η συστηματική μελέτη της απόκρισης δεν είναι εύκολη. Επίσης, πρέπει να αναλογιστεί κανείς ότι ζητούμενο είναι η δημιουργία περισσότερων του ενός ... κλώνων του μηχανισμού, κάτι που εγείρει την ανάγκη εύρεσης και υιοθέτησης παραμέτρων που να ανταποκρίνονται στα «μέσα» χαρακτηριστικά. Κάτι τέτοιο βέβαια ίσως ξεφεύγει από τα όρια του πρακτικού για τις ανάγκες του εργαστηρίου, και ίσως είναι περισσότερο εφαρμόσιμο σε μια πιο ώριμη εκδοχή του μηχανισμού με μεταλλικά μέρη και τη μέγιστη προσοχή στην αναπαραγωγή τους στη μηχανή CNC.

Για χρηστικούς λόγους οι τιμές των κερδών που τίθενται ως προεπιλογή στο πρόγραμμα ελέγχου είναι οι εξής:

$$K_p = 1.4$$
$$K_i = 0.04$$

Οι τιμές αυτές προέκυψαν εμπειρικά μέσω δοκιμών, με στόχο μια συντηρητική απόκριση, χωρίς έντονη υπερακόνηση (γράφημα 4.17). Αποκρίσεις με συγγενικές τιμές κερδών μπορούν να αναζητηθούν στο αρχείο της εργασίας `{:\Thesis Report\controller_response_plots\}`.

Πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι, λόγω των μεθόδων παραγωγής, η συναρμογή των μερών από αντίτυπο σε αντίτυπο διαφέρει. Η διαφοροποίηση αυτή έχει επίδραση και στην επιλογή των κερδών, οπότε μια διακύμανση γύρω από τις παραπάνω τιμές είναι αναμενόμενη για την προσέγγιση του βέλτιστου ανά περίπτωση.



Γράφημα 4.17 - Απόκριση του συστήματος με ελεγκτή PI και τιμές συντελεστών $K_p = 1.4$, $K_i = 0.04$ (εμπειρική επιλογή). Με γαλάζιο σημειώνεται η τιμή του ρεύματος που διαρρέει το μοτέρ. Δίνεται έμφραση στη συντηρητική τιμή της

εξόδου ελέγχου και την μικρή υπερακόντιση – ελάχιστη συγκριτικά με τις προτεινόμενες τιμές των προηγούμενων μεθόδων.

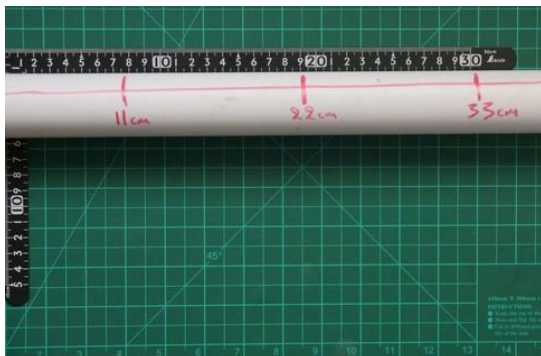
4.3 Επίδειξη της ικανότητας συγκράτησης αντικειμένων ποικίλης γεωμετρίας και μάζας

Δυστυχώς, τη δεδομένη χρονική στιγμή δεν είναι δυνατή η τοποθέτηση του μηχανισμού στο βραχίονα, ώστε να εξεταστεί η λειτουργία του στα πλαίσια του συνολικού συστήματος (υποβρύχιο όχημα + βραχίονας + στοιχείο δράσης). Οι δοκιμές του παρόντος κεφαλαίου λειτουργούν περισσότερο σαν επίδειξη της ικανότητας του μηχανισμού να συγκρατεί αντικείμενα διαφορετικής γεωμετρίας και μάζας.

Καθώς στο μηχανισμό δεν ενσωματώνεται κάποια μέθοδος ανίχνευσης της πιθανής ολίσθησης των αντικειμένων, η μελέτη είναι ποιοτική (οπτική). Για το λόγο αυτό τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μέσω βίντεο, με το υλικό να παρέχεται στο αρχείο της εργασίας `{:\Thesis Report\grasping videos\}`. Σε κάθε περίπτωση γίνονται δοκιμές με διαφορετικές δυνάμεις συγκράτησης - τυπικά σε τιμές πολλαπλάσιες της μάζας των αντικειμένων.

Τα αντικείμενα που επιλέχθηκαν είναι τα εξής:

- σωλήνας PVC κυλινδρικής διατομής, διαμέτρου 40 mm, μήκους 440 mm και μάζας 190 g
- τεμάχιο αλουμινίου, ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο, διαστάσεων 100 x 75 x 10 mm και μάζας περίπου 200 g
- γυάλινο δοχείο, διαμέτρου 55 mm, μήκους 155 mm, γεμισμένο με νερό, με συνολική μάζα 490 g
- μαρκαδόρο, διαμέτρου 15 mm, μήκους 140 mm και μάζας 10 g
- αυγό, μάζας 65 g



Εικόνα 4.1 - Ο σωλήνας PVC



Εικόνα 4.2 -Η πλάκα αλουμίνου



Εικόνα 4.3 - Το γυάλινο δοχείο



Εικόνα 4.4 - Ο μαρκαδόρος



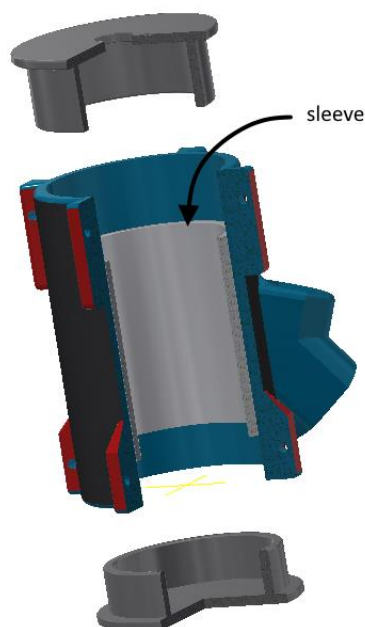
Εικόνα 4.5 - Αυγό

4.4 Μελέτη της στεγανότητας

Για τον προσδιορισμό του βαθμού στεγανότητας του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η δεξαμενή του εργαστηρίου, η οποία γεμίζεται με (χλωριωμένο) νερό από το δίκτυο διανομής. Οι διαστάσεις της δεξαμενής είναι κυλινδρικές, με διάμετρο και ύψος περίπου 8 m και 1.8 m αντίστοιχα. Η στάθμη του νερού βρίσκεται περίπου 1.5 m από τον πυθμένα.

Όπως έχω αναφέρει πρωτύτερα στο κεφάλαιο 2, το περίβλημα του μηχανισμού αρχικά κατασκευάστηκε από θερμοπλαστικό υλικό (ABS, PLA, PETG) σε 3D εκτυπωτή και στη συνέχεια από συμπαγή πολυακετάλη (POM-C), καθώς ο επιθυμητός βαθμός προστασίας δεν ήταν δυνατόν να επιτευχθεί με την πρώτη μέθοδο. Αν και ελλιπή, τα αποτελέσματα των δοκιμών με 3D-printed περιβλήματα παρουσιάζονται ενδεικτικά στον πίνακα 4.5 που ακολουθεί.

Το περίβλημα της δοκιμής 1 είναι από ABS, με τις παράπλευρες επιφάνειες βαμμένες με ακετόνη (διαλύτης για το ABS), χωρίς εσωτερικό συμπαγές χιτώνιο (βλ. εικόνα 4.6 κάτω). Τα περιβλήματα των δοκιμών 2 και 3 είναι από PLA, με τις παράπλευρες επιφάνειες επαλειμμένες με εποξειδική ρητίνη δύο συστατικών και εσωτερικό συμπαγές χιτώνιο (σωλήνα PVC). Σε όλες τις δοκιμές το εσωτερικό είναι κενό και το άνω πώμα δεν φέρει την οπή απ' όπου εξέρχεται ο τραπεζοειδής κοχλίας. Επίσης, στις άκρες του στυπιοθλίπτη και του συνδέσμου με τον απομακρυσμένο Η/Υ τοποθετείται συμπαγές κυλινδρικό πλαστικό μέρος, υποκαθιστώντας τα καλώδια. Συνεπώς, οι δοκιμές χαρακτηρίζουν μόνο τη στεγανότητα του περιβλήματος ως τέτοιο, κι όχι ως μέρος του συνολικού μηχανισμού.



Εικόνα 4.6 (αναδημοσίευση της εικόνας 2.6) - Τομή του περιβλήματος όπως χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές 2 και 3 του πίνακα 4.5 (άνω). Με γκριζο χρώμα διακρίνεται το εσωτερικό περίβλημα από συμπαγές PVC ("sleeve" - σημειώνεται με βέλος).

Δοκιμές στεγανότητας (3D-printed περίβλημα ABS, PLA)					
t (min)	Δοκιμή #	Κατάσταση	Σχόλια	Επιτυχία	
15	1η	✗	~ 5 mL νερό στο εσωτερικό	0	%
	2η*	✗	~ 5 mL νερό στο εσωτερικό		
	3η*	✗	~ 5 mL νερό στο εσωτερικό		
30	1η	✗	~ 10 mL νερό στο εσωτερικό	0	%
	2η*	✗	~ 5 mL νερό στο εσωτερικό		
	3η*	✗	~ 5 mL νερό στο εσωτερικό		
45	1η	✗	~ 10 mL νερό στο εσωτερικό	0	%
	2η*	✗	~ 5 mL νερό στο εσωτερικό		
	3η*	✗	~ 5 mL νερό στο εσωτερικό		
60	1η		---	0	%
	2η*				
	3η*				
90	1η	✗	~ 10 mL νερό στο εσωτερικό	0	%
	2η*	✗	~ 5 mL νερό στο εσωτερικό		
	3η*	✗	~ 5 mL νερό στο εσωτερικό		
120	1η		---	0	%
	2η*				
	3η*				
150	1η		---	0	%
	2η*				
	3η*				
180	1η		---	0	%
	2η*				
	3η*				
240	1η	✗	~ 10 mL νερό στο εσωτερικό	0	%
	2η*	✗	~ 5 mL νερό στο εσωτερικό		
	3η*	✗	~ 5 mL νερό στο εσωτερικό		

* με εσωτερικό χιτώνιο από συμπαγές PVC

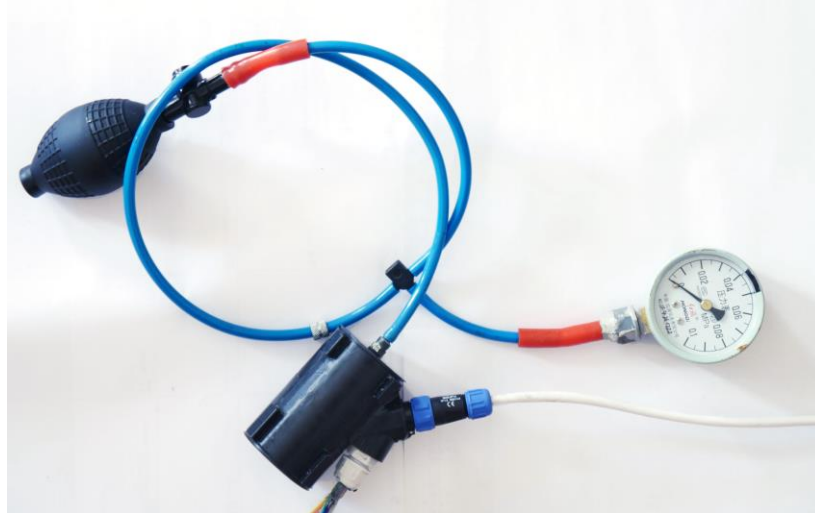
Πίνακας 4.5 - Δοκιμές της στεγανότητας του περιβλήματος του μηχανισμού, σε βάθος περίπου 1.5m. Τα περιβλήματα στις δοκιμές είναι κατασκευασμένα από ABS (δοκιμή 1^η) και PLA (δοκιμή 2^η & 3^η) μέσω 3D εκτύπωσης. Τα μεν είναι βαμμένα με ακετόνη, τα δε επαλειμμένα με εποξειδική κόλλα δύο συστατικών. Για τα περιβλήματα με PLA, στο εσωτερικό της κυλινδρικής επιφάνειας υπάρχει τμήμα πλαστικής σωλήνας από PVC. Λόγω της εμφανούς αναποτελεσματικότητας ήδη από τα πρώτα 30 λεπτά, κάποιες μετρήσεις δεν πραγματοποιήθηκαν χάριν συντομίας (κενές γραμμές πίνακα).

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 4.5, το περίβλημα που κατασκευάζεται μέσω 3D εκτύπωσης είναι αναποτελεσματικό στη διατήρηση της στεγανότητάς του, ήδη από τα πρώτα λεπτά. Άξιο αναφοράς είναι το γεγονός ότι η όποια εισροή νερού γίνεται στα πρώτα 30 λεπτά και στη συνέχεια το ποσό διατηρείται σταθερό. Η παρατήρηση αυτή ισχύει ακόμα και μετά το πέρας 24 ωρών (δοκιμάστηκε στο περίβλημα 1 και 2). Υποθέτω ότι αυτό συμβαίνει διότι εξισορροπείται η πίεση μεταξύ εξωτερικού και εσωτερικού του περιβλήματος, εμποδίζοντας περαιτέρω εισροή.

Η ύπαρξη μικροοπών μεταξύ των στρωμάτων θερμοπλαστικού στο περίβλημα ανιχνεύθηκε κατηγορηματικά και με την βοήθεια της παρακάτω διάταξης: Με τη βοήθεια ελαστικής πρέσας αυξάνεται η πίεση¹¹⁰ στο εσωτερικό του περιβλήματος και μέσω ενός μανόμετρου παρατηρείται η χρονική εξέλιξη της τιμής της. Εφόσον δεν ελαττώνεται η πίεση για

¹¹⁰ 0.2~0.3MPa είναι επαρκής πίεση (ισοδύναμα, 2 – 3 atm). Υπενθυμίζω ότι η πίεση του νερού σε βάθος 1.5 (πυθμένας της δεξαμενής) είναι περίπου 0.116MPa ή 1.15 atm

ένα εύλογο χρονικό διάστημα (πχ 15-20 λεπτά), το περίβλημα είναι στεγανό. Σε αντίθετη περίπτωση, το σημείο διαρροής μπορεί να ανιχνευθεί ψεκάζοντας με διάλυμα υγρού απορρυπαντικού σε νερό, το οποίο «κολλάει» στην επιφάνεια, δημιουργώντας φυσαλίδες όπου υπάρχουν οπές και εξέρχεται αέρας.



Εικόνα 4.7 - Πνευματικό κύκλωμα ελαστικής πρέσας και μανόμετρου, για τη συμπίεση του θαλάμου στο εσωτερικό του περιβλήματος και τον έλεγχο της στεγανότητας και την ανίχνευση διαρροών.

Συμπιέζοντας το περίβλημα παρατηρούνται πολλαπλά σημεία διαρροής στις παράπλευρες επιφάνειες του περιβλήματος, ακόμη και μετά τη βαφή/επάλειψη με πολλαπλά στρώματα ακετόνης/κόλλας. Για την περίπτωση των περιβλημάτων με εσωτερικό χιτώνιο η διαρροή στο εσωτερικό οφείλεται στην προεξοχή-οπή όπου στερεώνονται ο ηλεκτρικός σύνδεσμος και ο στυπιοθλίπτης, καθώς δεν μπορεί να υπάρξει διαρροή από το συμπαγές χιτώνιο.

Η απορρόφηση νερού από το περίβλημα γίνεται εμφανής επίσης κατά το στέγνωμα με θερμό αέρα, κατόπιν των δοκιμών, όπου σε αντίστροφη διαδικασία, σταγονίδια εμφανίζονται να εκρέουν από τις παράπλευρες επιφάνειες.

Όσον αφορά στο περίβλημα που κατασκευάζεται σε CNC mill από συμπαγές θερμοπλαστικό (POM-C), η πρώτη δοκιμή αφορά στη εξέταση της στεγανότητας με τρόπο παρόμοιο με προηγουμένως, με τη βοήθεια του μανόμετρου: το περίβλημα εξετάζεται μεμονωμένα, με τον ηλεκτρικό σύνδεσμο και τον στυπιοθλίπτη τοποθετημένους, χωρίς όμως άλλα εξαρτήματα στο εσωτερικό - αμφότερα τα πώματα είναι συμπαγή, πλην του συνδέσμου στο πνευματικό κύκλωμα.

Με τον τρόπο αυτό επιβεβαιώνεται η στεγανότητα των εξής επαφών:

- άνω και κάτω πώμα με περίβλημα (διπλό o-ring)
- ηλεκτρικός σύνδεσμος («θηλυκό» μέρος) με το περίβλημα (o-ring, ταινία τεφλόν και φλατζόκολλα κατά περίπτωση)
- στυπιοθλίπτης με το περίβλημα (o-ring, ταινία τεφλόν)
- απολήξεις ηλεκτρικού συνδέσμου («αρσενικό» μέρος) και στυπιοθλίπτη με τα αντίστοιχα καλώδιά τους (εγγενής σύσφιξη με ελαστικό περίβλημα)
- «αρσενικό» και «θηλυκό» μέρος ηλεκτρικού συνδέσμου (o-ring),

ενώ δεν ελέγχεται η στεγανότητα του πώματος με οπή για την έξοδο του κοχλία που κινεί τα δάκτυλα (επαφή μεταλλικού συνδέσμου κοχλία-μοτέρ με την ελαστική τσιμούχα) και φυσικά των εξωτερικών ηλεκτρικών μερών και επαφών.

Στη συνέχεια, στο εσωτερικό τοποθετείται η βάση του μοτέρ και το σύστημα συναρμολογείται μαζί με το μηχανισμό κίνησης των δακτύλων και τα ηλεκτρικά μέρη. Με το μανόμετρο ελέγχεται η στεγανότητα και της επαφής συνδέσμου-τσιμούχας.

Κατόπιν επιβεβαίωσης της στεγανότητας ως άνω, για το συνολικό πλέον σύστημα εξετάζεται ο βαθμός προστασίας από το νερό, τόσο στατικά (στεγανότητα πωμάτων και συνδέσμων με αισθητήρες FSR και απομακρυσμένο H/Y) όσο και δυναμικά (στεγανότητα τσιμούχας στην περιστροφή του συστήματος couplet-lead screw, FSR, διακόπτης αρχικοποίησης).

Η μεθοδολογία του πειράματος είναι η εξής:

- το σύστημα συναρμολογείται¹¹¹ στην τελική του μορφή, μαζί με τις διασυνδέσεις με τον απομακρυσμένο H/Y, εφαρμόζοντας όλα τα προβλεπόμενα μέτρα στεγανοποίησης στα ευαίσθητα σημεία
- το σύστημα βυθίζεται στον πυθμένα της δεξαμενής
- μετά από συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα αποσύρεται από τη δεξαμενή, στεγνώνεται εξωτερικά και αποσυναρμολογείται μερικώς (κάτω πώμα), ώστε να ελεγχθεί εάν υπάρχει νερό στο εσωτερικό του περιβλήματος
- πριν την εκκίνηση κάθε νέας περιόδου στεγνώνεται κι εσωτερικά -ανεξαρτήτως αποτελέσματος στο προηγούμενο βήμα- κι επανασυναρμολογείται στη βέλτιστη κατάσταση
- ελέγχεται η ορθότητα της λειτουργίας των ηλεκτρικών/ηλεκτρονικών μερών
- τα χρονικά διαστήματα είναι μεταβλητά (μέχρι και τις 4 ώρες), δίνοντας έμφαση στην πρώτη ώρα δοκιμών (έλεγχος ανά 15 λεπτά). Η δυναμική στεγανότητα εξετάζεται στο διάστημα έως 30 min, με επανάληψη της κίνησης των δακτύλων μεταξύ των ακραίων θέσεων, με περίοδο 0.5 min. Ο έλεγχος της δυναμικής στεγανότητας επαναλαμβάνεται για μία ακόμη φορά.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα 4.6.

Δοκιμές στεγανότητας μηχανισμού (CNC-milled περίβλημα)					
t (min)	Δοκιμή #	Κατάσταση	Σχόλια	Επιτυχία	
15	1η	✓	OK	100	%
	2η	✓	OK		
30	1η	✓	OK	100	%
	2η	✓	OK		
45	1η	✓	OK	-	-
60	1η	✓	OK	-	-
90	1η	✓	Ελαφριά συγκέντρωση αλάτων	-	-
120	1η	✓	Ελαφριά συγκέντρωση αλάτων	-	-
180	1η	✓	Αυξημένη συγκέντρωση αλάτων	-	-
240	1η	✓	Αυξημένη συγκέντρωση αλάτων	-	-

Πίνακας 4.6 - Δοκιμές της στεγανότητας του περιβλήματος του μηχανισμού, σε βάθος περίπου 1.5m. Τα περιβλήματα και τα πώματα είναι κατασκευασμένα από POM-C, σε CNC-mill και τόρνο.

¹¹¹ Παραπομπή στα παραρτήματα Β και Δ για τον ακριβή τρόπο συναρμολόγησης.

Όπως φαίνεται ο ζητούμενος βαθμός προστασίας επιτυγχάνεται για το χρόνο $\Delta t_{underwater}$ που ορίστηκε στην προδιαγραφή 9. Επίσης, εφόσον ο μηχανισμός είναι ανενεργός, χωρίς τροφοδοσία, φαίνεται ότι επιτυγχάνεται ο βαθμός προστασίας και για το χρόνο $\Delta t_{experiment}$ με το σύστημα υπό βύθιση.

Ωστόσο, πέρα από το διάστημα των 60 λεπτών, γίνεται εμφανής η συγκέντρωση αλάτων στα μεταλλικά κυρίως μέρη, η οποία είναι αυξημένη για το πλήρες διάστημα των 4 ωρών υπό βύθιση. Κατά τη γνώμη μου λοιπόν, μετά την παρέλευση των 60 λεπτών υπό βύθιση, το σύστημα θα πρέπει να αποσύρεται από το νερό και να ξεπλένεται με απιονισμένο νερό, για την αποφυγή σχηματισμού αλάτων. Στην αντίθετη περίπτωση, πρέπει τουλάχιστον να καθαρίζεται με κάποια μαλακή βούτσα (π.χ. μια σκληρή οδοντόβουρτσα)¹¹².

Σημειώνεται ότι εφόσον η στεγανοποίηση του περιβλήματος και των μερών αποδεικνύεται ικανοποιητική, ο έλεγχος πιθανών διαρροών με το μανόμετρο χρησιμοποιείται στα δύο αντίτυπα και εκτελείται μόνο δοκιμή για τη δυναμική στεγανότητα για διάστημα 30 λεπτών. Η μέθοδος αυτή θεωρώ ότι είναι επαρκής για τον έλεγχο της στεγανότητας νέων αντιτύπων ή κατόπιν αντικατάστασης καίριων μερών των μηχανισμών.

¹¹² Ως εναλλακτική (και δραστικότερη μάλλον) λύση υπάρχει η δυνατότητα ψεκασμού με κάποιο διάλυμα κατά των αλάτων, όπως τα αντίστοιχα οικιακής χρήσης. Ωστόσο δεν γνωρίζω την συμβατότητά του με το πλαστικό POM-C και τα ελαστικά μέρη στις τσιμούχες και τα o-rings.

5 Συμπεράσματα & Εξέλιξη

Στο κεφάλαιο αυτό συνοψίζονται τα αποτελέσματα της εργασίας, βάσει των προδιαγραφών που τέθηκαν στην αρχή.

Επίσης αναπτύσσονται τα προβλήματα κι οι ελλείψεις του συστήματος, αλλά και προτάσεις για περαιτέρω βελτίωση σε μελλοντικές εκδόσεις, διακρίνοντας τρεις κατηγορίες:

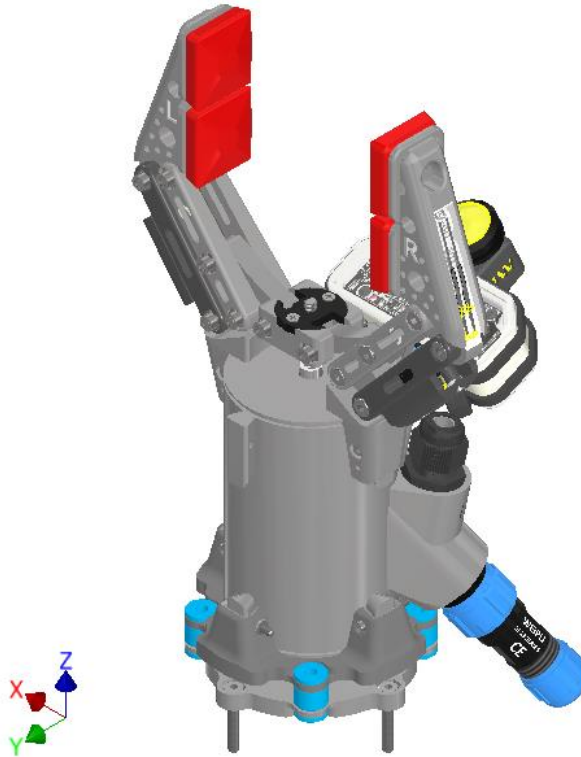
1. μηχανικά μέρη
2. ηλεκτρικά μέρη
3. λογισμικό ελέγχου

5.1 Σύνοψη των αποτελεσμάτων

Ξεκινώντας με την προδιαγραφή 1, η συμβατότητα συναρμολόγησης του στοιχείου δράσης στους βραχίονες εξασφαλίζεται με τη δημιουργία κατάλληλης βάσης στον 3D-εκτυπωτή. Η βάση έχει διαστάσεις αντίστοιχες της βάσης που υπάρχει στο άκρο των βραχιόνων κι εφαρμόζει σε αυτή με τη χρήση βιδών στις υπάρχουσες οπές της δεύτερης. Με αυτό τον τρόπο στηρίζονταν μέχρι τώρα στο βραχίονα και οι σταθερές κατασκευές συγκράτησης αντικειμένων.

Μεταξύ των δύο βάσεων ενσωματώνονται ελαστικά στοιχεία, που αποδίδουν το χαρακτηριστικό της ενδοτικότητας, όπως ζητείται στην προδιαγραφή 7. Η (παθητική) αυτή ενδοτικότητα επιτρέπει την κίνηση του μηχανισμού με 6 βαθμούς ελευθερίας και το εξής εύρος από τη θέση ισορροπίας (θεωρώντας τρισσορθογώνιο σύστημα συντ/μένων, με το ΧΥ-επίπεδο παράλληλο στο επίπεδο της βάσης του βραχίονα - βλ. εικόνα 5.1):

- Χ-διεύθυνση (γραμμικός β.ε.) : $[-8, 8] \pm 0.5 \text{ mm}$
- Υ-διεύθυνση (γραμμικός β.ε.) : $[-8, 8] \pm 0.5 \text{ mm}$
- Ζ-διεύθυνση (γραμμικός β.ε.) : $[-4, 5] \pm 0.5 \text{ mm}$
- Χ-διεύθυνση (στροφικός β.ε.) : $[-7, 7] \pm 1^\circ$
- Υ-διεύθυνση (στροφικός β.ε.) : $[-7, 7] \pm 1^\circ$
- Ζ-διεύθυνση (στροφικός β.ε.) : $[-20, 20] \pm 3^\circ$



Εικόνα 5.1 - Τρισσορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων για την περιγραφή του εύρους κίνησης του μηχανισμού χάρη στα ελαστικά στοιχεία της βάσης.

Από την άλλη, η κινηματική/δυναμική συμβατότητα δεν ελέγχθηκε, διότι οι βραχίονες ήταν ανενεργοί μέχρι και την περίοδο που ολοκληρώνεται η εργασία. Η προδιαγραφή για τη συνολική μάζα ωστόσο ($m_{ee_target_net} \in \sim (100,200) \text{ g}$) δεν ήταν εφικτό να ικανοποιηθεί, αφού η μάζα του συστήματος είναι:

- $\sim 310 \text{ g}$ (μηχανισμός, οπτικό σύστημα, φωτεινή πηγή)
- $\sim 270 \text{ g}$ (μηχανισμός μόνο)

Η διαφορά είναι σημαντική, ωστόσο μένει να αποδειχθεί κατά πόσο επηρεάζει την ικανότητα του βραχίονα (payload), μετά την αντικατάσταση των επενεργητών του.

Επίσης, η πλευστότητα του συνολικού συστήματος είναι αρνητική - αλλά μπορεί να μεταβληθεί σε οριακά θετική με την προσθήκη μικρού τμήματος αφρώδους υλικού περιμετρικά του σώματος του μηχανισμού (περί τα 20cm μήκος, 3cm πλάτος και 1.5cm πάχος)

Η προδιαγραφή 2 :

$$S_{open-to-close} = 60 \text{ mm}$$

καλύπτεται με ασφάλεια, με τις επιφάνειες συγκράτησης να ανοίγουν σε πλάτος 60mm κι ελαφρά μεγαλύτερο. Οι επιφάνειες έχουν πλάτος περί τα 20mm και μήκος περί τα 47mm, ενώ η συνολικά διαθέσιμη επιφάνεια μεταξύ τους είναι ένα παραλληλόγραμμο με διαστάσεις περίπου 60x70mm (βλ. Παράρτημα Α, ενότητα (J), sh. 2).

Επίσης, από την ανάλυση που παρατίθεται στο υποκεφάλαιο 2.2, για την κίνηση των επιφανειών συγκράτησης από την πλήρως κλειστή στην πλήρως ανοικτή θέση ($\Delta S = 60\text{mm}$) σε

χρόνο $\Delta t \leq 2s$, απαιτείται ταχύτητα περιστροφής του συστήματος μετάδοσης ίση με περίπου $100rpm$. Το σύστημα που επιλέγεται¹¹³, στη διαθέσιμη τροφοδοσία, μπορεί να αναπτύξει ταχύτητα περίπου τριπλάσια από αυτή, καλύπτοντας και την προδιαγραφή 6:

$$\Delta t_{open-to-close} \leq 2 s$$

Η αίσθηση «αφής» (προδιαγραφή 4) αποδίδεται με την βοήθεια τεσσάρων αισθητήρων τύπου Force Sensitive Resistors (δύο/δάκτυλο), οι οποίοι τοποθετούνται επί των επιφανειών συγκράτησης. Η βαθμονόμησή τους γίνεται στις συγκεκριμένες συνθήκες στερέωσής τους στις επιφάνειες συγκράτησης (βλ. υποκεφάλαιο 4.1). Καθώς είναι αισθητήρες πίεσης, όχι δύναμης, η απόκριση εξαρτάται κι από την επιφάνεια η οποία «ενεργοποιείται» στην επαφή. Η επιφάνεια αυτή στατιστικά θα είναι ελαφρά διαφορετική σε κάθε μέτρηση, με αποτέλεσμα την χαμηλή επαναληψιμότητα. Επίσης, παρουσιάζουν υστέρηση - και γενικότερα δεν ενδείκνυνται για μετρήσεις ακριβείας. Από την άλλη πλευρά ωστόσο, απαιτούν ελάχιστα επιπλέον εξαρτήματα για την ενσωμάτωσή του στο σύστημα κι έχουν χαμηλό κόστος.

Σχετικά με την προδιαγραφή 3 και τη μέγιστη μάζα συγκράτησης, το σύστημα επενεργητή που ενσωματώνεται αποδεικνύεται ικανό να ασκήσει ροπή τέτοια ώστε η δύναμη συγκράτησης να ξεπερνά τα $20N$ ($2kg - f$). Καθώς η μετάδοση της κίνησης στα δάκτυλα γίνεται μέσω τραπεζοειδή κοχλία (lead screw/nut), η κίνηση έχει το χαρακτηριστικό της αντεπιστροφής. Δηλαδή, εφόσον τα δάκτυλα φτάσουν σε μία θέση, ακόμα κι αν δεν ασκείται συνεχής ροπή από το μοτέρ στον κοχλία, δεν θα ολισθήσουν σε διαφορετική θέση - εξαιρουμένων των κινήσεων λόγω ανοχών.

Η τροφοδοσία του συστήματος γίνεται μέσω απομακρυσμένης πηγής τάσης $+12V$ (για τον επενεργητή και την πηγή φωτός) και μέσω του διαύλου επικοινωνίας ($+5V$) για τα υπόλοιπα στοιχεία (προδιαγραφή 8). Ο δίαυλος είναι το σύνθετο USB 2.0, με το σύστημα ελέγχου να βασίζεται στον 8-bit μικροελεγκτή ATmega32U4 και την πλακέτα ανάπτυξης Pro Micro. Ο συνολικός αριθμός των απαιτούμενων αγωγών ενσωματώνεται σε τρία καλώδια, ένα για κάθε υποσύστημα (μηχανισμός, οπτικό σύστημα, πηγή φωτός).

Η προδιαγραφή που αφορά στην ενσωμάτωση συστήματος οπτικής παρακολούθησης (camera - προδιαγραφή 5), ικανοποιείται με την προσθήκη συστημάτων στην παράπλευρη επιφάνεια του σώματος του μηχανισμού. Η στερέωση υπό γωνία και το διαθέσιμο οπτικό πεδίο (field-of-view) των μέσων επιτρέπει την ικανοποιητική κάλυψη της επιφάνειας μεταξύ των επιφανειών συγκράτησης, οπότε χρησιμοποιείται ένα ανά μηχανισμό. Η ανάλυση των συστημάτων (640×480 pixels / 30 fps) είναι χαμηλή για τα σύγχρονα δεδομένα, αλλά είναι αποτέλεσμα της έλλειψης ενός μέσου με χαμηλό κόστος και ταυτόχρονα συμβατό με το περιβάλλον ROS. Η αντικατάστασή τους με άλλα υψηλότερων δυνατοτήτων θα ωφελήσει το συνολικό σύστημα, εφόσον το κόστος κτήσης τους δικαιολογείται στο μέλλον.

Τέλος, η προστασία από το νερό σε συνθήκες βύθισης επιτυγχάνεται στις ζητούμενες συνθήκες βάθους και χρονικής διάρκειας (1.5m και 30min αντίστοιχα). Η προδιαγραφή αυτή (προδιαγραφή 9) αποδείχθηκε η δυσκολότερη να υλοποιηθεί, καθώς χρειάστηκε η κατασκευή συμπαγούς πλαστικού περιβλήματος σε CNC-mill και τόρνο, με χρήση επιπλέον μεθόδων στεγανοποίησης στα διάφορα σημεία των ενώσεων μεταξύ των εξαρτημάτων (o-rings, ταινία teflon, φλαντζόκολλα, τσιμούχες, βερνίκι αδιαβροχοποίησης ηλεκτρονικών). Η χρήση της μεθόδου FFF 3D-printing είναι ακατάλληλη για την δημιουργία στεγανών περιβλημάτων, στο πλαίσιο των διαδικασιών που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία (βλ. και υποκεφάλαιο 2.3). Ο βαθμός προστασίας του συστήματος είναι πρακτικά IPx8, για βάθος 1.5m και

¹¹³ τουλάχιστον στα δύο βασικά αντίτυπα του συστήματος - το ανταλλακτικό υστερεί σε ταχύτητα περιστροφής.

τουλάχιστον 120min. Καθώς ο διακόπτης αρχικοποίησης όμως έχει ονομαστικό βαθμό προστασίας IP67, ο βαθμός προστασίας του συστήματος τυπικά είναι IPx7.

Σε όλα τα παραπάνω προστίθενται βεβαίως τα τεχνικά σχέδια, οι οδηγίες συναρμολόγησης και κατασκευής των μερών του μηχανισμού, τα οποία μπορούν να λειτουργήσουν υποστηρικτικά στην ανίχνευση και επίλυση προβλημάτων, αλλά και στην περαιτέρω εξέλιξη του συστήματος.

Συνολικά λοιπόν, ως αποτέλεσμα αυτής της εργασίας δημιουργείται τελικό στοιχείο δράσης, σε δύο αντίτυπα, με τις εξής ιδιότητες:

- ⇒ Δυνατότητα ελέγχου της ασκούμενης δύναμης, με τιμές στο εύρος $[300, 2000] g - f$ (συνιστώμενο εύρος $[400, 1700] g - f$), μέσω αισθητήρων τύπου FSR
- ⇒ Μέγιστο πλάτος συγκράτησης $50mm$, με μέγιστο πλάτος ανοίγματος $60mm$ και υψηλή ταχύτητα κίνησης, $> 30mm/s$
- ⇒ Δυνατότητα παρακολούθησης του χώρου εργασίας μέσω κάμερας, ανάλυσης $640x480$ pixel, 30 fps
- ⇒ Δυνατότητα απροβλημάτιστης λειτουργίας υπό βύθιση, σε βάθος $1.5m$ και για τουλάχιστον $30min$ (νερό δικτύου διανομής)
- ⇒ Έλεγχος των λειτουργιών με φραστικές εντολές, μέσω πρωτόκολλου USB 2.0
- ⇒ Δυνατότητα ανίχνευσης γραμμικών και γωνιακών επιταχύνσεων, μέσω IMU 6 βαθμών ελευθερίας
- ⇒ Δυνατότητα επέκτασης του λογισμικού με έλεγχο της θέσης των επιφανειών συγκράτησης
- ⇒ Δυνατότητα προσάρτησης στους βραχίονες του E.A.E., με επιπλέον χαρακτηριστικό ενδοτικότητα 6 βαθμών ελευθερίας

5.2 Ζητήματα και προτάσεις στα μηχανικά μέρη

Καταρχάς, μια κριτική επισκόπηση του περιβλήματος και της συναρμογής των μερών στα τρία διαφορετικά αντίτυπα, φανερώνει τις ατέλειες που προκύπτουν τόσο από τη χρήση της CNC-φρέζας, όσο και του 3D-εκτυπωτή. Αμφότερες οι μέθοδοι χρειάζονται βελτιστοποίηση ώστε τα εξαρτήματα που κατασκευάζονται να διατηρούν τις σχεδιασμένες διαστάσεις σε κάθε αντίτυπο και να εξασφαλίζεται η καλή συναρμογή. Δυστυχώς, αυτό είναι κάτι που απαιτεί αυξημένο χρόνο, τριβή και εμπειρία στα μηχανήματα, πράγμα που δεν είναι πάντα εφικτό σε εργαστηριακό επίπεδο. Συνολικά πάντως:

- Μια επανεξέταση των παραμέτρων εκτύπωσης και των διαδικασιών/εργαλείων κοπής στη φρέζα θα βοηθούσε στην βελτίωση της ποιότητας των αντιτύπων και, πιθανόν, του χρόνου παραγωγής/επεξεργασίας τους.

Σημαντική παράμετρος που τέθηκε ήδη από τα πρώτα στάδια της κατασκευής στη φρέζα ήταν η χρήση αλουμινίου έναντι του πλαστικού. Αν και τα πλεονεκτήματα είναι υπαρκτά σε αυτή τη μετάβαση, έχοντας πλέον τη συνολική εικόνα του συστήματος και των βραχιόνων, θεωρώ ότι η χρήση αλουμινίου στο παρόν στάδιο εξέλιξης θα δημιουργούσε περισσότερα προβλήματα από αυτά που θα έλυσε. Για παράδειγμα, η επεξεργασία τεμαχίων στη φρέζα απαιτεί σημαντικά

περισσότερο χρόνο και εμπειρία, ενώ το ίδιο το υλικό είναι σημαντικά ακριβότερο. Επίσης, οι διαστάσεις των μερών του συστήματος είναι τέτοιες που, ακόμα κι αν τα πάχη μειώνονταν, η διαφορά όγκου δεν θα ήταν ικανή να αντισταθμίσει τον σχεδόν διπλασιασμό της πυκνότητας (το πλαστικό POM-C έχει πυκνότητα περί τα 1.4g/cm³, ενώ το αλουμίνιο περί τα 2.7g/cm³). Για παράδειγμα, το πάχος των (αλουμινένιων) περιβλημάτων των δύο grippers που υπήρχαν στο εργαστήριο είναι 1.8~2mm, ενώ το πάχος του περιβλήματος που παράγεται είναι ήδη 2.4mm¹¹⁴. Επίσης, η αύξηση της μάζας θα επιβάρυνε ακόμα περισσότερο τους βραχίονες, ελαττώνοντας ή εξαλείφοντας το περιθώριο χειρισμού αντικειμένων από το τελικό στοιχείο δράσης. Συνεπώς:

- Θεωρώ ότι η εναλλαγή του υλικού κατασκευής σε αλουμίνιο είναι ωφέλιμο να γίνει μόνο στην περίπτωση που αναβαθμιστούν ή αντικατασταθούν οι βραχίονες με άλλους υψηλότερων δυνατοτήτων. Εν τω μεταξύ, το παρόν σύστημα θα μπορούσε να επωφεληθεί από την εναλλαγή της μεθόδου κατασκευής των υπόλοιπων εξαρτημάτων (π.χ. δάκτυλα, σύνδεσμοι, βάσεις κ.λπ.) στη φρέζα, βελτιώνοντας την ποιότητα συναρμογής και τις ανοχές, τη φθορά με τους κύκλους λειτουργίας και γενικότερα την αξιοπιστία των μερών.
- Μια εναλλακτική μέθοδος κατασκευής η τεχνολογία SLA 3D-printing. Τα μέρη παράγονται από ρευστή ρητίνη και είναι συμπαγή, ενώ το κόστος είναι χαμηλότερο σε σύγκριση με την κατασκευή στη CNC-φρέζα. Πιθανόν αυτή η μέθοδος να μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και για το περίβλημα και τα καπάκια, εφόσον η ανάλυση της εκτύπωσης είναι επαρκής.
- Εν γένει, θεωρώ ότι πρέπει να γίνει μια μελέτη του κατά πόσο συμφέρει πλέον η κατασκευή των μερών από το εργαστήριο, δεδομένου ότι η φρέζα απαιτεί υψηλή τεχνογνωσία για την παραγωγή εξαρτημάτων ακριβείας και οι διαθέσιμοι 3D-printers είναι αρκετά παρωχημένοι. Μια ιστοσελίδα που προσφέρει ποικιλία μεθόδων κι ελεύθερη σύγκριση τιμών είναι η <https://craftcloud3d.com/>.

Βεβαίως, υπάρχουν διάφορες βελτιώσεις που μπορούν να γίνουν στα μέρη του μηχανισμού, με τις υπάρχουσες μεθόδους:

- Μια από αυτές είναι ο καλύτερος σχεδιασμός των καπακιών στο σημείο όπου εφάπτονται στο περίβλημα - το πρόβλημα που αναφέρεται στην υποενότητα (J) του Παραρτήματος Δ. Το πάχος του χείλους που απομένει πάνω από την εσοχή πρέπει να αυξηθεί (μια πρόταση είναι να φτάσει τα 2.5~3mm), ώστε να μην σπάει κατά την ανασήκωση των καπακιών. Η μετατροπή δεν θα δημιουργήσει πρόβλημα, καθώς υπάρχει αρκετό περιθώριο στις βάσεις των δακτύλων (και τη βάση του βραχίονα), ώστε να μειωθεί το ύψος της πλευράς τους που εφάπτεται στα καπάκια.
- Μια άλλη είναι η αύξηση του πλάτους των συνδέσμων στα σημεία όπου υπάρχουν αρθρώσεις ή η χρήση μεταλλικών ένθετων, ώστε να μειωθεί η παραμόρφωσή τους από την τριβή με τις μεταλλικές βίδες (και συνεπώς οι ανοχές). Με τον τρόπο αυτό μπορούν να εξαλειφθούν και τα περικόχλια ασφαλείας στα δάκτυλα και τους συνδέσμους, οι «φωλιές» των οποίων παραμορφώνονται εύκολα δημιουργώντας πρόβλημα στην απο/συναρμολόγηση.
- Βελτίωσης χρίζει και η μέθοδος κατασκευής των καλυμμάτων των αισθητήρων FSR, κάτι που μπορεί να γίνει με την κατασκευή καλουπιών υψηλότερης πιστότητας και τη χρήση σιλικόνης χύτευσης (αντί σιλικόνης-φλαντζόκολλας).
- Επίσης, ένα επιπλέον μέσο που να εμποδίζει την κίνηση του τραπεζοειδούς περικόχλιου (και των δακτύλων), πέρα από την πλήρως ανοικτή θέση είναι αναγκαίο. Εξαιτίας των

¹¹⁴ Ενδεικτικά, η μάζα στο μηχανισμό κατανέμεται ως εξής: ~80g για την εσωτερική βάση με τα ηλεκτρονικά/μοτέρ, ~80g για το ζεύγος των δακτύλων με τις βάσεις και ~70g για το περίβλημα. Τυχόν αλλαγή υλικού θα επηρέαζε μόνο τις δύο τελευταίες ενότητες.

ανοχών και της δυνατότητας παραμόρφωσης των 3D-printed συνδέσμων, όταν το περικόχλιο φτάσει στο υποθετικό ανώτατο σημείο της διαδρομής του, και για κάποιο λόγο δεν σταματήσει η κίνησή του (π.χ. δυσλειτουργία του διακόπτη αρχικοποίησης), θα συνεχίσει μέχρι να εξέλθει από τα σπειρώματα του κοχλία. Αυτό μπορεί να είναι απλά ενοχλητικό για το χρήστη που θα χρειαστεί να αποσυνδέσει τα δάκτυλα για να το επαναφέρει, αλλά μπορεί να προκαλέσει και τη θραύση της βάσης του ή της βάσης των δακτύλων και αυξημένη καταπόνηση του μοτέρ. Μια λύση θα μπορούσε να είναι η ενσωμάτωση μιας ασφάλειας (circlip) στον τραπεζοειδή κοχλία στο ανώτατο σημείο του.

Ένα ακόμα ζήτημα άξιο προσοχής είναι η ανάπτυξη θερμότητας στο εσωτερικό του περιβλήματος, η οποία προέρχεται από το μοτέρ - παραδόξως, ακόμα και σε κατάσταση στάσης. Πιθανόν να μπορεί να εφαρμοστεί κάποιος καλύτερος τρόπος απαγωγής της θερμότητας από το σώμα του μοτέρ - το οποίο στην παρούσα εκδοχή εφάπτεται σχεδόν σε όλο του το μήκος στα τοιχώματα της πλαστικής 3D-printed βάσης.

5.3 Ζητήματα και προτάσεις στα ηλεκτρικά μέρη

Το βασικότερο ζήτημα εδώ εντοπίζεται στο εσωτερικό του περιβλήματος, όπου ο περιορισμένος χώρος σε συνδυασμό με την πληθώρα καλωδίων δημιουργεί έντονα προβλήματα αξιοπιστίας στις διασυνδέσεις, την απο/συναρμολόγηση και τη δυνατότητα επισκευών σε περίπτωση βλάβης.

- Η ιδανικότερη λύση θα ήταν, κατά τη γνώμη μου, η δημιουργία πλακετών προσαρμοσμένων στις προδιαγραφές του συστήματος, με χρήση επίπεδων καλωδιοταινιών και υποδοχών (STM/FCC connectors) για τις διασυνδέσεις μεταξύ τους (δεδομένου ότι οι τιμές έντασης των ρευμάτων είναι έτσι κι αλλιώς χαμηλές) - ή ακόμα καλύτερα η σχεδίαση εύκαμπτων PCB' το οποίο ωστόσο απαιτεί τεχνογνωσία και έχει αυξημένο κόστος.
- Στο αντίθετο άκρο, μια λύση με επίδραση και στα δομικά στοιχεία του συστήματος, θα ήταν η αύξηση της διαμέτρου του περιβλήματος, κατά 5-10mm. Η μεταβολή αυτή δεν θα είχε παρά ελάχιστη επίδραση στη μάζα του μηχανισμού - πλην όμως στο γενικό του αποτύπωμα. Θεωρώ ότι αυτή είναι μια μετατροπή που πρέπει να υιοθετηθεί αν το κυρίως σώμα σχεδιαστεί/τροποποιηθεί για διαφορετική μέθοδο κατασκευής. Η εσωτερική διάμετρος των 40mm είναι υπόλειμμα της μεθόδου κατασκευής στον 3D-printed και αποδεικνύεται περιοριστική.

Ένα άλλο μεικτό ζήτημα είναι ο τρόπος σύνδεσης (και στεγανοποίησης) των αισθητήρων FSR και του διακόπτη αρχικοποίησης με το εσωτερικό του περιβλήματος. Η χρήση του στυπιοθλίπτη στο συγκεκριμένο σημείο είναι εν τέλη μια ογκώδης, δύσχρηστη και άκομψη λύση.

- Μια διαφορετική προσέγγιση θα ήταν η δημιουργία ενός διάτρητου πώματος, το οποίο θα εφαρμόζει στο περίβλημα όπως το άνω και κάτω καπάκι - με o-rings. Τα καλώδια μπορούν να «χυτευτούν» στην εσωτερική κοιλότητα του πώματος με εποξειδική κόλλα (όμοια με την παρούσα μέθοδο στεγανοποίησης μεν, πολύ πιο εύχρηστη όμως στην επεξεργασία και την από/συναρμολόγηση). Ο λόγος που δεν την εφάρμοσα στους μηχανισμούς είναι η έλλειψη συμβατότητας μεταξύ της κόλλας και του πλαστικού

POM-C - πρέπει να αναζητηθεί κάποιος διαφορετικός συνδυασμός γι' αυτό το εξάρτημα (ή να χρησιμοποιηθεί κάποια φλαντζόκολλα).

- Αντίστοιχα, θεωρώ ότι οι πλαστικοί σύνδεσμοι (Weipu) μπορούν στο μέλλον να αντικατασταθούν με μικρότερων διαστάσεων, οι οποίοι είναι διαθέσιμοι με τον ίδιο αριθμό θέσεων και τον ίδιο βαθμό προστασίας (π.χ. οι T-series σύνδεσμοι της Lemo, ενώ υπάρχουν και οικονομικότερα αντίτυπά τους στην κινεζική αγορά).

Οι υπόλοιπες παρατηρήσεις αφορούν σε ζητήματα αξιοπιστίας και σωστής ενσωμάτωσης των ηλεκτρονικών στοιχείων, τα οποία δεν είχα τη γνώση να διαχειριστώ και αφορούν περισσότερο την ειδικότητα του ηλεκτρολόγου μηχανικού:

- Η αναλυτική εξέταση της παρασιτικής αυτεπαγωγής των (ιδιαίτερα μακρών) καλωδίων από την απομακρυσμένη πηγή ρεύματος και η επίδρασή τους στον επενεργητή και τα υπόλοιπα στοιχεία. Η παράμετρος αυτή είχε ως αποτέλεσμα την καταστροφή δύο πλακετών DRV8801 (motor drivers), πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε -χονδροειδώς νομίζω- με την προσθήκη των δύο πυκνωτών στις θύρες τροφοδοσίας του μοτέρ στην πλακέτα.
- Η αναγκαιότητα προσθήκης ασφαλειών στην τροφοδοσία από την απομακρυσμένη πηγή.
- Η επίδραση των διασταυρούμενων καλωδίων στο εσωτερικό του περιβλήματος.
- Η εξέταση ζητημάτων - κακών πρακτικών, που μπορεί να προκαλούν την καταστροφή των αισθητήρων FSR και καναλιών ADC στην πλακέτα PRO MICRO (αντιμετωπίστηκε δύο φορές).
- Η προσθήκη δυνατότητας ανίχνευσης βραχυκυκλώματος/ανοικτοκυκλώματος στα εξωτερικά στοιχεία (limit switch, FSRs), εφόσον κάτι τέτοιο είναι εφικτό.
- Η αναζήτηση ενός διαφορετικού - και πιθανόν λιγότερο εκτεθειμένου στο νερό - τρόπου προσδιορισμού της πλήρως κλειστής (ή ανοικτής) θέσης των δακτύλων. Η χρήση ενός στροφικού ποτενσιόμετρου θα διευκόλυνε και το προσδιορισμό της απόλυτης θέσης των δακτύλων, ανεξάρτητα από διακοπές στην τροφοδοσία.

Και τρεις προτάσεις:

- Η ενσωμάτωση αισθητήρα-σόναρα στην ελεύθερη πλευρά του σώματος του μηχανισμού - υπάρχουν τυποποιημένοι αδιάβροχοι αισθητήρες, π.χ. ο αισθητήρας υπό την κωδική ονομασία *JSN-SR04T*.
- Η ενσωμάτωση αισθητήρων Hall-effect στις κορυφές των δακτύλων (π.χ. τα ολοκληρωμένα DRV5056, της TI), οι οποίοι μπορούν να λειτουργήσουν ως ανιχνευτές εγγύτητας για αντικείμενα στα οποία ενσωματώνονται μαγνητικές «κουκίδες» (μαγνήτες νεοδύμιου για παράδειγμα).
- Ο συνδυασμός των καλωδίων της τροφοδοσίας της λυχνίας LED και του USB της κάμερας σε ένα, εφόσον αποδειχθεί η χρησιμότητα της πρώτης.

5.4 Ζητήματα και προτάσεις στο λογισμικό ελέγχου

Όσον αφορά το λογισμικό ελέγχου, νομίζω ότι η κυριότερη έλλειψη είναι η δυνατότητα ελέγχου της θέσης των επιφανειών συγκράτησης, κάτι που όμως νομίζω εύκολα θα ενσωματωθεί στο μέλλον.

Η βιβλιοθήκη SimpleCLI παρέχει τη δυνατότητα αναφοράς σφαλμάτων, που ίσως θα μπορούσε να ενταχθεί στο λογισμικό για την αναγνώριση δυσλειτουργιών (π.χ. την απουσία ή λανθασμένη τιμή από έναν αισθητήρα ή μια μεταβλητή ελέγχου).

Άλλες ελλείψεις, περισσότερο σχετικές με την μοντελοποίηση του μηχανισμού, είναι μια αναλυτική προσέγγιση της δυναμικής του επενεργητή (και της θερμικής συμπεριφοράς), του ποσού μείωσης της απόδοσης λόγω της τριβής στην τσιμούχα περιστροφής¹¹⁵, του ποσού των ανοχών στις αρθρώσεις.

Επίσης, η IMU που ενσωματώνεται στο σύστημα, παραμένει σε αυτό το στάδιο αναξιοποίητη.

Κλείνοντας, ένα ζήτημα που θα ήθελα να εξεταστεί περαιτέρω είναι η επεκτασιμότητα της πλακέτας Pro Micro. Το πρόγραμμα ελέγχου, παρότι ενσωματώνει όλες τις λειτουργίες που ζητήθηκαν, έχει ήδη σχεδόν γεμίσει τη διαθέσιμη μνήμη του μικροελεγκτή ATmega32U4. Ένας από τους λόγους που επιλέχθηκε η συγκεκριμένη πλακέτα είναι το γεγονός ότι διαθέτει το ίδιο φορμά με την πλακέτα SAMD21 Mini Breakout της Sparkfun, η οποία φέρει τον ισχυρότερο μικροελεγκτή ATSAMD21G18 (32-bit ARM Cortex M0+ επεξεργαστής, 256KB flash, 32KB SRAM, και συχνότητα μέχρι 48MHz), ο οποίος θα μπορεί να ανταπεξέλθει σε συνθετότερα σχήματα ελέγχου και περισσότερες λειτουργίες. Γενικότερα, πολλών ειδών πλακέτες ανάπτυξης είναι πλέον διαθέσιμες με χαμηλό κόστος και ιδιαίτερα αυξημένες δυνατότητες (32-bit CPUs, μεγάλα ποσά μνήμης, ενσωματωμένες οθόνες, wi-fi, bluetooth, υποστήριξη RTOS κ.α.), που μπορεί να είναι χρήσιμες και πέρα από το πλαίσιο των υποβρύχιων εφαρμογών.

Αν παράλληλα υποτεθεί ότι την ανάπτυξη του στοιχείου δράσης θα ακολουθήσει ο επανασχεδιασμός κι η βελτίωση του βραχίονα, ίσως η ενσωμάτωση αμφότερων των μονάδων ελέγχου σε ένα μικροϋπολογιστή στη βάση του βραχίονα να είναι μια κομψή λύση, με αυξημένη επεξεργαστική ισχύ και λιγότερα καλώδια από τα διαφορετικά υποσυστήματα προς το χρήστη.

¹¹⁵ Το ζήτημα αυτό θα μπορούσε να συνδυαστεί με την κατασκευή (έστω μερική) της βάσης του μοτέρ στο CNC-mill, ώστε να μειωθούν οι ανοχές (εκκεντρότητα, έλλειψη ευθυγράμμισης άξονα μοτέρ και άξονα τσιμούχας) λόγω εκτύπωσης της στον 3D-printer.

Παράρτημα Α (technical drawings of parts)

Στο παράρτημα αυτό παρατίθενται τεχνικά σχέδια των μερών του μηχανισμού, μεμονωμένα. Πιθανόν αυτή η πληροφορία να είναι πλεονάζουσα για τον τελικό χρήστη - εξάλλου όλα τα στοιχεία μπορούν να βρεθούν αναλυτικότερα στα αρχεία CAD. Θεωρώ ωστόσο ότι υπάρχει αξία στην αναφορά της ως μέρος ενός έντυπου εγχειριδίου χρήσης, το οποίο εξυπηρετεί ποικίλες ανάγκες in situ, χωρίς να απαιτείται Η/Υ.

Τα μέρη του μηχανισμού χωρίζονται σε δέκα ενότητες (assemblies), οι οποίες αναφέρονται με τα αντίστοιχα πρώτα γράμματα του λατινικού αλφαβήτου ως εξής:

- (A) **Finger** assemblies [4 ειδών]
- (B) **Rod Link** assembly
- (C) **Casing Top Plug** assembly
- (D) **Motor Casing** assemblies [2 ειδών]
- (E) **Casing Bottom Plug** assemblies [2 ειδών]
- (F) **Manipulator Base** assembly
- (G) **Camera** assemblies [2 ειδών]
- (H) **LED Lamp** assembly
- (I) **Cable Host Buoy** assembly
- (J) **“UndEE”¹¹⁶ System** assembly

Συνοπτικά, οι ενότητες αναλύονται ως εξής:

- (A) : Τα στοιχεία που αποτελούν τα δάκτυλα, μέχρι και τη βάση τους στο κυρίως σώμα (το περίβλημα) του μηχανισμού, μαζί με τα ηλεκτρικά στοιχεία που τοποθετούνται σε αυτά. Περιλαμβάνονται και οι σύνδεσμοι προς τη βάση του περικόχλιου της ενότητας (B). Τα τέσσερα είδη αντιστοιχούν στις ισάριθμες διαφορετικές «γεωμετρίες» των δακτύλων (ευθεία, κυρτή, κυρτή με άρθρωση, εύκαμπτη).
- (B) : Τα στοιχεία της βάσης όπου εδράζεται το περικόχλιο με το τραπεζοειδές σπείρωμα.
- (C) : Τα στοιχεία του άνω πώματος του περιβλήματος, μαζί με τα στοιχεία στεγανοποίησης.
- (D) : Τα στοιχεία που αποτελούν το ηλεκτρομηχανικό «κέντρο» του συστήματος και εσωκλείονται στο περίβλημα (μοτέρ, αισθητήρες, ηλεκτρονικές πλακέτες κ.λπ.), μαζί με τη βάση τους, καθώς και τον τραπεζοειδή κοχλία. Τα δύο είδη διαφοροποιούνται μόνο ως προς το μοτέρ και τη βάση¹¹⁷.
- (E) : Τα στοιχεία του κάτω πώματος του περιβλήματος, μαζί με τα στοιχεία στεγανοποίησης. Τα δύο είδη διαφοροποιούνται μόνο ως προς την προσθήκη της απόληξης-συνδέσμου, για το πνευματικό κύκλωμα ελέγχου διαρροών.
- (F) : Τα στοιχεία της βάσης του μηχανισμού, μαζί με τα στοιχεία που προσδίδουν το χαρακτηριστικό της ενδοτικότητας, για τη σύνδεσή του με το βραχίονα του ROV.
- (G) : Τα στοιχεία του οπτικού συστήματος (κάμερα), μαζί με το περίβλημά του. Τα δύο είδη αναφέρονται στα δύο διαφορετικά συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν.

¹¹⁶ Underwater End Effector

¹¹⁷ Για το 3^ο, εφεδρικό, αντίτυπο του μηχανισμού ήταν αναγκαία η αντικατάσταση του μοτέρ με άλλο όμοιον διαστάσεων και τεχνικών χαρακτηριστικών, λόγω δυσλειτουργίας του πρωτότυπου - το οποίο δεν βρέθηκε για αγορά σε δεύτερο χρόνο.

- (H) : Η λυχνία LED, που τοποθετείται παράπλευρα στο περίβλημα της κάμερας, με τη βάση της.
- (I) : Το πλωτό περίβλημα, που περιλαμβάνει τους ενισχυτές των καλωδίων USB, λόγω περιορισμών του πρωτόκολλου (v. 2.0) για το μέγιστο μήκος (> 5m).
- (J) : Το σύνολο των στοιχείων του μηχανισμού (πρακτικά όλες οι παραπάνω ενότητες, εκτός της (I) ενότητας), μαζί με το κυρίως περίβλημα και τους συνδέσμους προς τον απομακρυσμένο Η/Υ και τους αισθητήρες FSR.

Ένα σχόλιο ως προς τον καταμερισμό των στοιχείων: Ο χωρισμός των ενοτήτων πηγάζει από την δική μου προοπτική επί της διαδικασίας ανάπτυξης, κατασκευής κι εν τέλει συναρμολόγησης των μερών του συστήματος.

Έτσι, για παράδειγμα, η ενότητα (B) περιλαμβάνει μόνο δύο στοιχεία, αλλά είναι το δομικό σύνολο που θα αφαιρεθεί πρώτο από τον -κυρίως¹¹⁸- μηχανισμό πριν την αποσυναρμολόγησή του. Επίσης, μοιάζει να είναι το πιο επιρρεπές σε φθορά σύστημα (μαζί ίσως με τις βάσεις των δακτύλων), οπότε θεωρώ ότι βοηθάει να χωριστεί λογικά από τα υπόλοιπα. Από την άλλη, η κάμερα και η πηγή φωτός χωρίζονται σε διαφορετικές ενότητες (η δεύτερη περιλαμβάνει πάλι δύο μόνο στοιχεία -τη λυχνία LED και τη βάση της), διότι δεν είναι αναγκαία η σύνδεσή τους στο μηχανισμό σε κάθε περίπτωση. Τέλος, η ενότητα (J) αναφέρεται, ανάποδα ίσως, ως τελευταία σε αυτό το παράρτημα, καθώς πρακτικά μπορεί να δημιουργηθεί μόνο κατόπιν σύνθεσης όλων των προηγούμενων.

Η φόρμα που χρησιμοποιώ στα τεχνικά σχέδια είναι μεγέθους A4 (297 × 210 mm), με απεικόνιση σε τρεις ή περισσότερες όψεις, με αναφορά στο όνομα, τον αριθμό και την ενότητα στην οποία ανήκει το στοιχείο, το υλικό και τη μέθοδο κατασκευής (εφόσον δεν είναι τυποποιημένο στοιχείο), τη μάζα του σε γραμμάρια και σημειώσεις για βασικές διαστάσεις, οπές, σπειρώματα κ.λπ.

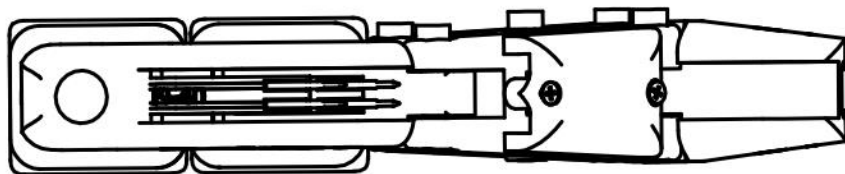
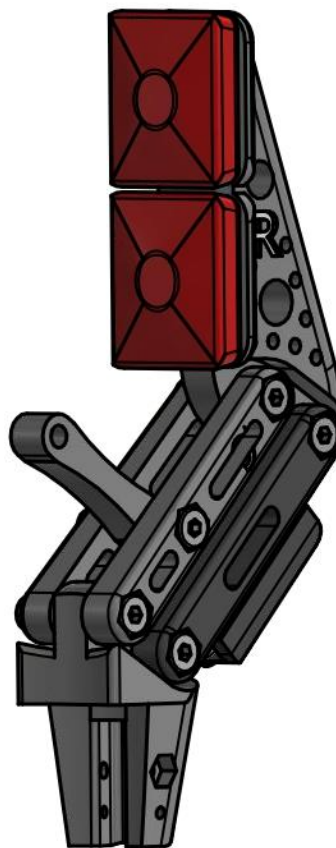
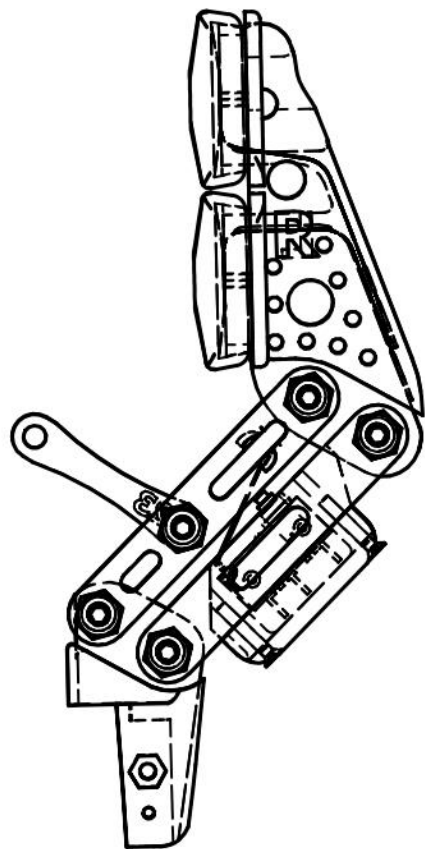
Σημειώνω ότι στο παράρτημα αυτό δεν περιλαμβάνονται τεχνικά σχέδια των ηλεκτρικών συνδέσμων ή των καλωδίων μεταξύ των στοιχείων της ενότητας (D), (H) και (I), δεδομένου ότι είναι τυποποιημένα στοιχεία.

Το σύνολο των σχεδίων - όπως και όλες οι 3D γεωμετρίες - παράχθηκε στο πρόγραμμα **Autodesk Inventor** (εκδ. 2020), άδεια χρήσης του οποίου παρέχεται από τη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

¹¹⁸ Εννοώντας όχι την κάμερα και την πηγή φωτός (λυχνία LED).

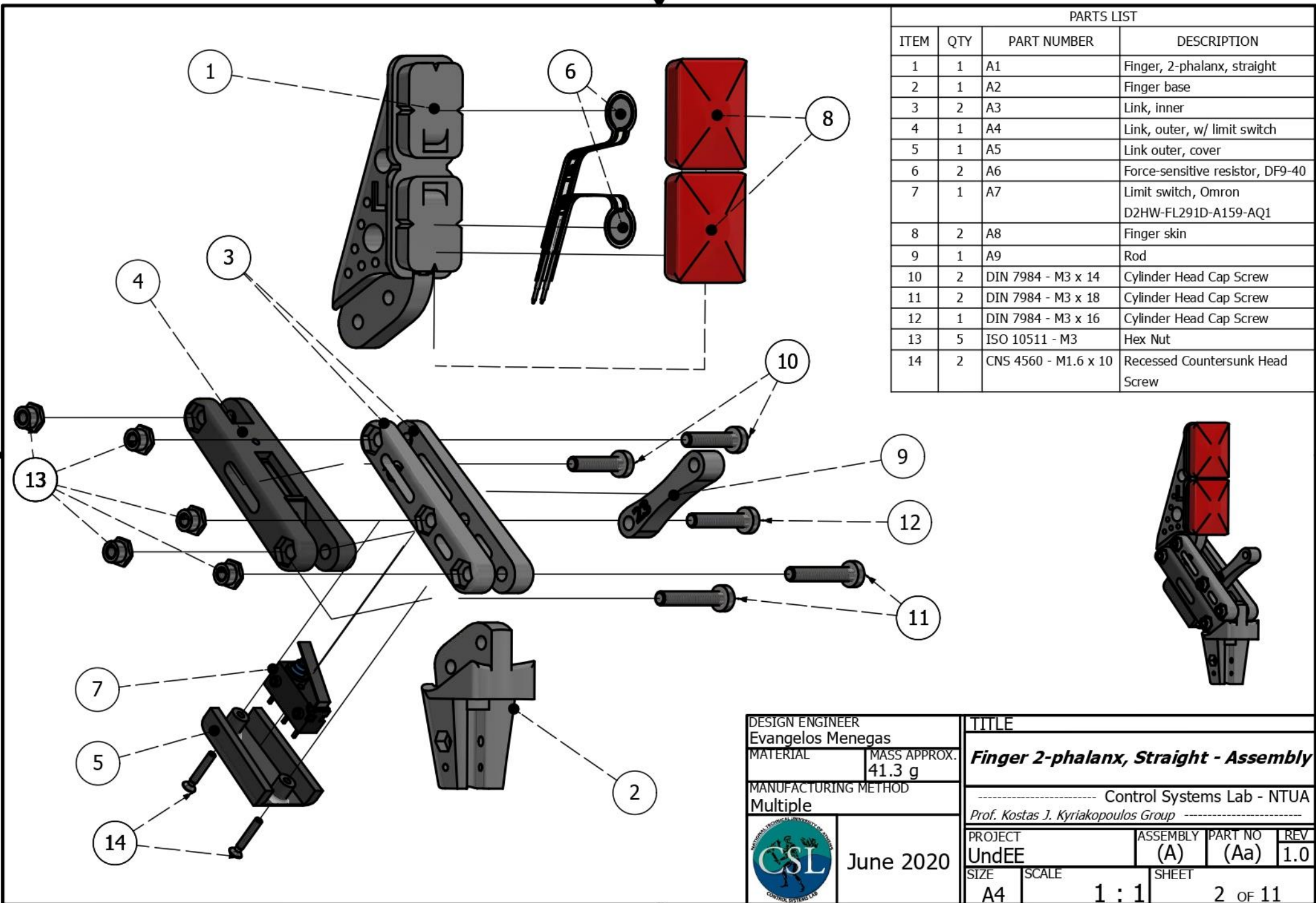
(A) - Finger assemblies





PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	A1	Finger, 2-phalanx, straight
2	1	A2	Finger base
3	2	A3	Link, inner
4	1	A4	Link, outer, w/ limit switch
5	1	A5	Link outer, cover
6	2	A6	Force-sensitive resistor, DF9-40
7	1	A7	Limit switch, Omron D2HW-FL291D-A159-AQ1
8	2	A8	Finger skin
9	1	A9	Rod
10	2	DIN 7984 - M3 x 14	Cylinder Head Cap Screw
11	2	DIN 7984 - M3 x 18	Cylinder Head Cap Screw
12	1	DIN 7984 - M3 x 16	Cylinder Head Cap Screw
13	5	ISO 10511 - M3	Hex Nut
14	2	CNS 4560 - M1.6 x 10	Recessed Countersunk Head Screw

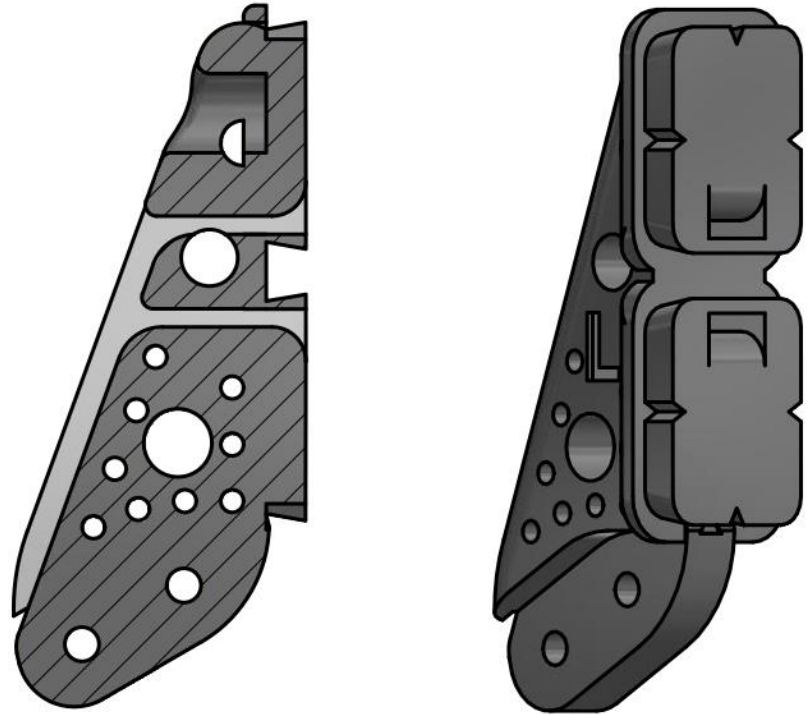
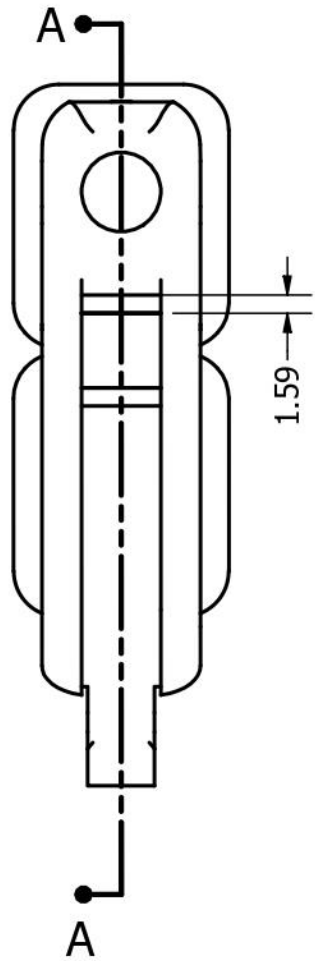
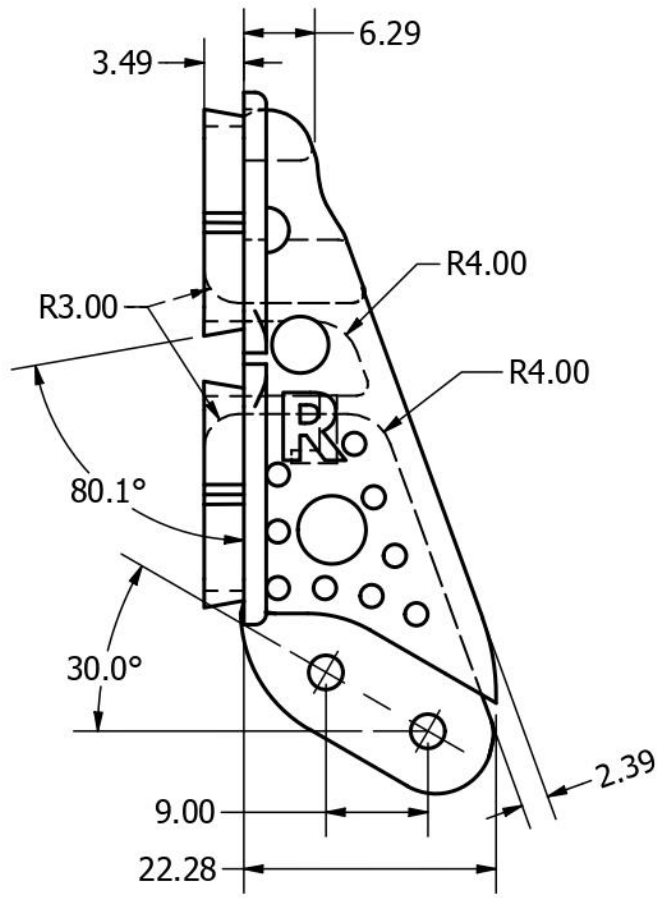
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL	MASS APPROX. 41.3 g	Finger 2-phalanx, Straight - Assembly	
MANUFACTURING METHOD Multiple		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group	
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (A)	PART NO (Aa)
	SIZE A4	SCALE 1 : 1	REV 1.0
		SHEET 1 OF 11	



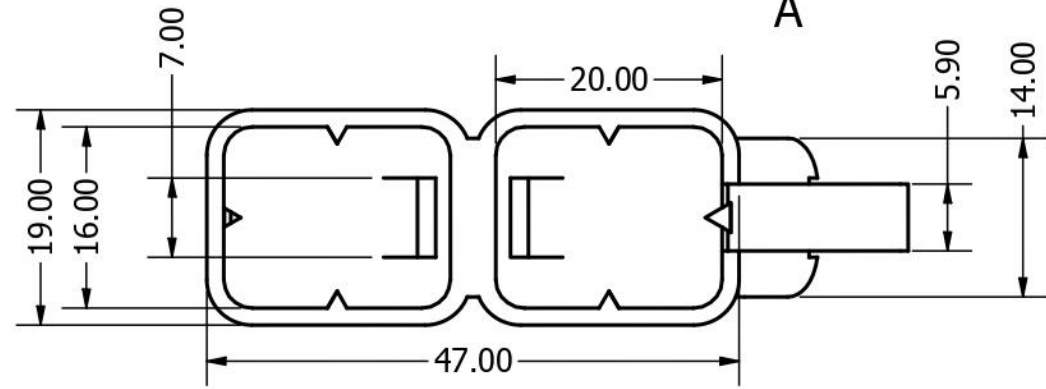
PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	A1	Finger, 2-phalanx, straight
2	1	A2	Finger base
3	2	A3	Link, inner
4	1	A4	Link, outer, w/ limit switch
5	1	A5	Link outer, cover
6	2	A6	Force-sensitive resistor, DF9-40
7	1	A7	Limit switch, Omron D2HW-FL291D-A159-AQ1
8	2	A8	Finger skin
9	1	A9	Rod
10	2	DIN 7984 - M3 x 14	Cylinder Head Cap Screw
11	2	DIN 7984 - M3 x 18	Cylinder Head Cap Screw
12	1	DIN 7984 - M3 x 16	Cylinder Head Cap Screw
13	5	ISO 10511 - M3	Hex Nut
14	2	CNS 4560 - M1.6 x 10	Recessed Countersunk Head Screw


DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas	
MATERIAL	MASS APPROX. 41.3 g
MANUFACTURING METHOD Multiple	
 June 2020	

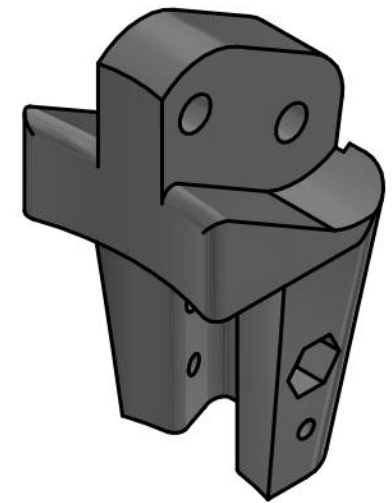
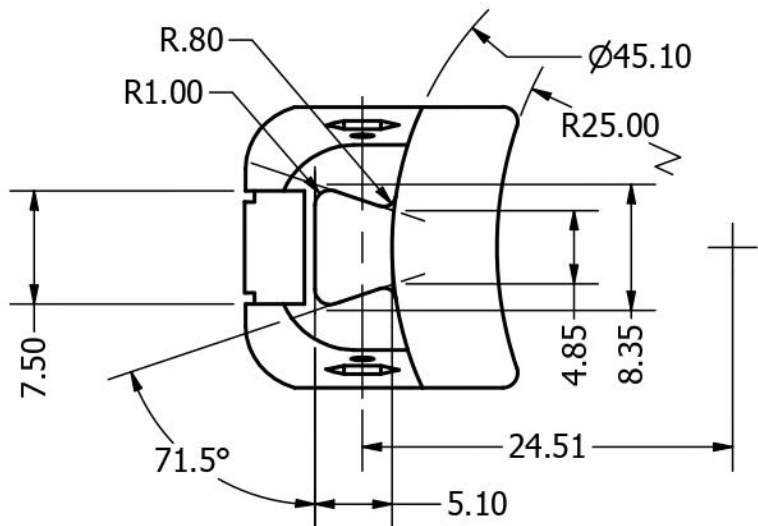
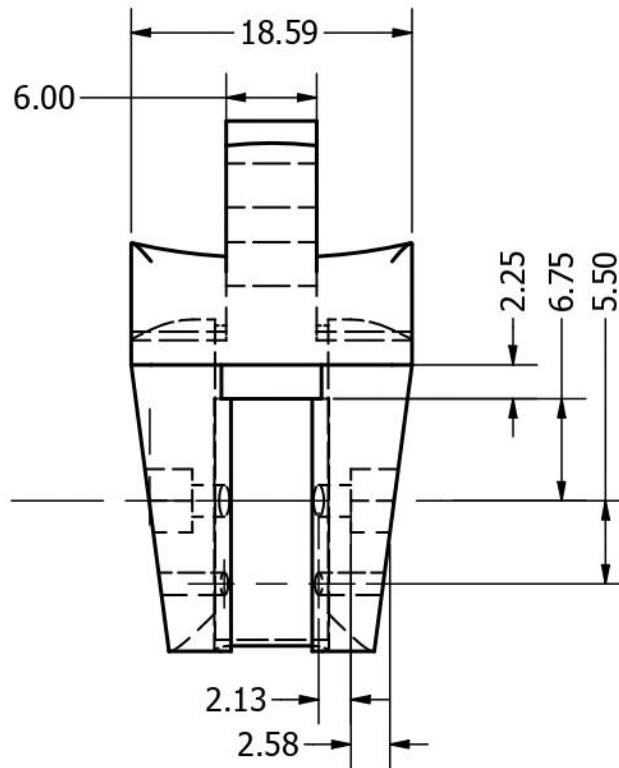
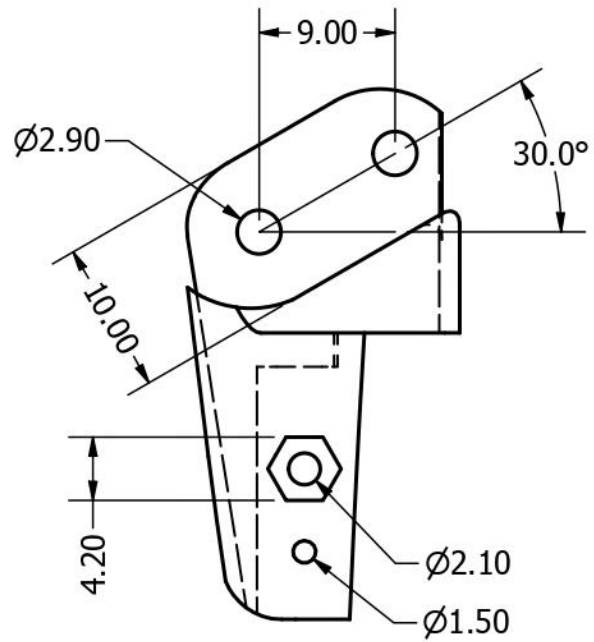
TITLE			
Finger 2-phalanx, Straight - Assembly			
Control Systems Lab - NTUA			
Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group			
PROJECT	ASSEMBLY	PART NO	REV
UndEE	(A)	(Aa)	1.0
SIZE	SCALE	SHEET	
A4	1 : 1	2 OF 11	




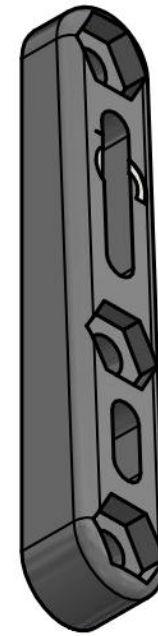
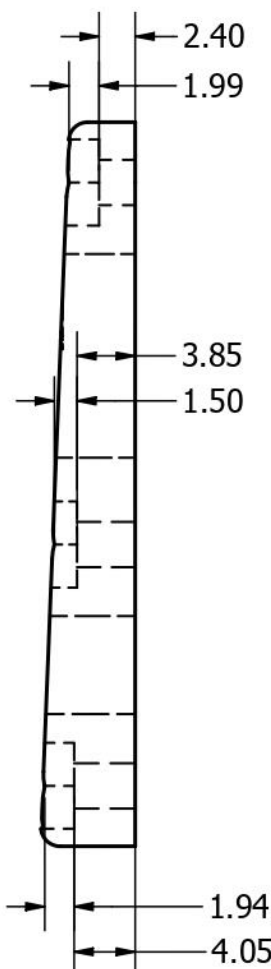
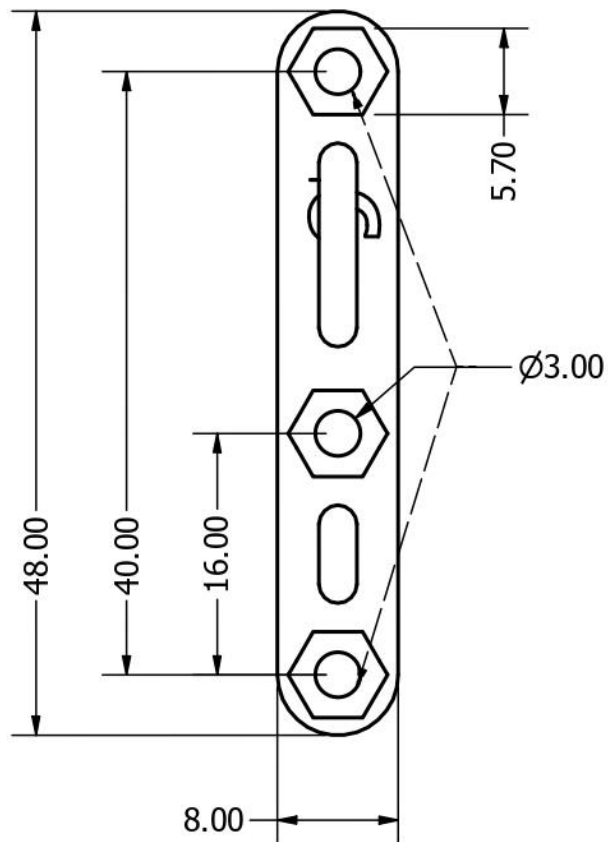
SECTION A-A
SCALE 1.5: 1




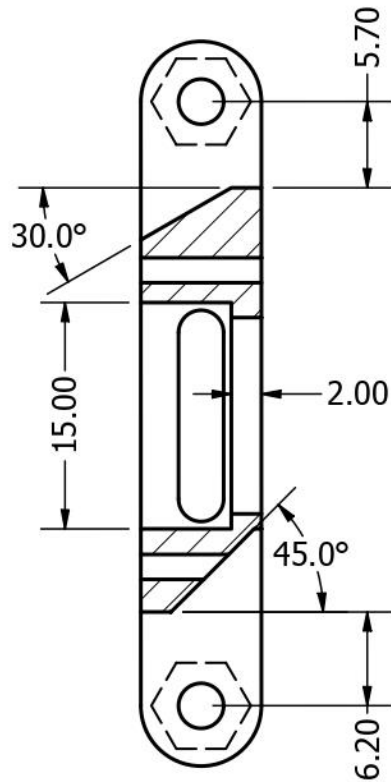
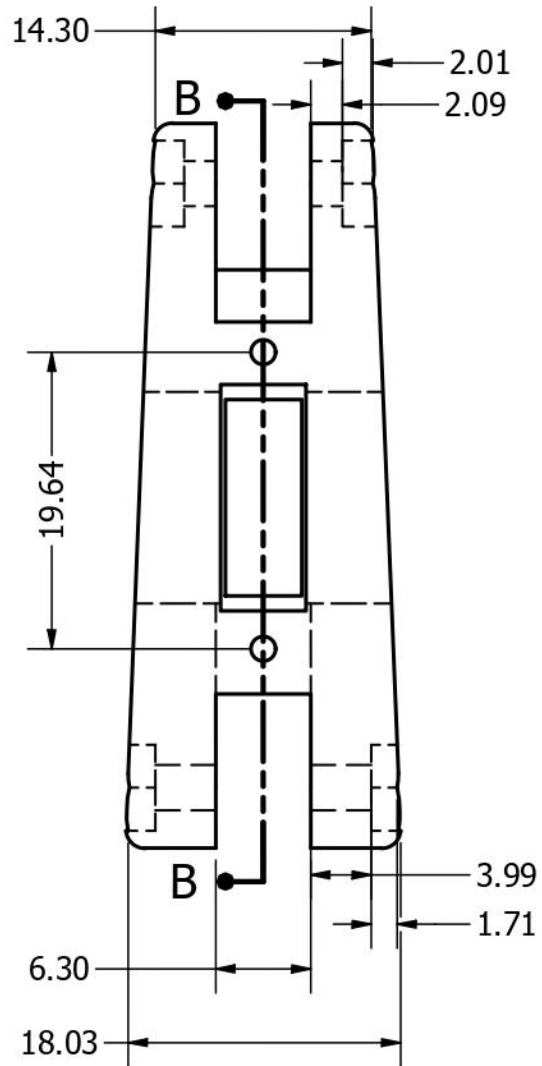
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL PLA Plastic	MASS APPROX. 12.0 g	Finger 2-phalanx, Straight		
MANUFACTURING METHOD 3D-Printed		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group		
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (A)	PART NO A1	REV 1.0
	SIZE A4	SCALE 1.5: 1	SHEET 3 OF 11	



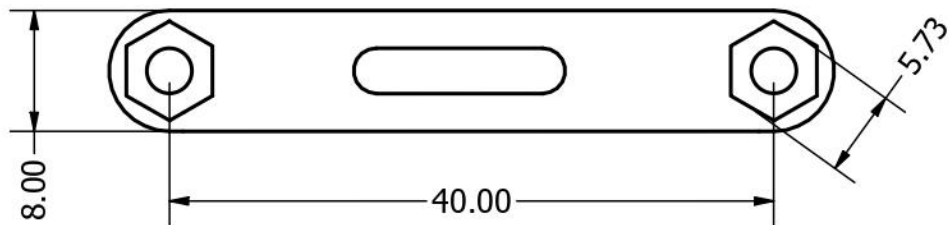
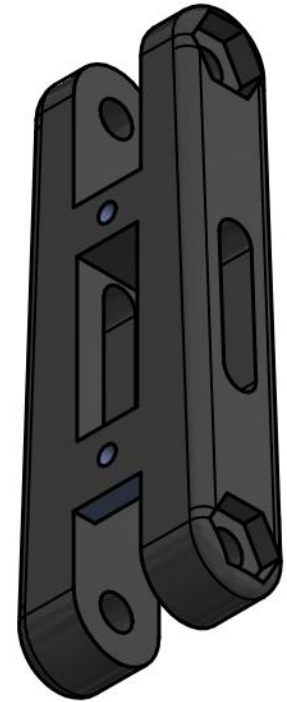
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE Finger Base		
MATERIAL PLA Plastic	MASS APPROX. 4.7 g	Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group		
MANUFACTURING METHOD 3D-Printed		PROJECT UndEE	ASSEMBLY (A)	PART NO A2
 June 2020		REV 1.0		
SIZE A4	SCALE 2 : 1	SHEET 4 OF 11		




