
ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ, ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ &
ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σχεδίαση, Κατασκευή και Έλεγχος Βιομημητικού Ρομποτικού
Βραχίονα με Χρήση Μαλακών Υλικών

Παπαδάκης Εμμανουήλ

Επιβλέπων: Δρ. Σφακιωτάκης Μιχαήλ

Επιβλέπων: Δρ. Τσακίρης Δημήτρης

Ηράκλειο Κρήτης
2020

HELLENIC MEDITERRANEAN UNIVERSITY
SCHOOL OF ENGINEERING

POSTGRADUATE PROGRAM
MASTER OF SCIENCE IN
ADVANCED MANUFACTURING SYSTEMS, AUTOMATION AND
ROBOTICS

MASTER THESIS

Design, Development and Control of a Soft Biomimetic Robot
Arm

Papadakis Emmanouil

Advisor: Dr. Sfakiotakis Michael

Advisor: Dr. Tsakiris Dimitris

Heraklion, Crete
2020

Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πραγματεύεται τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τον έλεγχο ενός βιομηχανικού ρομποτικού βραχίονα με χρήση μαλακών υλικών, ο οποίος κατασκευάστηκε στο εργαστήριο Υπολογιστικής Όρασης και Ρομποτικής του Ινστιτούτου Πληροφορικής (ΙΠ) του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας (ΙΤΕ) στα πλαίσια του διατμηματικού μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών « Προηγμένα Συστήματα Παραγωγής, Αυτοματισμού και Ρομποτικής » του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου.

Η χρήση μαλακών υλικών για την κατασκευή ρομποτικών διατάξεων είναι ένα ραγδαία αναπτυσσόμενο πεδίο το οποίο βρίσκει εφαρμογές σε πολλούς κλάδους της επιστήμης και όχι μόνο. Από τη βιομηχανία όπου χρησιμοποιούνται κυρίως ως αρπάγες για την επεξεργασία ευαίσθητων αντικειμένων, μέχρι την ιατρική όπου συναντάμε λαπαροσκοπικά εργαλεία από μαλακά υλικά τα οποία έχουν το πλεονέκτημα να μην τραυματίζουν τους μαλακούς ιστούς του ασθενή κατά την επέμβαση. Τα πλεονεκτήματα των μαλακών υλικών είναι πολλά, όπως η ιδιότητά τους να παραμορφώνονται έτσι ώστε να μην προκαλούν αθέμιτες βλάβες σε ευαίσθητα αντικείμενα τα οποία μεταχειρίζονται, καθώς και η δυνατότητά τους να πραγματοποιούν περίπλοκες κινήσεις μέσω του κατάλληλου σχεδιασμού τους. Στην εργασία αυτή μελετήθηκε και αναπτύχθηκε ένας βραχίονας από μαλακά υλικά ο οποίος είναι εμπνευσμένος από τα πλοκάμια του χταποδιού. Ειδικότερα, αναλύονται η μεθοδολογία σχεδιασμού και η μέθοδος κατασκευής του, ο σχεδιασμός ελέγχου του βραχίονα, και τέλος αποτελέσματα από την πειραματική διερεύνησή του. Ο, πνευματικής οδήγησης, βραχίονας είναι κατασκευασμένος από σιλικόνη χαμηλής σκληρότητας, και περιλαμβάνει θαλάμους οι οποίοι προσομοιώνουν λειτουργικά το μυϊκό σύστημα του πλοκαμιού των χταποδιών. Για τον έλεγχο της τροφοδοσίας πεπιεσμένου αέρα στο σύστημα έχει κατασκευαστεί μονάδα οδήγησης με σωληνοειδείς βαλβίδες για την εισαγωγή, εξαγωγή και συγκράτηση του πεπιεσμένου αέρα στους θαλάμους, καθώς και έναν μικροελεγκτή για τον έλεγχο των βαλβίδων. Ο έλεγχος του συστήματος γίνεται μέσω κατάλληλου λογισμικού που τρέχει σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και περιλαμβάνει γραφικό περιβάλλον που διευκολύνει τον προγραμματισμό των εκτελούμενων κινήσεων.

Abstract

In this master thesis, we examine the design, fabrication and control of a soft bio-mimetic robotic arm, which was manufactured in the Computer Vision and Robotics Laboratory (CVRL) of Institute of Computer Science (ICS) of the Foundation for Research and Technology – Hellas (FORTH).

The field of soft robotics is rapidly expanding, as it has variant applications in many different fields such as in industry, where soft materials are used to produce suction cups able to adapt their shape in order to have the optimal contact with the materials they sort, and even in the field of medicine, where soft materials are used to manufacture soft laparoscopic tools that lower the risk of accidentally fracturing soft tissue during a laparoscopic surgery. The benefits of soft materials are plenty, such as their ability to deform, in order not to damage fragile objects that they come in contact with, as well as to perform complex geometries based on their design. In this thesis we will be focusing in studying a soft bio-mimetic robotic arm inspired by the octopus's arm. The methodology of the design will be analyzed as well as the method of fabrication and control. Finally, we will summarize the results of experiments using the robotic arm, to conclude the capabilities of the system.

Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή.....	7
1.1.	Κίνητρα.....	7
1.2.	Στόχοι	8
1.3.	Επισκόπηση μεταπτυχιακής εργασίας.....	8
2.	Υπάρχουσες Τεχνολογίες.....	10
2.1.	Εισαγωγή.....	10
2.2.	Ρομποτικά συστήματα με χρήση μαλακών υλικών.....	10
2.2.1.	Μαλακά ρομποτικά συστήματα κινούμενα από τένοντες.....	11
2.2.2.	Μαλακά ρομποτικά συστήματα κινούμενα από κράματα μνήμης σχήματος..	12
2.2.3.	Πνευματικά μαλακά ρομποτικά συστήματα.....	14
2.2.4.	Παθητικά μαλακά ρομποτικά συστήματα.....	16
2.3.	Βιομηχανικός ρομποτικός βραχίονας.....	18
3.	Σχεδιασμός και Κατασκευή Ρομποτικού Βραχίονα Μαλακών Υλικών	19
3.1.	Εισαγωγή.....	19
3.2.	Σχεδιασμός βιομηχανικού ρομποτικού βραχίονα.....	19
3.3.	Κατασκευή καλουπιών βιομηχανικού ρομποτικού βραχίονα	25
3.4.	Κατασκευή βιομηχανικού ρομποτικού βραχίονα	26
4.	Σχεδιασμός και Κατασκευή Μονάδας Οδήγησης Βιομηχανικού Ρομποτικού Βραχίονα	30
4.1.	Εισαγωγή.....	30
4.2.	Εξαρτήματα μονάδας οδήγησης.....	30
4.2.1.	Σωληνοειδή.....	31
4.2.2.	Μικροελεγκτής.....	33
4.2.3.	Πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (PCB).....	34
4.3.	Σχεδιασμός μονάδας οδήγησης.....	37
4.4.	Κατασκευή μονάδας οδήγησης	40

5.	Έλεγχος Βιομημητικού Ρομποτικού Βραχίονα	44
5.1.	Εισαγωγή.....	44
5.2.	Μέθοδος λειτουργίας	44
5.3.	Λειτουργικό σύστημα βιομημητικού ρομποτικού βραχίονα	47
5.3.1.	Περιβάλλον διεπαφής χρήστη.....	47
5.3.2.	Μηχανική όραση.....	54
5.3.3.	Ελεγκτές	Error! Bookmark not defined.
6.	Δυνατότητες Βιομημητικού Ρομποτικού Βραχίονα	58
6.1.	Εισαγωγή.....	58
6.2.	Πειράματα.....	58
6.3.	Δυνατότητες.....	67
7.	Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα	69
7.1.	Εισαγωγή.....	69
7.2.	Ανασκόπηση και συμπεράσματα μεταπτυχιακής εργασίας	69
7.3.	Μελλοντική έρευνα.....	70
	Αναφορές.....	72
	Παράρτημα Α : Κατασκευή Πλακέτας Τυπωμένου Κυκλώματος (PCB)	74
	Παράρτημα Β :Κώδικας Λογισμικού Οδήγησης Βιομημητικού Ρομποτικού Βραχίονα.....	78
	Παράρτημα Γ: Κώδικας Λογισμικού Μονάδας Οδήγησης Βιομημητικού Ρομποτικού Βραχίονα	109

Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 1 ISR – Softhand των Mahmoud Tavakoli et.al.....	11
Εικόνα 2 Tendon-Driven continuum robot των Shineng Geng et al.....	12
Εικόνα 3 Inchbot από τους Barry A. Trimmer et.al.	13
Εικόνα 4 Μαλακός ρομποτικός βραχίονας των Cecilia Laschi et.al.	13
Εικόνα 5.....	14
Εικόνα 6 Εξωσκελετικός νάρθηκας με χρήση μαλακών υλικών των Παναγιώτης Πολυγερινός et.al	15
Εικόνα 7 Μαλακό ρομποτικό σύστημα με δυνατότητα πολλών βηματισμών των Robert F. Shepherd et.al.....	15
Εικόνα 8 STIFF-FLOP των Mattei Cianchetti et.al.	16
Εικόνα 9 Εσωτερική διάταξη θαλάμων STIFF-FLOP	16
Εικόνα 10 Σύστημα με κράματα μνήμης σχήματος των Μιχάλη Σφακιωτάκη et.al [9].	17
Εικόνα 11 Το βιομιμητικό ρομποτικό χταπόδι που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο CVRL του Ινστιτούτου Έρευνας και Τεχνολογίας. [10]	17
Εικόνα 12 Ο βιομιμητικός ρομποτικός βραχίονας μαλακών υλικών που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.....	18
Εικόνα 13 Μυϊκό σύστημα πλοκαμιού.....	20
Εικόνα 14 Τμήμα παράλληλου μυϊκού συστήματος.....	21
Εικόνα 15 Κατά μήκος μυϊκό σύστημα.....	22
Εικόνα 16 Δακτύλιοι συγκράτησης και καθοδήγησης μυϊκού συστήματος.....	22
Εικόνα 17 Ελικοειδές μυϊκό σύστημα.....	23
Εικόνα 18 Δακτύλιοι συγκράτησης και καθοδήγησης ελικοειδούς μυϊκού συστήματος	23
Εικόνα 19 Βάση συγκράτησης βιομιμητικού ρομποτικού βραχίονα.....	24
Εικόνα 20 Πειραματική διάταξη βιομιμητικού ρομποτικού βραχίονα.....	24
Εικόνα 21 Καλούπια χύτευσης παράλληλου μυϊκού συστήματος και σύνδεσης τμημάτων. 25	
Εικόνα 22 Καλούπια χύτευσης ελικοειδούς μυϊκού συστήματος.....	26
Εικόνα 23 Τμήματα παράλληλου μυϊκού συστήματος.....	27
Εικόνα 24 Τοποθέτηση σωλήνων.....	27