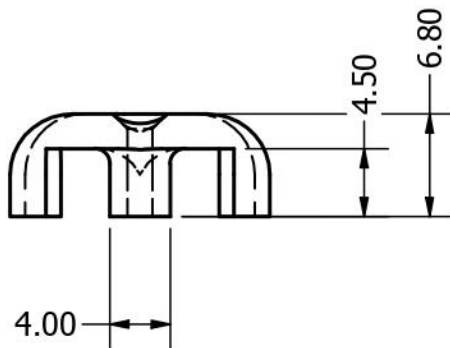
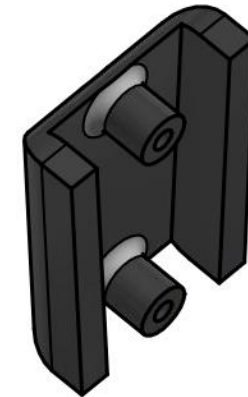
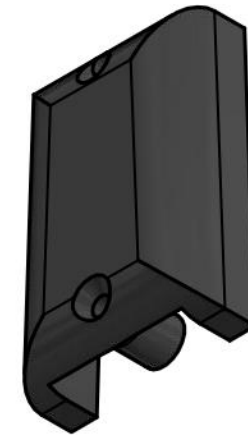
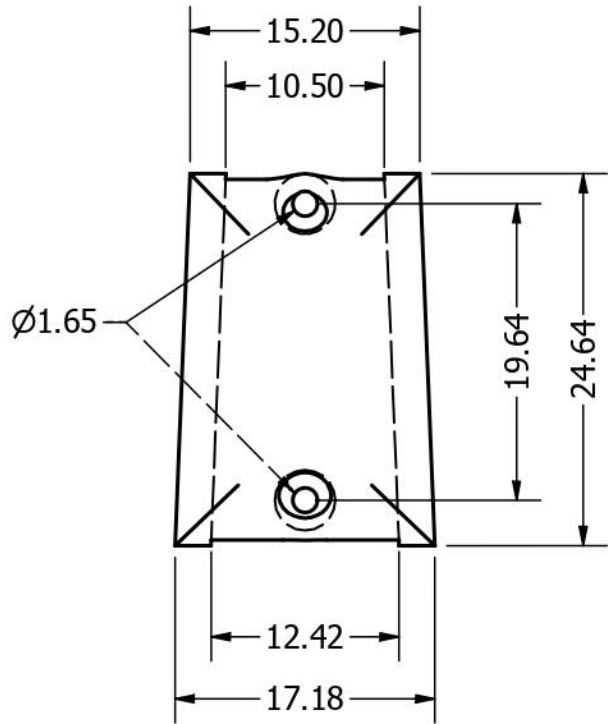
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL PLA Plastic	MASS APPROX. 1.8 g	Link, Inner	
MANUFACTURING METHOD 3D-Printed		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group	
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (A)	PART NO A3
	REV 1.0	SHEET	
SIZE A4	SCALE 2 : 1	5 OF 11	




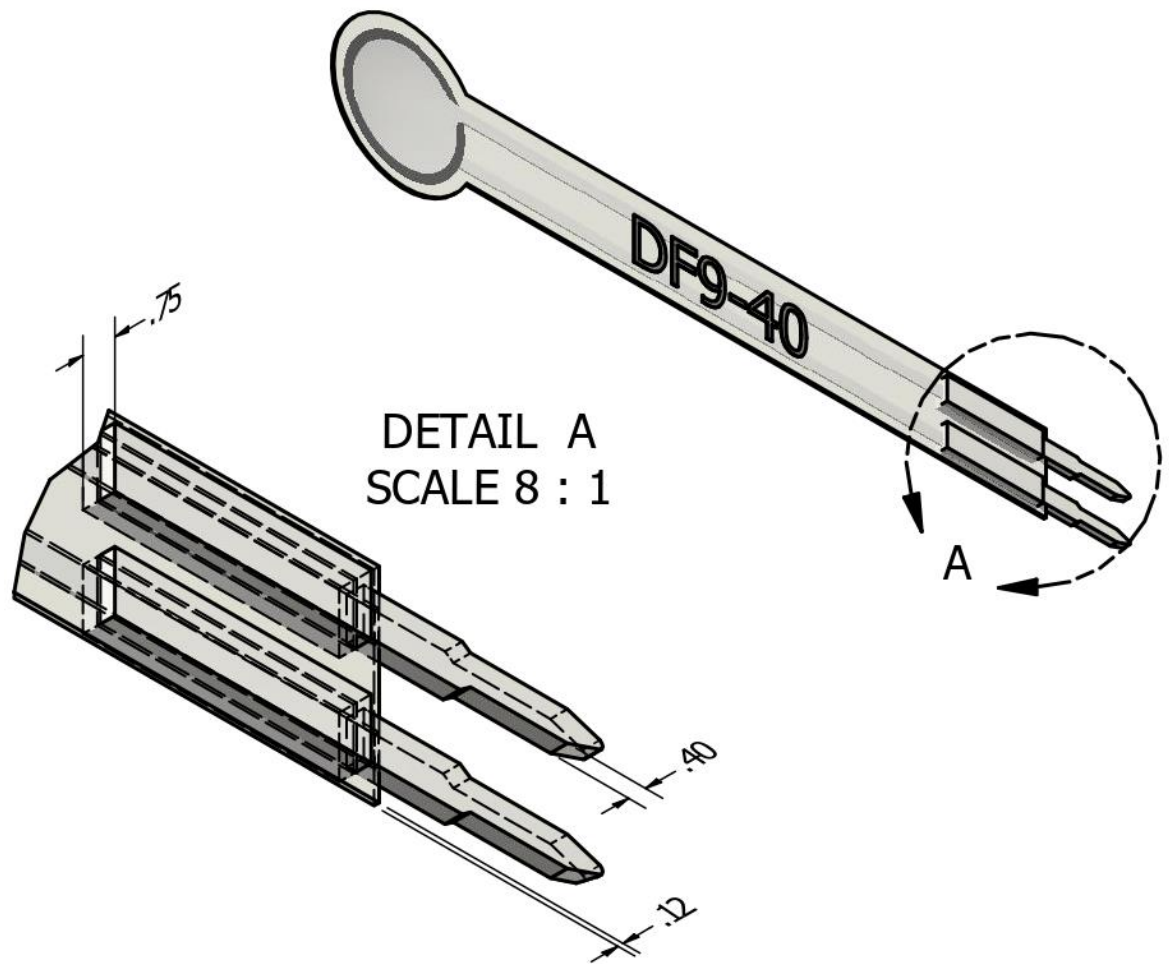
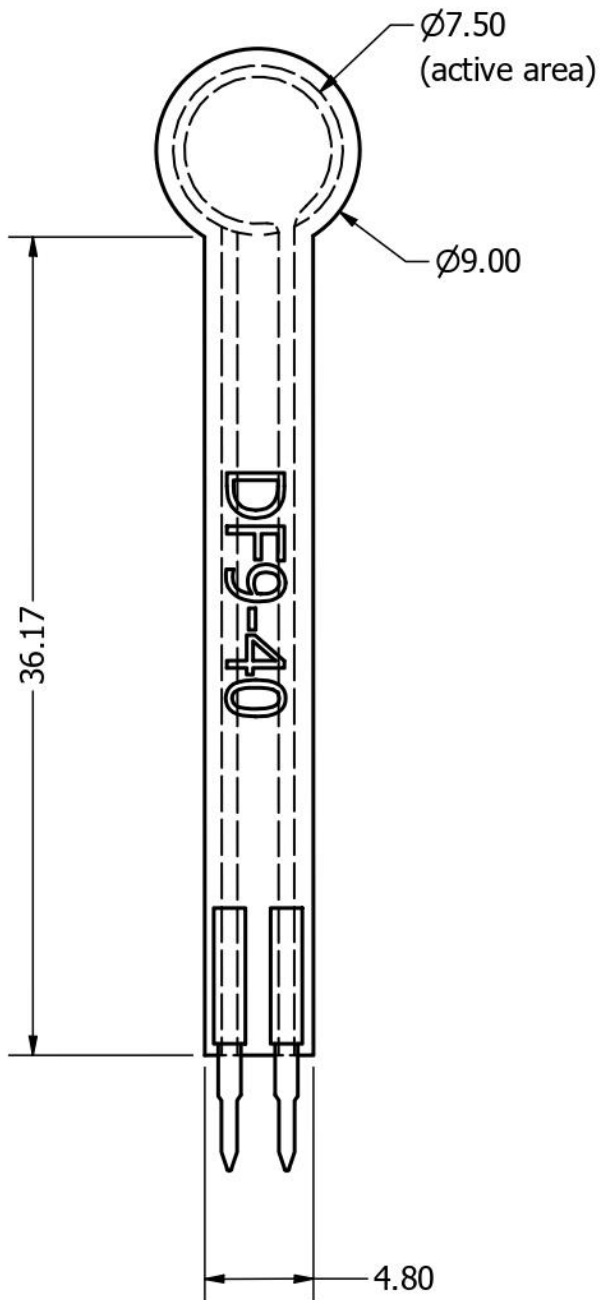
SECTION B-B
SCALE 2 : 1




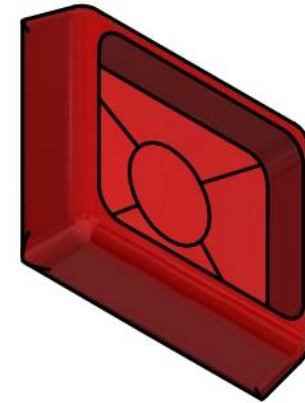
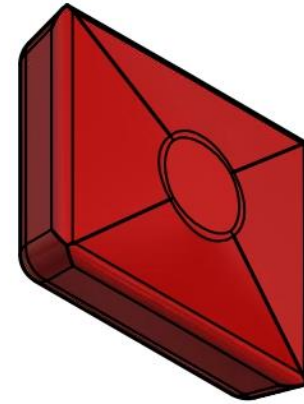
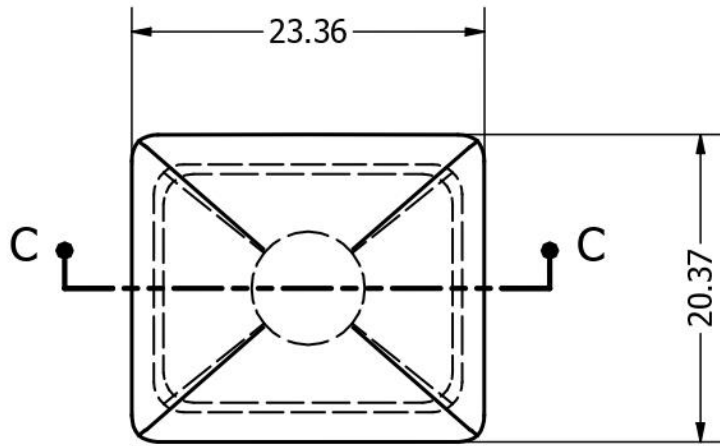
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL PLA Plastic	MASS APPROX. 4.4 g	Link, Outer, w/ limit switch		
MANUFACTURING METHOD 3D-Printed		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group		
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (A)	PART NO A4	REV 1.0
	SIZE A4	SCALE 2 : 1	SHEET 6 OF 11	



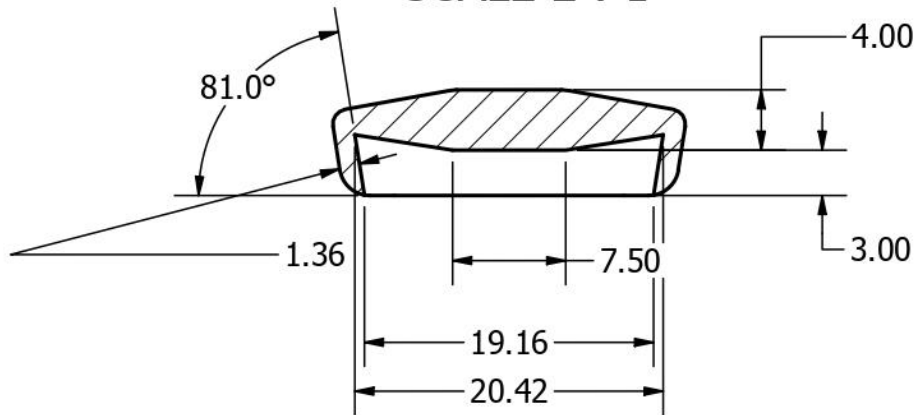
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL PLA Plastic	MASS APPROX. 1.6 g	Link Outer, cover		
MANUFACTURING METHOD 3D-Printed		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group		
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (A)	PART NO A5	REV 1.0
	SIZE A4	SCALE 2 : 1	SHEET 7 OF 11	



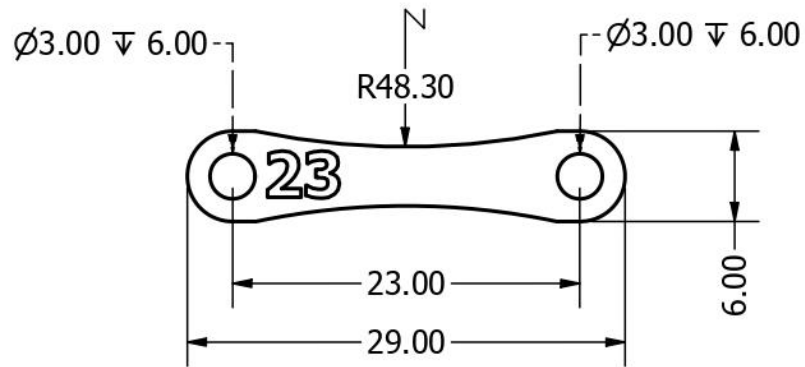
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL Phenolic Resin	MASS APPROX. N/A	DF9-40 Force Sensitive Resistor	
MANUFACTURING METHOD -		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group	
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (A)	PART NO A6
	REV -	SHEET	
SIZE A4	SCALE 3 : 1	8 OF 11	




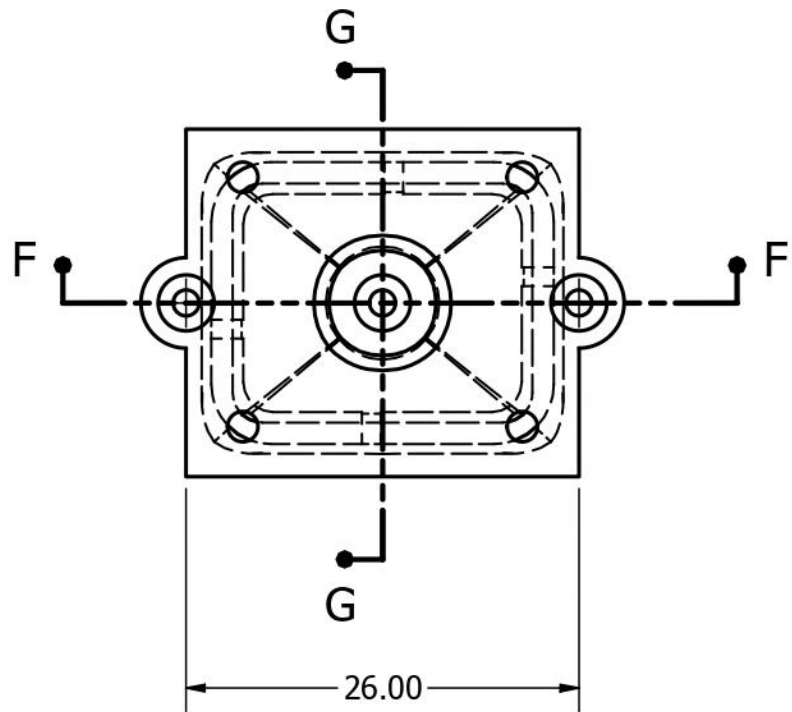
SECTION C-C
SCALE 2 : 1



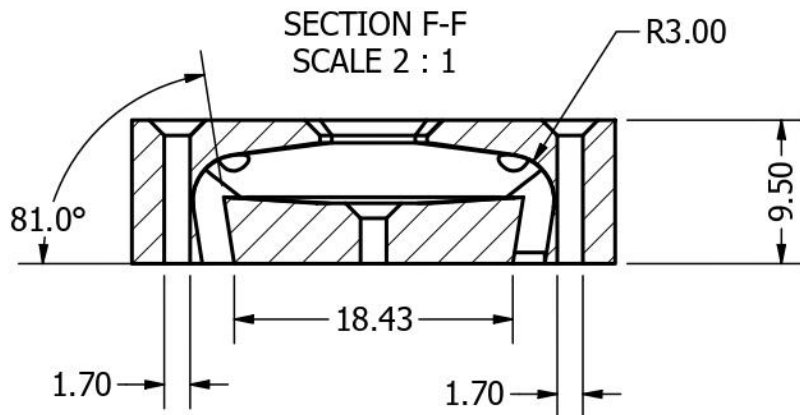
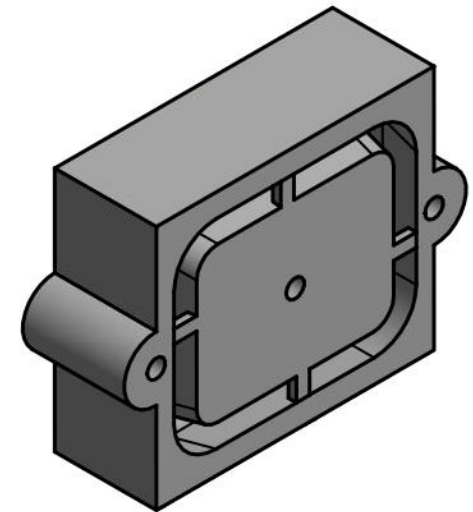
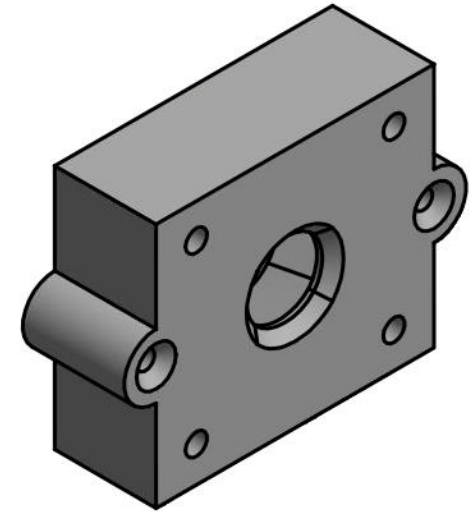
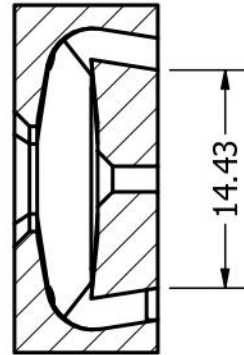
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL Rubber, Silicone	MASS APPROX. 0.0 kg	Finger Skin	
MANUFACTURING METHOD Mold Cast		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group	
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (A)	PART NO A8
	REV 1.0	SHEET	
SIZE A4	SCALE 2 : 1	SHEET 9 OF 11	



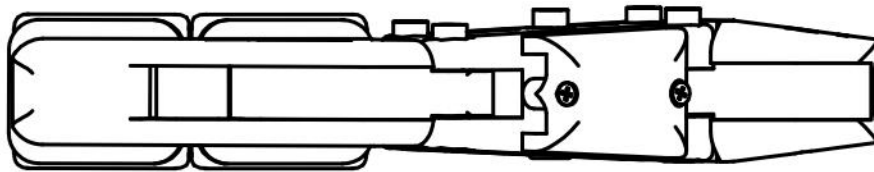
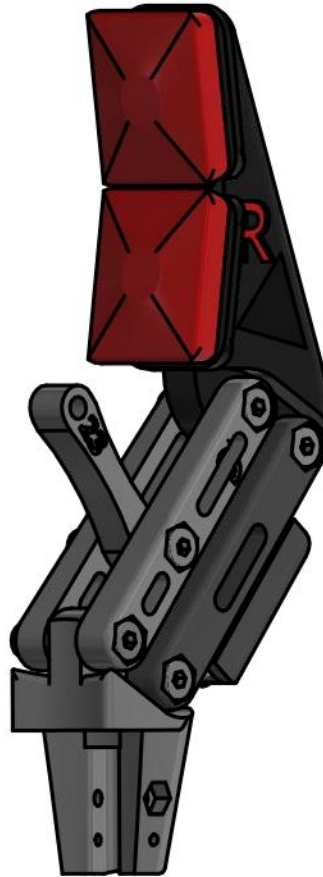
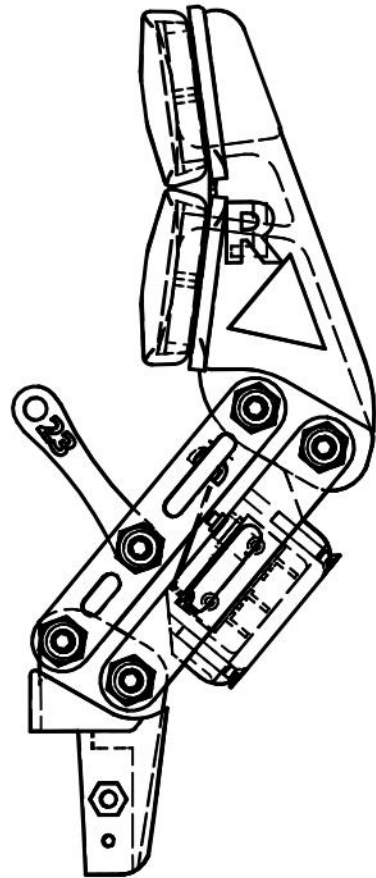
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL PLA Plastic	MASS APPROX. 0.0 kg	Rod	
MANUFACTURING METHOD 3D-printed		Control Systems Lab - NTUA <i>Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group</i>	
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (A)	PART NO A9
	REV 1.0	SHEET	
SIZE A4	SCALE 2 : 1	10 OF 11	



SECTION G-G
SCALE 2 : 1

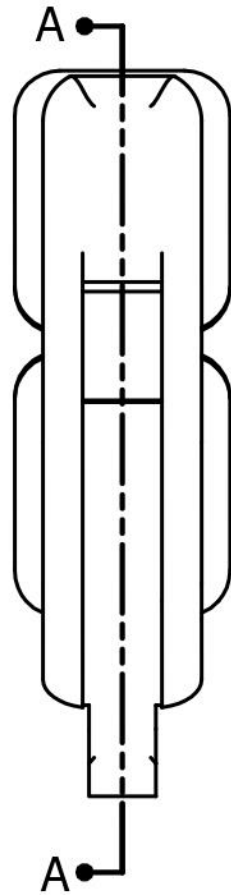
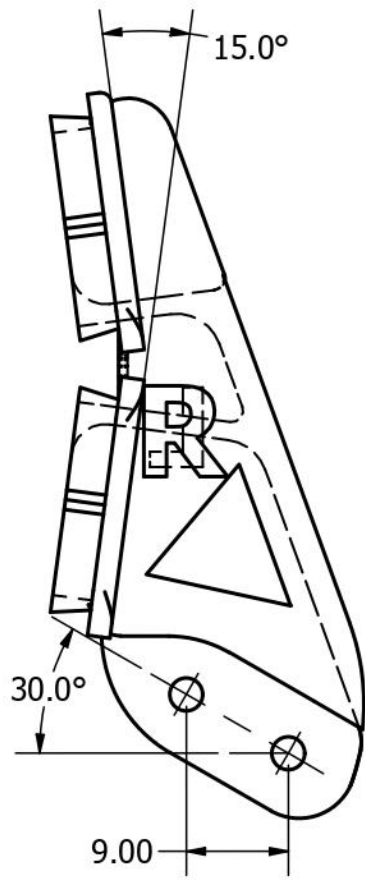


DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL PLA Plastic	MASS APPROX. 4.7 g	Finger skin mold		
MANUFACTURING METHOD 3D-printed		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group		
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (A)	PART NO Ax	REV 1.0
	SIZE A4	SCALE 2 : 1	SHEET 11 OF 11	

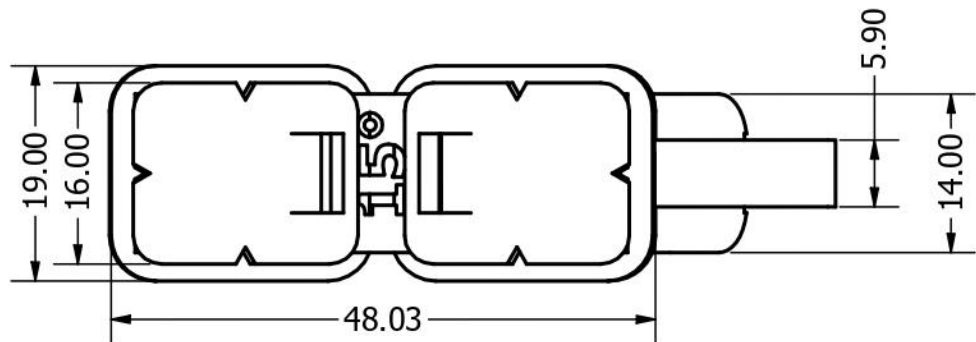



PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	A10	Finger, 2-phalanx, concave
2	1	A2	Finger base
3	2	A3	Link, inner
4	1	A5	Link outer, cover
5	1	A4	Link, outer, w/ limit switch
6	1	A7	Limit switch, Omron D2HW-FL291D-A159-AQ1
7	2	A8	Finger skin
8	1	A9	Rod
9	2	DIN 7984 - M3 x 14	Cylinder Head Cap Screw
10	2	DIN 7984 - M3 x 18	Cylinder Head Cap Screw
11	1	DIN 7984 - M3 x 16	Cylinder Head Cap Screw
12	5	ISO 10511 - M3	Hex Nut
13	2	CNS 4560 - M1.6 x 10	Recessed Countersunk Head Screw

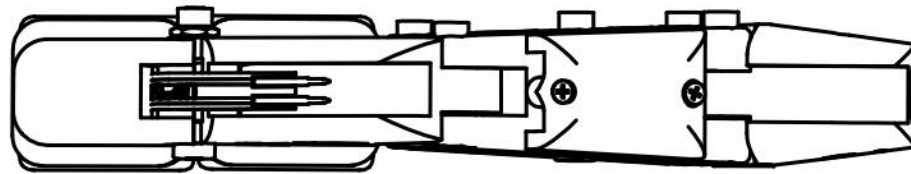
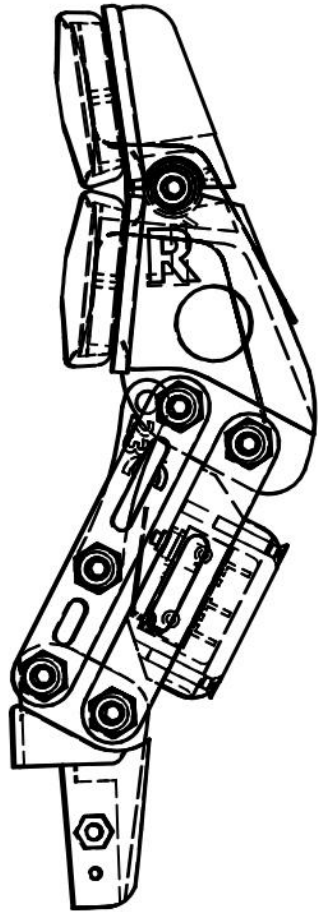
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE			
MATERIAL	MASS APPROX. 42.3 g	Finger 2-phalanx, concave - Assembly			
MANUFACTURING METHOD		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group			
	June 2020	PROJECT	ASSEMBLY	PART NO	REV
		UndEE	(A)	(Ab)	1.0
SIZE	SCALE	SHEET			
A4	1 : 1	1 OF 2			



SECTION A-A
SCALE 1.5 : 1

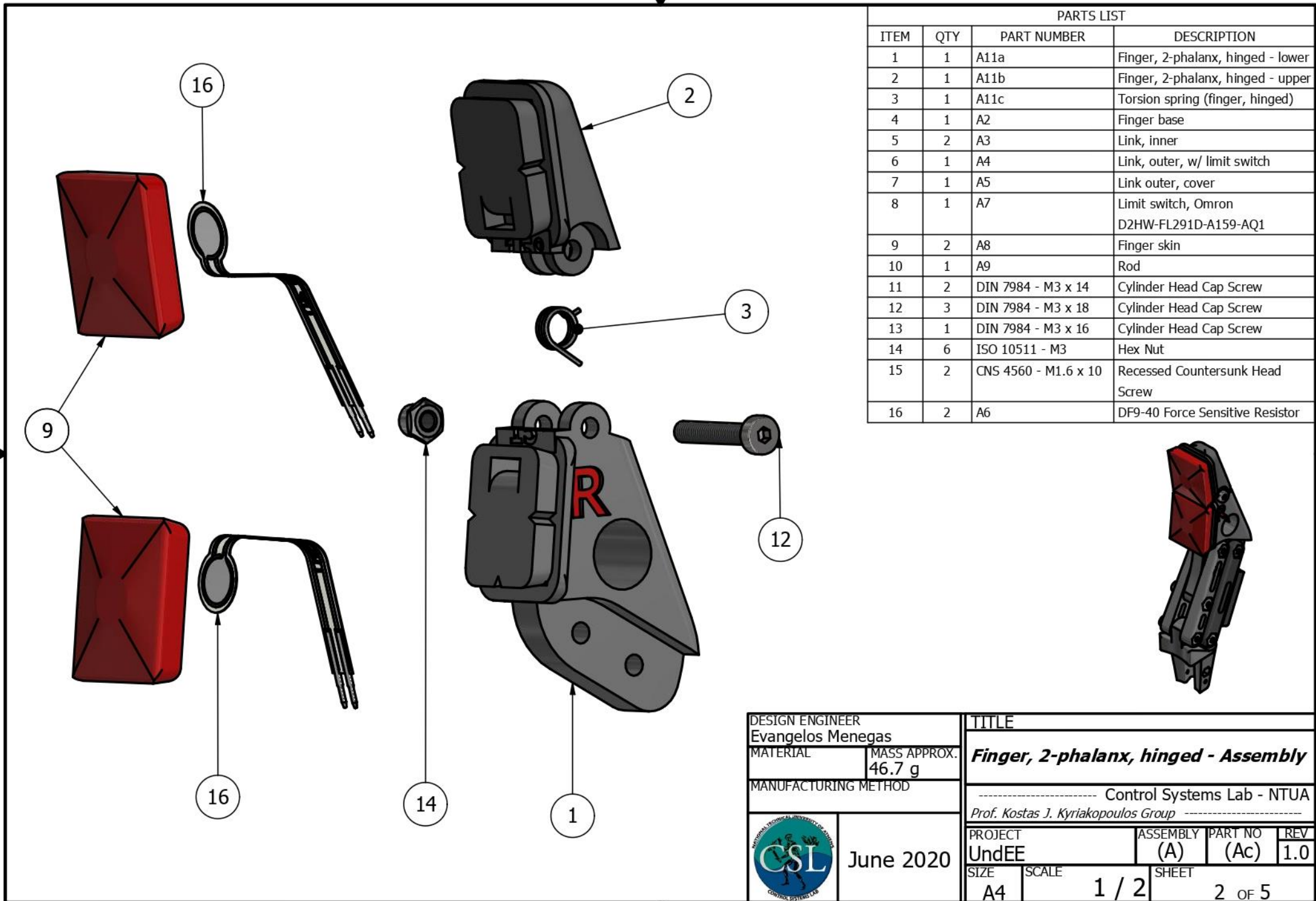


DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL PLA Plastic	MASS APPROX. 13.6 g	Finger, 2-phalanx, concave		
MANUFACTURING METHOD		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group		
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (A)	PART NO A10	REV 1.0
	SIZE A4	SCALE 1.5 : 1	SHEET 2 OF 2	




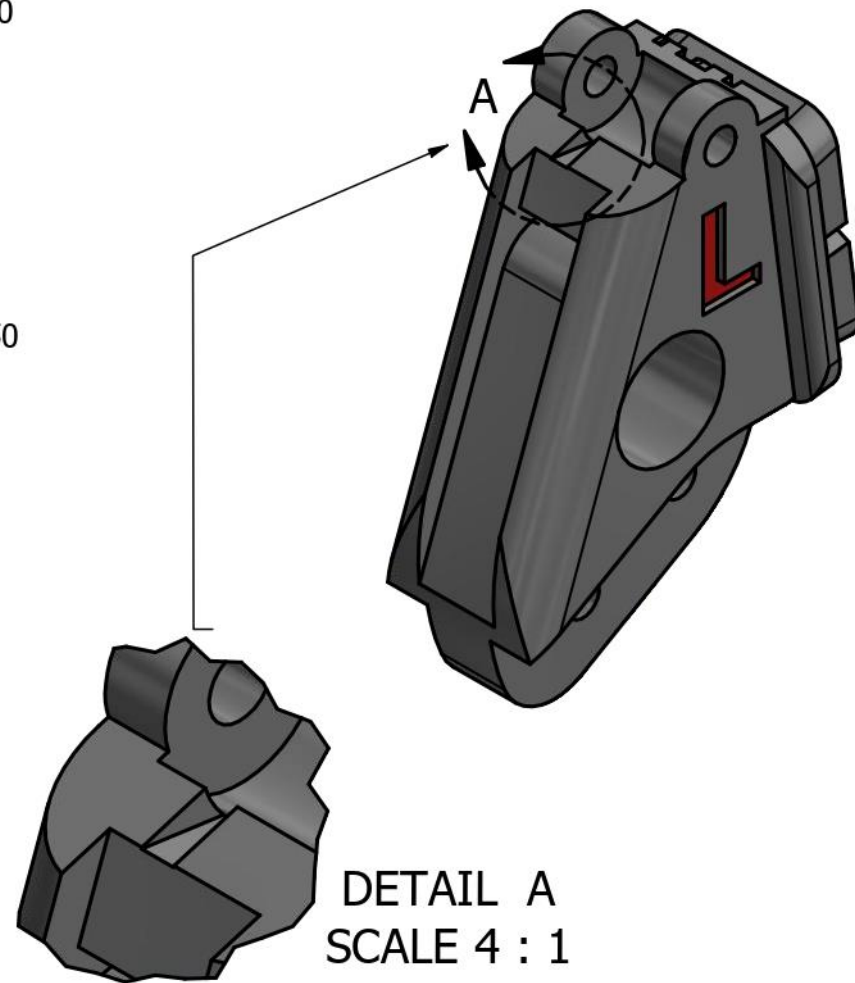
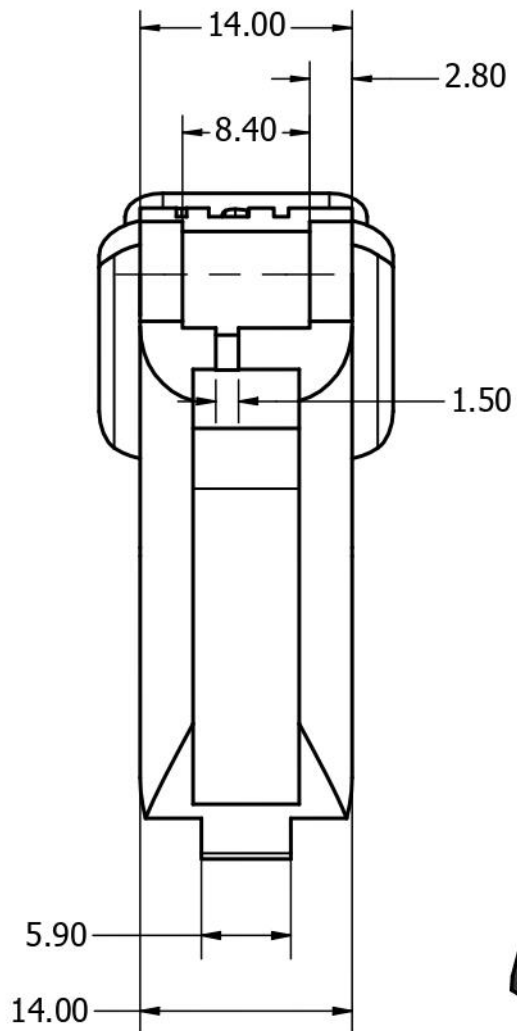
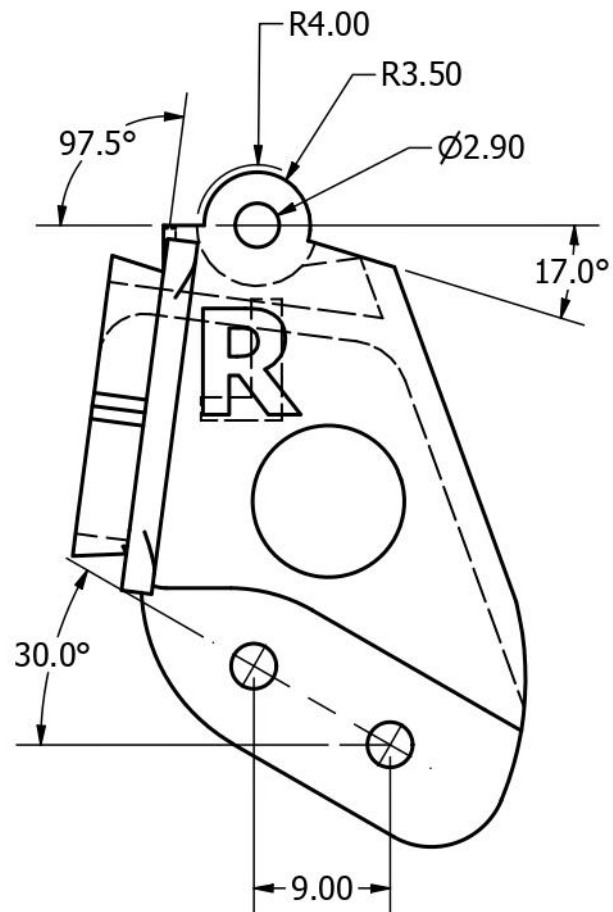
PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	A11a	Finger, 2-phalanx, hinged - lower
2	1	A11b	Finger, 2-phalanx, hinged - upper
3	1	A11c	Torsion spring (finger, hinged)
4	1	A2	Finger base
5	2	A3	Link, inner
6	1	A4	Link, outer, w/ limit switch
7	1	A5	Link outer, cover
8	1	A7	Limit switch, Omron D2HW-FL291D-A159-AQ1
9	2	A8	Finger skin
10	1	A9	Rod
11	2	DIN 7984 - M3 x 14	Cylinder Head Cap Screw
12	3	DIN 7984 - M3 x 18	Cylinder Head Cap Screw
13	1	DIN 7984 - M3 x 16	Cylinder Head Cap Screw
14	6	ISO 10511 - M3	Hex Nut
15	2	CNS 4560 - M1.6 x 10	Recessed Countersunk Head Screw
16	2	A6	DF9-40 Force Sensitive Resistor

DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL	MASS APPROX. 46.7 g	Finger, 2-phalanx, hinged - Assembly	
MANUFACTURING METHOD		----- Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group -----	
 June 2020	PROJECT	ASSEMBLY	PART NO
	UndEE	(A)	(Ac)
SIZE	SCALE	SHEET	
A4	1 : 1	1 OF 5	
REV	1.0		

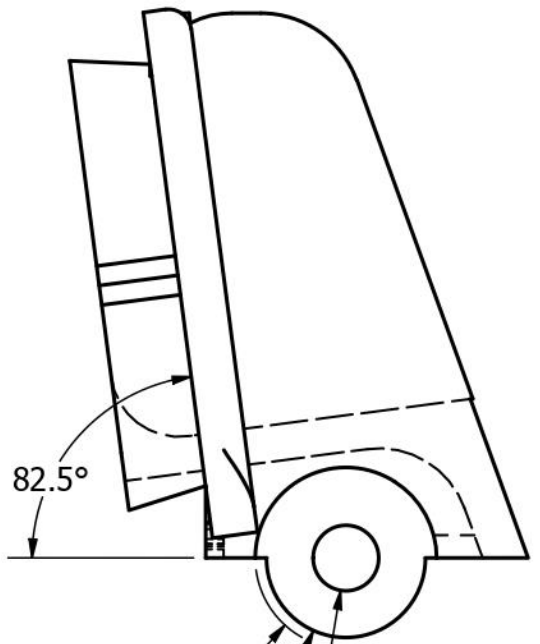


PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	A11a	Finger, 2-phalanx, hinged - lower
2	1	A11b	Finger, 2-phalanx, hinged - upper
3	1	A11c	Torsion spring (finger, hinged)
4	1	A2	Finger base
5	2	A3	Link, inner
6	1	A4	Link, outer, w/ limit switch
7	1	A5	Link outer, cover
8	1	A7	Limit switch, Omron D2HW-FL291D-A159-AQ1
9	2	A8	Finger skin
10	1	A9	Rod
11	2	DIN 7984 - M3 x 14	Cylinder Head Cap Screw
12	3	DIN 7984 - M3 x 18	Cylinder Head Cap Screw
13	1	DIN 7984 - M3 x 16	Cylinder Head Cap Screw
14	6	ISO 10511 - M3	Hex Nut
15	2	CNS 4560 - M1.6 x 10	Recessed Countersunk Head Screw
16	2	A6	DF9-40 Force Sensitive Resistor

DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL	MASS APPROX. 46.7 g	Finger, 2-phalanx, hinged - Assembly	
MANUFACTURING METHOD		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group	
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (A)	PART NO (Ac)
	SIZE A4	SCALE 1 / 2	REV 1.0
		SHEET 2 OF 5	



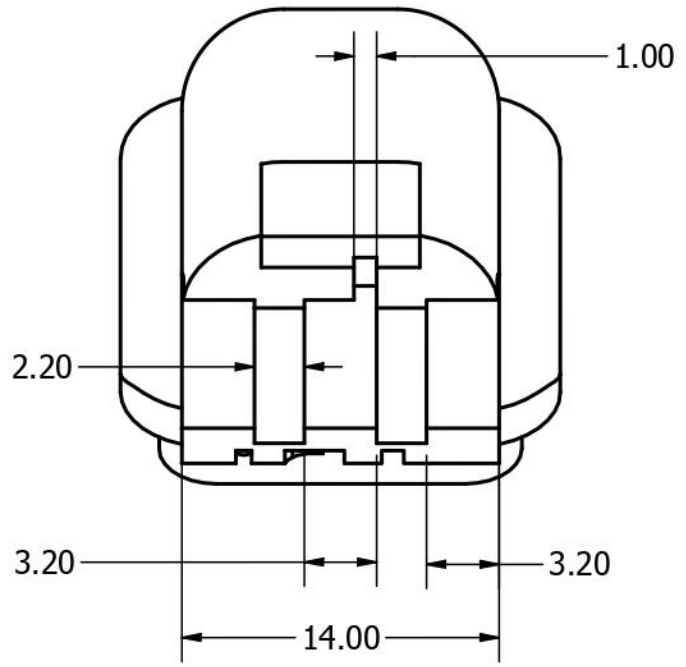
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL PLA Plastic	MASS APPROX. 10.1 g	Finger, 2-phalanx, hinged - lower		
MANUFACTURING METHOD 3D-printed		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group		
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (A)	PART NO A11a	REV 1.0
	SIZE A4	SCALE 2 : 1	SHEET 3 OF 5	



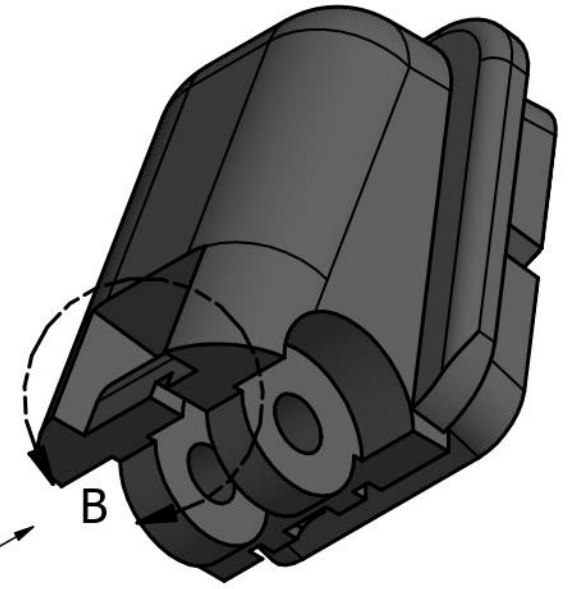
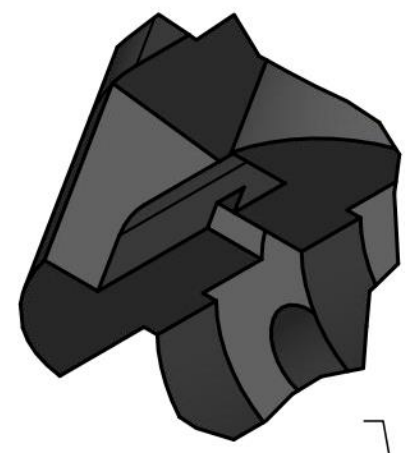
R4.00


R3.50

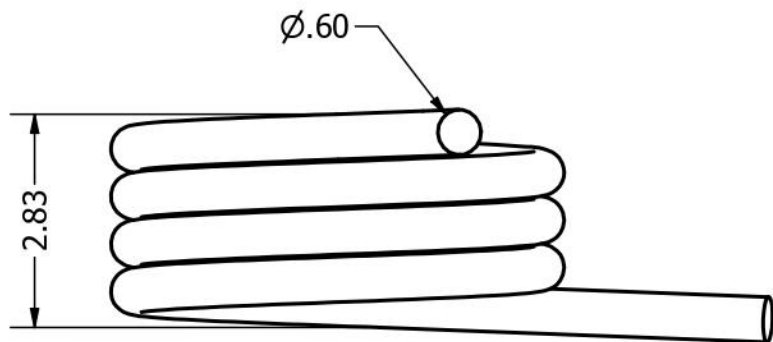
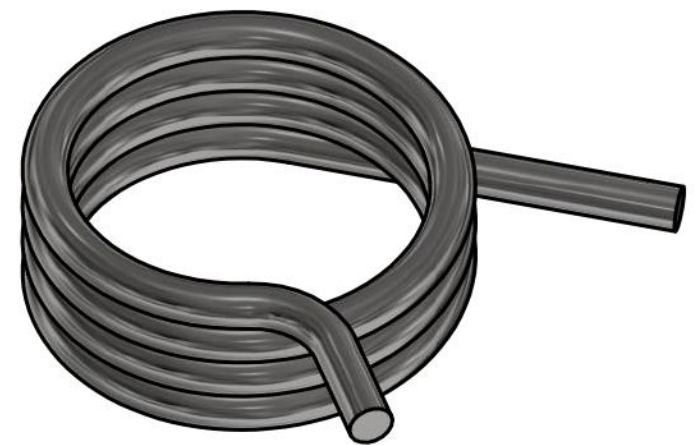
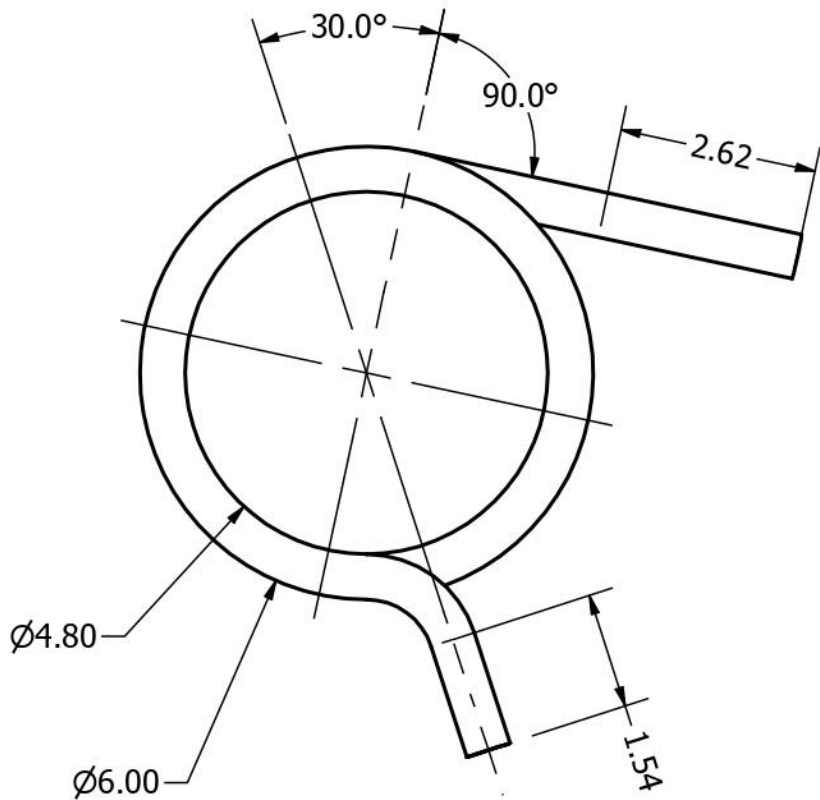
Ø2.90




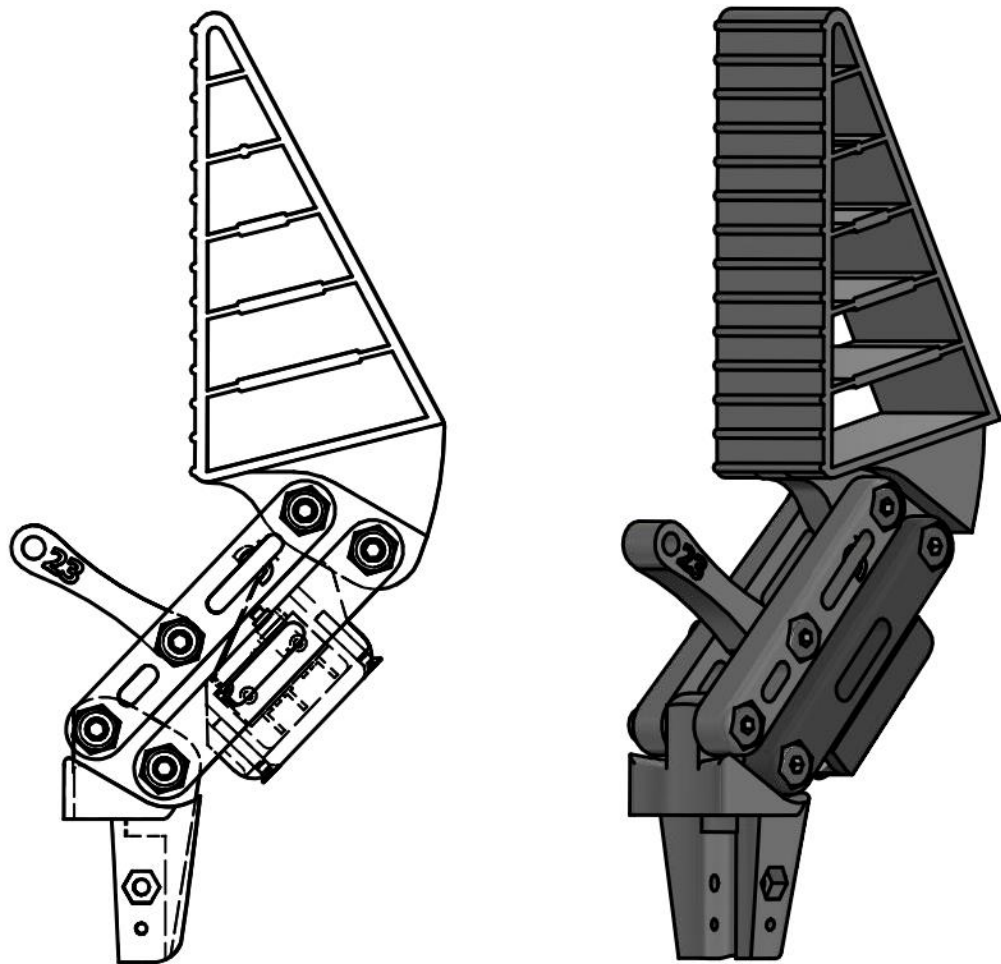
DETAIL B
SCALE 5 : 1




DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL PLA Plastic	MASS APPROX. 5.4 g	Finger, 2-phalanx, hinged - upper		
MANUFACTURING METHOD 3D-printed		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group		
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (A)	PART NO A11b	REV 1.0
	SIZE A4	SCALE 3 : 1	SHEET 4 OF 5	

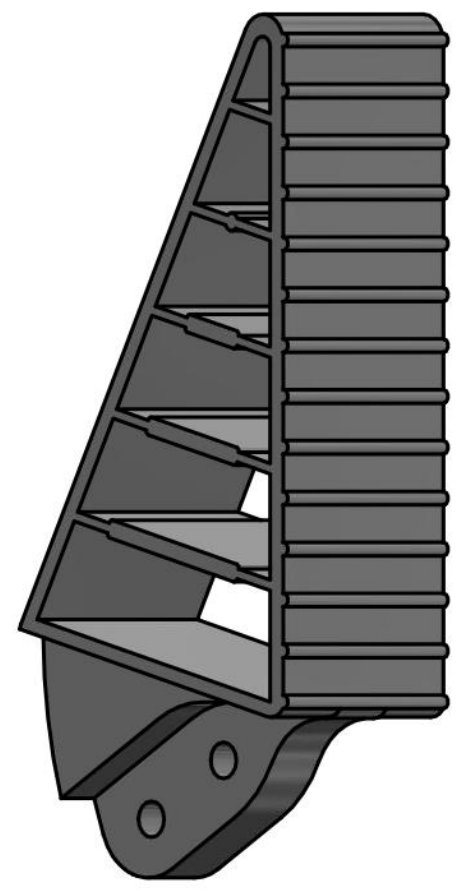
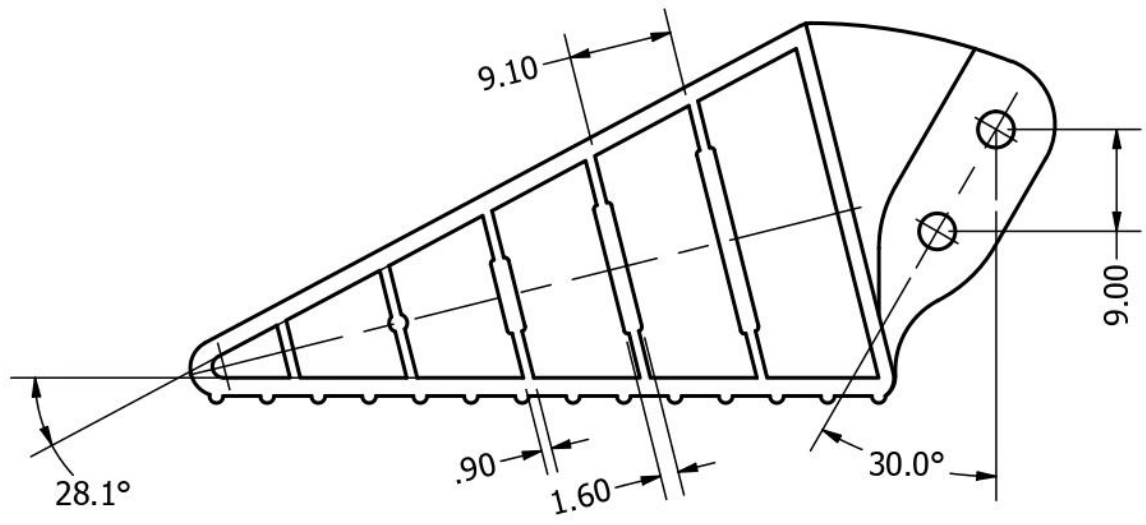



DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL Stainless Steel	MASS APPROX. 0.2 g	Torsion Spring (finger, hinged)		
MANUFACTURING METHOD		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group		
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (A)	PART NO A11c	REV 1.0
	SIZE A4	SCALE 10 : 1	SHEET 5 OF 5	



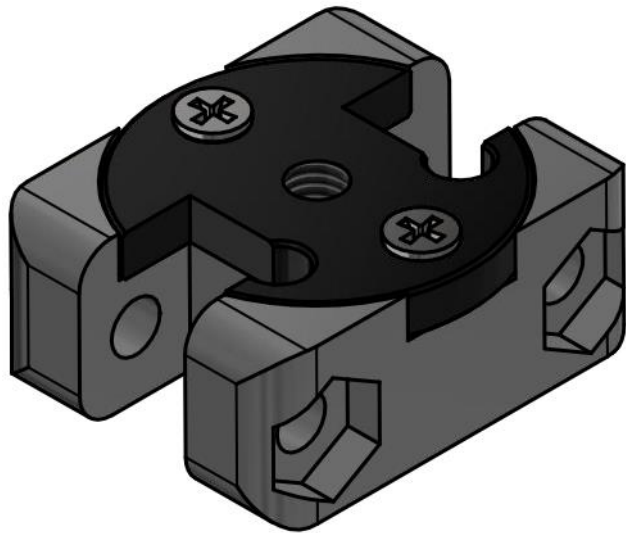
PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	A12	Finger, 1-phalanx, flexible (Finray)
2	1	A2	Finger base
3	2	A3	Link, inner
4	1	A4	Link, outer, w/ limit switch
5	1	A5	Link outer, cover
6	1	A7	Limit switch, Omron D2HW-FL291D-A159-AQ1
7	1	A9	Rod
8	2	DIN 7984 - M3 x 14	Cylinder Head Cap Screw
9	2	DIN 7984 - M3 x 18	Cylinder Head Cap Screw
10	1	DIN 7984 - M3 x 16	Cylinder Head Cap Screw
11	5	ISO 10511 - M3	Hex Nut
12	2	CNS 4560 - M1.6 x 10	Recessed Countersunk Head Screw

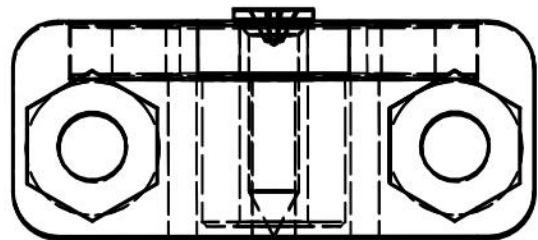
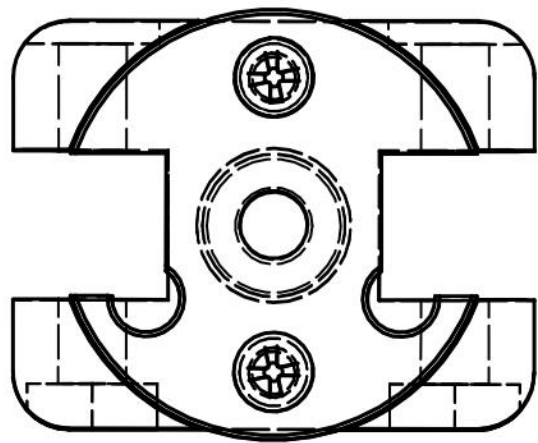
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL	MASS APPROX. 36.6 g	Finger, 1-phalanx, flexible - Assembly	
MANUFACTURING METHOD		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group	
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (A)	PART NO (Ad)
	REV 1.0	SCALE 1 : 1	SHEET 1 OF 2
SIZE A4			



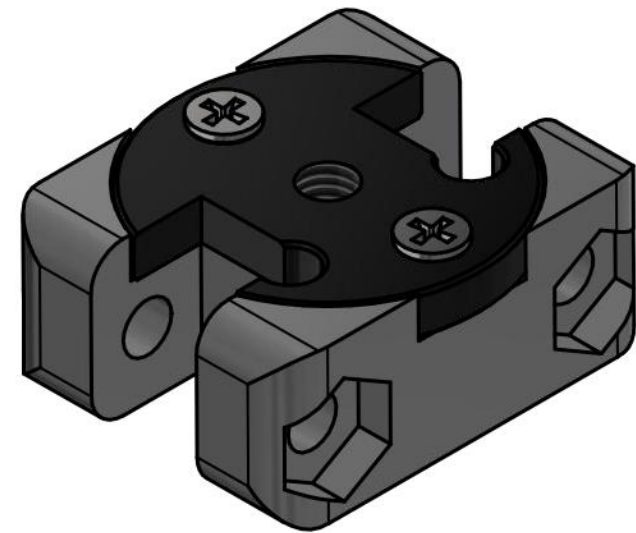
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL TPU plastic	MASS APPROX. 12.1 g	Finger, 1-phalanx, flexible	
MANUFACTURING METHOD 3D-printed		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group	
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (A)	PART NO A12
	REV 1.0	SHEET	
SIZE A4	SCALE 1.5 : 1	2 OF 2	


(B) - Rod Link assembly

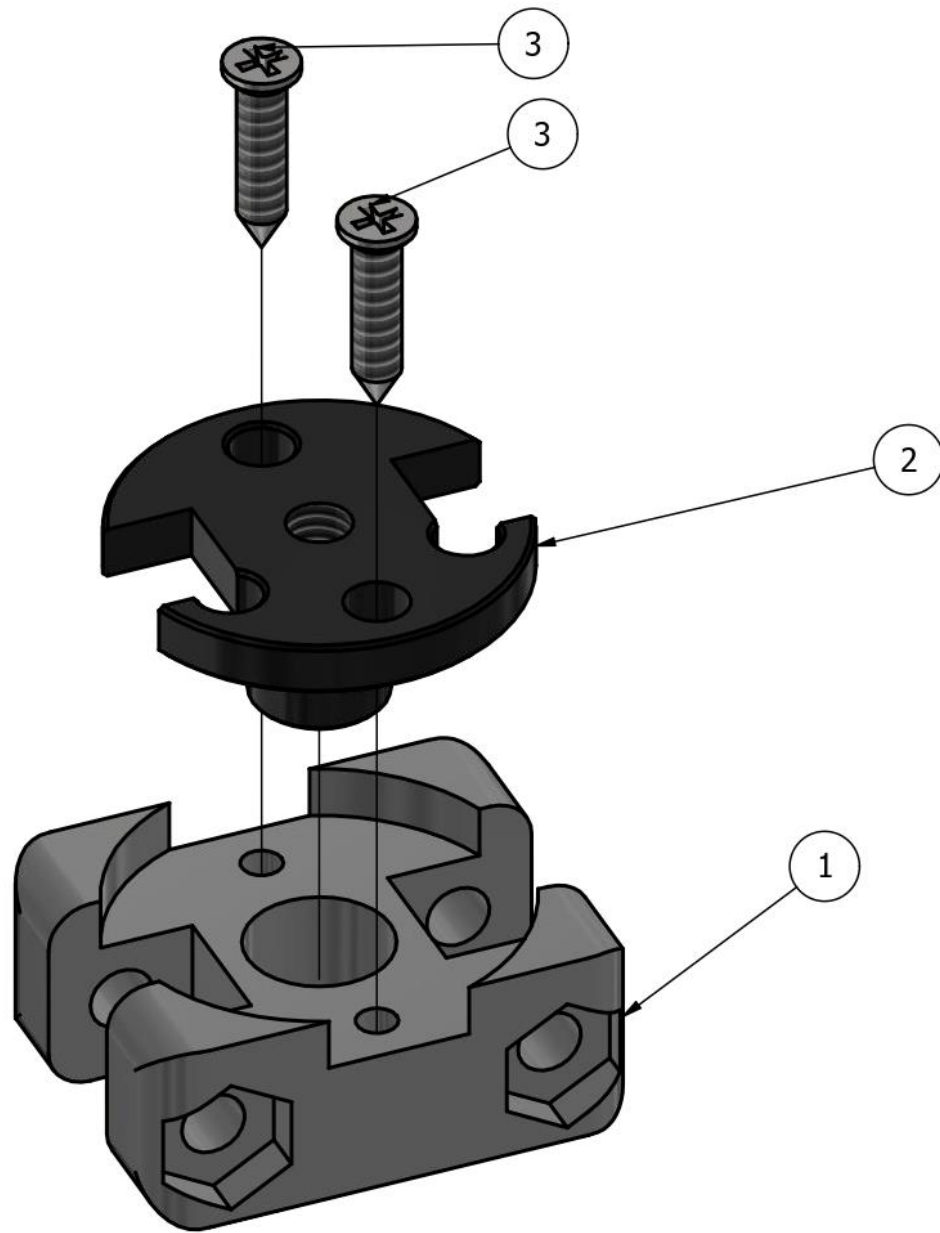




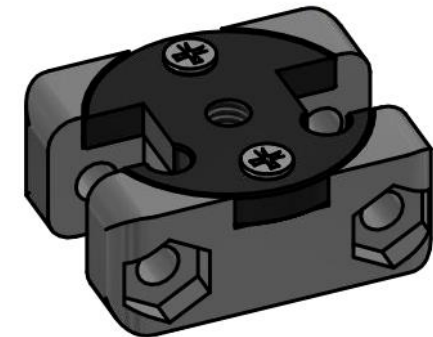
PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	B1	Rod link, dual
2	1	B2	Trapezoidal nut, TR3.5x2.4mm
3	2	ANSI B18.6.5M - 2.2 x 0.8 x 10 - AB - I	Cross Recessed Flat Countersunk Head Tapping Screw Type AB - Type I




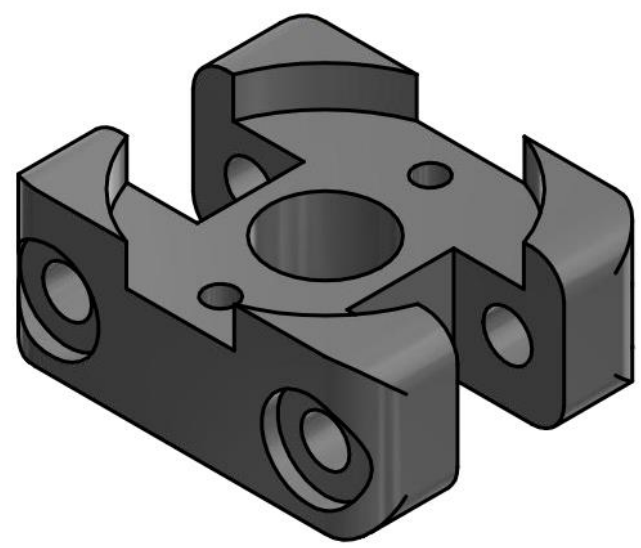
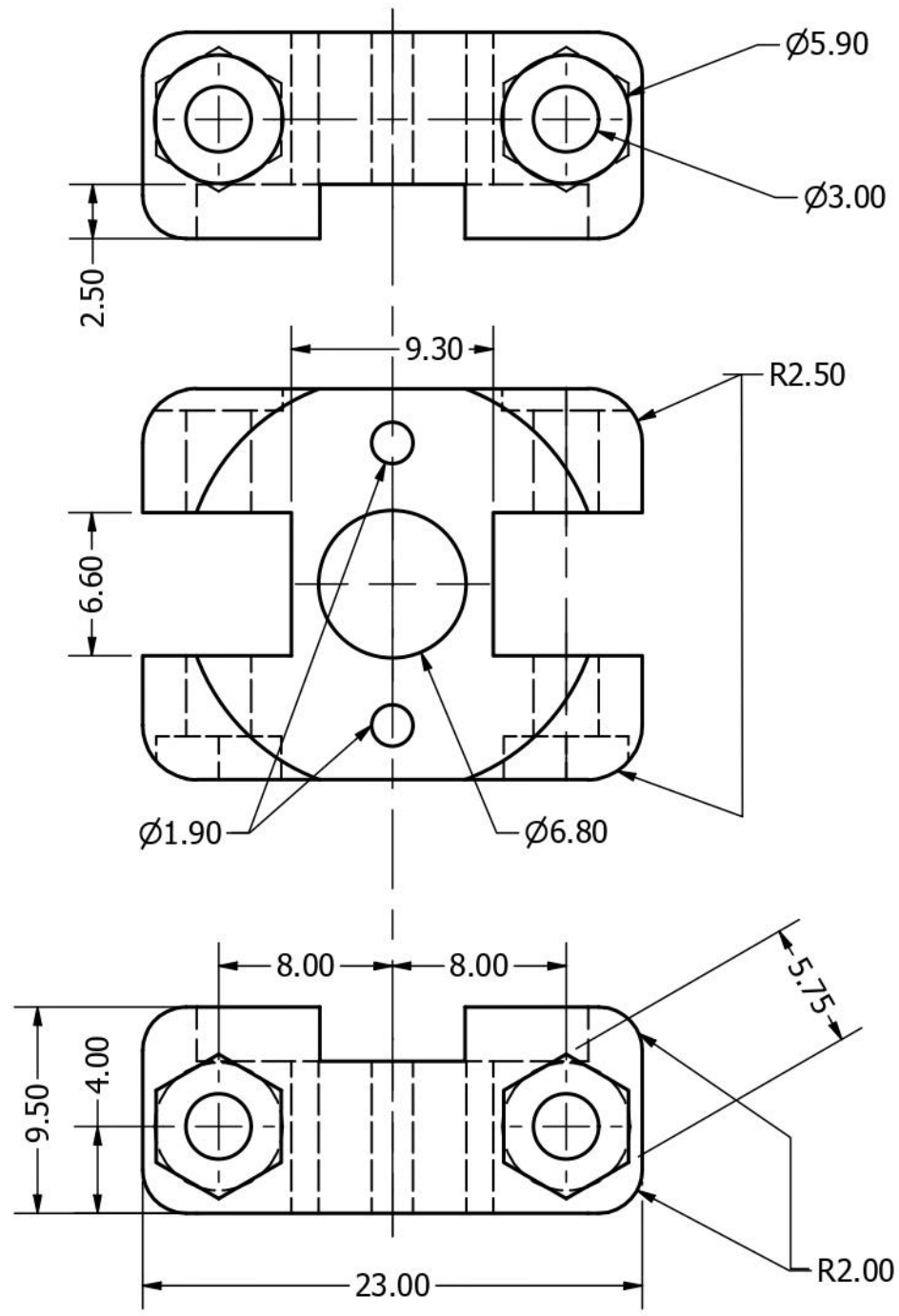
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL	MASS APPROX. 3.8 g	Rod link - Assembly	
MANUFACTURING METHOD		Control Systems Lab - NTUA <i>Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group</i>	
	PROJECT UndEE	ASSEMBLY PART NO (B)	
	SIZE A4	SCALE 3 : 1	REV 1.0
June 2020		SHEET 1 OF 4	



PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	B1	Rod link, dual
2	1	B2	Trapezoidal nut, TR3.5x2.4mm
3	2	ANSI B18.6.5M - 2.2 x 0.8 x 10 - AB - I	Cross Recessed Flat Countersunk Head Tapping Screw Type AB - Type I



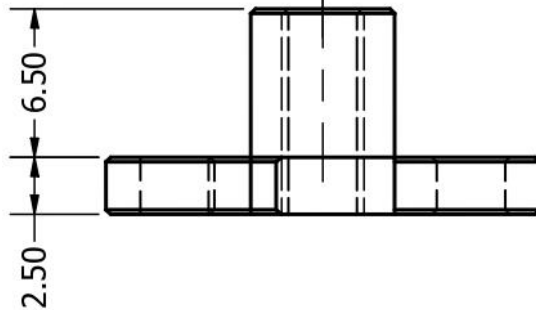
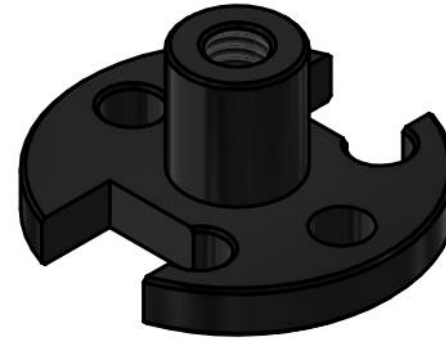
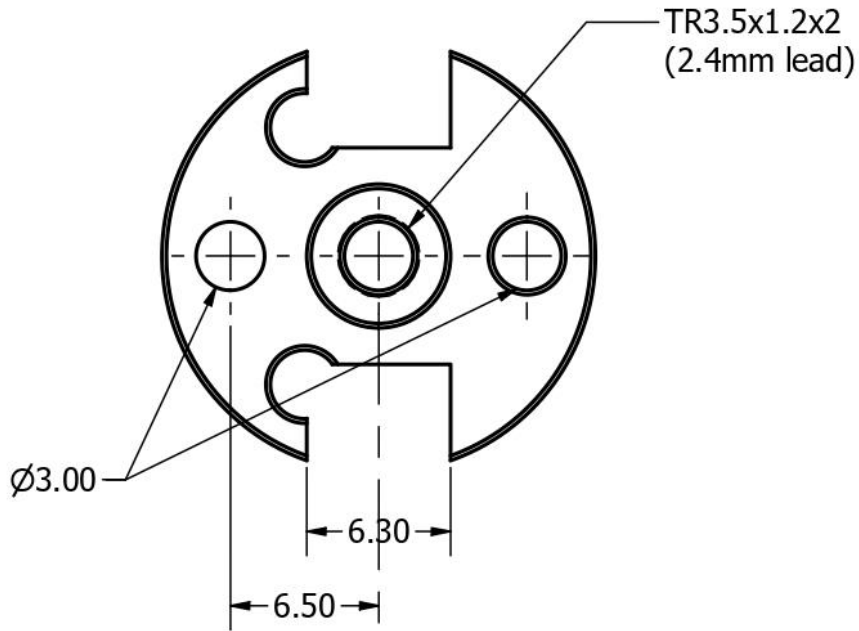
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL	MASS APPROX. 3.8 g	Rod link - Assembly	
MANUFACTURING METHOD		----- Control Systems Lab - NTUA <i>Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group</i> -----	
	PROJECT UndEE	ASSEMBLY PART NO (B)	REV 1.0
	June 2020	SIZE A4	SCALE 3 : 1



DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL PLA Plastic		MASS APPROX. 2.3 g	
MANUFACTURING METHOD 3D-printed		Rod link, dual	
Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group			
PROJECT UndEE	ASSEMBLY (B)	PART NO B1	REV 1.0
SIZE A4	SCALE 3 : 1	SHEET 3 OF 4	



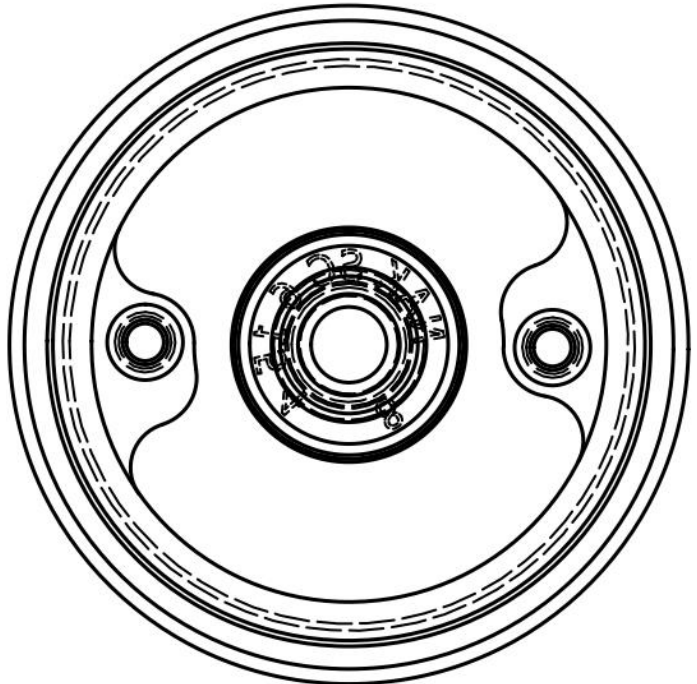
June 2020



DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL Acetal Resin, Black	MASS APPROX. 0.9 g	Trapezoidal nut, TR3.5x2.4mm	
MANUFACTURING METHOD Standardized		Control Systems Lab - NTUA <i>Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group</i>	
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (B)	PART NO B2
	REV 1.0		
SIZE A4	SCALE 3 : 1	SHEET 4 OF 4	


(C) - Casing Top Plug assembly





PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	C1	Plug, casing, top
2	2	CE2	O-ring 37x1.5, NBR
3	1	C3	Radial shaft seal, 6x15x4, NBR WA
4	2	Nut GB 809 A M3 x 6	Insert round nuts

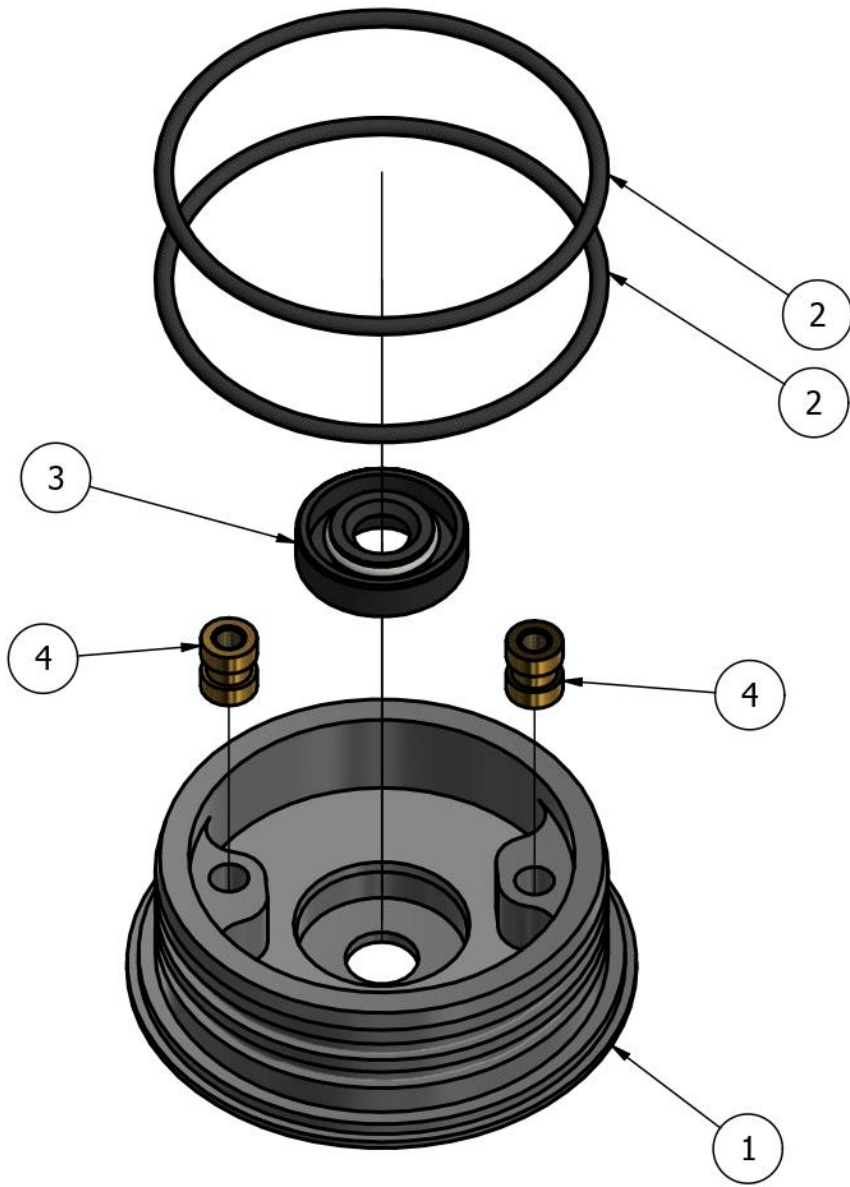



DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL	MASS APPROX. 15.6 g	Plug casing, top - Assembly	
MANUFACTURING METHOD		----- Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group -----	
	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (C)	
	SIZE A4	SCALE 2 : 1	PART NO REV 1.0
June 2020		SHEET 1 OF 5	

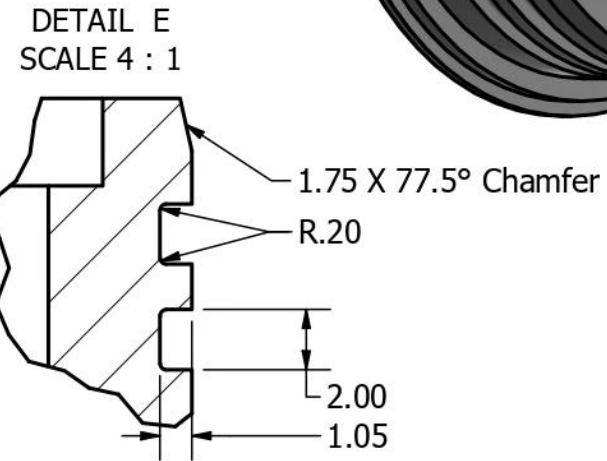
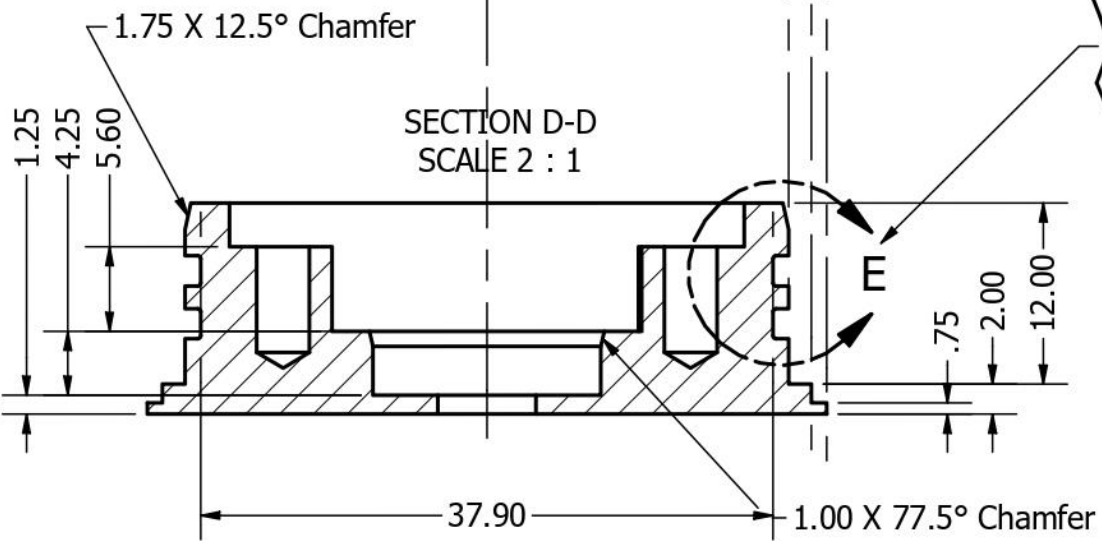
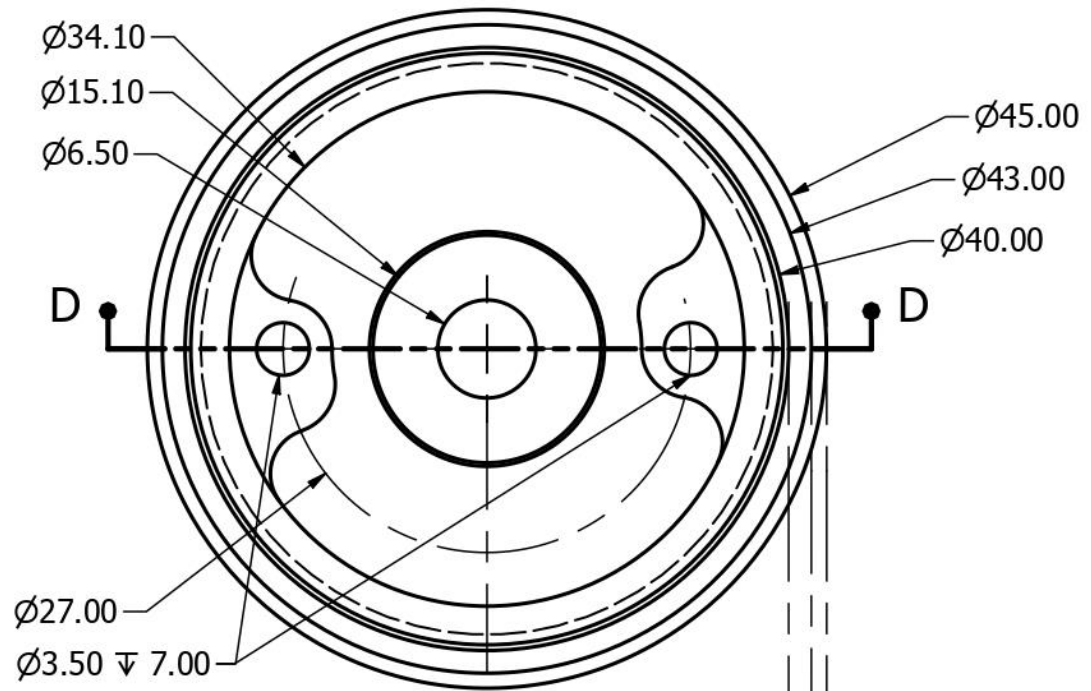
PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	C1	Plug, casing, top
2	2	CE2	O-ring 37x1.5, NBR
3	1	C3	Radial shaft seal, 6x15x4, NBR WA
4	2	Nut GB 809 A M3 x 6	Insert round nuts


Assembly Notes:

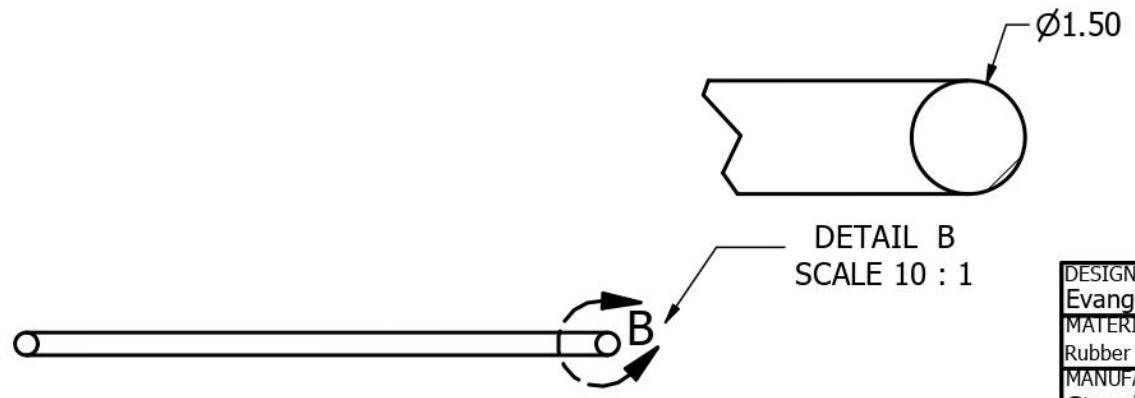
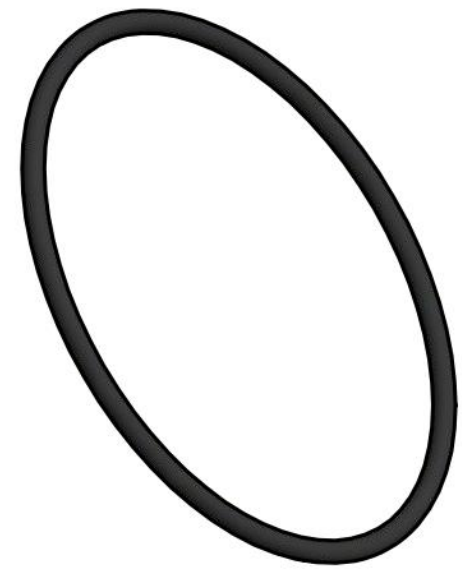
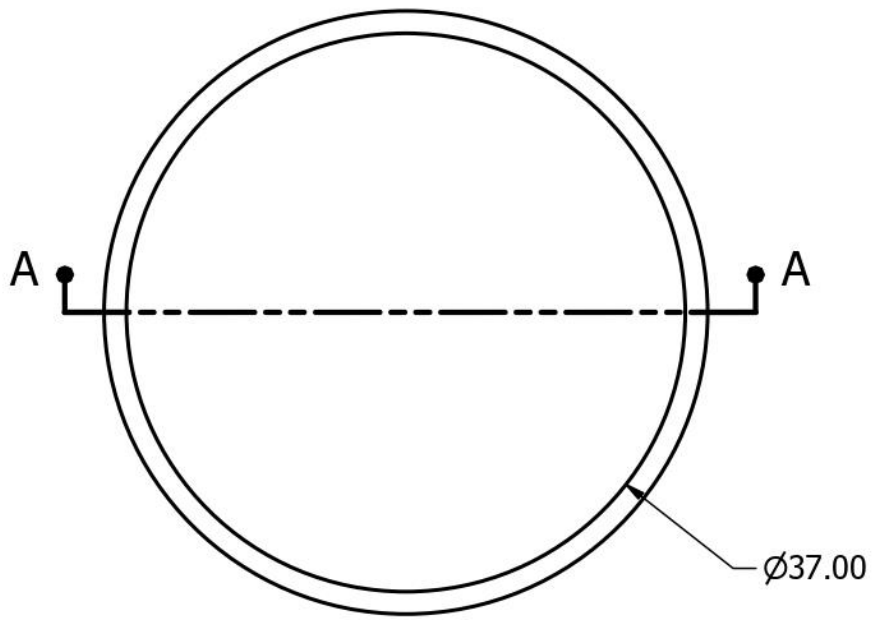
- Apply silicone lubricant to parts [CE2], [C3]
- Heat-press parts [4] into holes of part [C1]
- Pay attention not to twist or overstretch parts [CE2] during assembly




DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL	MASS APPROX. 15.6 g	Plug casing, top - Assembly		
MANUFACTURING METHOD		----- Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group -----		
	June 2020	PROJECT	ASSEMBLY PART NO	REV
		UndEE	(C)	1.0
SIZE	SCALE	SHEET		
A4	1.5 : 1	2 OF 5		

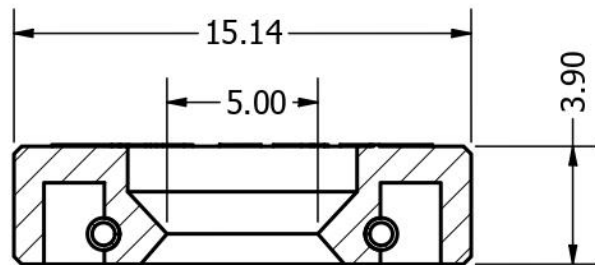


DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL Acetal Resin, Black	MASS APPROX. 13.6 g	Plug casing, top	
MANUFACTURING METHOD CNC-milled		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group	
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (C)	PART NO C1
	REV 1.0	SHEET	
SIZE A4	SCALE 2 : 1	3 OF 5	




SECTION A-A
SCALE 2 : 1

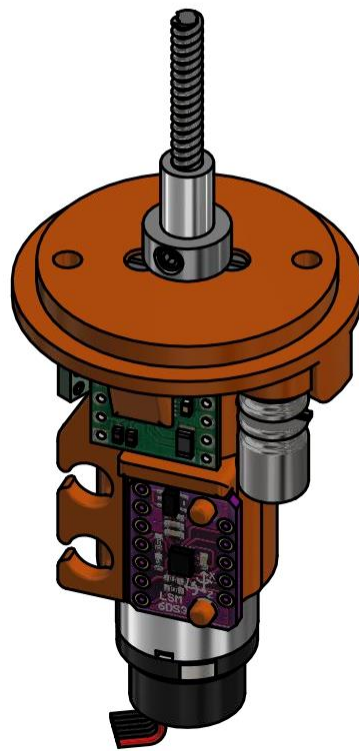
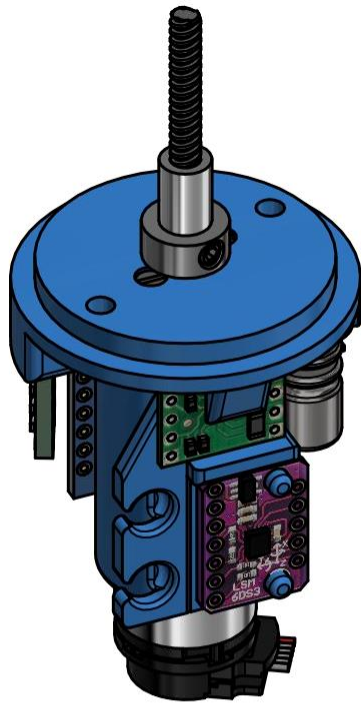
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE			
MATERIAL Rubber	MASS APPROX. 0.2 g	O-ring 37x1.5 NBR			
MANUFACTURING METHOD Standardized		Control Systems Lab - NTUA <i>Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group</i>			
	June 2020	PROJECT	ASSEMBLY	PART NO	REV
		UndEE	(CE)	CE2	1.0
SIZE A4	SCALE 2 : 1	SHEET		4 OF 5	

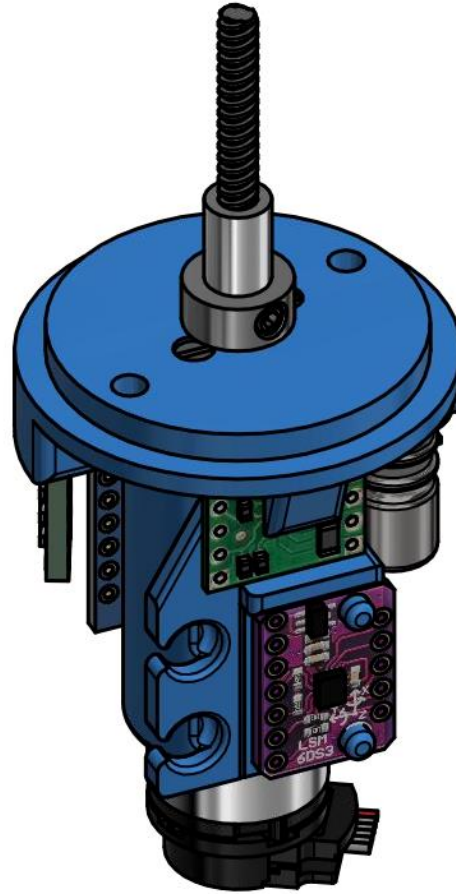
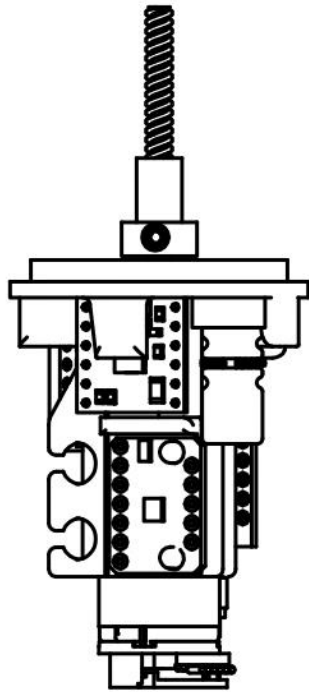


SECTION C-C
SCALE 4 : 1


DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE			
MATERIAL Rubber	MASS APPROX. 0.3 g	Radial Shaft Seal, 6x15x4, NBR			
MANUFACTURING METHOD Standardized		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group			
	June 2020	PROJECT	ASSEMBLY	PART NO	REV
		UndEE	(C)	C3	1.0
SIZE A4	SCALE 4 : 1	SHEET		5 OF 5	

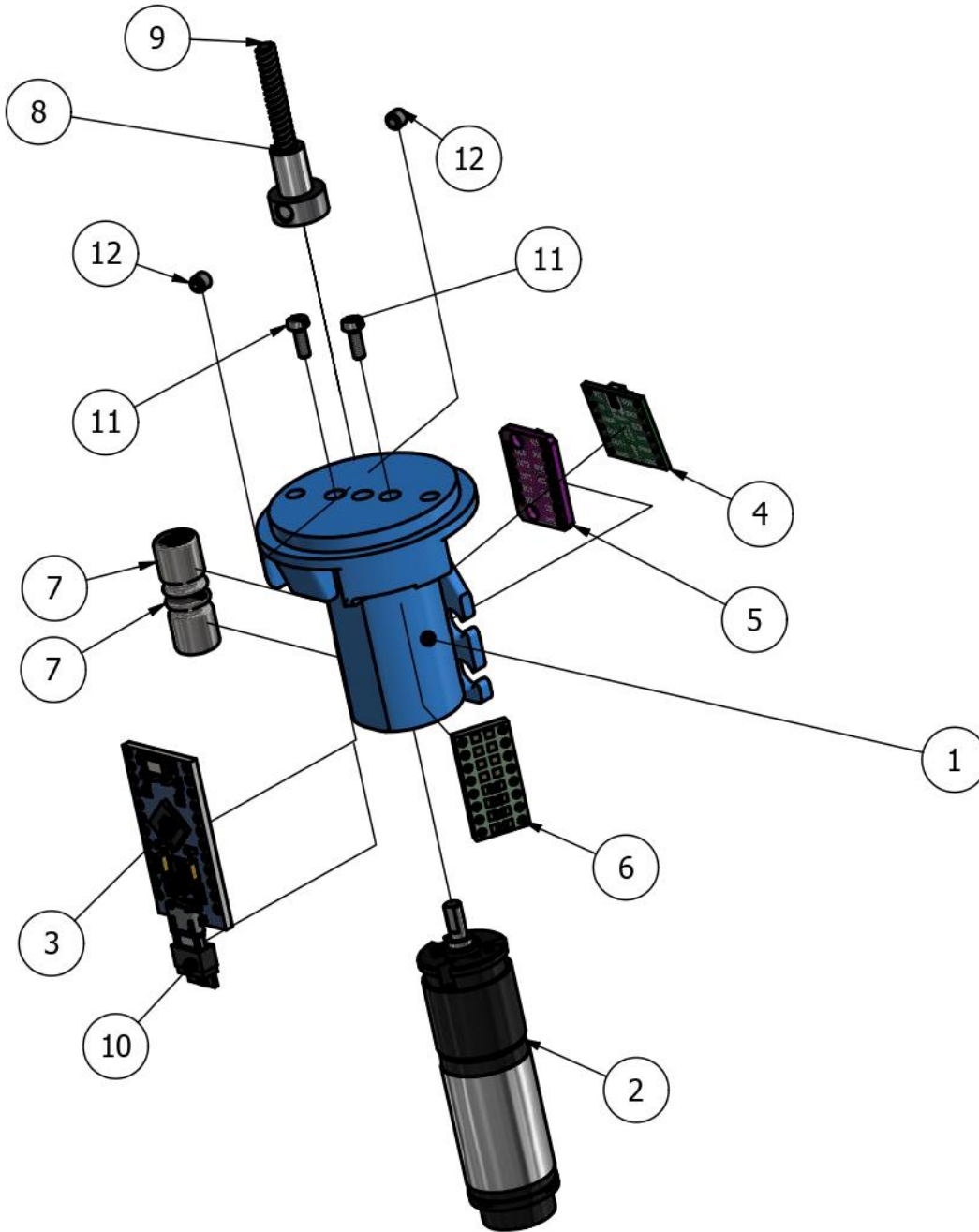
(D) - Motor Casing assemblies



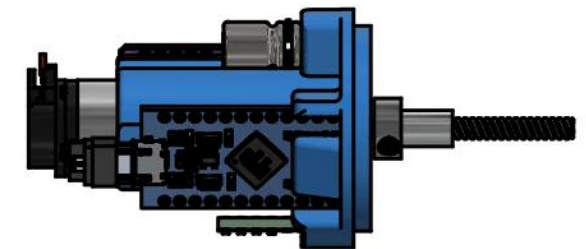



PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	D1	Motor casing (Escap 16)
2	1	D2	DC motor, Portescap 16G88-214E, B16 Gearhead 27:1, 8V, 5W
3	1	D3	Arduino Pro Micro (ATmega 32U4)
4	1	D4	DRV8801, Single brushed DC motor driver carrier
5	1	D5	LSM6DS3, 6DOF IMU, breakout board
6	1	D6	R-divider board (4x10kΩ) - Assembly
7	2	D7	Capacitor, 330uF-25V, Aluminium, High-ESR, SMD
8	1	D8	Shaft coupler, d6 x D10 x L15
9	1	D9	Lead screw, TR3.5x2.4, L27mm
10	1		USB 2.0 Micro connector, male
11	2	AS 1427 - M2 x 6(2)	ISO metric machine screws
12	2	BS 4168 - M3 x 3(4)	Hexagon socket screws and wrench keys, metric series- Specification for hexagon set screws with flat point

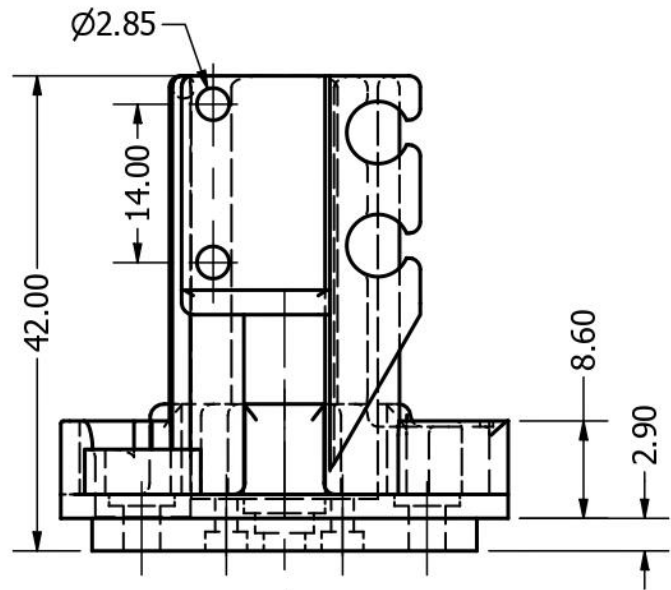
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL	MASS APPROX. 55.2 g	Motor casing (Escap 16) - Assembly	
MANUFACTURING METHOD		----- Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group -----	
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (D)	PART NO (Da)
	SIZE A4	SCALE 1 : 1	REV 1.0
		SHEET 1 OF 11	



PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	D1	Motor casing (Escap 16)
2	1	D2	DC motor, Portescap 16G88-214E, B16 Gearhead 27:1, 8V, 5W
3	1	D3	Arduino Pro Micro (ATmega 32U4)
4	1	D4	DRV8801, Single brushed DC motor driver carrier
5	1	D5	LSM6DS3, 6DOF IMU, breakout board
6	1	D6	R-divider board (4x10kΩ) - Assembly
7	2	D7	Capacitor, 330uF-25V, Aluminium, High-ESR, SMD
8	1	D8	Shaft coupler, d6 x D10 x L15
9	1	D9	Lead screw, TR3.5x2.4, L27mm
10	1		USB 2.0 Micro connector, male
11	2	AS 1427 - M2 x 6(2)	ISO metric machine screws
12	2	BS 4168 - M3 x 3(4)	Hexagon socket screws and wrench keys, metric series- Specification for hexagon set screws with flat point



DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE			
MATERIAL	MASS APPROX. 55.2 g	Motor casing (Escap 16) - Assembly			
MANUFACTURING METHOD		----- Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group -----			
	June 2020	PROJECT	ASSEMBLY	PART NO	REV
		UndEE	(D)	(Da)	1.0
SIZE	SCALE	SHEET			
A4	4 / 5	2 OF 11			



$\text{Ø}2.00$ THRU
 $\text{Ø}3.70 \nabla 1.70$

$\text{Ø}3.25$ THRU
 $\text{Ø}5.80 \nabla 1.00$

$\text{Ø}11.00$

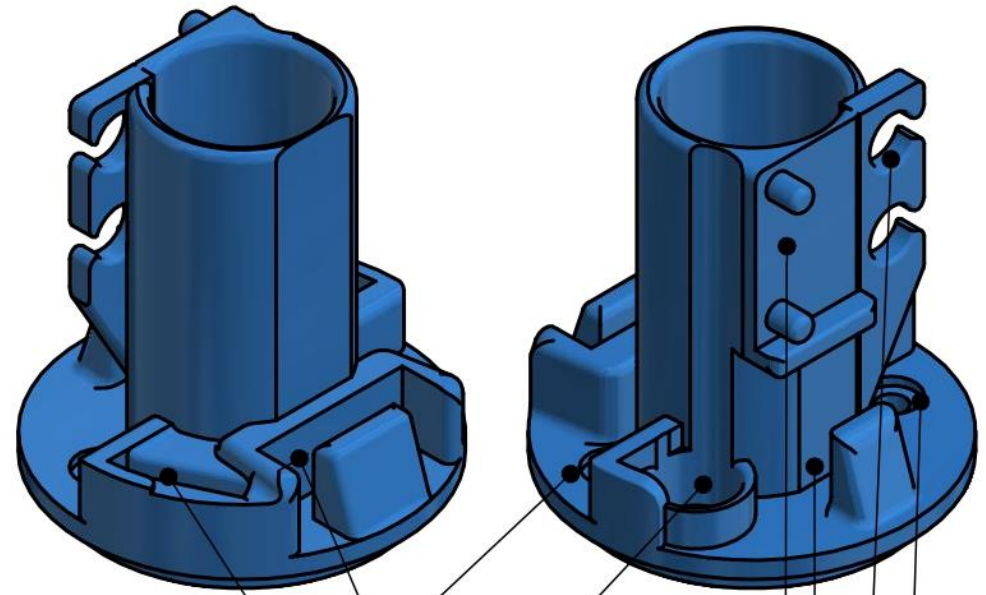
$\text{Ø}27.00$

$\text{Ø}7.15 \nabla 1.25$

$\text{Ø}5.20 \nabla 3.00$

$\text{Ø}8.40$

$\text{Ø}3.65 \nabla 5.00$



Cap 330uF-25V (2x)

LSM6DS3 6-DOF IMU


DRV8801 motor driver

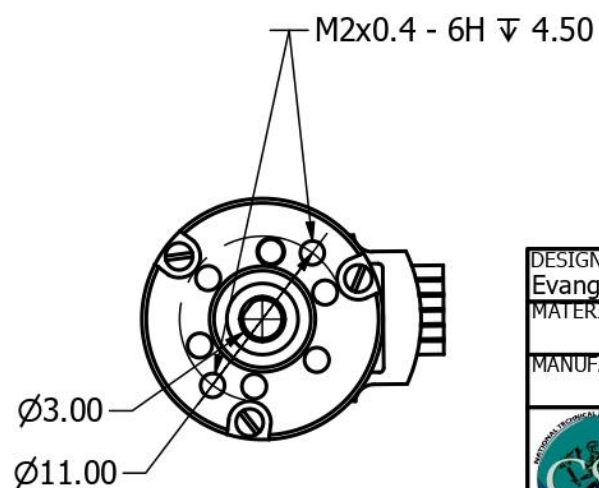
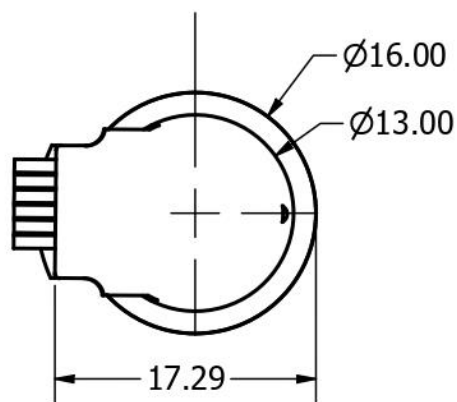
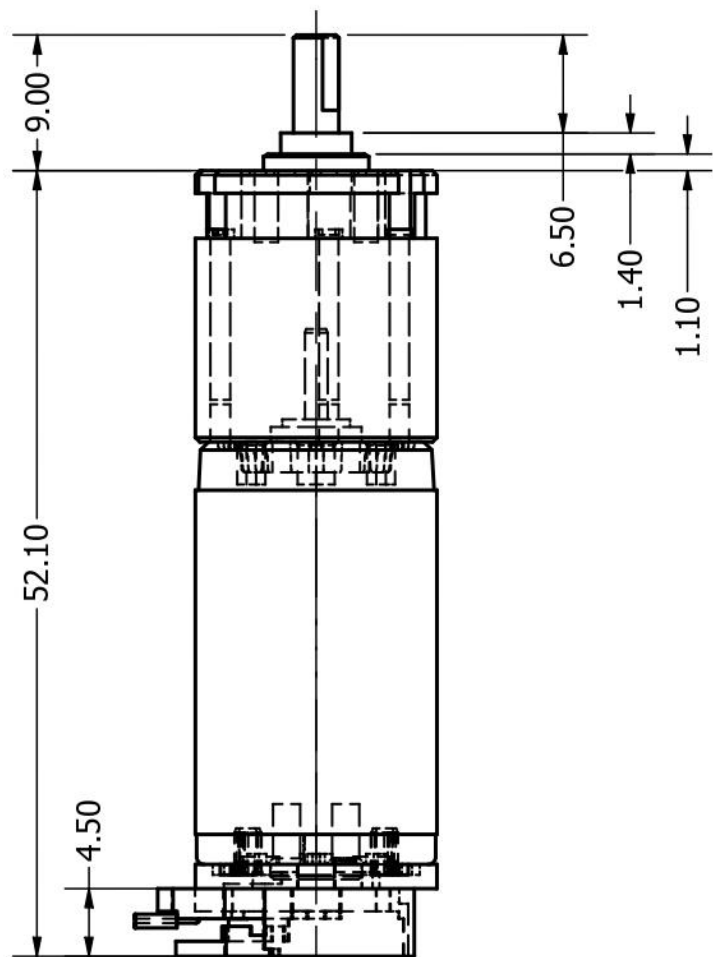
Arduino Pro Micro


R-divider board

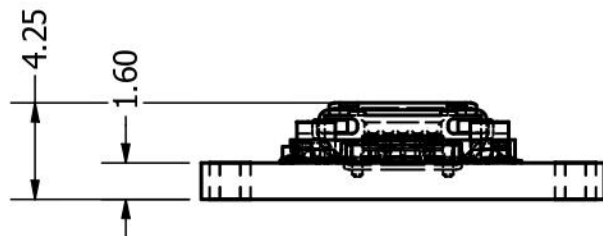
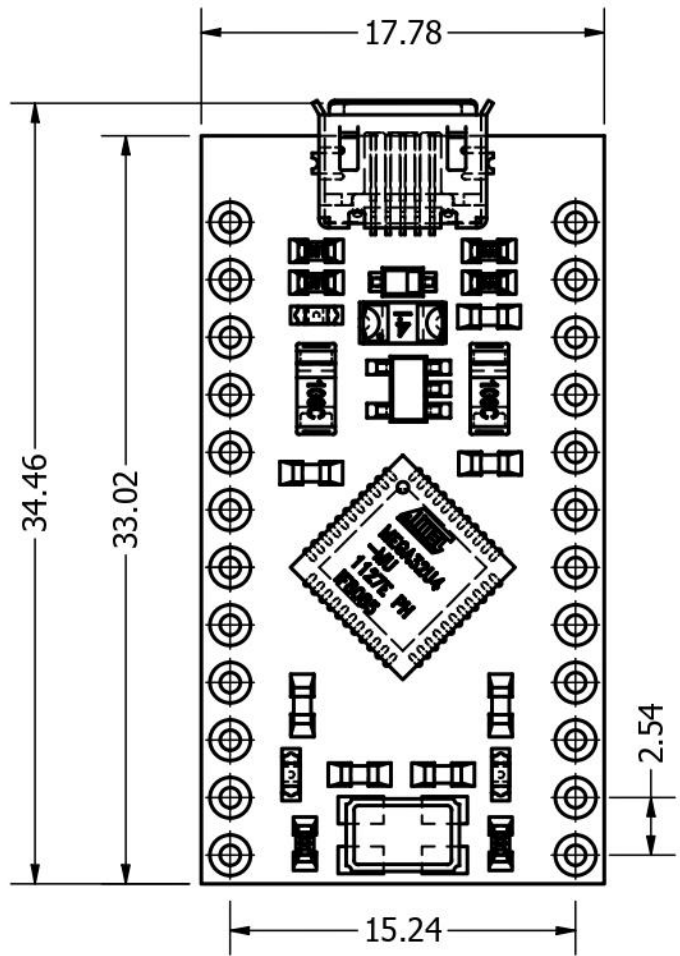
Cable management


Top-plug mounting bolts

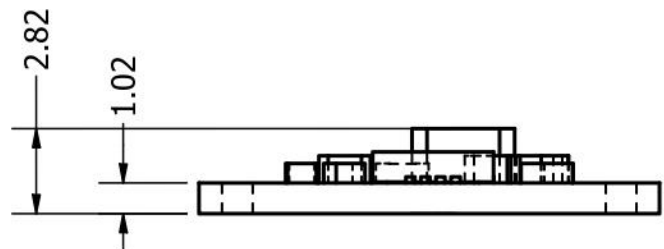
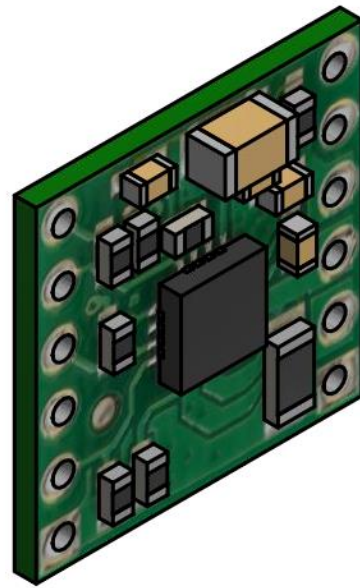
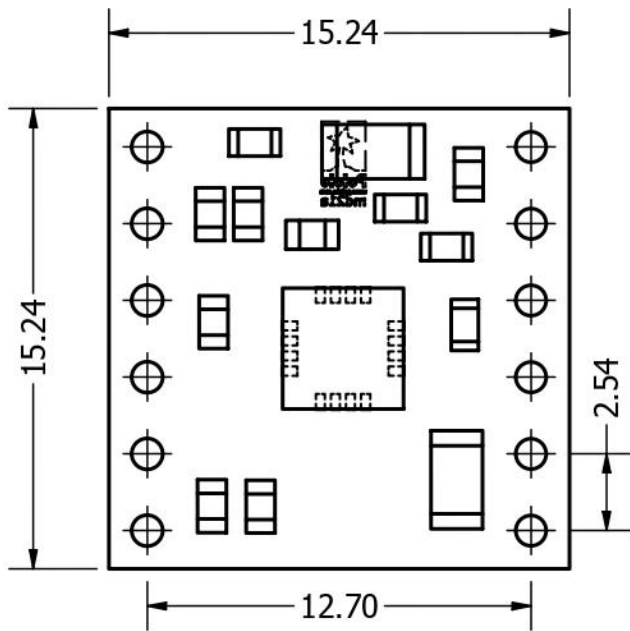
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL PLA Plastic	MASS APPROX. 13.7 g	Motor casing (Escap 16)	
MANUFACTURING METHOD 3D-printed		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group	
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (D)	PART NO D1
	REV 1.0		
SIZE A4	SCALE 1.5 : 1	SHEET 3 OF 11	




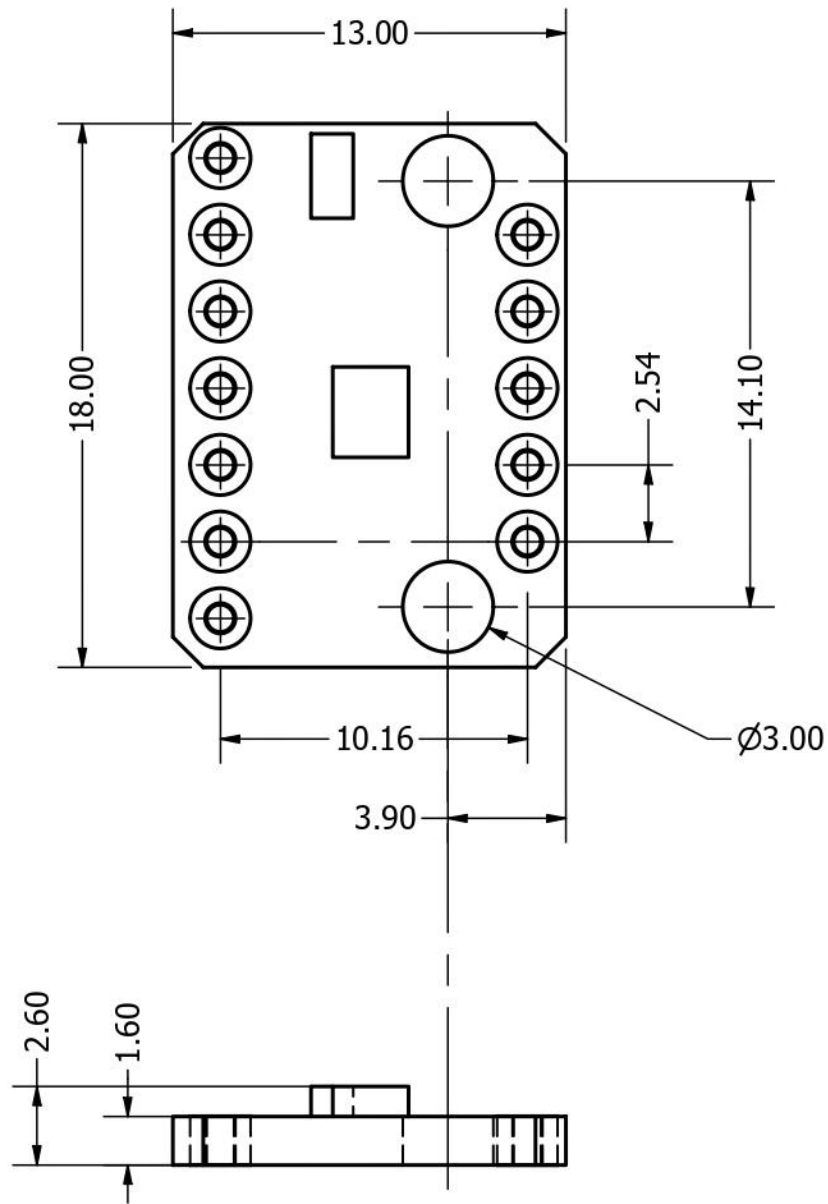
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL	MASS APPROX. 35.2 g	DC motor, Portescap 16G88-214E, B16 Gearhead 27:1, 8V, 5W		
MANUFACTURING METHOD		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group		
	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (D)	PART NO D2	REV 1.0
	SIZE A4	SCALE 2 : 1	SHEET 4 OF 11	
June 2020				




DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL Fiberglass Batt	MASS APPROX. 0.0 g	Arduino Pro Micro (ATmega 32U4)		
MANUFACTURING METHOD		Control Systems Lab - NTUA <i>Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group</i>		
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (D)	PART NO D3	REV 1.0
	SIZE A4	SCALE 3 : 1	SHEET 5 OF 11	



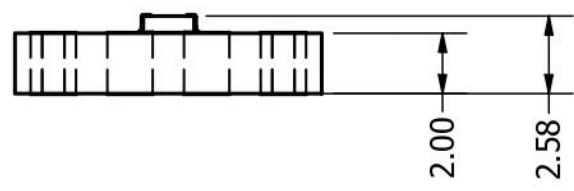
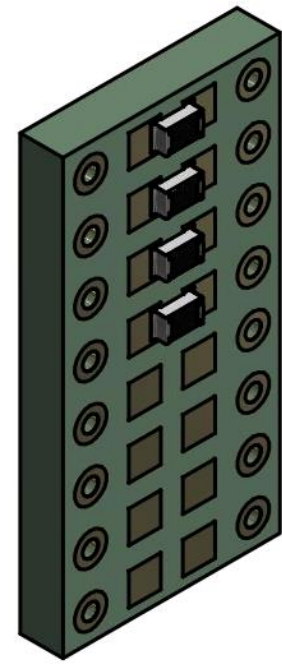
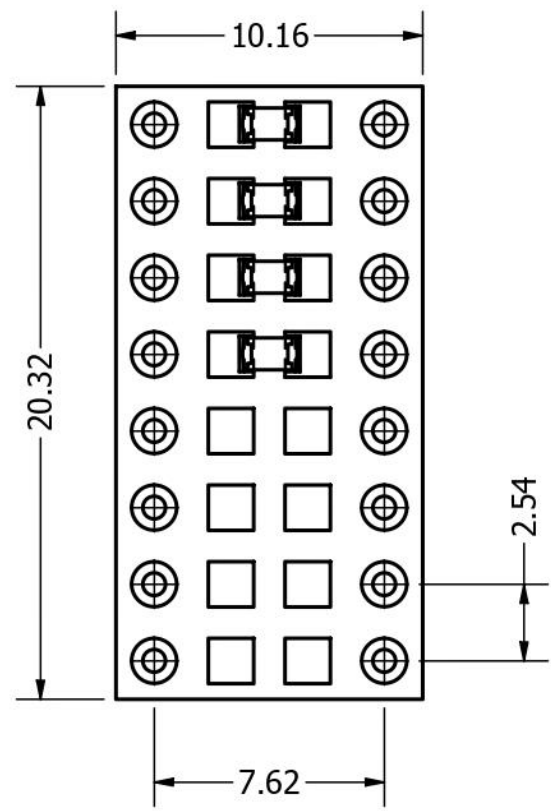
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE DRV8801, Single brushed DC motor driver carrier		
MATERIAL Phenolic Resin	MASS APPROX. 0.4 g	Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group		
MANUFACTURING METHOD		PROJECT UndEE	ASSEMBLY (D)	PART NO D4
 June 2020	SIZE A4	SCALE 4 : 1	REV 1.0	
	SHEET 6 OF 11			



DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL Phenolic Resin		MASS APPROX. 0.5 g	LSM6DS3, 6DOF IMU, breakout board	
MANUFACTURING METHOD		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group		
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (D)	PART NO D5	REV 1.0
	SIZE A4	SCALE 4 : 1	SHEET 7 OF 11	

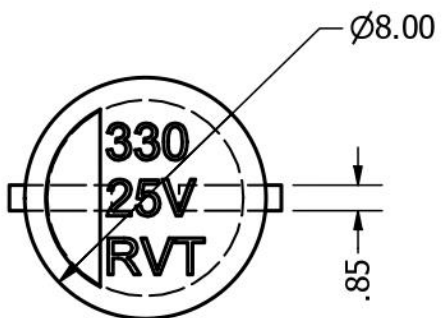
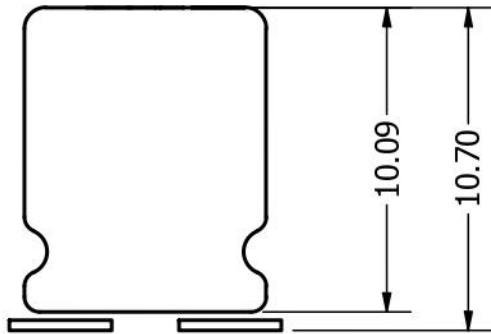
PARTS LIST


ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	4	D6a	Resistor, SMD 0805 (2013), 10kΩ
2	1	D6b	SMT 0805 to DIP converter board

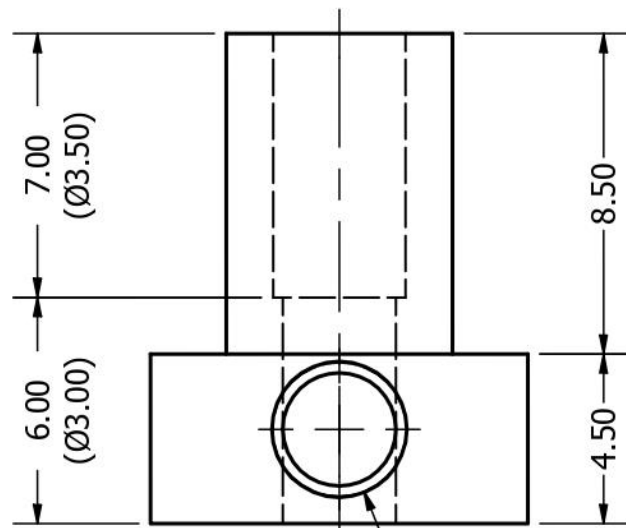


DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas	
MATERIAL	MASS APPROX. 0.7 g
MANUFACTURING METHOD	
 June 2020	

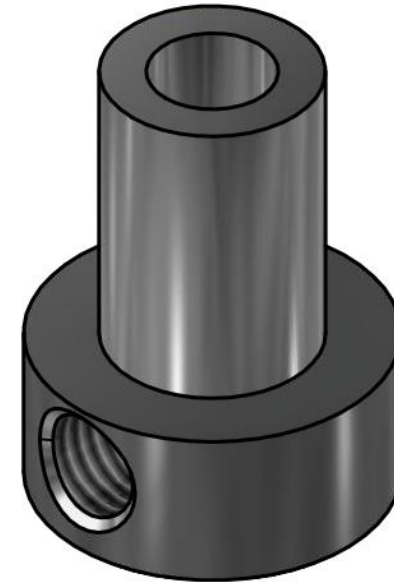
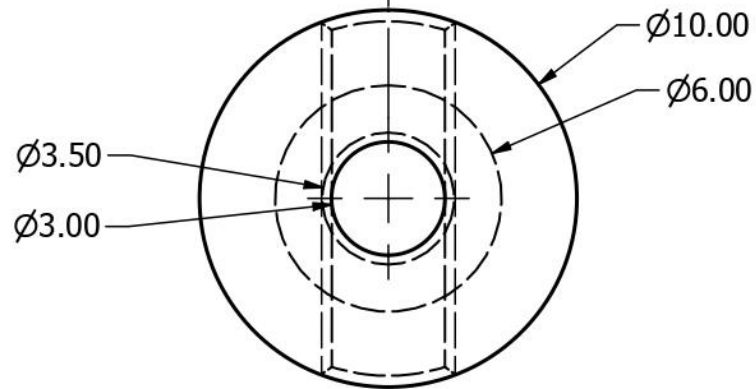
TITLE			
R-divider board (4x10kΩ) - Assembly			
----- Control Systems Lab - NTUA			
Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group -----			
PROJECT	ASSEMBLY	PART NO	REV
UndEE	(D)	D6	1.0
SIZE	SCALE	SHEET	
A4	4 : 1	8 OF 11	




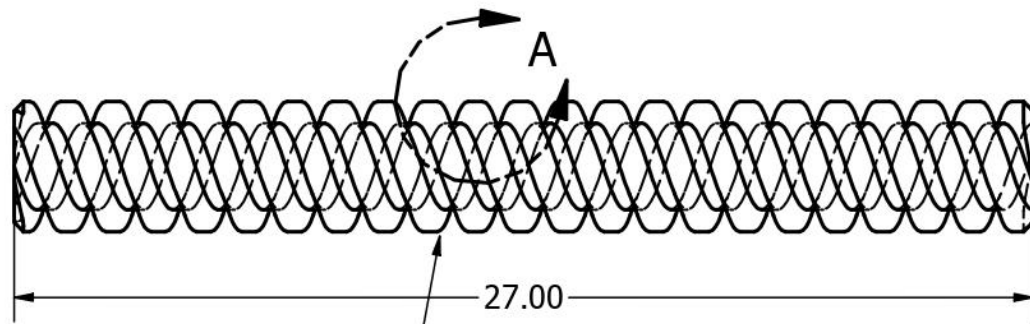
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL Generic	MASS APPROX. 0.5 g	Capacitor, 330uF-25V, High-ESR, SMD	
MANUFACTURING METHOD		Control Systems Lab - NTUA <i>Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group</i>	
 June 2020	PROJECT	ASSEMBLY (D)	PART NO D7
	REV 1.0	SIZE A4	SCALE 4 : 1
		SHEET 9 OF 11	



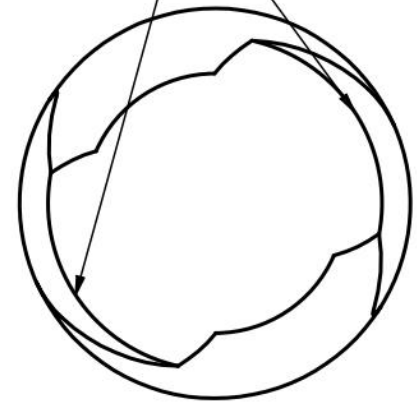
M3x0.5 - 6H



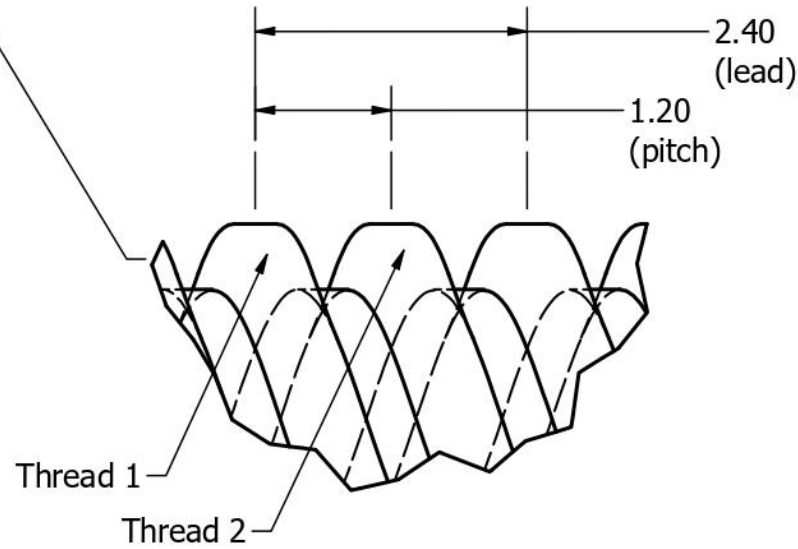
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL Aluminum	MASS APPROX. 1.2 g	Shaft coupler, d6 x D10 x L15	
MANUFACTURING METHOD Lathe-turned		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group	
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (D)	PART NO D8
	REV 1.0	SHEET	
SIZE A4	SCALE 5 : 1	10 OF 11	




Double thread

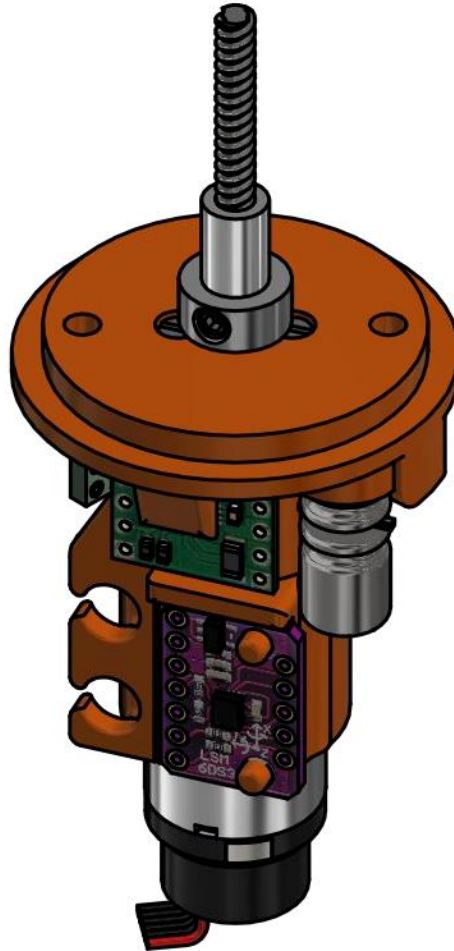
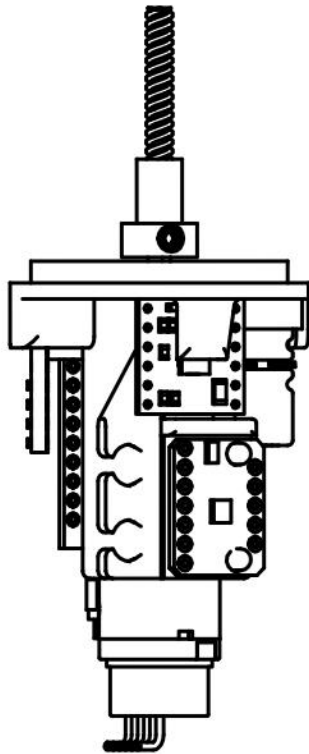


SCALE 15 : 1




DETAIL A
SCALE 15 : 1

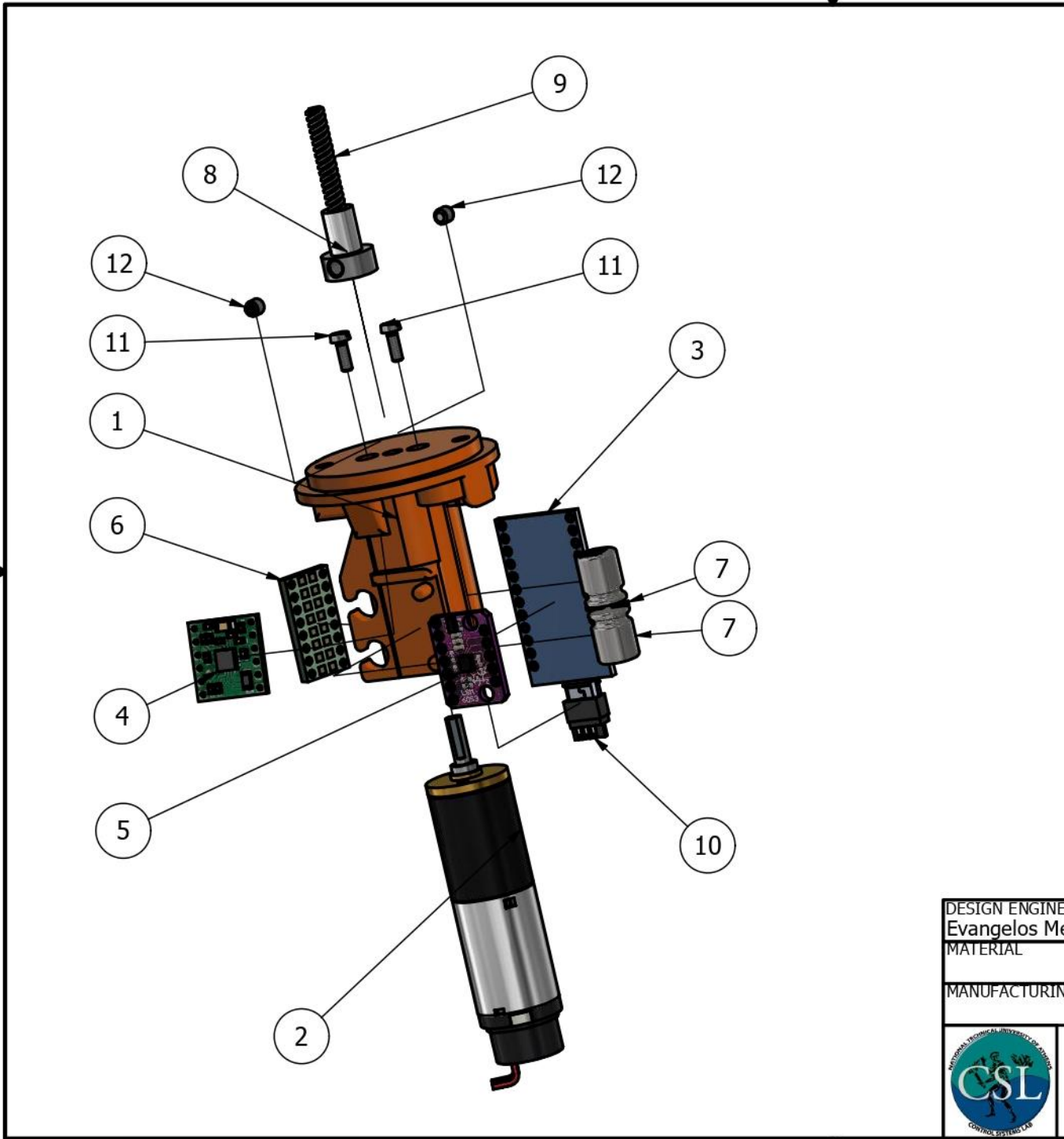
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL Stainless Steel	MASS APPROX. 1.4 g	Lead screw, TR3.5x2.4, L27mm	
MANUFACTURING METHOD Standardized		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group	
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (D)	PART NO D9
	REV 1.0	SHEET	
SIZE A4	SCALE 5 : 1	11 OF 11	




PARTS LIST

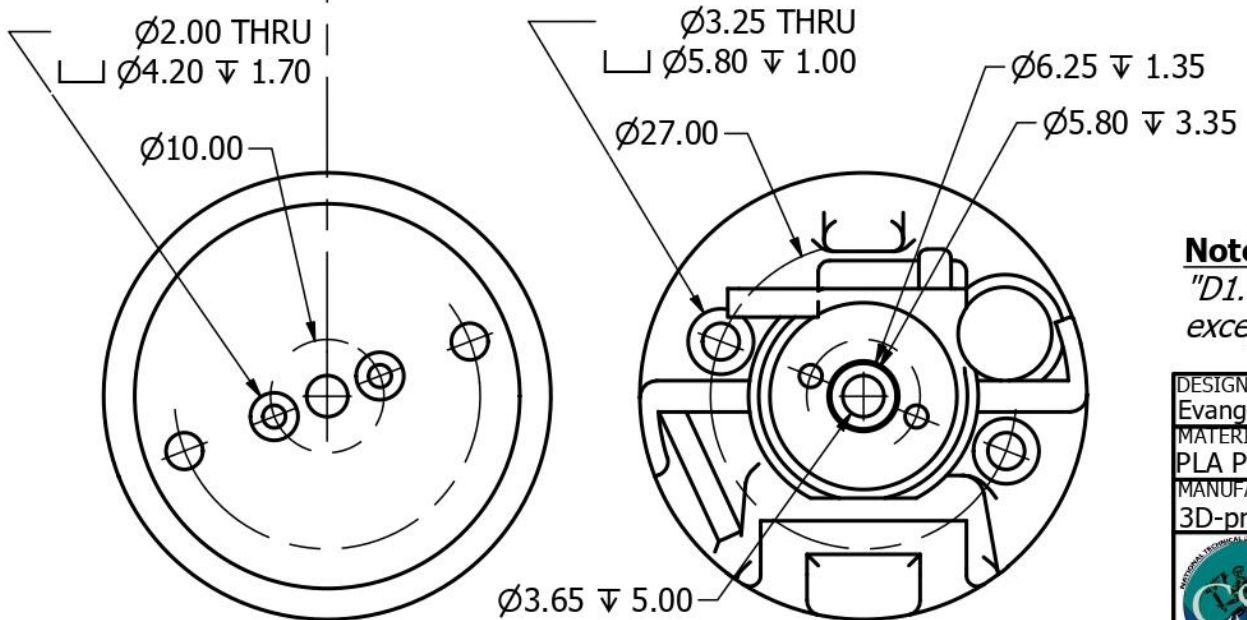
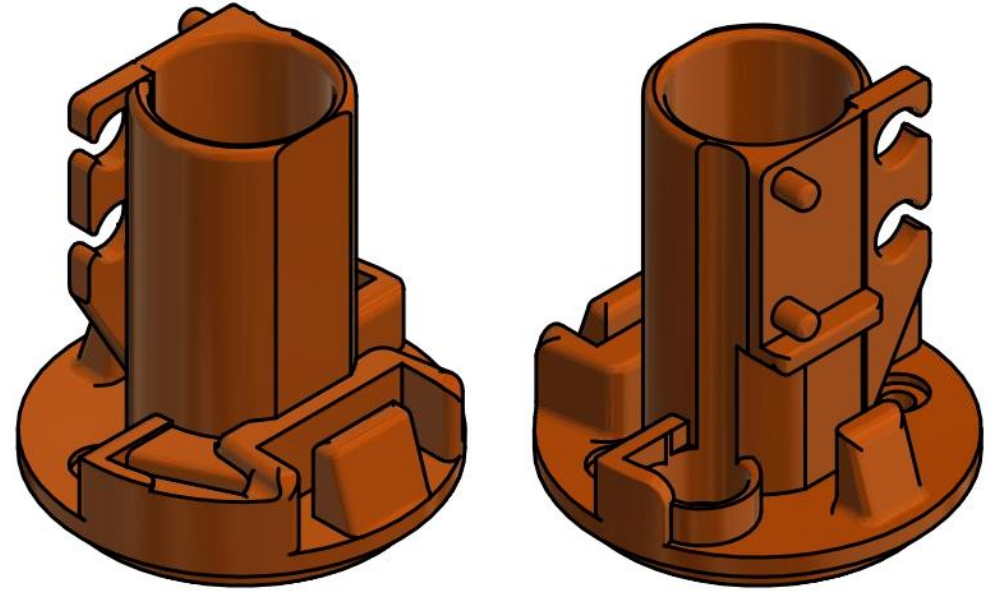
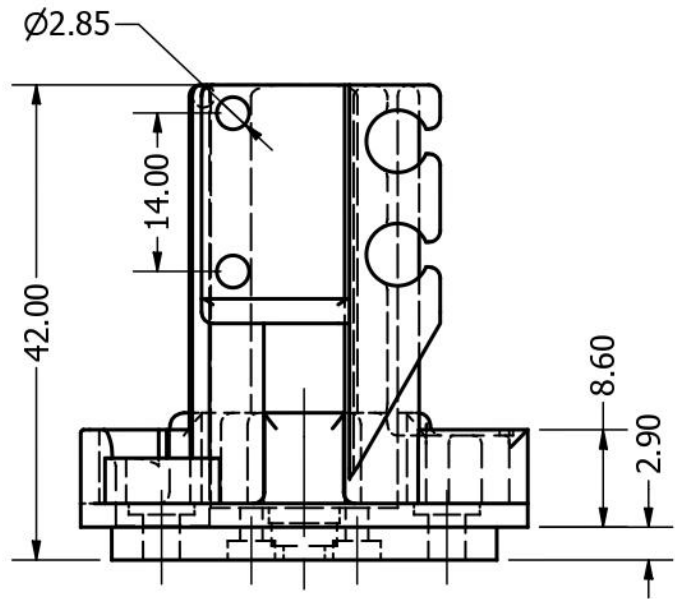
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	D10	Motor casing (Maxon 16)
2	1	D2	DC motor, Maxon 200875, Gearhead 128:1, 9V 2W
3	1	D3	Arduino Pro Micro (ATmega 32U4)
4	1	D4	DRV8801, Single brushed DC motor driver carrier
5	1	D5	LSM6DS3, 6DOF IMU, breakout board
6	1	D6	R-divider board (4x10kΩ) - Assembly
7	2	D7	Capacitor, 330uF-25V, Aluminium, High-ESR, SMD
8	1	D8	Shaft coupler, d6 x D10 x L15
9	1	D9	Lead screw, TR3.5x2.4, L27mm
10	1		USB 2.0 Micro connector, male
11	2	AS 1427 - M2 x 6(2)	ISO metric machine screws
12	2	BS 4168 - M3 x 3(4)	Hexagon socket screws and wrench keys, metric series- Specification for hexagon set screws with flat point

DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL	MASS APPROX. 70.6 g	Motor casing (Maxon 16) - Assembly		
MANUFACTURING METHOD		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group		
 June 2020	PROJECT	ASSEMBLY	PART NO	REV
	UndEE	(D)	(Db)	1.0
SIZE	SCALE	SHEET		
A4	1 : 1	1 OF 4		




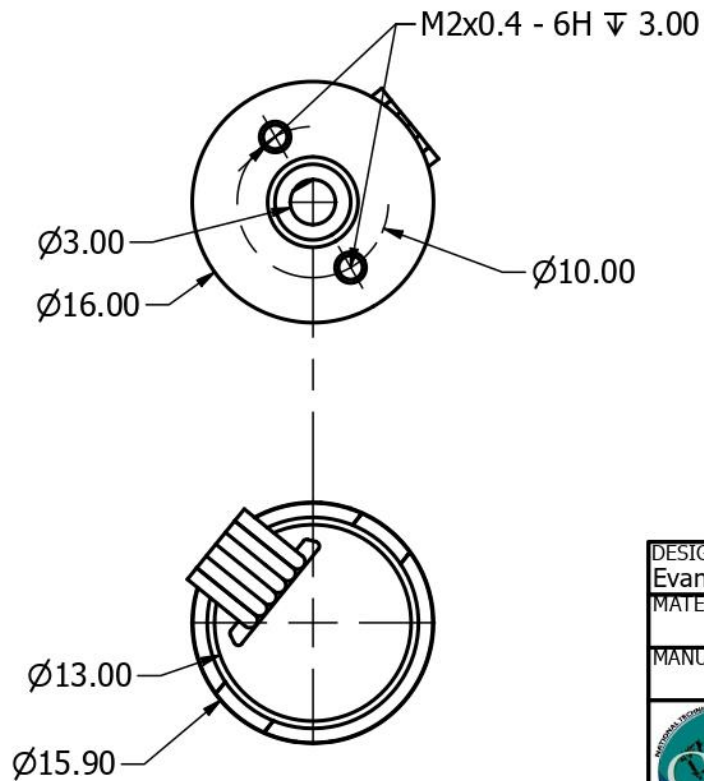
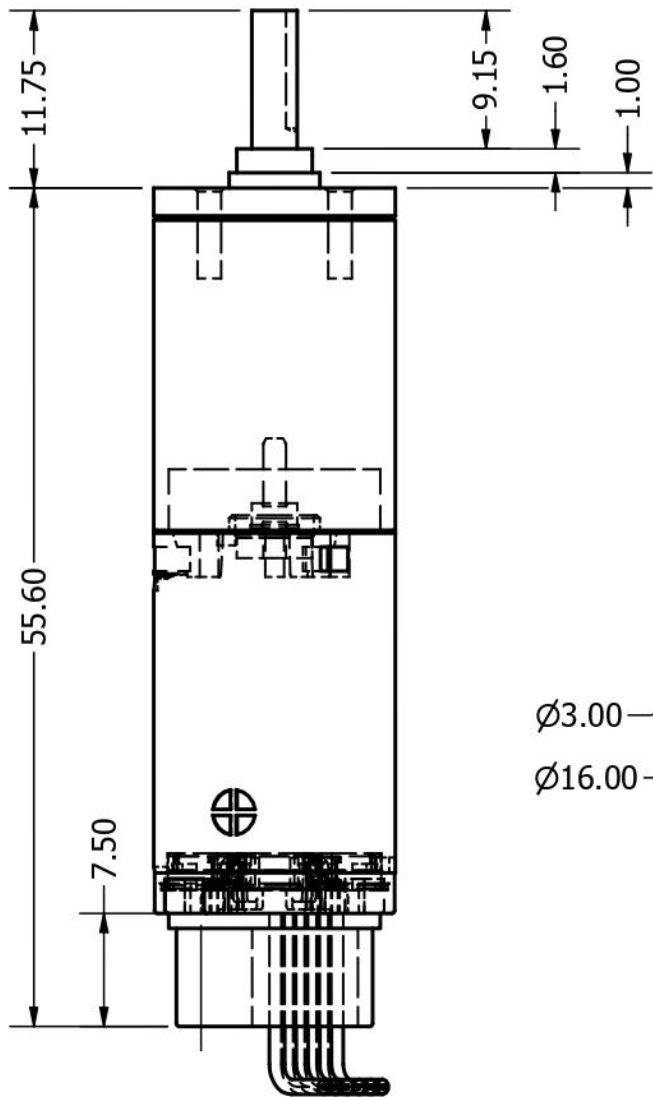
PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	D10	Motor casing (Maxon 16)
2	1	D2	DC motor, Maxon 200875, Gearhead 128:1, 9V 2W
3	1	D3	Arduino Pro Micro (ATmega 32U4)
4	1	D4	DRV8801, Single brushed DC motor driver carrier
5	1	D5	LSM6DS3, 6DOF IMU, breakout board
6	1	D6	R-divider board (4x10kΩ) - Assembly
7	2	D7	Capacitor, 330uF-25V, Aluminium, High-ESR, SMD
8	1	D8	Shaft coupler, d6 x D10 x L15
9	1	D9	Lead screw, TR3.5x2.4, L27mm
10	1		USB 2.0 Micro connector, male
11	2	AS 1427 - M2 x 6(2)	ISO metric machine screws
12	2	BS 4168 - M3 x 3(4)	Hexagon socket screws and wrench keys, metric series- Specification for hexagon set screws with flat point


DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE			
MATERIAL	MASS APPROX. 70.6 g	Motor casing (Maxon 16) - Assembly			
MANUFACTURING METHOD		----- Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group -----			
	June 2020	PROJECT	ASSEMBLY	PART NO	REV
		UndEE	(D)	(Db)	1.0
SIZE	SCALE	SHEET			
A4	7 / 8	2 OF 4			



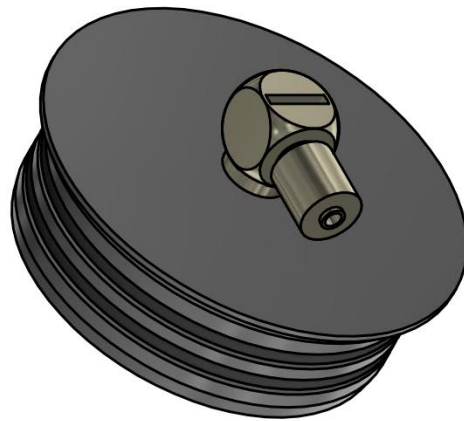
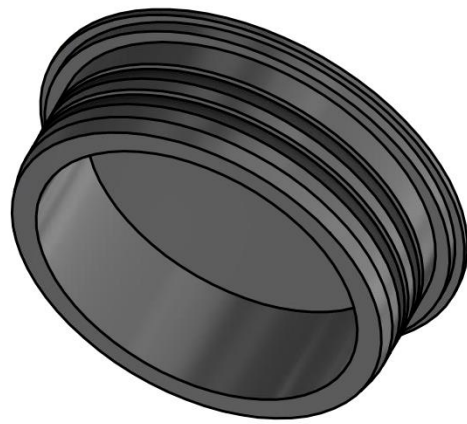
Note: Overall the part is identical to part "D1. Motor casing (Escap 16)" in assembly (Da), except for the motor mounting holes at the base.

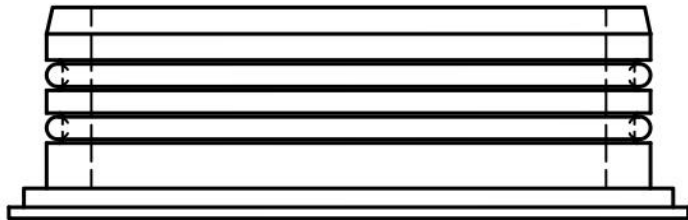
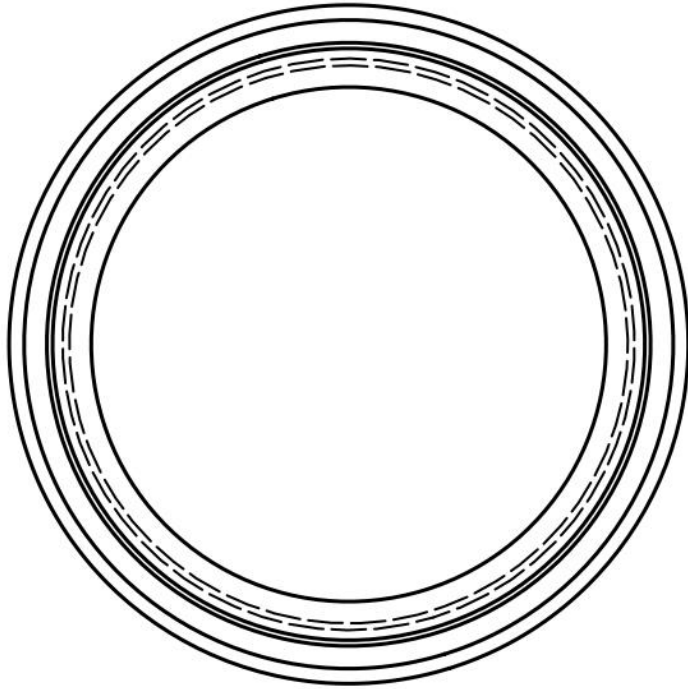
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE			
MATERIAL PLA Plastic	MASS APPROX. 13.7 g	Motor casing (Maxon 16)			
MANUFACTURING METHOD 3D-printed		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group			
	June 2020	PROJECT	ASSEMBLY	PART NO	REV
		UndEE	(D)	D10	1.0
SIZE	SCALE	SHEET			
A4	1.5 : 1	3		OF 4	




DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL	MASS APPROX. 50.6 g	DC motor, Maxon 200875, Gearhead 128:1, 9V 2W		
MANUFACTURING METHOD		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group		
 June 2020	PROJECT	ASSEMBLY	PART NO	REV
	UndEE	(D)	D2	1.0
SIZE	SCALE	SHEET		
A4	2 : 1	4 OF 4		

(E) - Casing Bottom Plug assembly





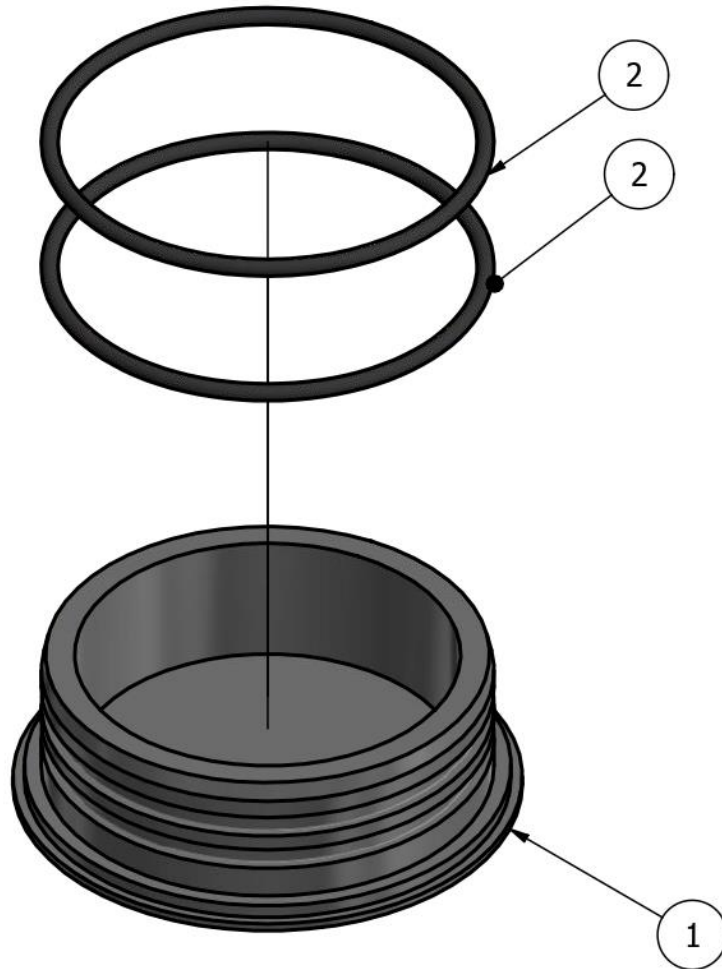
PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	E1	Plug casing, bottom
2	2	CE2	O-ring 37x1.5, NBR


DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL	MASS APPROX. 9.8 g	Plug casing, bottom - Assembly	
MANUFACTURING METHOD		----- Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group -----	
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (E)	PART NO (Ea)
	SIZE A4	SCALE 2 : 1	REV 1.0
		SHEET 1 OF 4	

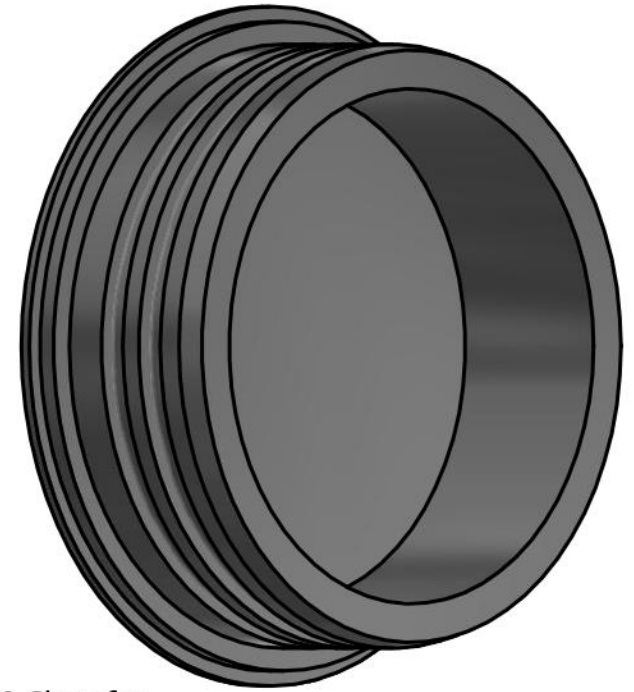
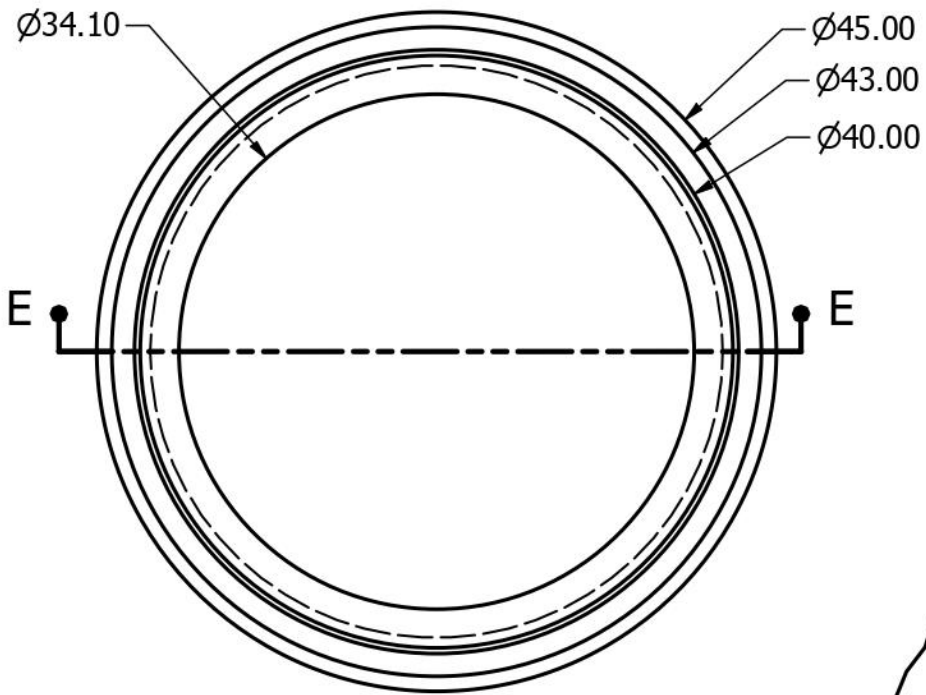
PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	E1	Plug casing, bottom
2	2	CE2	O-ring 37x1.5, NBR

Assembly Notes:

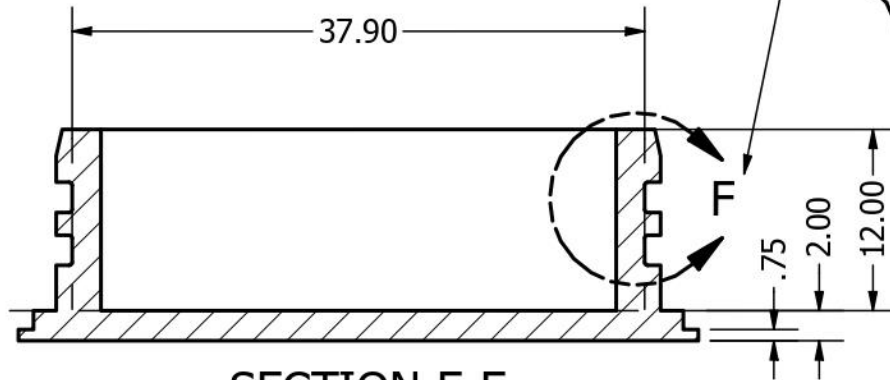
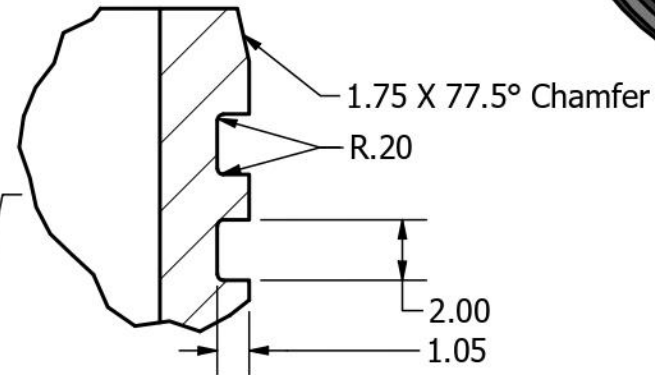
- Apply silicone lubricant to parts [CE2]
- Pay attention not to twist or overstrech parts [CE2] during assembly




DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE			
MATERIAL	MASS APPROX. 9.8 g	Plug casing, bottom - Assembly			
MANUFACTURING METHOD		----- Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group -----			
	June 2020	PROJECT	ASSEMBLY	PART NO	REV
		UndEE	(E)	(Ea)	1.0
SIZE	SCALE	SHEET			
A4	1.5 : 1	2 OF 4			

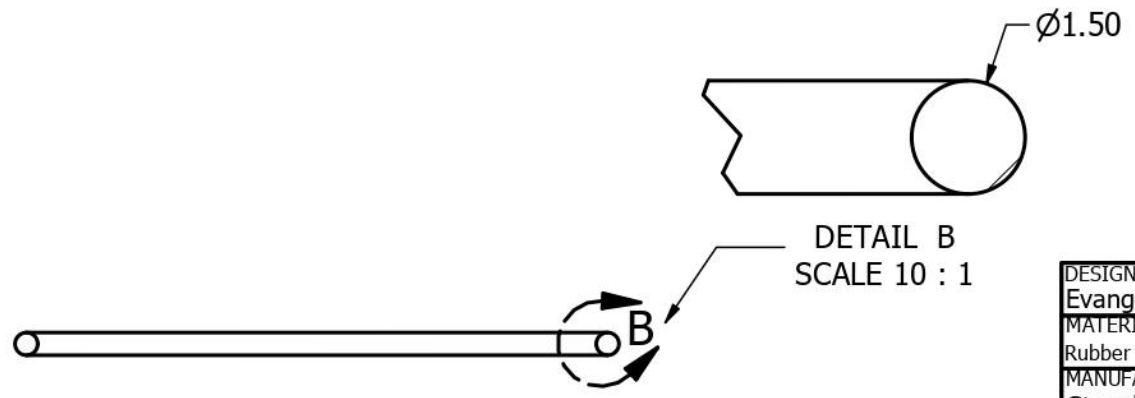
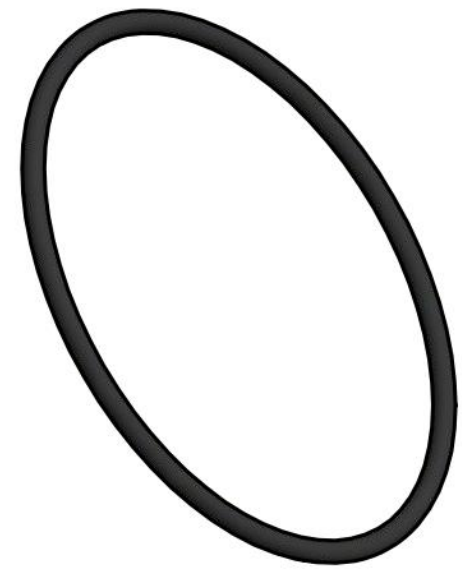
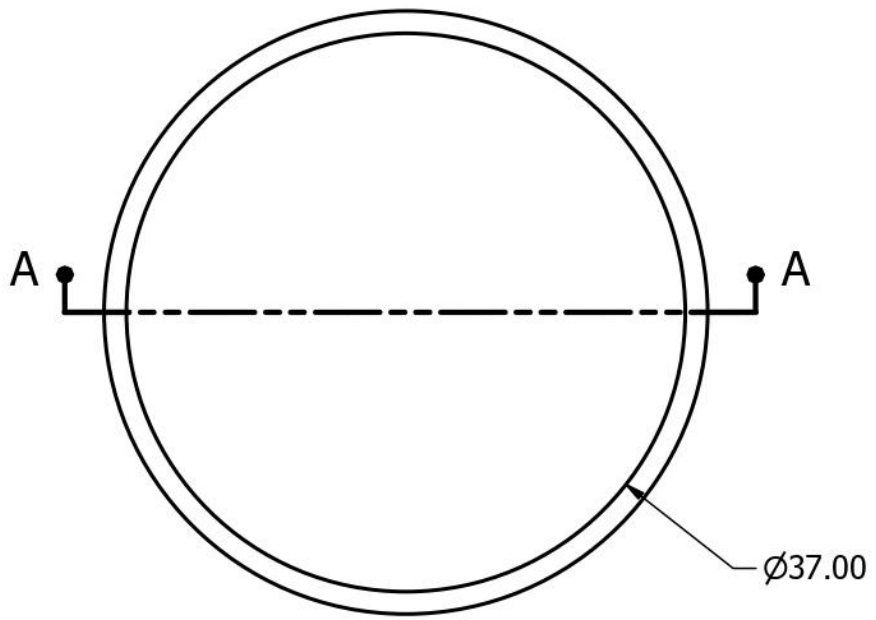


DETAIL F
SCALE 4 : 1




SECTION E-E
SCALE 2 : 1

DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE Plug casing, bottom		
MATERIAL Acetal Resin, Black	MASS APPROX. 9.4 g	Control Systems Lab - NTUA <i>Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group</i>		
MANUFACTURING METHOD CNC-milled		PROJECT UndEE	ASSEMBLY (E)	PART NO E1
 June 2020		REV 1.0		
SIZE A4	SCALE 2 : 1	SHEET 3 OF 4		

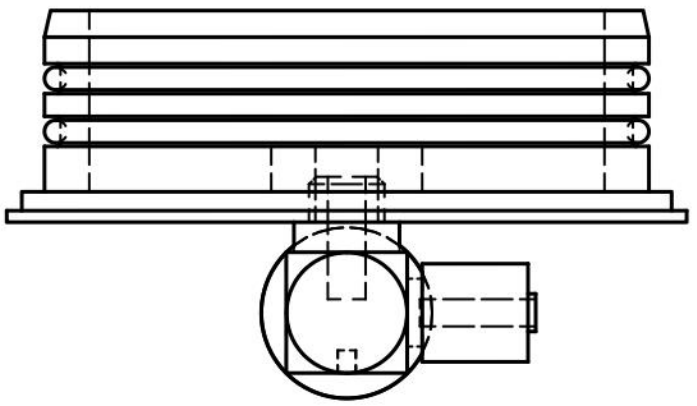
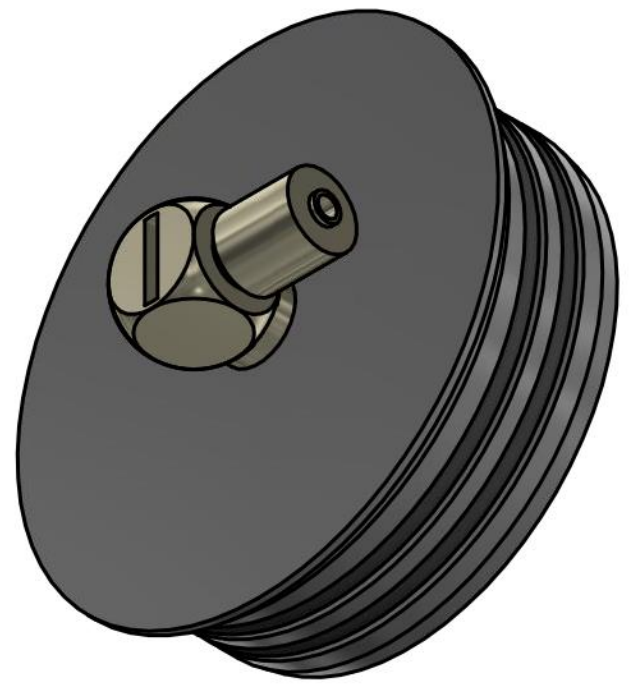
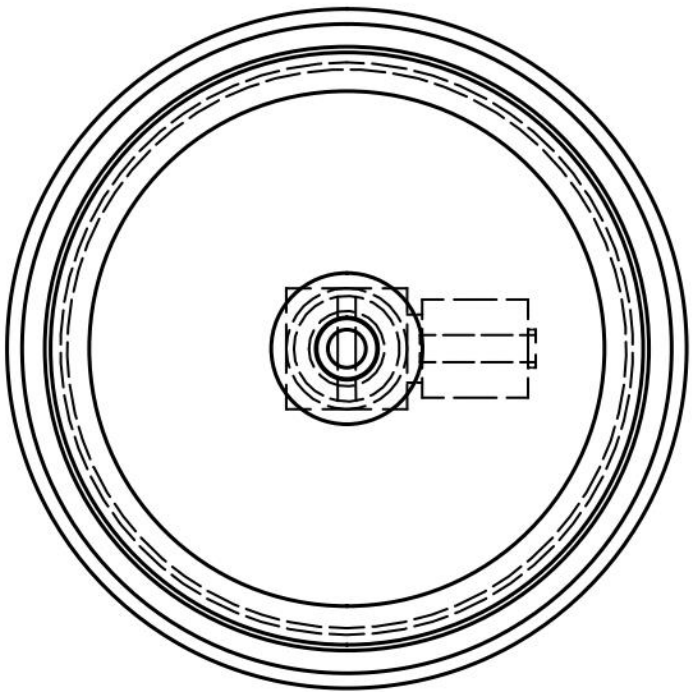



SECTION A-A
SCALE 2 : 1

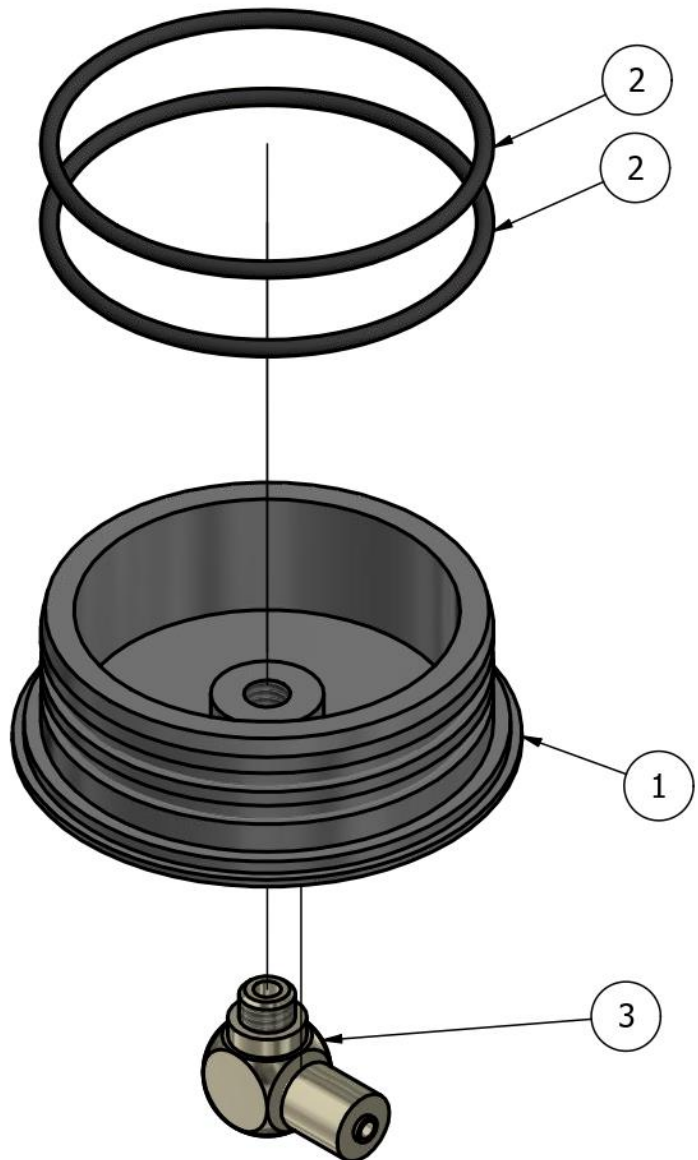
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL Rubber	MASS APPROX. 0.2 g	O-ring 37x1.5 NBR	
MANUFACTURING METHOD Standardized		Control Systems Lab - NTUA <i>Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group</i>	
	June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (CE)
		SIZE A4	PART NO CE2
SCALE 2 : 1		REV 1.0	SHEET 4 OF 4

PARTS LIST

ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	E1	Plug casing, bottom, w/ fitting
2	2	CE2	O-ring 37x1.5, NBR
3	1	E3	M-5HL-6 Hose Elbow, Mini Pneumatic Fitting

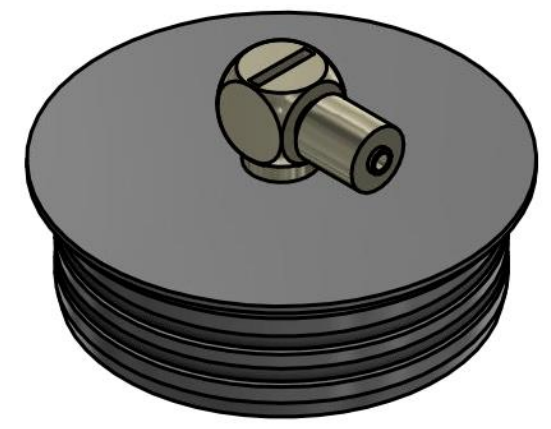



DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE Plug casing, bottom, w/ fitting - Assembly		
MATERIAL	MASS APPROX. 14.4 g	Control Systems Lab - NTUA <i>Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group</i>		
MANUFACTURING METHOD		PROJECT UndEE	ASSEMBLY (E)	PART NO (Eb)
 June 2020		REV 1.0	SHEET 1 OF 5	
SIZE A4	SCALE 2 : 1			

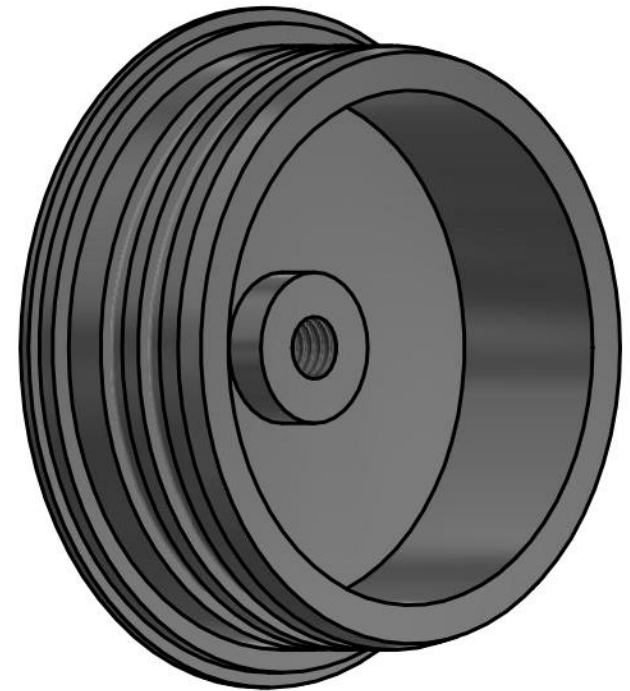
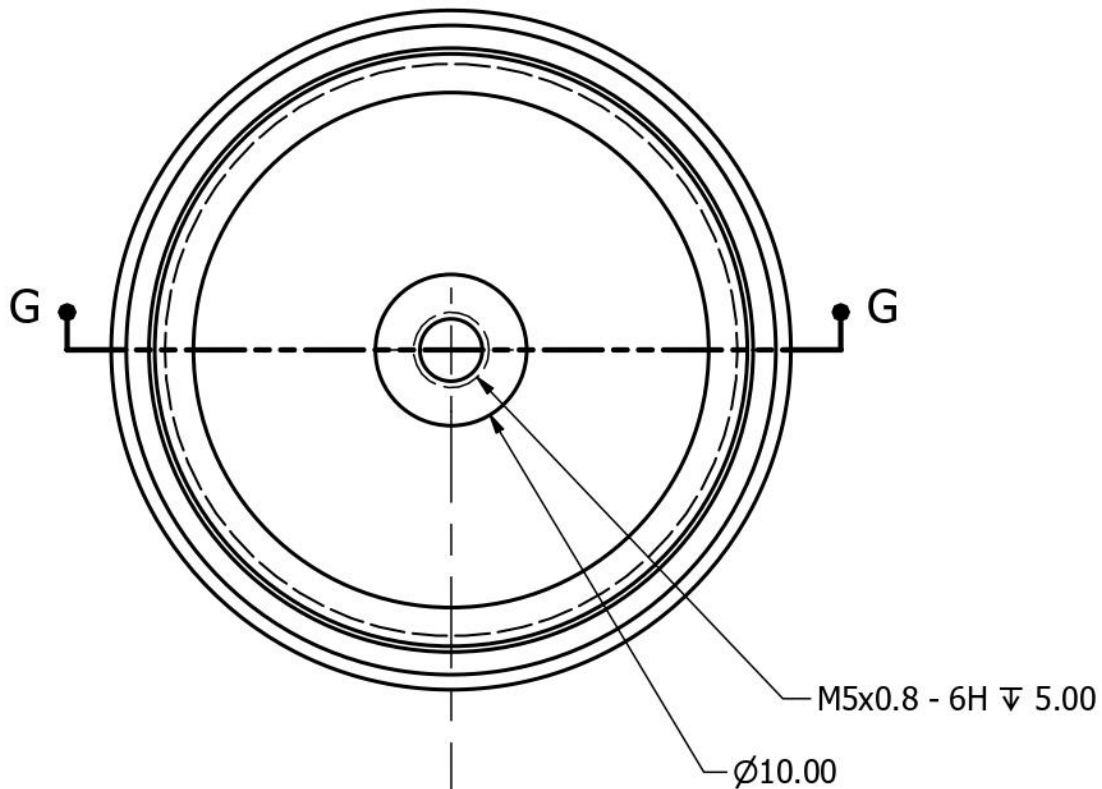


PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	E1	Plug casing, bottom, w/ fitting
2	2	CE2	O-ring 37x1.5, NBR
3	1	E3	M-5HL-6 Hose Elbow, Mini Pneumatic Fitting

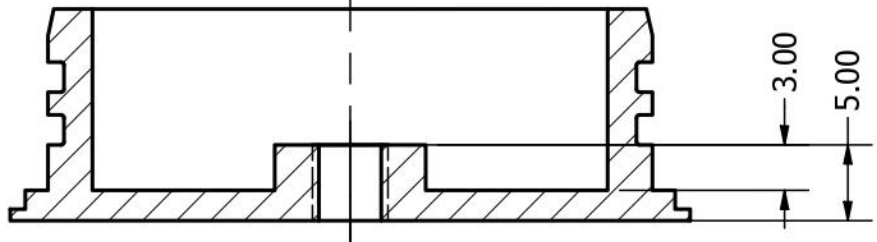
- Assembly Notes:**
- Apply silicone lubricant to parts [CE2]
 - Apply silicone lubricant to gasket of part [E3]
 - Apply teflon tape to thread of part [E3]
 - Pay attention not to twist or overstretch parts [CE2] during assembly




DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL	MASS APPROX. 14.4 g	Plug casing, bottom, w/ fitting - Assembly	
MANUFACTURING METHOD		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group	
 June 2020	PROJECT	ASSEMBLY	PART NO
	UndEE	(E)	(Eb)
SIZE	SCALE	SHEET	
A4	1.5 : 1	2 OF 5	

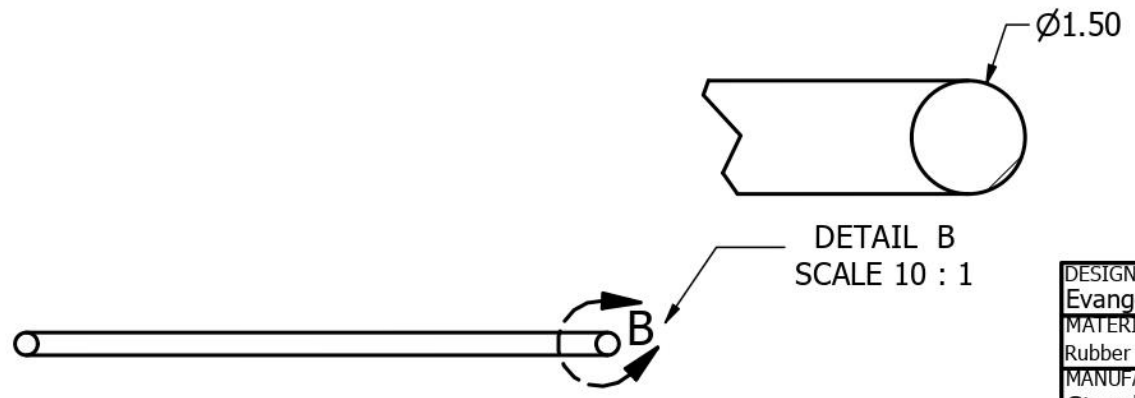
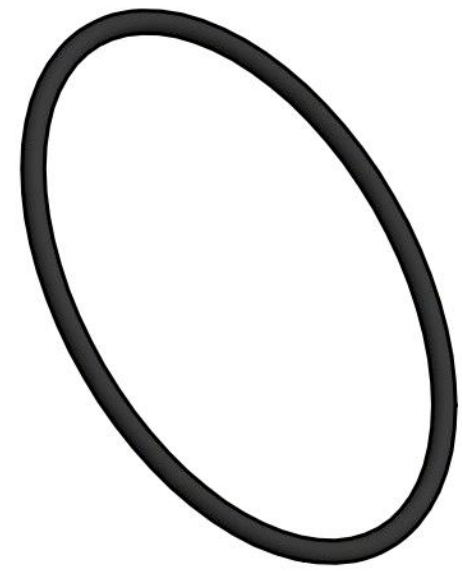
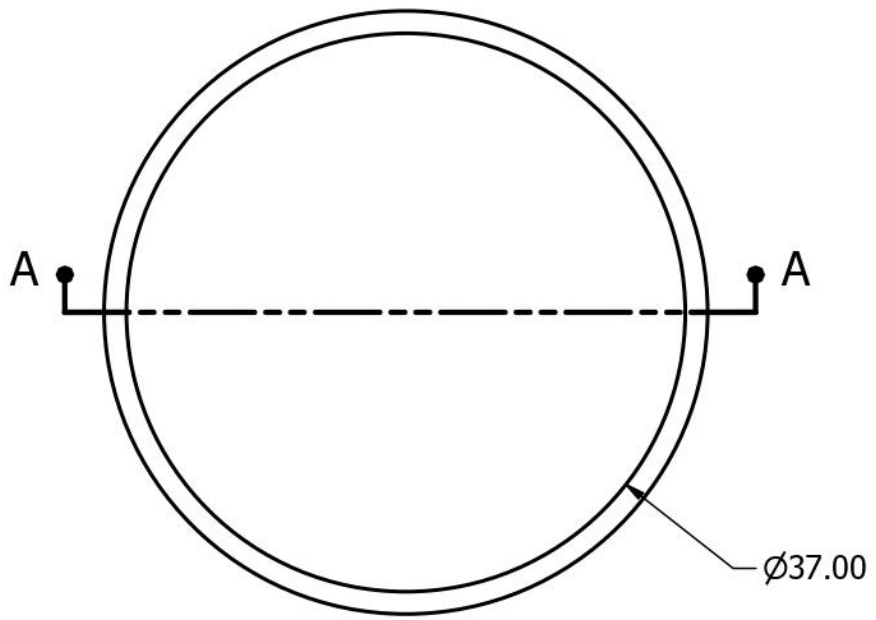


SECTION G-G
SCALE 2 : 1




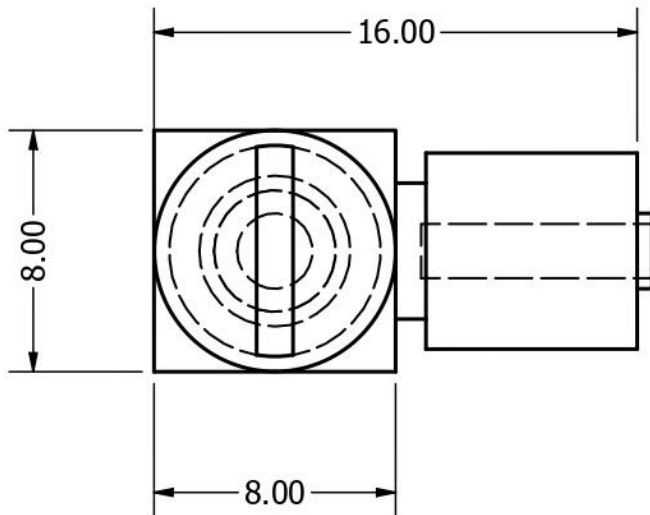
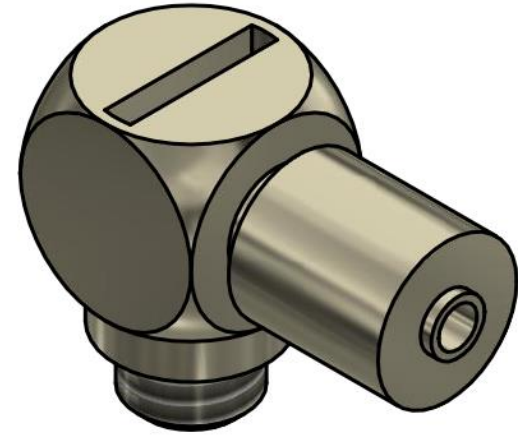
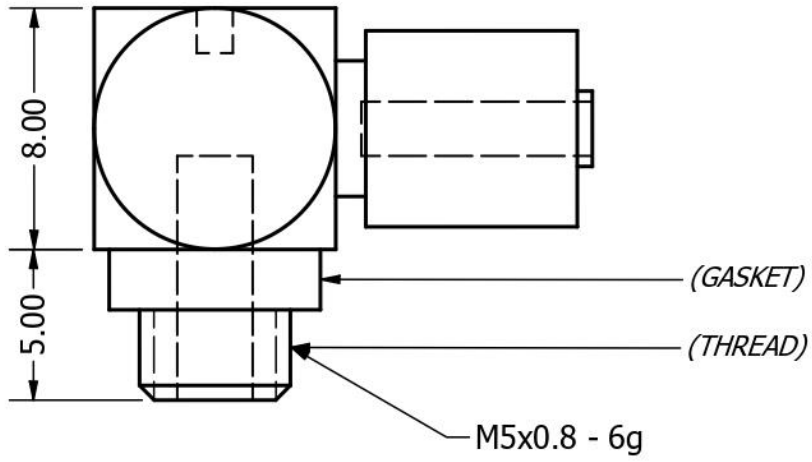
Note: Overall the part is identical to part "E1. Plug casing, bottom" in assembly (Ea), except for the pneumatic fitting mount at the center.


DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL Acetal Resin, Black	MASS APPROX. 9.6 g	Plug casing, bottom, w/ fitting		
MANUFACTURING METHOD CNC-milled		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group		
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (E)	PART NO E1	REV 1.0
	SIZE A4	SCALE 2 : 1	SHEET 3 OF 5	



SECTION A-A
SCALE 2 : 1

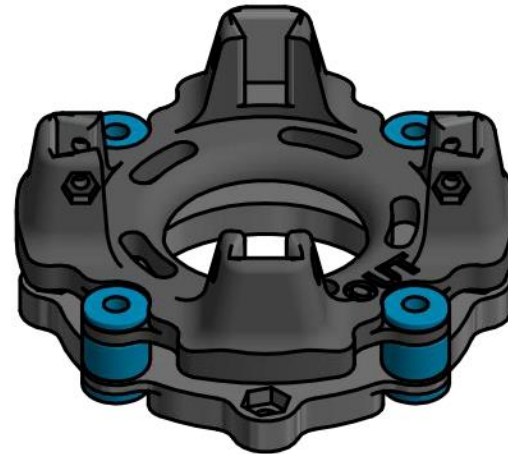
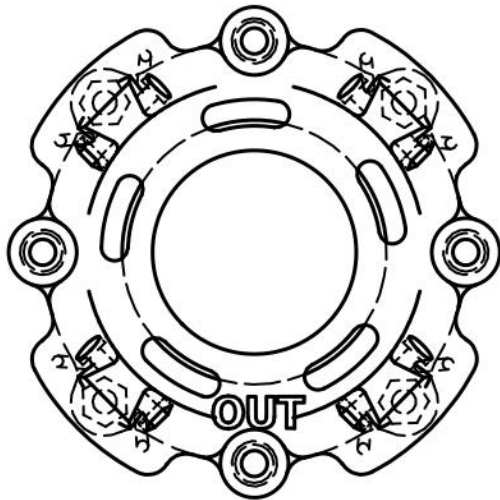
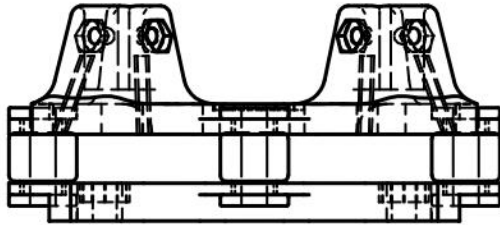
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE			
MATERIAL Rubber	MASS APPROX. 0.2 g	O-ring 37x1.5 NBR			
MANUFACTURING METHOD Standardized		Control Systems Lab - NTUA <i>Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group</i>			
	June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (CE)	PART NO CE2	REV 1.0
		SIZE A4	SCALE 2 : 1	SHEET 4 OF 5	




DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL Iron, Ductile	MASS APPROX. 4.4 g	Hose Elbow Mini Fitting M-5HL-6		
MANUFACTURING METHOD Standardized		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group		
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (E)	PART NO E3	REV 1.0
	SIZE A4	SCALE 4 : 1	SHEET 5 OF 5	

(F) - Manipulator Base assembly





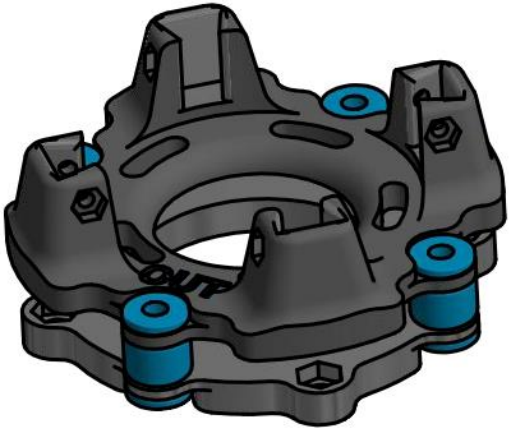
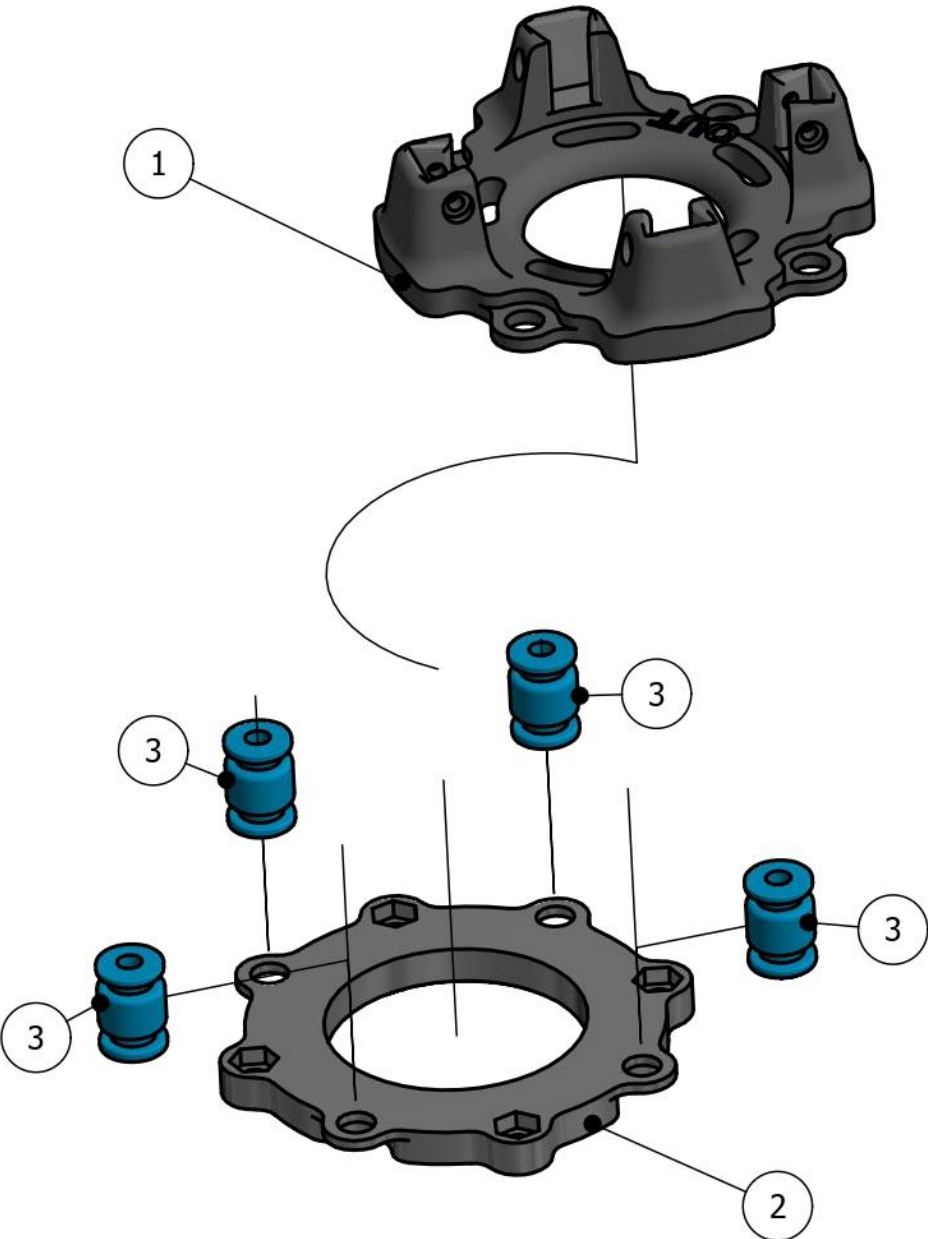
PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	F1	Manipulator mount, casing
2	1	F2	Manipulator base, gumball
3	4	F3	Gumball, 6x9x13 (anti-vibration damping rubber)


DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL	MASS APPROX. 27.6 g	Manipulator base - Assembly		
MANUFACTURING METHOD		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group		
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (F)	PART NO (F)	REV 1.0
	SIZE A4	SCALE 1 : 1	SHEET 1 OF 5	

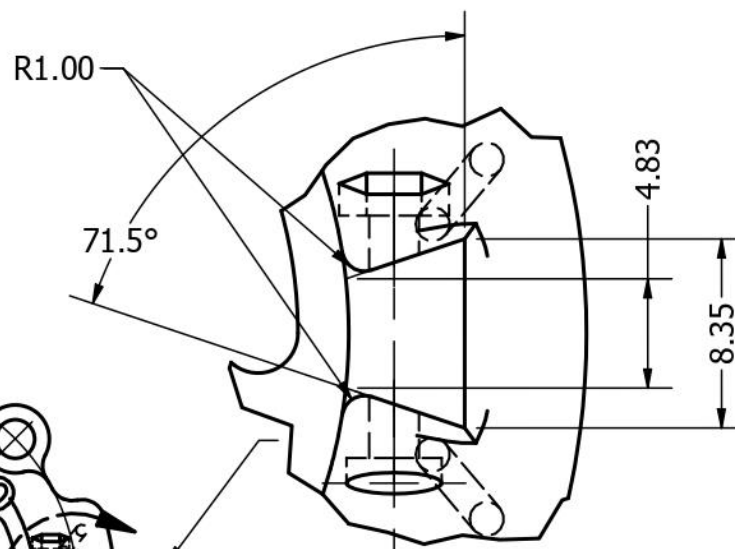
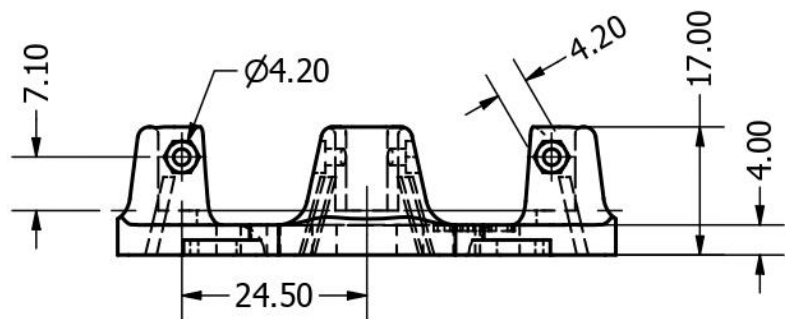
PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	F1	Manipulator mount, casing
2	1	F2	Manipulator base, gumball
3	4	F3	Gumball, 6x9x13 (anti-vibration damping rubber)

Assembly Notes:

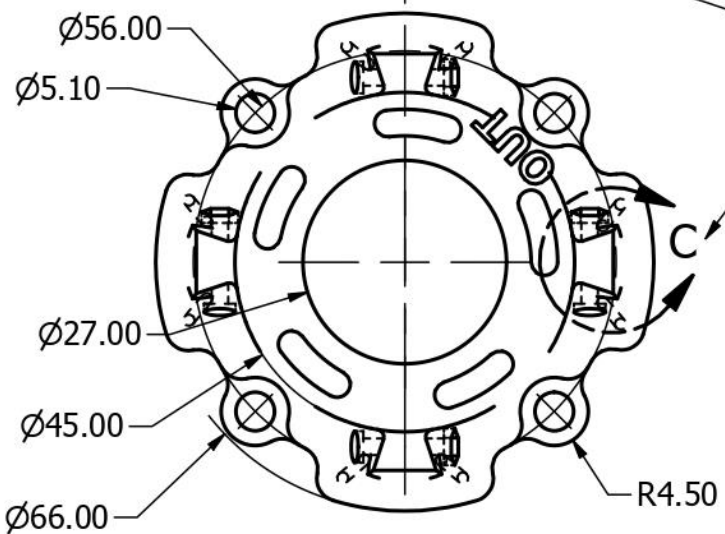
- Apply silicone lubricant to parts [F3]
- Fix parts [F3] to base [F2]; a dull flat screwdriver or similar tool can help
- Fix parts [F3] to mount [F1]




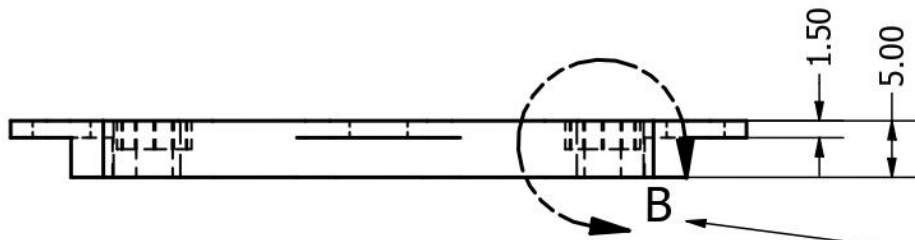
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL	MASS APPROX. 27.6 g	Manipulator base - Assembly	
MANUFACTURING METHOD		----- Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group -----	
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (F)	PART NO (F)
	SIZE A4	SCALE 1 : 1	REV 1.0
		SHEET 2 OF 5	



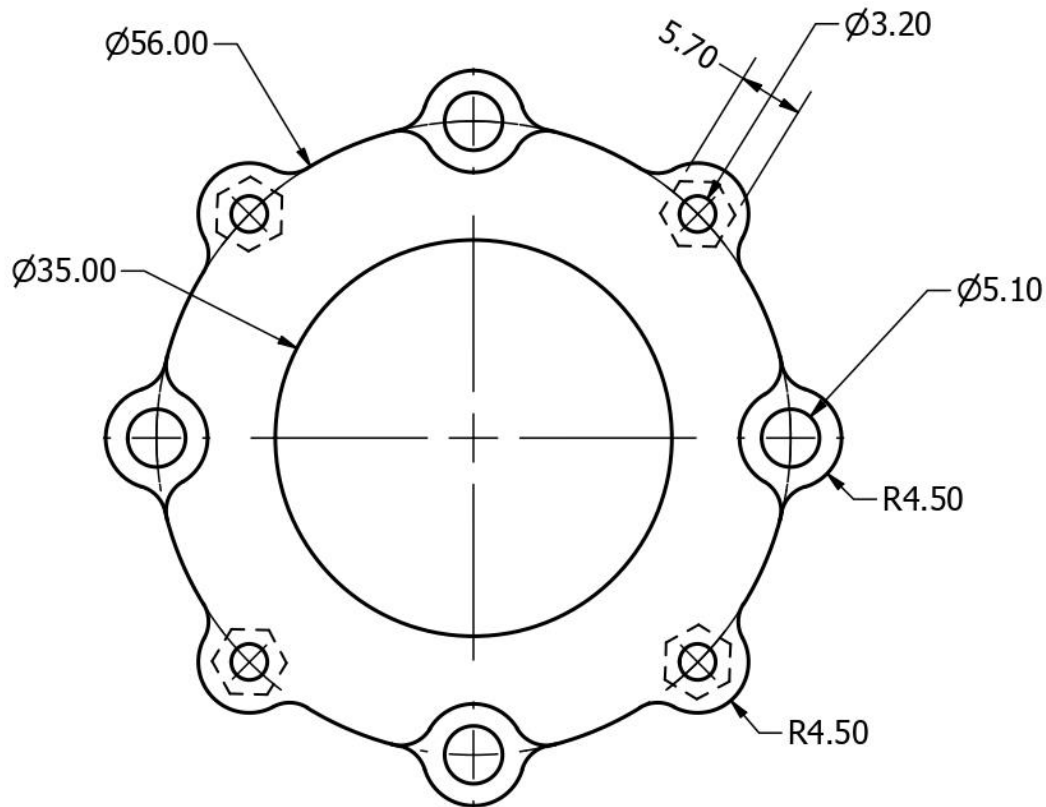
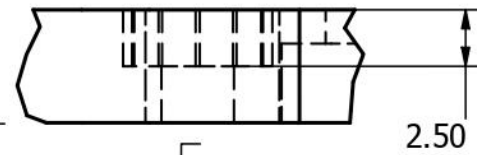
DETAIL C
 SCALE 3 : 1




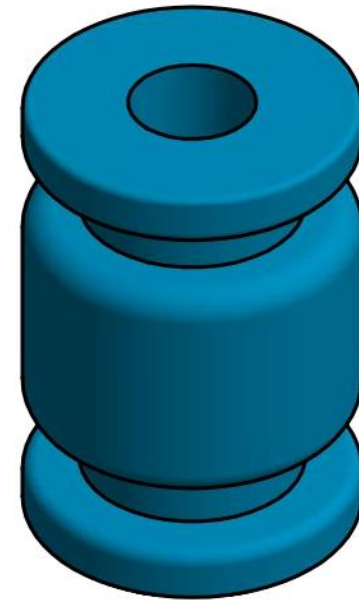
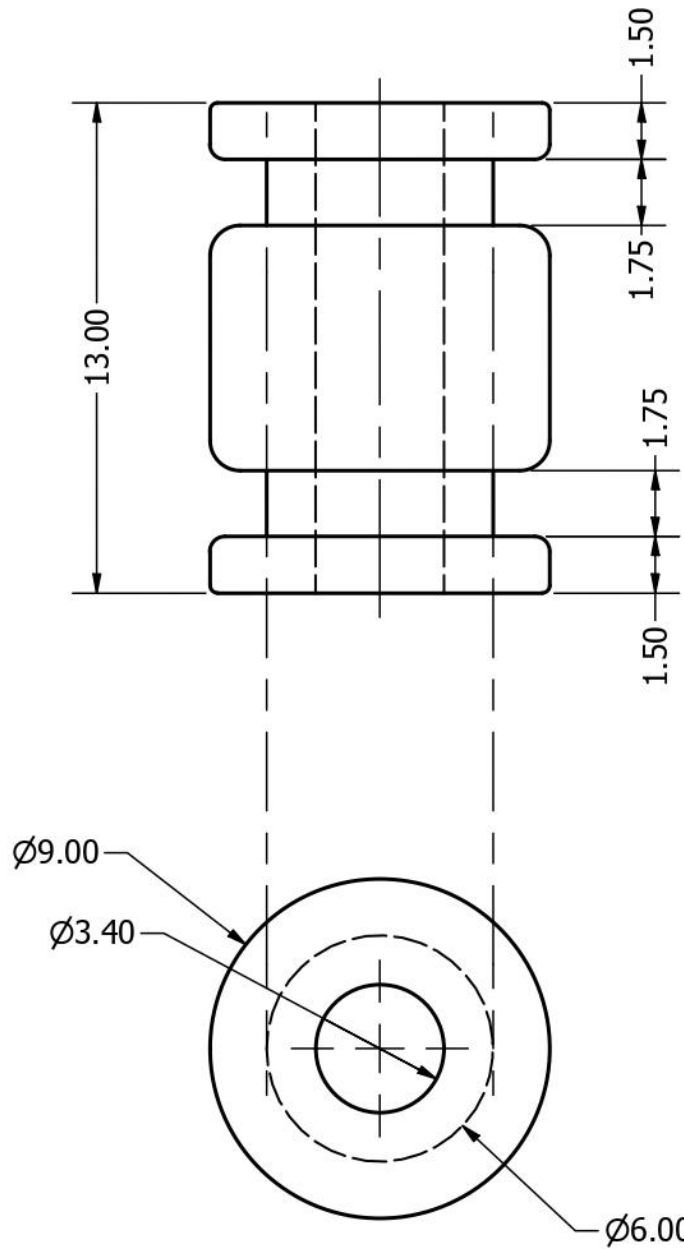
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL PLA Plastic	MASS APPROX. 16.2 g	Manipulator mount, casing		
MANUFACTURING METHOD 3D-printed		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group		
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (F)	PART NO F1	REV 1.0
	SIZE A4	SCALE 1 : 1	SHEET 3 OF 5	




DETAIL B
SCALE 3 : 1



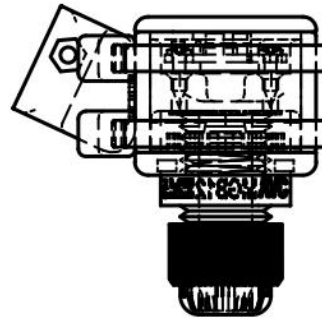
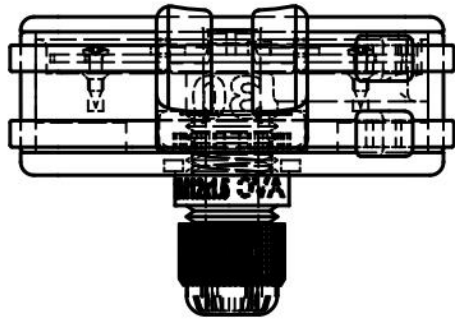
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL PLA Plastic	MASS APPROX. 9.3 g	Manipulator base, gumball		
MANUFACTURING METHOD 3D-printed		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group		
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (F)	PART NO F2	REV 1.0
	SIZE A4	SCALE 1.5 : 1	SHEET 4 OF 5	



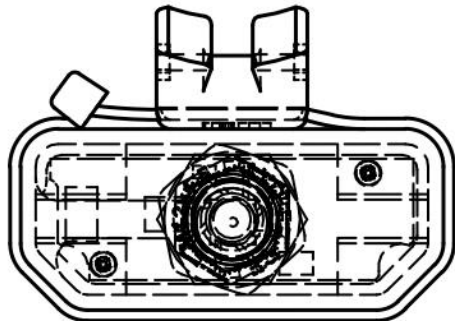
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL Rubber	MASS APPROX. 0.5 g	Gumball, 6x9x13	
MANUFACTURING METHOD		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group	
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (F)	PART NO F3
	REV 1.0	SHEET	
SIZE A4	SCALE 5 : 1	5 OF 5	


(G) - Camera assemblies

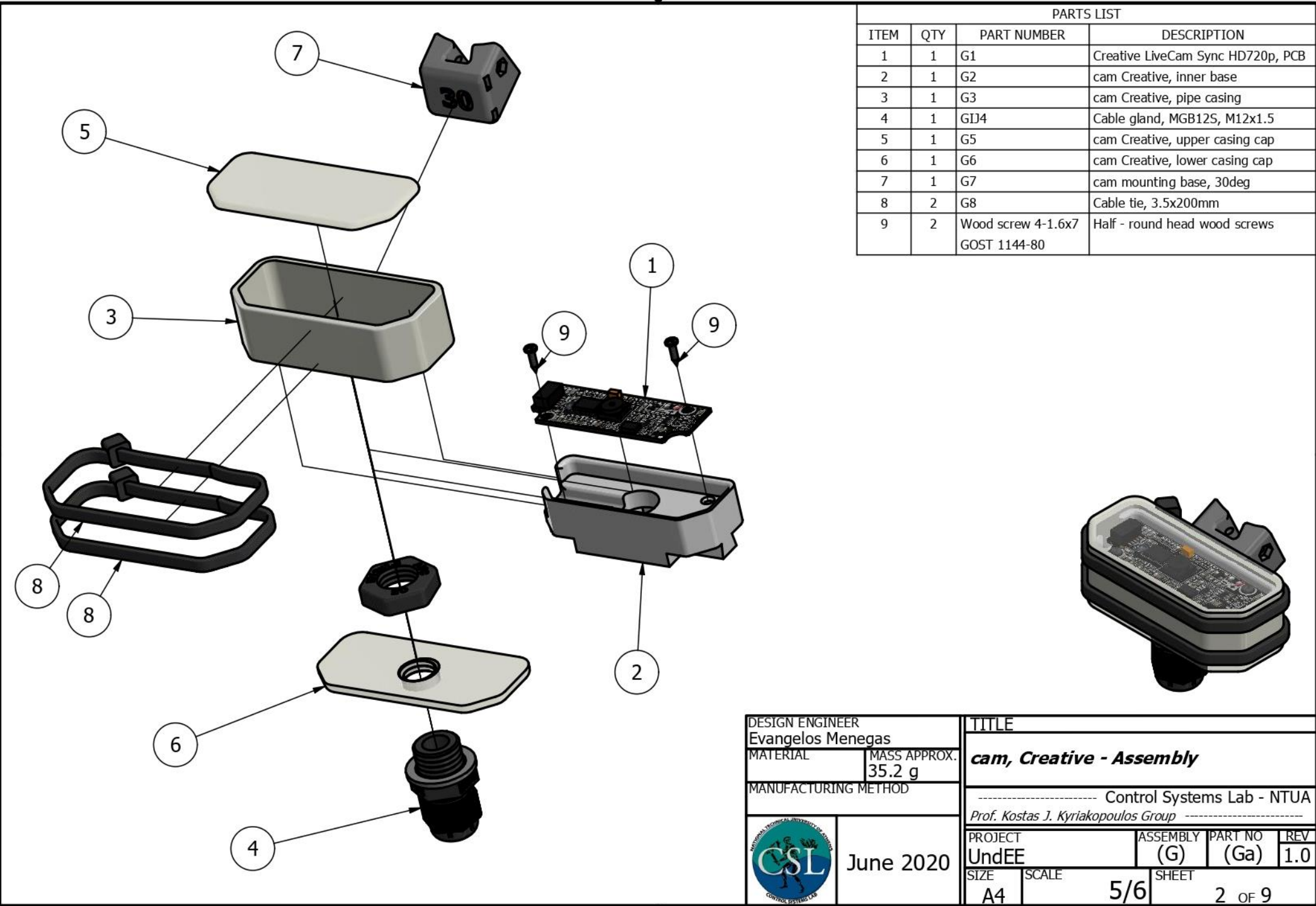




PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	G1	Creative LiveCam Sync HD720p, PCB
2	1	G2	cam Creative, inner base
3	1	G3	cam Creative, pipe casing
4	1	GIJ4	Cable gland, MGB12S, M12x1.5
5	1	G5	cam Creative, upper casing cap
6	1	G6	cam Creative, lower casing cap
7	1	G7	cam mounting base, 30deg
8	2	G8	Cable tie, 3.5x200mm
9	2	Wood screw 4-1.6x7 GOST 1144-80	Half - round head wood screws



DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL	MASS APPROX. 35.2 g	cam, Creative - Assembly		
MANUFACTURING METHOD		----- Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group -----		
 June 2020	PROJECT	ASSEMBLY	PART NO	REV
	UndEE	(G)	(Ga)	1.0
SIZE	SCALE	SHEET		
A4	1 : 1	1 OF 9		



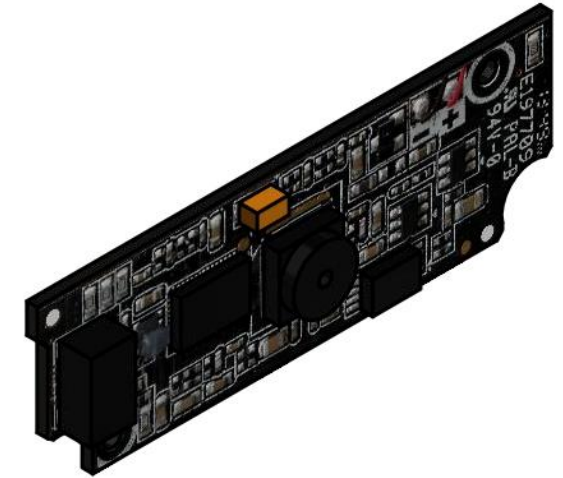
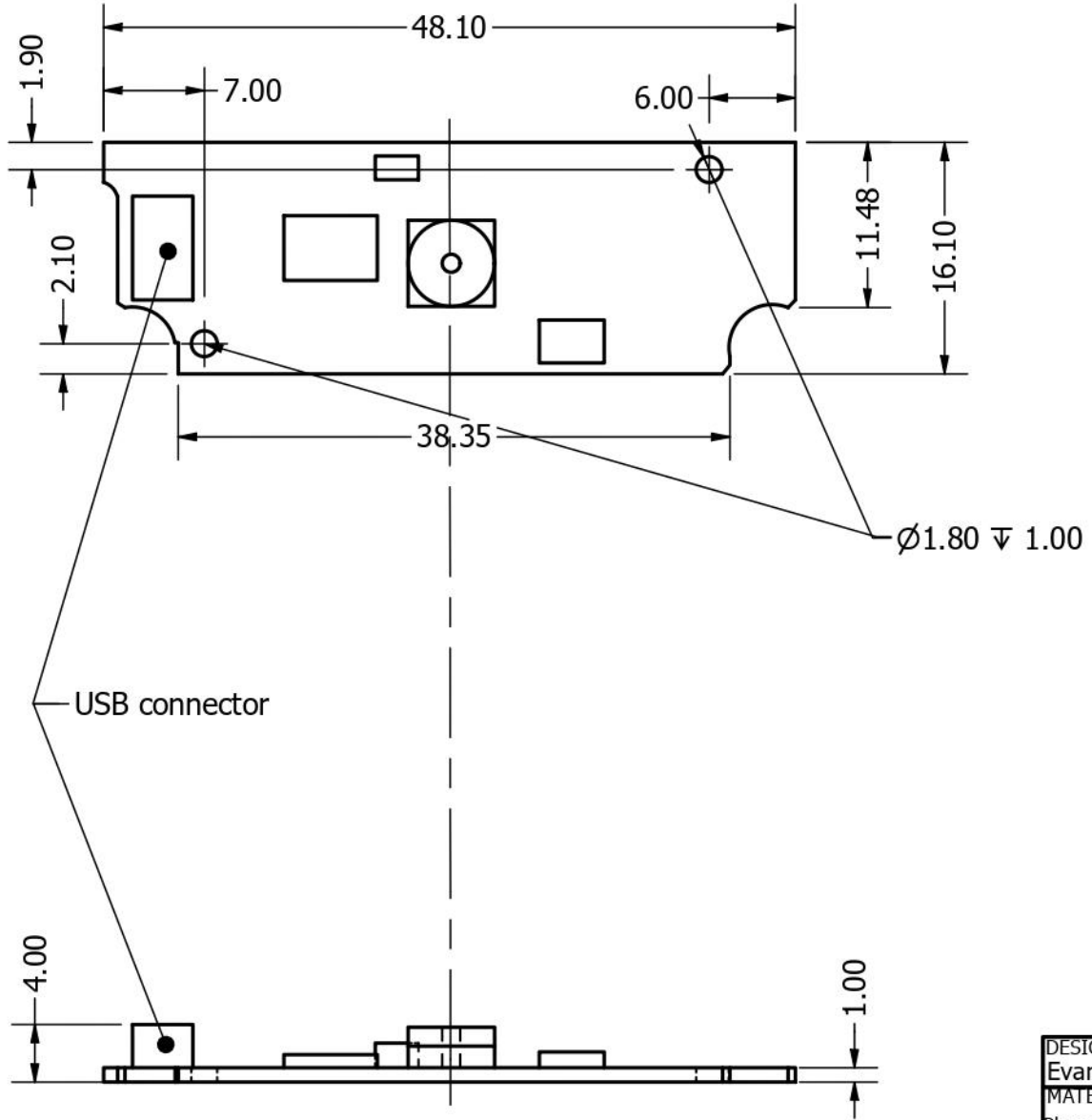
PARTS LIST


ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	G1	Creative LiveCam Sync HD720p, PCB
2	1	G2	cam Creative, inner base
3	1	G3	cam Creative, pipe casing
4	1	GIJ4	Cable gland, MGB12S, M12x1.5
5	1	G5	cam Creative, upper casing cap
6	1	G6	cam Creative, lower casing cap
7	1	G7	cam mounting base, 30deg
8	2	G8	Cable tie, 3.5x200mm
9	2	Wood screw 4-1.6x7 GOST 1144-80	Half - round head wood screws

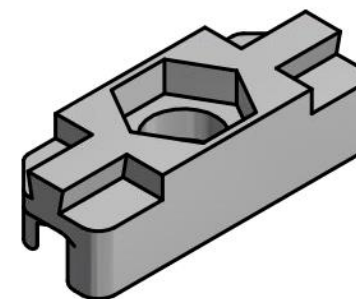
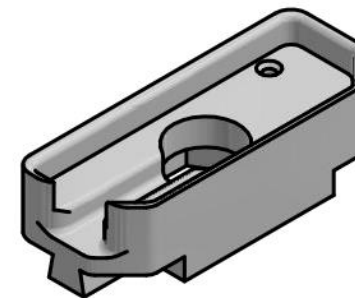
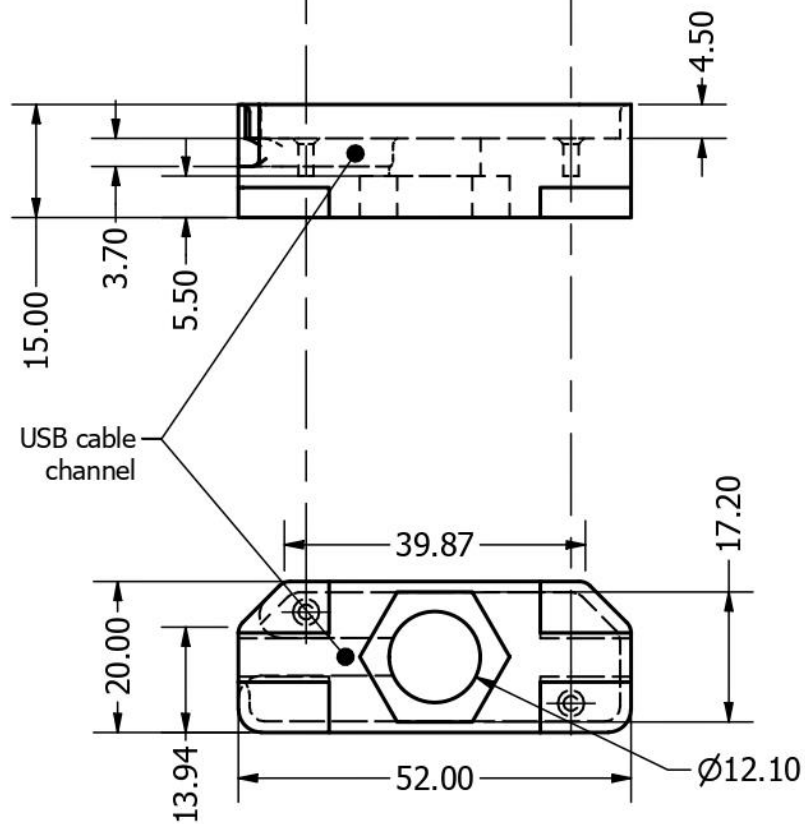
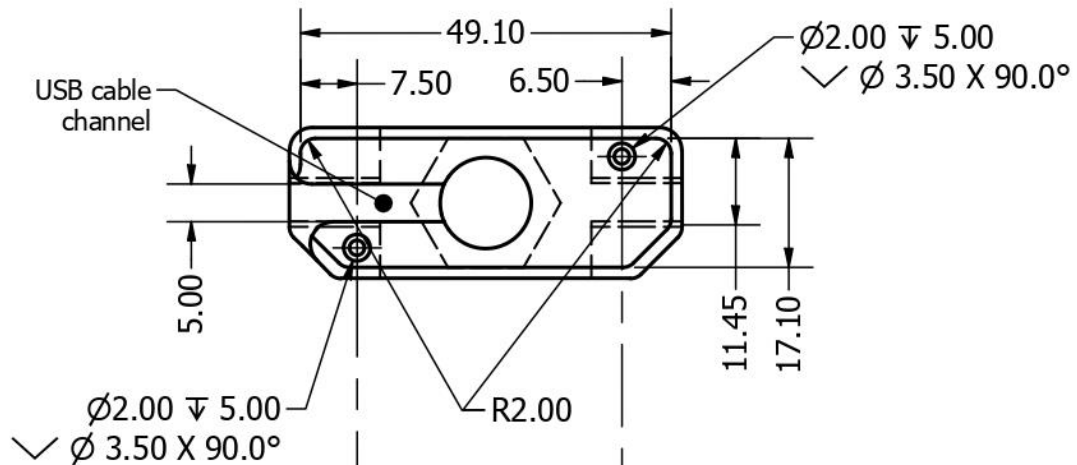
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas	
MATERIAL	MASS APPROX. 35.2 g
MANUFACTURING METHOD	
	
June 2020	


TITLE			
cam, Creative - Assembly			
----- Control Systems Lab - NTUA			
Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group			
PROJECT	ASSEMBLY	PART NO	REV
UndEE	(G)	(Ga)	1.0
SIZE	SCALE	SHEET	
A4	5/6	2 OF 9	

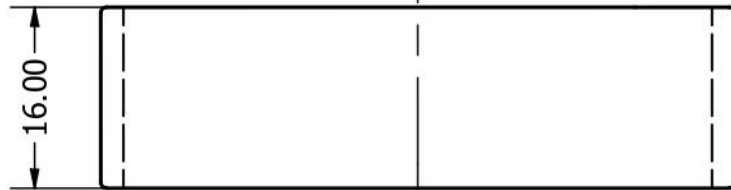
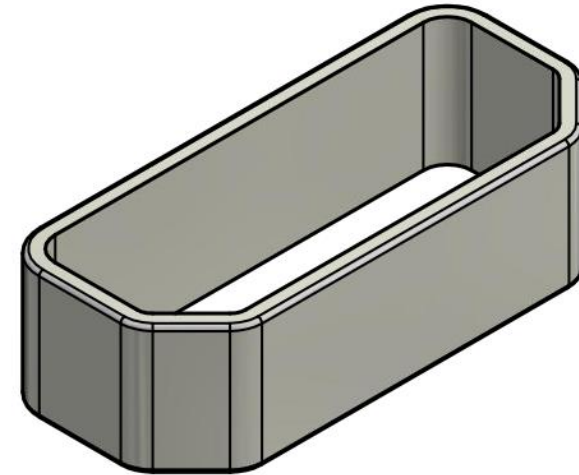
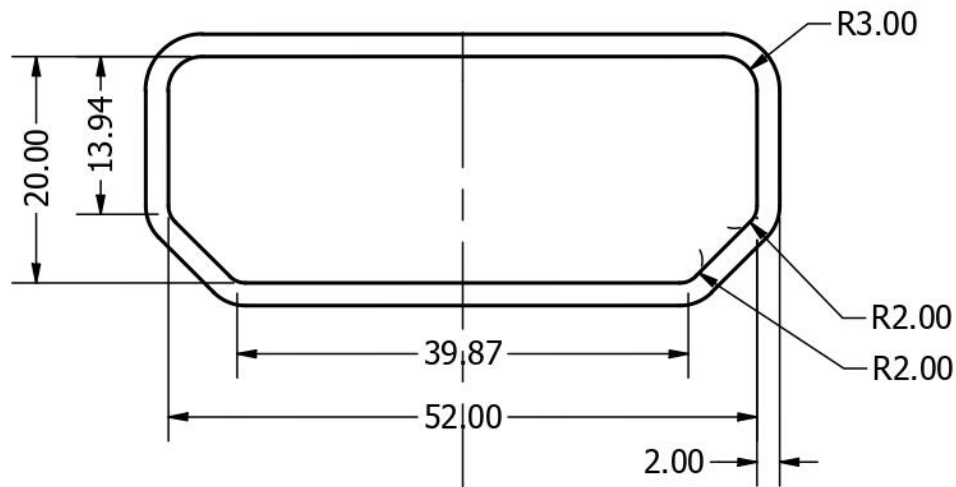





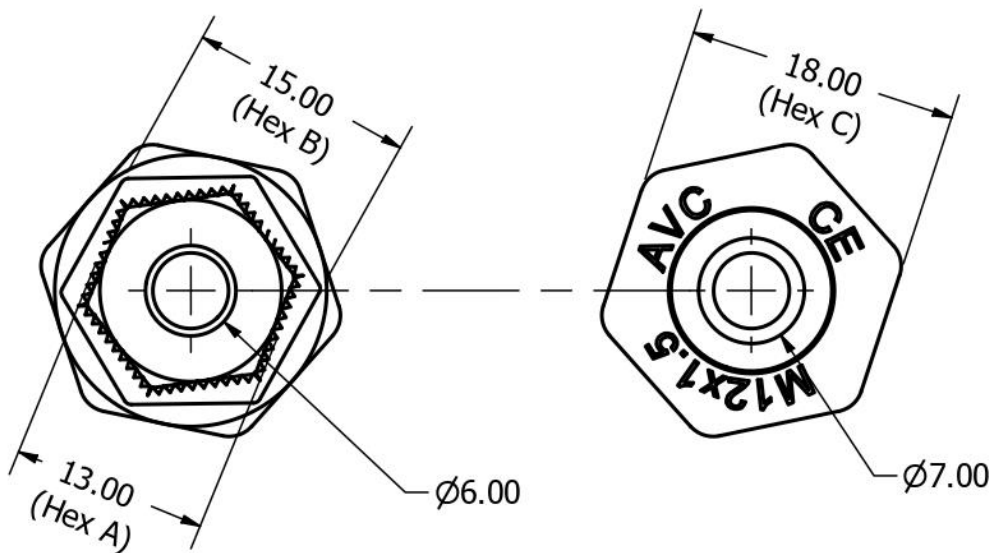
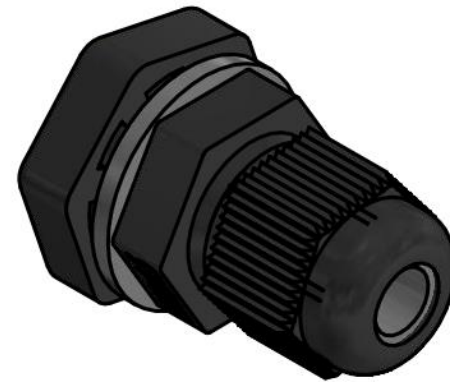
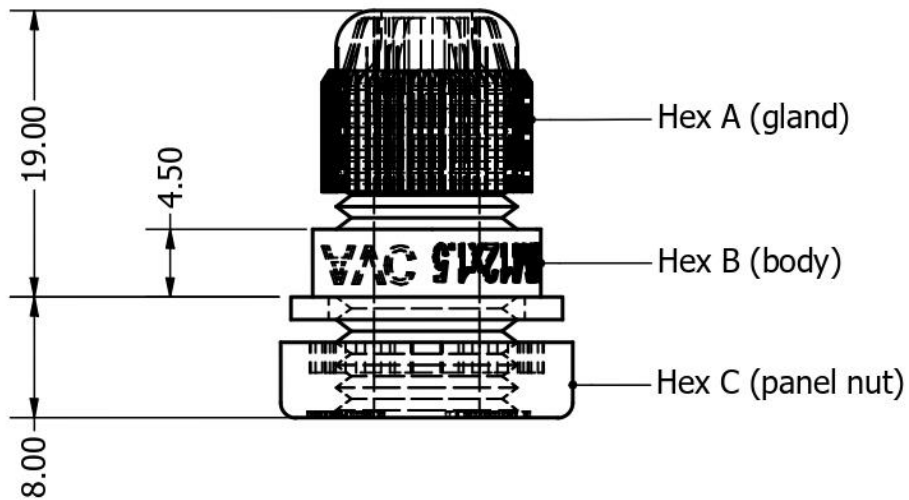
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL Phenolic Resin	MASS APPROX. 1.3 g	Creative LiveCam Sync HD720p, PCB		
MANUFACTURING METHOD		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group		
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (G)	PART NO G1	REV 1.0
	SIZE A4	SCALE 2 : 1	SHEET 3 OF 9	




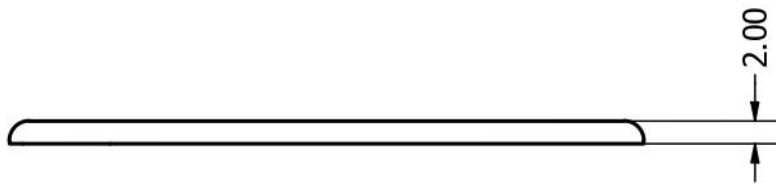
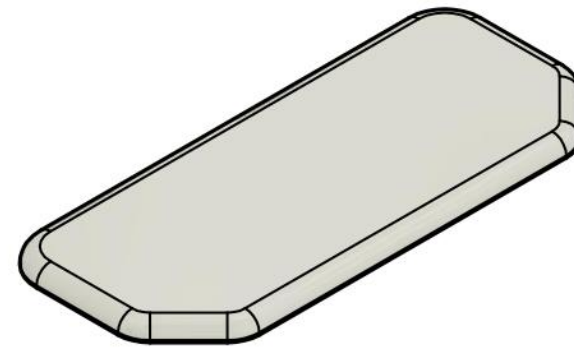
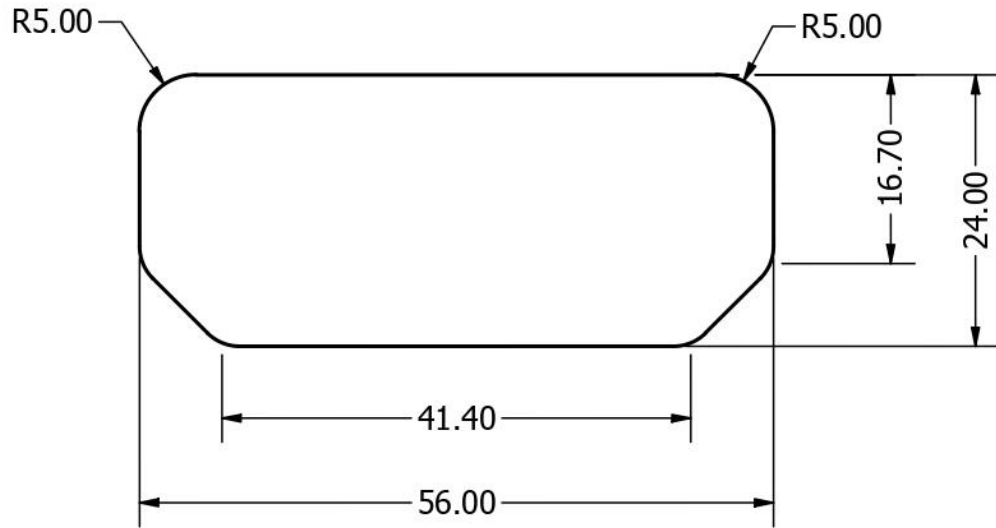
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL PVC-Piping	MASS APPROX. 10.7 g	cam Creative, inner base		
MANUFACTURING METHOD 3D-printed		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group		
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (G)	PART NO G2	REV 1.0
	SIZE A4	SCALE 1 : 1	SHEET 4 OF 9	




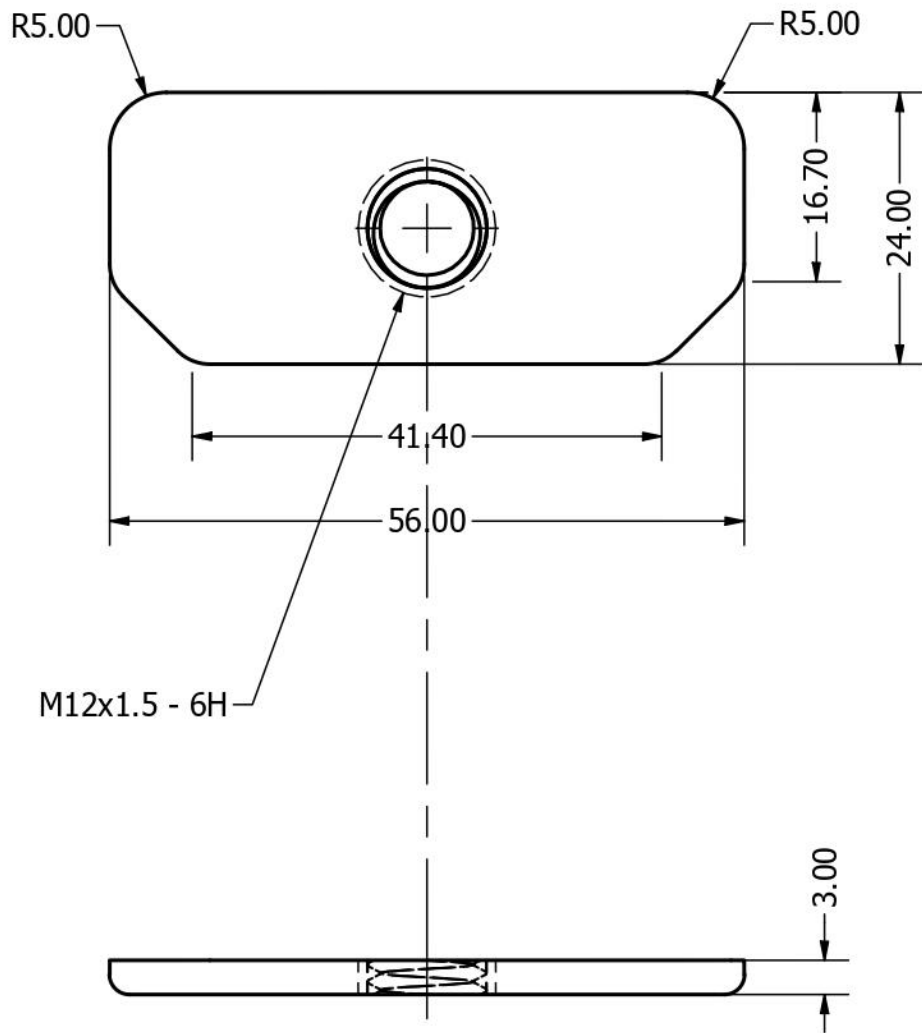
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE			
MATERIAL PVC-Piping	MASS APPROX. 6.3 g	cam Creative, pipe casing			
MANUFACTURING METHOD Thermofomed		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group			
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (G)	PART NO G3	REV 1.0	
	SIZE A4	SCALE 1.5 : 1	SHEET 5 OF 9		




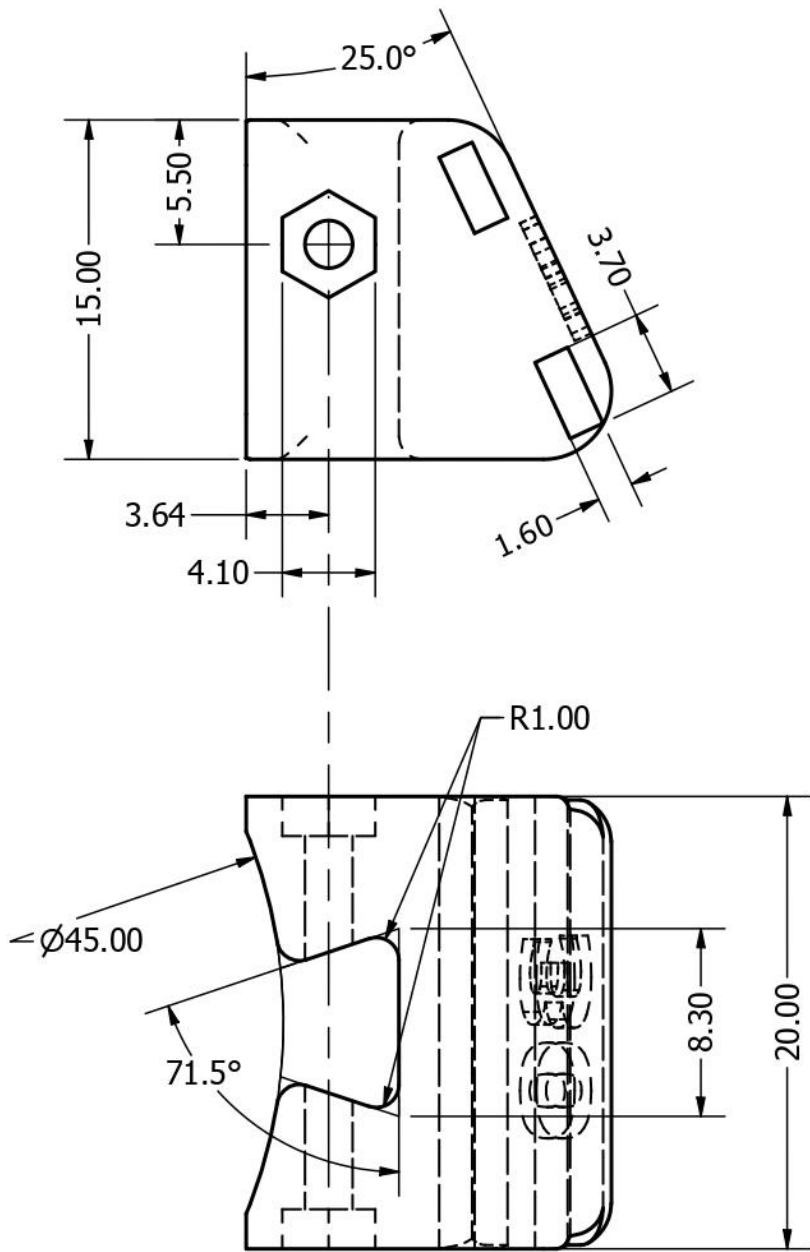
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL	MASS APPROX. 3.7 g	Cable gland, MGB12S, M12x1.5	
MANUFACTURING METHOD Standardized		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group	
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (GIJ)	PART NO GIJ4
	REV 1.0	SCALE 2 : 1	SHEET 6 OF 9




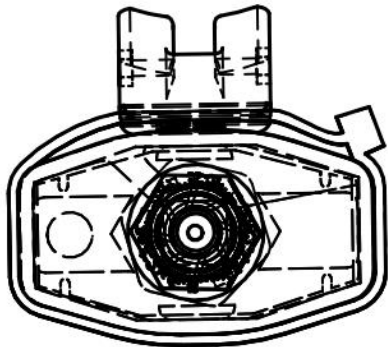
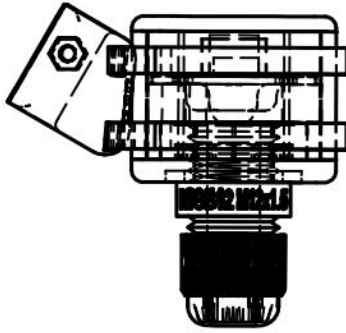
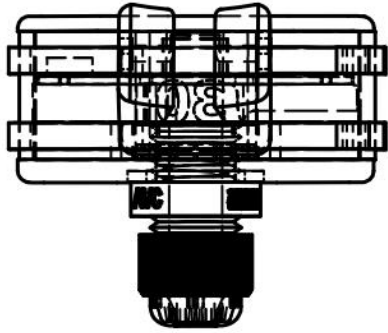
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL Polycarbonate, Clear	MASS APPROX. 3.0 g	cam Creative, upper casing cap		
MANUFACTURING METHOD		----- Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group -----		
 June 2020	PROJECT	ASSEMBLY (G)	PART NO G5	REV
	SIZE A4	SCALE 1.5 : 1	SHEET 7 OF 9	



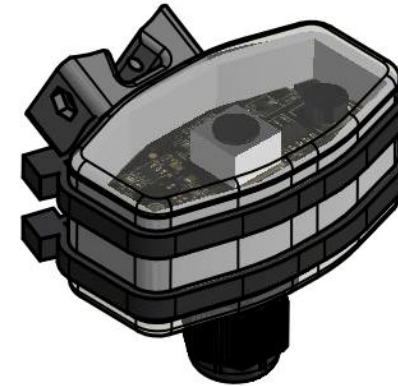
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL Polycarbonate, Clear	MASS APPROX. 4.2 g	cam Creative, lower casing cap		
MANUFACTURING METHOD		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group		
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (G)	PART NO G6	REV 1.0
	SIZE A4	SCALE 1.5 : 1	SHEET 8 OF 9	




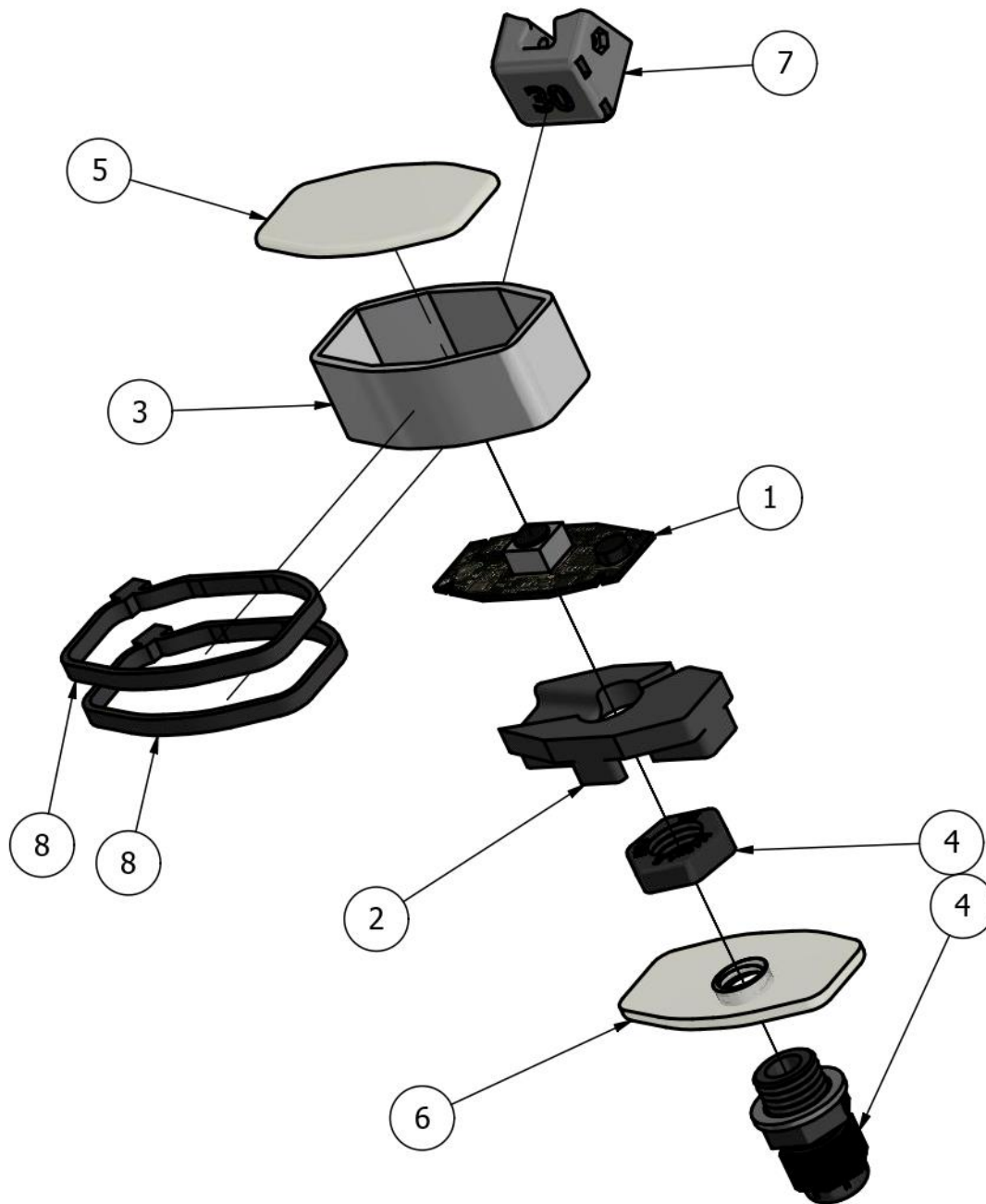
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL PLA Plastic	MASS APPROX. 3.7 g	cam mounting base, 30deg		
MANUFACTURING METHOD 3D-printed		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group		
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (G)	PART NO G7	REV 1.0
	SIZE A4	SCALE 3 : 1	SHEET 9 OF 9	



PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	G1	Hercules Dualpix HD720p Emotion
2	1	G2	cam Hercules, inner base
3	1	G3	cam Hercules, pipe casing
4	1	G1J4	Cable gland, MGB12S, M12x1.5
5	1	G5	cam Hercules, upper casing cap
6	1	G6	cam Hercules, lower casing cap
7	1	G7	cam mounting base, 30deg
8	2	G8	Cable tie, 3.5x200mm




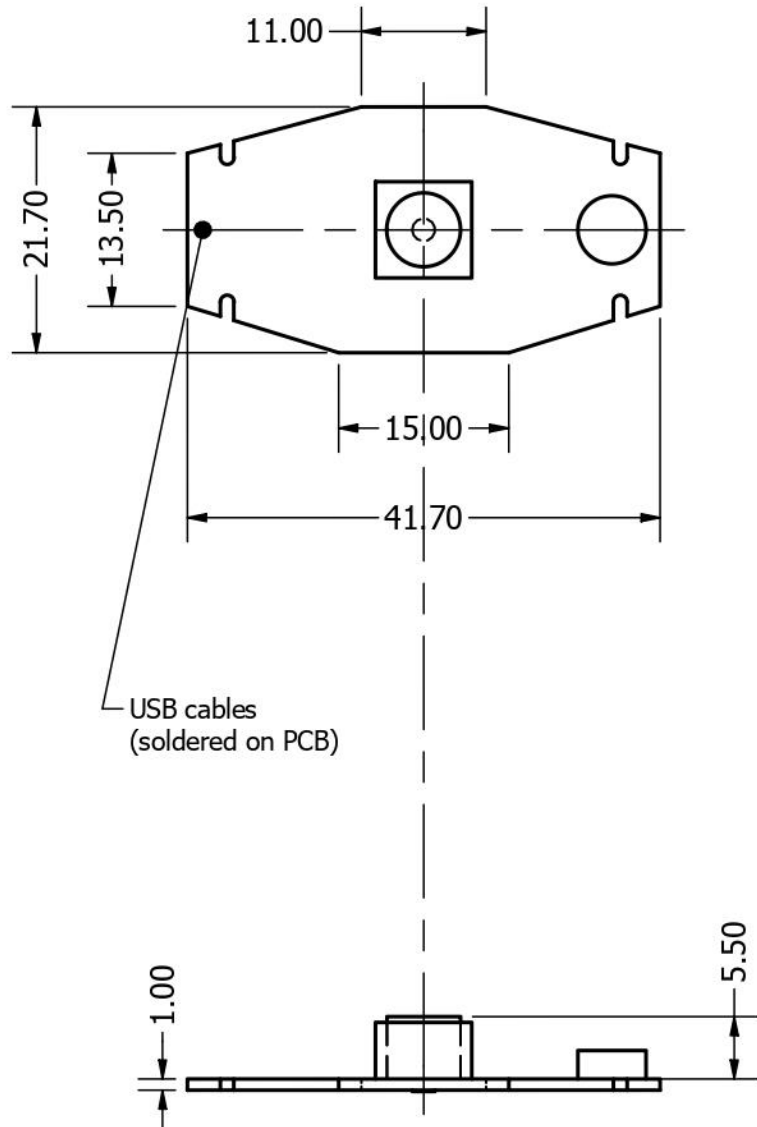
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE			
MATERIAL	MASS APPROX. 27.4 g	cam, Creative - Assembly			
MANUFACTURING METHOD		----- Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group -----			
	June 2020	PROJECT	ASSEMBLY	PART NO	REV
		UndEE	(G)	(Gb)	1.0
SIZE	SCALE	SHEET			
A4	1 : 1	1 OF 9			




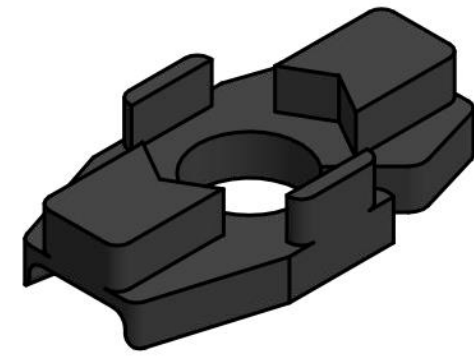
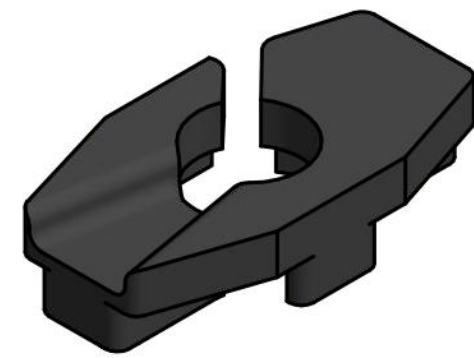
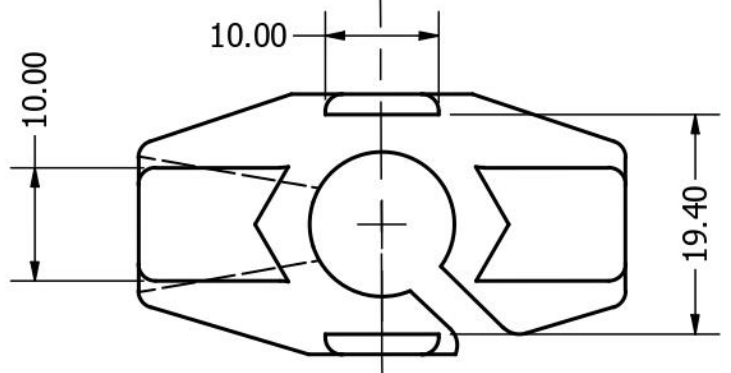
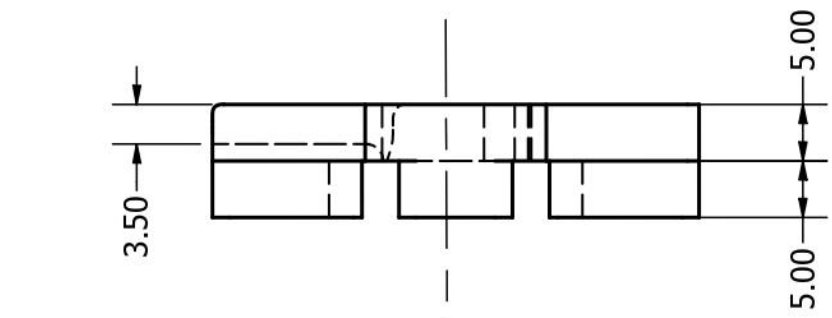
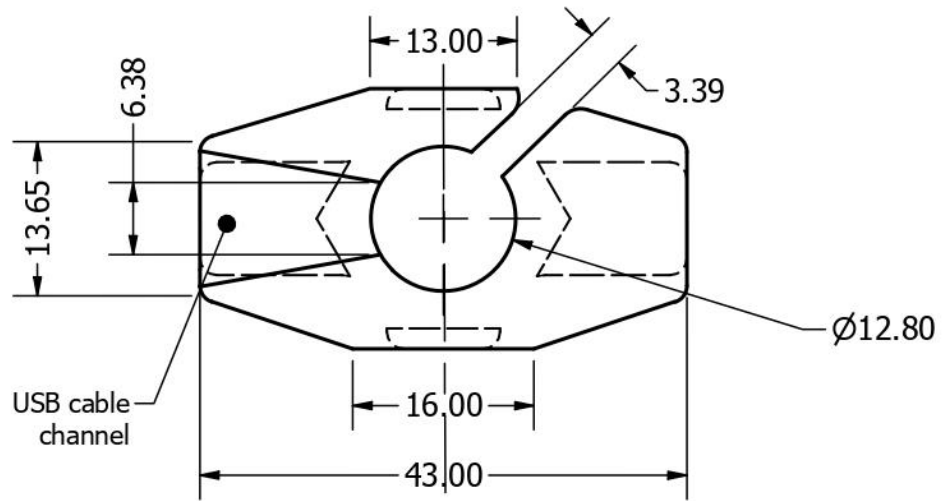
PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	G1	Hercules Dualpix HD720p Emotion
2	1	G2	cam Hercules, inner base
3	1	G3	cam Hercules, pipe casing
4	1	G4	Cable gland, MGB12S, M12x1.5
5	1	G5	cam Hercules, upper casing cap
6	1	G6	cam Hercules, lower casing cap
7	1	G7	cam mounting base, 30deg
8	2	G8	Cable tie, 3.5x200mm




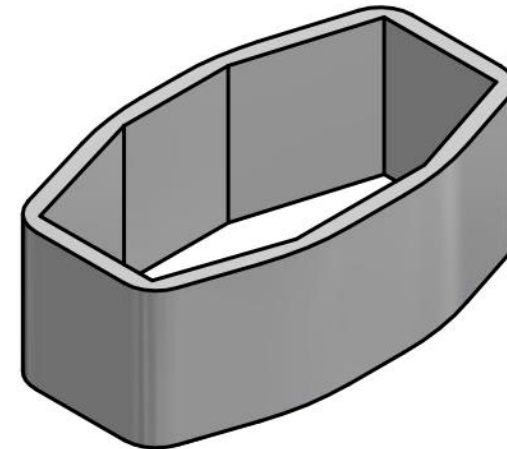
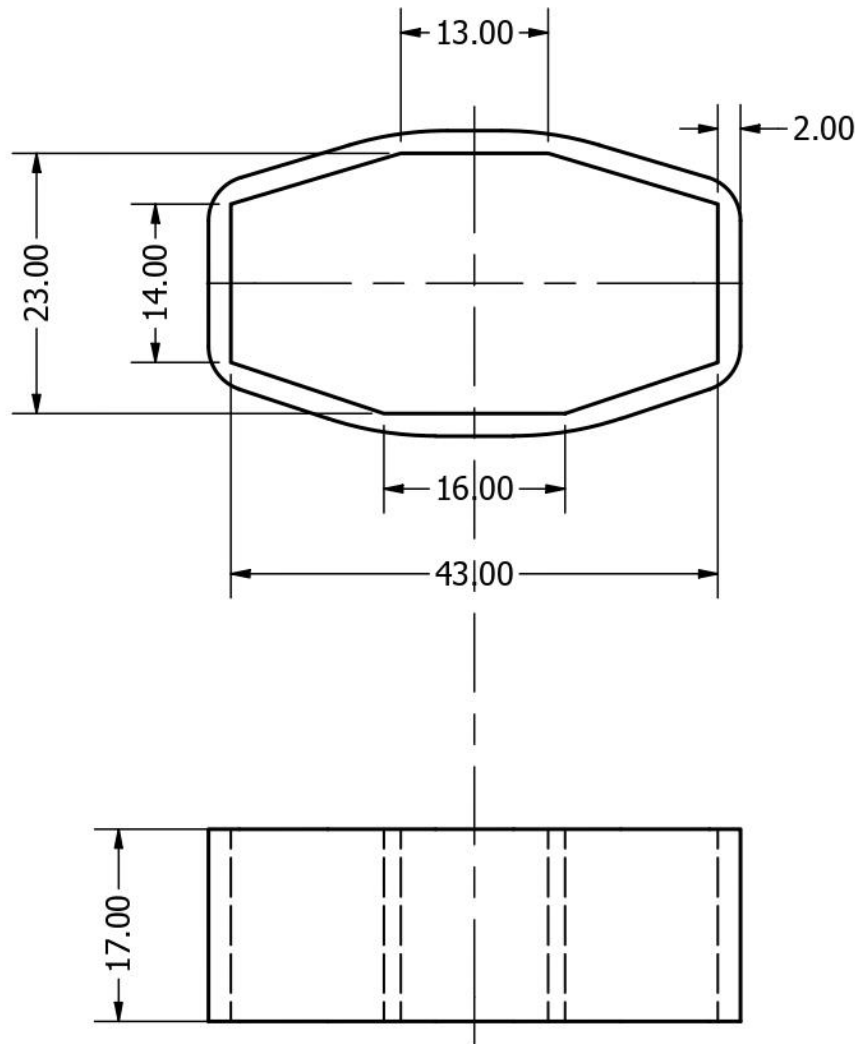
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL	MASS APPROX. 27.4 g	cam, Creative - Assembly	
MANUFACTURING METHOD		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group	
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (G)	PART NO (Gb)
	REV 1.0	SCALE 5/6	SHEET 2 OF 9
SIZE A4			




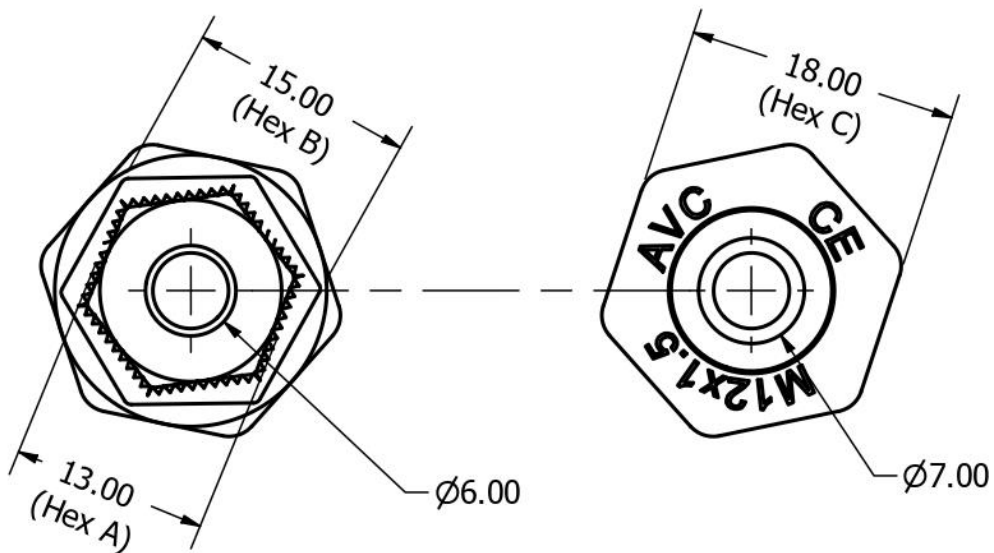
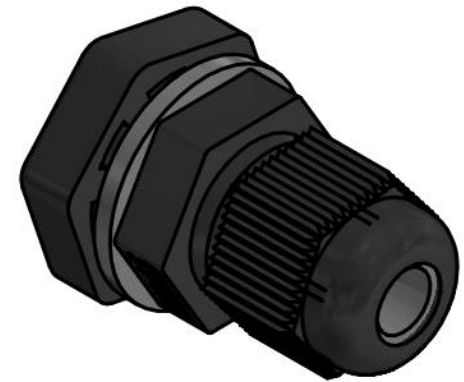
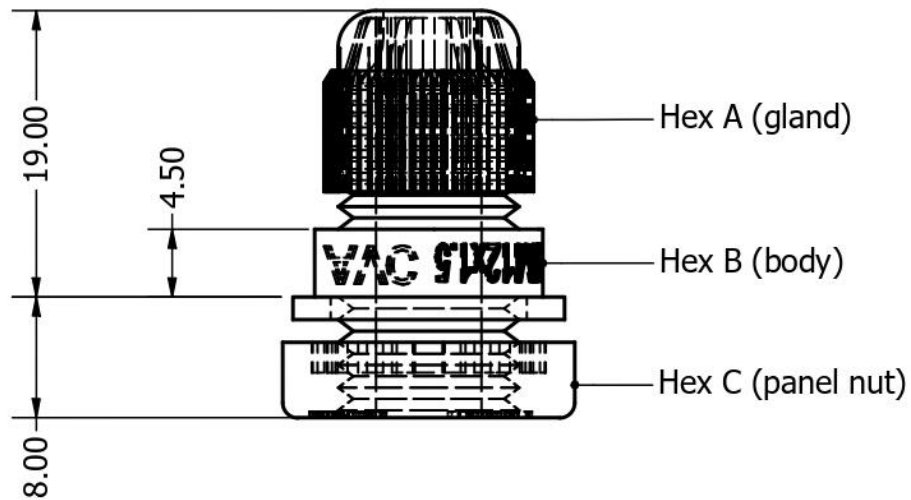
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL Phenolic Resin	MASS APPROX. 1.7 g	<i>Hercules Dualpix HD720p Emotion</i>		
MANUFACTURING METHOD		Control Systems Lab - NTUA <i>Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group</i>		
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (G)	PART NO G1	REV 1.0
	SIZE A4	SCALE 1.5 : 1	SHEET 3 OF 9	




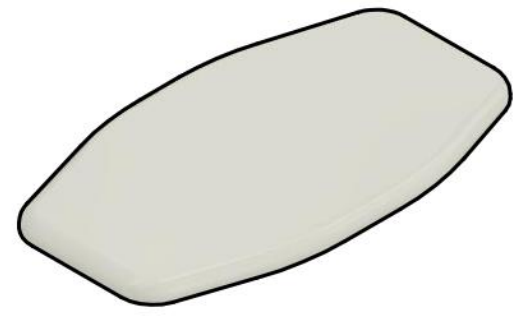
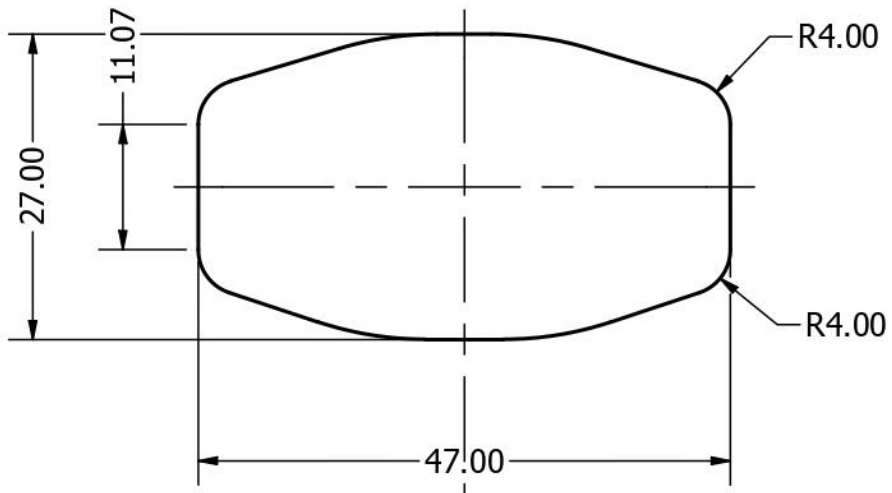
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE			
MATERIAL PLA Plastic	MASS APPROX. 5.4 g	cam Hercules, inner base			
MANUFACTURING METHOD 3D-printed		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group			
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (G)	PART NO G2	REV 1.0	
	SIZE A4	SCALE 1.5 : 1	SHEET 4 OF 9		




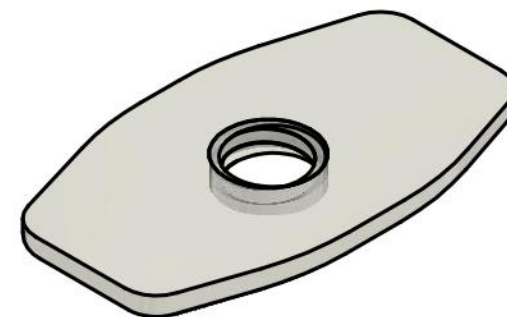
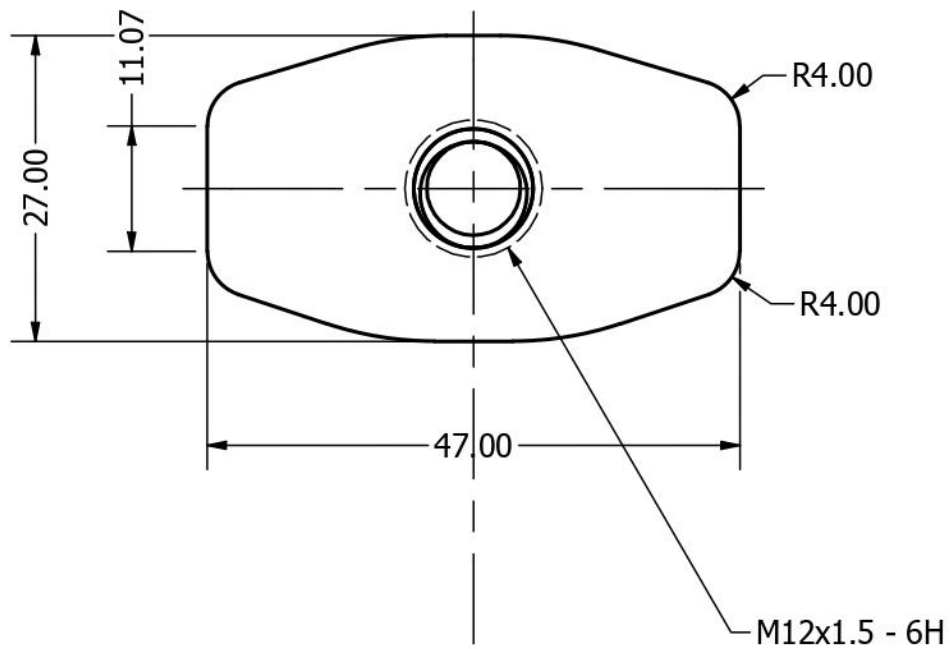
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE			
MATERIAL PLA Plastic	MASS APPROX. 5.0 g	cam Hercules, pipe casing			
MANUFACTURING METHOD Thermoformed		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group			
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (G)	PART NO G3	REV 1.0	
	SIZE A4	SCALE 1.5 : 1	SHEET 5 OF 9		




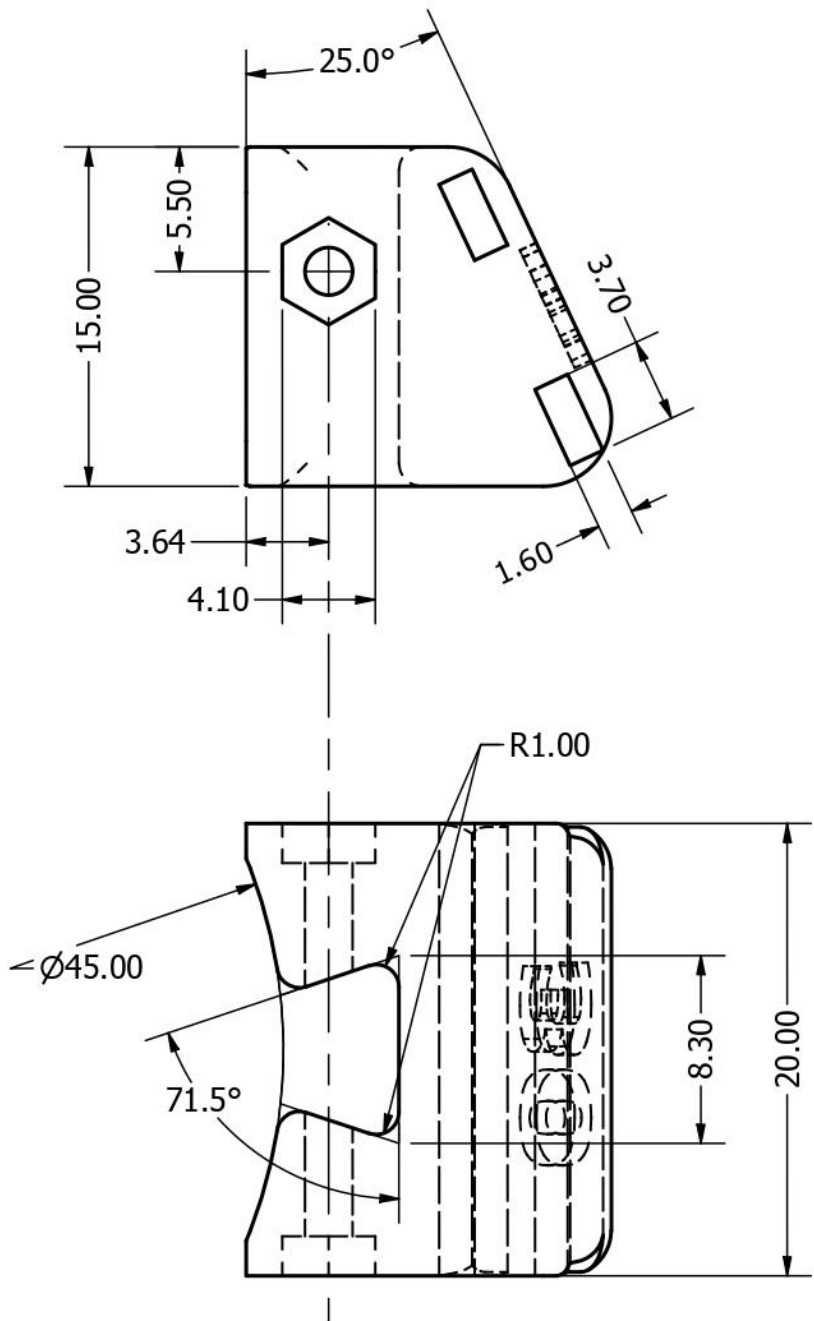
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL	MASS APPROX. 3.7 g	Cable gland, MGB12S, M12x1.5	
MANUFACTURING METHOD Standardized		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group	
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (GIJ)	PART NO GIJ4
	REV 1.0	SCALE 2 : 1	SHEET 6 OF 9




DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE			
MATERIAL Polycarbonate, Clear	MASS APPROX. 2.6 g	cam Hercules, upper casing cap			
MANUFACTURING METHOD		----- Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group -----			
	June 2020	PROJECT	ASSEMBLY	PART NO	REV
		UndEE	(G)	G5	1.0
SIZE	SCALE	SHEET			
A4	1.5 : 1	7 OF 9			



DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL Polycarbonate, Clear	MASS APPROX. 3.6 g	cam Hercules, lower casing cap		
MANUFACTURING METHOD		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group		
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (G)	PART NO G6	REV 1.0
	SIZE A4	SCALE 1.5 : 1	SHEET 8 OF 9	

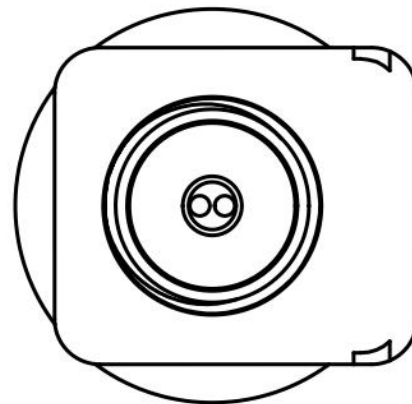
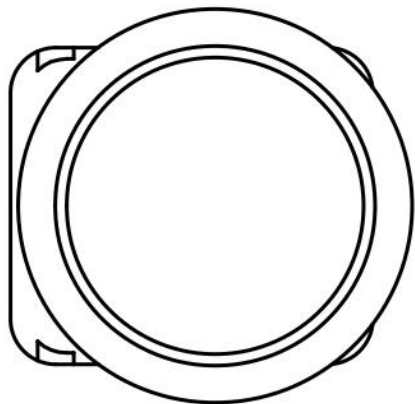
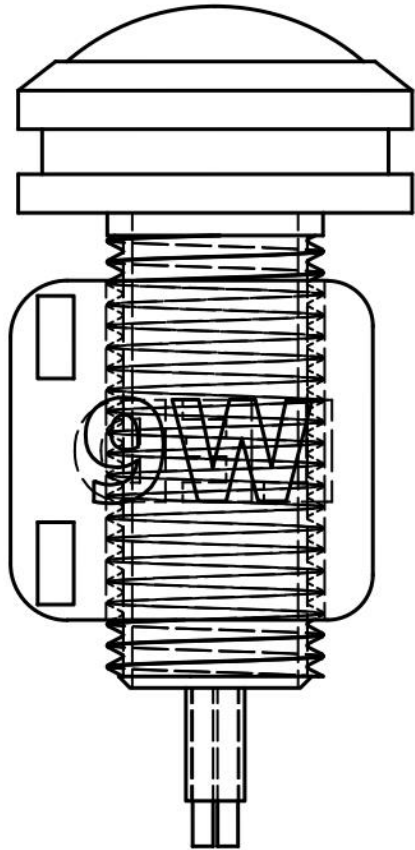



DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE			
MATERIAL PLA Plastic	MASS APPROX. 3.7 g	cam mounting base, 30deg			
MANUFACTURING METHOD 3D-printed		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group			
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (G)	PART NO G7	REV 1.0	
	SIZE A4	SCALE 3 : 1	SHEET 9 OF 9		

(H) - LED Lamp assembly



PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	H1	LED lamp, 9W-12V, "eagle-eye"
2	1	H2	Base, LED lamp



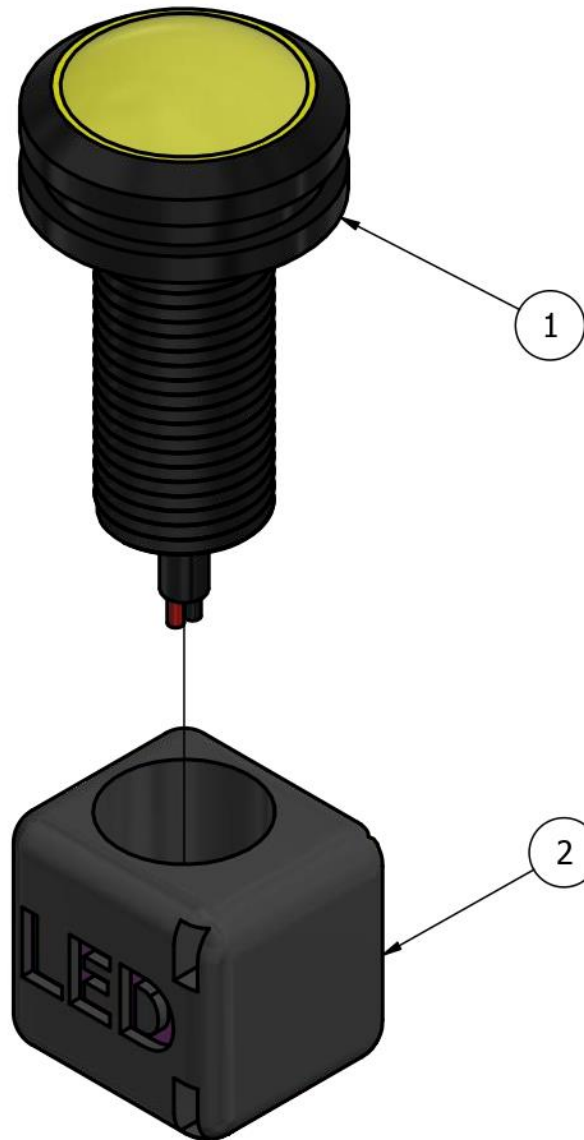
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE			
MATERIAL	MASS APPROX. 7.8 g	LED lamp - Assembly			
MANUFACTURING METHOD		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group			
	June 2020	PROJECT	ASSEMBLY	PART NO	REV
		UndEE	(H)	(H)	1.0
SIZE	SCALE	SHEET			
A4	3 : 1	1		OF 4	


PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	H1	LED lamp, 9W-12V, "eagle-eye"
2	1	H2	Base, LED lamp

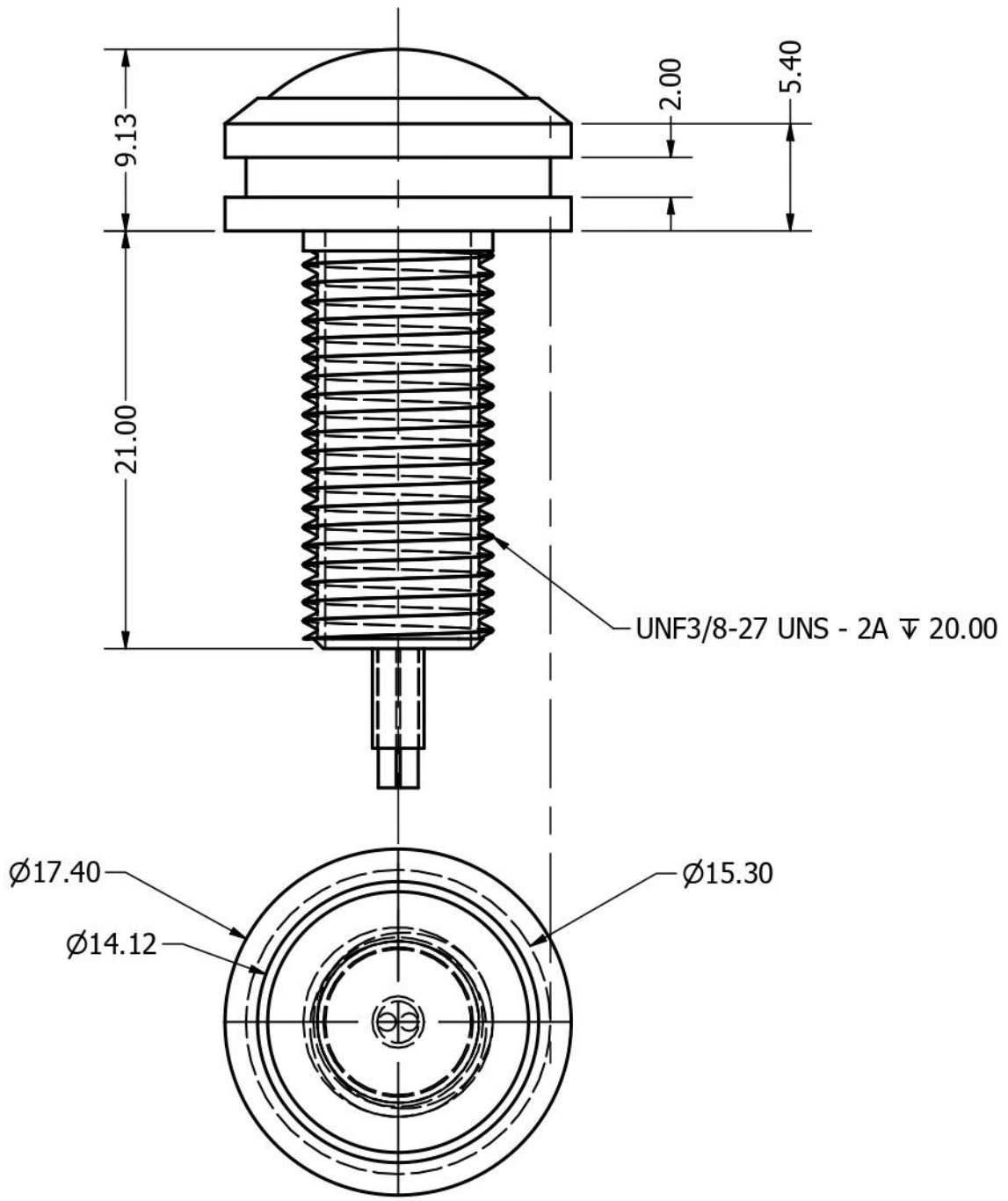
Assembly Notes:


- Fit LED lamp [H1] body into base [H2] like a screw
- Use cable ties (tire-up)*, passing through side holes, to fix assembly on camera assembly [Gn] body (see also instructions of assembly [Gn])

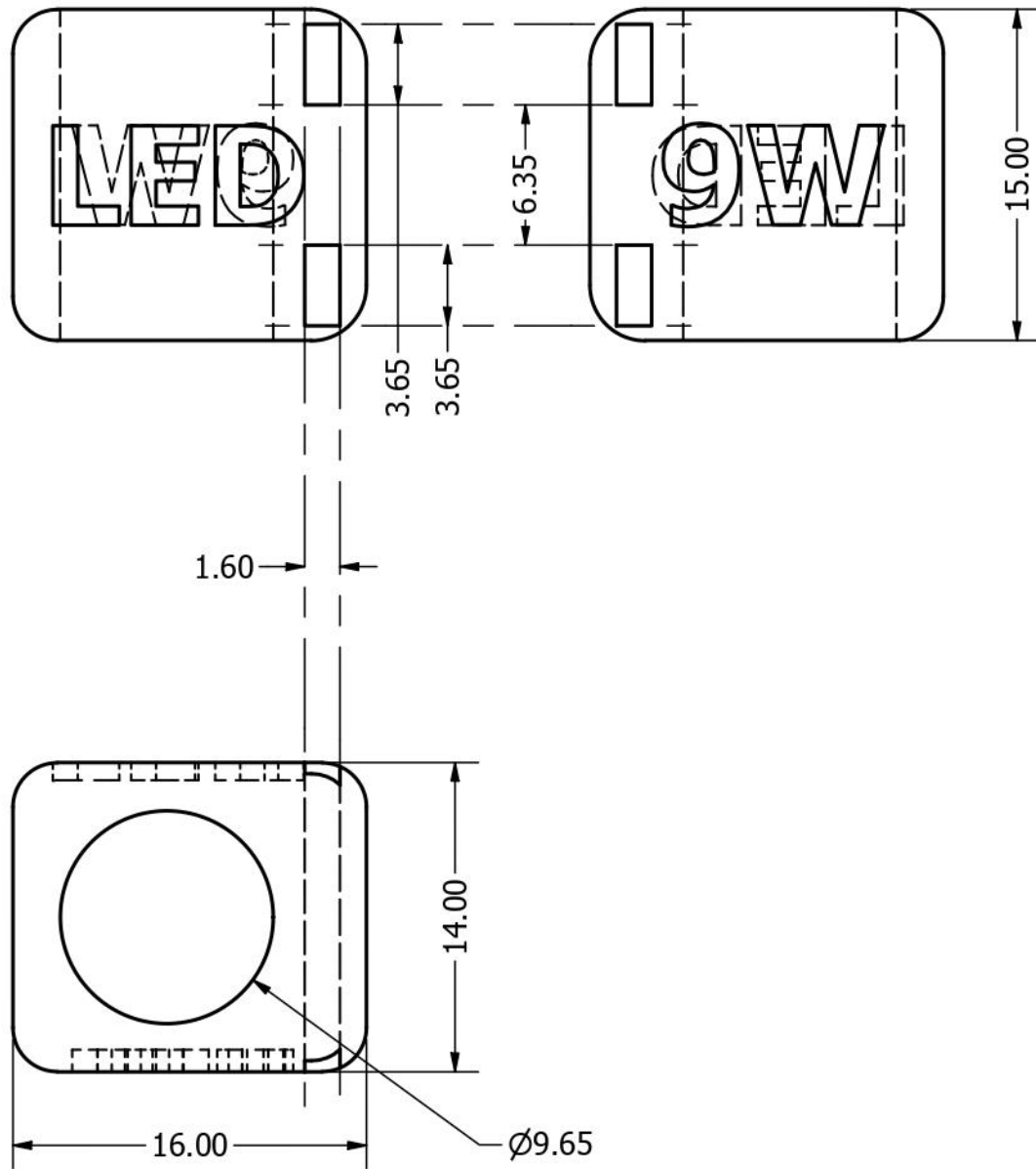
* 3.5x200mm will fit perfectly




DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL	MASS APPROX. 7.8 g	LED lamp - Assembly		
MANUFACTURING METHOD		----- Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group -----		
	June 2020	PROJECT	ASSEMBLY PART NO	REV
		UndEE	(H)	(H)
SIZE	SCALE	SHEET		
A4	2 : 1	2 OF 4		

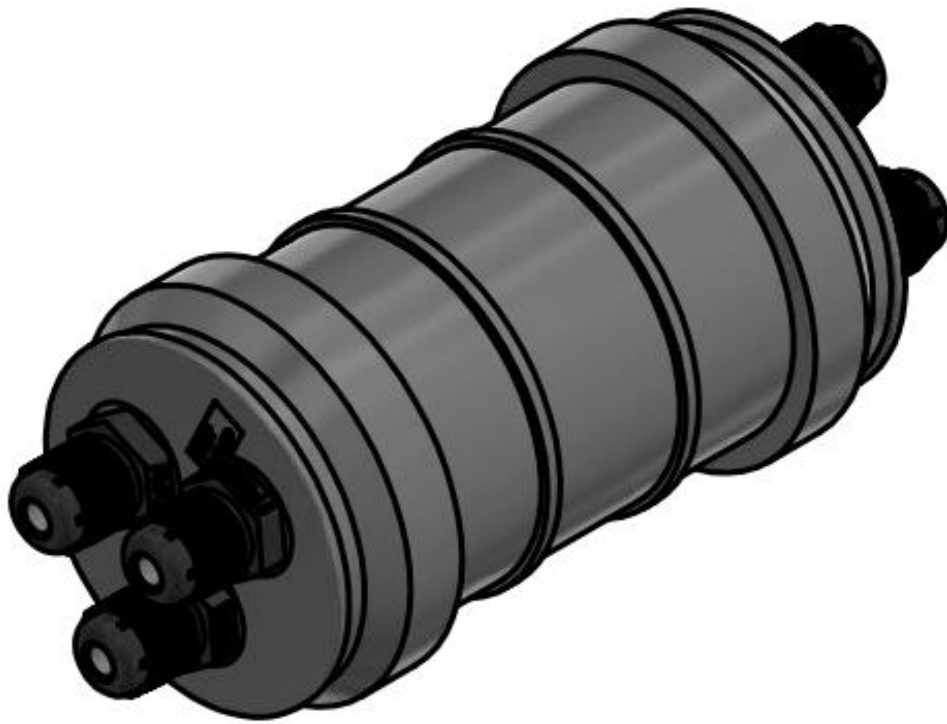


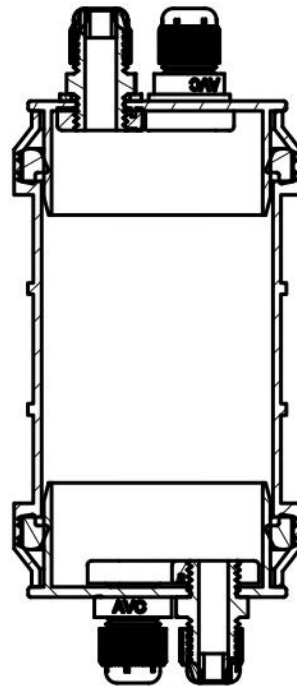
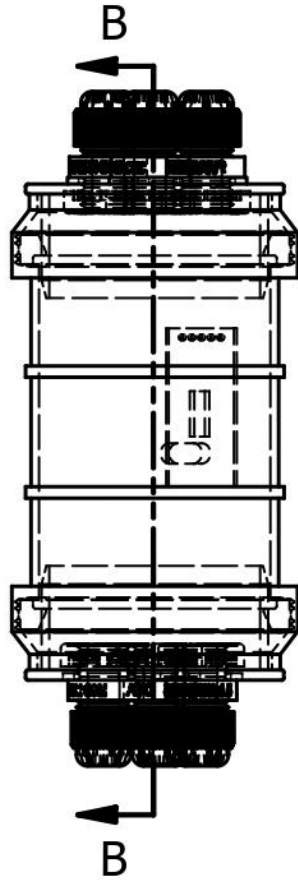
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL Aluminum 6061	MASS APPROX. 5.5 g	LED lamp, 9W-12V, "eagle-eye"	
MANUFACTURING METHOD		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group	
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY H1	PART NO H1
	REV 1.0	SHEET	
SIZE A4	SCALE 3 : 1	3 OF 4	



DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE			
MATERIAL PLA Plastic	MASS APPROX. 2.4 g	Base, LED lamp			
MANUFACTURING METHOD 3D-printed		----- Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group -----			
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (H)	PART NO H2	REV 1.0	
	SIZE A4	SCALE 3 : 1	SHEET 4 OF 4		

(I) - Cable Host Buoy assembly

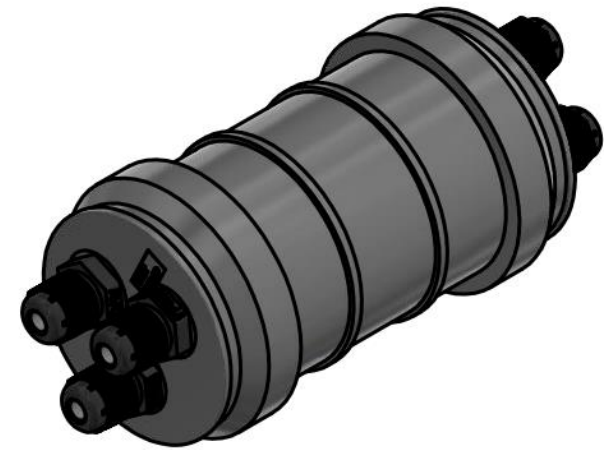





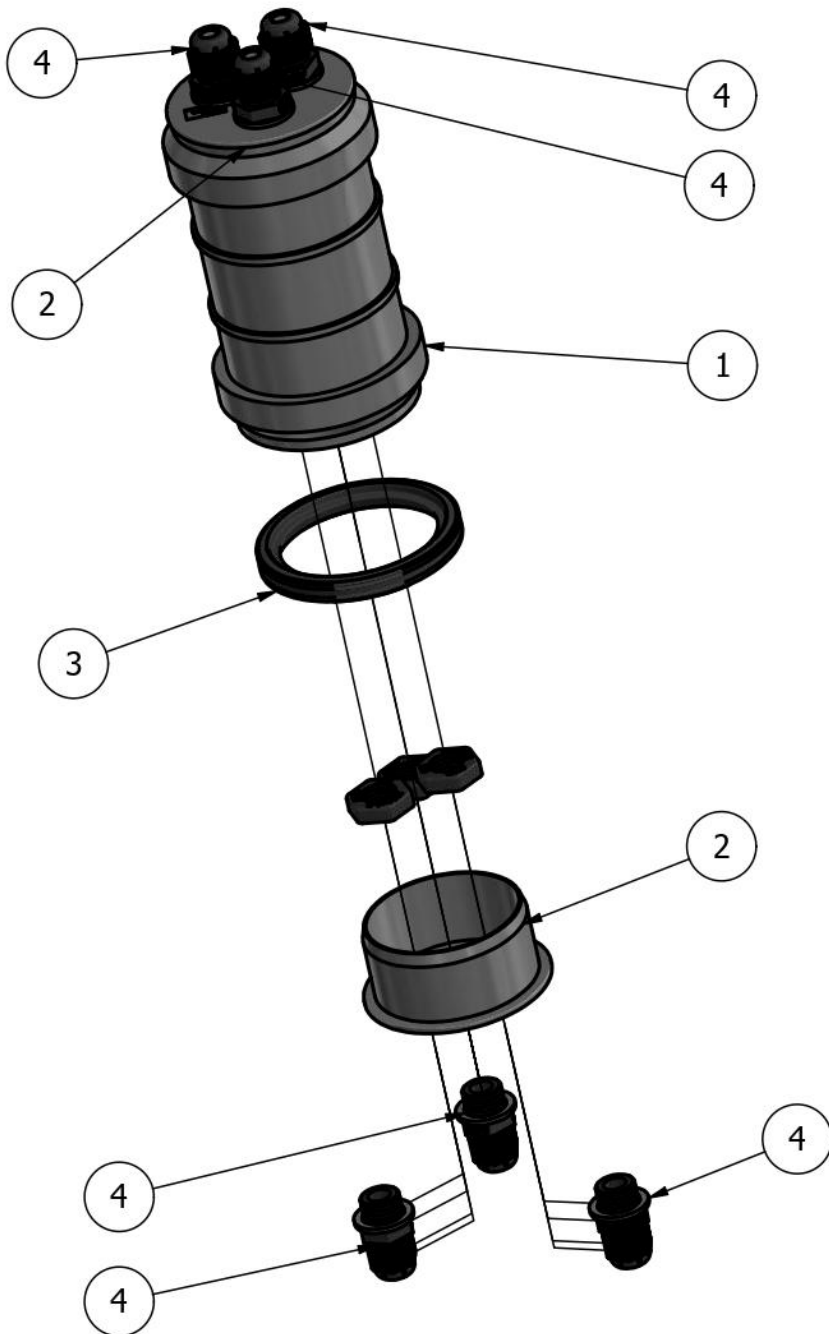
SECTION B-B
SCALE 3 / 5



PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	I1	Sliding sleeve, PP 50, Valsir
2	2	I2	Pipe plug, PP 50, Valsir
3	2	I3	Lip seal ring, DN50 BL-581, MOL
4	6	GD4	Cable gland, MGB12S, M12x1.5
5	2	I5	USB active extension PCB



DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL	MASS APPROX. 88.7 g	Buoy, cable host, USB extentions	
MANUFACTURING METHOD		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group	
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (I)	PART NO
	SIZE A4	SCALE 3 / 5	REV 1.0
		SHEET 1 OF 7	

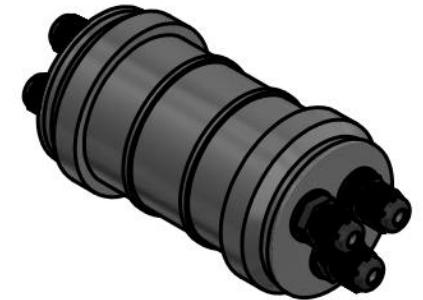



PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	I1	Sliding sleeve, PP 50, Valsir
2	2	I2	Pipe plug, PP 50, Valsir
3	2	I3	Lip seal ring, DN50 BL-581, MOL
4	6	GIJ4	Cable gland, MGB12S, M12x1.5
5	2	I5	USB active extension PCB

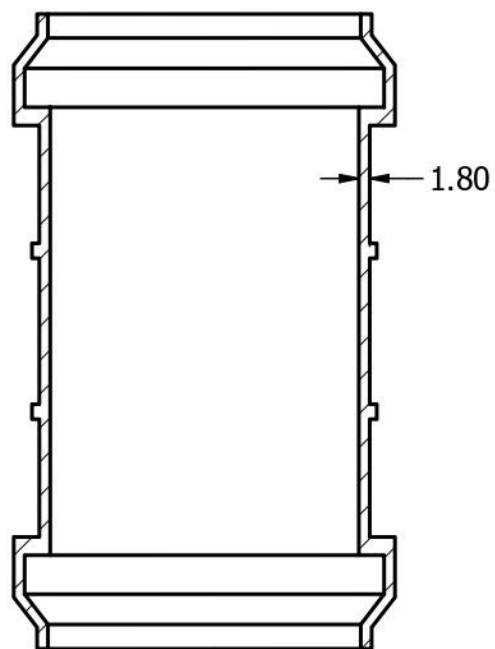
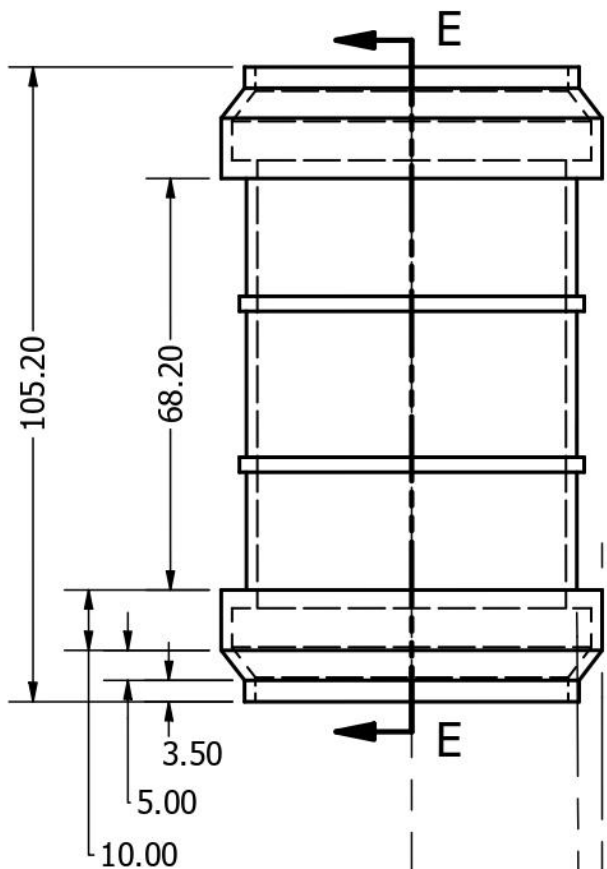
Assembly Notes:

- Apply silicone lubricant to parts [I3] and put in corresponding grooves of part [I1]
- (Pass USB/power cables through cable glands first)*
- Apply silicone sealant to male threads and base of cable glands [GIJ4]
- Screw cable glands [GIJ4] to pipe plug [I2] with moderate torque
- Apply silicone sealant to cable gland inner nuts' faces and tighten from the inside of pipe plug [I2] with moderate torque
- Connect USB/power cables, USB extension boards
- Place plugs [I3] on part [1]
- Tighten cable glands around cables

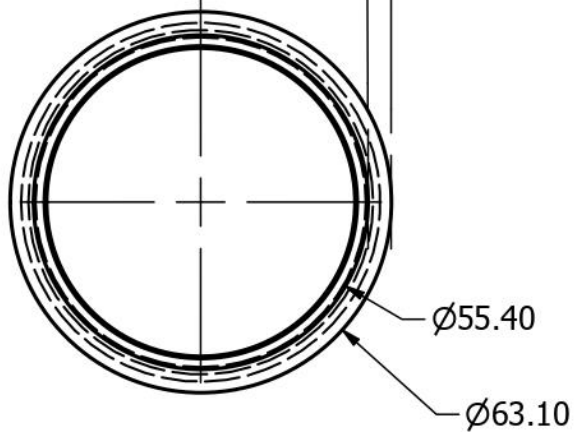
* valid only for the first time of assembly




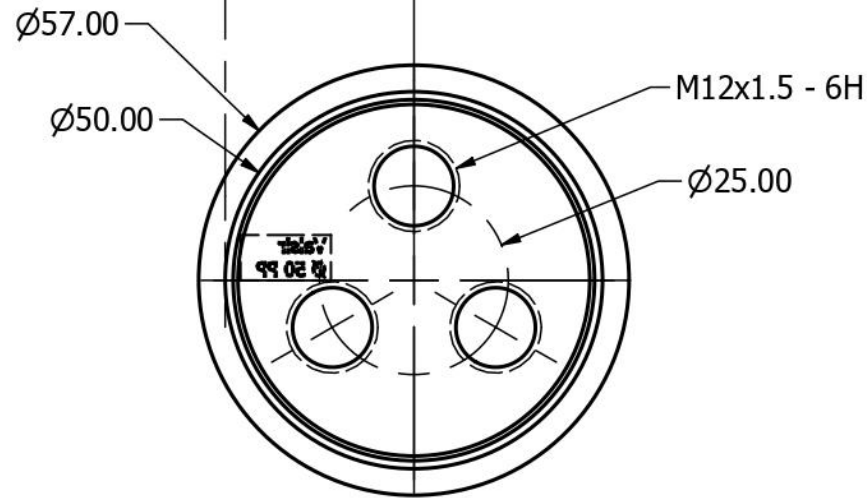
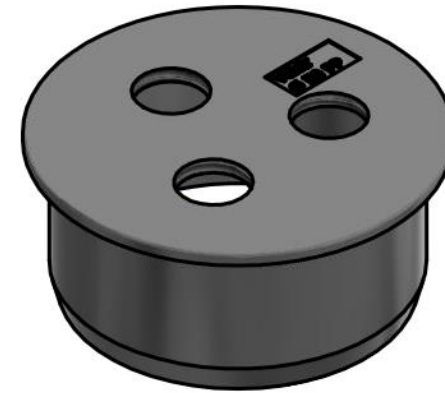
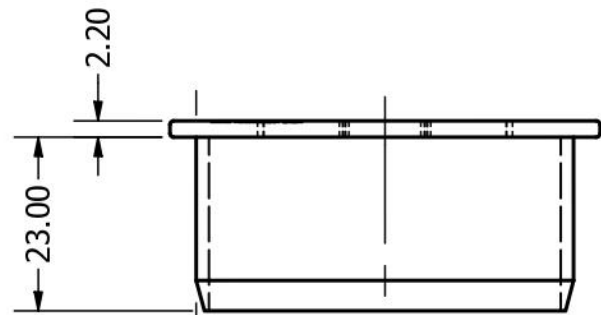
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL	MASS APPROX. 88.7 g	Buoy, cable host, USB extentions	
MANUFACTURING METHOD		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group	
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (I)	PART NO
	SIZE A4	SCALE 2 / 5	REV 1.0
		SHEET 2 OF 7	




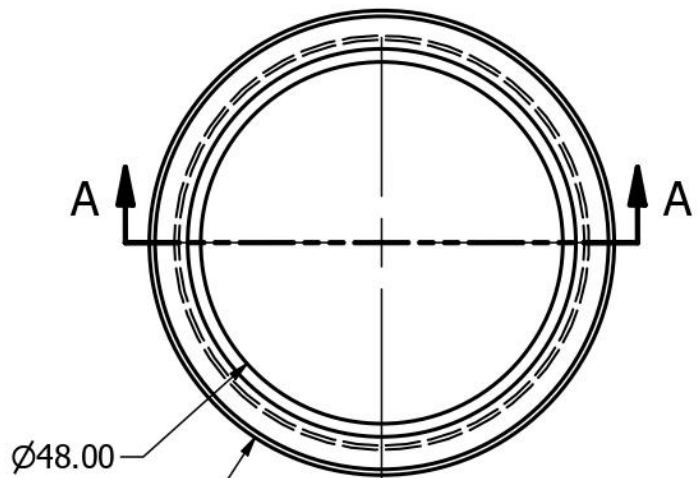
SECTION E-E
SCALE 4 / 5



DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL Polypropylene	MASS APPROX. 34.9 g	Sliding sleeve, PP 50, Valsir		
MANUFACTURING METHOD Standardized		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group		
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (I)	PART NO I1	REV 1.0
	SIZE A4	SCALE 4 / 5	SHEET 3 OF 7	



DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE			
MATERIAL Polypropylene	MASS APPROX. 9.5 g	Pipe plug, PP 50, Valsir			
MANUFACTURING METHOD Standardized		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group			
	June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (I)	PART NO I2	REV 1.0
		SIZE A4	SCALE 1 : 1	SHEET 4 OF 7	

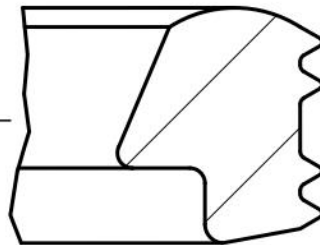


Ø48.00

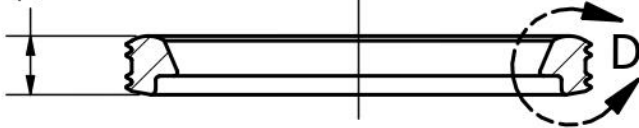
Ø61.60




DETAIL D
SCALE 4 : 1

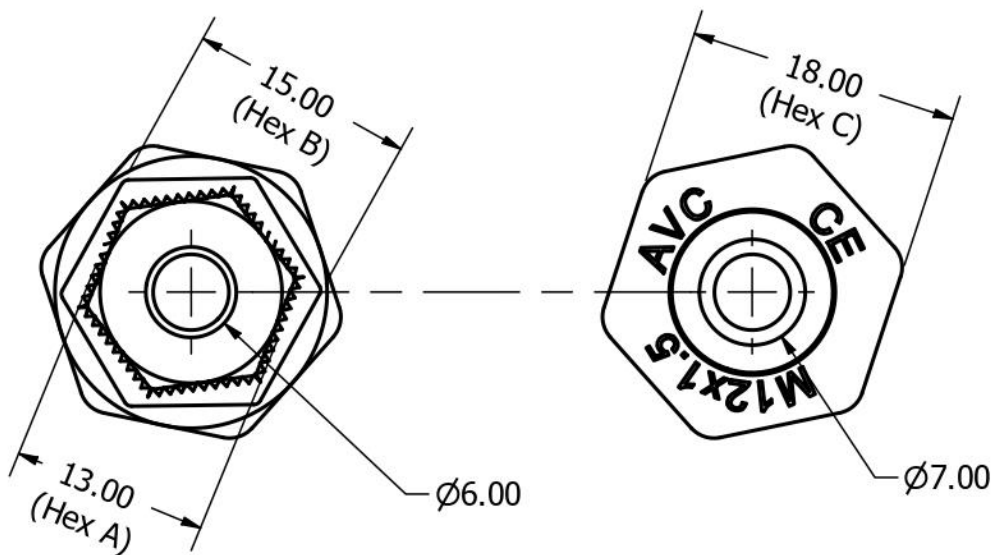
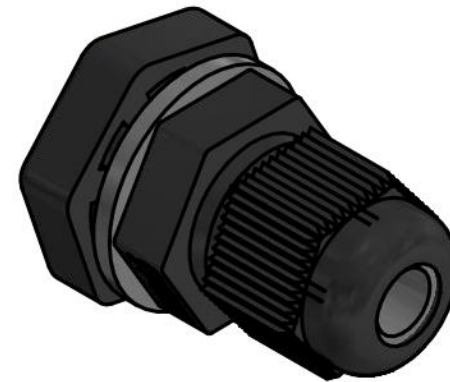
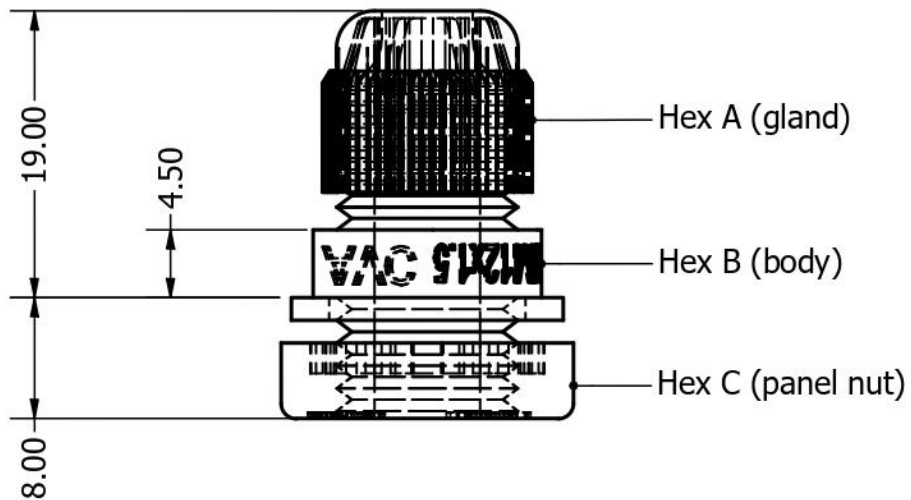



7.80

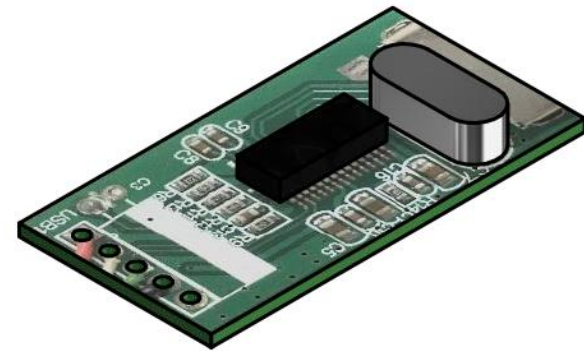
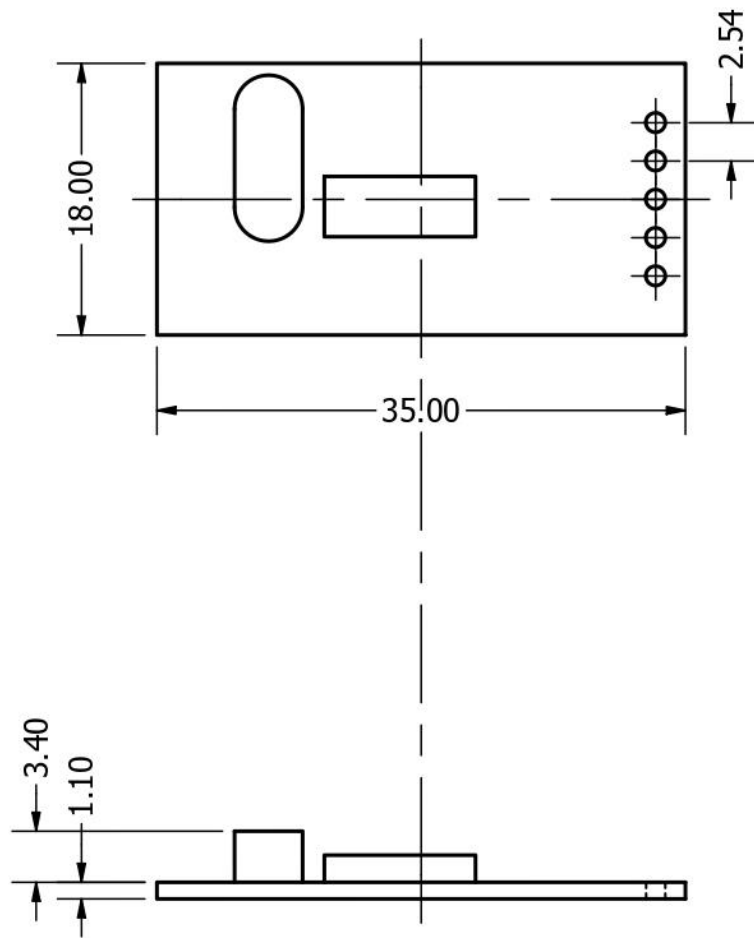



SECTION A-A
SCALE 1 : 1

DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE			
MATERIAL Rubber	MASS APPROX. 5.8 g	Lip seal ring, DN50 BL-581, MOL			
MANUFACTURING METHOD Standardized		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group			
	June 2020	PROJECT	ASSEMBLY	PART NO	REV
		UndEE	(I)	I3	1.0
SIZE	SCALE	SHEET			
A4	1 : 1	5		OF 7	

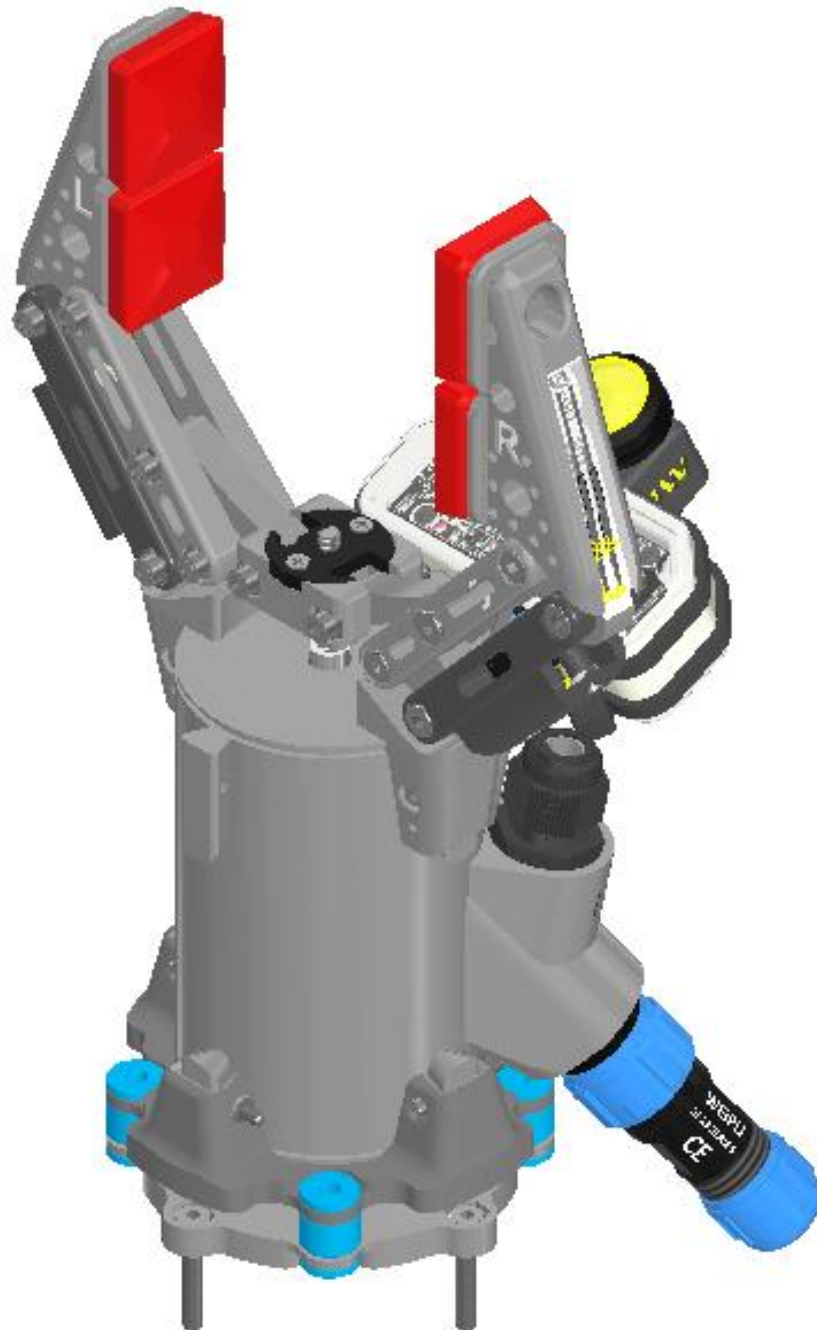


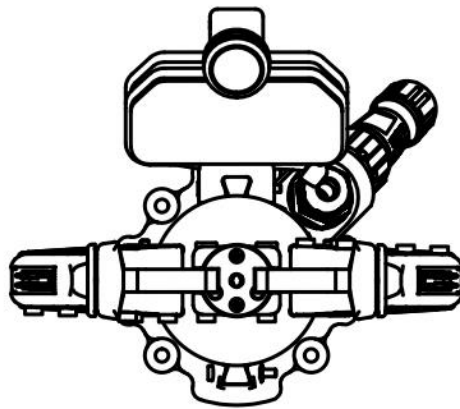
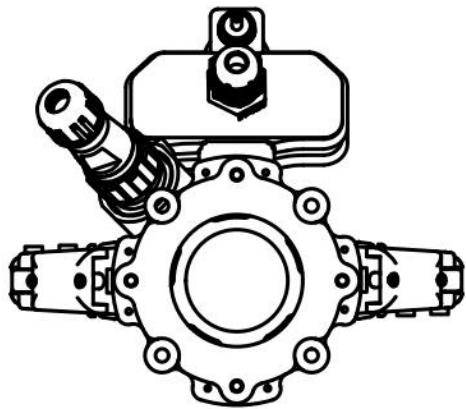
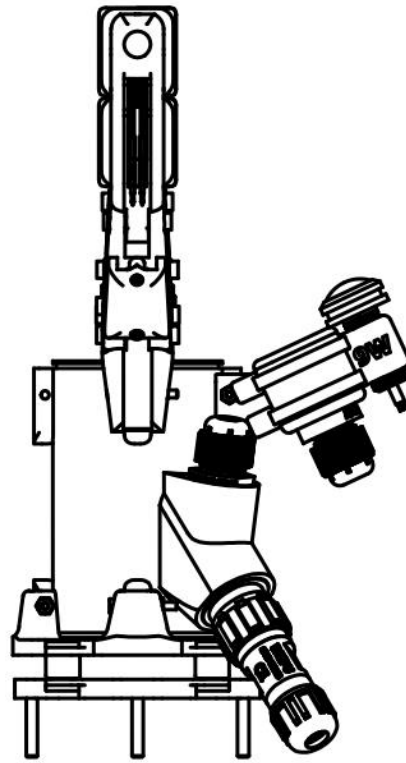
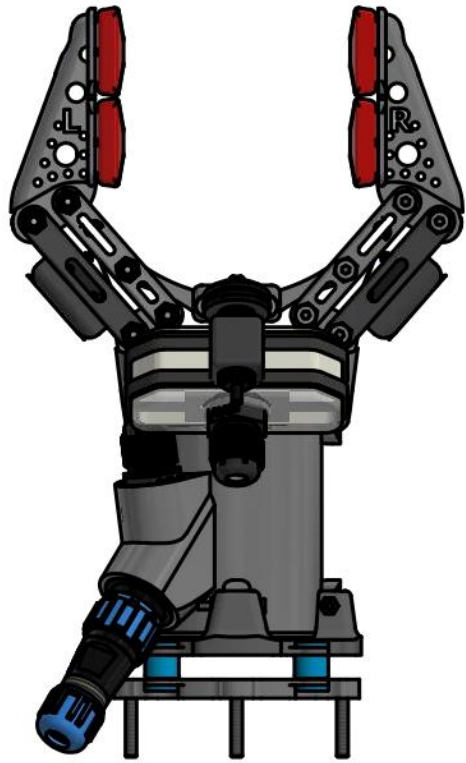
DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL	MASS APPROX. 3.7 g	Cable gland, MGB12S, M12x1.5	
MANUFACTURING METHOD Standardized		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group	
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (GIJ)	PART NO GIJ4
	REV 1.0	SHEET	
SIZE A4	SCALE 2 : 1	6 OF 7	



DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE			
MATERIAL Phenolic Resin	MASS APPROX. 1.3 g	USB active extention PCB			
MANUFACTURING METHOD		----- Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group -----			
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (I)	PART NO I5	REV 1.0	
	SIZE A4	SCALE 2 : 1	SHEET 7 OF 7		


(J) - "UndEE" System assembly

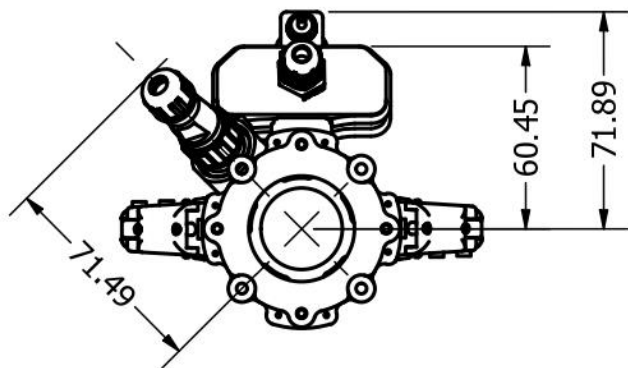
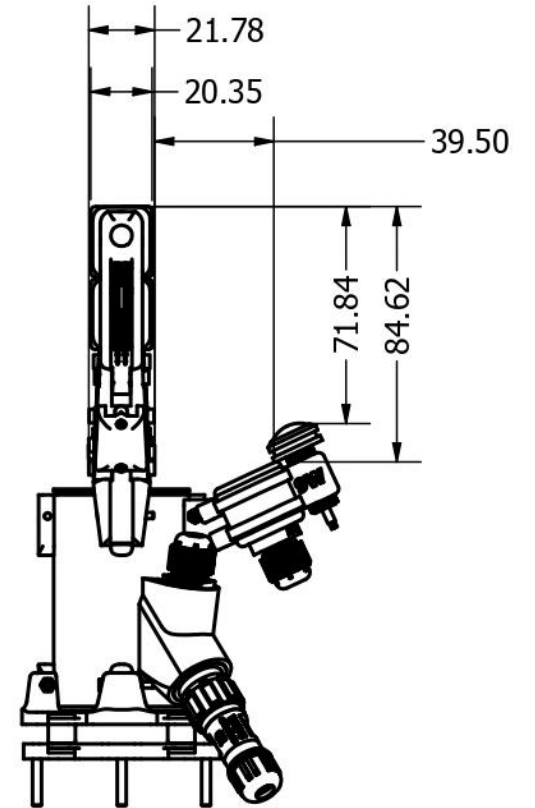
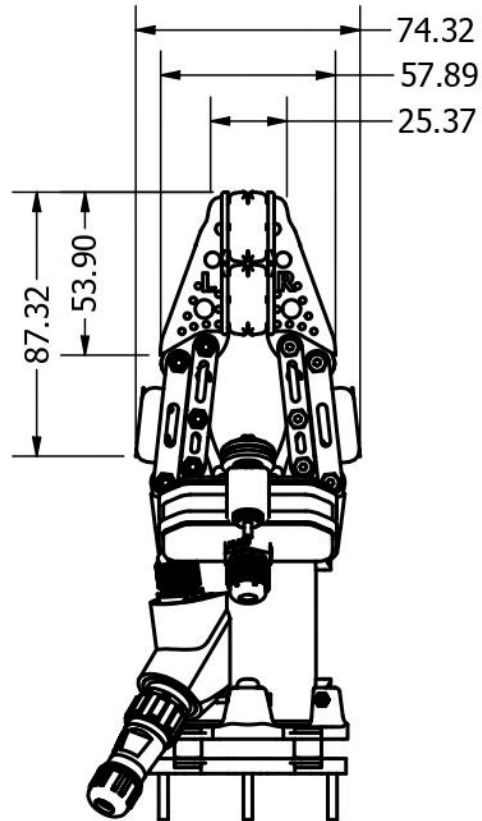
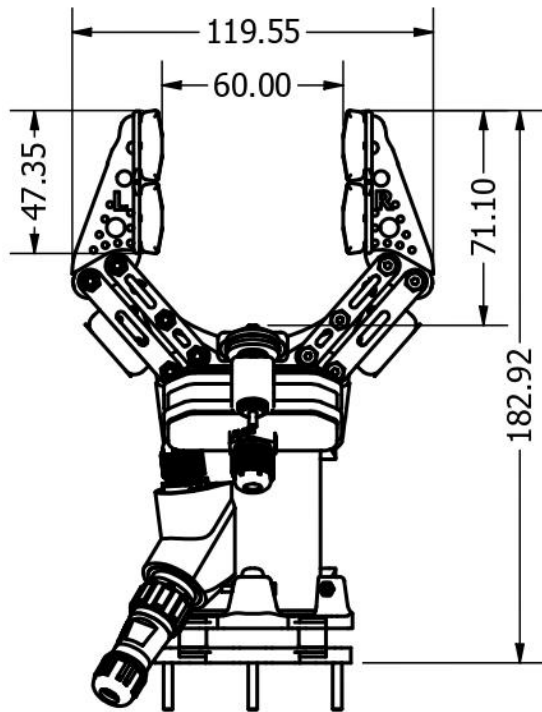





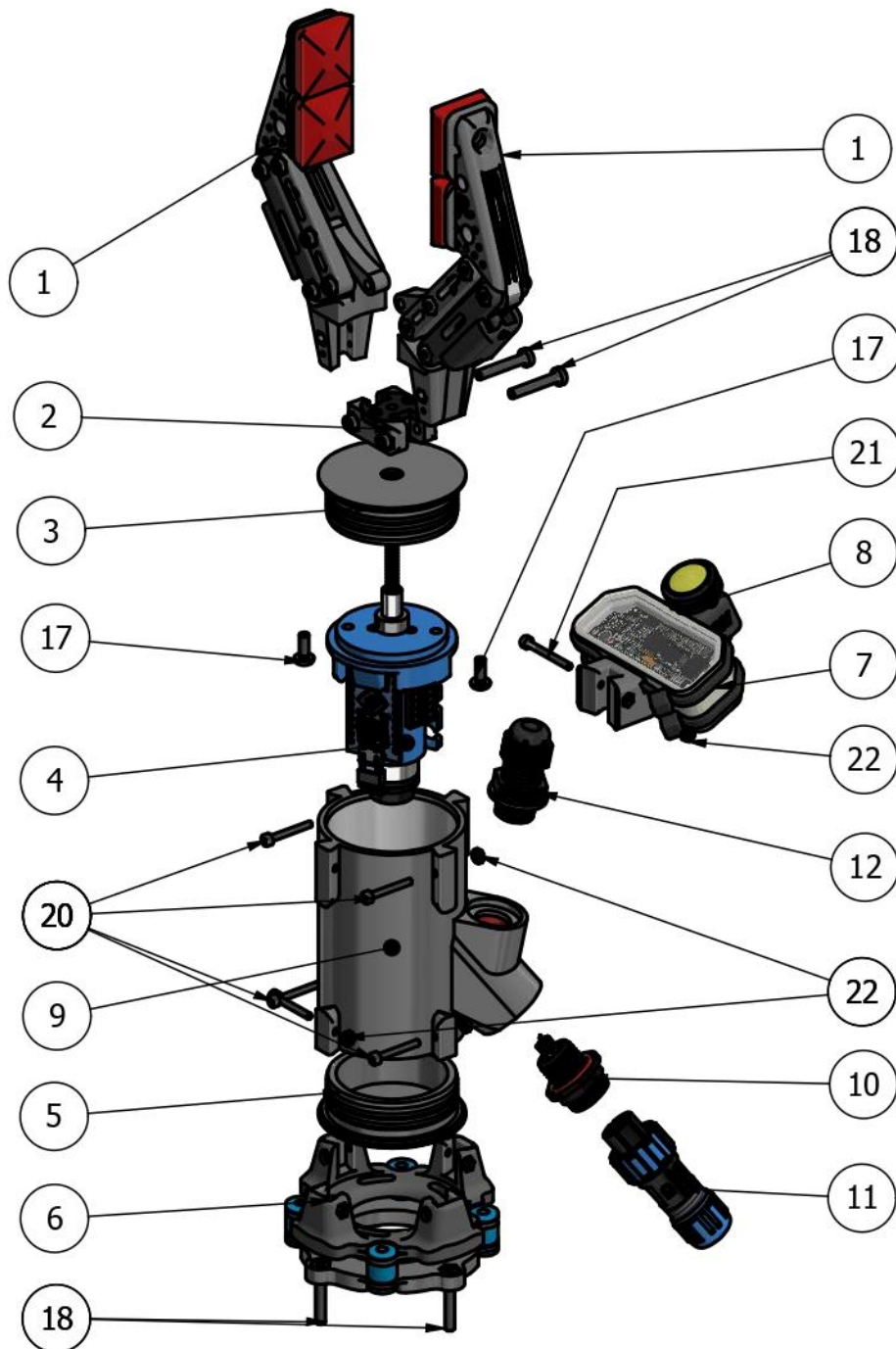
PARTS LIST

ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	2	(Aa)	Finger, 2-phalanx, straight
2	1	(B)	Rod link, dual - Assembly
3	1	(C)	Plug casing, top - Assembly
4	1	(Da)	Motor casing (Escap 16) - Assembly
5	1	(Ea)	Plug casing, bottom - Assembly
6	1	(F)	Manipulator base - Assembly
7	1	(Ga)	cam, Creative - Assembly
8	1	(H)	LED lamp - Assembly
9	1	J1	Main casing
10	1	J2	Weipu connector, front mount, male - SP1312_P7
11	1	J3	Weipu cable connector, female SP1310_S7IN
12	1	GIJ4	Cable gland, MGB12S, M12x1.5
13	1	UndEE-Assembly.Harness2	
14	2	PicoBlade_M+F_2P	
15	3	PicoBlade_M+F_4P	
16	1	PicoBlade_M+F_6P	
17	2	AS 1427 - M3 x 8(4)	Pozidriv ISO metric machine screws
18	6	DIN 7984 - M3 x 18	Cylinder Head Cap Screw
19	2	ISO 10511 - M3	Hex Nut
20	6	ISO 4762 - M2 x 16	Hexagon Socket Head Cap Screw
21	1	ISO 4762 - M2 x 20	Hexagon Socket Head Cap Screw
22	7	Nut GB/T 6170 M2	Hexagon nuts, style 1


DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL	MASS APPROX. 320.7 g	UndEE	
MANUFACTURING METHOD		----- Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group -----	
	June 2020	PROJECT	ASSEMBLY
		UndEE	(J)
SIZE	SCALE	SHEET	REV
A4	1 / 2	1 OF 6	1.0

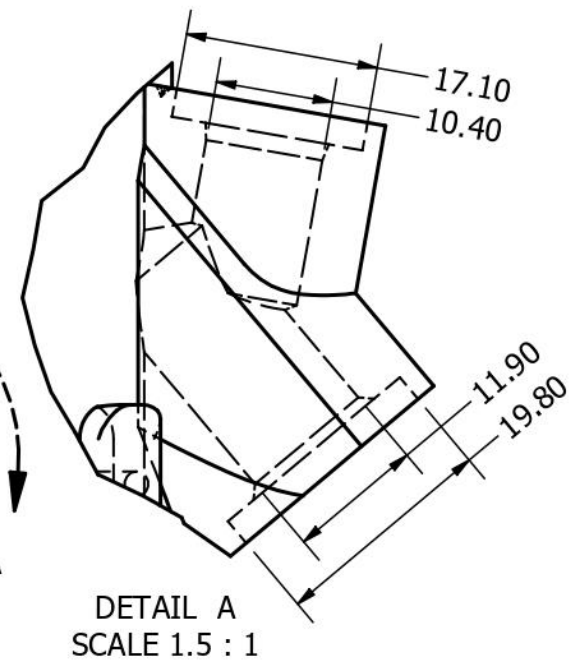
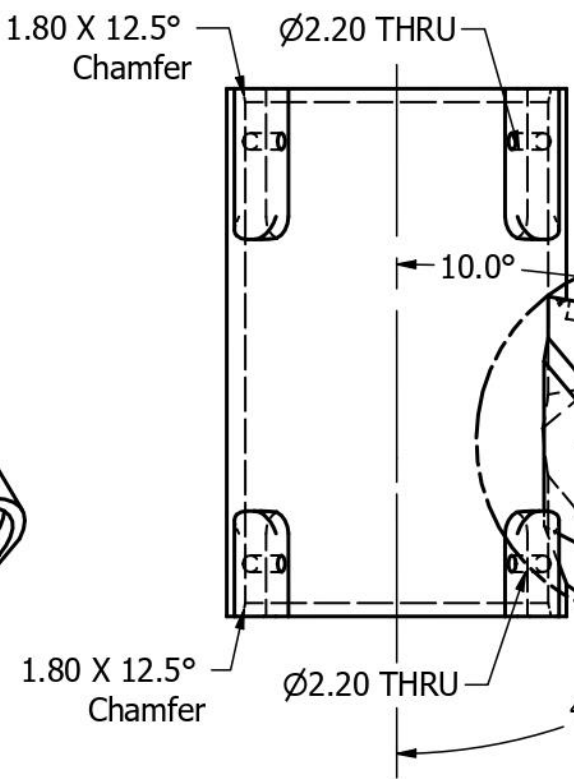
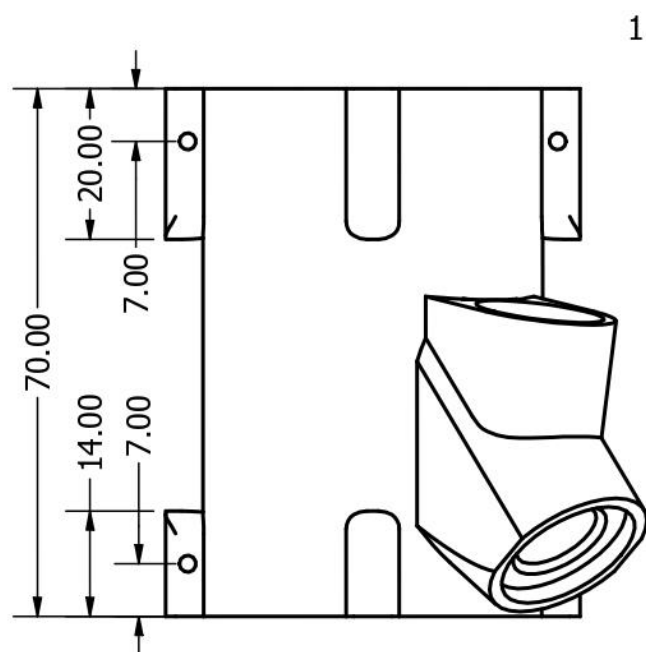


DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL	MASS APPROX. 320.7 g	UndEE	
MANUFACTURING METHOD		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group	
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (J)	PART NO
	SIZE A4	SCALE 2/5	REV 1.0
		SHEET 2 OF 6	

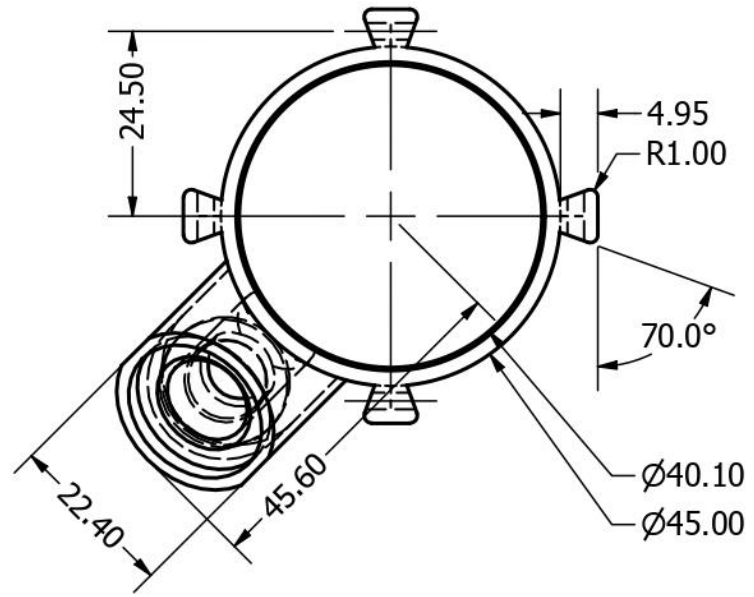
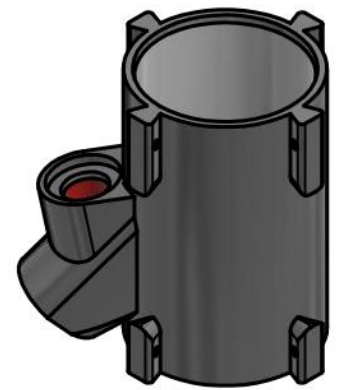


PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	2	(Aa)	Finger, 2-phalanx, straight
2	1	(B)	Rod link, dual - Assembly
3	1	(C)	Plug casing, top - Assembly
4	1	(Da)	Motor casing (Escap 16) - Assembly
5	1	(Ea)	Plug casing, bottom - Assembly
6	1	(F)	Manipulator base - Assembly
7	1	(Ga)	cam, Creative - Assembly
8	1	(H)	LED lamp - Assembly
9	1	J1	Main casing
10	1	J2	Weipu connector, front mount, male - SP1312_P7
11	1	J3	Weipu cable connector, female SP1310_S7IN
12	1	GIJ4	Cable gland, MGB12S, M12x1.5
17	2	AS 1427 - M3 x 8(4)	Pozidriv ISO metric machine screws
18	6	DIN 7984 - M3 x 18	Cylinder Head Cap Screw
19	2	ISO 10511 - M3	Hex Nut
20	6	ISO 4762 - M2 x 16	Hexagon Socket Head Cap Screw
21	1	ISO 4762 - M2 x 20	Hexagon Socket Head Cap Screw
22	7	Nut GB/T 6170 M2	Hexagon nuts, style 1

DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL	MASS APPROX. 320.7 g	UndEE	
MANUFACTURING METHOD		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group	
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (J)	PART NO
	SIZE A4	SCALE 4 / 9	REV 1.0
		SHEET 3 OF 6	

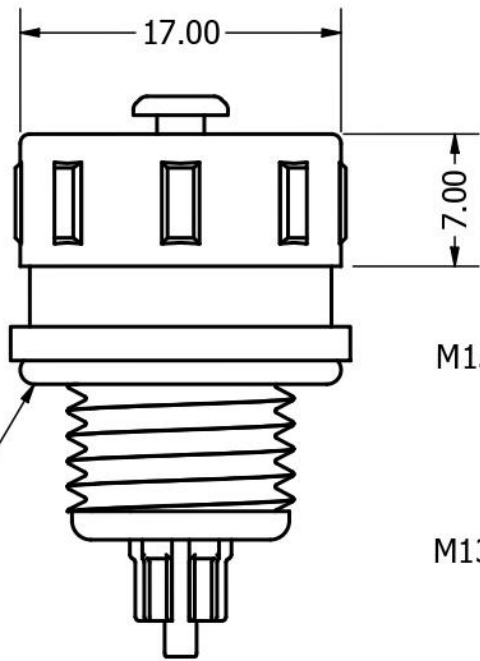


DETAIL A
SCALE 1.5 : 1



DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas	
MATERIAL Acetal Resin, Black	MASS APPROX. 49.7 g
MANUFACTURING METHOD CNC-milled	
 June 2020	

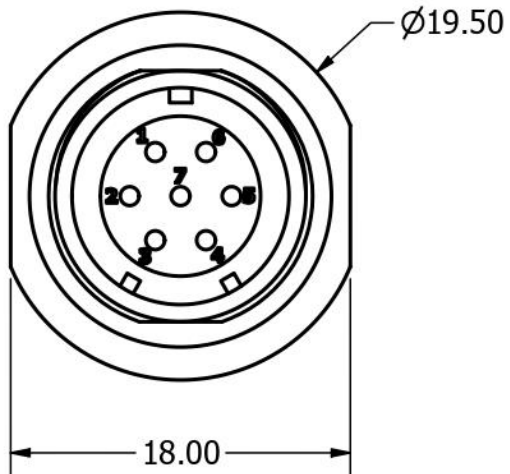
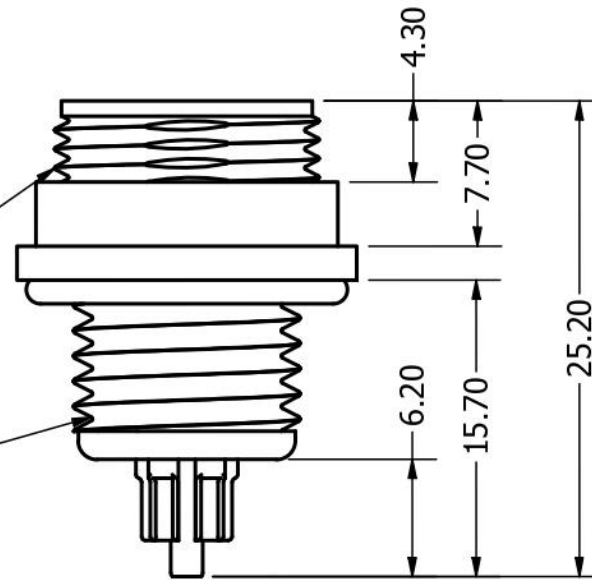
TITLE Main casing			
Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group			
PROJECT UndEE	ASSEMBLY (J)	PART NO J1	REV 1.0
SIZE A4	SCALE 1 : 1	SHEET 4 OF 6	




O-ring (Ø14x1.5mm)

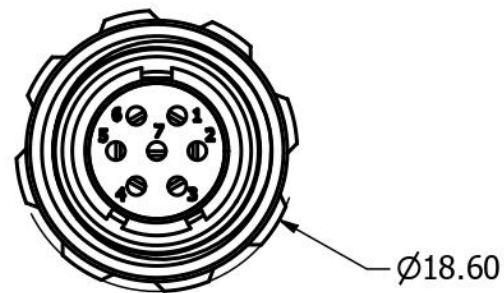
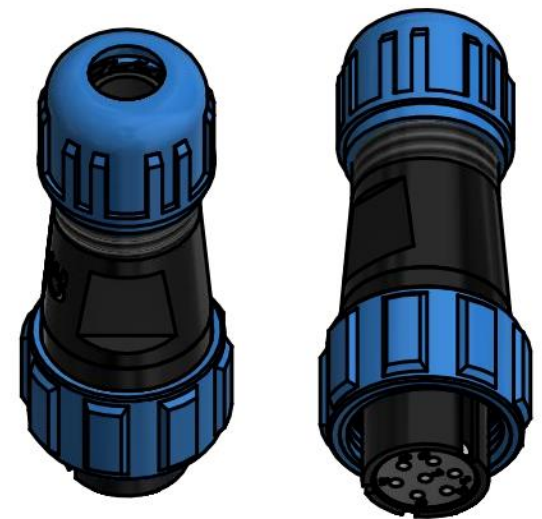
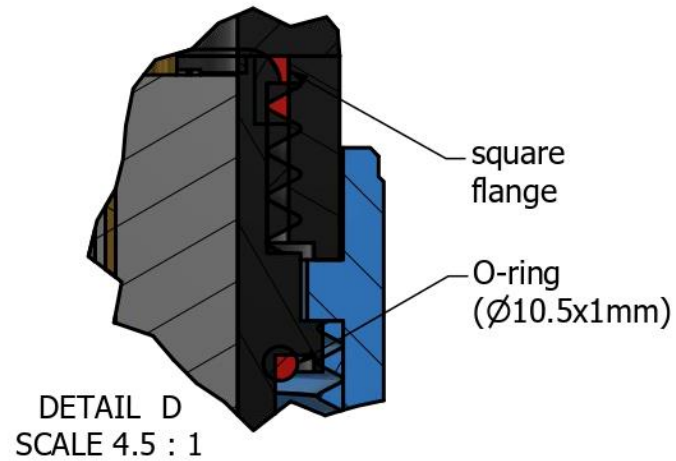
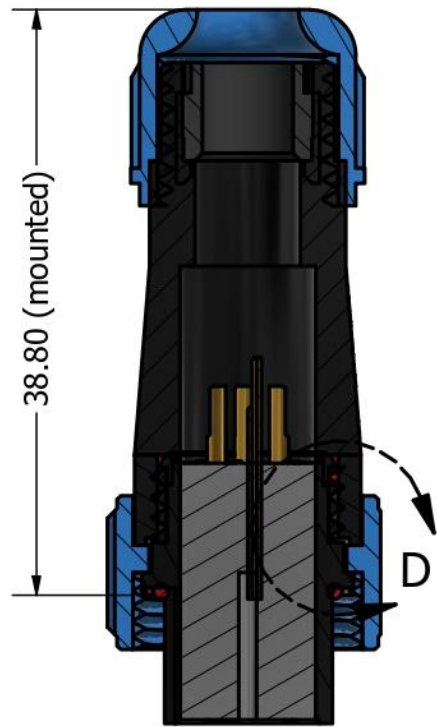
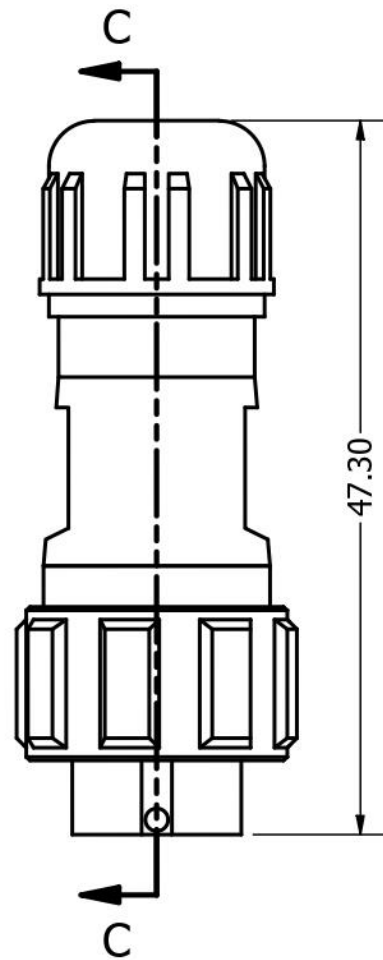
M15x1mm


M13x1mm



DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE Weipu connector, front mount, male - SP1312_P7		
MATERIAL	MASS APPROX. 3.6 g	Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group		
MANUFACTURING METHOD		PROJECT UndEE	ASSEMBLY (J)	PART NO J2
		SIZE A4	SCALE 2.5 : 1	REV 1.0
		SHEET 5 OF 6		

June 2020



DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE Weipu cable connector, female SP1310_S71N	
MATERIAL	MASS APPROX. 7.1 g	Control Systems Lab - NTUA <i>Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group</i>	
MANUFACTURING METHOD		PROJECT UndEE	ASSEMBLY (J)
 June 2020		PART NO J3	REV 1.0
		SIZE A4	SCALE 2 : 1
		SHEET 6 OF 6	

Παράρτημα Β (electrical manual)

Στο Παράρτημα Β παραθέτω τα κυκλωματικά διαγράμματα των ηλεκτρικών στοιχείων του μηχανισμού. Σύμφωνα με το κεφάλαιο 3 (§3.1 ~ § 3.3), τα στοιχεία αυτά και οι διασυνδέσεις τους ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες:

1. Στοιχεία εσωτερικά του μηχανισμού: όλα τα στοιχεία που τοποθετούνται εντός του περιβλήματος, οι αισθητήρες FSR και όλες οι διασυνδέσεις τους.
2. Στοιχεία εξωτερικά του μηχανισμού: το σύστημα της κάμερας με τη λυχνία LED, οι διασυνδέσεις με τον απομακρυσμένο Η/Υ και την πηγή τροφοδοσίας, καθώς και τα USB repeaters που παρεμβάλλονται στα αντίστοιχα καλώδια.

Παρότι σχεδόν το σύνολο των στοιχείων και των διασυνδέσεων αφορούν στην πρώτη κατηγορία, συνοπτικές οδηγίες δίνονται και για την δεύτερη, όπου μεν οι συνδέσεις είναι απλές, προσοχή πρέπει να δοθεί δε στην συναρμολόγηση, ώστε να εξασφαλίζεται η στεγανότητα. Ακολουθούν οι οδηγίες-υποδείξεις και οι αντίστοιχες εικόνες ανά κατηγορία.

⇒ Για την πρώτη κατηγορία («Στοιχεία εσωτερικά του μηχανισμού»)

Παρέχονται δύο γραφικά που αναπαριστούν τα κυκλωματικά διαγράμματα των μερών της κατηγορίας.

Το πρώτο αφορά στο κυκλωματικό διάγραμμα, όπως αυτό σχηματίζεται στο πρόγραμμα KiCAD (εκδ. 5.1.4) και παρατίθεται συμπληρωματικά του επόμενου, ως πιο τεχνικά άρτιο.

Το δεύτερο, το οποίο μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει για να ενώσει τα στοιχεία, είναι ένα ελεύθερο διάγραμμα-σχέδιο, όπου οι αγωγοί μεταξύ στοιχείων διαχωρίζονται με χρώματα. Χρησιμοποίησα τις εικόνες των φυσικών υποσυστημάτων, καθώς θεωρώ ότι είναι πιο εύληπτες σε σύγκριση με την αναπαράστασή τους ως στοιχεία του KiCAD. Περιμετρικά των στοιχείων σημειώνονται τα ονόματα των εκάστοτε θυρών. Λόγω διάταξης στην εικόνα, συχνά (οι κατακόρυφοι) αγωγοί εμφανίζονται να τέμνουν άλλους. Αυτό δεν έχει καμία άμεση αντιστοιχία με την πραγματική διάταξη τους στο σύστημα. Τέλος, επί των αγωγών (είτε μεμονωμένα είτε σε ομάδες) σημειώνονται τα προτεινόμενα μήκη τους (σε χιλιοστά), βάσει της χωροταξίας που επέλεξα να κάνω εγώ. Τα μεγέθη αυτά είναι ενδεικτικά και εμπεριέχουν σχετικά μικρό ποσό «ασφάλειας». Ανάλογα με την ... αυτοπεποίθηση του χρήστη, μπορεί να μεταβάλλει τις τιμές κατά βούληση - ευελπιστώ μόνο προς τα πάνω.

Δεν θα επιχειρήσω να δώσω οδηγίες για την σύνδεση κάθε καλωδίου χωριστά, καθώς θεωρώ ότι θα ήταν υπερβολικό. Αντιθέτως, οδηγίες που κατά τη γνώμη μου πρέπει να ακολουθηθούν είναι οι εξής:

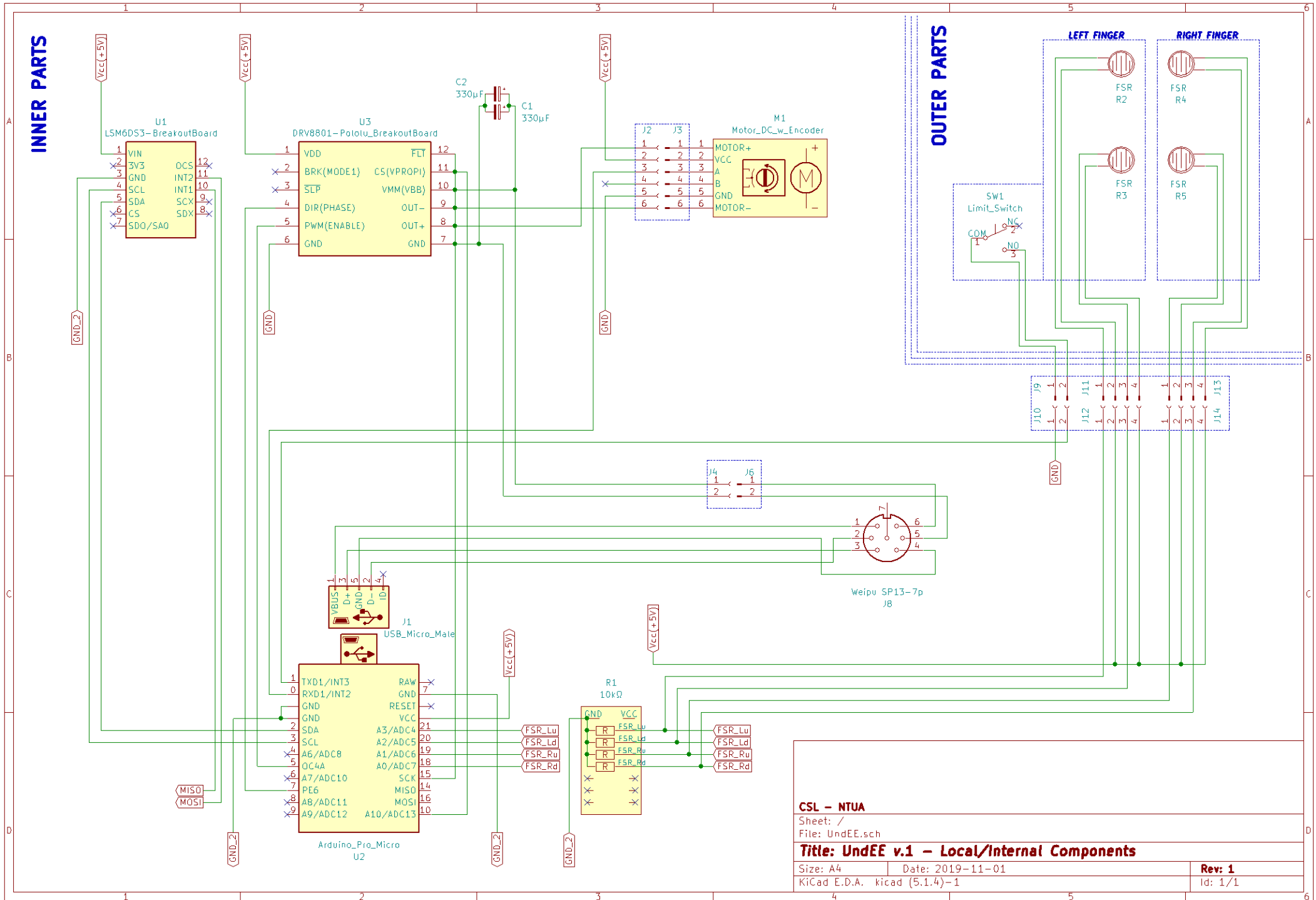
- Η τοποθέτηση των πλακετών/εξαρτημάτων στη βάση τους (*D1. Motor casing*) θα βοηθήσει στην εποπτεία των διασυνδέσεων και την αποφυγή λαθών στην κοπή των καλωδίων.
- Εφόσον οι πλακέτες επιτρέπουν την συγκόλληση από αμφότερες τις πλευρές τους, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται ανά περίπτωση η πλευρά που επιτρέπει την μικρότερη δυνατή καμπύλωση του αγωγού - άρα και την χαμηλότερη πιθανότητα κοπής του υπό τάση.
- Οι αγωγοί της γείωσης να εφαρμοστούν αφού συνδεθούν όλοι οι υπόλοιποι, να συνδεθούν μεταξύ τους και με έναν αγωγό σε κάποια από τις θύρες GND της πλακέτας Pro Micro. Αντίστοιχα και οι αγωγοί της τροφοδοσίας +5V στη θύρα VCC.
- Για το σύνδεσμο USB Micro male, που συνδέει την πλακέτα Pro Micro με τον σύνδεσμο 7 θέσεων (*J2. Weipu connector, front mount, male*) είναι πιο αξιόπιστο να χρησιμοποιηθεί το αντίστοιχο τμήμα από ένα εμπορικό USB καλώδιο (π.χ. από κινητό τηλέφωνο), καθώς περιλαμβάνει θωράκιση και το ελαστικό περίβλημα στον σύνδεσμο. Ωστόσο πρέπει να επιλεγεί σύνδεσμος με σχετικά μικρό μήκος, διότι αν πιέζεται από το κάτω καπάκι του περιβλήματος, υπάρχει πιθανότητα να αποκολληθεί ο αντίστοιχος σύνδεσμος στην πλακέτα Pro Micro, χωρίς δυνατότητα επιδιόρθωσης.
- Κατόπιν συγκόλλησης όλων των αγωγών σε κάθε πλακέτα, πρέπει να ψεκάζεται με βερνίκι αδιαβροχοποίησης (π.χ. Cramolin PLASTIK), προσεκτικά ώστε να καλυφθούν όλα τα σημεία. Το ίδιο πρέπει να γίνει και για τους συνδέσμους, υπό την παράμετρο ότι τα δύο μέρη τους (αρσενικό-θηλυκό) θα είναι ενωμένα. Εξίσου και για τις διασυνδέσεις των αισθητήρων FSR.
- Ειδικά στις ενώσεις αγωγών στον σύνδεσμο 7-θέσεων (*J2*), να χρησιμοποιηθεί και θερμοσυστελλόμενο περίβλημα κατόπιν εφαρμογής του αδιαβροχοποιητικού, για την προστασία τους από κοπή υπό τάση. Το ίδιο και για τους αισθητήρες FSR, με προσοχή ώστε το μήκος του περιβλήματος να μην ξεπερνά το μεταλλικό τους μέρος πάνω από 1-2mm.
- Ειδικά για τους τελευταίους, η κοπή των καλωδίων και οι διασυνδέσεις τους να γίνουν αφού στερεωθούν στις επιφάνειες των δακτύλων (βλ. και Παράρτημα Δ). Να υπολογιστεί επιπλέον περιθώριο από το τελικό μήκος των αγωγών περί τα 15mm και να ελεγχθεί ότι δεν υπάρχει τάση τόσο στην ανοικτή όσο και στην κλειστή θέση των δακτύλων.

Σημειώνω επίσης τα εξής:

- Οι αγωγοί που αφορούν στους αισθητήρες FSR και το διακόπτη αρχικοποίησης χωρίζονται σε δύο μέρη, τα οποία ενώνονται με ηλεκτρικούς συνδέσμους δυο και τεσσάρων θέσεων. Η επιλογή αυτή γίνεται ώστε να είναι δυνατή η αφαίρεσή τους από το περίβλημα - οι σύνδεσμοι χωράνε από την οπή του στυπιοθλίπτη αν χρησιμοποιηθεί προσοχή· το ίδιο και ο σύνδεσμος USB Micro. Για το λόγο αυτό συνίσταται η χρήση μιας κοινής καλωδιοταινίας (10 αγωγών) για τους αισθητήρες και τον διακόπτη αρχικοποίησης. Ο διαχωρισμός των αγωγών (4-4-2) γίνεται κατά βούληση ώστε να εξυπηρετείται η χωροταξία εντός του περιβλήματος και επί των δακτύλων.
- Για την επίτευξη στεγανής επαφής της καλωδιοταινίας με τον στυπιοθλίπτη, θα πρέπει αυτή να τυλιχθεί σε κυλινδρικό σχήμα και να περαστεί μέσα από ένα μικρό κομμάτι εύκαμπτου πλαστικού σωλήνα ($\varnothing 6\text{mm}$, ~15mm μήκος), με την προσθήκη εποξειδικής κόλλας δύο συστατικών. Για την εξυπηρέτηση της χωροταξίας, η πλευρά του σωλήνα εγγύτερα στους ηλ. συνδέσμους, θα πρέπει να απέχει περί τα 90mm από αυτούς.

INNER PARTS

OUTER PARTS



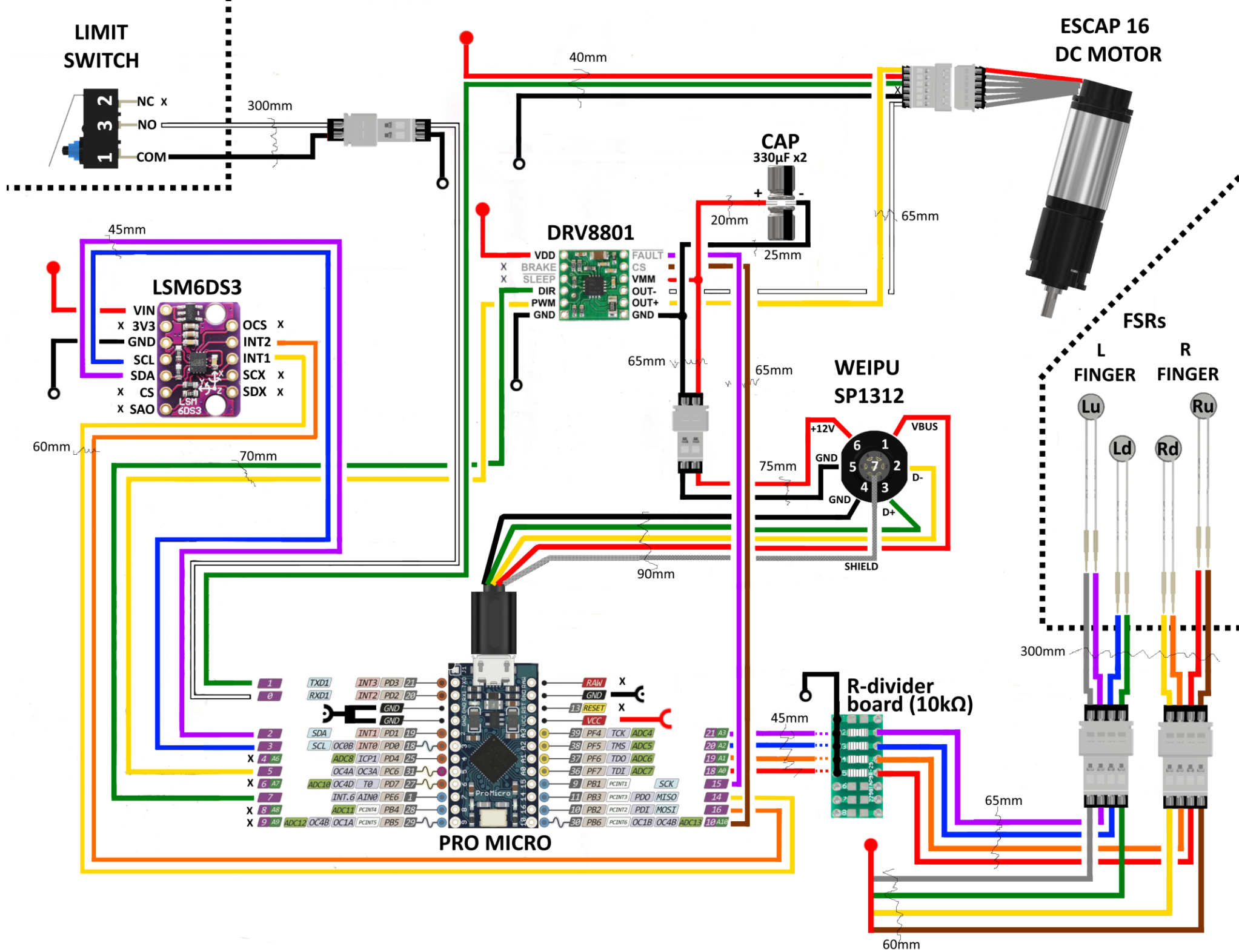
CSL - NTUA

Sheet: /
File: UndEE.sch

Title: UndEE v.1 - Local/Internal Components

Size: A4 Date: 2019-11-01
KiCad E.D.A. kicad (5.1.4)-1

Rev: 1
Id: 1/1



⇒ Για τη δεύτερη κατηγορία («Στοιχεία εξωτερικά του μηχανισμού»)

Οι περισσότερες από τις διασυνδέσεις των μερών αυτής της κατηγορίας είναι τυποποιημένες, οπότε δεν σχεδιάζω κάποιο ειδικό σχήμα γι' αυτές. Αντ' αυτού, υπενθυμίζω ποιες είναι αυτές και θα κάνω μερικές παρατηρήσεις.

Ξεκινώντας από την πλευρά του μηχανισμού, προς την πλευρά του απομακρυσμένου χρήστη:

- Διασύνδεση ηλεκτρικού συνδέσμου 7 θέσεων (J3. *Weirui cable connector, female*) και USB extension / τροφοδοσίας +12V, μέσω καλωδίου τύπου [A] (βλ. υποκεφάλαιο 3.3).
 - └ Το καλώδιο έχει μήκος περί τα 5m και καταλήγει, διαμέσου στυπιοθλίπτη, στο περιβλήμα (I).
 - └ Εντός του περιβλήματος διαχωρίζονται οι 4 αγωγοί 0.22mm² (συν τη γείωση), οι οποίοι συνδέονται στην πλακέτα USB extension, μέσω αρσενικού συνδέσμου USB (type A).
 - └ Οι δύο αγωγοί 0.50mm² συνδέονται σε σύνδεσμο-κλέμμα δύο θέσεων.
- Διασύνδεση οπτικού συστήματος (G) και USB extension, μέσω καλωδίου USB.
 - └ Το καλώδιο έχει μήκος περί τα 5m και καταλήγει, διαμέσου στυπιοθλίπτη, στο περιβλήμα (I).
 - └ Εντός του περιβλήματος, συνδέεται στην πλακέτα USB extension μέσω αρσενικού συνδέσμου USB (type A).
- Διασύνδεση φωτεινής πηγής LED (H) και τροφοδοσίας +12V, μέσω καλωδίου τύπου [B] (βλ. υποκεφάλαιο 3.3).
 - └ Το καλώδιο έχει μήκος περί τα 5m και καταλήγει, διαμέσου στυπιοθλίπτη, στο περιβλήμα (I).
 - └ Εντός του περιβλήματος οι δύο αγωγοί συνδέονται στον ίδιο σύνδεσμο-κλέμμα (ίδια πλευρά) που συνδέθηκε η τροφοδοσία του μηχανισμού.
- Διασύνδεση USB extension -μηχανισμός- και απομακρυσμένου Η/Υ, μέσω καλωδίου USB.
 - └ Το καλώδιο, μήκους περί τα 4m, συνδέεται απ' ευθείας πάνω στην πλακέτα USB extension εντός του περιβλήματος, κι εξέρχεται από αυτό διαμέσου στυπιοθλίπτη.
 - └ Στην πλευρά του Η/Υ το καλώδιο καταλήγει σε αρσενικό σύνδεσμο USB (type A).
- Διασύνδεση USB extension -οπτικό σύστημα- και απομακρυσμένου Η/Υ, μέσω καλωδίου USB.
 - └ Το καλώδιο, μήκους περί τα 4m, συνδέεται απ' ευθείας πάνω στην πλακέτα USB extension εντός του περιβλήματος, κι εξέρχεται από αυτό διαμέσου στυπιοθλίπτη.
 - └ Στην πλευρά του Η/Υ το καλώδιο καταλήγει σε αρσενικό σύνδεσμο USB (type A).
- Διασύνδεση κοινού συνδέσμου-κλέμμα τροφοδοσίας +12V και απομακρυσμένης πηγής τροφοδοσίας, μέσω καλωδίου τύπου [B].
 - └ Το καλώδιο, μήκους περί τα 4m, συνδέεται στην άλλη πλευρά του συνδέσμου-κλέμμα εντός του περιβλήματος, κι εξέρχεται από αυτό διαμέσου στυπιοθλίπτη.
 - └ Στην πλευρά του χρήστη το καλώδιο καταλήγει σε σύνδεσμο-κλέμμα δύο θέσεων.

Παρατηρήσεις:

- Τα καλώδια που αφορούν τη διασύνδεση του οπτικού συστήματος και της φωτεινής πηγής με το ενδιάμεσο περίβλημα, καλό είναι να κοπούν περί τα 15-20cm μακρύτερα από το αντίστοιχο καλώδιο του μηχανισμού, καθώς τα δύο συστήματα βρίσκονται σε υψηλότερη θέση από το σύνδεσμο του μηχανισμού.
- Το καλώδιο του οπτικού συστήματος κατά πάσα πιθανότητα θα έχει κάποιο σύνδεσμο 4 ή 5 θέσεων, ο οποίος θα πρέπει να περαστεί από τον στυπιοθλίπτη του αντίστοιχου περιβλήματος της ενότητας (G). Σε περίπτωση που η ένωσή του γίνεται πάνω στην πλακέτα της κάμερας, μπορεί να αποκολληθεί από αυτήν, να περαστεί από το στυπιοθλίπτη και να εφαρμοστεί ξανά. Η διαδικασία αυτή απαιτεί μεγάλη προσοχή και τη χαμηλότερη δυνατή θερμοκρασία (270°C είναι ένα καλό σημείο εκκίνησης), για να αποφευχθεί ζημία στην πλακέτα.
- Καθώς όλα σχεδόν τα καλώδια (εκτός ίσως των USB προς την πλευρά του χρήστη) έχουν διάμετρο περί τα 5mm, για την ασφαλέστερη στεγανοποίηση στα σημεία που διέρχονται από στυπιοθλίπτες, προτείνω την τοπική εφαρμογή επιπλέον θερμοσυστελλόμενου καλύμματος (όλοι στυπιοθλίπτες είναι σχεδιασμένοι για καλώδια εξωτερικής διαμέτρου μέχρι 6.5mm). Αντίστοιχο, αλλά λιγότερο τακτικό αποτέλεσμα μπορεί να πετύχει κανείς με μερικές περιελίξεις ηλεκτρολογικής ταινίας. Σημειώτέο ότι και ο ηλεκτρικός σύνδεσμος του μηχανισμού (J3) φέρει στην άκρη του στυπιοθλίπτη.
- Για τις απολήξεις των καλωδίων του μηχανισμού και του οπτικού συστήματος εντός του περιβλήματος (αρσενικοί σύνδεσμοι USB type A) είναι προτιμότερη η χρήση τμημάτων από εμπορικά καλώδια, για τους λόγους που αναφέρθηκαν και νωρίτερα στη σύνδεση των εσωτερικών στοιχείων.
- Εφόσον χρησιμοποιηθούν καλώδια με ενσωματωμένες τις πλακέτες USB extension, είναι σχετικά εύκολο να αποκολληθούν οι αγωγοί στην πλευρά των καλωδίων, ώστε να περαστούν πρώτα από τους στυπιοθλίπτες και κατόπιν να συνδεθούν ξανά στις πλακέτες. Σε αντίθετη περίπτωση, που τα USB extensions φέρουν αρσενικό σύνδεσμο USB, ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει τμήματα εμπορικών καλωδίων με θηλυκούς συνδέσμους.
- Στο σύνολο των συνδέσμων και των πλακετών θα πρέπει να εφαρμοστεί αδιαβροχοποιητικό βερνίκι (π.χ. Cramolin PLASTIK), με προσοχή ώστε να καλυφθούν όλα τα σημεία.

Παράρτημα Γ (manufacture manuals)

Σε αυτό το παράρτημα θα προσπαθήσω να δώσω πληροφορίες για την κατασκευή των μερών του μηχανισμού, τόσο αυτών που τυπώνονται στον 3D-printer, όσο κι εκείνων που κατασκευάζονται με τη βοήθεια του CNC mill ή του τόνου.

Αρχικά, αναφέρω ότι όλα τα μέρη των ενότητων (A), (B), (D), (F), (G), (H), όπως αυτές ορίστηκαν στο Παράρτημα Α, κατασκευάζονται με τη μέθοδο 3D-printing¹¹⁹. Τα μέρη που κατασκευάζονται με αφαιρετικές μεθόδους (CNC mill, τόνος) είναι τα δύο καπάκια των ενότητων (C) και (E), και φυσικά το κυρίως περίβλημα του μηχανισμού της ενότητας (J).

Εξαιρεση αποτελούν τα καλύμματα των αισθητήρων FSR, τα οποία κατασκευάζονται με τη μέθοδο της χύτευσης, από σιλικόνη RTV. Το καλούπι κατασκευάζεται μέσω 3D-printing, καθώς η γεωμετρία του είναι αρκετά σύνθετη. Το μηχανικό αποτέλεσμα διακρίνεται από αποδεκτή μεν λειτουργικότητα, αλλά χρίζει βελτίωσης. Το αισθητικό αποτέλεσμα είναι μάλλον κακό. Αμφότερες οι παράμετροι μπορούν να βελτιωθούν κάνοντας χρήση ενός καλουπιού που παράγεται με μεγαλύτερη πιστότητα.

- ⇒ Τα 3D-printed μέρη εξάγονται ως αρχεία stl από το πρόγραμμα CAD (*Autodesk Inventor 2020*) και επεξεργάζονται για εκτύπωση στο πρόγραμμα slicer **Ultimaker Cura** (εκδ. 4.6), απ' όπου παράγεται ο G-code.
Ο εκτυπωτής που χρησιμοποιείται είναι ο **Lulzbot TAZ 4**¹²⁰, με αναβαθμισμένη κεφαλή εκτύπωσης στην "Single Extruder Tool Head v2" και το αντίστοιχο firmware.
- ⇒ Τα μέρη που κατεργάζονται στο CNC-mill, επεξεργάζονται στο πρόγραμμα **Autodesk Inventor CAM 2020** (ως μέρος του προγράμματος Autodesk Inventor) και παράγεται ο αντίστοιχος G-code.
Η φρέζα που χρησιμοποιείται είναι η **Haas Mini Mill**, με την προσθήκη δυνατότητας 4th-axis κατεργασίας, μέσω του τραπέζιου **HRT160**¹²¹. Για την κατεργασία των καπακιών χρησιμοποιείται επίσης ο (χειροκίνητος) τόνος **Proxxon PD400**¹²².