Εικόνα 25 Συγκράτηση σωλήνων.....	28
Εικόνα 26 Ολοκληρωμένος βραχίονας με παράλληλο μυϊκό σύστημα.....	28
Εικόνα 27 Ελικοειδές μυϊκό σύστημα.	28
Εικόνα 28 Το τελικό πρωτότυπο του βιομιμητικού ρομποτικού βραχίονα, τοποθετημένο στη βάση έδρασης του.	29
Εικόνα 29 Τρίοδη σωληνοειδής βαλβίδα αέρος.	31
Εικόνα 30 Συνδεσμολογία σωληνοειδών, λειτουργία εισόδου αέρα.....	32
Εικόνα 31 Συνδεσμολογία σωληνοειδών, λειτουργία συγκράτησης αέρα.	32
Εικόνα 32 Συνδεσμολογία σωληνοειδών, λειτουργία εξόδου αέρα.	33
Εικόνα 33 Teensy3.6	33
Εικόνα 34 PWM σήμα ελέγχου i) 80% duty cycle ii) 50% duty cycle iii) 10% duty cycle.....	34
Εικόνα 35 Κύκλωμα ελέγχου σωληνοειδούς βαλβίδας αέρος.	35
Εικόνα 36 Σχεδιάγραμμα τυπωμένου κυκλώματος.	35
Εικόνα 37 Κάτω πλευρά πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος.	36
Εικόνα 38 Πάνω πλευρά πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος.	37
Εικόνα 39 Συστοιχία σωληνοειδών.	38
Εικόνα 40 Συναρμολόγηση σωληνοειδών στη βάση της μονάδας οδήγησης.....	38
Εικόνα 41 Τμήμα πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος και μικροελεγκτή.....	39
Εικόνα 42 Εξωτερικά τοιχώματα μονάδας οδήγησης.	40
Εικόνα 43 Συναρμολογημένη μονάδα οδήγησης βιομιμητικού ρομποτικού βραχίονα.	40
Εικόνα 44 Εγκατεστημένες σωληνοειδείς βαλβίδες.	41
Εικόνα 45 Εμπρόσθια όψη μονάδας οδήγησης.	41
Εικόνα 46 Οπίσθια όψη μονάδας οδήγησης.....	42
Εικόνα 47 Πλάγια όψη μονάδας οδήγησης.	42
Εικόνα 48 Ολοκληρωμένη κατασκευή μονάδας οδήγησης.	43
Εικόνα 49 Αρίθμηση κατά μήκος μυϊκού συστήματος.....	46
Εικόνα 50 Σύστημα συντεταγμένων.	46
Εικόνα 51 Το κεντρικό παράθυρο του λογισμικού διεπαφής κατά την εκκίνηση.....	48
Εικόνα 52 Πεδίο γενικών πληροφοριών συστήματος.....	49
Εικόνα 53 Καρτέλα ρύθμισης επικοινωνίας.....	50
Εικόνα 54 Καρτέλα επίδειξης λειτουργίας (demo).	51

Εικόνα 55 Καρτέλα ελέγχου θαλάμων χωρίς χρήση ανάδρασης.....	51
Εικόνα 56 Καρτέλα ελέγχου κατά XYZ.	52
Εικόνα 57 Καρτέλα ελέγχου με χρήση ανάδρασης.	52
Εικόνα 58 Καρτέλα επιλογής τύπου ελεγκτή.	53
Εικόνα 59 καρτέλα ρυθμίσεων οπτικών μέσων.	54
Εικόνα 60 Εικόνα RGB πλοκαμιού.	55
Εικόνα 61 Φιλτραρισμένη binary εικόνα.....	55
Εικόνα 62 Τρισδιάστατη απεικόνιση εντοπισμένων σημείων.	56
Εικόνα 63 Αναλογικός ελεγκτής (P controller).	57
Εικόνα 64 Αναλογικός – διαφορικός ελεγκτής (PD controller).	57
Εικόνα 65 Πειραματική διάταξη βιομημητικού ρομποτικού βραχίονα - Aluris.	59
Εικόνα 66 Διάγραμμα Δύναμης – αριθμός παλμών για πίεση αέρα από 0,1 bar έως 0,5 bar στον Z άξονα του βραχίονα.	60
Εικόνα 67 Διάγραμμα ταχύτητας – πίεσης αέρα εισόδου.	61
Εικόνα 68 Διάγραμμα μετατόπισης – παλμών αέρα.	61
Εικόνα 69 Πειραματική διάταξη βιομημητικού ρομποτικού βραχίονα ελεγχου κλειστου βρογχου.	62
Εικόνα 70 Απόκριση συστήματος σε έλεγχο κλίσης για $Kp = 1,4,7,10,13$	63
Εικόνα 71 Απόκριση συστήματος σε έλεγχο κλίσης για $Kd = 1,3,5,7$ και $Kp = 1$	64
Εικόνα 72 α) Απόκριση συστήματος σε έλεγχο κλίσης για $Kd = 0,2$ και $Kp = 17$ β) Σήμα ελέγχου σωληνοειδών βαλβίδων.	65
Εικόνα 73 α) Απόκριση συστήματος σε έλεγχο θέσης για $Kp = 6$ β) Σήμα ελέγχου σωληνοειδών βαλβίδων.	66
Εικόνα 74 Χρονοδιάγραμμα (timelapse) επιμήκυνσης βραχίονα.....	67
Εικόνα 75 Χρονοδιάγραμμα (timelapse) κάμψης βραχίονα.	67
Εικόνα 76 Χρονοδιάγραμμα (timelapse) κυματοειδής κίνησης βραχίονα.	67
Εικόνα 77 Σχεδιάγραμμα πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος.	74
Εικόνα 78 εκτυπωμένο σχεδιάγραμμα πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος.	75
Εικόνα 79 Άνω όψη πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος.....	76
Εικόνα 80 Κάτω όψη πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος.....	77

1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα κίνητρα για την υλοποίηση της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας καθώς και οι στόχοι της.

1.1. Κίνητρα

Από την αρχή του ανθρωπίνου είδους, ο άνθρωπος αντλούσε έμπνευση από τη φύση και προσπαθούσε να μιμηθεί το περιβάλλον στο οποίο βρισκόταν με σκοπό να διευκολύνει τη ζωή του και πολλές φορές αυτό ήταν αναγκαίο για την επιβίωσή του. Στη σημερινή εποχή, ακόμα αντλούμε έμπνευση από τη φύση, προσπαθώντας να εκμεταλλευτούμε τα προτερήματά της και ,συνδυάζοντας τα με την ήδη κερκτημένη γνώση μας, να δημιουργήσουμε νέους μηχανισμούς οι οποίοι συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα της φύσης χωρίς τα μειονεκτήματά της.

Βασιζόμενοι στην έμπνευση που αντλούμε από τη φύση, στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία επιλέξαμε να μελετήσουμε την ιδιόμορφη φυσιολογία των χταποδιών τα οποία κατατάσσονται στα μαλάκια, τα οποία δεν διαθέτουν σκελετό. Πιο συγκεκριμένα, επικεντρωθήκαμε στη μελέτη των πλοκαμιών τους, τα οποία είναι μαλακά και ευέλικτα-χαρακτηριστικά τα οποία στον τομέα της ρομποτικής είναι επιθυμητά.

Ένας μαλακός βιομιμητικός βραχίονας εμπνευσμένος από τα χταπόδια μπορεί να βρει πολλές εφαρμογές σε διάφορους τομείς. Στον τομέα της ιατρικής μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μαλακό λαπαροσκοπικό εργαλείο, το οποίο λόγω της μικρής του σκληρότητας δεν

τραυματίζει τους μαλακούς ιστούς του ασθενή κατά την επέμβαση, σε αντίθεση με τα σημερινά λαπαροσκοπικά εργαλεία τα οποία είναι κατασκευασμένα από μεταλλικά εξαρτήματα και συνεπώς είναι σκληρά. Ένας ακόμα ενδιαφέρον τομέας στον οποίο βρίσκεται εφαρμογή ο εν λόγω βραχίονας είναι αυτός των βιομημητικών ρομποτικών συστημάτων. Παραδείγματος χάριν, σε ένα ρομποτικό χταπόδι ο βραχίονας αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να βελτιωθεί η ρεαλιστική μίμηση της κίνησής του καθώς και η απόδοση αυτής. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως μέσο για την αλληλεπίδραση του συστήματος με το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται.

1.2. Στόχοι

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός βιομημητικού ρομποτικού βραχίονα από μαλακά υλικά, καθώς και ο έλεγχος του.

Πιο αναλυτικά, θα μελετηθεί η μορφολογία του πλοκαμιού των χταποδιών καθώς και η μορφολογία του μυϊκού τους συστήματος. Στη συνέχεια, θα σχεδιαστεί και θα κατασκευαστεί ένας βιομημητικός ρομποτικός βραχίονας από μαλακά υλικά που θα μιμείται, στο εσωτερικό του, το μυϊκό σύστημα των χταποδιών με τη χρήση θαλάμων οι οποίοι ,με βάση τον έλεγχο της ποσότητας αέρα που θα εισάγεται εντός τους, θα μετατοπίζουν με τον επιθυμητό τρόπο τον βραχίονα. Πέραν του βραχίονα, είναι αναγκαία η σχεδίαση και κατασκευή μιας κατάλληλης μονάδας οδήγησης η οποία θα ευθύνεται για την ελεγχόμενη είσοδο και έξοδο του πεπιεσμένου αέρα εντός των θαλάμων του βραχίονα, καθώς και η υλοποίηση κατάλληλου λογισμικού για τη λειτουργία του συστήματος.

Τέλος, θα πραγματοποιηθούν πειράματα για την εξακρίβωση των δυνατοτήτων του βραχίονα, τόσο για την κίνηση όσο και για τις δυνάμεις που μπορεί να ασκήσει στο περιβάλλον του.

1.3. Επισκόπηση μεταπτυχιακής εργασίας

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία χωρίζεται σε επτά κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένου αυτού του κεφαλαίου το οποίο πρόκειται για το εισαγωγικό κεφάλαιο της εργασίας.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** παρατίθενται οι υπάρχουσες τεχνολογίες, γίνεται αναφορά σε ορισμένα παρόμοια συστήματα μαλακών ρομποτικών βραχιόνων που έχουν κατασκευαστεί,

παρατίθενται πληροφορίες των εν λόγω συστημάτων και επεξηγείται η τεχνολογία των ρομποτικών συστημάτων με χρήση μαλακών υλικών (soft robotics).

Στο **τρίτο κεφάλαιο** παρατίθεται ο σχεδιασμός και η κατασκευή του βιομιμητικού ρομποτικού βραχίονα από μαλακά υλικά, οι λόγοι με βάση τους οποίους επιλέχθηκε το τελικό σχέδιο του βραχίονα, οι δυνατότητες που παρέχει το εν λόγω σχέδιο, καθώς και η αναλυτική παρουσίαση της πορείας για την κατασκευή του πρωτοτύπου του βραχίονα.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** παρατίθεται ο σχεδιασμός και η κατασκευή της μονάδας οδήγησης για την υποστήριξη του μαλακού βιομιμητικού ρομποτικού βραχίονα, ο τρόπος με τον οποίο σχεδιάστηκε η μονάδα, τα πλεονεκτήματα που παρέχει ο εν λόγω σχεδιασμός, τα εξαρτήματα που στεγάζονται μέσα στη μονάδα καθώς και η πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (PCB) που υλοποιήθηκε για την υποστήριξη και λειτουργία του βραχίονα.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** παρατίθενται ο τρόπος λειτουργίας και οι δυνατότητες του μαλακού βιομιμητικού ρομποτικού βραχίονα και παρουσιάζεται το λογικό διάγραμμα λειτουργίας του και οι δυνατότητές του.

Στο **έκτο κεφάλαιο** παρατίθενται τα πειράματα τα οποία πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του συστήματος, βάσει των οποίων προσδιορίζονται και τα χαρακτηριστικά και οι ικανότητές του. Επίσης, παρουσιάζονται αποτελέσματα από τη χρήση διαφόρων τεχνικών ελέγχου, καθώς επίσης και ο τελικός ελεγκτής ο οποίος προέκυψε από την εν λόγω μελέτη.

Στο **έβδομο κεφάλαιο** παρατίθενται τα συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε στο τέλος της εν λόγω μεταπτυχιακής εργασίας μετά τη δοκιμή και χρήση του μαλακού βιομιμητικού ρομποτικού βραχίονα, καθώς και η δυνατότητα για τη μελλοντική έρευνα που μπορεί να πραγματοποιηθεί, βασιζόμενη στην εν λόγω μεταπτυχιακή εργασία.

2. Υπάρχουσες Τεχνολογίες

2.1. Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρέχεται μια, εισαγωγή στην τεχνολογία της ρομποτικής με χρήση μαλακών υλικών (soft robotics), παρουσιάζονται διάφορα υπάρχοντα ρομποτικά συστήματα από μαλακά υλικά και θεωρητικές εργασίες περί των πλοκαμιών του χταποδιού και τέλος παρουσιάζεται συνοπτικά ο βιομιμητικός ρομποτικός βραχίονας που κατασκευάστηκε στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

2.2. Ρομποτικά συστήματα με χρήση μαλακών υλικών

Ο κλάδος της ρομποτικής με χρήση μαλακών υλικών ασχολείται με την κατασκευή ρομποτικών συστημάτων από μαλακά υλικά όπως σιλικόνη, καουτσούκ, πολυουρεθάνη και άλλα. Ένα από τα χαρακτηριστικά των εν λόγω συστημάτων είναι η έλλειψη άκαμπτων στοιχείων, εμπνευσμένα κατά βάση από έμβιους οργανισμούς όπως τα μαλάκια.

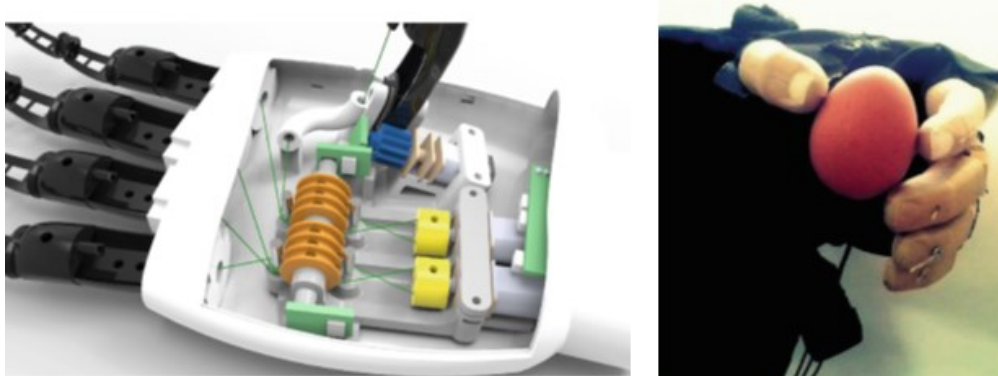
Για να επιτευχθεί η κίνηση των μαλακών υλικών χωρίς χρήση σκελετού, χρησιμοποιούνται τρεις βασικές μέθοδοι. Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιεί τεχνητούς τένοντες και διαχωρίζεται σε δυο επιμέρους κατηγορίες : στα συστήματα που κινούνται κατά τον εφελκυσμό των τενόντων και στα συστήματα που κινούνται κατά τον εφελκυσμό και την ώθησή τους. Η δεύτερη μέθοδος που βρίσκει εφαρμογή είναι η χρήση κραμάτων μνήμης σχήματος (s.m.a.), όπου τα κράματα χρησιμοποιούνται συνηθώς ως σπειρώματα τα οποία κατά την ενεργοποίησή τους συσπειρώνονται, μειώνοντας το μήκος τους, και εφελκύουν με τον τρόπο

αυτό ένα τμήμα του μαλακού συστήματος. Η τρίτη και πιο διαδεδομένη μέθοδος χρησιμοποιεί θαλάμους κατασκευασμένους από μαλακά υλικά στους οποίους ελέγχεται η πίεση του μέσου που χρησιμοποιείται για την αύξηση ή μείωση του μεγέθους του θαλάμου. Η εν λόγω μέθοδος διαχωρίζεται σε τρεις επιμέρους κατηγορίες : πνευματικά συστήματα, συστήματα κενού και υδραυλικά συστήματα.

2.2.1. Μαλακά ρομποτικά συστήματα κινούμενα από τένοντες

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα μαλακά ρομποτικά συστήματα τεχνητών τενόντων χρησιμοποιούν νήματα τα οποία είναι αγκιστρωμένα σε ένα σημείο του συστήματος και καθώς αυτά εφελκύνονται, παρασέρνουν το τμήμα στο οποίο είναι τοποθετημένα. Τα εν λόγω συστήματα βρίσκουν εφαρμογή σε πλειάδα συστημάτων όπως τεχνητά μέλη, εξωσκελετούς και χειρουργικά εργαλεία.

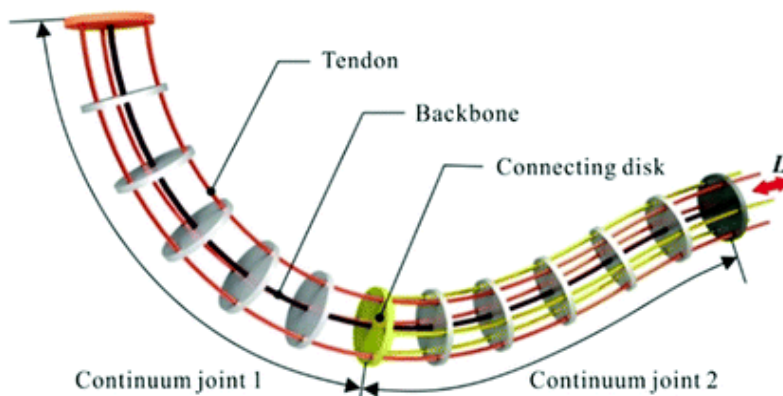
Ένα παράδειγμα υλοποίησης προσθετικού μέλους με χρήση της εν λόγω τεχνολογίας είναι το ISR – Softhand των Tavakoli et al. [1], το οποίο χρησιμοποιεί μαλακούς συνδέσμους ανάμεσα στις φάλαγγες των δακτύλων σε συνδυασμό με τεχνητούς τένοντες (Εικόνα 1) και μαλακή κάλυψη ως δέρμα. Το αποτέλεσμα των παραπάνω είναι ένα ρομποτικό προσθετικό χέρι το οποίο μπορεί να προσαρμοστεί στο αντικείμενο το οποίο καλείται να αρπάξει (Εικόνα 1), προσδίδοντας έτσι καλύτερη επαφή με το αντικείμενο και καλύτερη συγκράτηση.