Σημείωση:

Θεωρώ σημαντικό να τονιστεί ότι ο G-code και οι οδηγίες κατασκευής που παρέχω στο πλαίσιο αυτής της εργασίας διακρίνεται από «ωριμότητα» μόνο μερικών μηνών στην αντίστοιχη μέθοδο κατασκευής ή και λιγότερο. Θα πρότεινα λοιπόν να μην ιδωθεί σαν ένα έτοιμο-προς-χρήση, πλήρως βελτιστοποιημένο πρόγραμμα.

Αν και πολλές παράμετροι έχουν πράγματι βελτιστοποιηθεί σε κάποιο βαθμό, όλα τα στοιχεία χαρακτηρίζονται από την οπτική και την αντίληψη του γράφοντα επί των διεργασιών - υπάρχει περιθώριο βελτίωσης, αλλά και σφαλμάτων!

¹¹⁹ Ενωώντας φυσικά τα μέρη που δεν είναι τυποποιημένα προϊόντα και κατασκευάζονται στο εργαστήριο Α.Ε.

¹²⁰ Περισσότερες πληροφορίες στην ιστοσελίδα: <https://www.lulzbot.com/>

¹²¹ Περισσότερες πληροφορίες στις ιστοσελίδες: <https://www.haascnc.com/machines/vertical-mills/mini-mills/models/minimill.html> και <https://www.haascnc.com/machines/rotaries-indexers/rotary-tables/models/hrt160.html>

¹²² Περισσότερες πληροφορίες στην ιστοσελίδα: <https://www.proxxon.com/en/micromot/24400.php>

Θα προσπαθήσω ανά περίπτωση να θέσω αυτά τα σημεία προσοχής, εξηγώντας γιατί τα αντιμετωπίζω ως τέτοια. Είναι βέβαια αδύνατο να μεταφέρω το σύνολο της πληροφορίας για τη χρήση του 3D-printed, πολλώ δε μάλλον της CNC φρέζας - δεν είναι άλλωστε αυτός ο σκοπός του παραρτήματος.

Αν η χρήση γίνεται σε κατάσταση σωματικής και πνευματικής κούρασης, αμφότερες οι μηχανές είναι επικίνδυνες. Συνιστώ έτσι την αντιμετώπιση τους με σεβασμό και επιφύλαξη και στη συγκέντρωση όσο το δυνατόν περισσότερων πληροφοριών για τα χαρακτηριστικά και τη λειτουργία τους πριν από τη χρήση τους. Με την λογική αυτή ολοκλήρωσα εγώ απροβλημάτιστα την εργασία μου, αφήνοντας ταυτόχρονα τις μηχανές «αλώβητες» για τους επόμενους χρήστες.

G1. Τα μέρη που κατασκευάζονται μέσω 3D-εκτύπωσης

Καταρχάς, κάποιες γενικές πληροφορίες:

- Αρχεία **stl** και **obj**¹²³ όλων των μερών μπορούν να ευρεθούν στο αρχείο, σε φακέλους ανά ενότητα `{:\UndEE_manufacture\3d-printed_parts\}`.
- Όλα τα μέρη κατασκευάζονται από **PLA**¹²⁴, καθώς θεωρώ ότι η υψηλότερη σκληρότητα και ακαμψία του υλικού εξυπηρετεί καλύτερα τις ανάγκες του μηχανισμού, συγκριτικά με το έτερο διαθέσιμο ABS.
- Χάριν ευκολίας, χρησιμοποιείται ένα μόνο προφίλ εκτύπωσης (“**normal**” - 0.15mm layer height) και μεταβάλλονται, κατά περίπτωση, οι εξής παράμετροι:
 - + *Wall Thickness/Wall Line Count* (αριθμών περιμέτρων θερμοπλαστικού στο σύνορο της στρώσης)
 - + *Infill Density* (το ποσοστό θερμοπλαστικού ως προς τον όγκο του αντικειμένου)
 - + *Support & Support Placement* (η ύπαρξη και η τοποθέτηση υποστηρικτικών δομών)

Ένα αντίγραφο του προφίλ για κάθε υλικό (PLA, TPU), στη γενική του μορφή, μπορεί να βρεθεί στο αρχείο `{:\UndEE_manufacture\3d-printed_parts\}`.

- Κατά την εκτύπωση παρατηρείται το εξής φαινόμενο: οι διαστάσεις στο XY-επίπεδο εμφανίζονται μειωμένες κατά ένα σχεδόν σταθερό ποσό, περίπου ίσο με 0.20~0.25mm, ενώ οι διαστάσεις στον κατακόρυφο άξονα Z μένουν πρακτικά αναλλοίωτες. Για παράδειγμα, μια οπή στο XY-επίπεδο, που σχεδιάζεται με διάμετρο 15.00mm στο περιβάλλον CAD, θα μετρηθεί ως ~14.75mm στο εκτυπωμένο αντικείμενο με PLA.
- Δεδομένου του προηγούμενου ζητήματος, έχω υιοθετήσει τις εξής σχεδιαστικές επιλογές:
 - + Οι οπές από τις οποίες διέρχονται βίδες στερέωσης διατηρούνται στην ονομαστική τους διάμετρο και διανοίγονται στο εκτυπωμένο αντικείμενο με αντίστοιχης διάστασης τρυπάνι¹²⁵. Θεωρώ ότι αυτό εξυπηρετεί στη διασφάλιση

¹²³ STL εκ του *STereolithography* και OBJ εκ του Object. Αμφότερα χρησιμοποιούνται για την αποτύπωση της 3D γεωμετρίας, χωρίς ωστόσο δυνατότητα διατήρησης ιδιοτήτων του CAD μοντέλου.

¹²⁴ Εκτός από την παραλλαγή των δακτύλων που βασίζεται στο φαινόμενο FinRay, που χρησιμοποιείται TPE.

¹²⁵ Ίδανικά, ένα καλής ποιότητας HSS-Co τρυπάνι, που να μην έχει καταπονημένη κόψη, χρησιμοποιούμενο χειροκίνητα και όχι πάνω σε ένα βαρύ δράπανο (ή άλλο εργαλείο τύπου Dremel), για να υπάρχει έλεγχος της καθετότητας ως προς την οπή. Εναλλακτικά, σε ένα κολονάτο δράπανο.

της ιδανικής διαμέτρου, εξαλείφοντας παράλληλα τυχόν προεξοχές λόγω ατελειών στην εκτύπωση. Συνειδητά επιλέγω την παράλειψη ανοχών για ευκολότερη συναρμογή, καθώς οι μεταλλικές βίδες έτσι κι αλλιώς θα καταπονήσουν το πλαστικό υλικό με τη χρήση, οδηγώντας σε υπέρμετρες ανοχές. Για παράδειγμα, μια οπή για βίδα M3 σχεδιάζεται ως 3mm, προκύπτει περίπου ίση με 2.75mm από την εκτύπωση και εν τέλει ανοίγεται με τρυπάνι 3mm στην ονομαστική διάμετρο.

- + Προεξοχές και γεωμετρικές που σχετίζονται με τη συναρμογή πλαστικών μερών μεταξύ τους, σχεδιάζονται κανονικά με ανοχές, λαμβάνοντας υπόψιν και τις μειωμένες διαστάσεις στο ΧΥ-επίπεδο λόγω εκτύπωσης.
- Η πλειοψηφία των αντικειμένων, όπως προκύπτουν από την εκτύπωση, χρειάζονται κάποιου είδους επεξεργασία (post-processing) πριν χρησιμοποιηθούν στο μηχανισμό (π.χ. για την αφαίρεση υποστηρικτικών δομών - supports). Νομίζω ότι αυτή η επεξεργασία γίνεται ευκολότερα αμέσως μετά την εκτύπωση, που το υλικό είναι ακόμα σχετικά μαλακό. Ένα κοπίδι με φρέσκια λάμα, καθώς κι ένα μυτοσίμπιδο ή πενσάκι είναι επαρκή για την εργασία. Σημειώσεις κι οδηγίες δίνονται ανά αντικείμενο.
- Για την επιλογή του προσανατολισμού των αντικειμένων στην επιφάνεια εκτύπωσης, και συνεπώς της διεύθυνσης των στρωμάτων (layers), λαμβάνονται υπόψιν τα εξής δεδομένα, σε σειρά προτεραιότητας:
 - + Η διεύθυνση στην οποία δομούνται τα στρώματα είναι αυτή στην οποία το αντικείμενο παρουσιάζει α) τη μικρότερη δυσκαμψία, β) τον υψηλότερο κίνδυνο μηχανικής αστοχίας (τα στρώματα είναι ευκολότερο να διαχωριστούν-αποκολληθούν υπό τάση).
 - + Ο προσανατολισμός που επιτρέπει τη χρήση των λιγότερων δυνατών υποστηρικτικών δομών είναι προτιμότερος τόσο από άποψη μετέπειτα επεξεργασίας όσο και από άποψη φινιρίσματος.
- Για την επιλογή της θέσης των αντικειμένων στην επιφάνεια εκτύπωσης, λαμβάνεται υπόψιν η κατάσταση της αυτοκόλλητης ταινίας που εξασφαλίζει την πρόσφυση του υλικού (κατά πόσο έχει σκισίματα ή άλλου είδους φθορά). Αμφότεροι οι εκτυπωτές του εργαστηρίου -στην παρούσα χρονική στιγμή- παρουσιάζουν καλή πρόσφυση στη δεξιά πλευρά της επιφάνειας εκτύπωσης, οπότε τα αντικείμενα τοποθετούνται προσεγγιστικά σε εκείνη τη θέση.

Τα στοιχεία παρουσιάζονται σε μορφή πίνακα, ανά ενότητα, με τις απαραίτητες παραμέτρους. Στους πίνακες χρησιμοποιούνται οι ορολογίες στην αγγλική, όπως στο πρόγραμμα Cura.

Κατόπιν ακολουθούν μικρογραφίες με προεπισκόπηση του κάθε μέρους στο επίπεδο εκτύπωσης και σύντομες παρατηρήσεις. Με **κόκκινο** χρώμα σημειώνεται το υλικό που αντιστοιχεί στο σώμα του αντικειμένου· με **κίτρινο** και **πράσινο** αντίστοιχα σημειώνονται το ανώτατο στρώμα και η περίμετρος κάθε επιφάνειάς του. Με **γαλάζιο** χρώμα σημειώνονται οι υποστηρικτικές δομές.

Στο αρχείο αποθηκεύονται ο προκύπτων G-code (αρχεία gcode), καθώς και το σύνολο της πληροφορίας (ως project/session), όπως περιέχεται στο πρόγραμμα Cura για κάθε αντικείμενο (αρχεία 3mf)¹²⁶.

¹²⁶ Για την περίπτωση που ο χρήστης θελήσει να παρέμβει στις παραμέτρους εκτύπωσης, τη θέση του αντικειμένου, τα αντίτυπα κ.λπ., χωρίς ωστόσο να χρειαστεί να «φορτώσει» όλα τα δεδομένα εκ του μηδενός.

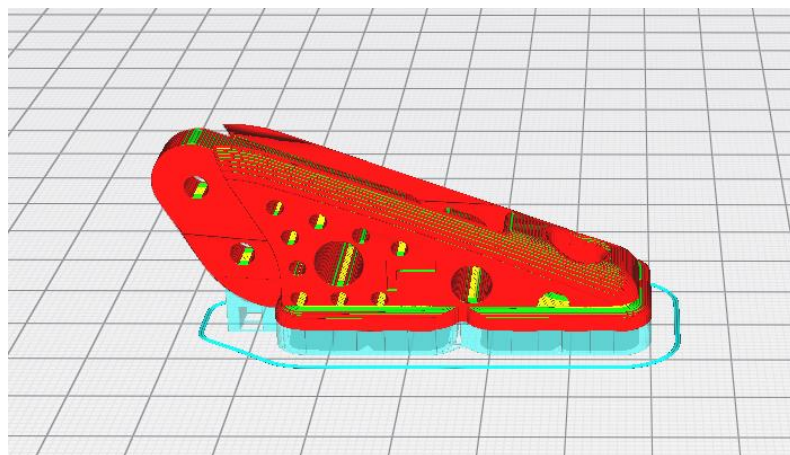
(A) Finger assemblies

Assembly	(A)	Fingers				
Part #	File name	Material	Printing time (approx.)	Wall Line Count	Infill Density	Support
A1	finger_2phalanx_straight.stl	PLA	2h	D	D	On - T.B.
A2	finger_base.stl	PLA	1h 10min	D	D	On - T.B.
A3	link_inner.stl	PLA	20min	D	D	Off
A4	link_outer_limSwitch.stl	PLA	50min	D	D	On - T.B.
A5	linl_outer_cover.stl	PLA	15min	D	D	On - T.B.
A9	rod.stl	PLA	15min	D	D	Off
A10	finger_2phalanx_concave.stl	PLA	2h 10min	D	D	On - T.B.
A11a	finger_2phalanx_hinged_lower.stl	PLA	1h 30min	D	D	On - T.B.
A11b	finger_2phalanx_hinged_upper.stl	PLA	1h	D	D	On - T.B.
A12	finger_1phalanx_FinRay.stl	TPU	2h 30min	D	D	On - T.B.
Ax	finger_skin_mold.stl	PLA	40min	D	D	Off

Definitions | D = Default value , T.B. = Touching Builtplate , E = Everywhere

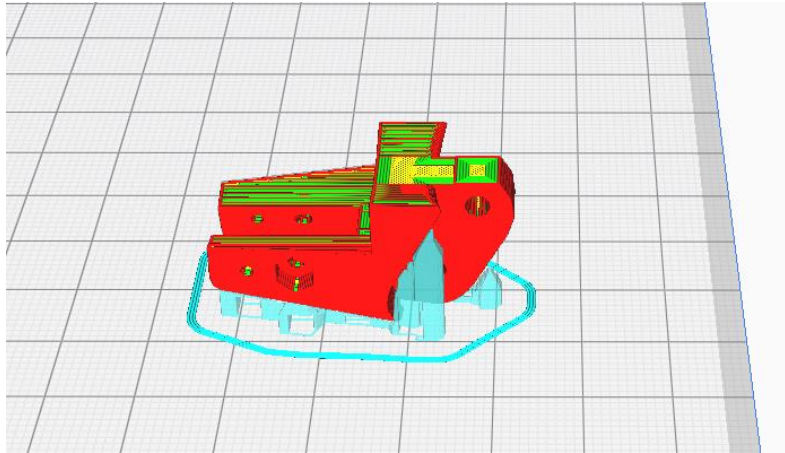
Finger, 2phalanx, straight (A1) : Τυπώνεται με την έσω επιφάνεια των δακτύλων προς τα κάτω. Αποφεύγεται έτσι η δημιουργία υποστηρικτικών δομών στα αυλάκια των αισθητήρων FSR, όπου θα ήταν δύσκολο να αφαιρεθούν/καθαριστούν.

Απαιτείται η αφαίρεση των δομών στο κάτω μέρος, καθώς και η διάνοιξη των δύο οπών στερέωσης στους συνδέσμους στην ονομαστική διάμετρο 3mm. Θα πρέπει να ελεγχθεί επίσης η επιφάνεια που θα στερεωθούν οι αισθητήρες FSR, ώστε να είναι επίπεδη, χωρίς προεξοχές.



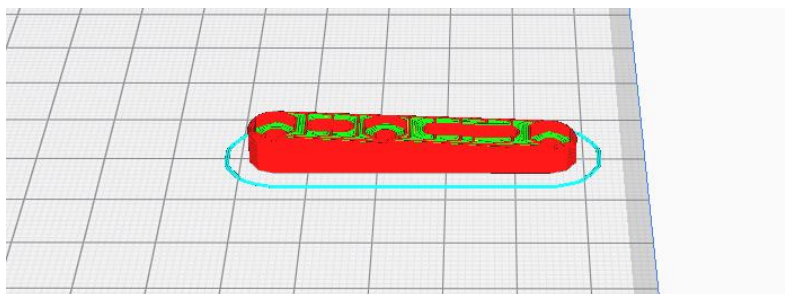
Εικόνα Γ.1 - Finger, 2-phalanx, straight (A1).

Finger base (A2) : Τυπώνεται στην συγκεκριμένη διαμόρφωση για τους εξής λόγους: α) για να αποφευχθεί η δημιουργία δομών στο σημείο σύνδεσης με το περίβλημα (dovetail joint), οι οποίες θα ήταν δύσκολο να καθαριστούν, β) για να είναι συμμετρικός αυτός ο σύνδεσμος, ώστε να επιτυγχάνεται καλή εφαρμογή και γ) για να είναι τα στρώματα σε μια κατεύθυνση που να εμποδίζει τη διάσχιση του αντικειμένου υπό τάση (π.χ. αν ήταν κατακόρυφα)¹²⁷. Απαιτείται η αφαίρεση των δομών στο κάτω μέρος, καθώς και η διάνοιξη των δύο οπών στερέωσης των συνδέσμων στην ονομαστική διάμετρο 3mm. Οι οπές στερέωσης στο περίβλημα, καθώς και οι εσοχές για το κεφάλι της βίδας/το παξιμάδι δεν χρειάζονται επεξεργασία εν γένει. Οι διαστάσεις έχουν σχεδιαστεί ώστε το παξιμάδι να τοποθετείται σφηνωτά, κάτι που διευκολύνει τη συναρμολόγηση κατά τη γνώμη μου.



Εικόνα Γ.2 - Finger base (A2).

Link inner (A3) : Η διαμόρφωση αυτή είναι η ευκολότερη στην εκτύπωση και τα στρώματα συνεισφέρουν στη δυσκαμψία στη διεύθυνση κίνησης των δακτύλων. Δεν υπάρχουν υποστηρικτικές δομές, αλλά απαιτείται η διάνοιξη των τριών οπών στερέωσης στην βάση, τα δάκτυλα και τον μεσαίο σύνδεσμο (με το «τραπεζοειδές» περικόχλιο) στην ονομαστική διάμετρο 3mm. Οι εσοχές για τα παξιμάδια σχεδιάζονται ώστε να μπαίνουν σφηνωτά και δεν χρειάζονται εν γένει επεξεργασία. Η περιφέρεια της άνω επιφάνειας -όπως εκτυπώνεται- σχεδιάζεται με ένα μικρό fillet κι ιδανικά αυτό μπορεί να γίνει και στην κάτω επιφάνεια με το κοπίδι ή γυαλόχαρτο. Η επεξεργασία αυτή βοηθάει στην αποφυγή τριβής προεξοχών του αντικειμένου με τα άλλα συνδεόμενα μέρη.

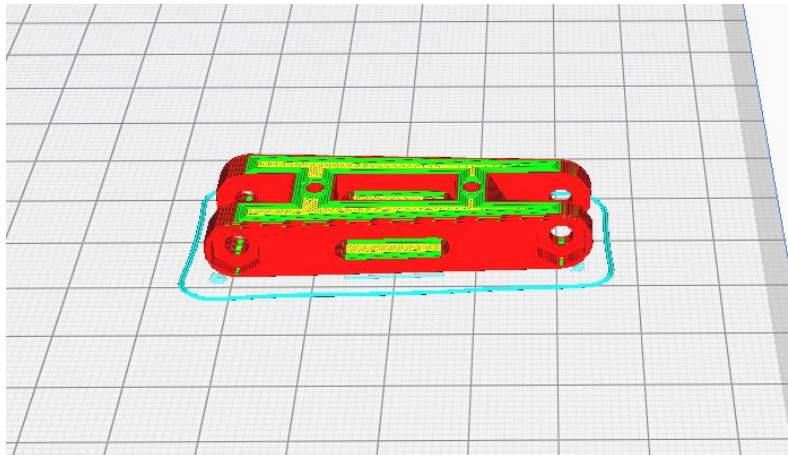


Εικόνα Γ.3 - Link inner (A3).

¹²⁷ Ιδανικό θα ήταν να τυπωθεί με την πλάγια επιφάνεια (εκεί όπου σχηματίζονται οι οπές) στο επίπεδο εκτύπωσης, καθώς τα στρώματα θα δημιουργούσαν την μεγαλύτερη δυσκαμψία υπό τάση. Ωστόσο αυτό δημιουργεί πρόβλημα στον σημείο του συνδέσμου, όπως στα ζητήματα α) και β).

Link outer, w/ limit switch (A4) : Αντίστοιχα με τον εσωτερικό σύνδεσμο η διαμόρφωση αυτή είναι η ευκολότερη στην εκτύπωση. Δομές υποστήριξης δημιουργούνται μόνο στο κεκλιμένο επίπεδο στην κάτω πλευρά του αντικειμένου -αριστερά στην εικόνα- (που λειτουργεί ως μηχανικό στοπ στην κίνηση πάνω στη βάση των δακτύλων).

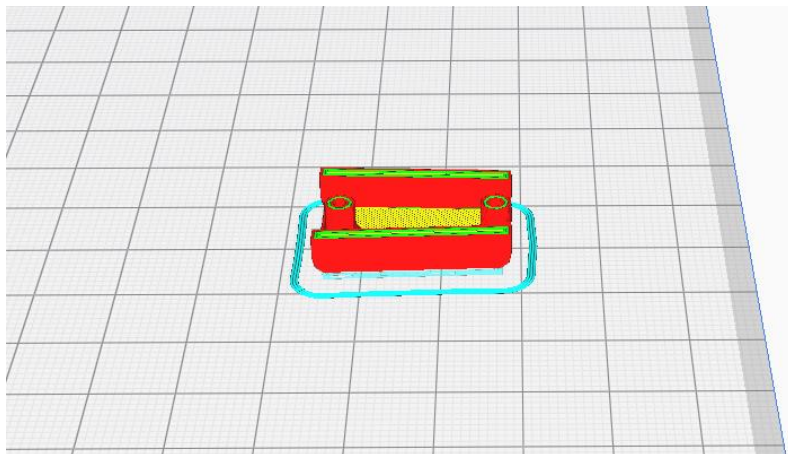
Απαιτείται η αφαίρεση των υποστηρικτικών δομών και η διάνοιξη των οπών στερέωσης στη βάση και τα δάκτυλα στην ονομαστική διάμετρο 3mm. Ως συνήθως, οι εσοχές για τα παξιμάδια δεν χρήζουν περαιτέρω επεξεργασίας υπό κανονικές συνθήκες. Η δημιουργία μικρού fillet στην περιφέρεια της κάτω επιφάνειας (όπως τυπώνεται), καθώς και ο έλεγχος για προεξοχές στις περιοχές που το αντικείμενο εφάπτεται στη βάση και τα δάκτυλα είναι επιθυμητός.



Εικόνα Γ.4 - Link outer, w/ limit switch (A4).

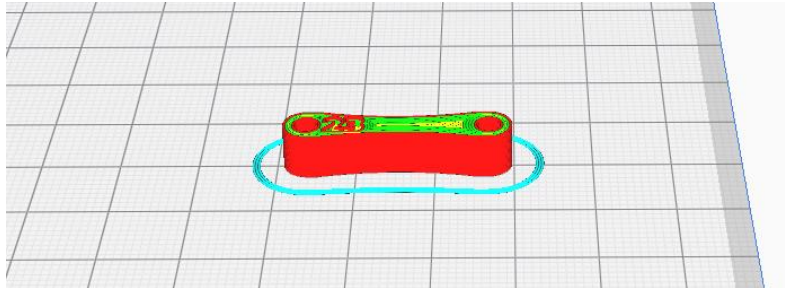
Link outer, cover (A5) : Τυπώνεται με στη συγκεκριμένη διαμόρφωση για την αποφυγή δημιουργίας εκτενών δομών υποστήριξης. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην μεταχείριση, καθώς οι βάσεις και τα πλαϊνά τοιχώματα είναι εύκολο να διασχιστούν λόγω της διαμόρφωσης εκτύπωσης. Σε περίπτωση αποκόλλησης, η χρήση κυανοακρυλικής κόλλας (κόλλα «στιγμής»), με προσεκτική ευθυγράμμιση, θα επαναφέρει το αντικείμενο στη λειτουργική κατάσταση.

Το -αισθητικής φύσης- fillet στην επιφάνεια που εφάπτεται στο επίπεδο εκτύπωσης στηρίζεται από επιπλέον υλικό (ελάχιστο), το οποίο μπορεί να αφαιρεθεί με το κοπίδι. Οι οπές στερέωσης είναι επιθυμητό να διανοιχθούν στην ονομαστική διάμετρο 2mm για διευκόλυνση της συναρμολόγησης.



Εικόνα Γ.5 - Link outer, cover (A5).

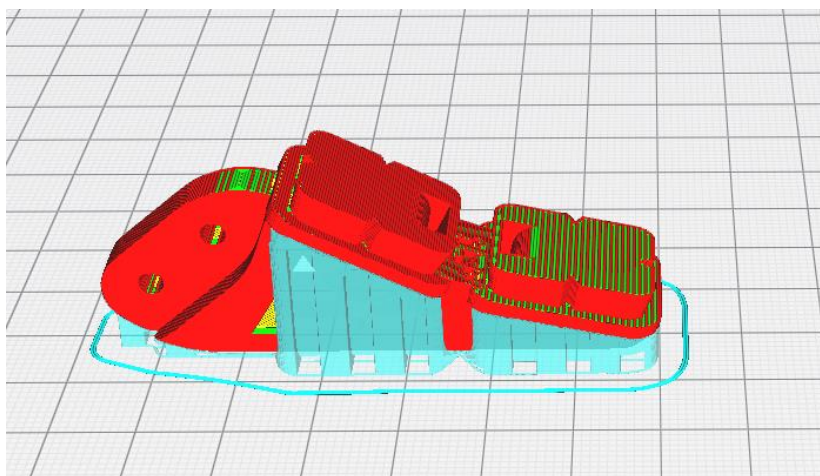
Rod (A9) : Η διαμόρφωση αυτή είναι η ευκολότερη στην εκτύπωση και τα στρώματα συνεισφέρουν στη δυσκαμψία στη διεύθυνση κίνησης των δακτύλων. Δεν υπάρχουν υποστηρικτικές δομές, αλλά απαιτείται η διάνοιξη των δύο οπών στερέωσης στα δάκτυλα και τον μεσαίο σύνδεσμο (με το «τραπεζοειδές» περικόχλιο) στην ονομαστική διάμετρο 3mm. Ιδανικά μπορεί να προστεθεί ένα μικρό fillet στις περιφέρειες της άνω και κάτω επιφάνειας με το κοπίδι.



Εικόνα Γ.6 - Rod (A9).

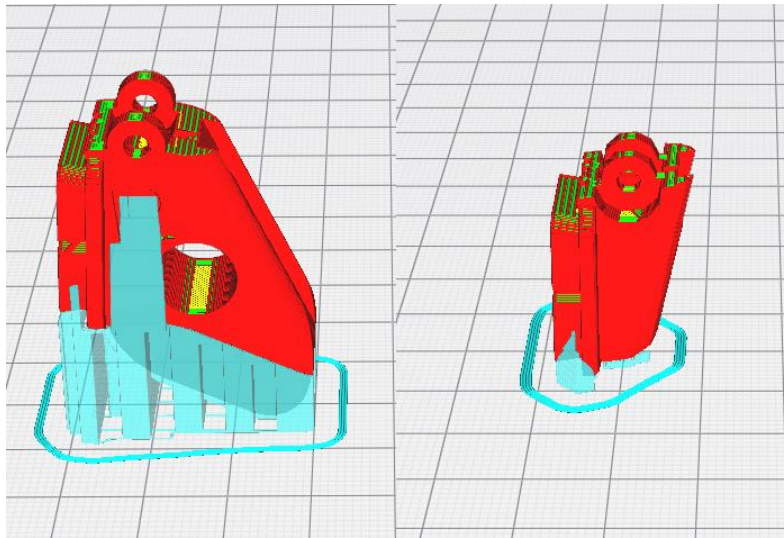
Finger, 2-phalanx, concave (A10) : Η διαμόρφωση επιλέγεται ως συμβιβασμός μεταξύ της εκτύπωσης υποστηρικτικών δομών και του συνολικού χρόνου εκτύπωσης. Οι δύο επιφάνειες στερέωσης των αισθητήρων FSR δεν μπορούν να είναι ταυτόχρονα επίπεδες, οπότε το χαρακτηριστικό αυτό εγκαταλείπεται. Τα αυλάκια των αισθητήρων που συνδέουν την εμπρός με την πίσω επιφάνεια δεν είναι κάθετα στο επίπεδο εκτύπωσης (όπως συμβαίνει στο αντικείμενο A1), αλλά δεν δημιουργούνται υποστηρικτικές δομές, οι οποίες είναι εν γένει δύσκολο να αφαιρεθούν. Δυστυχώς δημιουργούνται δομές στο αυλάκι στην πίσω επιφάνεια ωστόσο (κάτω επιφάνεια στην εικόνα).

Απαιτείται η αφαίρεση των υποστηρικτικών δομών τόσο στα πλάγια, όσο και στο αυλάκι στην κάτω πλευρά του αντικειμένου (οι οποίες ωστόσο πιθανόν να αποκολληθούν από αυτό και να παραμείνουν στο επίπεδο εκτύπωσης). Επίσης, απαιτείται η διάνοιξη των δύο οπών στερέωσης στους συνδέσμους στην ονομαστική διάμετρο 3mm. Τέλος, η επιφάνεια στερέωσης των αισθητήρων FSR πρέπει να επεξεργαστεί με γυαλόχαρτο (π.χ. #240), ώστε να γίνει σχετικά λεία.



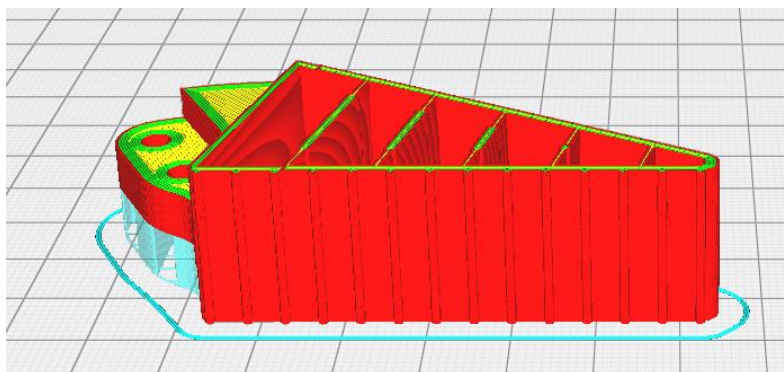
Εικόνα Γ.7 - Finger, 2-phalanx, concave (A10).

Finger, 2-phalanx, hinged (A11a, A11b) : Τα δύο μέρη τυπώνονται στη συγκεκριμένη διαμόρφωση αποκλειστικά για να εξασφαλιστεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα στο σημείο ένωσης τους (άρθρωση) - ελλείψει υποστηρικτικών δομών. Απαιτείται η αφαίρεση των δομών που δημιουργούνται στην κάτω επιφάνειά τους, καθώς και η διάνοιξη των δύο οπών στερέωσης στους συνδέσμους στην ονομαστική διάμετρο 3mm. Το ίδιο εφαρμόζεται και στις οπές στερέωσης στο σημείο της άρθρωσης, μαζί με έλεγχο για τυχόν προεξοχές. Οι επιφάνειες στερέωσης των αισθητήρων FSR καλό είναι να λειανθούν με γυαλόχαρτο (π.χ. #240).



Εικόνα Γ.8 - Finger, 2-phalanx, hinged (A11a, A11b).

Finger, 1-phalanx, FinRay (A12) : Η διαμόρφωση επιλέγεται ώστε να εξασφαλίζεται η συνοχή των στρωμάτων υπό τάση, καθώς έτσι τυπώνονται κάθετα στην κίνηση των δακτύλων. Εν γένει, η αφαίρεση υποστηρικτικών δομών είναι δυσκολότερη στο εν λόγω υλικό (TPU), γιατί στην περίπτωση που δεν αποκολλώνται, πρέπει να κοπούν με προσοχή με το κοπίδι. Για το λόγο αυτό επιλέγεται η μείωση της πυκνότητάς τους στο προφίλ εκτύπωσης (σε σχέση με το PLA). Επίσης, οι οπές στερέωσης στα δάκτυλα σχεδιάζονται με ελαφρά μεγαλύτερη ονομαστική διάμετρο (3.2mm), ώστε να μην χρειάζονται περαιτέρω επεξεργασία. Ιδανικά, απαιτείται μόνο η προσεκτική αφαίρεση (ή κοπή) των δομών υποστήριξης στο κάτω μέρος της βάσης του δακτύλου (αριστερά στην εικόνα).

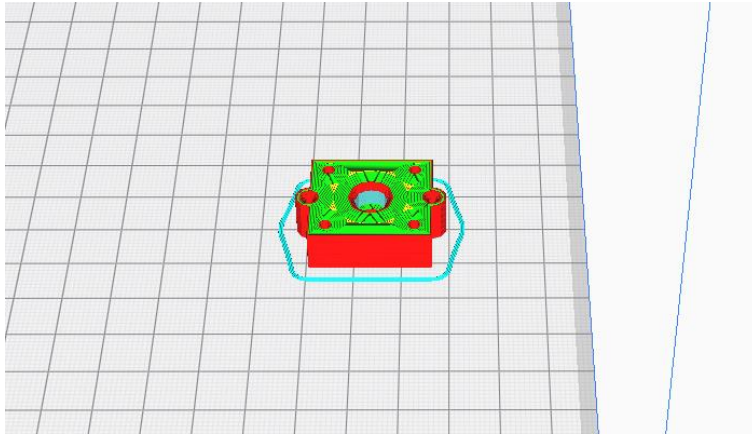


Εικόνα Γ.9 - Finger, 1-phalanx, FinRay (A12).

Finger skin mold (Ax) : Το καλούπι σχεδιάστηκε ως ενιαίο κομμάτι, με σκοπό να είναι ευθυγραμμισμένο το εσωτερικό και το εξωτερικό μέρος του κατά τη χύτευση της σιλικόνης ¹²⁸. Για το λόγο αυτό τοποθετείται με την ακόλουθη διαμόρφωση στο επίπεδο εκτύπωσης, με απενεργοποιημένη την επιλογή για δημιουργία υποστηρικτικών δομών. Οι διαστάσεις του επιτρέπουν την εκτύπωση της άνω επιφάνειας (στην εικόνα), χωρίς την κοίλωση των νημάτων θερμοπλαστικού από το βάρος τους.

Πέραν της προσοχής κατά την αφαίρεσή του από το επίπεδο εκτύπωσης, ώστε να μην αποκολληθεί το εσωτερικό από το εξωτερικό μέρος, δεν χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία προς το παρόν.

Η μέθοδος χύτευσης περιγράφεται στο υποκεφάλαιο Γ3 του παραρτήματος.



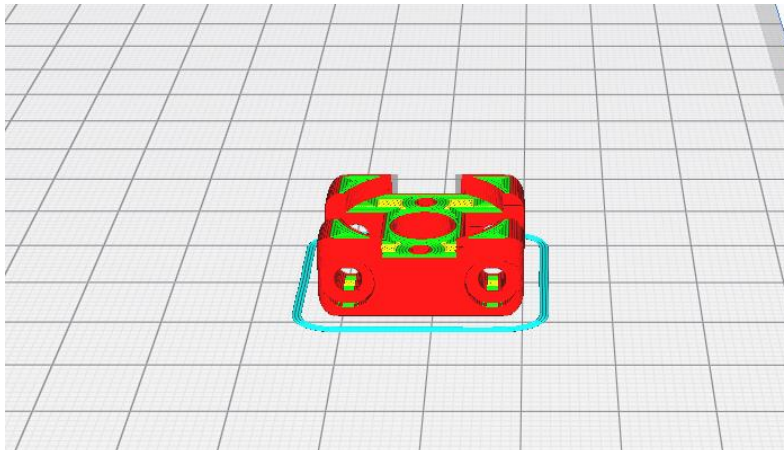
Εικόνα Γ.10 - Finger skin mold (Ax).

¹²⁸ βλ. και το αντίστοιχο τεχνικό σχέδιο στο Παράρτημα Α.

(B) Rod Link assembly

Assembly		(B)	Rod Link			
Part #	File name	Material	Printing time (approx.)	Wall Line Count	Infill Density	Support
B1	rod_link_dual.stl	PLA	30min	D	D	Off
Definitions		D = Default value , T.B. = Touching Builtplate , E = Everywhere				

Rod link, dual (B1) : Η συγκεκριμένη διαμόρφωση επιλέγεται βεβαίως για την αποφυγή δημιουργίας υποστηρικτικών δομών στην εσοχή που τοποθετείται το περικόχλιο. Η μόνη επεξεργασία που απαιτείται είναι η διάνοιξη των οπών στερέωσης των πλαϊνών συνδέσμων (A9) στη ονομαστική διάμετρο 3mm.



Εικόνα Γ.11 - Rod link, dual (B1).

(D) Motor Casing assemblies

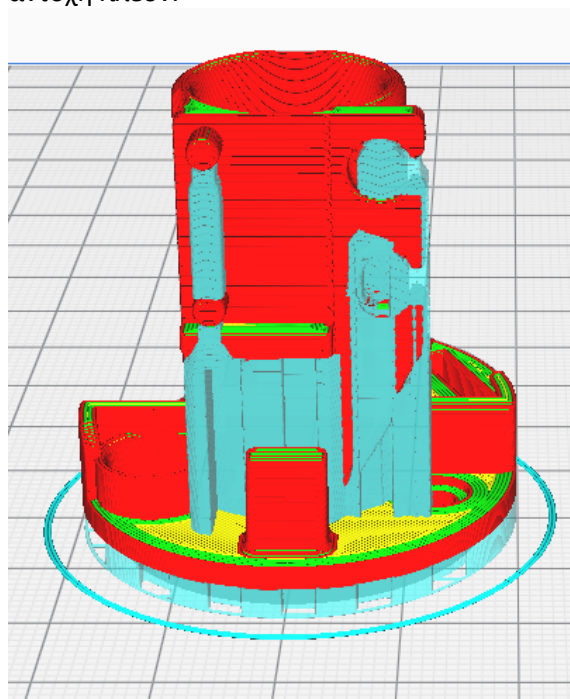
Assembly	(D)	Motor Casing				
Part #	File name	Material	Printing time (approx.)	Wall Line Count	Infill Density	Support
D1	motor_casing_escap16.stl	PLA	2h 15min	D	D	On - E (8%)
D10	motor_casing_maxon16.stl	PLA	2h 15min	D	D	On - E (8%)
Definitions		D = Default value , T.B. = Touching Builtplate , E = Everywhere , (X%) = Support Density value				

Motor casing, Escap 16 & Motor casing, Maxon 16 (A1, A10) : Η επιφάνεια της βάσης που βιδώνεται στο άνω καπάκι του περιβλήματος τοποθετείται στο επίπεδο εκτύπωσης για τον ίδιο λόγο με προηγουμένως - αποφυγή εκτύπωσης περιττών δομών υποστήριξης. Δεδομένου ότι είναι αδύνατον να αποφευχθεί η εκτύπωση τέτοιων δομών στον περιφερειακό χείλος που εφάπτεται στο επίπεδο εκτύπωσης, η πυκνότητά τους μειώνεται στο 8%. Οι δομές εδώ ενεργοποιούνται για όλο το ύψος του αντικειμένου .

Απαιτείται φυσικά η αφαίρεση των δομών που αναφέρθηκαν προηγουμένως, η οποία θα είναι σχετικά εύκολη λόγω μειωμένης πυκνότητας. Ενδείκνυται ο καθαρισμός του σημείου αυτού από τυχόν υπολείμματα ή προεξοχές με το κοπίδι, ώστε να επιτυγχάνεται σωστή εφαρμογή στο καπάκι του περιβλήματος.

Απαιτείται επίσης η αφαίρεση των δομών από τις δύο προεξοχές στήριξης της IMU (LSM6DS3), οι οποίες σχετικά εύκολα μπορούν να σπάσουν. Συνίσταται να κοπούν προσεκτικά στην άκρη των κυλινδρικών προεξοχών με το κοπίδι και στη συνέχεια να αφαιρεθούν με το μυτοσίμπιδο. Με παρόμοιο τρόπο πρέπει να αφαιρεθούν οι δομές από τις θέσεις του motor driver (DRV8801) και των καλωδίων στο πλάι.

Σε περίπτωση αποκόλλησης, η χρήση κυανοακρυλικής κόλλας λειτουργεί μεν, αλλά με μειωμένη αντοχή πλέον.

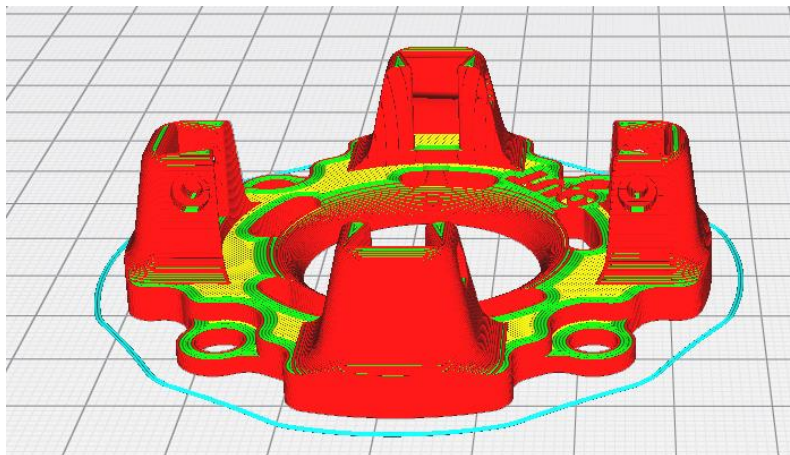


Εικόνα Γ.12 - Motor casing, Escap 16 & Motor casing, Maxon 16 (A1, A10).

(F) **Manipulator Base** assembly

Assembly		(F)	Manipulator Base			
Part #	File name	Material	Printing time (approx.)	Wall Line Count	Infill Density	Support
F1	manipulator_mount.stl	PLA	2h 30min	D	D	Off
F2	manipulator_base_gumball.stl	PLA	1h	D	D	Off
Fxa	damping_base-1.0.stl	TPU	3h 30min	10	30	On - E
Fxz	damping_base-1.0.stl	TPU	4h	10	30	On - E
Definitions		D = Default value , T.B. = Touching Builtplate , E = Everywhere				

Manipulator mount, casing (F1) : Φυσικά η συγκεκριμένη τοποθέτηση εξυπηρετεί καλύτερα τις προδιαγραφές που τέθηκαν. Δεν υπάρχουν προεξοχές κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα εκτύπωσης, συνεπώς οι δημιουργία υποστηρικτικών δομών απενεργοποιείται εντελώς. Συνίσταται η επιβεβαίωση της διαμέτρου των τεσσάρων οπών που στερεώνονται οι ελαστικοί αποσβεστήρες (F3) στην ονομαστική διάσταση 5mm, καθώς και το πέρασμα της περιφέρειάς τους με γυαλόχαρτο (π.χ. #240), ώστε να είναι ομαλές. Αυτό θα βοηθήσει στην αποφυγή πρόωρης φθοράς ή σχισμού στους αποσβεστήρες. Οι υπόλοιπες οπές ή εσοχές δεν χρειάζονται άλλη επεξεργασία.



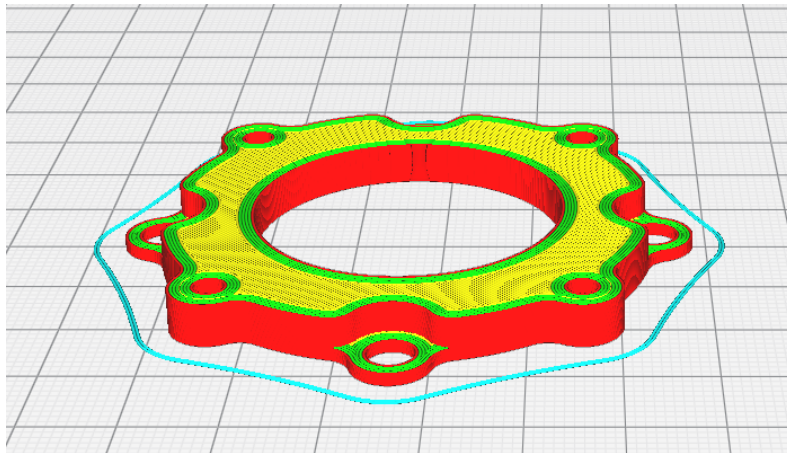
Εικόνα Γ.13 - Manipulator mount, casing (F1).

Manipulator base, gumball (F2) : Η εικονιζόμενη διαμόρφωση είναι η ευκολότερη για εκτύπωση.

Προσοχή απαιτείται κατά την αποκόλληση από το επίπεδο εκτύπωσης, ώστε να μην σπάσουν οι προεξέχουσες βάσεις των αποσβεστήρων (F3).

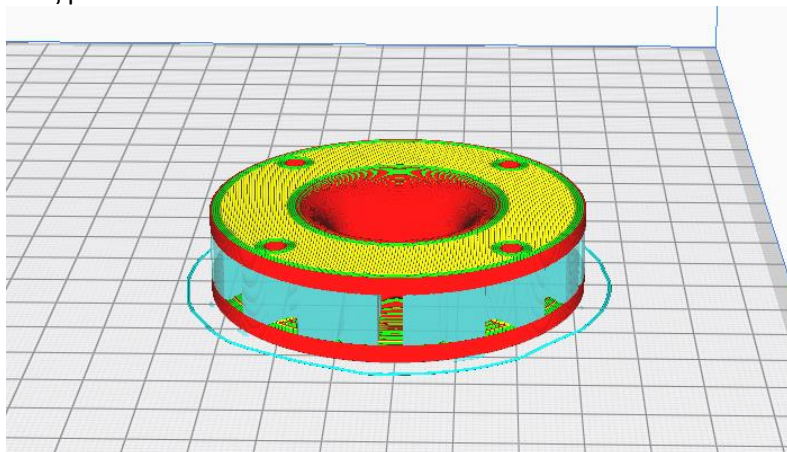
Αντίστοιχα με την προηγούμενη βάση (F1), συνίσταται η επιβεβαίωση της διαμέτρου των τεσσάρων οπών που αυτοί στερεώνονται, στην ονομαστική διάσταση 5mm. Το πέρασμα της περιφέρειάς τους με γυαλόχαρτο (π.χ. #240), ώστε να είναι ομαλές, θα βοηθήσει στην αποφυγή πρόωρης φθοράς ή σχισμού στους αποσβεστήρες.

Οι υπόλοιπες οπές και εσοχές δεν χρειάζονται περαιτέρω επεξεργασία.



Εικόνα Γ.14 - Manipulator base, gumball (F2).

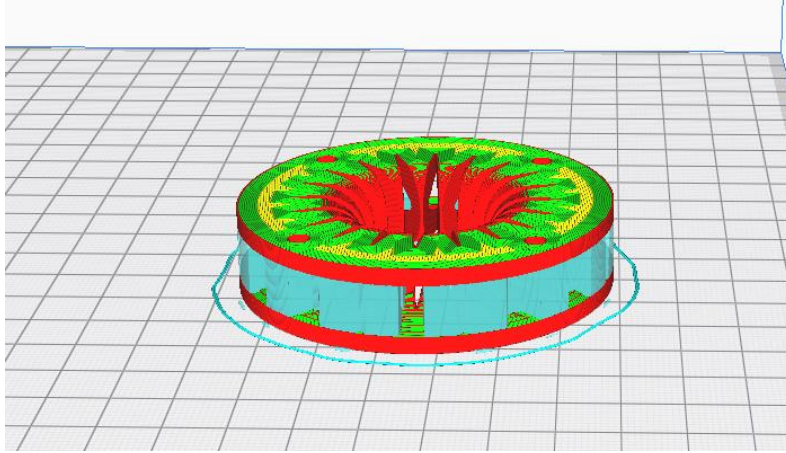
Damping base, 1-dof (Fxa) : Καθώς το αντικείμενο είναι συμμετρικό ως προς το επίπεδο που είναι παράλληλο και ισαπέχον από την άνω και κάτω βάση του, δεν έχει σημασία ποια θα τοποθετηθεί στο επίπεδο εκτύπωσης. Επειδή το υλικό (TPU) είναι ελαστικό αυξάνεται η πυκνότητα εκτύπωσης στο 30%, ώστε να είναι πιο στιβαρό στις δύο επιφάνειες που συνδέεται στη βάση του end-effector και του βραχίονα (η πυκνότητα δεν επηρεάζει πρακτικά το ενδιάμεσο τμήμα που προσδίδει την ενδοτικότητα, καθώς είναι αρκετά λεπτό ώστε να τυπώνεται ως ομόκεντροι κύκλοι). Επίσης αυξάνεται ο αριθμός των περιμέτρων (wall line count) σε 10, ώστε να εξασφαλίζεται η στιβαρότητα στα σημεία που τοποθετούνται οι βίδες στερέωσης (με ροδέλες). Απαιτείται η απομάκρυνση των υποστηρικτικών δομών από το ενδιάμεσο μέρος ή η αφαίρεσή τους με το κοπίδι.



Εικόνα Γ.15 - Damping base, 1dof (Fxa).

Damping base, 2-dof (Fza) : Ομοίως με το προηγούμενο αντικείμενο (Fxa), δεν έχει σημασία ποια από τις δύο βάσεις του θα τοποθετηθεί στο επίπεδο εκτύπωσης. Αυξάνεται αντίστοιχα η πυκνότητα εκτύπωσης στο 30%, καθώς και ο αριθμός των περιμέτρων (wall line count) σε 10, ώστε να εξασφαλίζεται η στιβαρότητα στα σημεία που τοποθετούνται οι βίδες στερέωσης (με ροδέλες).

Απαιτείται η απομάκρυνση των υποστηρικτικών δομών από το ενδιάμεσο μέρος ή η αφαίρεσή τους με το κοπίδι.



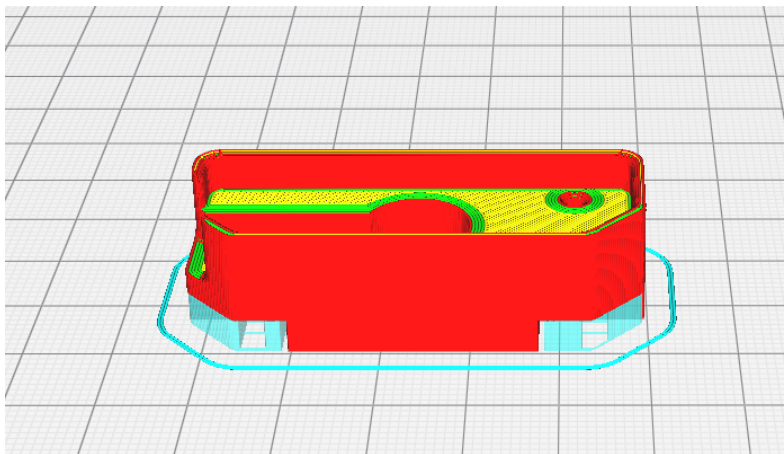
Εικόνα Γ.16 - Damping base, 2dof (Fza).

(G) Camera assemblies

Assembly	(G)	Cameras				
Part #	File name	Material	Printing time (approx.)	Wall Line Count	Infill Density	Support
G2	cam_Creative_inner_base.stl	PLA	45min	D	D	On - T.B.
G2	cam_Hercules_inner_base.stl	PLA	45min	D	D	On - T.B.
G7	cam_mounting_base_30deg.stl	PLA	25min	D	D	On - T.B.
Gx	cam_Creative_housing_patron.stl	PLA	1h	D	25	Off
Gx	cam_Hercules_housing_patron.stl	PLA	1h	D	25	Off

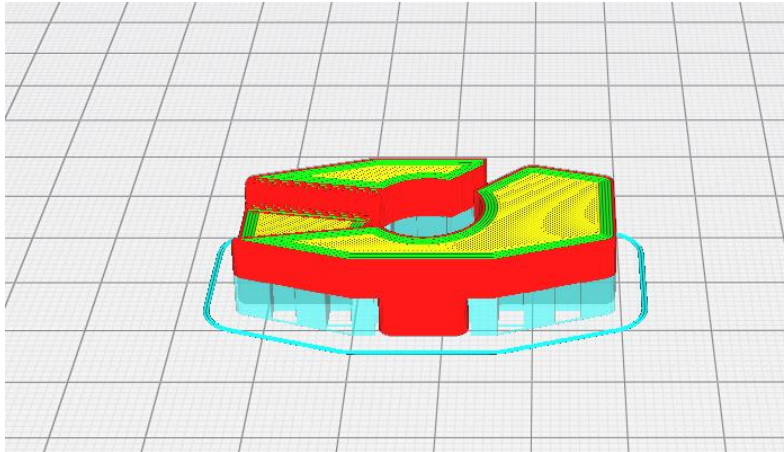
Definitions | D = Default value , T.B. = Touching Builtplate , E = Everywhere

Cam Creative, inner base (G2) : Το αντικείμενο τοποθετείται έτσι ώστε να μην τυπωθούν υποστηρικτικές δομές στην εσοχή όπου εφαρμόζει το PCB της κάμερας. Η αφαίρεση των δομών από την κάτω επιφάνεια είναι εύκολη και, στην προκειμένη περίπτωση, οι όποιες ατέλειες ή σσονος σημασίας, καθώς δεν επηρεάζουν την εφαρμογή της βάσης στο περίβλημά της. Δεν απαιτείται άλλη επεξεργασία σε οπές, ακμές ή εσοχές.



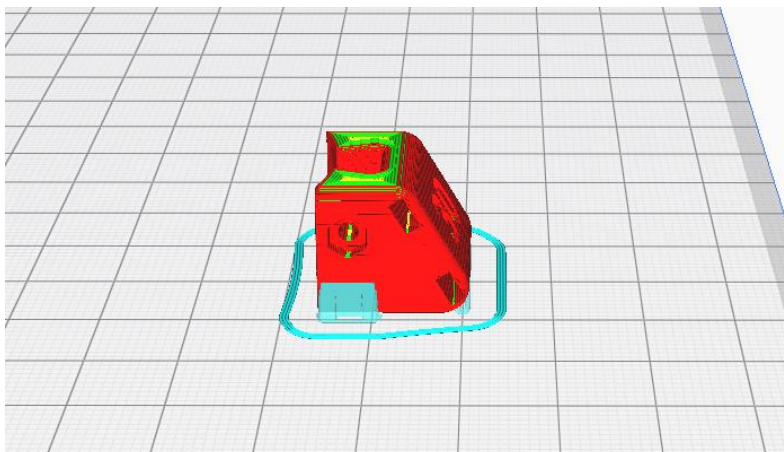
Εικόνα Γ.17 - Cam Creative, inner base (G2).

Cam Hercules, inner base (G2) : Αμφότερες οι βάσεις μπορούν να επιλεγθούν ώστε να εφάπτονται του επιπέδου εκτύπωσης χωρίς πρόβλημα. Η τοποθέτηση είναι άνευ ιδιαίτερης σημασίας, οπότε απλά προτιμάται η επιφάνεια που εφάπτεται το PCB της κάμερας να παραμείνει «καθαρή» από επιπλέον δομές. Πέραν της αφαίρεσης των υποστηρικτικών δομών στο κάτω μέρος, δεν απαιτείται κάποια άλλη επεξεργασία.



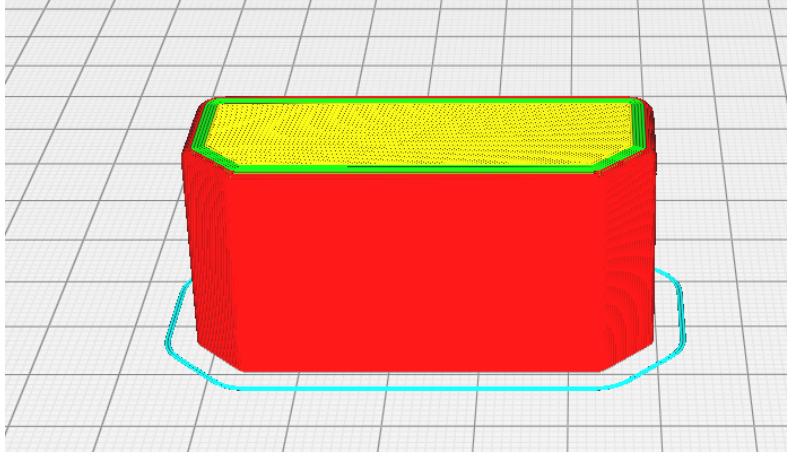
Εικόνα Γ.18 - Cam Hercules, inner base (G2).

Cam mounting base, 30deg (G7) : Το αντικείμενο θα μπορούσε και πάλι να τοποθετηθεί ανάποδα ως προς το επίπεδο εκτύπωσης, χωρίς τη δημιουργία δομών στερέωσης, καθώς η κλίση της πλάγιας επιφάνειας είναι 30° ως προς τον κατακόρυφο άξονα (δομές υποστήριξης τυπικά εκτυπώνονται για γωνίες $> 45^\circ$). Η μόνη επεξεργασία που απαιτείται είναι η αφαίρεση του λιγοστού υλικού που τοποθετείται στη βάση, λόγω του - κοσμητικού - fillet που έχει προστεθεί στις ακμές.



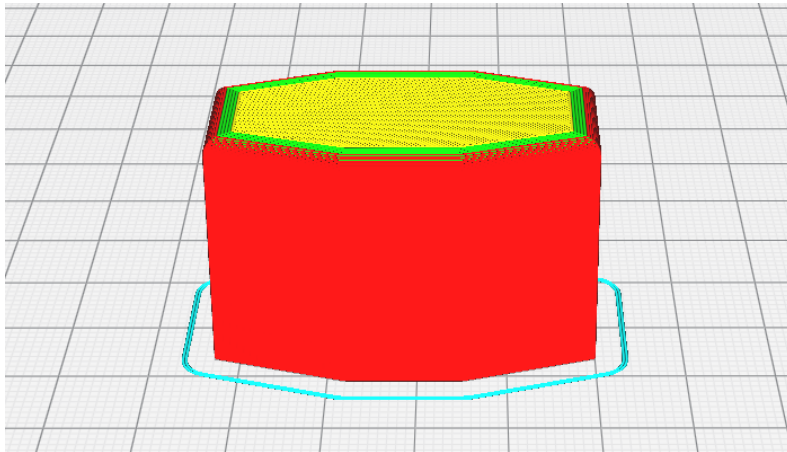
Εικόνα Γ.19 - Cam mounting base, 30deg (G7).

Cam Creative, housing patron (Gx) : Δεν υπάρχει τίποτα άξιο ιδιαίτερης προσοχής σε αυτό το αντικείμενο, πέρα από το γεγονός ότι εκτυπώνεται με μειωμένη πυκνότητα (25%), για οικονομία υλικού και χρόνου. Σε μία από τις εξάγωνες βάσεις του σχεδιάζεται μικρό fillet, για να διευκολύνεται το πέρασμα του θερμού σωλήνα που θα σχηματίσει το περίβλημα. Η απέναντι βάση είναι εκείνη που τοποθετείται στο επίπεδο εκτύπωσης.



Εικόνα Γ.20 - Cam Creative, housing patron (Gx).

Cam Hercules, housing patron (Gx) : Επίσης τίποτα άξιο ιδιαίτερης προσοχής σε αυτό το αντικείμενο. Εκτυπώνεται με μειωμένη πυκνότητα (25%), για οικονομία υλικού και χρόνου. Σε μία από τις εξάγωνες βάσεις του σχεδιάζεται μικρό fillet, για να διευκολύνεται το πέρασμα του θερμού σωλήνα που θα σχηματίσει το περίβλημα. Η απέναντι βάση είναι εκείνη που τοποθετείται στο επίπεδο εκτύπωσης.



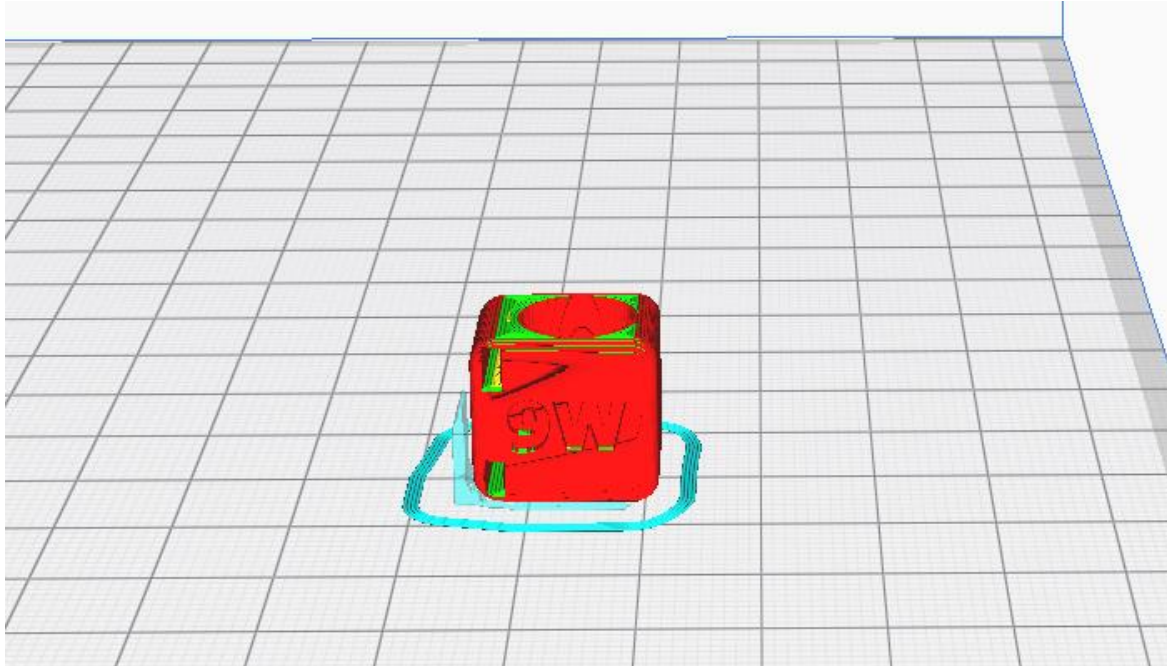
Εικόνα Γ.21 - Cam Hercules, housing patron (Gx).

(H) LED Lamp assembly

Assembly		(H)	LED Lamp			
Part #	File name	Material	Printing time (approx.)	Wall Line Count	Infill Density	Support
H2	LEDlamp_base.stl	PLA	25min	D	D	On - T.B.
Definitions		D = Default value , T.B. = Touching Builtplate , E = Everywhere				

Base, LED lamp (H2) : Το αντικείμενο τοποθετείται στην ευκολότερη προς εκτύπωση διαμόρφωση, με μερικές υποστηρικτικές δομές να προστίθενται στη βάση που εφάπτεται στο επίπεδο εκτύπωσης, λόγω των fillets στις ακμές του.

Δεν χρειάζεται καμία περαιτέρω επεξεργασία.



Εικόνα Γ.22 - Base, LED lamp (H2).

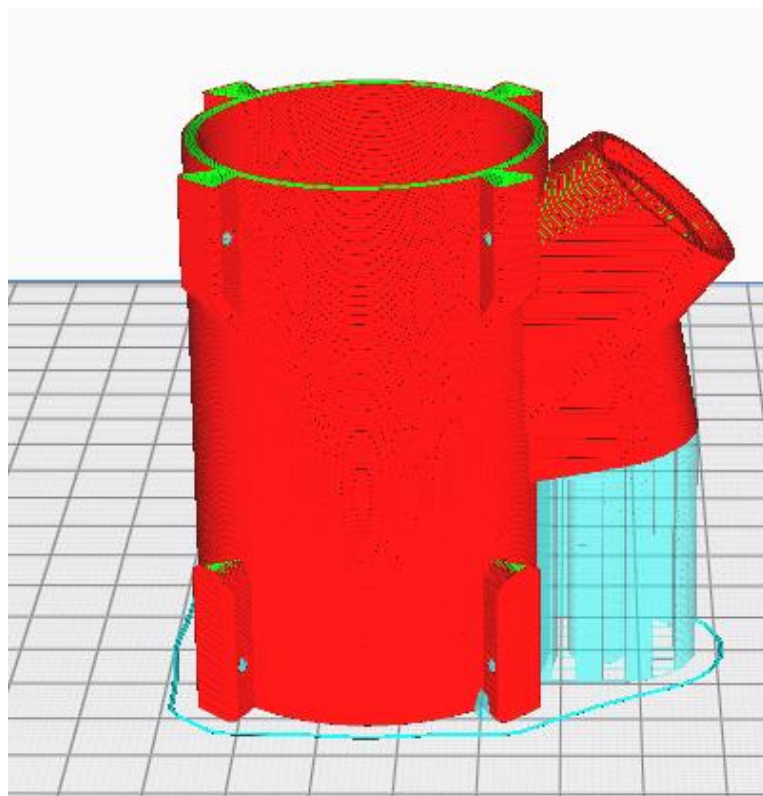
(J) “UndEE” System assembly

Assembly		(J)	UndEE			
Part #	File name	Material	Printing time (approx.)	Wall Line Count	Infill Density	Support
J1	main_casing-3Dprinted.stl	PLA	6h	10	D	On - E
Definitions		D = Default value , T.B. = Touching Builtplate , E = Everywhere				

Main casing, 3D-printed (J1) : Λαμβάνοντας υπόψιν το ενδεχόμενο να θελήσει κάποιος να χρησιμοποιήσει το μηχανισμό αποκλειστικά εκτός νερού, δημιουργείται η ακόλουθη έκδοση του περιβλήματος για 3D-εκτύπωση. Πρακτικά όλες οι διαστάσεις και οι γεωμετρίες διατηρούνται αυτούσιες από τη CNC-milled εκδοχή, εκτός από τις διαμέτρους των οπών για τη στερέωση του ηλεκτρικού συνδέσμου και του στυπιοθλίπτη των καλωδίων για τους αισθητήρες FSR (στην παράπλευρη επιφάνεια).

Αμφότερες σχεδιάζονται με ελαφρά μεγαλύτερη διάμετρο (12.3mm και 11mm αντίστοιχα), ώστε είτε να ανοιχθούν «ρηχά» σπειρώματα με σπειροτόμους (M13x1mm και M12x1.5mm) είτε να ανοιχθούν με τρυπάνι (διαμέτρου 13mm και 12mm) - η κοπή σπειρωμάτων σε 3D-printed αντικείμενα δεν είναι πάντοτε επιτυχής. Για το λόγο αυτό αυξάνεται ο αριθμός των περιμέτρων (wall line count) από 5 σε 10, μιας και σημαντικό μέρος θα απομακρυνθεί με το σπειροτόμο ή το τρυπάνι.

Η βάση του κυλινδρικού περιβλήματος που αντιστοιχεί στην πλευρά των δακτύλων τοποθετείται προς τα πάνω, διότι η διαμόρφωση αυτή δίνει ποιοτικότερο αποτέλεσμα στις επιφάνειες των προεξοχών στερέωσης του ηλεκτρικού συνδέσμου/του στυπιοθλίπτη.



Εικόνα Γ.23 - Main casing, 3D-printed (J1).

Γ2. Τα μέρη που κατασκευάζονται μέσω CNC-φρέζας και τόννου:

Όπως έχω αναφέρει νωρίτερα στην εργασία, το περίβλημα που σχεδιάστηκε για κατασκευή μέσω 3D-εκτύπωσης μεταφέρθηκε σχεδόν αυτούσιο στη διαδικασία κατασκευής μέσω CNC-φρέζας. Ως αποτέλεσμα, οι γεωμετρίες είναι αρκετά απαιτητικές και χρειάζεται η τοποθέτηση του κομματιού (stock ή billet στην «κατασκευαστική» αργκό) σε πολλές διαφορετικές διαμορφώσεις επί του τραπέζιου της φρέζας, κάτι που μπορεί να αποτελέσει σημαντική πηγή σφαλμάτων κι ανεπιθύμητων ανοχών. Οι προεξοχές στην παράπλευρη επιφάνεια, όπου συνδέονται οι βάσεις των δακτύλων και η βάση για το βραχίονα, κάνουν επίσης χρήση του 4^{ου} άξονα κατεργασίας¹²⁹, προσθέτοντας επιπλέον πολυπλοκότητα.

Από την άλλη πλευρά, η κατασκευή των δύο καπακιών είναι σχετικά εύκολη, αλλά απαιτεί προσοχή κατά τη μετάβαση από τη CNC-φρέζα στο χειροκίνητο (και δυστυχώς ταλαιπωρημένο μηχανικά) τόννο - ιδιαίτερα τα αυλάκια των o-rings, που πρέπει να είναι πολύ ακριβή σε διαστάσεις, για να μονώνουν επιτυχώς το περίβλημα.

Επίσης, μεταξύ αυτών των δυσκολιών τίθεται και το ζήτημα απόκτησης εμπειρίας και εξοικείωσης με τις μηχανές, τις μεθόδους κατεργασίας και τα κοπτικά, παράμετροι που δεν υπήρχαν ως δεδομένο. Η εμπειρία αυτή μεταφράζεται στην εξοικονόμηση χρόνου και φυσικά την καταστροφή όσο το δυνατόν λιγότερων υλικών μέχρι την επίτευξη ενός χρηστικού αποτελέσματος.

Αυτό το *χρηστικό* αποτέλεσμα θα περιγράψω με τις μεθοδολογίες που ακολουθούν, μαζί με τις ποικίλες ατέλειές του (σε όλα τα αντίτυπα των μερών¹³⁰), μιας και αυτή είναι η *βάση* που δημιουργείται από την παρούσα έκδοση. Θα προσπαθήσω επίσης να συμπεριλάβω την όποια εξέλιξη και βελτιστοποίηση κατάφερα να κάνω στις διεργασίες προχωρώντας από κομμάτι σε κομμάτι¹³¹, αιτιολογώντας κατά το δυνατόν τη συλλογιστική μου.



Εικόνα Γ.24 - Ενδεικτική εικόνα (από νεότερη έκδοση) της CNC-φρέζας, Haas MiniMill, που υπάρχει στο εργαστήριο E.A.E. [αριστερά].

¹²⁹ Ενδεικτικά, μια φρέζα συνήθως έχει δυνατότητα κίνησης σε έναν ή περισσότερους από τους τρεις άξονες ενός καρτεσιανού συστήματος (έστω X, Y, Z) και, δυνητικά στροφής, γύρω από τον X-άξονα (4^{ος} «άξονας» κατεργασίας ή A-άξονας), τον Y-άξονα (5^{ος} «άξονας» κατεργασίας ή B-άξονας) ή ακόμη και τον Z-άξονα (6^{ος} «άξονας» κατεργασίας ή C-άξονας).

¹³⁰ Υπενθυμίζω ότι ζητήθηκαν δύο αντίτυπα του μηχανισμού, συν ένα ανταλλακτικό.

¹³¹ Επιχειρήθηκε συνολικά η κατεργασία πέντε κομματιών.

Καταρχάς, το ζήτημα που τέθηκε ήταν η επιλογή του υλικού. Ανάμεσα στα συνήθη βιομηχανικού τύπου θερμοπλαστικά (ή “engineering plastics”), τρεις προμηθευτές¹³² συνέστησαν τη συμπολυμερή ακετάλη (ή πολυακετάλη, POM-C) κατόπιν περιγραφής του προς κατεργασία αντικειμένου ως έχοντος τα εξής χαρακτηριστικά:

- μέρος ενός συστήματος ρομποτικού βραχίονα
- λειτουργία ως κλειστού-στεγανού περιβλήματος
- χρήση εντός δεξαμενής νερού για παρατεταμένα διαστήματα
- κατεργασία σε CNC-φρέζα

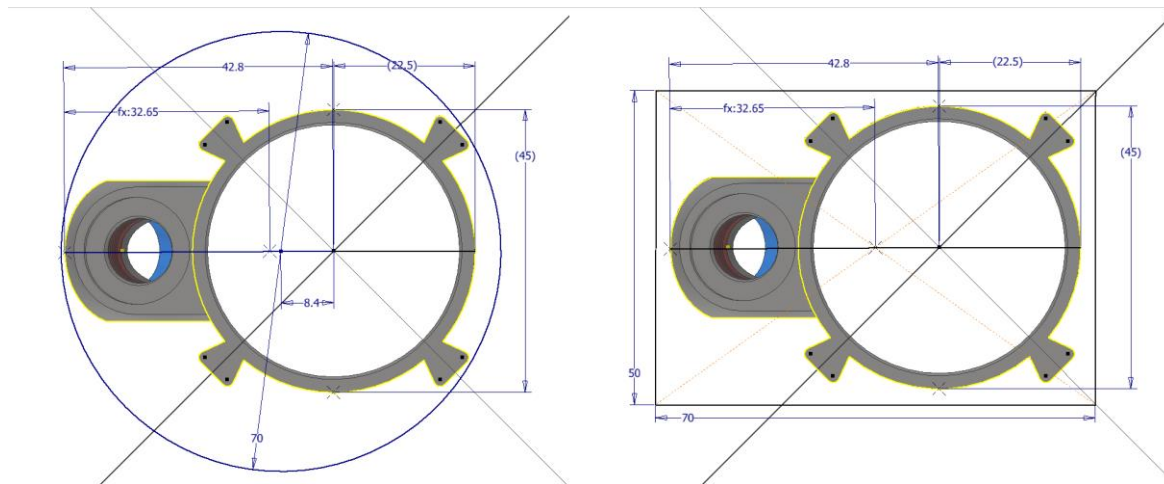
Βασικές ιδιότητες του υλικού που αιτιολογούν την επιλογή του είναι η χαμηλή υδαταπορρόφηση, η υψηλή διαστατική σταθερότητα, η υψηλή αντοχή σε φθορά και η υψηλή κατεργασιμότητα.

Το POM-C παράγεται τυπικά σε φύλλα και ράβδους ποικίλων διαστάσεων. Τα φύλλα χαρακτηρίζονται από το πάχος, με ονομαστικές διαστάσεις¹³³ 10, 20, 30, 40, 50, 60 χιλιοστά κ.ο.κ., ενώ οι ράβδοι από τη διάμετρο, με ονομαστικό βήμα 5 χιλιοστά (10, 15, 20 χιλιοστά κ.ο.κ.). Για την επιλογή των κομματιών έλαβα υπόψιν τα εξής:

- Το περίβλημα-σώμα του μηχανισμού είναι οικονομικότερο να κατασκευαστεί από ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο κομμάτι πλαστικού (τομή από φύλλο), διότι υπάρχουν οι προεξοχές στην παράπλευρη επιφάνεια. Στην εικόνα Γ.25 φαίνεται το προφίλ του περιβλήματος εντός του ελάχιστου ορθογωνίου και του ελάχιστου κύκλου.
- Οι προεξοχές για τη σύνδεση των δακτύλων και της βάσης θα κατεργαστούν με κοπές στον 4^ο άξονα, συνεπώς απαιτείται η ύπαρξη επιπλέον υλικού, ώστε να είναι δυνατή η ανάρτηση του κομματιού στο αντίστοιχο τσοκ (περί τα 30-40mm επιπλέον κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα του περιβλήματος).
- Τα καπάκια, όντας κυλινδρικού σχήματος, είναι οικονομικότερο να κατασκευαστούν από κυλινδρικά κομμάτια πλαστικού (τομή από ράβδο), με διάμετρο την αμέσως μεγαλύτερη από την μέγιστη διάμετρό τους.
- Καθώς και τα καπάκια θα πρέπει να αναρτηθούν σε κάποιο τσοκ (είτε του 4^{ου} άξονα της φρέζας είτε του τόνου), πρέπει να υπάρχει επιπλέον υλικό. Το ρόλο αυτό μπορεί να διαδραματίσει το σώμα ενός εκ των δύο καπακιών, εφόσον χρησιμοποιηθεί ένα κοινό κομμάτι, με μήκος περίπου διπλάσιο από το μήκος τους. Π.χ. το μήκος για ένα καπάκι είναι περί τα 15mm· αν χρησιμοποιηθεί ένα κυλινδρικό κομμάτι συνολικού μήκους περί τα 40mm, η μια άκρη μπορεί να πιαστεί στο τσοκ, ενώ η άλλη κατεργάζεται και αντίστροφα. Η διαίρεση του κομματιού στο τέλος δίνει δύο αντίτυπα.

¹³² Stemplast Hatzivagoustis (<https://www.stemplast.gr/>), ETKA (<https://etka.gr/>) και Δ.ΚΟΛΛΕΡΗΣ Ε.Ε. (<https://www.kolleris.gr>)

¹³³ Η τουλάχιστον αυτές οι διαστάσεις υπήρχαν διαθέσιμες στα καταστήματα που ζήτησα πληροφορίες.



Εικόνα Γ.25 - Απεικόνιση του ελάχιστου κύκλου και του ελάχιστου ορθογώνιου που περιγράφουν το προφίλ του περιβλήματος, με στρογγυλοποίηση της διάστασης στην εγγύτερη άνω δεκάδα (70mm και 50x70mm αντίστοιχα). Ως στερεό μήκους 110mm (μήκος περιβλήματος συν επιπλέον υλικό για την ανάρτηση στο τσοκ), η κυκλική διατομή 70mm δίνει λόγο ωφέλιμου προς συνολικό όγκο περίπου ίσο με 0.077, ενώ η ορθογώνια διατομή 50x70mm περίπου ίσο με 0.085. Επιπλέον, η ράβδος κοστίζει περί τα 10€/kg, ενώ το φύλλο περί τα 9€/kg.

Σημειώνω ότι υπάρχει η επίσης η δυνατότητα επιλογής κομματιού με προφίλ κυκλικού δακτυλίου, γλιτώνοντας υποθετικά το υλικό που «απορρίπτεται» από το εσωτερικό. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση το κέντρο του κύκλου θα έπρεπε να συμπίπτει με το κέντρο του κυλινδρικού περιβλήματος κι, ως συνέπεια, η ελάχιστη εξωτερική διάμετρος θα ήταν 90mm. Αντίστοιχα, ακόμα κι αν η μέγιστη εσωτερική διάμετρος ήταν 40mm, ο συνολικός όγκος είναι ακόμα υψηλότερος από τις άλλες δύο περιπτώσεις (λόγος περίπου ίσος με 0.058).

Συνοψίζοντας το ζήτημα προμήθειας υλικού, τα κομμάτια POM-C που επέλεξα έχουν τις εξής διαστάσεις:

- ⇒ *Main casing (J1)* -- [1 αντίτυπο ανά τεμάχιο] : ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο, 50x70x110 mm
- ⇒ *Plug, casing, top/bottom (C1/E1)* -- [1/1 αντίτυπο ανά τεμάχιο] : κύλινδρος, $\varnothing 45 \times 40$ mm

Στη συνέχεια θα παρουσιάσω τμηματικά τις κατεργασίες για κάθε ένα από τα δύο κομμάτια, με το διαχωρισμό να προκύπτει από τις αλλαγές του συστήματος συντεταγμένων. Πρώτα όμως θα ήθελα να αναφερθώ συνοπτικά στα κοπτικά που χρησιμοποιήθηκαν και κάποιες παραμέτρους που σχετίζονται με αυτά.

Τυπικά, τα υλικά στο παρόν πλαίσιο χωρίζονται σε κατηγορίες, ανάλογα με την κατεργασιμότητά τους. Π.χ. το ασάλι διαχωρίζεται από το ανοξείδωτο ασάλι, ο χυτοσίδηρος επίσης, το αλουμίνιο κ.ο.κ.¹³⁴ Βάσει αυτής της κατηγοριοποίησης διακρίνονται και τα κοπτικά, ως προς τη συμβατότητά τους με το κάθε υλικό (διαφορετική σκληρότητα, γεωμετρία, αριθμός κοπτικών ακμών κ.α.). Ακόμη, βάσει αυτής της κατηγοριοποίησης, οι κατασκευαστές κοπτικών εργαλείων προτείνουν τιμές για τις βασικές παραμέτρους κατεργασίας, όπως η ταχύτητα περιστροφής, η ταχύτητα πρόωσης, το βάθος κοπής κ.λπ.

Τα συνθετικά υλικά (π.χ. τα θερμοπλαστικά) αντιμετωπίζονται συνήθως ως διαφορετική κατηγορία από τους κατασκευαστές. Παρότι αρκετοί κατασκευαστές επικεντρώνονται αποκλειστικά στην κατεργασία μετάλλων (οπότε δεν προτείνουν συγκεκριμένα εργαλεία ή

¹³⁴ Μια επίσημη ταξινόμηση μπορεί να βρεθεί στο πρότυπο ISO 513.

παραμέτρους για συνθετικά υλικά), η γενική πληροφορία είναι ότι: τα κοπτικά και οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στην κατεργασία μη-σιδηρούχων μετάλλων (αλουμίνιο, χαλκός κ.α.) είναι συνήθως επαρκώς συμβατά με την κατεργασία συνθετικών υλικών.

Αν και ποικίλοι συνδυασμοί κοπτικών-παραμέτρων μπορούν να οδηγήσουν σε ένα χρηστικό αποτέλεσμα (ιδιαίτερα στην παρούσα περίπτωση, όπου το υλικό είναι θερμοπλαστικό), η κατάλληλη επιλογή συμβάλλει στην αύξηση της παραγωγικότητας, στην ποιότητα των επιφανειών (φινίρισμα) και στην επιμήκυνση του χρόνου ζωής των κοπτικών.

Η επιλογή των βέλτιστων παραμέτρων είναι σε μεγάλο βαθμό ζήτημα εμπειρίας. Προσωπικά, ελλείψει αυτής της εμπειρίας και καθώς ο αριθμός των αντικειμένων προς κατασκευή ήταν περιορισμένος, χρησιμοποίησα βασικές τιμές και τύπους εργαλείων που προτείνουν οι κατασκευαστές.

Μία από τις εταιρίες που διαχωρίζουν ως κατηγορία τα συνθετικά υλικά και προτείνουν συγκεκριμένες παραμέτρους για την κατεργασία τους είναι η Izar (<https://www.izartool.com/>). Η πλειοψηφία των παραμέτρων που χρησιμοποίησα βασίζονται στις προτεινόμενες τιμές από τους καταλόγους της εν λόγω εταιρίας.

Όσον αφορά την επιλογή των κοπτικών, αν και ξεκίνησα κάνοντας χρήση αρκετών διαφορετικών διαστάσεων και τύπων, προσπάθησα στην πορεία προς το τελευταίο αντίτυπο να μειώσω τον αριθμό τους στα πλέον «ευέλικτα» κι απαραίτητα. Το σύνολο των χρησιμοποιούμενων κοπτικών παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα.

#	Περιγραφή	Κατασ/τής	Κωδικός προϊόντος	Υλικό	Χρήση
1	Ø12mm Two-flute Finishing Flat End Mill, Long	Izar	4428	HSSE 8% Co	J1, C1, E1
2	Ø6mm Two-flute Finishing Flat End Mill, Long	-*	-*	HSS	J1
3	Ø5mm Single-flute Finishing Flat End Mill, Extra Long	Izar	44138	HSS	J1
4	Ø5mm Two-flute Flat End Mill	Carmon	NL 075294 P27.2	HSS	C1, E1
5	Ø4mm Single-flute Flat End Mill, Long	XCAN	-*	Carbide	J1
6	Ø3.175mm Single-flute Flat End Mill, Long	-*	-*	Carbide	J1
7	12.5° Tapered End Mill	-*	-*	HSS	J1, C1, E1
8	Ø1.5mm Single-flute Flat End Mill	DrillPro	1529851	Carbide	J1
9	Ø2mm 118° Drill	-*	-*	HSS Ti-coated	J1
10	Ø3.5mm 118° Drill	-*	-*	HSS Ti-coated	C1, E1
11	Ø6.5mm 118° Drill	-*	-*	HSS Ti-coated	C1, E1
12	Ø10mm 118° Drill	-*	-*	HSS Ti-coated	J1
13	Ø12mm 118° Drill	-*	-*	HSS Ti-coated	J1
14	Ø12x1.5mm Right Hand Tap	-*	-*	HSS	J1
15	Ø13x1.0mm Right Hand Tap	-*	-*	HSS	J2
16	2mm Grooving Tool (Lathe)	-*	-*	HSS-Co	C1, E1
17	3mm Square Parting Tool (Lathe)	-*	-*	Carbide	J1, C1, E1
* Κοπτικά μαζικής παραγωγής, χωρίς περαιτέρω στοιχεία.					

Πίνακας Γ.1 - Λίστα των κοπτικών εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατεργασία του περιβλήματος και των καπακιών.

Αναλυτικότερες πληροφορίες για τα κοπτικά αυτά (καθώς και τα τεχνικά φυλλάδια όσων εξ αυτών υπήρχαν), μπορούν να βρεθούν στο αρχείο της εργασίας `{:\UndEE_manufacture\~Hardware_Mill\Tools@CSL\}` και, κυρίως, στη βιβλιοθήκη εργαλείων που δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα *Autodesk Inventor CAM (2020)*, στον ίδιο φάκελο (αρχεία .hsmplib).

Η βιβλιοθήκη αυτή περιέχει επίσης το σύνολο των κοπτικών εργαλείων που υπάρχουν - τη δεδομένη χρονική στιγμή¹³⁵ - διαθέσιμα στο εργαστήριο Α.Ε., τόσο από την ομάδα του καθηγητή Κ. Κυριακόπουλου, όσο και από την ομάδα του καθηγητή Ε. Παπαδόπουλου.

Τέλος, η βιβλιοθήκη περιλαμβάνει και τις κωνικές βάσεις των κοπτικών (chucks), με τις διαστάσεις τους, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο ανεπιθύμητων επαφών στον προσομοιωτή του προγράμματος.

Η συνολική διαδικασία για την κατεργασία ενός αντικειμένου στη CNC-φρέζα μπορεί να αναλυθεί ως εξής:

1. Προετοιμασία της μηχανής για χρήση: περιλαμβάνει τον έλεγχο της πίεσης του αέρα και της στάθμης του λιπαντικού, τον καθαρισμό του τραπεζιού και του θαλάμου κατεργασίας, και κατόπιν την εκτέλεση του κύκλου προθέρμανσης/λίπανσης της μηχανής.
2. Προετοιμασία των μέσων σύσφιξης και των κοπτικών: περιλαμβάνει τον καθαρισμό και τον έλεγχο της μέγγενης ή του τσοκ που χρησιμοποιείται στη στερέωση των κομματιών στο τραπέζι, τη τοποθέτηση και σύσφιξή τους στο τραπέζι, βάσει του σχεδιασμού που έχει προηγηθεί στο πρόγραμμα CAM.
3. Προετοιμασία των κοπτικών: περιλαμβάνει τον καθαρισμό, τον έλεγχο και την τοποθέτηση των κοπτικών στις βάσεις τους και στο καρουζέλ της μηχανής, βάσει του σχεδιασμού που έχει προηγηθεί στο πρόγραμμα CAM.
4. Ορισμός συστημάτων συντεταγμένων και θέσης κοπτικών: περιλαμβάνει την σύσφιξη του προς κατεργασία αντικειμένου στην επιθυμητή θέση-διαμόρφωση, τον ορισμό του συστήματος συντεταγμένων κατεργασίας (εφεξής σ.σ.) ως προς το σ.σ. της μηχανής, αλλά και τη θέση των κοπτικών ως προς αυτό κοπτικών (απόσταση από το επίπεδο του τραπεζιού).
5. Έλεγχος των συστημάτων συντεταγμένων: αφορά στον έλεγχο ορθής αντιστοιχίας των σ.σ. και της θέσης των κοπτικών, που ορίστηκαν στο προηγούμενο βήμα, ως προς αυτά που σχεδιάστηκαν στο πρόγραμμα CAM και τις κινήσεις που παράγονται από τον G-code.
6. Εκτέλεση των διεργασιών: αφορά βεβαίως στην εκτέλεση του G-code και των κινήσεων που περιγράφει.
7. Αφαίρεση αντικειμένου, κοπτικών-βάσεων και μέσων στερέωσης: περιλαμβάνει την απομάκρυνση του αντικειμένου από τη μέγγενη ή το τσοκ, την αφαίρεση των βάσεων και των κοπτικών, καθώς και της μέγγενης/τσοκ από το τραπέζι και το θάλαμο κατεργασίας.
8. Προετοιμασία της μηχανής για αδράνεια: περιλαμβάνει τον καθαρισμό του θαλάμου και του τραπεζιού, τον καθαρισμό των μέσων σύσφιξης, των εργαλείων και των βάσεων, καθώς και την ταξινόμηση των τελευταίων στις θέσεις τους.

Όπως ανέφερα νωρίτερα, δεν θα περιγράψω τις εργασίες που προηγούνται και έπονται της κατεργασίας των κομματιών, αλλά θα προσπαθήσω να αναλύσω το κομμάτι του σχεδιασμού στο πρόγραμμα CAM, την επιλογή των κοπτικών και των συστημάτων συντεταγμένων. Στο αρχείο αποθηκεύονται ενδεικτικά βίντεο των διεργασιών, όπως εκτελούνται στην προσομοίωση του προγράμματος. Πληροφορίες για το «πέρασμα» από το πρόγραμμα CAM, αλλά και τη χρήση της μηχανής μπορεί να αντλήσει κανείς από τις οδηγίες του συναδέλφου Γ. Βάλβη `{:\UndEE_manufacture\~Hardware_Mill\Haas MiniMill, guides\}`.

Θα ξεκινήσω ανάποδα, από την κατασκευή των δύο καπακιών για το περίβλημα, γιατί είναι αρκετά ευκολότερη και πιο εύληπτη η κατεργασία τους, ευελπιστώντας ότι θα λειτουργήσει ως μια ηπιότερη εισαγωγή.

¹³⁵ Καλοκαίρι 2019

C1. Plug, casing, top / E1. Plug, casing, bottom

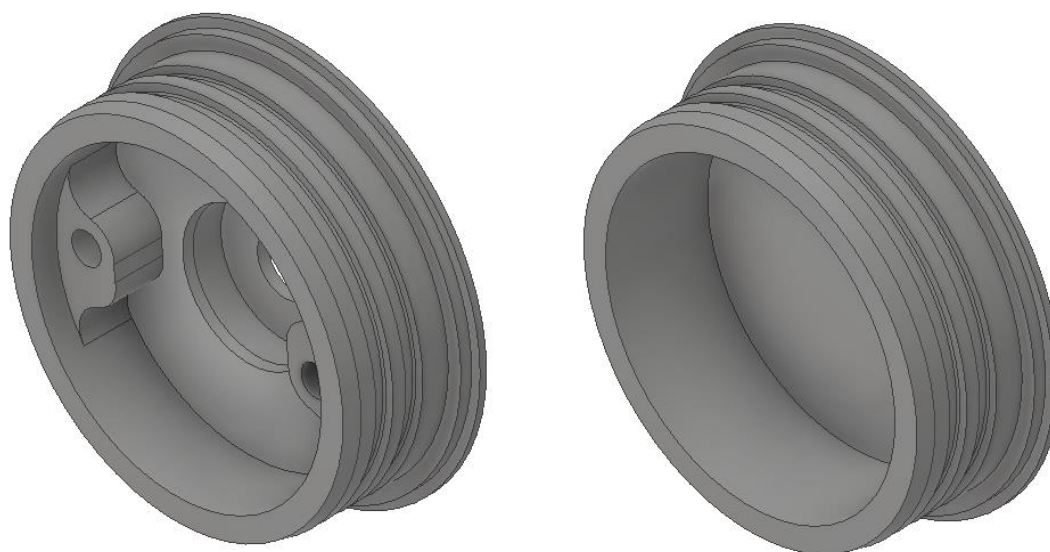
Αντικείμενο	<i>Plug, casing, top / Plug, casing, bottom (C1/E1)</i>
Διαστάσεις τεμαχίου (ονομαστικές)	Ø45x40mm [κύλινδρος]
Υλικό	POM-C
Τύπος κατεργασίας	CNC-φρέζα (2D-milling) + τόνος
Μέσο συγκράτησης	Τσοκ
Αριθμός τοποθετήσεων	2 + 2
Αριθμός κοπτικών	5 + 1
Εκτιμώμενος χρόνος κατεργασίας *	70min

Πίνακας Γ.0.1 - Βασικά στοιχεία της κατασκευής των δύο καπακιών του περιβλήματος. * Ο χρόνος κατεργασίας αφορά μόνο στη διάρκεια των κινήσεων και των κοπών, δηλαδή δεν περιλαμβάνει το χρόνο προετοιμασίας των μηχανών, των κοπτικών, του ορισμού των συστημάτων συντεταγμένων κ.λπ.