Εικόνα 1 ISR – Softhand των Mahmoud Tavakoli et.al.

Άλλο ένα παράδειγμα της τεχνολογίας αυτής είναι η δουλειά των Geng et al. [2], όπου χρησιμοποιούν μια ελαστική σπονδυλική στήλη (backbone) σε συνδυασμό με τεχνητούς τένοντες (Tendons) κατασκευασμένους από κράμα NiTi. Καθώς εφελκύεται ο τεχνητός τένοντας, ο βραχίονας λυγίζει προς την πλευρά που βρίσκεται ο εν λόγω τένοντας, και με τη

χρήση των δίσκων που βρίσκονται τοποθετημένοι κατά μήκος των τμημάτων του, ο βραχίονας επιτυγχάνει την ομοιόμορφη κάμψη του (Εικόνα 2).



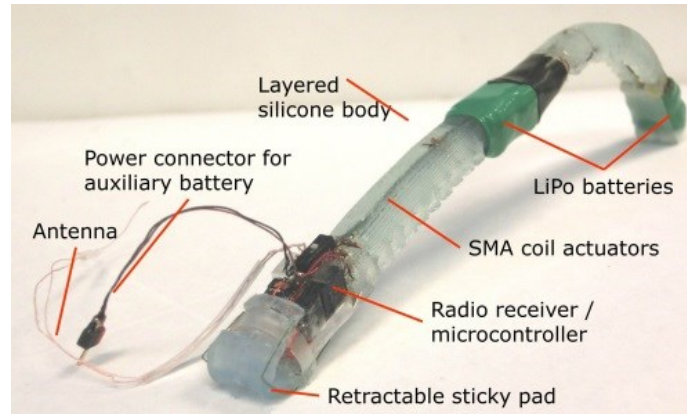
Εικόνα 2 Tendon-Driven continuum robot των Geng et. al. [2].

2.2.2. Μαλακά ρομποτικά συστήματα κινούμενα από κράματα μνήμης σχήματος

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει και ο τομέας των μαλακών ρομπότ τα οποία χρησιμοποιούν κράματα μνήμης σχήματος για την κίνηση τους. Τα κράματα μνήμης σχήματος είναι κράματα τα οποία μπορούν να παραμορφωθούν όταν είναι σε θερμοκρασία δωματίου αλλά επιστρέφουν στην μορφή στην οποία έχουν εκπαιδευτεί όταν θερμανθούν. Στην περίπτωση αυτή, τα κράματα εκπαιδεύονται με τέτοιο τρόπο ώστε όταν ενεργοποιούνται να εφελκύουν το σημείο στο οποίο είναι συγκρατημένα. Λόγω του μικρού μεγέθους των κραμάτων, οι κατασκευές που μπορούν να δημιουργηθούν είναι εφικτό να έχουν πολύ μικρό μέγεθος. Ένα μειονέκτημα που παρουσιάζει η τεχνολογία αυτή είναι η μεγάλη απαίτηση ενέργειας για την ενεργοποίηση των κραμάτων, καθώς για την επιστροφή τους στη μορφή που έχουν εκπαιδευτεί, πρέπει να αυξηθεί η θερμοκρασία τους και για την απενεργοποίηση τους απαιτείται η ψύξη τους.

Εξαιρετικά ενδιαφέροντα είναι η δουλειά των Trimmer et.al [3] οι οποίοι κατασκεύασαν το inchbot (Εικόνα 3), ένα ρομποτικό σύστημα εμπνευσμένο από την κάμπια το οποίο είναι κατασκευασμένο από σιλικόνη και χρησιμοποιεί κράματα μνήμης σχήματος σε μορφή ελατηρίου για την επίτευξη των κινήσεών του. Το εν λόγω σύστημα διαθέτει επιπλέον επαναφορτιζόμενες μπαταρίες LiPo, έναν μικροελεγκτή καθώς και έναν δέκτη για την ασύρματη λειτουργία του. Το ρομποτικό σύστημα Inchbot χωρίζεται σε δυο όμοια μέρη τα οποία είναι κατασκευασμένα από μαλακή σιλικόνη και διατρέχονται από σπείρες κραμάτων SMA. Κατά τη λειτουργία του, όταν το ένα τμήμα ενεργοποιείται, καθώς τα SMA εφελκύουν

το εκάστοτε τμήμα, τότε αυτό λυγίζει όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 3. Με τη συνδυασμένη κίνηση των δυο τμημάτων του ρομπότ επιτυγχάνεται η μετακίνησή του πάνω στην επιφάνεια που εδράζεται.



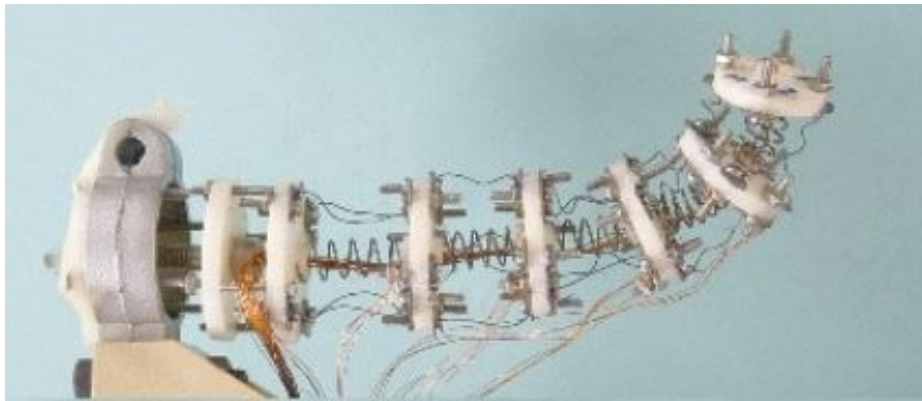
Εικόνα 3 Inchbot από τους Trimmer et.al. [3]

Ένα σύστημα εμπνευσμένο από τα χταπόδια είναι και ο μαλακός ρομποτικός βραχίονας των Laschi et.al [4], οι οποίοι κατασκεύασαν έναν βραχίονα ο οποίος χρησιμοποιεί συνδυαστικά κράματα μνήμης σχήματος και τεχνητούς τένοντες για την επίτευξη κινήσεων όμοιες με αυτές του πραγματικού χταποδιού. Οι τεχνητοί τένοντες χρησιμοποιούνται για την ελεγχόμενη διαμήκη κίνηση του βραχίονα, ενώ τα κράματα μνήμης σχήματος χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της εγκάρσιας κίνησης του βραχίονα. Με τον εν λόγω σχεδιασμό, ο βραχίονας (Εικόνα 4) που κατασκευάστηκε είναι ικανός να πραγματοποιήσει τις βασικές κινήσεις ενός πλοκαμιού όπως επιμήκυνση, συσπείρωση και κάμψη.



Εικόνα 4 Μαλακός ρομποτικός βραχίονας των Laschi et.al. [4]

Άλλο ένα ενδιαφέρον σύστημα είναι ο ρομποτικός βραχίονας που κατασκευάστηκε από τους Vanourakis et.al [5], ο οποίος χρησιμοποιεί άκαμπτους δίσκους ενωμένους στο κέντρο τους με ελατήριο το οποίο επιτρέπει στην κατασκευή να λυγίσει προς όλες τις κατευθύνσεις, και τέσσερα ελατήρια κατασκευασμένα από κράματα μνήμης σχήματος τα οποία χρησιμοποιούνται για την επίτευξη ελέγχου κάμψης του συστήματος. Οι δίσκοι έχουν μικρή απόσταση μεταξύ τους, 25mm, και έχουν τη δυνατότητα να ελέγχονται ξεχωριστά ο κάθε ένας.



Εικόνα 5

2.2.3. Πνευματικά μαλακά ρομποτικά συστήματα

Ο τομέας των πνευματικά ελεγχόμενων μαλακών ρομποτικών συστημάτων επικεντρώνεται στη χρήση ρευστών όπως νερό, αέρας ή και κενό σε συνδυασμό με στρατηγικά τοποθετημένους θαλάμους εντός των κατασκευών για την επίτευξη κινήσεων. Οι θάλαμοι σχεδιάζονται έτσι ώστε όταν αυξηθεί ή ελαττωθεί η πίεση του ρευστού εντός τους, η παραμόρφωση του θαλάμου να παρασύρει την κατασκευή προς την επιθυμητή κατεύθυνση. Εάν υποθέσουμε ένα σύστημα το οποίο διαθέτει μόνο έναν θάλαμο και η λειτουργία του είναι η κάμψη του κατά την αύξηση της πίεσης του ρευστού στο θάλαμο, ο θάλαμος θα πρέπει να είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε η πλευρά από την οποία καλείται να καμφθεί η κατασκευή να έχει μεγαλύτερη σκληρότητα. Με τον τρόπο αυτό, καθώς αυξάνεται ο όγκος του θαλάμου, η μαλακή πλευρά του παραμορφώνεται σε μεγαλύτερο βαθμό από την αντιδιαμετρική της, και λόγω της διαφοράς που δημιουργείται μεταξύ του μήκους των δυο αυτών πλευρών η κατασκευή ωθείται σε μια μορφή τόξου κύκλου.