Ξεκινώντας το σχεδιασμό των κατεργασιών στο πρόγραμμα CAM πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι τα κομμάτια, όπως κόβονται από τον προμηθευτή, σπανίως θα έχουν τις ονομαστικές διαστάσεις - πιθανόν να έχουν και μικρότερες στις διευθύνσεις που γίνονται τομές. Αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψιν κατά την παραγγελία τους κι αυτός είναι ο λόγος που το μήκος του κομματιού ορίζεται στα 40mm.

Αν υποθεθεί ότι τα δύο καπάκια (μήκους 14mm το καθένα) τοποθετηθούν αντικριστά (εικόνα Γ.27) και προστεθεί επιπλέον υλικό περίπου 3mm (το πλάτος του κοπτικού για το διαχωρισμό των δύο κομματιών), υπάρχει περιθώριο 9mm για αποκλίσεις και τυχόν (μικρά) σφάλματα στην τοποθέτηση ή τις διεργασίες.

Αρχίζοντας λοιπόν από ένα κύλινδρο διαστάσεων περίπου Ø45x40mm, πρέπει να κατασκευαστούν τα εξής δύο αντικείμενα:

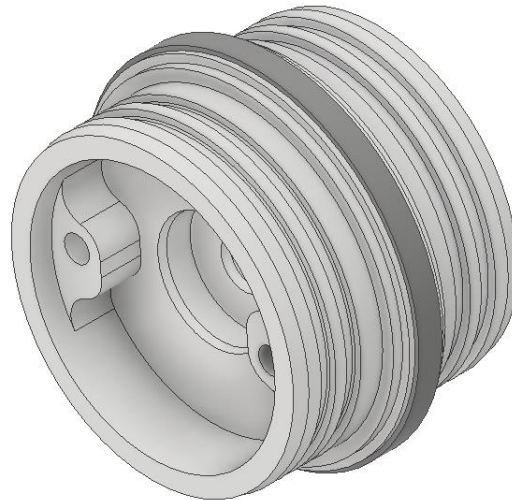


Εικόνα Γ.26 - Τα δύο καπάκια του περιβλήματος του μηχανισμού.

Αρχικά μετριούνται οι ακριβείς διαστάσεις των κομματιών θερμοπλαστικού. Ο σχεδιασμός των διεργασιών στο πρόγραμμα CAM θα είναι μεν κοινός για όλα, αλλά κάθε τεμάχιο θα επεξεργαστεί βάσει των δικών του διαστάσεων, οι οποίες παρουσιάζουν μικρές διακυμάνσεις. Σημαντικό να τονιστεί ότι σε περίπτωση μη-ορθογώνιων βάσεων (ή πλευρών αργότερα), ενδιαφέρει η μικρότερη μετρούμενη διάσταση, λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψιν το μέγεθος της «προεξοχής» στο σημείο εκκίνησης των κατεργασιών¹³⁶. Θα εξετάσω το παράδειγμα ενός κομματιού με διαστάσεις :

$\varnothing 46.1 \times 40 \text{ mm}$

Προετοιμασία: Το πρώτο βήμα είναι η σχεδίαση των δύο καπακιών σε ένα κοινό στερεό, καθώς και η δημιουργία ενός στερεού με τις διαστάσεις του κομματιού (οι οποίες εύκολα μεταβάλλονται στη συνέχεια για διαφορετικά κομμάτια). Αυτό βοηθάει στην καλύτερη εποπτεία της διαδικασίας από το χρήστη και διευκολύνει τον ορισμό σημείων/σ.σ. στο πρόγραμμα CAM.



Εικόνα Γ.27 - Τα δύο καπάκια σε ένα στερεό, «πλάτη με πλάτη». Παρεμβάλλεται τμήμα πάχους 3.2mm, που αντιστοιχεί στο πλάτος του κοπτικού διάσχισης, μαζί με ένα μικρό ποσό ανοχών, καθώς ο τόρνος είναι χειροκίνητος και ταλαιπωρημένος.

Το πλάνο ορίζει ότι η κατεργασία της περιμέτρου και του εσωτερικού των αντικειμένων θα γίνει στη φρέζα (με εναλλαγή της τοποθέτησης πάνω-κάτω), και στη συνέχεια το αντικείμενο θα τοποθετηθεί στον τόρνο για την κοπή των αυλακιών των o-rings. Στο τέλος, το κομμάτι θα διαιρεθεί στη μέση, δίνοντας τα δύο καπάκια. Γι' αυτό το λόγο προστίθεται περιοχή πάχους 3.2mm ενδιάμεσα στα δύο καπάκια (διακρίνεται στην εικόνα Γ.27 με έντονο γκριζό χρώμα). Το πάχος αυτό αντιστοιχεί στο πλάτος του εργαλείου διάσχισης (3mm), επιτρέποντας κι ένα μικρό περιθώριο σφάλματος για την τοποθέτησή του κοπτικού στη μέση του τεμαχίου - καθώς ο τόρνος είναι χειροκίνητος και σχετικά ταλαιπωρημένος. Φυσικά η στερέωση του κομματιού στο τραπέζι της φρέζας θα γίνει με το τσοκ, κι όχι τη μέγγενη, μιας και είναι κυλινδρικό.

¹³⁶ Τυπικά, πρέπει να προηγηθεί μια προ-κατεργασία για την «ορθογωνιοποίηση» των τεμαχίων, ώστε να εξασφαλιστεί η σωστή τοποθέτηση και ορισμός των συστημάτων συντεταγμένων στη μηχανή. Ενίοτε οι γεωμετρικές ή η επιλογή των διεργασιών μπορεί να επιτρέπουν την παράληψη αυτό του βήματος - όπως συμβαίνει τόσο στα δύο καπάκια όσο και στο περίβλημα.

Τα συστήματα συντεταγμένων: εφόσον έχει δημιουργηθεί το στερεό με τις πραγματικές διαστάσεις του κομματιού που θα κατεργαστεί, αρκεί ο ορισμός δύο σ.σ. (ένα σε κάθε βάση του κυλίνδρου) για το μέρος των κοπών στη φρέζα. Αυτά τα σ.σ. θα οριστούν και στη μηχανή ως το σημείο εκκίνησης της κατεργασίας¹³⁷. Απαιτούνται λοιπόν δύο ειδών τοποθετήσεις του τεμαχίου στη φρέζα για την ολοκλήρωση των διεργασιών. Υιοθετώντας την ορολογία του προγράμματος CAM, μια τοποθέτηση του τεμαχίου (που χαρακτηρίζεται από ένα τοπικό σ.σ.), εντός του σ.σ. της μηχανής, θα ονομάζεται “setup”.

Όσον αφορά την κατεργασία στον τόρνο, αν και δεν χρειάζεται η περιγραφή στο πρόγραμμα CAM, η κοπή των αυλακιών και η διαίρεση του τεμαχίου απαιτεί δύο τοποθετήσεις.

Επιλογή ειδών κατεργασίας και κοπτικών: Δεν υπάρχει κάτι άξιο ιδιαίτερης ανάλυσης σε αυτές τις κατεργασίες. Από τα εργαλεία που εμφανίζονται στον πίνακα Γ.1, χρησιμοποιώ το #1 για την αφαίρεση υλικού από σημεία που δεν απαιτείται υψηλή ακρίβεια διαστάσεων. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώ το #4 για την επεξεργασία της περιφέρειας και του εσωτερικού, όπου πρέπει οι διαστάσεις να είναι ακριβείς, καθώς είναι κοντύτερο και στιβαρότερο. Οι σπές στο άνω καπάκι γίνονται φυσικά με τα τρυπάνια αντίστοιχης διαμέτρου (#10, #11). Με το κωνικό κοπτικό #7 σχηματίζεται στο χείλος των καπακιών που εισέρχεται στο περιβλήμα chamfer, όπως απαιτείται για τη σωστή συναρμολόγηση των o-rings. Οι κατεργασίες στον τόρνο γίνονται με το κοπτικό #16 (κοπή αυλακιών o-rings) και με το κοπτικό #17 (διαίρεση του κομματιού στα δύο καπάκια). Άξιο αναφοράς είναι το γεγονός ότι η κοπή της περιφέρειας που εφάπτεται στο εσωτερικό του περιβλήματος και τοποθετούνται τα o-rings επαναλαμβάνεται και δεύτερη φορά, ώστε να καθαριστεί από τυχόν υπολείμματα από το πρώτο πέρασμα.

Κατεργασίες: Προσομοιώσεις των δύο setup που αφορούν στην κοπή της περιφέρειας των καπακιών στη φρέζα (setup0, setup1) παρουσιάζονται στα ομώνυμα βίντεο {:\UndEE_manufacture\milled_parts\}. Αν και δεν έχουν ιδιαίτερη χρηστική αξία, προσομοιώσεις των δύο κατεργασιών στον τόρνο (αυλάκια o-rings και διαίρεση τεμαχίου - setup2, setup3) παρουσιάζονται επίσης σε βίντεο. Σημείο προσοχής: μετά την ολοκλήρωση του setup0, το τεμάχιο πρέπει να στερεώνεται στα τσοκ με σχετικά χαμηλή δύναμη, ώστε να μην δημιουργηθούν σημάδια στις περατωμένες επιφάνειές του (η παρεμβολή μιας-δύο στρώσεων χαρτοταινίας μπορεί να βοηθήσει).

Σημειώσεις/παρατηρήσεις: Το κύριο ζήτημα στο οποίο δεν έχω αναφερθεί έως τώρα είναι ο σχεδιασμός των παραμέτρων που αφορούν τα **o-rings**. Υπάρχουν διάφορες εφαρμογές on-line για τη σχεδίαση των διαστάσεων - εγώ χρησιμοποίησα την εφαρμογή της Apple Rubber, “O-ring Gland Calculator”¹³⁸, η οποία είναι αρκετά εύληπτη κι εύχρηστη. Επιπλέον πληροφορίες άντλησα από το σχετικό τεχνικό φυλλάδιο της Trelleborg¹³⁹. Η επιλογή των διαστάσεων του o-ring, εκτός φυσικά από τις διαστάσεις του περιβλήματος, καθορίστηκε κι από την διαθεσιμότητα κατά την προμήθεια των υλικών. Χρησιμοποιώντας την εφαρμογή σχεδίασης, θεώρησα ότι η διάσταση 37x1.5mm¹⁴⁰ που υπήρχε σε διαθεσιμότητα, μπορεί να είναι κατάλληλη. Ως υλικό επιλέχθηκε το σύννηθες NBR (Nitrile Rubber), καθώς το μέσο (νερό) δεν απαιτεί ειδικές λύσεις.

Οι βασικές παράμετροι φαίνονται στην ακόλουθη εικόνα Γ.28:

¹³⁷ “workpiece coordinate system”

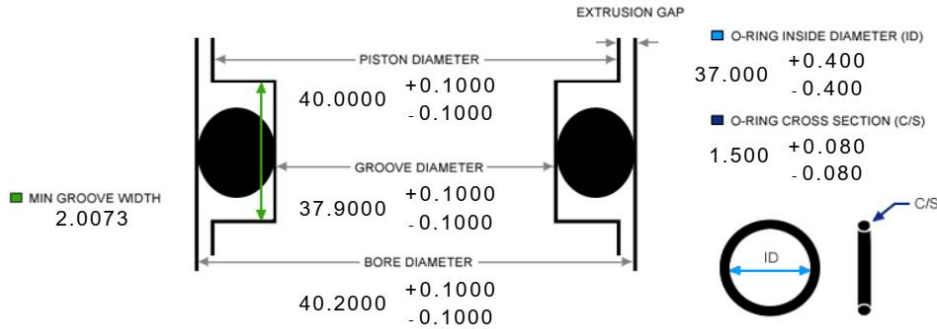
¹³⁸ Στη σελίδα: <https://www.applerubber.com/oring-gland-calculator/>

¹³⁹ <https://www.tss.trelleborg.com/en> -- βιβλ/κή αναφορά [7]

¹⁴⁰ Εσωτερική διάμετρος x διατομή (IDxCS)

Input Values

	Nominal	+ Tolerance	- Tolerance
Bore Diameter	40.2000	0.1000	0.1000
Piston Diameter	40.0000	0.1000	0.1000
Groove Diameter	37.9000	0.1000	0.1000
O-Ring ID	37.000	0.400	0.400
O-Ring CS	1.500	0.080	0.080
Volume Swell	85%		

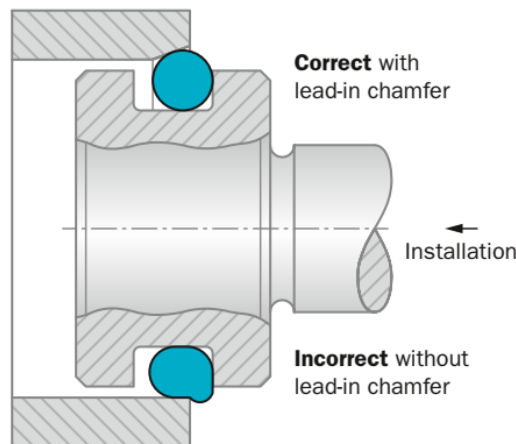


Results*	Concentric Condition		
	Minimum	Nominal	Maximum
% Compression	11.97	23.33	33.54
Extrusion Gap	0	0.1	0.2
% Stretch	1.07	2.43	3.83
Squeeze	0.17	0.35	0.53

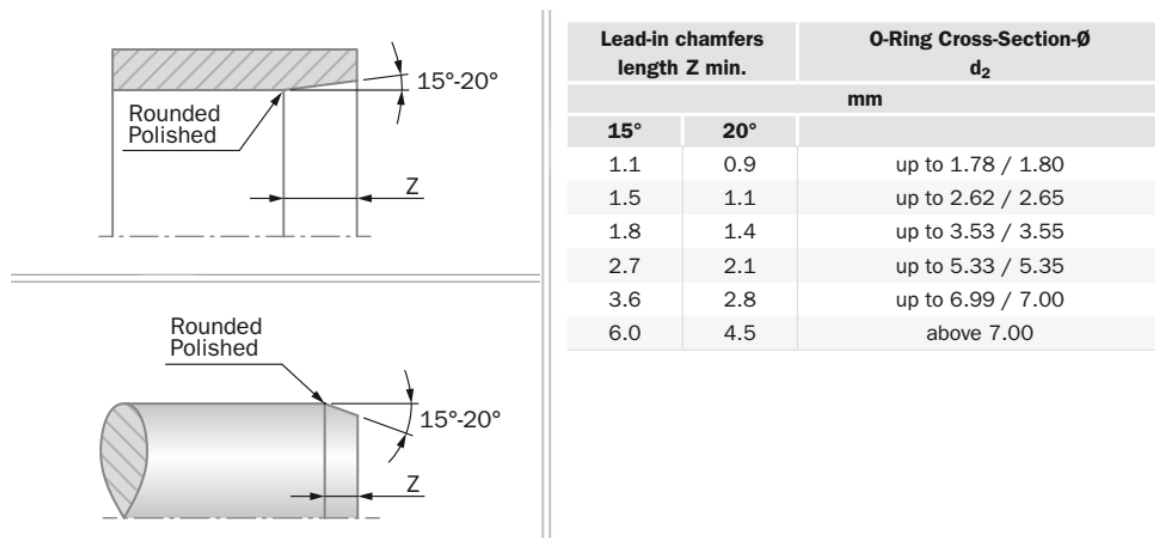
* Value out of recommended range.

Εικόνα Γ.28 - Σχεδιασμός των διαστάσεων για τη χρήση o-rings στα καπάκια του περιβλήματος. Χρησιμοποιήθηκε η on-line εφαρμογή "O-ring Gland Calculator" της Apple Rubber (βλ. υποσημείωση 132).

Σημαντικό επίσης στοιχείο είναι η δημιουργία chamfers στις ακμές τόσο του περιβλήματος, όσο και των καπακιών. Η παράληψη αυτής της κατεργασίας μπορεί να οδηγήσει στην παραμόρφωση των o-rings κατά τη συναρμολόγηση και σε ελλιπή στεγανοποίηση. Η παραμόρφωση αυτή απεικονίζεται στην ακόλουθη εικόνα Γ.29. Η κατάλληλη γεωμετρία των ακμών φαίνεται στην εικόνα Γ.30. Σημειώνω ότι το κοπτικό που υπήρχε διαθέσιμο είχε κλίση 12.5°, οπότε χρησιμοποίησα αυτό και αύξησα το ύψος Z των chamfers.



Εικόνα Γ.29 - Ακμές με chamfer, τόσο για το περίβλημα όσο και για το καπάκι είναι απαραίτητες για τη σωστή συναρμολόγηση και λειτουργία των o-rings [πάνω]. Η παράληψη της κατεργασίας οδηγεί στην παραμόρφωσή τους και πιθανά σε κακή στεγανοποίηση ή πρόωρη φθορά [κάτω]. Πηγή: βιβλιογραφική αναφορά [7].



Εικόνα Γ.30 - Η κατάλληλη γεωμετρία των ακμών για την ορθή συναρμολόγηση των μερών με τα o-rings. Στον πίνακα δεξιά σημειώνεται το απαιτούμενο μήκος βάσει της διατομής των o-rings. Πηγή: βιβλιογραφική αναφορά [7].

Μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι η εφαρμογή περιλαμβάνει τη δήλωση ανοχών (tolerances), οι οποίες οδηγούν τα αποτελέσματα της αξιολόγησης του σχεδιασμού οριακά εκτός των προδιαγραφών (βλ. εικόνα Γ.28). Η εκτίμηση αυτών των ανοχών προκύπτει από τα τρία-τέσσερα αντίτυπα που κατασκευάστηκαν, μετρώντας τις αντίστοιχες διαστάσεις κατόπιν της κατεργασίας των αντικειμένων.

Δυστυχώς δεν είναι εύκολο να επιτευχθούν μικρότερες ανοχές με τα μέσα και την εμπειρία που εγώ διαθέτω σε αυτό το στάδιο που κατασκευάζονται τα εξαρτήματα. Ωστόσο, μετρώντας δύο συστήματα υποβρύχιων grippers και laser pointers (με αλουμινένια περιβλήματα), τα οποία χρησιμοποιούν o-rings για την στεγανοποίησή τους, και εισάγοντας τις διαστάσεις στην εφαρμογή, ο σχεδιασμός τους μοιάζει παραπλήσιος.

Εκ του αποτελέσματος πάντως, το περίβλημα του μηχανισμού διατηρεί τη στεγανότητά του, οπότε ο σχεδιασμός είναι μάλλον ικανοποιητικός.

J1. Main casing

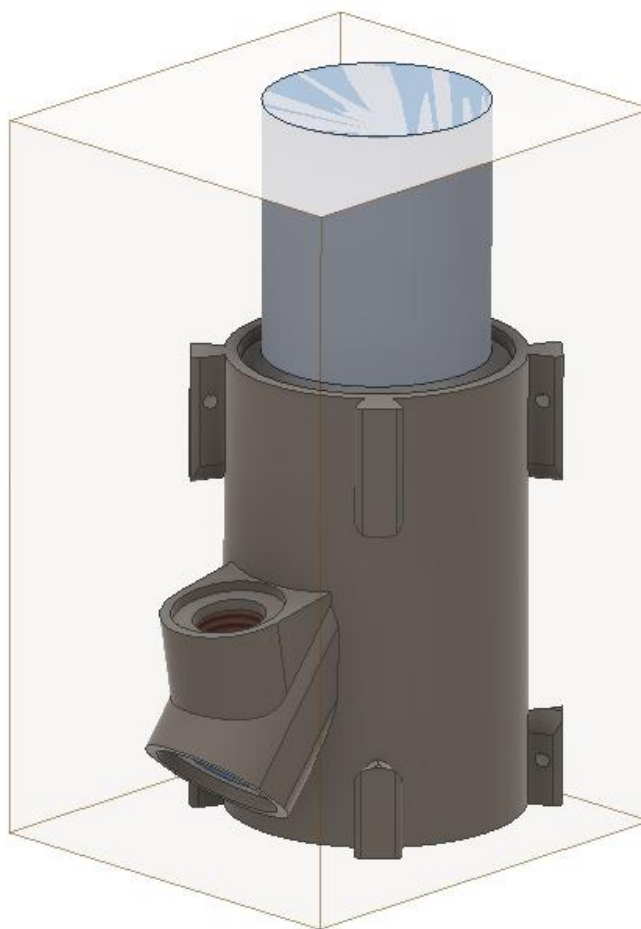
Αντικείμενο	Main casing (J1)
Διαστάσεις τεμαχίου (ονομαστικές)	50x70x110mm [ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο]
Υλικό	POM-C
Τύπος κατεργασίας	CNC-φρέζα (4-axis milling)
Μέσο συγκράτησης	Μέγγενη, τσόκ
Αριθμός τοποθετήσεων	6
Αριθμός κοπτικών	12
Εκτιμώμενος χρόνος κατεργασίας *	

Πίνακας Γ.0.2 - Βασικά στοιχεία της κατασκευής του περιβλήματος. * Ο χρόνος κατεργασίας αφορά μόνο στη διάρκεια των κινήσεων και των κοπών, δηλαδή δεν περιλαμβάνει το χρόνο προετοιμασίας των μηχανών, των κοπτικών, του ορισμού των συστημάτων συντεταγμένων κ.λπ

Όπως και για τα τεμάχια πλαστικού που αφορούν στην κατασκευή των καπακιών, προμηθεύτηκα κομμάτια με ελαφρά μεγαλύτερες διαστάσεις. Θα εξετάσω την κατασκευή του περιβλήματος από ένα τεμάχιο διαστάσεων

70x63.8x111 mm

Προετοιμασία: Αντίστοιχα με την κατασκευή των καπακιών, το πρώτο βήμα η δημιουργία ενός στερεού με τις διαστάσεις του κομματιού, για την καλύτερη εποπτεία της διαδικασίας τον ορισμό σημείων/σ.σ. στο πρόγραμμα CAM. Δημιουργείται επίσης κυλινδρική προεξοχή στο άνω μέρος του περιβλήματος, με διάμετρο 34mm και μήκος 39mm. Η προεξοχή αυτή θα χρησιμοποιηθεί στη στερέωση του τεμαχίου στο τσόκ του 4^{ου} άξονα και σχηματίζεται στην άνω επιφάνεια του περιβλήματος, ώστε να μην βρίσκεται κοντά στις προεξοχές στερέωσης του ηλεκτρικού συνδέσμου και του στυπιοθλίπτη. Αν περίπου 25mm εισέλθουν στο τσόκ του 4^{ου} άξονα, απομένουν περίπου 14mm για την κίνηση των κοπτικών μετά το πέρας της άνω επιφάνειας, το οποίο κρίνεται ασφαλές. Το στερεό φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα Γ.31 - Το περιβλήμα που πρέπει να κατασκευαστεί, εντός του τεμαχίου POM-C (διαφανές ορθογώνιο παρ/δο). Διακρίνεται στο άνω μέρος του η κυλινδρική προεξοχή για την στερέωση στο τσοκ του 4^{ου} άξονα.

Το πλάνο ορίζει ότι η κατεργασία θα ξεκινήσει με την πρόσδεση του κομματιού στη μέγγενη και την κοπή της κυλινδρικής προεξοχής και του μέρους της περιφέρειας του περιβλήματος έως την προεξοχή του στυπιοθλίπτη, αφήνοντας μεγάλες ανοχές. Η επιλογή αυτή γίνεται ώστε στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί το τσοκ στο τραπέζι, εξασφαλίζοντας την ταύτιση του κατακόρυφου άξονα του περιβλήματος με αυτόν της μηχανής. Έτσι δεν είναι αναγκαία η ορθογωνιοποίηση των πλευρών. Η ταύτιση των αξόνων είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς, λόγω του ύψους του περιβλήματος και του ωφέλιμου μήκους των κοπτικών, απαιτείται η εναλλαγή της φοράς του κομματιού στον κατακόρυφο άξονα για να ολοκληρωθεί η περιμετρική κατεργασία.

Αφού τοποθετηθεί λοιπόν το τεμάχιο στο τσοκ, θα κατεργαστεί μέρος της περιμέτρου στην κάτω πλευρά. Στο ύψος της προεξοχής του στυπιοθλίπτη, θα δημιουργηθεί ένα πλαίσιο ορθογώνιας διατομής ύψους περί τα 10mm. Το πλαίσιο αυτό θα χρησιμοποιηθεί για την εκ νέου στερέωση στη μέγγενη, υπό γωνία αυτή τη φορά, ώστε να κατεργαστούν οι οπές στις προεξοχές του συνδέσμου και του στυπιοθλίπτη. Η δημιουργία του πλαισίου θα εξασφαλίσει την παραλληλία των πλευρών, ώστε να διατηρηθεί η συμμετρία κατά την ανάποδη πρόσδεση στη μέγγενη.

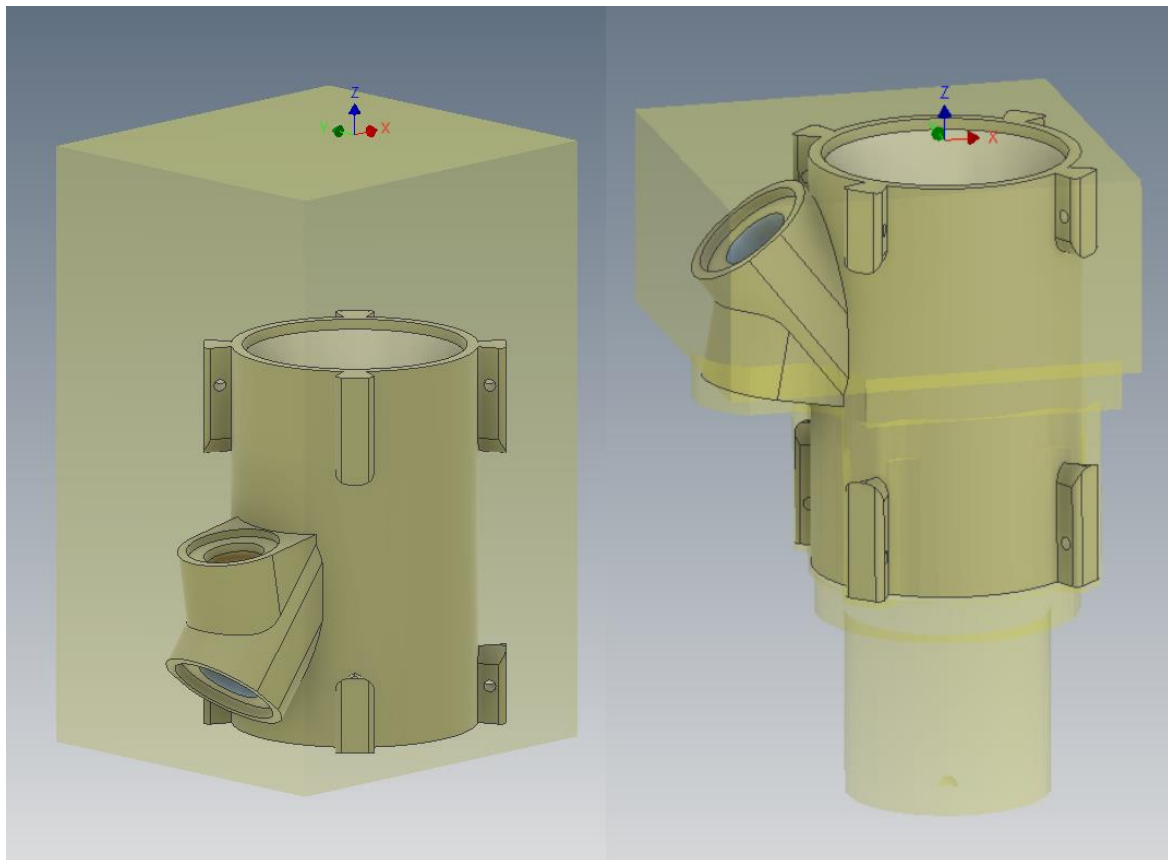
Στη συνέχεια θα γίνει η πρόσδεση στο τσοκ του 4^{ου} άξονα, όπου θα γίνουν οι κατεργασίες των προεξοχών στερέωσης των βάσεων των δακτύλων και της κάτω βάσης.

Τέλος, πάλι με τη χρήση του τσοκ στο τραπέζι, θα γίνει η τελική κατεργασία της περιμέτρου και του εσωτερικού, σε δύο στάδια, με εναλλαγή της φοράς του κατακόρυφου άξονα. Στο ενδιάμεσο θα πρέπει να αφαιρεθεί η κυλινδρική προεξοχή με τη βοήθεια του τόρνου.

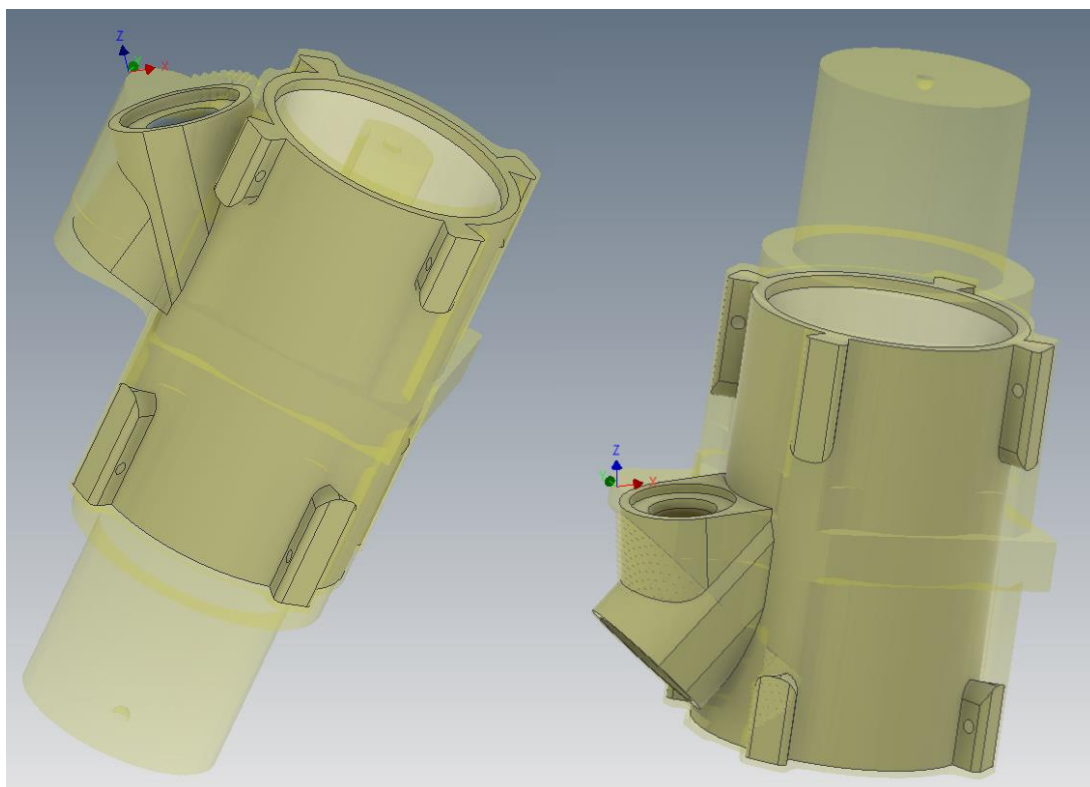
Δυστυχώς, στο τελευταίο στάδιο η πρόσδεση θα πρέπει να γίνει από το εσωτερικό, με τα τοιχώματα στην τελική σχεδόν μορφή τους, οπότε θα χρειαστεί μικρότερη δύναμη σύσφιξης και χαμηλότερες ταχύτητες κατεργασίας. Η συνθήκη αυτή αποδεικνύεται πηγή σφαλμάτων ως προς την παραλληλία των άνω και κάτω επιφανειών και την «κυλινδρικότητα» του εσωτερικού.

Τα συστήματα συντεταγμένων: τοποθετούνται κατεχοχόν στον κατακόρυφο άξονα του κυλινδρικού περιβλήματος, σε ποικίλα ύψη ώστε να εξυπηρετείται ο εντοπισμός και η καταχώρησή τους στη μηχανή - τυπικά τα ΧΥ επίπεδα εφάπτονται των επιφανειών του τεμαχίου που βρίσκονται «εκτεθειμένες» στο κοπτικό πριν τη έναρξη κάθε κατεργασίας. Δύο εξαιρέσεις αποτελούν οι κατεργασίες στις πλευρικές προεξοχές, όπου εδράζονται ο ηλ/κος σύνδεσμος κι ο στυπιοθλίπτης, όπου τα σ.σ. τοποθετούνται στις κατά προσέγγιση στις ακμές που απομένουν από προηγούμενες κατεργασίες. Η επιλογή αυτή, αν κι όχι βέλτιστη, παρέχει επαρκή ακρίβεια στην δημιουργία των οπών και των σπειρωμάτων. Το σημαντικό είναι η τήρηση των γωνιών στερέωσης ως προς τον κύριο άξονα του περιβλήματος, αλλά και μεταξύ τους, και λιγότερο το ακριβές μήκος της προεξοχής - που σε κάθε περίπτωση δεν θα αποκλίνει περισσότερο από 1 – 2mm από το μοντέλο, εφόσον μετρηθεί σωστά με έναν απλό βερνιέρο.

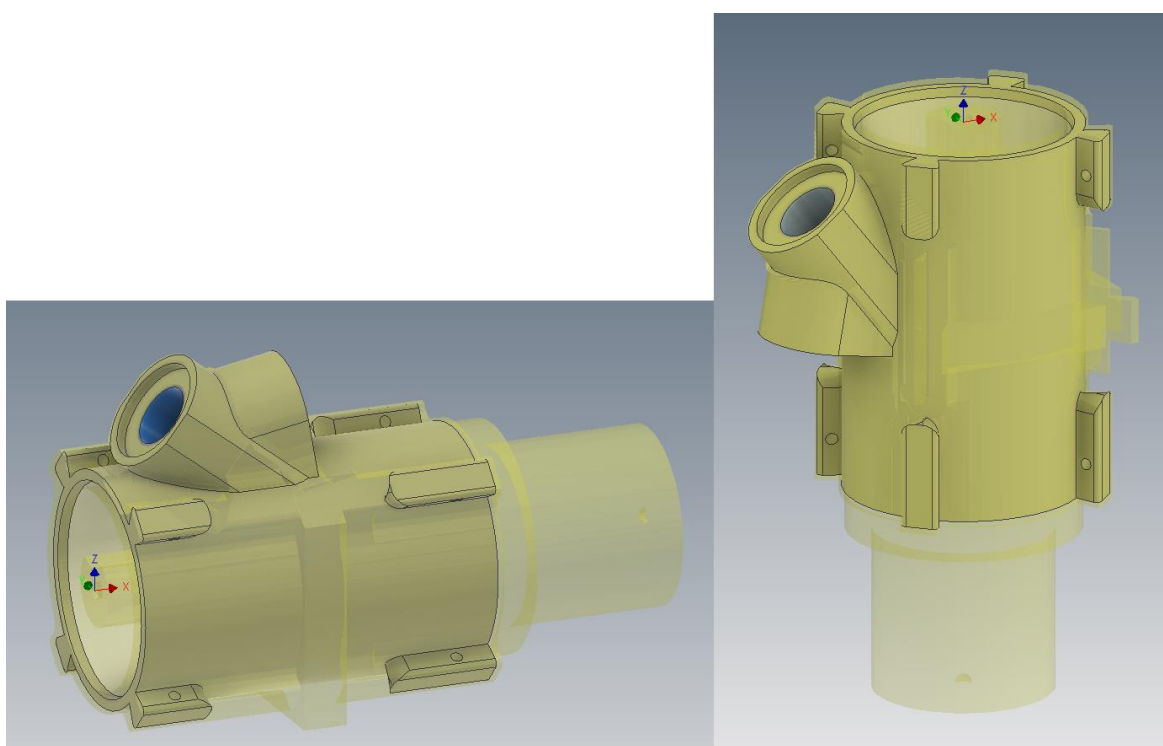
Βάσει και της περιγραφής του πλάνου των κατεργασιών, απαιτούνται 7 συστήματα συντεταγμένων (7 setups), συν την κατεργασία στον τόρνο. Τα συστήματα αυτά, μαζί με την αναπαράσταση του τεμαχίου στο εκάστοτε στάδιο προόδου, φαίνονται στις ακόλουθες εικόνες.



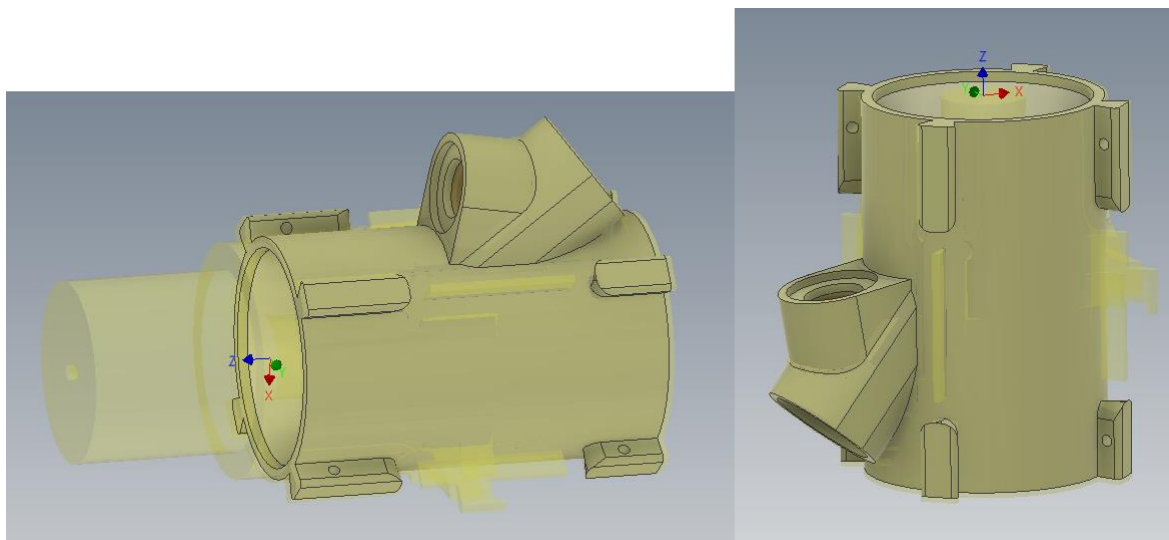
Εικόνα Γ.32 - Τα δύο πρώτα σείτ κατεργασιών, setup0 [αριστερά] και setup1 [δεξιά]. Διακρίνονται στο πάνω μέρος τα δύο συστήματα συντεταγμένων.



Εικόνα Γ.33 - Τα σετ κατεργασιών *setup2* [αριστερά] και *setup3* [δεξιά]. Διακρίνονται τα συστήματα συντεταγμένων στις άνω επιφάνειες των σημείων, όπου μετά την κατεργασία θα προκύψουν οι βάσεις του ηλεκτρικού συνδέσμου και του συμπυκνωτή αντίστοιχα.



Εικόνα Γ.34 - Τα επόμενα σετ κατεργασιών, *setup4* [αριστερά] και *setup5* [δεξιά]. Το πρώτο αφορά στην κατεργασία στον 4^ο άξονα της μηχανής, γι' αυτό απεικονίζεται οριζόντια. Διακρίνονται τα αντίστοιχα συστήματα συντεταγμένων στην αριστερή άκρη του τεμαχίου για το *setup4* και στο πάνω μέρος για το *setup5*.



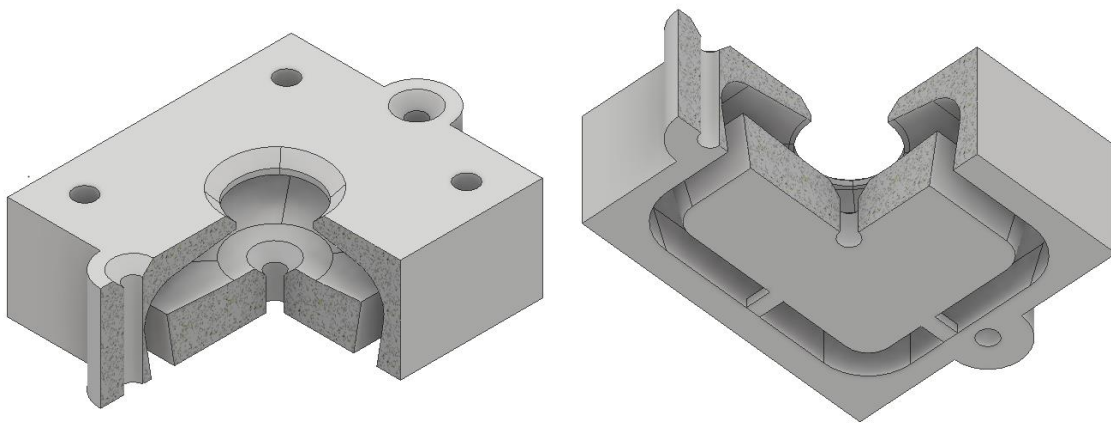
Εικόνα Γ.35 - Τα δύο τελευταία σετ κατεργασιών, setup6-“dummy” [αριστερά] και setup6 [δεξιά]. Το πρώτο αφορά στην αποκοπή της κυλινδρικής προεξοχής στον τόρνο, γι’ αυτό απεικονίζεται οριζόντια. Διακρίνονται τα αντίστοιχα συστήματα συντεταγμένων στην αριστερή άκρη του τεμαχίου για τη στερέωση στον τόρνο (μόνο για λόγους απεικόνισης) και στο άνω μέρος για το setup6.

Κατεργασίες: Προσομοιώσεις όλων των setup που αφορούν στην κοπή στην CNC-mill μηχανή παρουσιάζονται στα βίντεο `{:\UndEE_manufacture\milled_parts\}`. Χρησιμοποιώντας το setup6-“dummy”, παρουσιάζεται επίσης μια προσέγγιση της διαδικασίας που πρέπει να γίνει στον τόρνο, στο ομώνυμο βίντεο. Σημείο προσοχής: όπως ανέφερα νωρίτερα, μετά την αποκοπή της κυλινδρικής προεξοχής στον τόρνο, το τεμάχιο πρέπει να στερεωθεί στο τσοκ με σχετικά χαμηλή δύναμη, ώστε να μην δημιουργηθούν σημάδια στις περατωμένες επιφάνειές του (η παρεμβολή μιας-δύο στρώσεων χαρτοταινίας μπορεί να βοηθήσει). Δυστυχώς, ελλείψει καλύτερου συστήματος πρόσδεσης, η δύναμη δεν θα πρέπει να είναι ούτε πολύ χαμηλή, διαφορετικά το κομμάτι μπορεί να κινηθεί ή και να ξεφύγει από το τσοκ - με καταστροφικά αποτελέσματα. Ο χρήστης πρέπει να βρει μια ιδανική τομή αισθητικά.

Γ3. Τα καλύμματα των αισθητήρων FSR: χύτευση σε καλούπι

Για την κατασκευή των καλυμμάτων των αισθητήρων χρησιμοποιείται η μέθοδος της χύτευσης - σε μια πολύ βασική μορφή της.

Καταρχάς, στο περιβάλλον CAD δημιουργείται καλούπι, ως το «αρνητικό» των καλυμμάτων, το οποίο θα τυπωθεί στον 3D-printer. Το καλούπι αυτό - Finger skin mold (Ax) - εξετάστηκε στο υποκεφάλαιο Γ3, στο τέλος της ενότητας (A). Απεικονίζεται σε τομή τριών τετάρτων



Εικόνα Γ.36 - Το καλούπι για την χύτευση των καλυμμάτων των αισθητήρων FSR σε τομή $\frac{3}{4}$.

Η διαδικασία είναι σχετικά απλή:

- ⊥ το καλούπι χρησιμοποιείται για τη διάνοιξη οπών σε μια επίπεδη επιφάνεια (π.χ. ένα κομμάτι plexiglass), με οδηγούς τις οπές στις δύο πλαϊνές προεξοχές και την οπή στο κέντρο του εσωτερικού κομματιού
- ⊥ το καλούπι διαιρείται στα κομμάτια του με ένα μαχαιράκι και καθαρίζονται τυχόν προεξοχές στο εσωτερικό, ώστε οι επιφάνειες του καλύμματος να είναι κατά το δυνατόν ομαλές
- ⊥ το εσωτερικό κομμάτι στερεώνεται με μία (φρεζάτη) βίδα M1.6 στην επίπεδη επιφάνεια και αλείφεται με ένα ελαφρύ στρώμα βαζελίνης
- ⊥ ένα ελαφρύ στρώμα βαζελίνης επαλείφεται και στην εσωτερική επιφάνεια του εξωτερικού κομματιού και στη βάση του
- ⊥ για καλύτερα αποτελέσματα, το καλούπι γεμίζεται με σιλικόνη RTV πριν τοποθετηθεί στην επίπεδη επιφάνεια - ένα μέρος σιλικόνης επαλείφεται και στις παράπλευρες επιφάνειες του εσωτερικού κομματιού, όπου πιθανόν να μην φτάσει σιλικόνη
- ⊥ το εξωτερικό τμήμα πιέζεται προσεκτικά πάνω στο εσωτερικό και στερεώνεται στην επίπεδη επιφάνεια με βίδες M1.6
- ⊥ ζητούμενο είναι να εξέρχεται σιλικόνη τόσο από την κεντρική οπή, όσο και από τις τέσσερις μικρότερες στις γωνίες του εξωτερικού τμήματος, ένδειξη ότι και οι περιοχές αυτές έχουν γεμίσει με σιλικόνη
- ⊥ αν χρειάζεται, σιλικόνη συμπληρώνεται πιέζοντάς τη από την κεντρική οπή, και πάλι μέχρι να εξέρχεται από όλες τις μικρότερες οπές

- ⊥ ο χρόνος βουλκανισμού είναι κατ' ελάχιστο 24 ώρες - έπειτα το καλούπι μπορεί να αφαιρεθεί από την επιφάνεια και με προσοχή να αποκολληθεί το κάλυμμα
- ⊥ συνίσταται η χρήση περισσότερων του ενός καλουπιών ταυτόχρονα (π.χ. 4, όσα ο αριθμών των καλυμμάτων ανά στοιχείο δράσης)
- ⊥ τα καλύμματα πρέπει να ελεγχθούν αφού αφαιρεθούν από τα καλούπια τους και να κοπούν οι προεξοχές που αναμένονται στα σημεία των οπών ή και της βάσης

Σημειώνεται ότι μετά από μερικές χρήσεις, ίσως το εσωτερικό κομμάτι να στρίβει επάνω στην επιφάνεια, κάτι που θα οδηγήσει σε ένα λανθασμένα ευθυγραμμισμένο εσωτερικό κι εξωτερικό μέρος στο κάλυμμα. Για να αποφευχθεί μια τέτοια εξέλιξη συνίσταται η χρήση κόλλας για την στερέωσή του στην επιφάνεια, ήδη από την πρώτη φορά που θα χρησιμοποιηθεί - εφόσον η επάλειψη με βαζελίνη γίνεται προσεκτικά και καλύπτει όλα τα σημεία, δεν θα χρειαστεί να αφαιρεθεί για την αποκόλληση των καλυμμάτων.

Παράρτημα Δ (assembly manuals)

Τα τεχνικά σχέδια των μερών του συστήματος έχουν ήδη παρουσιαστεί στο Παράρτημα Α, όπου χωρίστηκαν σε ενότητες (assemblies) ως εξής:

- (A) **Finger** assemblies [4 ειδών]
- (B) **Rod Link** assembly
- (C) **Casing Top Plug** assembly
- (D) **Motor Casing** assemblies [2 ειδών]
- (E) **Casing Bottom Plug** assemblies [2 ειδών]
- (F) **Manipulator Base** assembly
- (G) **Camera** assemblies [2 ειδών]
- (H) **LED Lamp** assembly
- (I) **Cable Host Buoy** assembly
- (J) **“UndEE” System** assembly

Στο τέλος κάθε ενότητας είχε παρουσιαστεί σχηματικά και ο τρόπος συναρμολόγησης των στοιχείων της.

Στο παράρτημα αυτό η συναρμολόγηση κάθε ενότητας εξετάζεται λίγο πιο αναλυτικά, περιγράφοντας τη διαδικασία και τυχόν σημεία προσοχής. Παρέχονται επίσης βίντεο μικρής διάρκειας με την ακολουθία της συναρμολόγησης σε 3D animations `{:\UndEE_user-manuals\assembly_video-directions\}`.

(A) - Finger assemblies

⇒ Finger 2-phalanx, straight - Assembly (Aa)

Ένα ενδεικτικό σχέδιο της συναρμολόγησης των μερών της υποενότητας δίνεται στο αντίστοιχο τεχνικό σχέδιο που ακολουθεί [Assembly (A), P/N (Aa), sh.2].

Ένα ενδεικτικό βίντεο όπου προτείνεται και μια σειρά για την συναρμολόγησή τους μπορεί να βρεθεί στο αρχείο `{:\UndEE_user-manuals\assembly_video-directions\}`.

Τα σημεία που πρέπει να τονιστούν είναι τα εξής:

- τα μέρη που προέρχονται από 3D-εκτύπωση πρέπει να έχουν επεξεργαστεί σύμφωνα με τις οδηγίες που Παραρτήματος Γ
- οι αισθητήρες FSR πρέπει να τοποθετηθούν στις επιφάνειες των δακτύλων με ταινία διπλής όψης (1 cm² αρκεί), με προσοχή ώστε να είναι στο κέντρο τους - θα βοηθήσει η χρήση των εγκοπών στις άκρες των επιφανειών
- η στερέωση των καλυμμάτων των αισθητήρων FSR [P/N A8] στις φάλαγγες πρέπει να γίνει με μικρό ποσό σιλικόνης (ή φλατζόκολλας) στη βάση τους - υπάρχει διάκενο περί το 1-1.5mm γι' αυτό το λόγο
- ο διακόπτης αρχικοποίησης θα τοποθετηθεί μόνο σε μία από τις δύο υποενότητες δακτύλων που θα χρησιμοποιηθεί στο μηχανισμό - δεν έχει σημασία σε ποια, καθώς ο εξωτερικός σύνδεσμος [P/N A4] είναι κοινός
- ο διακόπτης αρχικοποίησης χρειάζεται προσοχή να τοποθετηθεί πλήρως στην εσοχή του συνδέσμου, ειδάλως δεν θα ενεργοποιείται στην πλήρως κλειστή θέση
- οι ηλεκτρικές συνδέσεις των αισθητήρων FSR και του διακόπτη αρχικοποίησης θα γίνουν σε μεταγενέστερο στάδιο, στην συναρμολόγηση της ενότητας (J)
- κατά την τελική σύσφιξη των περικόχλιων, προσοχή πρέπει να δοθεί ώστε οι κινήσεις των μερών να είναι ανεμπόδιστες, αλλά όχι χαλαρές - να ληφθεί υπόψιν ότι με τη λειτουργία τα μέρη θα αποκτήσουν επιπλέον ανοχές λόγω φθοράς του υλικού

⇒ Finger 2-phalanx, concave - Assembly (Ab)

Για τη συναρμολόγηση της υποενότητας (Ab), το σύνολο των οδηγιών της προηγούμενης υποενότητας (Aa) μπορεί να ακολουθηθεί, καθώς δεν παρουσιάζουν ουσιαστικές διαφορές σε αυτό το πλαίσιο.

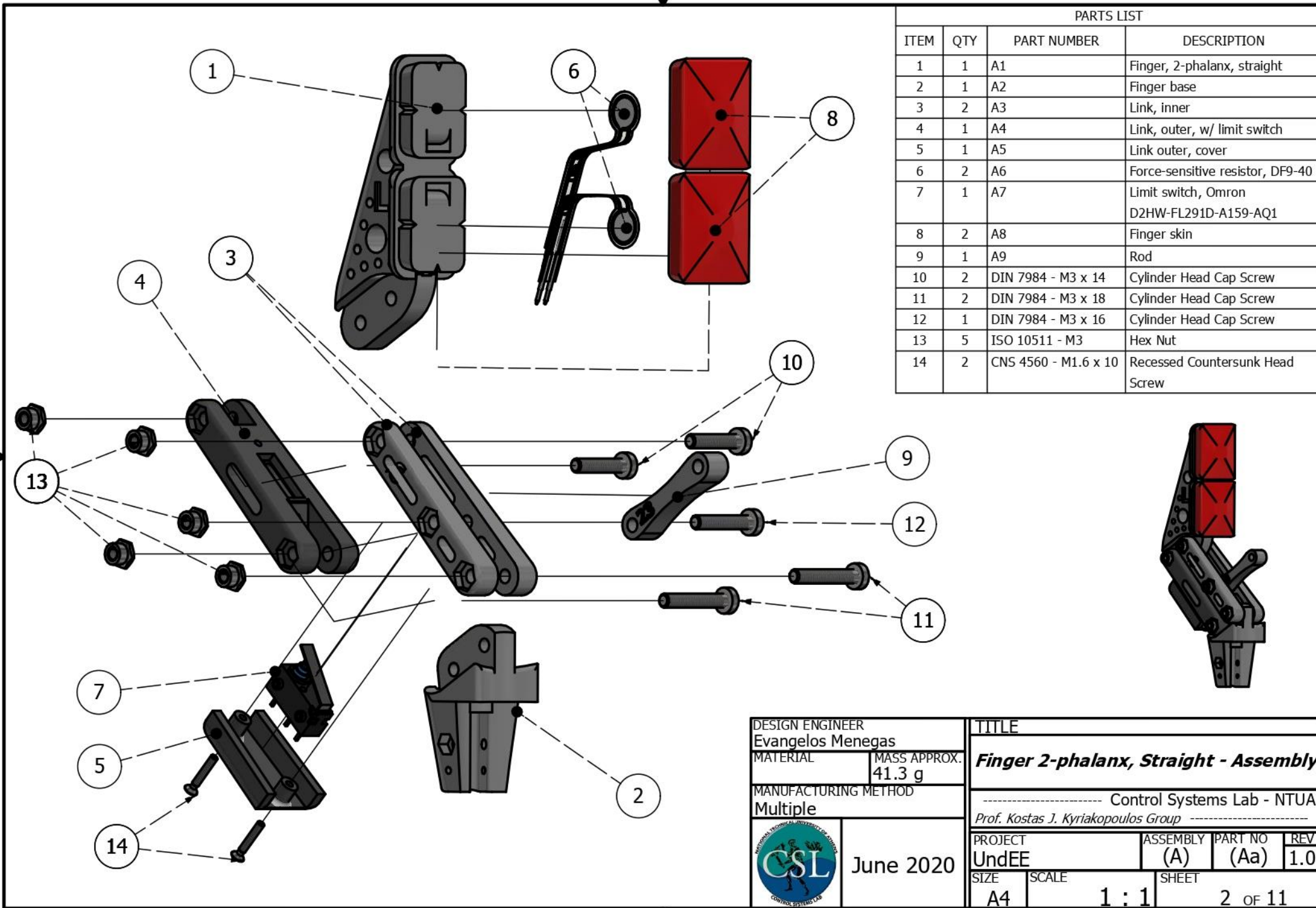
⇒ Finger 2-phalanx, hinged - Assembly (Ac)

Για τη συναρμολόγηση της υποενότητας (Ac), το σύνολο των οδηγιών της υποενότητας (Aa) μπορεί να ακολουθηθεί, με εξαίρεση την συναρμολόγηση των επιφανειών συγκράτησης [P/N A11]. Ένα ενδεικτικό σχέδιο της συναρμολόγησης αυτών μερών δίνεται στο τεχνικό σχέδιο που ακολουθεί [Assembly (A), P/N (Ac), sh.2].

Ένα ενδεικτικό βίντεο όπου προτείνεται και μια σειρά για την συναρμολόγησή τους μπορεί να βρεθεί στο αρχείο `{:\UndEE_user-manuals\assembly_video-directions\}`.

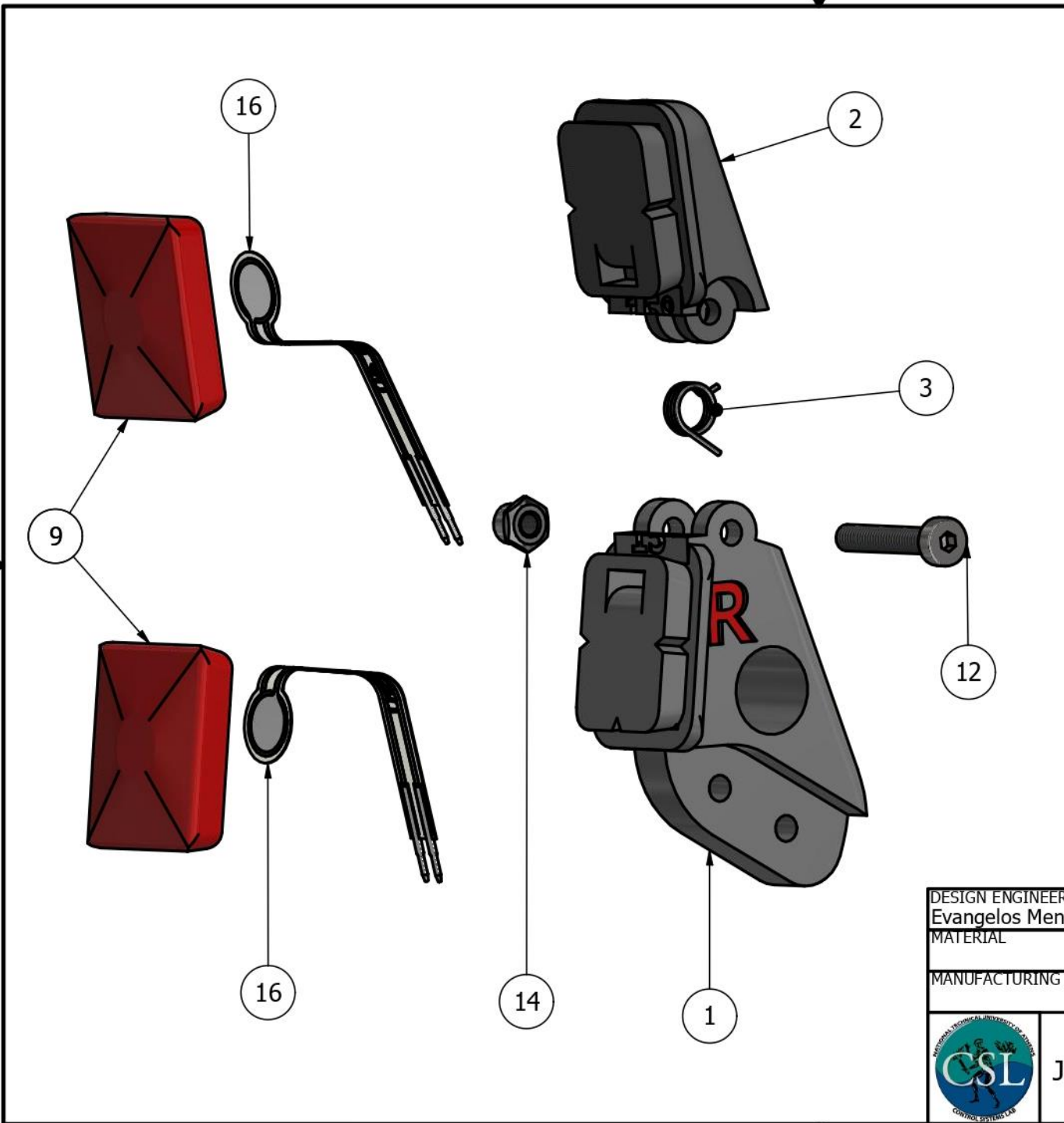
⇒ Finger 1-phalanx, flexible - Assembly (Ad)

Για τη συναρμολόγηση της υποενότητας (Ad), το σύνολο των οδηγιών της υποενότητας (Aa) μπορεί να ακολουθηθεί, παραλείποντας το τμήμα που αφορά τους αισθητήρες FSR, καθώς δεν περιλαμβάνονται.



PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	A1	Finger, 2-phalanx, straight
2	1	A2	Finger base
3	2	A3	Link, inner
4	1	A4	Link, outer, w/ limit switch
5	1	A5	Link outer, cover
6	2	A6	Force-sensitive resistor, DF9-40
7	1	A7	Limit switch, Omron D2HW-FL291D-A159-AQ1
8	2	A8	Finger skin
9	1	A9	Rod
10	2	DIN 7984 - M3 x 14	Cylinder Head Cap Screw
11	2	DIN 7984 - M3 x 18	Cylinder Head Cap Screw
12	1	DIN 7984 - M3 x 16	Cylinder Head Cap Screw
13	5	ISO 10511 - M3	Hex Nut
14	2	CNS 4560 - M1.6 x 10	Recessed Countersunk Head Screw

DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL	MASS APPROX. 41.3 g	Finger 2-phalanx, Straight - Assembly	
MANUFACTURING METHOD Multiple		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group	
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (A)	PART NO (Aa)
	SIZE A4	SCALE 1 : 1	REV 1.0
		SHEET 2 OF 11	



PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	A11a	Finger, 2-phalanx, hinged - lower
2	1	A11b	Finger, 2-phalanx, hinged - upper
3	1	A11c	Torsion spring (finger, hinged)
4	1	A2	Finger base
5	2	A3	Link, inner
6	1	A4	Link, outer, w/ limit switch
7	1	A5	Link outer, cover
8	1	A7	Limit switch, Omron D2HW-FL291D-A159-AQ1
9	2	A8	Finger skin
10	1	A9	Rod
11	2	DIN 7984 - M3 x 14	Cylinder Head Cap Screw
12	3	DIN 7984 - M3 x 18	Cylinder Head Cap Screw
13	1	DIN 7984 - M3 x 16	Cylinder Head Cap Screw
14	6	ISO 10511 - M3	Hex Nut
15	2	CNS 4560 - M1.6 x 10	Recessed Countersunk Head Screw
16	2	A6	DF9-40 Force Sensitive Resistor



DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas	
MATERIAL	MASS APPROX. 46.7 g
MANUFACTURING METHOD	
	
June 2020	

TITLE			
Finger, 2-phalanx, hinged - Assembly			
Control Systems Lab - NTUA			
Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group			
PROJECT	ASSEMBLY	PART NO	REV
UndEE	(A)	(Ac)	1.0
SIZE	SCALE	SHEET	
A4	1 / 2	2 OF 5	

(B) - Rod Link assembly

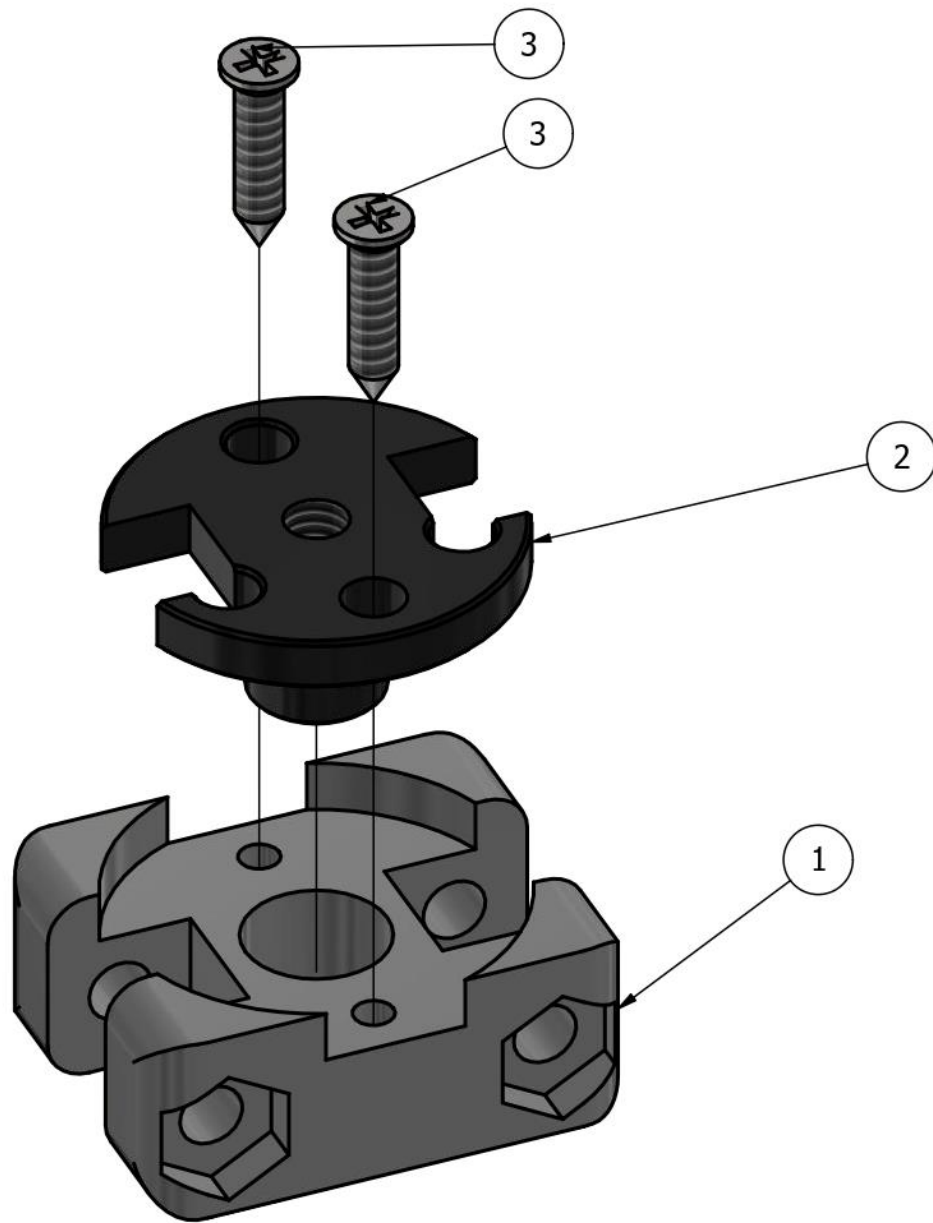
Ένα ενδεικτικό σχέδιο της συναρμολόγησης των μερών της υποενότητας δίνεται στο αντίστοιχο τεχνικό σχέδιο που ακολουθεί [Assembly (B), sh.2].

Ένα ενδεικτικό βίντεο όπου προτείνεται και μια σειρά για την συναρμολόγησή τους μπορεί να βρεθεί στο αρχείο `{:\UndEE_user-manuals\assembly_video-directions\}`.

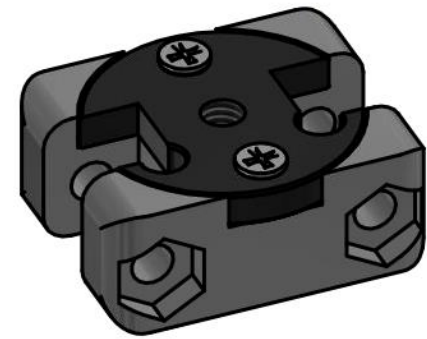
Τα σημεία που πρέπει να τονιστούν είναι τα εξής:


- τα μέρη που προέρχονται από 3D-εκτύπωση πρέπει να έχουν επεξεργαστεί σύμφωνα με τις οδηγίες που Παραρτήματος Γ
- το περικόχλιο με το τραπεζοειδές σπείρωμα [P/N B2] χρειάζεται επεξεργασία πριν τοποθετηθεί στη βάση [P/N B1] - εφόσον ληφθεί στην εμπορική του κατάσταση¹⁴¹ - η οποία μπορεί να γίνει ως εξής:
 - ↳ τοποθετώντας το στη βάση, ώστε μία εκ των οπών του να ευθυγραμμίζεται με μια οπή της βάσης, να βιδωθεί η αντίστοιχη βίδα
 - ↳ με τη βοήθεια ενός τρυπανιού $\varnothing 1.5\text{mm}$, χρησιμοποιώντας την άλλη οπή της βάσης σαν οδηγό, να ανοιχθεί επιπλέον οπή στο περικόχλιο
 - ↳ με ένα τρυπάνι $\varnothing 3\text{mm}$ να αυξηθεί η διάμετρος της νέας οπής στο περικόχλιο
 - ↳ με ένα λεπτό πριονάκι ή εργαλείο τύπου Dremel να κοπούν τα μέρη του περικόχλιου που περισσεύουν - αν κοπούν δύο εσοχές με οδηγό τις αντίστοιχες πλευρές της βάσης, το κομμάτι που περισσεύει μπορεί να αποσπαστεί προσεκτικά με ένα μυτοσίμπηδο

¹⁴¹ για τα περικόχλια που παραδίδονται με τους μηχανισμούς οι επεξεργασίες έχουν ήδη γίνει.



PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	B1	Rod link, dual
2	1	B2	Trapezoidal nut, TR3.5x2.4mm
3	2	ANSI B18.6.5M - 2.2 x 0.8 x 10 - AB - I	Cross Recessed Flat Countersunk Head Tapping Screw Type AB - Type I



DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL	MASS APPROX. 3.8 g	Rod link - Assembly	
MANUFACTURING METHOD		----- Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group -----	
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (B)	PART NO
	SIZE A4	SCALE 3 : 1	REV 1.0
		SHEET 2 OF 4	

(C) - Casing Top Plug assembly

Ένα ενδεικτικό σχέδιο της συναρμολόγησης των μερών της υποενότητας δίνεται στο αντίστοιχο τεχνικό σχέδιο που ακολουθεί [Assembly (C), sh.2].

Ένα ενδεικτικό βίντεο όπου προτείνεται και μια σειρά για την συναρμολόγησή τους μπορεί να βρεθεί στο αρχείο `{:\UndEE_user-manuals\assembly_video-directions\}`.

Τα σημεία που πρέπει να τονιστούν είναι τα εξής:

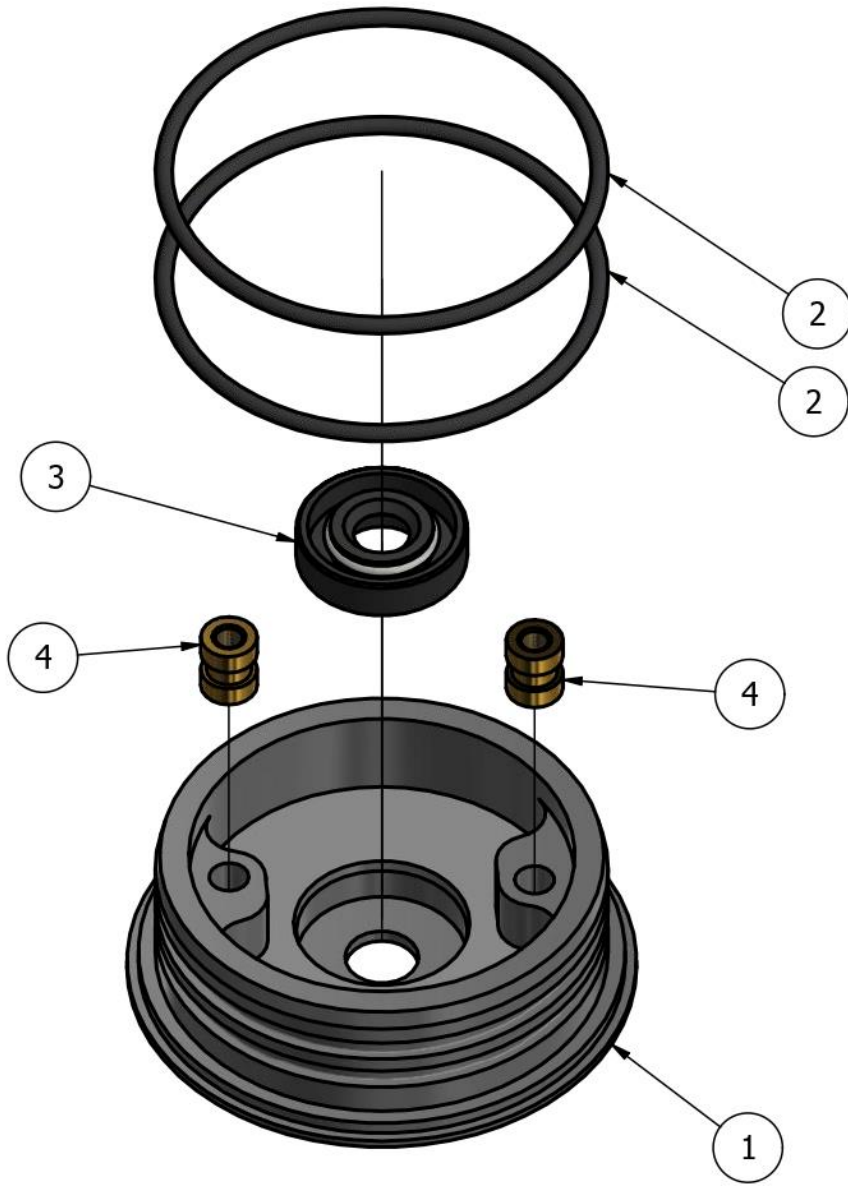
- αν και γενικά τα μέρη που προέρχονται από CNC-milling είναι «καθαρά», καλό είναι να γίνει ένας έλεγχος για προεξοχές και υπολείμματα στις ακμές και τις άκρες
- τα δύο κοχλιωτά εμβάσματα [ITEM 4] τοποθετούνται στις οπές του καπακιού πρεσαριστά, κατόπιν εφαρμογής θερμότητας τοπικά και στα δύο μέρη· ζητούμενο είναι τα εμβάσματα να λιώσουν το πλαστικό κατά την είσοδο τους στην οπή, ώστε να εγκλωβιστούν σε αυτό καθώς το πλαστικό στερεοποιείται ξανά - ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί ώστε να μην τοποθετηθούν πλάγια ως προς τον κατακόρυφο άξονα ή έκκεντρα των οπών¹⁴²
- τα ελαστικά μέρη (o-rings καιτσιμούχα) πρέπει να επαλειφθούν με λιπαντικό σιλικόνης πριν την εφαρμογή τους στο καπάκι
- τα o-rings πρέπει να τοποθετηθούν στις εσοχές τους χωρίς να υπερ-εκταθούν και χωρίς να στραφούν, διότι μπορεί η στεγανοποίηση να είναι υποδεέστερη


¹⁴² για τα καπάκια που παραδίδονται με τους μηχανισμούς τα εμβάσματα έχουν τοποθετηθεί.

PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	C1	Plug, casing, top
2	2	CE2	O-ring 37x1.5, NBR
3	1	C3	Radial shaft seal, 6x15x4, NBR WA
4	2	Nut GB 809 A M3 x 6	Insert round nuts

Assembly Notes:

- Apply silicone lubricant to parts [CE2], [C3]
- Heat-press parts [4] into holes of part [C1]
- Pay attention not to twist or overstretch parts [CE2] during assembly



DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL	MASS APPROX. 15.6 g	Plug casing, top - Assembly		
MANUFACTURING METHOD		----- Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group -----		
	June 2020	PROJECT	ASSEMBLY PART NO	REV
		UndEE	(C)	1.0
SIZE	SCALE	SHEET		
A4	1.5 : 1	2 OF 5		

(D) - Motor Casing assemblies

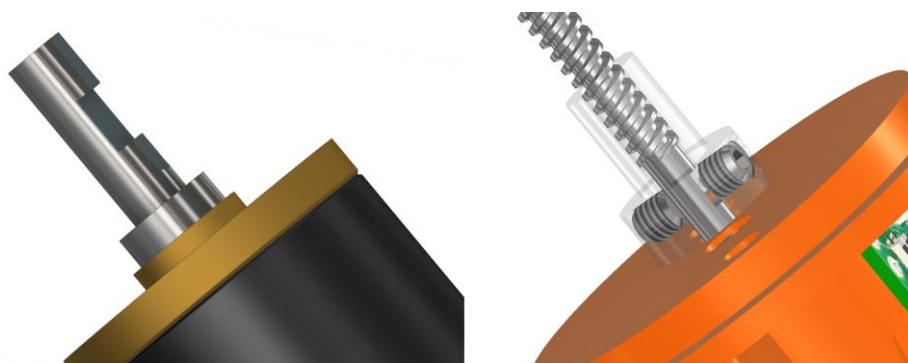
⇒ Motor casing (Escap 16) - Assembly (Da)

Ένα ενδεικτικό σχέδιο της συναρμολόγησης των μερών της υποενότητας δίνεται στο αντίστοιχο τεχνικό σχέδιο που ακολουθεί [Assembly (D), P/N (Da), sh.2].

Ένα ενδεικτικό βίντεο όπου προτείνεται και μια σειρά για την συναρμολόγησή τους μπορεί να βρεθεί στο αρχείο {:\UndEE_user-manuals\assembly_video-directions\}.

Τα σημεία που πρέπει να τονιστούν είναι τα εξής:

- τα μέρη που προέρχονται από 3D-εκτύπωση πρέπει να έχουν επεξεργαστεί σύμφωνα με τις οδηγίες που Παραρτήματος Γ
- οι ηλεκτρικές συνδέσεις των αντίστοιχων μερών [P/N D2~D7] πρέπει να έχουν γίνει σύμφωνα με τις οδηγίες που Παραρτήματος Β και τα μέρη να τοποθετηθούν στις κατάλληλες εσοχές
- στον άξονα του μοτέρ [P/N D2] κατεργάζεται, με τη βοήθεια εργαλείου τύπου Dremel (ή λίμας), επιπλέον εσοχή στην επίπεδη πλευρά του, ώστε να μην υπάρχει ο κίνδυνος να αποσυνδεθεί από το σύνδεσμο [P/N D8] του τραπεζοειδή κοχλία¹⁴³ (βλ. εικόνα Δ.1)

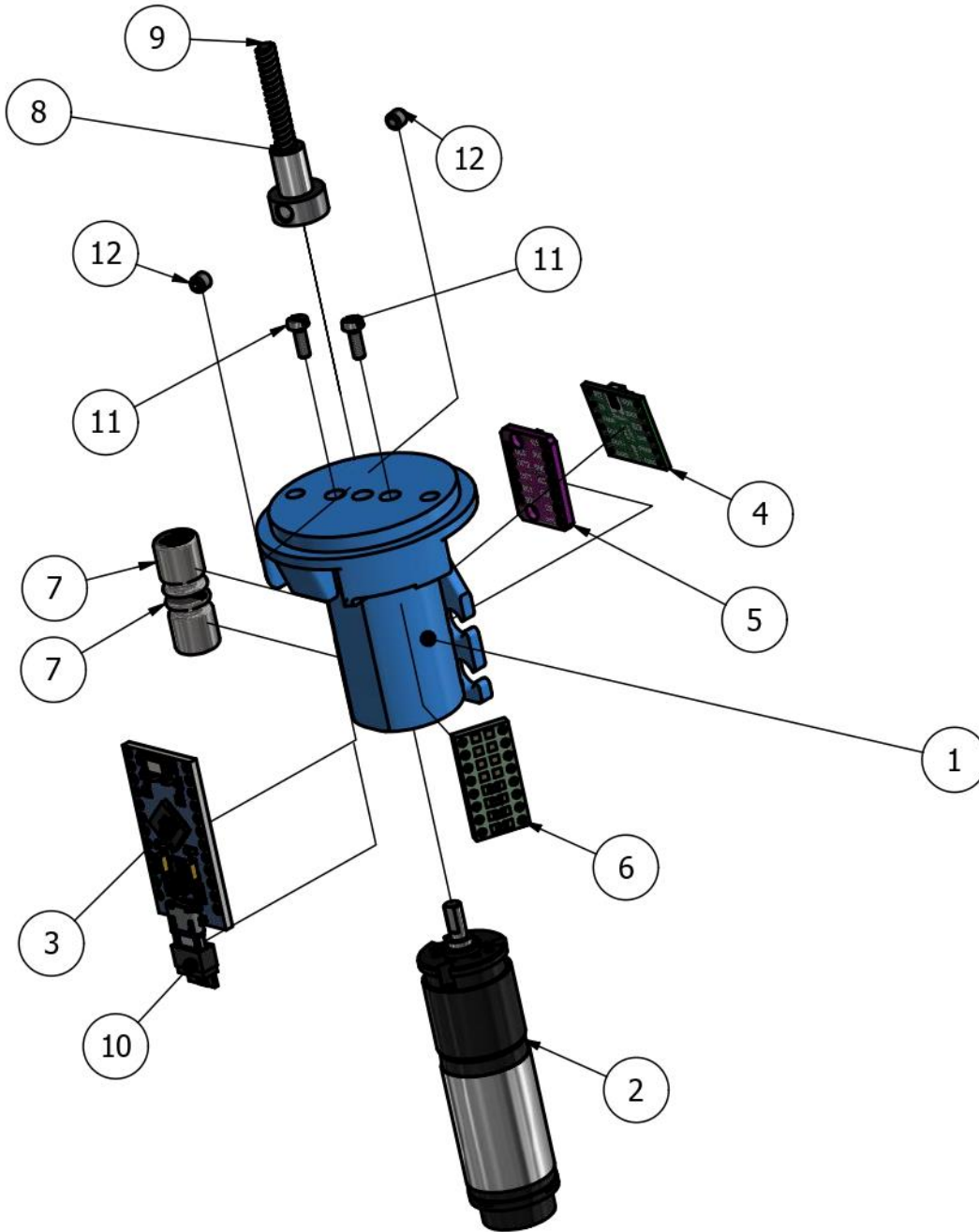


Εικόνα Δ.1 - Η πρόσθετη εσοχή που κατεργάζεται στον άξονα των μοτέρ - στο ύψος των βιδών στερέωσης του συνδέσμου -, η οποία αποτρέπει τον σύνδεσμο από την απώλεια επαφής με τον άξονα.

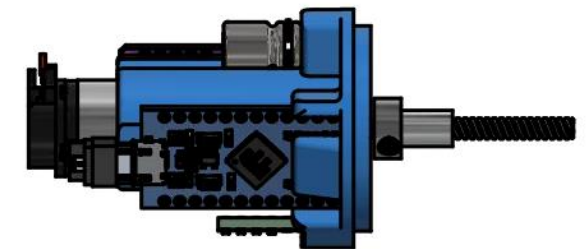
⇒ Motor casing (Maxon 16) - Assembly (Db)


Για τη συναρμολόγηση της υποενότητας (Db), το σύνολο των οδηγιών της προηγούμενης υποενότητας (Da) μπορεί να ακολουθηθεί, καθώς δεν παρουσιάζουν ουσιαστικές διαφορές σε αυτό το πλαίσιο.

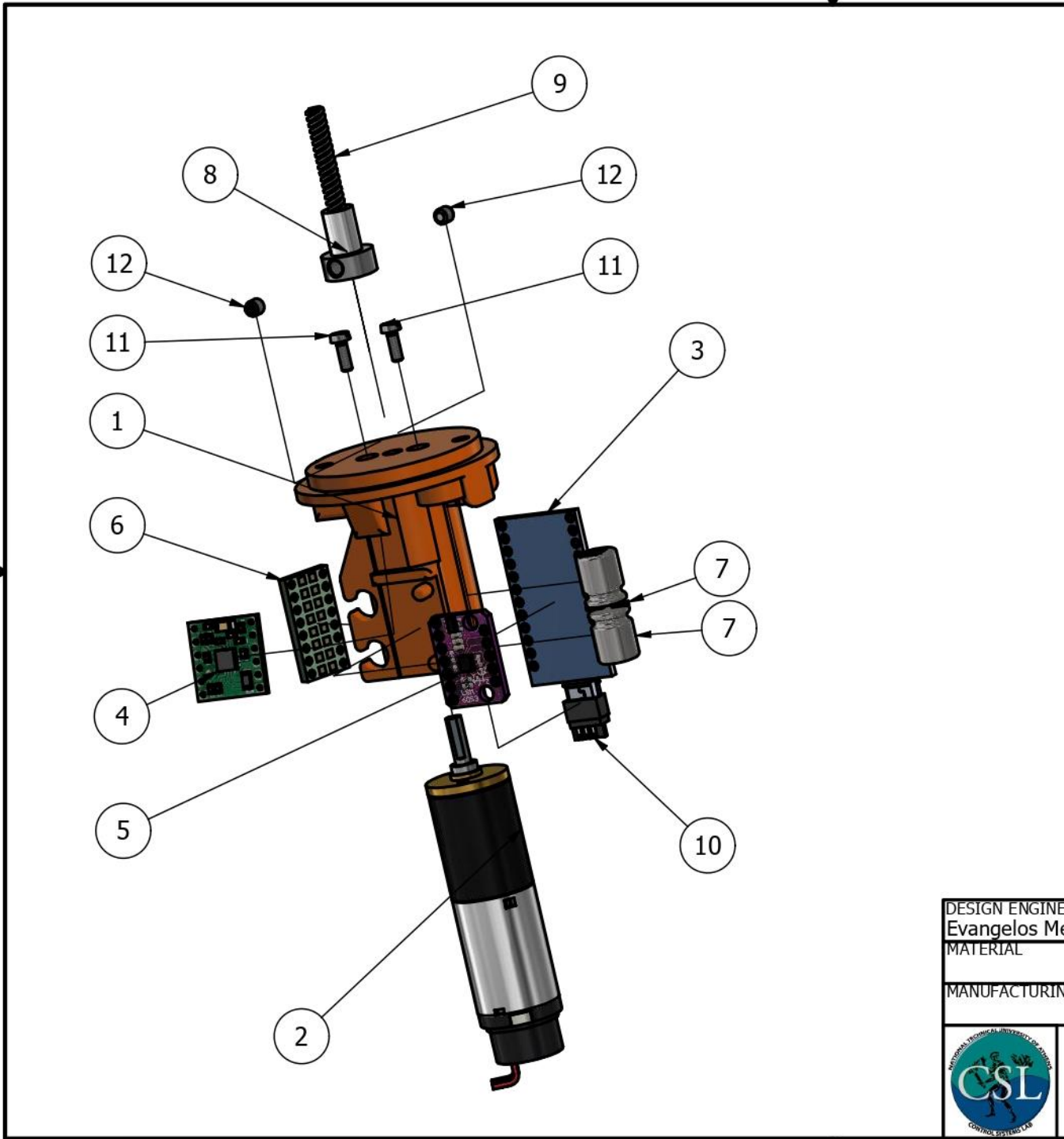
¹⁴³ Για τα μοτέρ που παραδίδονται με τους μηχανισμούς οι κατεργασία αυτή έχει ήδη γίνει. Μια εναλλακτική μέθοδος θα μπορούσε να είναι η χρήση αναεροβικής κόλλας, κάτι το οποίο όμως εγώ δεν δοκίμασα και δεν γνωρίζω το βαθμό επιτυχίας του.




PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	D1	Motor casing (Escap 16)
2	1	D2	DC motor, Portescap 16G88-214E, B16 Gearhead 27:1, 8V, 5W
3	1	D3	Arduino Pro Micro (ATmega 32U4)
4	1	D4	DRV8801, Single brushed DC motor driver carrier
5	1	D5	LSM6DS3, 6DOF IMU, breakout board
6	1	D6	R-divider board (4x10kΩ) - Assembly
7	2	D7	Capacitor, 330uF-25V, Aluminium, High-ESR, SMD
8	1	D8	Shaft coupler, d6 x D10 x L15
9	1	D9	Lead screw, TR3.5x2.4, L27mm
10	1		USB 2.0 Micro connector, male
11	2	AS 1427 - M2 x 6(2)	ISO metric machine screws
12	2	BS 4168 - M3 x 3(4)	Hexagon socket screws and wrench keys, metric series- Specification for hexagon set screws with flat point



DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE			
MATERIAL	MASS APPROX. 55.2 g	Motor casing (Escap 16) - Assembly			
MANUFACTURING METHOD		----- Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group -----			
	June 2020	PROJECT	ASSEMBLY	PART NO	REV
		UndEE	(D)	(Da)	1.0
SIZE	SCALE	SHEET			
A4	4 / 5	2 OF 11			



PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	D10	Motor casing (Maxon 16)
2	1	D2	DC motor, Maxon 200875, Gearhead 128:1, 9V 2W
3	1	D3	Arduino Pro Micro (ATmega 32U4)
4	1	D4	DRV8801, Single brushed DC motor driver carrier
5	1	D5	LSM6DS3, 6DOF IMU, breakout board
6	1	D6	R-divider board (4x10kΩ) - Assembly
7	2	D7	Capacitor, 330uF-25V, Aluminium, High-ESR, SMD
8	1	D8	Shaft coupler, d6 x D10 x L15
9	1	D9	Lead screw, TR3.5x2.4, L27mm
10	1		USB 2.0 Micro connector, male
11	2	AS 1427 - M2 x 6(2)	ISO metric machine screws
12	2	BS 4168 - M3 x 3(4)	Hexagon socket screws and wrench keys, metric series- Specification for hexagon set screws with flat point

DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE			
MATERIAL	MASS APPROX. 70.6 g	Motor casing (Maxon 16) - Assembly			
MANUFACTURING METHOD		----- Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group -----			
	June 2020	PROJECT	ASSEMBLY	PART NO	REV
		UndEE	(D)	(Db)	1.0
SIZE	SCALE	SHEET			
A4	7 / 8	2 OF 4			

(E) - Casing Bottom Plug assembly

⇒ Plug casing, bottom - Assembly (Ea)

Ένα ενδεικτικό σχέδιο της συναρμολόγησης των μερών της υποενότητας δίνεται στο αντίστοιχο τεχνικό σχέδιο που ακολουθεί [Assembly (E), P/N (Ea), sh.2].

Ένα ενδεικτικό βίντεο όπου προτείνεται και μια σειρά για την συναρμολόγησή τους μπορεί να βρεθεί στο αρχείο `{:\UndEE_user-manuals\assembly_video-directions\}`.

Τα σημεία που πρέπει να τονιστούν είναι τα εξής:

- αν και γενικά τα μέρη που προέρχονται από CNC-milling είναι «καθαρά», καλό είναι να γίνει ένας έλεγχος για προεξοχές και υπολείμματα στις ακμές και τις άκρες
- τα o-rings πρέπει να επαλειφθούν με λιπαντικό σιλικόνης πριν την εφαρμογή τους στο καπάκι
- επίσης, πρέπει να τοποθετηθούν στις εσοχές τους χωρίς να υπερ-εκταθούν και χωρίς να στραφούν, διότι μπορεί η στεγανοποίηση να είναι υποδεέστερη

⇒ Plug casing, bottom, w/ fitting - Assembly (Eb)

Για τη συναρμολόγηση της υποενότητας (Eb), το σύνολο των οδηγιών της προηγούμενης υποενότητας (Ea) μπορεί να ακολουθηθεί, με εξαίρεση την τοποθέτηση του πνευματικού συνδέσμου [P/N E3], για το οποίο θα πρέπει:

- ↳ να εφαρμοστεί λιπαντικό σιλικόνης στην φλάντζα του
- ↳ να χρησιμοποιηθεί ταινία teflon στα σπειρώματα στη βάση του

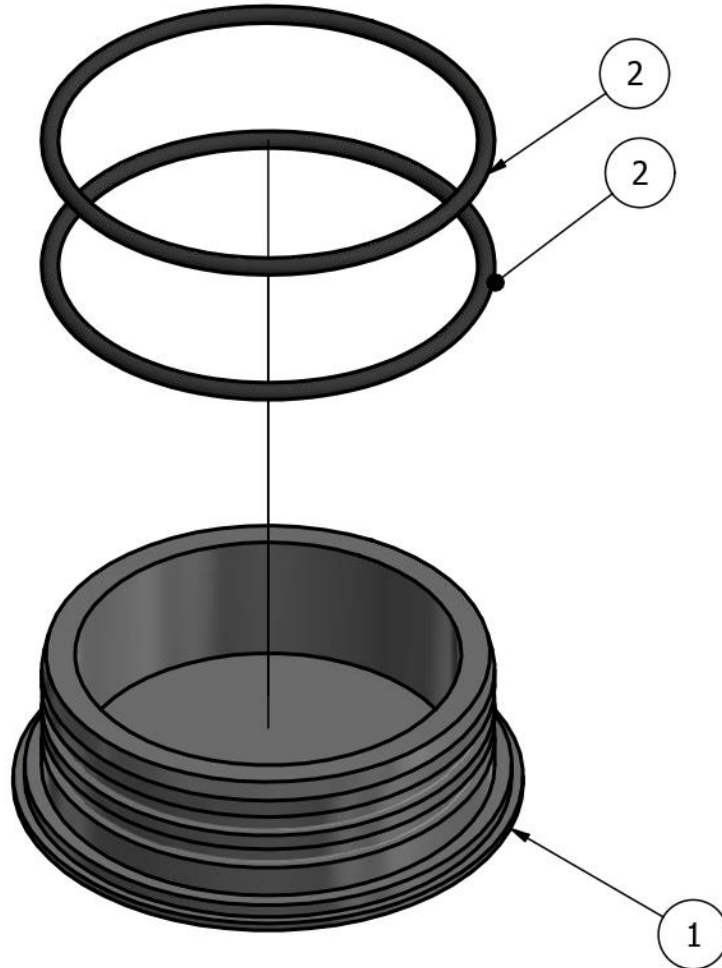
Ένα ενδεικτικό σχέδιο της συναρμολόγησης των μερών της υποενότητας δίνεται στο αντίστοιχο τεχνικό σχέδιο που ακολουθεί [Assembly (E), P/N (Eb), sh.2].


Ένα ενδεικτικό βίντεο όπου προτείνεται και μια σειρά για την συναρμολόγησή τους μπορεί να βρεθεί στο αρχείο `{:\UndEE_user-manuals\assembly_video-directions\}`.

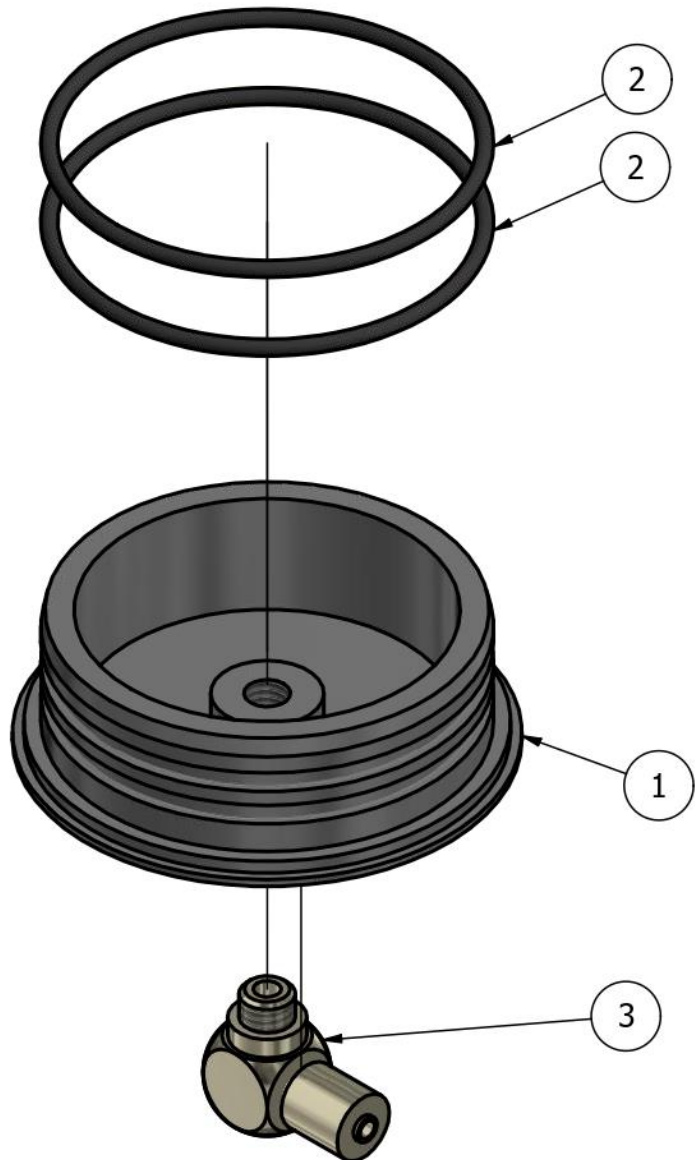
PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	E1	Plug casing, bottom
2	2	CE2	O-ring 37x1.5, NBR

Assembly Notes:

- Apply silicone lubricant to parts [CE2]
- Pay attention not to twist or overstretch parts [CE2] during assembly

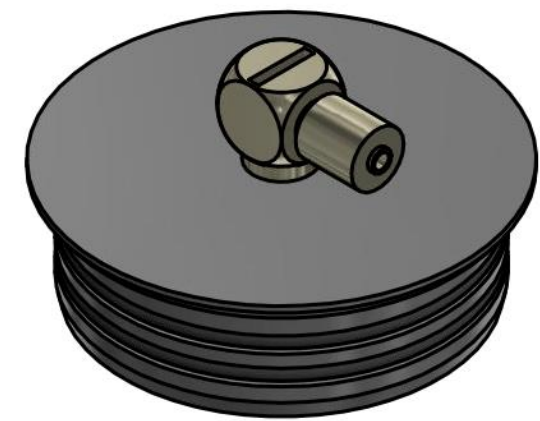



DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL	MASS APPROX. 9.8 g	Plug casing, bottom - Assembly		
MANUFACTURING METHOD		Control Systems Lab - NTUA <i>Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group</i>		
	June 2020	PROJECT	ASSEMBLY PART NO	REV
		UndEE	(E)	(Ea)
SIZE	SCALE	SHEET		
A4	1.5 : 1	2 OF 4		



PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	E1	Plug casing, bottom, w/ fitting
2	2	CE2	O-ring 37x1.5, NBR
3	1	E3	M-5HL-6 Hose Elbow, Mini Pneumatic Fitting

- Assembly Notes:
- Apply silicone lubricant to parts [CE2]
 - Apply silicone lubricant to gasket of part [E3]
 - Apply teflon tape to thread of part [E3]
 - Pay attention not to twist or overstretch parts [CE2] during assembly



DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL	MASS APPROX. 14.4 g	Plug casing, bottom, w/ fitting - Assembly		
MANUFACTURING METHOD		----- Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group -----		
 June 2020	PROJECT	ASSEMBLY	PART NO	REV
	UndEE	(E)	(Eb)	1.0
SIZE	SCALE	SHEET		
A4	1.5 : 1	2 OF 5		

(F) - Manipulator Base assembly

Ένα ενδεικτικό σχέδιο της συναρμολόγησης των μερών της υποενότητας δίνεται στο αντίστοιχο τεχνικό σχέδιο που ακολουθεί [Assembly (F), sh.2].

Ένα ενδεικτικό βίντεο όπου προτείνεται και μια σειρά για την συναρμολόγησή τους μπορεί να βρεθεί στο αρχείο `{:\UndEE_user-manuals\assembly_video-directions\}`.

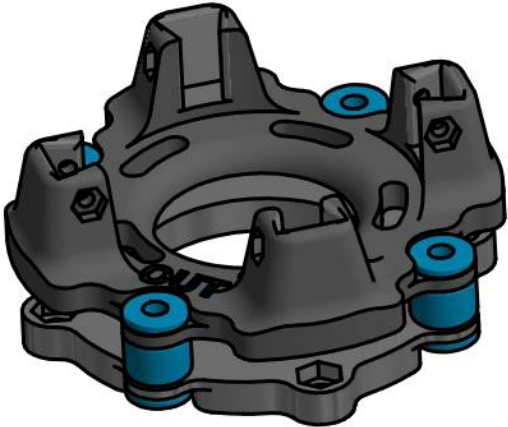
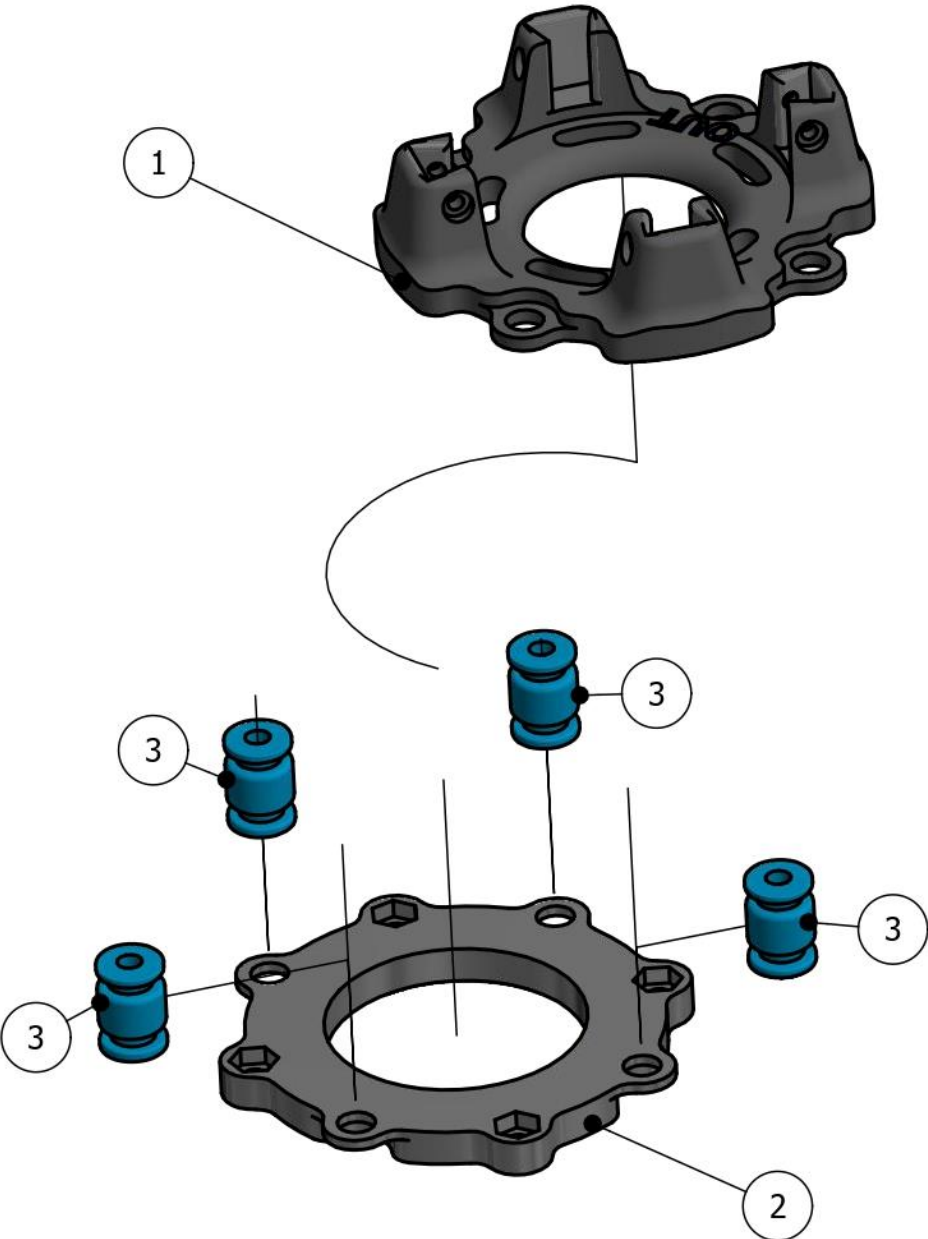
Τα σημεία που πρέπει να τονιστούν είναι τα εξής:

- τα μέρη που προέρχονται από 3D-εκτύπωση πρέπει να έχουν επεξεργαστεί σύμφωνα με τις οδηγίες που Παραρτήματος Γ
- στους ελαστικούς αποσβεστήρες [P/N F3] πρέπει να εφαρμοστεί λιπαντικό σιλικόνης
- η συναρμολόγηση των στοιχείων γίνεται ευκολότερα αν τα ελαστικά μέρη τοποθετηθούν πρώτα στην κάτω βάση [P/N F2]
- για την συναρμολόγησή των ελαστικών μερών στις οπές των βάσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μικρό επίπεδο κατσαβίδι, με προσοχή να μην σκιστούν

PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	F1	Manipulator mount, casing
2	1	F2	Manipulator base, gumball
3	4	F3	Gumball, 6x9x13 (anti-vibration damping rubber)

Assembly Notes:

- Apply silicone lubricant to parts [F3]
- Fix parts [F3] to base [F2]; a dull flat screwdriver or similar tool can help
- Fix parts [F3] to mount [F1]



DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL		MASS APPROX. 27.6 g	
MANUFACTURING METHOD		Manipulator base - Assembly	
----- Control Systems Lab - NTUA			
Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group			
PROJECT UndEE		ASSEMBLY (F)	PART NO (F)
SIZE A4		SCALE 1 : 1	REV 1.0
		SHEET 2 OF 5	



June 2020

(G) - Camera assemblies

⇒ Camera, Creative - Assembly (Ga)

Ένα ενδεικτικό σχέδιο της συναρμολόγησης των μερών της υποενότητας δίνεται στο αντίστοιχο τεχνικό σχέδιο που ακολουθεί [Assembly (G), P/N (Ga), sh.2].

Ένα ενδεικτικό βίντεο όπου προτείνεται και μια σειρά για την συναρμολόγησή τους μπορεί να βρεθεί στο αρχείο `{:\UndEE_user-manuals\assembly_video-directions\}`.

Τα σημεία που πρέπει να τονιστούν είναι τα εξής:

- τα μέρη που προέρχονται από 3D-εκτύπωση πρέπει να έχουν επεξεργαστεί σύμφωνα με τις οδηγίες που Παραρτήματος Γ
- το περίβλημα κατασκευάζεται ως εξής:
 - ↳ κομμάτι σωλήνα PVC (Ø40mm, ~25mm μήκος) θερμαίνεται (σε ηλεκτρικό φούρνο, σε θερμοκρασία περί τους 100°C) για περίπου 10 λεπτά ή μέχρι να είναι εύπλαστο
 - ↳ στο εσωτερικό του τοποθετείται το αντίστοιχο πατρόν (βλ. `{:\UndEE_CAD\~Camera,LEDParts (G,H)\ cam_Creative\}`), το οποίο θα δώσει το σχήμα του στο σωλήνα - το πατρόν έχει καμπύλωση στην μία του βάση, προς διευκόλυνση της εισαγωγής του στο σωλήνα
 - ↳ αφού κρυώσει ο σωλήνας, αφαιρείται το πατρόν
 - ↳ το περίβλημα είναι έτοιμο προς χρήση αφού κοπεί στο τελικό μήκος/ύψος (16-18mm)
- τα δύο καπάκια κατασκευάζονται από ακρυλικό (plexiglass), χρησιμοποιώντας το περίβλημα για την χάραξη της περιμέτρου τους (το κάτω καπάκι μπορεί να είναι ελαφρώς παχύτερο, 3 ή 4mm πάχος, ώστε να βιδωθεί ασφαλέστερα ο στυπιοθλίπτης) - προσοχή ώστε η οπή στο κάτω καπάκι να γίνει πριν την κοπή της περιμέτρου, ώστε να είναι δυνατή η ευθυγράμμιση της στο κέντρο του περιβλήματος
- οι ηλεκτρικές συνδέσεις πρέπει να έχουν γίνει σύμφωνα με τις οδηγίες που Παραρτήματος Β
- η πλακέτα της κάμερας [P/N G1] πρέπει να τοποθετηθεί στην αντίστοιχη βάση [P/N G2]
- το καλώδιο USB πρέπει να διέρχεται από τη βάση της κάμερας, το περικόχλιο του στυπιοθλίπτη, το κάτω καπάκι του περιβλήματος, και τέλος το στυπιοθλίπτη
- ένα τμήμα θερμοσυστελλόμενου καλό είναι να χρησιμοποιηθεί στο σημείο της σύσφιξης, για να αυξήσει τη διάμετρό του καλωδίου
- στο άνω μέρος (πάνω στην πλακέτα της κάμερας) πρέπει να τοποθετηθεί μέσο απορρόφησης υγρασίας (π.χ. silica gel), ώστε να μην συγκεντρώνονται υδρατμοί στο άνω καπάκι λόγω της λυχνίας LED της κάμερας
- κατόπιν συναρμολόγησης όλων των μερών, τα καπάκια πρέπει να κολληθούν στις επιφάνειες του περιβλήματος με εποξειδική κόλλα - προσοχή να μην χρησιμοποιηθεί υπερβολική ποσότητα, η οποία μπορεί να φθάσει στην πλακέτα της κάμερας
- τέλος, ο στυπιοθλίπτης πρέπει να βιδωθεί στο κάτω καπάκι με την προσθήκη φλατζόκολλας στα σπειρώματά του, ώστε να εξασφαλιστεί η στεγανή σύνδεση
- για την στερέωση της βάσης, με την οποία αναρτάται στο κυρίως σώμα του μηχανισμού, χρησιμοποιούνται πλαστικά δεματικά (ιδανικό πλάτος: 3.5mm)

- αν ο χρήστης επιθυμεί την ενσωμάτωση της πρόσθετης πηγής φωτός (H), θα πρέπει αυτή να περαστεί στα δερματικά πριν το κλείσιμό τους (βλ. και επόμενο υποκεφάλαιο)

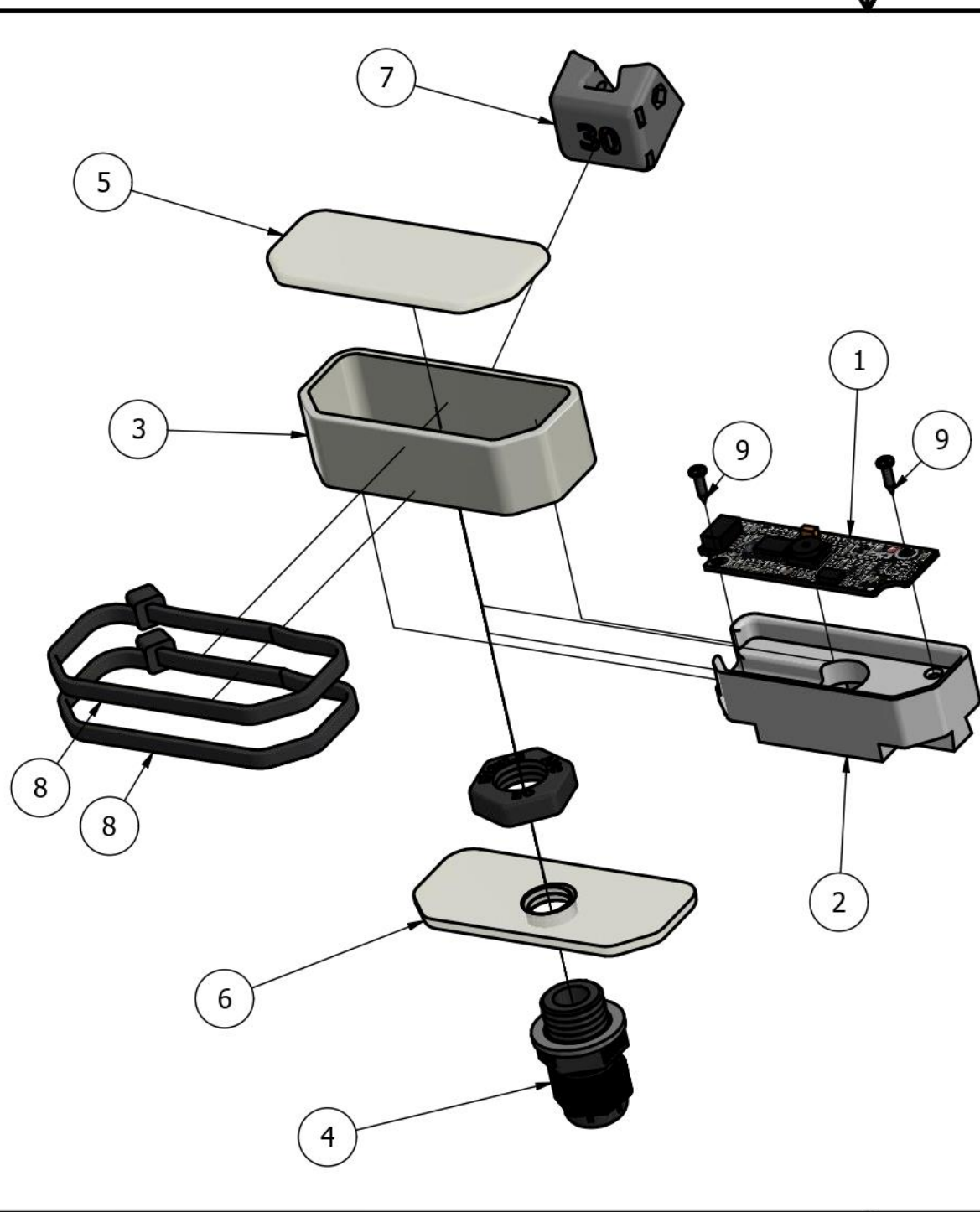
⇒ Camera, Hercules - Assembly (Gb)

Για τη συναρμολόγηση της υποενότητας (Gb), το σύνολο των οδηγιών της προηγούμενης υποενότητας (Ga) μπορεί να ακολουθηθεί, με εξαίρεση το εξής σημείο:

- ↳ το τελικό μήκος/ύψος του περιβλήματος θα πρέπει να προσαρμοστεί ώστε ο φακός της κάμερας να εφάπτεται στο άνω καπάκι, καθώς η πλακέτα δεν στηρίζεται στην εσωτερική βάση με βίδες - η διάστασή αυτή είναι περίπου 17mm
- ↳ το αντίστοιχο parton βρίσκεται στο φάκελο **{:\UndEE_CAD\~Camera,LEDParts (G,H)\cam_Hercules\}**


Ένα ενδεικτικό σχέδιο της συναρμολόγησης των μερών της υποενότητας δίνεται στο αντίστοιχο τεχνικό σχέδιο που ακολουθεί [Assembly (G), P/N (Gb), sh.2].

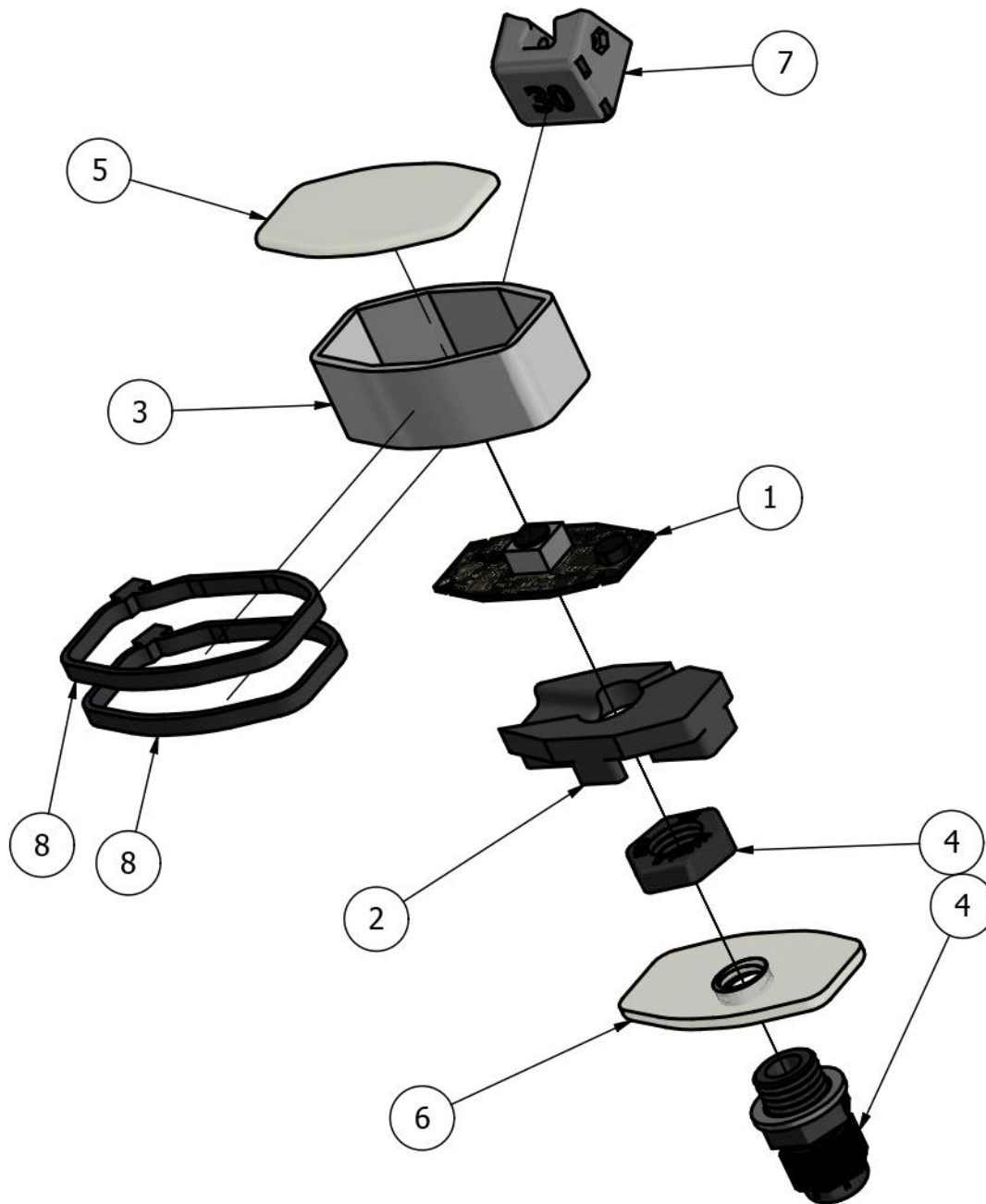
Ενδεικτικά βίντεο όπου προτείνεται και μια σειρά για την συναρμολόγησή τους μπορούν να βρεθεί στο αρχείο **{:\UndEE_user-manuals\assembly_video-directions\}**.



PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	G1	Creative LiveCam Sync HD720p, PCB
2	1	G2	cam Creative, inner base
3	1	G3	cam Creative, pipe casing
4	1	GIJ4	Cable gland, MGB12S, M12x1.5
5	1	G5	cam Creative, upper casing cap
6	1	G6	cam Creative, lower casing cap
7	1	G7	cam mounting base, 30deg
8	2	G8	Cable tie, 3.5x200mm
9	2	Wood screw 4-1.6x7 GOST 1144-80	Half - round head wood screws




DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL	MASS APPROX. 35.2 g	cam, Creative - Assembly	
MANUFACTURING METHOD		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group	
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (G)	PART NO (Ga)
	REV 1.0	SHEET	
SIZE A4	SCALE 5/6	2 OF 9	



PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	G1	Hercules Dualpix HD720p Emotion
2	1	G2	cam Hercules, inner base
3	1	G3	cam Hercules, pipe casing
4	1	G4	Cable gland, MGB12S, M12x1.5
5	1	G5	cam Hercules, upper casing cap
6	1	G6	cam Hercules, lower casing cap
7	1	G7	cam mounting base, 30deg
8	2	G8	Cable tie, 3.5x200mm



DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL	MASS APPROX. 27.4 g	cam, Creative - Assembly	
MANUFACTURING METHOD		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group	
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (G)	PART NO (Gb)
	REV 1.0	SCALE 5/6	SHEET 2 OF 9
SIZE A4			

(H) - LED Lamp assembly

Ένα ενδεικτικό σχέδιο της συναρμολόγησης των μερών της υποενότητας δίνεται στο αντίστοιχο τεχνικό σχέδιο που ακολουθεί [Assembly (H), sh.2].

Ένα ενδεικτικό βίντεο μπορεί να βρεθεί στο αρχείο `{:\UndEE_user-manuals\assembly_video-directions\}`.

Τα σημεία που πρέπει να τονιστούν είναι τα εξής:

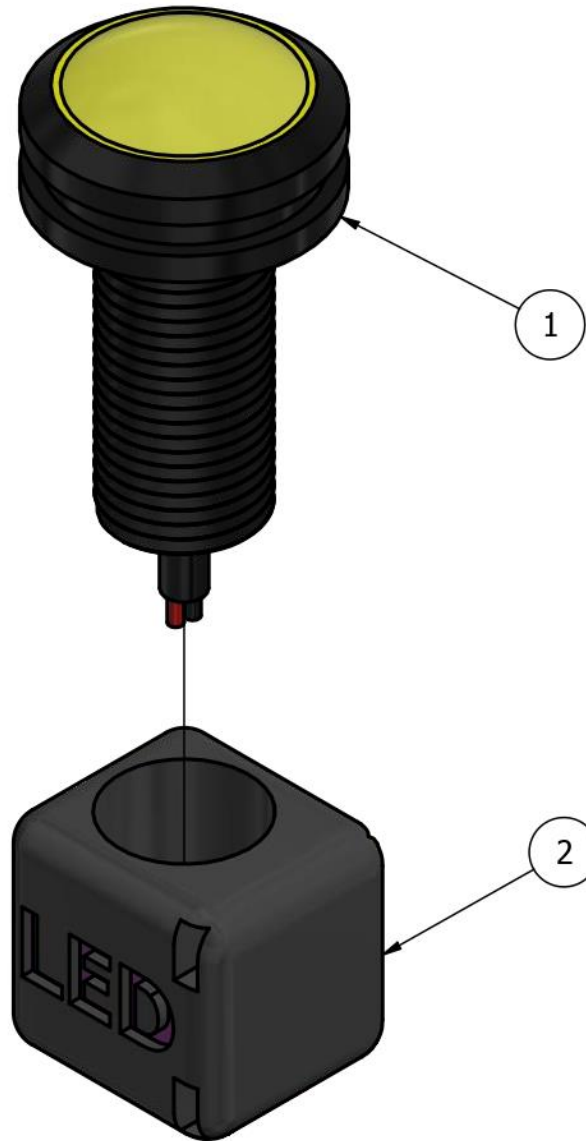
- τα μέρη που προέρχονται από 3D-εκτύπωση πρέπει να έχουν επεξεργαστεί σύμφωνα με τις οδηγίες που Παραρτήματος Γ
- η διάμετρος της οπής της βάσης [P/N H2] είναι σχεδιασμένη ώστε το σώμα του λαμπτήρα LED (μεταλλικό) να συνδέεται κοχλιωτά σε αυτή - το μεταλλικό σπείρωμα θα παραμορφώσει κατάλληλα την πλαστική βάση
- εφόσον ο χρήστης επιθυμεί την ενσωμάτωση της πηγής φωτός στο σύστημα της κάμερας, θα πρέπει να την τοποθετήσει στα δεματικά που συγκρατούν τη βάση της δεύτερης (βλ. και προηγούμενο υποκεφάλαιο)


PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	H1	LED lamp, 9W-12V, "eagle-eye"
2	1	H2	Base, LED lamp

Assembly Notes:

- Fit LED lamp [H1] body into base [H2] like a screw
- Use cable ties (tire-up)*, passing through side holes, to fix assembly on camera assembly [Gn] body (see also instructions of assembly [Gn])

* 3.5x200mm will fit perfectly



DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL	MASS APPROX. 7.8 g	LED lamp - Assembly		
MANUFACTURING METHOD		----- Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group -----		
	June 2020	PROJECT	ASSEMBLY PART NO	REV
		UndEE	(H) (H)	1.0
SIZE	SCALE	SHEET		
A4	2 : 1	2 OF 4		

(I) - Cable Host Buoy assembly

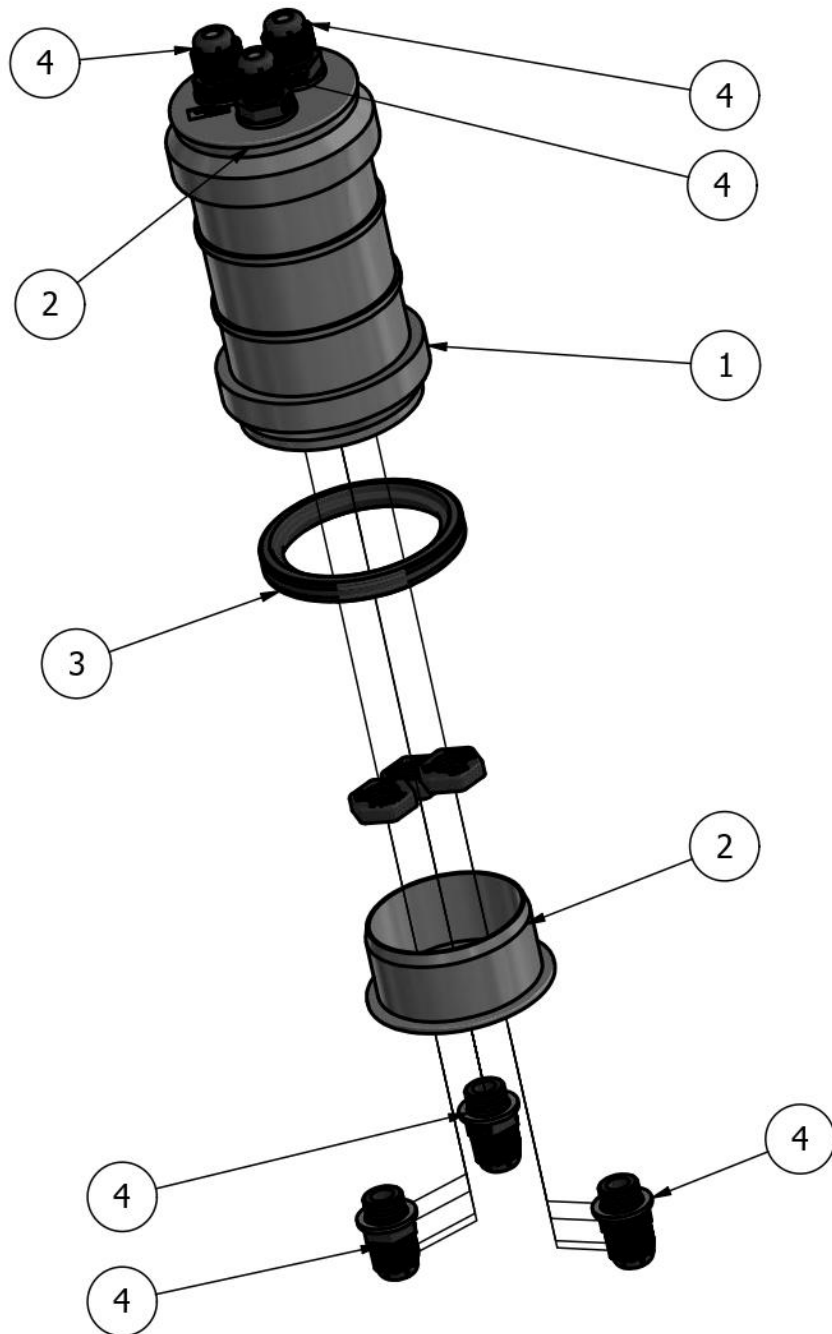
Ένα ενδεικτικό σχέδιο της συναρμολόγησης των μερών της υποενότητας δίνεται στο αντίστοιχο τεχνικό σχέδιο που ακολουθεί [Assembly (I), sh.2].

Ένα ενδεικτικό βίντεο όπου προτείνεται και μια σειρά για την συναρμολόγησή τους μπορεί να βρεθεί στο αρχείο `{:\UndEE_user-manuals\assembly_video-directions\}`.

Τα σημεία που πρέπει να τονιστούν είναι τα εξής:

- οι ηλεκτρικές συνδέσεις των καλωδίων και των USB extentions πρέπει να έχουν γίνει σύμφωνα με τις οδηγίες που Παραρτήματος Β
- τα καπάκια του περιβλήματος πρέπει να τροποποιηθούν από την εμπορική τους μορφή ως εξής¹⁴⁴:
 - ↳ τρεις οπές $\varnothing 10\text{mm}$ πρέπει να ανοιχτούν σε συμμετρικές αποστάσεις στην περίμετρο κύκλου διαμέτρου 25mm, με το κέντρο του στο κέντρο του καπακιού - η ακρίβεια μπορεί να επιτευχθεί με την επικόλληση τυπωμένου σχεδίου στην άνω επιφάνεια
 - ↳ κατόπιν, σπειρώματα πρέπει να ανοιχτούν, με διαστάσεις M12x1.5mm
 - ↳ προαιρετικά, το μήκος/ύψος μπορεί να ελαττωθεί κατά 5mm, για ευκολότερη από/συναρμολόγηση
- τα καλώδια πρέπει να διέρχονται από το στυπιοθλίπτη, το καπάκι του περιβλήματος και τέλος το περικόχλιο του στυπιοθλίπτη
- ένα τμήμα θερμοστελλόμενου καλώδιου είναι να χρησιμοποιηθεί στο σημείο της σύσφιξης, για να αυξήσει τη διάμετρο των καλωδίων
- οι ελαστικές φλάντζες [P/N I3] πρέπει να επαλειφθούν με λιπαντικό σιλικόνης πριν την εφαρμογή τους στα αυλάκια του περιβλήματος
- πριν τη χρήση εντός νερού, οι στυπιοθλίπτες πρέπει σφικθούν γύρω από τα καλώδια επαρκώς, ώστε να εξασφαλίζεται η στεγανότητα

¹⁴⁴ Τα καπάκια που παραδίδονται με τους μηχανισμούς έχουν ήδη κατεργαστεί αναλόγως.

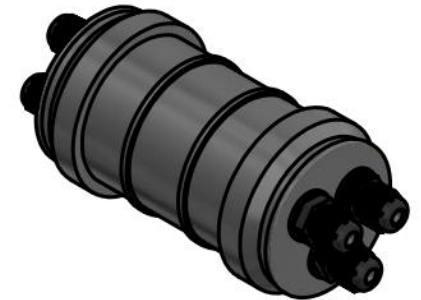



PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	I1	Sliding sleeve, PP 50, Valsir
2	2	I2	Pipe plug, PP 50, Valsir
3	2	I3	Lip seal ring, DN50 BL-581, MOL
4	6	GIJ4	Cable gland, MGB12S, M12x1.5
5	2	I5	USB active extension PCB

Assembly Notes:

- Apply silicone lubricant to parts [I3] and put in corresponding grooves of part [I1]
- (Pass USB/power cables through cable glands first)*
- Apply silicone sealant to male threads and base of cable glands [GIJ4]
- Screw cable glands [GIJ4] to pipe plug [I2] with moderate torque
- Apply silicone sealant to cable gland inner nuts' faces and tighten from the inside of pipe plug [I2] with moderate torque
- Connect USB/power cables, USB extension boards
- Place plugs [I3] on part [I1]
- Tighten cable glands around cables

* valid only for the first time of assembly



DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE	
MATERIAL	MASS APPROX. 88.7 g	Buoy, cable host, USB extentions	
MANUFACTURING METHOD		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group	
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (I)	PART NO
	SIZE A4	SCALE 2 / 5	REV 1.0
		SHEET 2 OF 7	

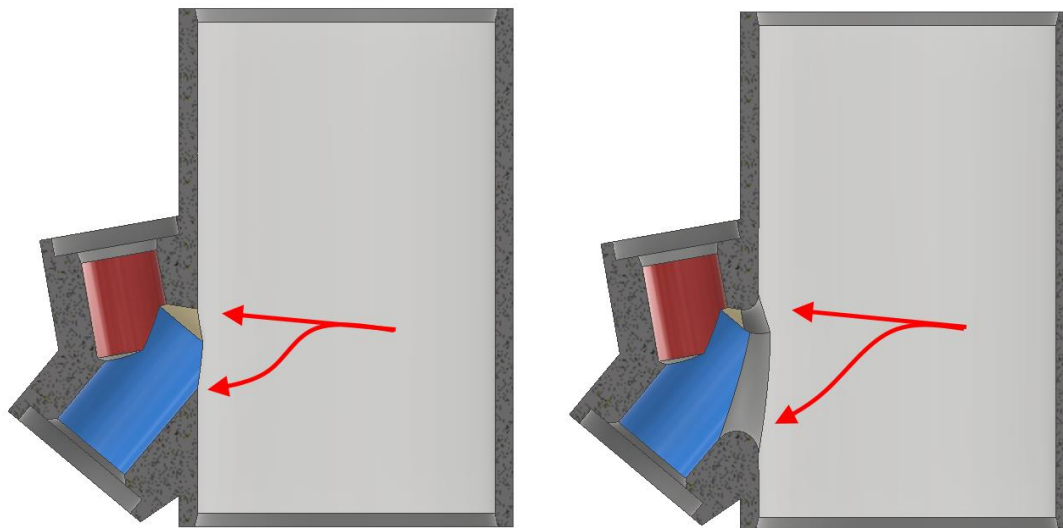
(J) - “UndEE” System assembly

Ένα ενδεικτικό σχέδιο της συναρμολόγησης των μερών της υποενότητας δίνεται στο αντίστοιχο τεχνικό σχέδιο που ακολουθεί [Assembly (J), sh.3].

Ένα ενδεικτικό βίντεο όπου προτείνεται και μια σειρά για την συναρμολόγησή τους μπορεί να βρεθεί στο αρχείο `{:\UndEE_user-manuals\assembly_video-directions\}`.

Τα σημεία που πρέπει να τονιστούν είναι τα εξής:

- αν και γενικά τα μέρη που προέρχονται από CNC-milling είναι «καθαρά», καλό είναι να γίνει ένας έλεγχος για προεξοχές και υπολείμματα στις ακμές και τις άκρες
- ειδικά ωστόσο για το κυρίως περίβλημα του μηχανισμού [P/N J1], μια επιπλέον κατεργασία πρέπει να γίνει κατόπιν ολοκλήρωσης των διαδικασιών στο CNC-mill και τον τόρνο¹⁴⁵:
 - ↳ το εσωτερικό της προεξοχής όπου τοποθετούνται ο ηλεκτρικός σύνδεσμος [P/N J2] και ο στυπιοθλίπτης [P/N GIJ4] έχει επιφάνειες οι οποίες σχηματίζουν οξείες γωνίες (βλ. εικόνα Δ.2)
 - ↳ οι γωνίες αυτές καλό είναι να εξομαλυνθούν, για τη δημιουργία περισσότερου χώρου για τη διέλευση των καλωδίων από και προς το εσωτερικό του περιβλήματος
 - ↳ η κατεργασία αυτή μπορεί να γίνει με τη βοήθεια ενός μαχαιριού χειροτεχνίας και μιας μικρής λίμας, με προσοχή ώστε να μην αλλοιωθούν τα σπειρώματα στις οπές



Εικόνα Δ.2 - Οι γωνίες που σχηματίζονται στο εσωτερικό της προεξοχής όπου στηρίζονται ο ηλεκτρικός σύνδεσμος κι ο στυπιοθλίπτης, συνιστάται να εξομαλυνθούν για την δημιουργία περισσότερου χώρου για τα καλώδια που διέρχονται του σημείου.

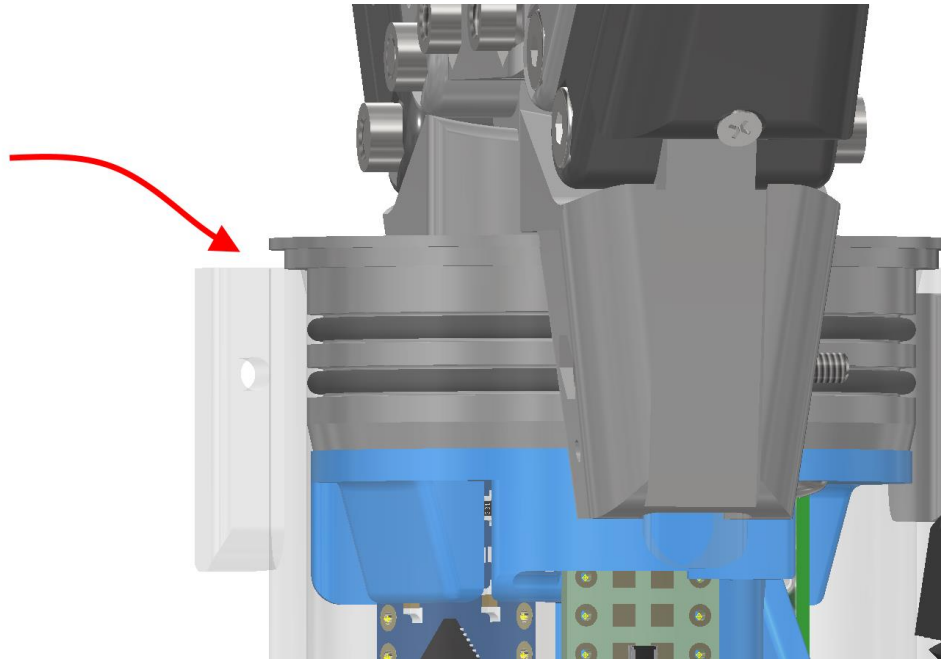
¹⁴⁵ Αν και δεν είναι απόλυτα απαραίτητη, καθιστά ωστόσο την συναρμολόγηση των καλωδίων ευκολότερη και ασφαλέστερη ως προς την πιθανότητα κοπής ή σχισίματος της μόνωσής τους. Στα περιβλήματα που παραδίδονται με τους μηχανισμούς η κατεργασία έχει ήδη γίνει.

- οι απαραίτητες ηλεκτρικές συνδέσεις πρέπει να έχουν γίνει σύμφωνα με τις οδηγίες που Παραρτήματος Β
- προτείνεται η εφαρμογή του ηλεκτρικού συνδέσμου [P/N J2] και ο στυπιοθλίπτης [P/N GIJ4] (με τις καλωδιώσεις τους) να γίνει πρώτη, χωρίς άλλα μέρη επάνω στο περίβλημα
- τόσο για το σύνδεσμο όσο και για το στυπιοθλίπτη πρέπει να χρησιμοποιηθεί o-ring, αλλά και ταινία teflon στη βάση τους, και να σφιχθούν με επαρκή ροπή στο περίβλημα ώστε να εξασφαλίζεται η στεγανότητα της σύνδεσης
- η υποενότητα (Dn) πρέπει να συνδεθεί στο άνω καπάκι (C) και η κοιλότητα του δεύτερου να γεμιστεί πλήρως με γράσο για θαλάσσιες εφαρμογές· με το ίδιο γράσο πρέπει να γεμιστούν οι κοιλότητες της τσιμούχας περιστροφής και να επαλειφθεί ο τραπεζοειδής κοχλίας και το περικόχλιό του, σαν λιπαντικό
- το σύνολο (C)/(D) πρέπει να τοποθετηθεί στο περίβλημα, ώστε η πλευρά με τη μικρότερη πυκνότητα καλωδίων να βρίσκεται στην πλευρά της προεξοχής του ηλεκτρικού συνδέσμου/στυπιοθλίπτη - όπου υπάρχει ήδη αυξημένος αριθμός καλωδίων
- συνίσταται όλα τα καλώδια να βγουν στην κάτω πλευρά του περιβλήματος πριν την πλήρη εισαγωγή των (C)/(D) στο περίβλημα· η ένωση των ηλεκτρικών συνδέσμων μπορεί να γίνει ευκολότερα έτσι, όπως και η μετέπειτα τακτοποίησή τους στον εναπομείναν χώρο
- πριν την τοποθέτηση των υπόλοιπων μερών, πρέπει να τοποθετηθεί το κάτω καπάκι με τον πνευματικό σύνδεσμο (Eb) και το περίβλημα να ελεγχθεί για τυχόν διαρροές με το μανόμετρο - εφόσον όλα είναι OK, μπορεί αν τοποθετηθεί το κανονικό καπάκι (Ea)
- προσοχή κατά την τοποθέτηση του κάτω καπακιού να μην πιέζεται ο σύνδεσμος USB Micro της πλακέτας Pro Micro, γιατί αυτό μπορεί να προκαλέσει την καταστροφή της όπως έχει αναφερθεί στο Παράρτημα Β - ένας σχετικός «συνωστισμός» των καλωδίων είναι αναμενόμενος!
- για την εφαρμογή των βιδών στις οπές στήριξης της βάσης για το βραχίονα (F) πρέπει να ασκηθεί ένα ποσό δύναμης, ώστε να ευθυγραμμιστούν με τις οπές στο περίβλημα
- τόσο για τη βάση του βραχίονα όσο και για τις βάσεις των δακτύλων, η τριβή μεταξύ των βιδών στήριξης και των πλαστικών μερών είναι επαρκής ώστε να μην ολισθαίνουν, οπότε η χρήση ή μη των περικόχλιων είναι στην ευχέρεια του χρήστη

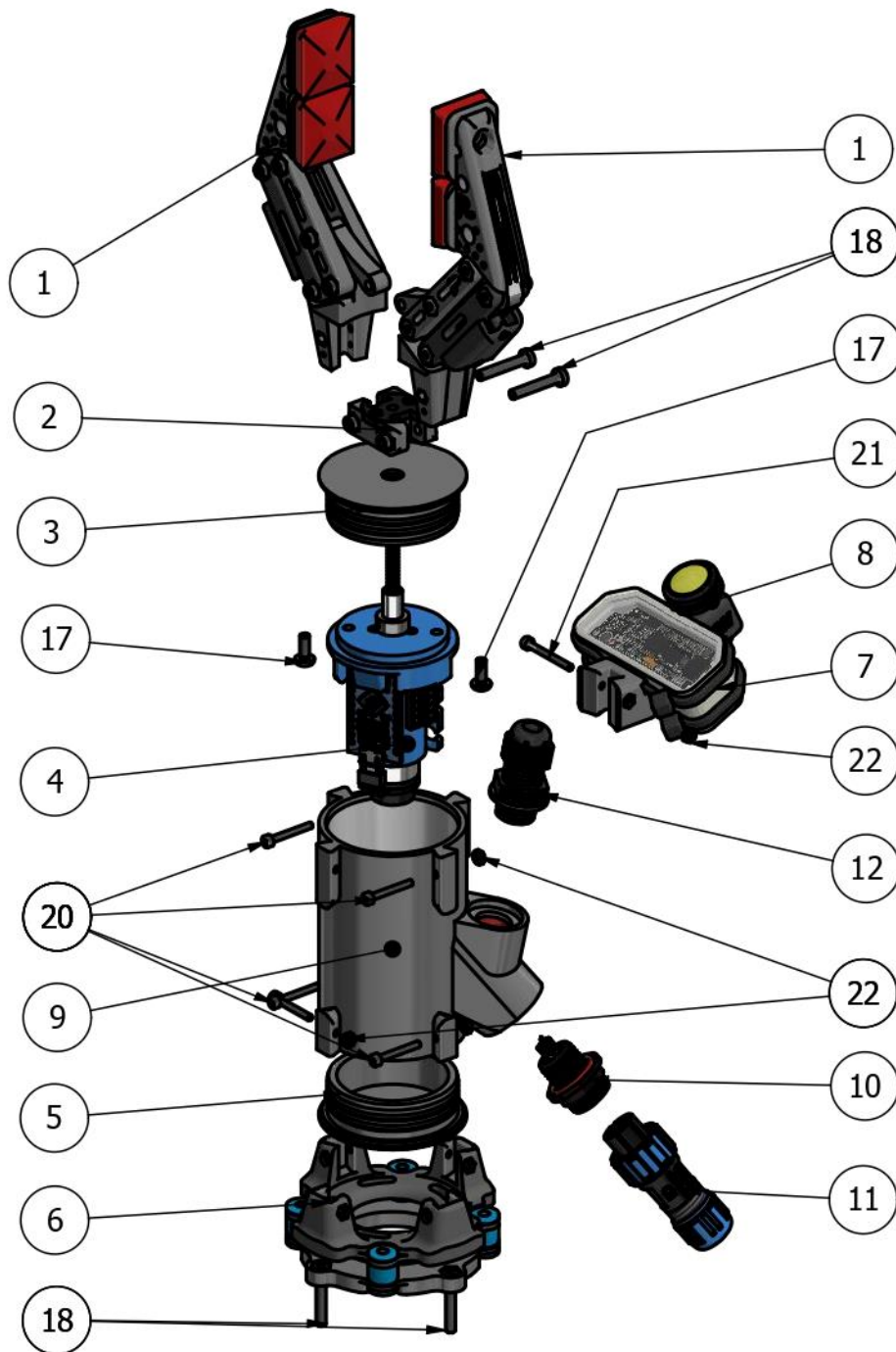
Ένα επιπλέον σημείο προσοχής αφορά στην αποσυναρμολόγηση των καπακιών από το περίβλημα:

Αν και ο σχεδιασμός τους περιλαμβάνει μικρή εσοχή (βλ. εικόνα Δ.3) για την εισαγωγή κάποιου εργαλείου που θα βοηθήσει να ανασηκωθούν, το πάχος του υπόλοιπου κομματιού στη χρήση αποδεικνύεται μικρό (με αποτέλεσμα να σπάει σχετικά εύκολα).


Τα καπάκια χρησιμοποιήθηκαν μεν, αλλά το σημείο χρίζει βελτίωσης σε επόμενες εκδόσεις. Για την αποσυναρμολόγησή τους λοιπόν συνίσταται η χρήση ενός μαχαιριού με σχετικά πλατιά λεπίδα (ή αντίστοιχου εργαλείου, αλλά όχι με κοφτερή ακμή), ανασηκώνοντάς τα σταδιακά και περιμετρικά, έως ότου να μπορούν να τραβηχτούν με το χέρι.



Εικόνα Δ.3 - Τα καπάκια φέρουν μικρό σκαλοπάτι, το οποίο -αν και δεν ήταν επιτυχές σε κανονικές συνθήκες - σχεδιάστηκε ώστε να διευκολύνει την αποσυναρμολόγησή τους από το περίβλημα. Διακρίνεται η εσοχή στο σημείο του βέλους, παρότι το καπάκι φαίνεται να εφάπτεται πλήρως στην επιφάνεια του περιβλήματος.



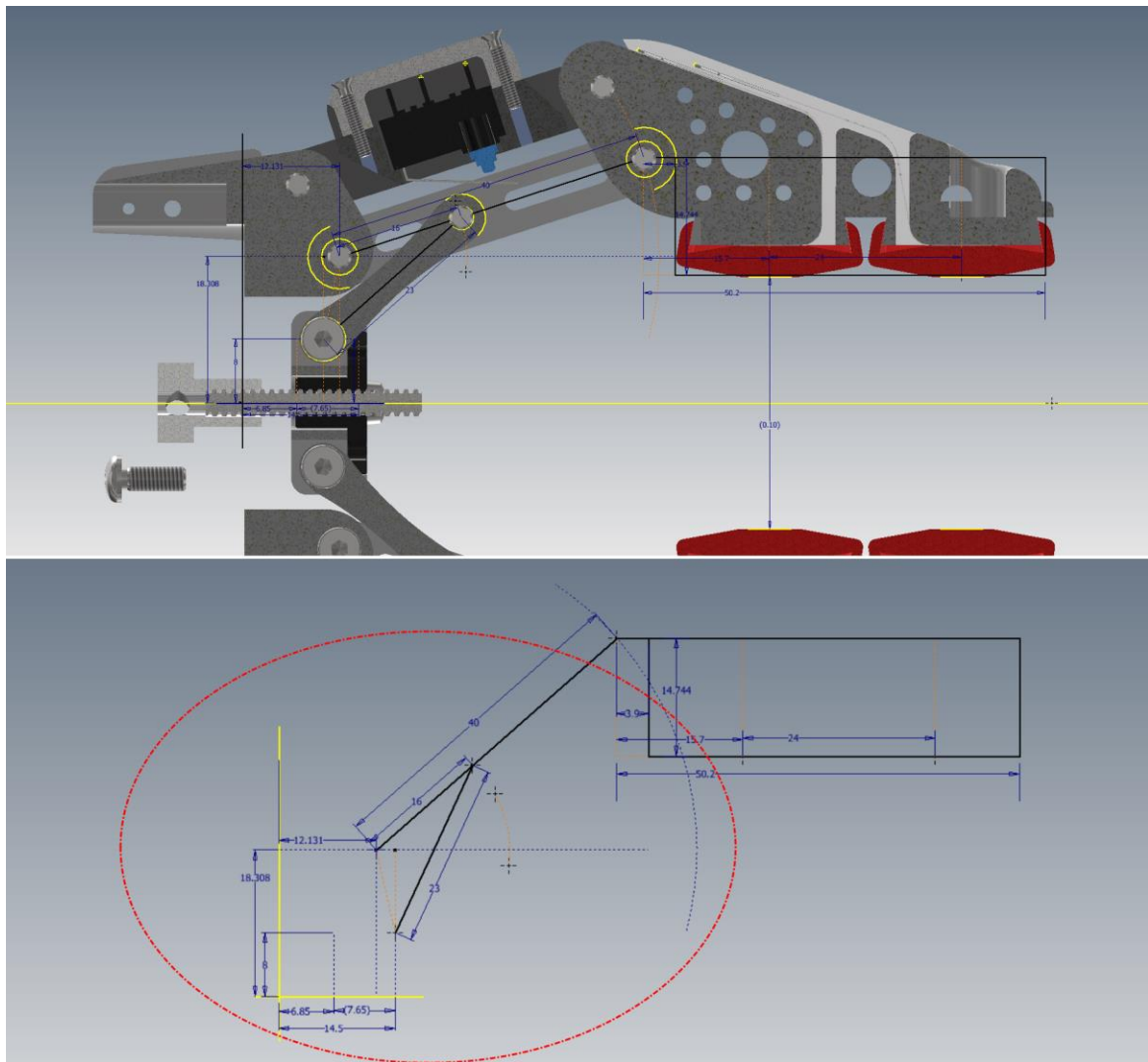
PARTS LIST				
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION	
1	2	(Aa)	Finger, 2-phalanx, straight	
2	1	(B)	Rod link, dual - Assembly	
3	1	(C)	Plug casing, top - Assembly	
4	1	(Da)	Motor casing (Escap 16) - Assembly	
5	1	(Ea)	Plug casing, bottom - Assembly	
6	1	(F)	Manipulator base - Assembly	
7	1	(Ga)	cam, Creative - Assembly	
8	1	(H)	LED lamp - Assembly	
9	1	J1	Main casing	
10	1	J2	Weipu connector, front mount, male - SP1312_P7	
11	1	J3	Weipu cable connector, female SP1310_S7IN	
12	1	GIJ4	Cable gland, MGB12S, M12x1.5	
17	2	AS 1427 - M3 x 8(4)	Pozidriv ISO metric machine screws	
18	6	DIN 7984 - M3 x 18	Cylinder Head Cap Screw	
19	2	ISO 10511 - M3	Hex Nut	
20	6	ISO 4762 - M2 x 16	Hexagon Socket Head Cap Screw	
21	1	ISO 4762 - M2 x 20	Hexagon Socket Head Cap Screw	
22	7	Nut GB/T 6170 M2	Hexagon nuts, style 1	

DESIGN ENGINEER Evangelos Menegas		TITLE		
MATERIAL	MASS APPROX. 320.7 g	UndEE		
MANUFACTURING METHOD		Control Systems Lab - NTUA Prof. Kostas J. Kyriakopoulos Group		
 June 2020	PROJECT UndEE	ASSEMBLY (J)	PART NO (J)	REV 1.0
	SIZE A4	SCALE 4 / 9	SHEET 3 OF 6	

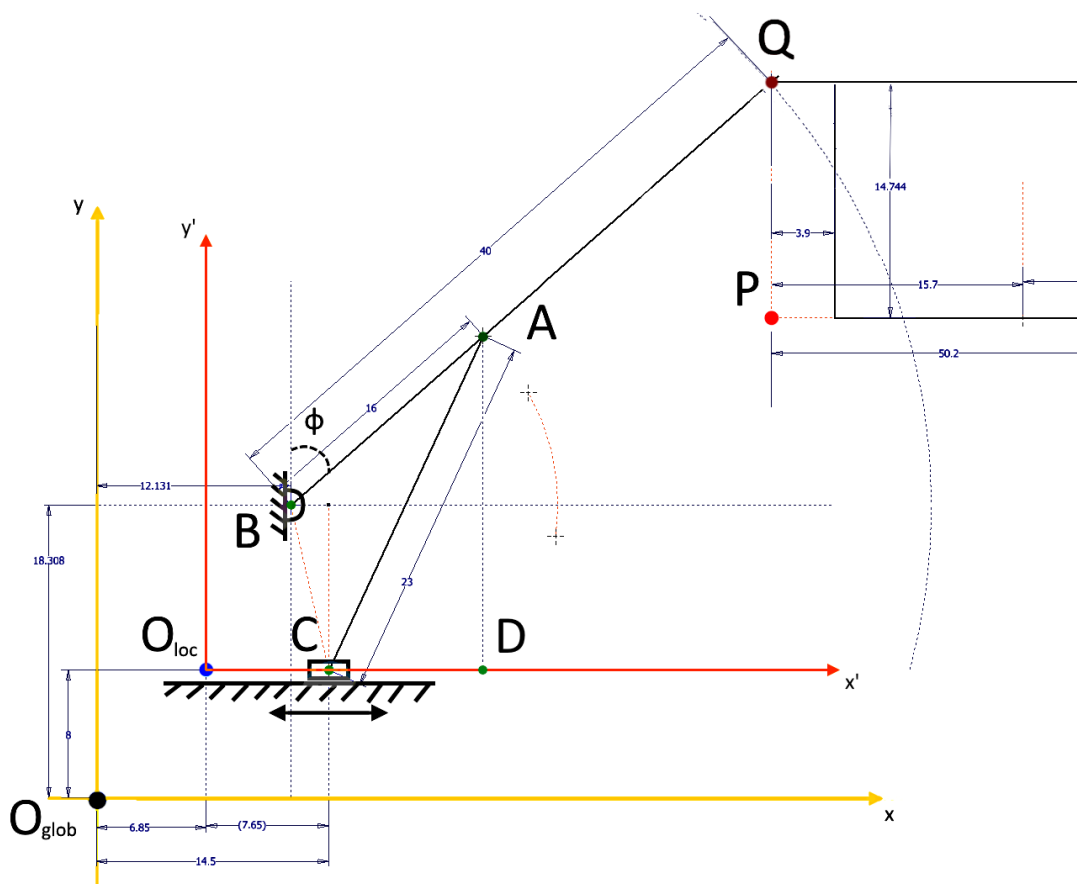
Παράρτημα Ε (συνάρτηση πλάτους ανοίγματος-γωνίας στροφής μοτέρ)

Θεωρώ χρήσιμο, ανάμεσα στο υλικό που παραδίδεται, να υπάρχει μια στοιχειώδης περιγραφή των κινηματικών στοιχείων του μηχανισμού.

Για την εξαγωγή μιας σχέσης μεταξύ της μετατόπισης του περικόχλιου και του πλάτους ανοίγματος των επιφανειών συγκράτησης, εξετάζονται τα ακόλουθα σχήματα, τα οποία αναπαριστούν το σύστημα μετάδοσης της κίνησης από τον κοχλία και το περικόχλιο στα δάκτυλα. Στην εικόνα Στ.1 φαίνεται το πως σχηματίζεται η γεωμετρία του συστήματος, ενώ η εικόνα Στ.2 εστιάζει στο σημείο ενδιαφέροντος.



Εικόνα Στ.1 - Γεωμετρική αντιστοίχιση των μερών του μηχανισμού που σχετίζονται με την κίνηση των δακτύλων. Ο μηχανισμός σε τομή (πάνω) και η γεωμετρία με σημειωμένες τις σημαντικές διαστάσεις, όπως λαμβάνονται από το μοντέλο (κάτω). Ο εξωτερικός σύνδεσμος παραλείπεται, καθώς δεν επηρεάζει τον υπολογισμό της ζητούμενης σχέσης. Με κόκκινο σημειώνεται το πεδίο που αναλύεται σε μεγέθυνση στην εικόνα Στ.2.



Εικόνα Στ.2 - Μεγέθυνση του πεδίου ενδιαφέροντος της εικόνας Στ.1. Σημειώνονται τα συστήματα συντεταγμένων, τα σημεία και οι διαστάσεις που θα χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση.

Σύμφωνα με την εικόνα Στ.2 ορίζω δύο συστήματα συντεταγμένων (σε μονάδες 10^{-3} m):

- το (γενικό) σύστημα $O_{glob}xy$, του οποίου ο x-άξονας ταυτίζεται με τον άξονα του κοχλίου και ο y-άξονας με την άνω επιφάνεια του πώματος στο πάνω μέρος του περιβλήματος του μηχανισμού
- το (τοπικό) σύστημα $O_{loc}x'y'$, του οποίου ο x-άξονας διέρχεται από το κέντρο της άρθρωσης μεταξύ της βάσης του περικόχλιου και του συνδέσμου-«διωστήρα» και ο y-άξονας με το σημείο απ' όπου η βάση είναι στην κατώτερη θέση (και τα δάκτυλα στην πλέον κλειστή θέση - οι επιφάνειες συγκράτησης εφάπτονται)

Από το γενικό στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων ισχύει ο μετασχηματισμός:

$$\begin{cases} x' = x - 6.85 \\ y' = y - 8 \end{cases}$$

Ορίζω επίσης τα εξής σημεία, βάσει του συστήματος $O_{glob}xy$ ¹⁴⁶:

- το σημείο A είναι στο κέντρο της άρθρωσης μεταξύ του συνδέσμου-«διωστήρα» και συνδέσμου των δακτύλων, με συντεταγμένες $(x'_A + 6.85, y'_A + 8)$ - μεταβλητό

¹⁴⁶ οι τιμές των αποστάσεων λαμβάνονται από το μοντέλο του μηχανισμού στο περιβάλλον CAD.

- το σημείο B είναι στο κέντρο της άρθρωσης μεταξύ του συνδέσμου των δακτύλων και της παράπλευρης βάσης τους, με συντεταγμένες (12.131, 18.308)
- το σημείο C είναι στο κέντρο της άρθρωσης μεταξύ του συνδέσμου-«διωστήρα» και της βάσης του περικόχλιου, με συντεταγμένες $(x'_C + 6.85, 8)$ - μεταβλητό- και τον περιορισμό $x'_C \in [0, 7.65]$ ¹⁴⁷
- το σημείο D είναι η προβολή του σημείου A στον x-άξονα του τοπικού συστήματος, με συντεταγμένες $(x'_D + 6.85, 8)$ - μεταβλητό
- το σημείο P είναι εφαιπτόμενο στην επιφάνεια συγκράτησης, με συντεταγμένες (x_P, y_P) - μεταβλητό
- το σημείο Q είναι στο κέντρο της άρθρωσης μεταξύ του συνδέσμου και του δακτύλου, με συντεταγμένες (x_Q, y_Q) - μεταβλητό

και τις εξής αποστάσεις :

- $|AC| = 23$
- $|AB| = 16$
- $|BQ| = 40$
- $|PQ| = 14.744$

Ορίζω τέλος τη γωνία φ μεταξύ του ευθύγραμμου τμήματος BA και του άξονα y' , με κορυφή το σημείο B. Σημειώνεται ότι σύμφωνα με τον περιορισμό για τη συνιστώσα x'_C , προκύπτει ότι η γωνία φ παίρνει, κατά προσέγγιση, τιμές στο διάστημα $[48.44, 95.12]^\circ$.

Το ζητούμενο εκφράζεται από την y -συνιστώσα του σημείου P στο γενικό σύστημα συντεταγμένων $O_{glob}xy$:

$$\text{πλάτος ανοίγματος δακτύλων} \stackrel{\text{def}}{=} S_{grip} = 2y_P$$

και η ανεξάρτητη μεταβλητή είναι η τιμή της (γραμμικής) μετατόπισης του συστήματος περικόχλιο-βάση, που εκφράζεται από την x -συνιστώσα του σημείου C στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων $O_{loc}xy$:

$$\text{μετατόπιση περικόχλιου} \stackrel{\text{def}}{=} l_{nut} = x'_C$$

Εργαζόμενος αρχικά στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων, εφαρμόζω το πυθαγόρειο θεώρημα στο ορθογώνιο τρίγωνο ACD. Θα καταλήξω σε μια συνάρτηση της συνιστώσας x'_C με τη γωνία φ . Επιλύοντας αυτή τη σχέση ως προς τη γωνία, θα μπορώ να υπολογίσω τις συντεταγμένες του σημείου A και συνεπακόλουθα του σημείου Q. Βάσει αυτών, το ζητούμενο θα προκύψει εύκολα με απλό μετασχηματισμό στο σημείο P, στο γενικό σύστημα συντεταγμένων.

$$\begin{aligned} |AC|^2 &= |AD|^2 + |CD|^2 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow 23^2 &= y'_A{}^2 + (x'_D - x'_C)^2 \\ \Leftrightarrow 23^2 &= (y'_{AB} + y'_B)^2 + (x'_{AB} + x'_A - l_{nut})^2 \\ \Leftrightarrow 23^2 &= (16\cos\varphi + 18.308 - 8)^2 + (12.131 - 6.85 + 16\sin\varphi - l_{nut})^2 \end{aligned}$$

¹⁴⁷ για την τιμή 0 οι επιφάνειες συγκράτησης εφάπτονται, όπως αναφέρθηκε, ενώ για την τιμή 7.65 βρίσκονται σε απόσταση 60 mm.

Η (πραγματική) λύση της τριγωνομετρικής εξίσωσης είναι:

$$\varphi(l_{nut}) = 2 \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{(c_1 l_{nut}^2 - c_2 l_{nut} + c_3)(-c_1 l_{nut}^2 + c_2 l_{nut} + c_4) - c_5 l_{nut} + c_6}}{-c_1 l_{nut}^2 + c_2 l_{nut} + c_7} \right],$$

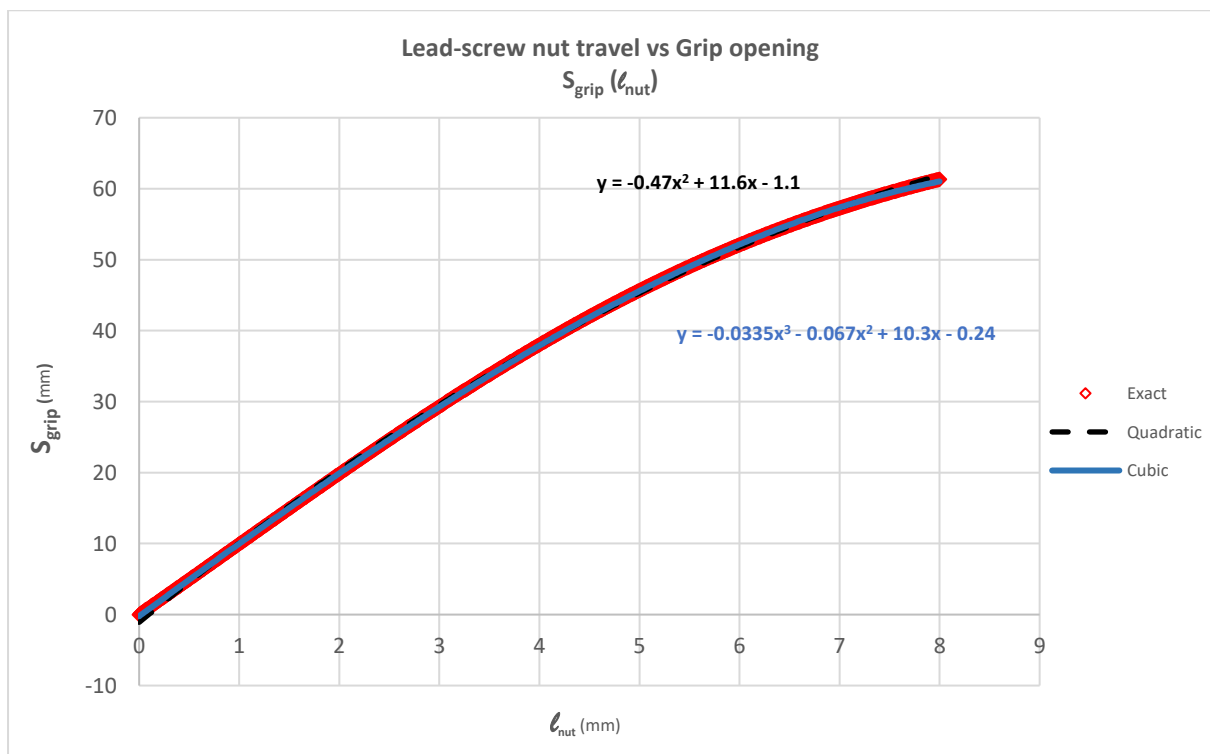
όπου:

$$\begin{cases} c_1 = 40000 \\ c_2 = 422480 \\ c_3 = 3405753 \\ c_4 = 55474247 \\ c_5 = 1280000 \\ c_6 = 6759680 \\ c_7 = 18748487 \end{cases}$$

Υπό τη γνώση της συνάρτησης $\varphi(l_{nut})$, το ζητούμενο προκύπτει ως:

$$S_{grip} = 2y_P = 2(y_Q - |PQ|) = 2(|BQ| \cos \varphi + 18.308 - 14.744)$$

Η γραφική αναπαράσταση της λύσης, για $l_{nut} \equiv x'_C \in [0, 8] \text{ mm}$ στο φαίνεται στο ακόλουθο γράφημα.



Γράφημα Στ.1 - Αναπαράσταση του πλάτους ανοίγματος των επιφανειών συγκράτησης συναρτήσει της μετατόπισης του συστήματος περικόχλιο-βάση στο διάστημα $[0, 8] \text{ mm}$. Σημειώνονται επίσης δύο πολυωνυμικές προσεγγίσεις της λύσης, οι οποίες έχουν σημαντικά απλούστερη μορφή, μία 2^{ου} και μία 3^{ου} βαθμού.

Παρατηρείται η μη γραμμική συμπεριφορά, ιδιαίτερα για τιμές μετατόπισης πάνω από 4 mm. Για τιμές μικρότερες από 4 mm, θα μπορούσε κανείς να πει ότι κάθε χιλιοστό μετατόπισης αντιστοιχεί σε δέκα χιλιοστά στο πλάτος ανοίγματος¹⁴⁸.

Δεδομένου ότι η εξίσωση που περιγράφει τη σχέση της γωνίας φ με τη μετατόπιση l_{nut} είναι μάλλον δύσχρηστη, συμπεριλαμβάνω δύο πολυωνυμικές προσεγγίσεις της ζητούμενης συνάρτησης $S_{grip} = S_{grip}(l_{nut})$, οι οποίες έχουν απλούστερη μορφή, μία 2^{ου} και μια 3^{ου} βαθμού. Η μεν πρώτη αποκλίνει ελαφρά στα ακραία διαστήματα, αλλά με σφάλμα που δεν ξεπερνάει το 1 mm. Η δεύτερη δε, πρακτικά περιγράφει τη λύση ακριβώς. Οι σχέσεις που περιγράφουν τις δύο προσεγγίσεις είναι:

$$y_{S_{grip}} = -0.47x^2 + 11.6x - 1.1 \quad (RMSE \ 0.341)$$

$$y_{S_{grip}} = -0.0335x^3 - 0.067x^2 + 10.3x - 0.24 \quad (RMSE \ 0.09)$$

Υπενθυμίζω ότι η ανάλυση του encoder στο μοτέρ είναι 128 παλμοί ανά περιστροφή, η οποία στο άκρο της κεφαλής μείωσης (όπου αναρτάται ο κοχλίας) πολλαπλασιάζεται με το αντίστροφο του λόγου μείωσης (1: 27), οπότε προκύπτει ίση με 3456 παλμούς ανά περιστροφή. Η ανάλυση αυτή μεταφράζεται σε μοίρες περιστροφής του κοχλίου:

$$360/3456 = 0.104^\circ/\text{παλμό}$$

και εφόσον το βήμα (lead) του ισούται με 2.4 mm, σε μονάδες μετατόπισης του συστήματος βάσης-περικόχλιο:

$$2.4/3456 \cong 0.000694 \text{ mm}/\text{παλμό}$$

ή στο λίγο πιο διαισθητικό μέγεθος:

$$1440 \text{ παλμοί}/\text{mm} \text{ (μετατόπισης περικόχλιου)}$$

Η συσχέτιση του πλάτους ανοίγματος με τον αριθμό των παλμών του encoder προκύπτει από την αντιστροφή της συνάρτησης $S_{grip}(l_{nut})$ και την προσθήκη του πολλαπλασιαστικού όρου 1440. Δυστυχώς, η συνάρτηση $p_{count}(S_{grip})$ που προκύπτει είναι και πάλι αρκετά δύσχρηστη και η προσέγγισή της με κάποια συνήθη μορφή δεν είναι εξίσου ακριβής με την προηγούμενη περίπτωση:

$$p_{count}(S_{grip}) = 1440 \frac{(125 S_{grip} + c_1) \left[8 \sqrt{(c_2 S_{grip}^2 + c_3 S_{grip} + c_4)} - 4 \sqrt{(c_5 S_{grip}^2 + c_6 S_{grip} + c_7) + c_8} \right]}{10^8 \cos \left[\frac{1}{2} \cos^{-1} \left(\frac{S_{grip}}{80} - \frac{891}{10^4} \right) \right]^2}$$

όπου:

¹⁴⁸ Ενδεικτικά: $S_{grip}(3.0) \cong 29.3 \text{ mm}$, $S_{grip}(3.5) \cong 33.8 \text{ mm}$, $S_{grip}(4.0) \cong 38 \text{ mm}$

$$\begin{cases} c_1 = 9109 \\ c_2 = -15625 \\ c_3 = 222750 \\ c_4 = 99206119 \\ c_5 = -62500 \\ c_6 = -5551500 \\ c_7 = 703285891 \\ c_8 = 26405 \end{cases}$$

και σε προσέγγιση με πολυωνυμική συνάρτηση 3^{ου} βαθμού ¹⁴⁹:

$$y_{p_{count}} = 0.0335x^3 - 1.865x^2 + 175.6x - 105 \quad (RMSE \ 48.9)$$

Ολοκληρώνοντας, θέλω να σημειώσω ότι οι προαναφερθείσες συναρτήσεις παρέχουν τη δυνατότητα υπολογισμών με αρκετά μεγάλη ακρίβεια. Ωστόσο οι ανοχές των κινούμενων μερών του συστήματος ¹⁵⁰ είναι σαφώς ανώτερες κι αυτό είναι κάτι που πρέπει να ληφθεί υπόψιν.

¹⁴⁹ Η προσέγγιση με πολυωνυμική 4^{ου} βαθμού δίνει τιμή *RMSE* 17.6 και η αντίστοιχη 5^{ου} βαθμού *RMSE* 6.4.

¹⁵⁰ από το backlash της κεφαλής μείωσης και του συστήματος κοχλία-περικόχλιο, έως τις ανοχές των αρθρώσεων και τη φθορά με τους κύκλους λειτουργίας.

Παράρτημα Στ (ενδεικτικό κοστολόγιο)

Στο παράρτημα αυτό συντάσσεται μια λίστα όλων των εξαρτημάτων ενός συστήματος τελικού στοιχείου δράσης μαζί με το κόστος τους.

- ⇒ Κάποια από τα στοιχεία αγοράστηκαν στο γενικό πλαίσιο κατασκευής των μηχανισμών (αναλώσιμα, κοπτικά κ.α.), οπότε το κόστος τους επιμερίζεται στα τρία αντίτυπα (σημειώνεται το 1/3 του κόστους δηλαδή).
- ⇒ Το κόστος των μερών που κατασκευάζονται στον 3D-printer και το CNC-mill αφορά μόνο στο κόστος του χρησιμοποιούμενου νήματος (σύμφωνα με το εκτιμώμενο καταναλισκόμενο μήκος, κατά το πρόγραμμα Ultimaker Cura, εκδ. 4.6) και του τεμαχίου πλαστικού που κατεργάζεται αντίστοιχα.
- ⇒ Πρέπει να αναφερθεί ότι οι συνδυασμοί επενεργητών (μοτέρ/κεφαλή μείωσης/encoder) αγοράστηκαν μεταχειρισμένοι και η τιμή που δηλώνεται είναι υποπολλαπλάσια του κόστους αγοράς τους καινούριοι.
- ⇒ Επίσης, τα περισσότερα ηλεκτρονικά αγοράστηκαν από ηλεκτρονικά καταστήματα στο εξωτερικό, όπου οι τιμές είναι συχνά έως και 50% χαμηλότερες - οπότε η τιμή δεν αντικατοπτρίζει το κόστος κτήσης από εγχώρια καταστήματα.
- ⇒ Τέλος, ορισμένα στοιχεία, όπως οι επενεργητές, ο τραπεζοειδής κοχλίας και το περικόχλιό του, τα ένθετα σπειρώματα και κάποια από τα κοπτικά και τα εξαρτήματα του CNC-mill, αγοράστηκαν επίσης από ηλεκτρονικά καταστήματα στο εξωτερικό, καθώς δεν υπήρχαν καν διαθέσιμα στην Ελλάδα. Αυτή η πρακτική είναι προβληματική μεν, προτιμήθηκε δε από τη επίτευξη (σημαντικά) υποδεέστερων επιδόσεων και αποτελεσμάτων.

Το συνολικό κόστος για ένα αντίτυπο του στοιχείου δράσης, με όλα τα παρελκόμενα, είναι περίπου 135€.

Αν αφαιρεθεί το κόστος των κοπτικών, των καλωδίων και ορισμένων υλικών, που αγοράζονται εφάπαξ, το κόστος μειώνεται περίπου στο ποσό των 100€.

Ακολουθεί ο πίνακας με το κοστολόγιο των μερών (εκτείνεται σε τρεις σελίδες).

Ενότητα	#	Εξάρτημα	Σημειώσεις	Τεμάχια	Κόστος (€)
A	A1	Finger, 2-phalanx, straight	[3D-printed]*	2	0.60
	A2	Finger base	[3D-printed]*	2	0.30
	A3	Link, inner	[3D-printed]*	4	0.24
	A4	Link, outer, w/ limit switch	[3D-printed]*	2	0.24
	A5	Link outer, cover	[3D-printed]*	2	0.06
	A6	Force-sensitive resistor, DF9-40	-	4	12.00
	A7	Limit switch, Omron D2HW-FL291D-A159-AQ1	-	1	3.00
	A8	Finger skin	[RTV silicon-cast]	4	0.40
	A9	Rod	[3D-printed]*	2	0.06
	A10	Finger, 2-phalanx, concave	[3D-printed]*	2	0.90
	A11a	Finger, 2-phalanx, hinged - lower	[3D-printed]*	2	0.70
	A11b	Finger, 2-phalanx, hinged - upper	[3D-printed]*	2	0.40
A11c	Torsion spring (finger, hinged)	-	2	0.00	
A12	Finger, 1-phalanx, flexible (Finray)	[3D-printed]*	2	0.70	
B	B1	Rod link, dual	[3D-printed]*	1	0.10
	B2	Trapezoidal nut, TR3.5x2.4mm	-	1	0.60
C	C1	Plug, casing, top	[CNC-machined]**	1	0.75
C/E	CE2	O-ring 37x1.5, NBR	-	4	0.88
C	C3	Radial shaft seal, 6x15x4, NBR WA	[CNC-machined]**	1	1.53
D	D1	Motor casing (Escap 16)	[3D-printed]*	1	0.45
	D2	DC motor, Portescap 16G88-214E, B16 Gearhead 27:1, 8V, 5W	-	1	12.00
	D2	DC motor, Maxon 200875, Gearhead 128:1, 9V 2W	-	(1)	10.00
	D3	Arduino Pro Micro (ATmega 32U4)	-	1	3.00
	D4	DRV8801, Single brushed DC motor driver carrier	-	1	6.70
	D5	LSM6DS3, 6DOF IMU, breakout board	-	1	1.90
	D6	R-divider board (+ 4x10kΩ resistors)	-	1	0.20
	D7	Capacitor, 330uF-25V, Aluminium, High-ESR, SMD	-	2	0.20
	D8	Shaft coupler, d6 x D10 x L15	-	1	0.90
	D9	Lead screw, TR3.5x2.4, L27mm	-	1	0.70
E	D10	Motor casing (Maxon 16)	[3D-printed]*	(1)	0.45
	E1	Plug casing, bottom	[CNC-machined]**	1	0.75
	E1	Plug casing, bottom, w/ fitting	[CNC-machined]**, 1/3****	(1)	0.25
F	E3	M-5HL-6 Hose Elbow, Mini Pneumatic Fitting	1/3****	1	0.23
	F1	Manipulator mount, casing	[3D-printed]*	1	0.50
	F2	Manipulator base, gumball	[3D-printed]*	1	0.30

	F3	Gumball, 6x9x13 (anti-vibration damping rubber)	-	4	0.64
	G1	Creative LiveCam Sync HD720p, PCB	-	1	15.00
	G1	Hercules Dualpix HD720p Emotion	-	(1)	15.00
	G2	cam Creative, inner base	[3D-printed]*	1	0.20
G	G3	cam Creative, pipe casing	-	1	0.00
	GIJ4	Cable gland, MGB12S, M12x1.5	-	8	4.00
	G5	cam Creative, upper casing cap	-	1	0.00
	G6	cam Creative, lower casing cap	-	1	0.00
	G7	cam mounting base, 30deg	[3D-printed]*	1	0.15
G	G8	Cable tie, 3.5x200mm	-	2	0.00
	H1	LED lamp, 9W-12V, "eagle-eye"	-	1	0.70
H	H2	Base, LED lamp	[3D-printed]*	1	0.08
	I1	Sliding sleeve, PP 50, Valsir	-	1	1.10
	I2	Pipe plug, PP 50, Valsir	-	2	1.00
	I3	Lip seal ring, DN50 BL-581, MOL	-	2	0.00
I	I5	USB active extention PCB	-	2	4.00
	J1	Main casing	[CNC-machined]**	1	9.00
	J2	Weipu connector, front mount, male - SP1312_P7	-	1	3.00
	J3	Weipu cable connector, female SP1310_S7IN	-	1	3.00
A		Βίδα M1.6 x 10	ανοξειδωτο ατσάλι	4	
D		Βίδα M2 x 6	ανοξειδωτο ατσάλι	2	
J		Βίδα M2 x 16	ανοξειδωτο ατσάλι	6	
J		Βίδα M2 x 20	ανοξειδωτο ατσάλι	1	
J		Παξιμάδι M2, ασφαλείας	ανοξειδωτο ατσάλι	7	
J		Βίδα M3 x 8	ανοξειδωτο ατσάλι	2	3.50
A		Βίδα M3 x 14	ανοξειδωτο ατσάλι	4	
A		Βίδα M3 x 16	ανοξειδωτο ατσάλι	2	
A/J		Βίδα M3 x 18	ανοξειδωτο ατσάλι	10	
A/J		Παξιμάδι M3, ασφαλείας	ανοξειδωτο ατσάλι	11	
B		Βίδα 2.0 x 10, αυτοκοχλιούμενη, φρεζάτη	ανοξειδωτο ατσάλι	2	
C		Ένθετο σπείρωμα M3 x 6	-	2	0.10
D		Σύνδεσμοι PicoBlade_M+F_2P	-	2	0.20
D		Σύνδεσμοι PicoBlade_M+F_4P	-	2	0.30
D		Σύνδεσμοι PicoBlade_M+F_6P	-	1	0.40
D		Σύνδεσμος USB Micro 2.0, Male	-	1	0.00
D		Καλωδιωταινία, 10p, 1.25mm (1m)	-	1	0.50
J		Καλώδιο USB 2.0, type A, M-F (5m)	-	3	9.00
J		Καλώδιο 2 αγωγών, 0.50 (1m)	-	9	1.71
J		Καλώδιο 6+2 αγωγών, 0.22+0.50, γείωση, θωράκιση (1m)	-	5	2.55

	Cramolin PLASTIK, conformal coating, σπρέι (400mL)	1/3***	(1)	2.67
	Permatex Black Silicon RTV, φλαντζόκολλα (80mL)	1/3***	(1)	2.67
	Γράσο λιθίου, θαλάσσιων εφαρμογών	-	-	0.00
	Κοπτικά CNC-mill / ER11, ER20 collet-chuck / collets	1/3***	-	17.89
* κόστος νήματος ** κόστος τεμαχίου υλικού *** κόστος επιμεριζόμενο στα τρία αντίτυπα		ΣΥΝΟΛΟ		134.89

Παράρτημα Z (κατάλογος αρχείων)

Στο παράρτημα αυτό συντάσσεται ο κατάλογος των φακέλων/αρχείων που συνοδεύουν την εργασία.

Στην πλειοψηφία τους τα αρχεία που σχετίζονται με το σχεδιασμό και την ανάπτυξη του στοιχείου δράσης είναι σε μορφή ή μέγεθος που δεν είναι δυνατόν να ενσωματωθεί σε ένα απλό αρχείο κειμένου (π.χ. αρχεία CAD, βίντεο κ.λπ.). Μεγάλο μέρος αυτών των αρχείων (κυρίως αυτά που αφορούν σε τεχνικά σχέδια και διαγράμματα) περιλαμβάνεται στο κείμενο με τη μορφή εικόνων, με το μειονέκτημα ότι δεν είναι πλέον ανυσματικά αρχεία, με την αντίστοιχα απώλεια πληροφορίας.

Καθώς ήθελα να εντάξω όλα τα αρχεία, που κατά τη γνώμη μου είναι απαραίτητα στο δυνητικό χρήστη ή σε όποιον επιχειρήσει την περαιτέρω εξέλιξη του συστήματος, θα προσπαθήσω να κάνω λίγο ευκολότερη τη ζωή των αναγνωστών/χρηστών μέσω αυτού του καταλόγου.

Αναφορές σε τέτοια αρχεία γίνονται σε πολυάριθμα σημεία στο κείμενο της εργασίας, μέσω του φακέλου στον οποίο ανήκουν, με τη βοήθεια αγκυλών {...} - αφήνεται στο χρήστη ωστόσο να τα εντοπίσει επακριβώς.

Ενδεικτικά, ο μητρικός φάκελος {UndEE}, αποτελείται από επτά κύριους θυγατρικούς φακέλους, οι οποίοι φέρουν ονόματα αντίστοιχα του περιεχομένου τους:

- ↳ **{:\Thesis Report}** → το σύνολο των αρχείων που σχετίζεται με την αναφορά της διπλωματικής εργασίας, όπως πολυμέσα που ενσωματώνονται στο κείμενο, υπολογιστικά φύλλα, διαγράμματα κ.α.
- ↳ **{:\UndEE_analysis}** → ολιγάριθμα αρχεία που σχετίζονται με τη συνάρτηση του Παραρτήματος E και κάποιες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων
- ↳ **{:\UndEE_CAD}** → το σύνολο των αρχείων (3d-γεωμετρίες) των μερών του συστήματος (parts), χωρισμένα σε υποφακέλους ανά ενότητα (assembly), καθώς και των ενοτήτων
- ↳ **{:\UndEE_electrical}** → τα αρχεία που σχετίζονται με το ηλεκτρολογικό υλικό του συστήματος, όπως τεχνικά φυλλάδια και κυκλωματικά διαγράμματα
- ↳ **{:\UndEE_firmware}** → ο κώδικας που συντάσσει το λογισμικό ελέγχου και το λογισμικό που χρησιμοποιείται σε άλλες περιστάσεις (π.χ. στο υποκεφάλαιο 4.2), μαζί με τις εξωτερικές βιβλιοθήκες που χρησιμοποιούνται (AutoPID, SimpleCLI κ.λπ.)
- ↳ **{:\UndEE_manufacture}** → το σύνολο των αρχείων (κυρίως αρχεία G-code) που χρησιμοποιείται στην κατασκευή των μερών, χωρισμένο ανά μέθοδο κατασκευής (3D-printer/CNC-mill) και ανά ενότητα
- ↳ **{:\UndEE_user-manuals}** → τεχνικά σχέδια, διαγράμματα και βίντεο που σχετίζονται με τις διαστάσεις και τη συναρμολόγηση των μερών/ενοτήτων

Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] Bhandari, V B (2007), Design of Machine Elements, Tata McGraw-Hill, ISBN 978-0-07-061141-2
- [2] Shigley, Joseph E.; Mischke, Charles R.; Budynas, Richard Gordon (2003), Mechanical Engineering Design (7th ed.), McGraw Hill, ISBN 978-0-07-252036-1
- [3] Brevet US 2014/0077499 A1, Underwater electric rotating device having waterproofing structure and an underwater generator using the same
- [4] Interlink Electronics, FSR® Integration Guide
- [5] Sensitronics LLC, FSR 101 Force Sensing Resistor Theory and Applications, Rev. 1.01
- [6] Haugen, F. Comparing PI Tuning Methods in a Real Benchmark Temperature Control System. Modeling, Identification and Control, 2010b. 31:79–91.
[doi:10.4173/mic.2010.3.1](https://doi.org/10.4173/mic.2010.3.1).
- [7] Trelleborg Sealing Solutions, O-Rings and Back-up Ring, Edition December 2016