Με χρήση της παραπάνω αρχής λειτουργίας, οι Polygerinos et.al [6], κατασκεύασαν έναν εξωσκελετικό νάρθηκα για υποβοήθηση και θεραπευτική χρήση στο σπίτι για άτομα με

πάθηση στα χέρια (Εικόνα 6). Ο εν λόγω νάρθηκας αποτελείται από πέντε ξεχωριστά τμήματα, ένα για την κίνηση κάθε δακτύλου. Το κάθε τμήμα αποτελείται από ένα θάλαμο και έχει τη δυνατότητα να καμφθεί μόνο προς μια κατεύθυνση. Λόγω της φύσης της κατασκευής, κάθε τμήμα προσαρμόζεται στη μορφή των δακτύλων κατά την ενεργοποίηση του, πιέζοντας ομοιόμορφα καθ' όλο το μήκος του.



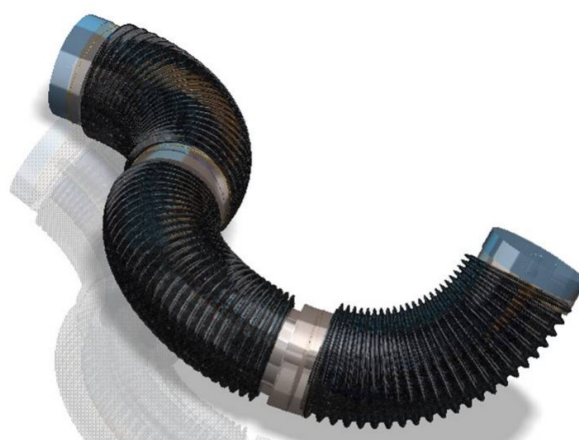
Εικόνα 6 Εξωσκελετικός νάρθηκας με χρήση μαλακών υλικών των Polygerinos et.al [6]

Με τη συνδυαστική χρήση πολλών θαλάμων είναι εφικτή η κατασκευή συστημάτων τα οποία μπορούν να πραγματοποιήσουν μεγαλύτερο βαθμό κινήσεων, όπως το σύστημα που αναπτύχθηκε από τους Shepherd et.al [7], οι οποίοι κατασκεύασαν ένα μαλακό ρομποτικό σύστημα με δυνατότητα πολλών βηματισμών. Το σύστημα αποτελείται από πέντε θαλάμους, έναν κεντρικό στο μέσο της κατασκευής και τέσσερις οι οποίοι είναι τοποθετημένοι χιαστί. Με την ελεγχόμενη ενεργοποίηση των θαλάμων, είναι σε θέση να πραγματοποιήσουν πληθώρα βηματισμών και κινήσεων του συστήματος για τη μετακίνηση του πάνω σε επιφάνειες, καθώς και για να ξεπεράσει εμπόδια (Εικόνα 7).

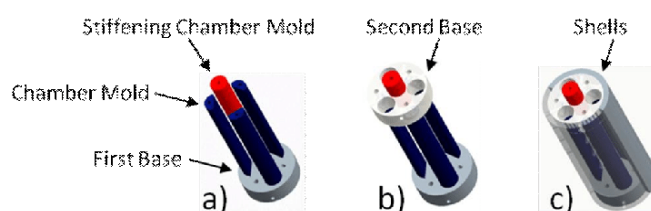


Εικόνα 7 Μαλακό ρομποτικό σύστημα με δυνατότητα πολλών βηματισμών των Shepherd et.al. [7]

Όπως παρατηρήθηκε και στις προηγούμενες τεχνολογίες, η χρήση μαλακών υλικών για την κατασκευή ευέλικτων βραχιόνων είναι ένα θέμα το οποίο ενδιαφέρει σε μεγάλο βαθμό την επιστημονική κοινότητα. Οι Cianchetti et.al [8] κατασκεύασαν τον STIFF-FLOP (Εικόνα 8) έναν μαλακό βραχίονα ο οποίος χρησιμοποιείται ως χειρουργικός επενεργητής. Βασισμένοι στην εν λόγω τεχνολογία, τοποθέτησαν κατά μήκος ενός σωλήνα σιλικόνης τρεις θαλάμους οι οποίοι παρέχουν τη δυνατότητα λυγισμού του βραχίονα σε εμβέλεια 360 μοιρών. Επίσης ενσωμάτωσαν και ένα θάλαμο ο οποίος περιέχει κοκκώδες υλικό, στο κέντρο του σωλήνα, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα να μεταβάλλεται η ακαμψία του βραχίονα, ελέγχοντας την υποπίεση του θαλάμου αυτού. (Εικόνα 9).



Εικόνα 8 STIFF-FLOP των Mattei Cianchetti et.al.

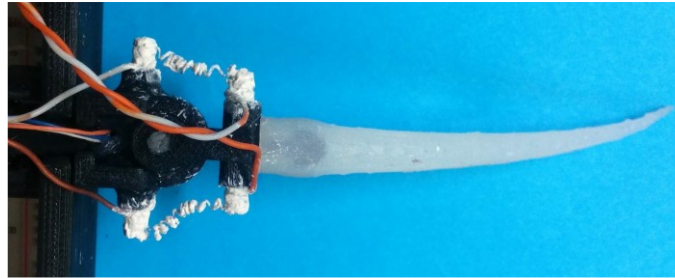


Εικόνα 9 Εσωτερική διάταξη θαλάμων STIFF-FLOP

2.2.4. Παθητικά μαλακά ρομποτικά συστήματα

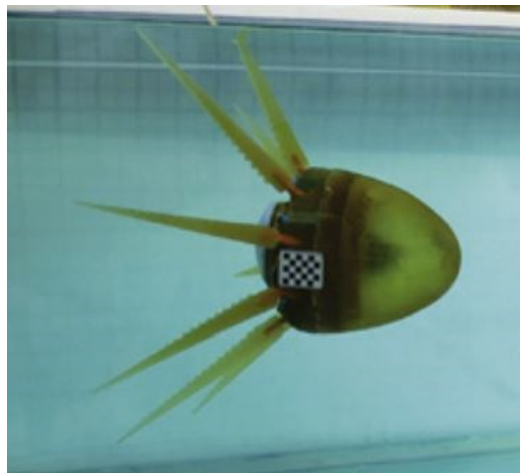
Τα παθητικά μαλακά ρομποτικά συστήματα χρησιμοποιούν εύκαμπτα μαλακά υλικά για την κατασκευή τους και σε αντίθεση με τα συστήματα τα οποία παρουσιάστηκαν παραπάνω δεν ενεργούν απευθείας πάνω στα μαλακά υλικά αλλά κινούν μαλακά άκρα από σταθερά σημεία. Τα εν λόγω συστήματα εκμεταλλεύονται την ευκαμψία των μαλακών υλικών ώστε να προάγουν τα επιθυμητά αποτελέσματα, όπως αυξημένη ώθηση και μειωμένη αντίσταση κατά την κίνηση.

Ένα ρομποτικό σύστημα για ώθηση μέσα σε νερό το οποίο χρησιμοποιεί ανταγωνιστικά κράματα μνήμης σχήματος είναι αυτό των Sfakiotakis et.al [9]. Το σύστημα χρησιμοποιεί δυο κράματα μνήμης σχήματος τοποθετημένα αντιδιαμετρικά για την κίνηση ενός μαλακού άκρου κατασκευασμένου από σιλικόνη. Καθώς τα κράματα ενεργοποιούνται εναλλάξ το ένα με το άλλο, η μαλακή προέκταση μετακινείται δεξιά και αριστερά, παράγοντας έτσι ώθηση στη διάταξη η οποία βρίσκεται μέσα στο νερό.



Εικόνα 10 Σύστημα με κράματα μνήμης σχήματος των Sfakiotakis et.al [9].

Άλλο ένα ρομποτικό σύστημα το οποίο εκμεταλλεύεται τη χρήση μαλακών υλικών είναι και το ρομποτικό χταπόδι που κατασκευάστηκε από τους Sfakiotakis et.al [10]. Το σύστημα αποτελείται από οκτώ πλοκάμια κατασκευασμένα από σιλικόνη ή πολυουρεθάνη και ένα σώμα κατασκευασμένο από πολυουρεθάνη. Κάθε ένα από τα πλοκάμια του συστήματος κινείται μέσω ενός σερβοκινητήρα ο οποίος είναι στερεωμένος πάνω στο σώμα του ρομπότ.



Εικόνα 11 Το βιομμητικό ρομποτικό χταπόδι που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο CVRL του Ινστιτούτου Έρευνας και Τεχνολογίας. [10]

2.3. Βιομημητικός ρομποτικός βραχίονας

Με βάση τις τεχνολογίες που αναφέρθηκαν στο παρόν κεφάλαιο και αντλώντας έμπνευση από τους έμβιους οργανισμούς, και πιο συγκεκριμένα από τα χταπόδια, στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία παρουσιάζουμε τον σχεδιασμό και κατασκευή ενός βιομημητικού ρομποτικού βραχίονα εμπνευσμένου από τα πλοκάμια των χταποδιών.

Ο βραχίονας διαθέτει τρία τμήματα με κατά μήκος θαλάμους, το οποίο του προσδίδει τη δυνατότητα κάμψης σε τρία διαφορετικά επίπεδα του συνολικού του μήκους. Επιπλέον, τα τμήματα αυτά αλληλοκαλύπτονται και με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η ομαλή μετάβαση της καμπύλης των τμημάτων, απαλείφοντας τις νεκρές περιοχές μεταξύ των διαφορετικών τμημάτων του. Τέλος, σε αντίθεση με τους βραχίονες που παρουσιάστηκαν παραπάνω, ο εν λόγω βραχίονας διαθέτει ελικοειδείς θαλάμους, οι οποίοι προσδίδουν τη δυνατότητα συστροφής κατά μήκος του βραχίονα.



Εικόνα 12 Ο βιομημητικός ρομποτικός βραχίονας μαλακών υλικών που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Πέραν του βιομημητικού βραχίονα, η παρούσα εργασία ασχολείται και με τη σχεδίαση και κατασκευή της μονάδας οδήγησης για την υποστήριξη του βραχίονα, καθώς και με την υλοποίηση κατάλληλου λογισμικού για την εύκολη χρήση του.

3. Σχεδιασμός και Κατασκευή Ρομποτικού Βραχίονα Μαλακών Υλικών

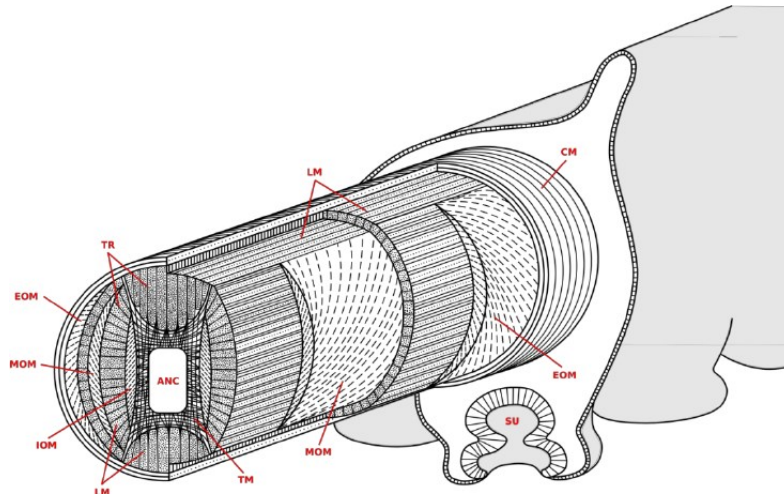
3.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον σχεδιασμό και την κατασκευή του βιομιμητικού ρομποτικού βραχίονα. Πιο συγκεκριμένα, εξηγείται η πορεία της μελέτης του πλοκαμιού των χταποδιών εκ των οποίων είναι εμπνευσμένος ο βραχίονας, αναλύεται η πορεία σχεδίασης και η αρχιτεκτονική του βραχίονα, και τέλος παρουσιάζονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την κατασκευή του πρωτοτύπου του βραχίονα καθώς και οι προκλήσεις οι οποίες προέκυψαν κατά την υλοποίησή του.

3.2. Σχεδιασμός βιομιμητικού ρομποτικού βραχίονα

Για τη σχεδίαση του βιομιμητικού ρομποτικού βραχίονα, αρχικά μελετήθηκε η φυσιολογία του μυϊκού συστήματος του πλοκαμιού των χταποδιών (Εικόνα 13). Το μυϊκό σύστημα του πλοκαμιού των χταποδιών διαχωρίζεται σε τρεις μυϊκές ομάδες. Η πρώτη μυϊκή ομάδα εκτείνεται κατά μήκος του πλοκαμιού και ευθύνεται για την κάμψη του. Διαχωρίζεται σε δυο ζεύγη ανταγωνιστικών μυών οι οποίοι είναι αντιδιαμετρικά τοποθετημένοι μεταξύ τους, και για την πραγματοποίηση της κίνησης, όταν ο ένας εκ των δυο συσφίγγεται, τότε ο ανταγωνιστικός του μυς χαλαρώνει επιτρέποντας την κάμψη προς τη μια πλευρά. Η δεύτερη

μυϊκή ομάδα διατρέχει το μήκος του πλοκαμιού σε ελικοειδή διαμόρφωση. Και σε αυτήν την περίπτωση, παρουσιάζεται ένα ζευγάρι ανταγωνιστικών μυών οι οποίοι διαφέρουν στη φορά με την οποία διατρέχουν το πλοκάμι - ο ένας μυς έχει αριστερόστροφη φορά ενώ ο ανταγωνιστικός του δεξιόστροφη. Οι ελικοειδείς αυτοί μύες ευθύνονται για τη συστροφή του πλοκαμιού. Τέλος το τρίτο μυϊκό σύστημα αποτελείται από κάθετους κατά το μήκος του πλοκαμιού μυς και ευθύνεται για τη συσπείρωση και την έκταση του πλοκαμιού.



Εικόνα 13 Μυϊκό σύστημα πλοκαμιού.

Βάσει των παραπάνω παρατηρήσεων, καταλήξαμε στον σχεδιασμό ενός βιομιμητικού ρομποτικού βραχίονα ο οποίος θα κατασκευαστεί από μαλακή σιλικόνη και στη θέση των μυών θα τοποθετηθούν θάλαμοι οι οποίοι, όταν θα εισέρχεται πεπιεσμένος αέρας εντός τους, θα μετατοπίζουν τον μηχανισμό όπως οι πραγματικοί μύες ενός πλοκαμιού. Για λόγους απλότητας της κατασκευής, επιλέξαμε να μην χρησιμοποιηθεί η τρίτη μυϊκή ομάδα, καθώς στην περίπτωσή μας, το αποτέλεσμα της κίνησής της μπορεί να επιτευχθεί και μέσω κατάλληλου ελέγχου της πρώτης μυϊκής ομάδας. Επομένως, ο βιομιμητικός ρομποτικός βραχίονας που θα κατασκευαστεί θα αποτελείται από δυο ξεχωριστά μυϊκά συστήματα, από τα οποία το ένα θα διατρέχει κατά το μήκος του βραχίονα και θα ευθύνεται για την κάμψη και την επιμήκυνση, ενώ το δεύτερο θα είναι ελικοειδές κατά το μήκος του και θα ευθύνεται για τη συστροφή του βραχίονα.

Το κατά μήκος μυϊκό σύστημα αποτελείται από τέσσερις ευθύγραμμους θαλάμους και ευθύνεται για την κάμψη του ρομποτικού βραχίονα καθώς και για τη συσπείρωση και έκτασή του. Οι θάλαμοι σχεδιάστηκαν ώστε να είναι παράλληλοι στην εξωτερική κλίση του βραχίονα (τρεις μοίρες) με σκοπό να αποφευχθεί η αλλαγή του πάχους σιλικόνης κατά μήκος του

θαλάμου, το οποίο θα είχε ως αποτέλεσμα την ανομοιόμορφη παραμόρφωσή του κατά την αύξηση της πίεσης του αέρα στο εσωτερικό του. Λόγω της απαίτησης για ξεχωριστή ελεγχόμενη κίνηση ανά διαστήματα του μήκους του βραχίονα, το εν λόγω μυϊκό σύστημα χωρίστηκε σε τρία τμήματα (Εικόνα 14). Η τμηματοποίηση του βραχίονα θα προσφέρει την δυνατότητα υλοποίησης σύνθετων γεωμετριών κατά τη λειτουργία του βραχίονα, καθώς κάθε ένα από τα τρία τμήματά του θα μπορεί να καμφθεί ελεγχόμενα και ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα.

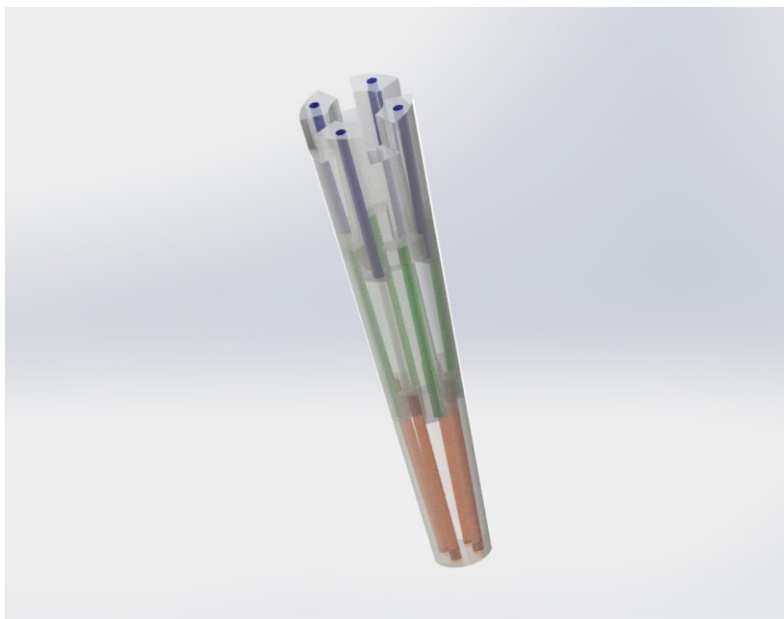


Εικόνα 14 Τμήμα παράλληλου μυϊκού συστήματος.

Βάσει του παραπάνω σχεδίου, κατά τη λειτουργία του βραχίονα κάθε ένα τμήμα θα έχει τη δυνατότητα να καμφθεί προς όλες τις κατευθύνσεις καθώς και να εκταθεί. Η κάμψη κάθε τμήματος επιτυγχάνεται με την είσοδο πεπιεσμένου αέρα στους θαλάμους. Όταν ένας εκ των θαλάμων έχει μεγαλύτερη πίεση αέρα από τον αντιδιαμετρικό του θάλαμο, τότε το τμήμα κάμπτεται προς την πλευρά του θαλάμου με τη μικρότερη πίεση αέρα. Εάν η πίεση των αντιδιαμετρικών θαλάμων αυξηθεί ισόποσα, τότε επιτυγχάνεται η κατά μήκος έκταση του τμήματος.

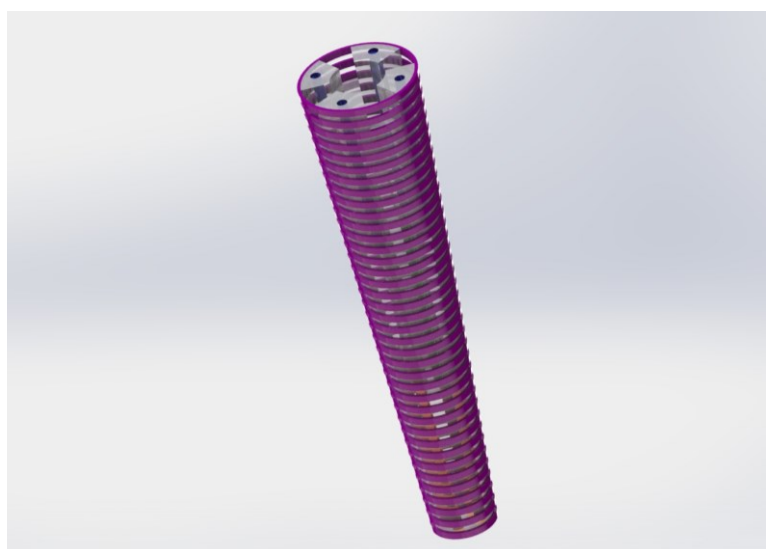
Τα τρία τμήματα του συστήματος ενώνονται με τρόπο ώστε οι θάλαμοί τους να αλληλοκαλύπτονται σε μικρό βαθμό, καθώς με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η εξάλειψη νέκρων σημείων κατά την κάμψη του βραχίονα. Επίσης, για τη διέλευση των απαραίτητων σωληνώσεων, το τμήμα της βάσης και το ενδιάμεσο τμήμα σχεδιάστηκαν έτσι ώστε το εσωτερικό τους να είναι κενό ώστε να επιτρέπεται η διέλευση των σωλήνων προς τα επόμενα τμήματα του βραχίονα. Αντιθέτως, το τελευταίο τμήμα δεν διαθέτει αντίστοιχο κενό στο

κέντρο του. Παρακάτω παρουσιάζεται η συναρμολογημένη όψη του κατά μήκος μυϊκού συστήματος για την κάμψη και έκταση του βραχίονα (Εικόνα 15).



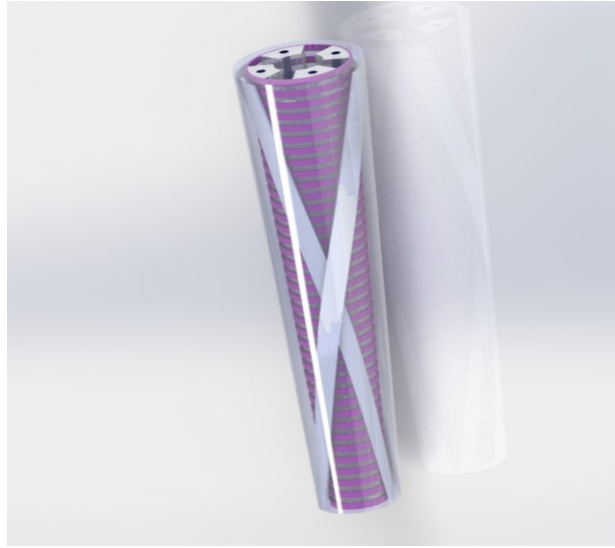
Εικόνα 15 Κατά μήκος μυϊκό σύστημα.

Κρίθηκε επίσης απαραίτητη η χρήση δακτυλίων συγκράτησης και καθοδήγησης κατά μήκος του βραχίονα (Εικόνα 16) κατασκευασμένοι από ABS υλικό. Οι δακτύλιοι περιορίζουν την προς τα έξω έκταση των θαλάμων και επιτρέπουν την κατά μήκος επιμήκυνσή τους, κάθε δακτύλιος είναι ανεξάρτητος από τους υπόλοιπους. Δίχως τους δακτυλίους τα τμήματα απαιτούν μεγαλύτερη ποσότητα αέρα για την κάμψη τους, η οποία είναι επικίνδυνη καθώς υφίσταται κίνδυνος καταστροφής τους λόγω της μεγάλης πίεσης.



Εικόνα 16 Δακτύλιοι συγκράτησης και καθοδήγησης μυϊκού συστήματος.

Το ελικοειδές μυϊκό σύστημα (Εικόνα 17) σχεδιάστηκε κατόπιν της σχεδίασης του παράλληλου, καθώς χρησιμοποιεί τη δομή αυτού και προσαρμόζεται επάνω του.



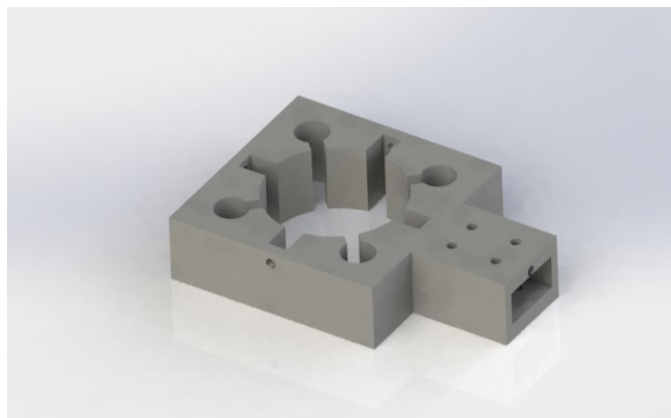
Εικόνα 17 Ελικοειδές μυϊκό σύστημα.

Το μυϊκό αυτό σύστημα αποτελείται από τέσσερις θαλάμους οι οποίοι διαχωρίζονται σε δυο ομάδες : οι δυο θάλαμοι ανήκουν στο δεξιόστροφο σύστημα και οι άλλοι δύο στο αριστερόστροφο σύστημα. Όταν ο βραχίονας επιβάλλεται να συστραφεί δεξιόστροφα, οι εν λόγω δεξιόστροφοι θάλαμοι φουσκώνουν παράλληλα, ενώ στην αντίστροφη περίπτωση οι αριστερόστροφοι θάλαμοι φουσκώνουν αντίστοιχα για να επιτευχθεί η στροφή του βραχίονα. Όπως και στην περίπτωση του παράλληλου μυϊκού συστήματος, για τον περιορισμό των θαλάμων και την καθοδήγησή του, επιβάλλεται η χρήση δακτυλίων (Εικόνα 18).



Εικόνα 18 Δακτύλιοι συγκράτησης και καθοδήγησης ελικοειδούς μυϊκού συστήματος

Τέλος, για τη δημιουργία της πειραματικής διάταξης, σχεδιάστηκε μια βάση στην οποία ασφαλίζεται σε κάθετη θέση ο βιομημητικός ρομποτικός βραχίονας (Εικόνα 19).



Εικόνα 19 Βάση συγκράτησης βιομημητικού ρομποτικού βραχίονα.

Παρακάτω παρουσιάζεται φωτορεαλιστική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης του συστήματος, η οποία περιλαμβάνει μια βάση έδρασης κατασκευασμένη με προφίλ αλουμίνιου.



Εικόνα 20 Πειραματική διάταξη βιομημητικού ρομποτικού βραχίονα.

Ο τελικός βραχίονας που σχεδιάστηκε έχει διαστάσεις 150mm μήκος, διάμετρο βάσης 40mm και διάμετρο άκρου 25mm. Η συνολική πειραματική διάταξη έχει διαστάσεις 220mm μήκος, 200mm πλάτος και ύψος 320mm.

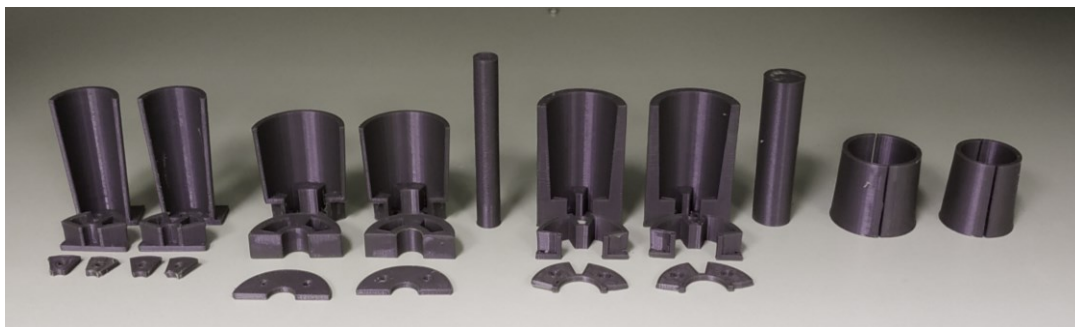
Κατά την διάρκεια κατασκευής του βιομημητικού ρομποτικού βραχίονα πραγματοποιήθηκαν διορθώσεις στα αρχικά σχέδια των καλουπιών, καθώς κάθε χύτευση είχε μικρές ατέλειες οι οποίες συσσωρευόμενες επηρέαζαν σε αισθητό βαθμό τις διαστάσεις της

κατασκευής. Συνεπώς όπως παρουσιάζεται και παρακάτω, οι διαστάσεις της πραγματικής κατασκευής του βραχίονα διαφέρουν από τις διαστάσεις των σχεδίων που παρουσιάστηκαν στο παρόν κεφάλαιο.

3.3. Κατασκευή καλουπιών βιομημητικού ρομποτικού βραχίονα

Για την κατασκευή των τμημάτων του βιομημητικού ρομποτικού βραχίονα απαιτήθηκε η κατασκευή πληθώρας καλουπιών. Για κάθε τμήμα του βραχίονα σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε καλούπι στο οποίο έπειτα χυτεύτηκε σιλικόνη χαμηλής σκληρότητας. Συνολικά σχεδιάστηκαν επτά καλούπια : τρία για τα τμήματα του κατά μήκος μυϊκού συστήματος, ένα για τη σύνδεση των τριών τμημάτων, και δύο για το ελικοειδές μυϊκό σύστημα. Τα τεμάχια των καλουπιών κατασκευάστηκαν με τη χρήση τρισδιάστατου εκτυπωτή (FMD 3d printer) και αποτελούνται από υλικό PLA. Τα τρισδιάστατα σχέδια των καλουπιών εξήχθησαν σε μορφή stl (stereolithography) αρχείων, την οποία απαιτεί το λογισμικό οδήγησης του τρισδιάστατου εκτυπωτή.

Αρχικά σχεδιάστηκαν τα καλούπια, βάση της τελικής μορφής του βραχίονα που έχει σχεδιαστεί, για τη δημιουργία του κατά μήκος μυϊκού συστήματος (Εικόνα 21), το οποίο χωρίζεται σε τρία τμήματα. Κάθε τμήμα, λόγω διαφορετικής μορφής και μεγέθους, απαιτεί διαφορετικό καλούπι, και επιπλέον για τη σύνδεση των τριών τμημάτων απαιτούνται δυο διαφορετικού μεγέθους καλούπια.



Εικόνα 21 Καλούπια χύτευσης παράλληλου μυϊκού συστήματος και σύνδεσης τμημάτων.

Έπειτα σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν τα καλούπια για τη δημιουργία του ελικοειδούς μυϊκού συστήματος (Εικόνα 22). Το ελικοειδές μυϊκό σύστημα κατασκευάζεται σε δυο τμήματα. Αρχικά κατασκευάζεται το αριστερόστροφο τμήμα και στη συνέχεια το δεξιόστροφο τμήμα. Πέραν των εκτυπωμένων τεμαχίων, χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικές

ράβδοι πάχους 2 mm για την κατασκευή των θαλάμων του παράλληλου μυϊκού συστήματος, καθώς και ράβδοι πάχους 3 mm λυγισμένες σε ελικοειδή μορφή για την κατασκευή του ελικοειδούς μυϊκού συστήματος.



Εικόνα 22 Καλούπια χύτευσης ελικοειδούς μυϊκού συστήματος.

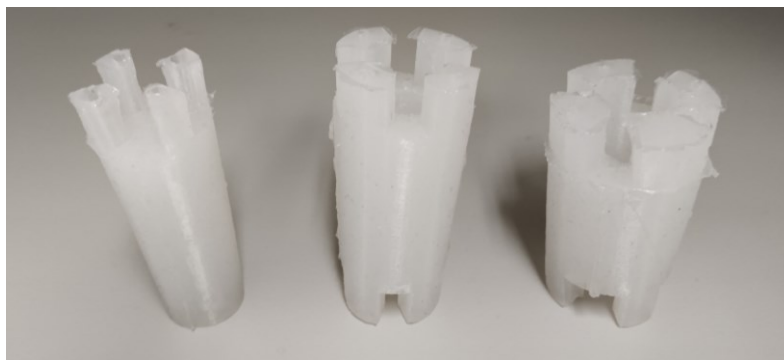
Λόγω του ότι κατά την χύτευση των τεμαχίων παρατηρήθηκαν μικρές διαφορές στις διαστάσεις μεταξύ των αρχικών σχεδίων και των τελικών τεμαχίων, τα καλούπια του ελικοειδούς μυϊκού συστήματος τροποποιήθηκαν ώστε να ταιριάζουν με τις διαστάσεις της κατασκευής.

3.4. Κατασκευή βιομημητικού ρομποτικού βραχίονα

Μετά την ολοκλήρωση κατασκευής των καλουπιών ακολούθησε η διαδικασία χύτευσης. Για την κατασκευή του βιομημητικού ρομποτικού βραχίονα επιλέχθηκε η χρήση σιλικόνης Ecoflex 00-10 της Smooth-On, η οποία διαθέτει σκληρότητα 10 A, επιμήκυνση στο σημείο θραύσης 800%, συρρίκνωση $<.001\text{in./in.}$, ελάχιστη θερμοκρασία χρήσης $-65\text{ }^{\circ}\text{F}$, μέγιστη θερμοκρασία χρήσης $450\text{ }^{\circ}\text{F}$, και αντοχή εφελκυσμού 120 psi. Η εν λόγω σιλικόνη είναι δύο συστατικών τα οποία αναδεύονται σε αναλογία 1:1 για τη δημιουργία του τελικού μείγματος, έχει διάρκεια εργασίας τριάντα λεπτά και για την πλήρη σταθεροποίησή της απαιτούνται τέσσερις ώρες.

Αρχικά κατασκευάστηκαν τα τρία τμήματα του παράλληλου μυϊκού συστήματος (Εικόνα 23 **Error! Reference source not found.**), και ελέγχθηκαν για τυχόν ατέλειες. Έπειτα, στα τεμάχια συνδέθηκαν οι απαραίτητες σωληνώσεις για την εισαγωγή του πεπιεσμένου αέρα.

Οι σωληνώσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι κατασκευασμένες από σιλικόνη, έχουν εξωτερική διάμετρο 4mm και εσωτερική 2mm.

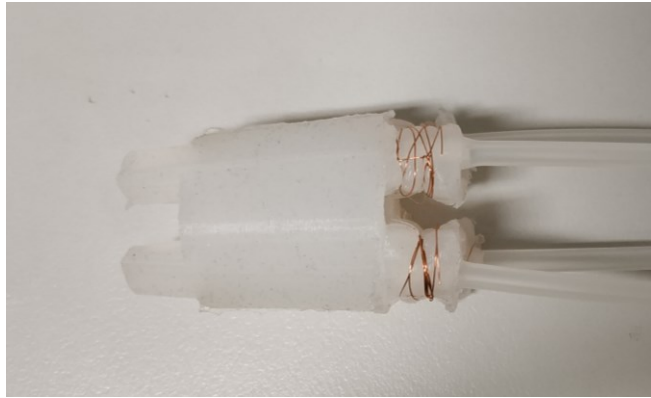


Εικόνα 23 Τμήματα παράλληλου μυϊκού συστήματος.



Εικόνα 24 Τοποθέτηση σωλήνων.

Κατά την αύξηση πίεσης του αέρα εντός των θαλάμων, η παραμόρφωσή τους έχει ως αποτέλεσμα την εξαγωγή των σωλήνων από την επιθυμητή τους θέση. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος εισαγάγαμε έναν πλαστικό σκληρό σωλήνα μήκους 3mm στο άκρο κάθε σωλήνα σιλικόνης και στην συνέχεια ο σωλήνας εισχωρεί εντός του θαλάμου 3mm και χρησιμοποιείται χάλκινο νήμα για την ασφάλιση της θέσης του (Εικόνα 25). Το μικρό πλαστικό σωληνάκι προσδίδει ακαμψία στο σημείο που επιθυμούμε να συγκρατηθεί ο σωλήνας, χωρίς να επιτρέπει τη σύνθλιψη του.



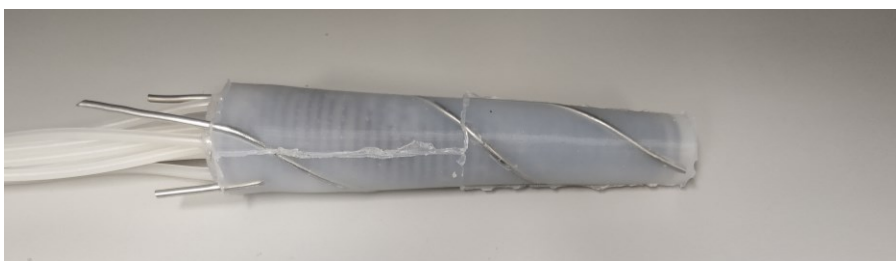
Εικόνα 25 Συγκράτηση σωλήνων.

Τα τμήματα ενώθηκαν μόνιμα με χρήση των καλουπιών. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν οι δακτύλιοι συγκράτησης και καθοδήγησης, ολοκληρώνοντας έτσι την κατασκευή της βασικής μορφής του βιομιμητικού ρομποτικού βραχίονα. Στο στάδιο αυτό, ο βραχίονας δοκιμάστηκε για την εξακρίβωση της ορθής λειτουργίας του, καθώς στη συνέχεια δεν θα ήταν εφικτή καμία τροποποίηση στο εν λόγω τμήμα. Κατά την δοκιμή της κατασκευής ελέγχθηκαν όλοι οι θάλαμοι για διαρροές αέρα καθώς και για την σωστή κίνηση τους.



Εικόνα 26 Ολοκληρωμένος βραχίονας με παράλληλο μυϊκό σύστημα.

Μετά την εξακρίβωση της ορθής λειτουργίας του παράλληλου μυϊκού συστήματος, κατασκευάστηκε το ελικοειδές μυϊκό σύστημα (Εικόνα 27), χρησιμοποιώντας την υφιστάμενη κατασκευή ως βάση.

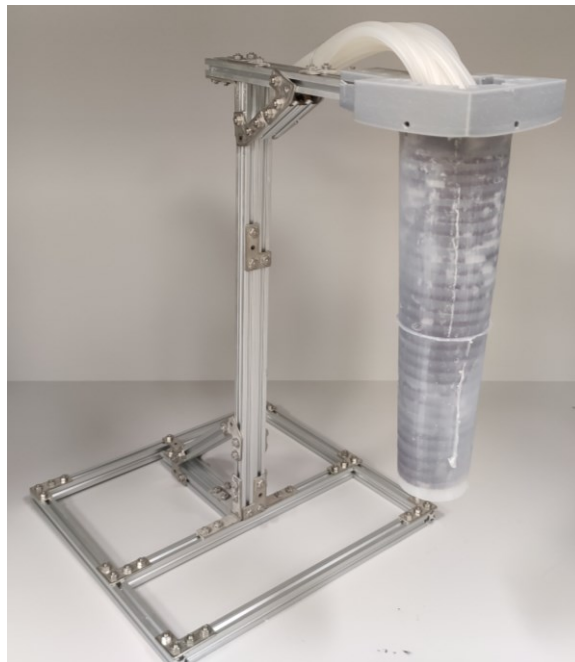


Εικόνα 27 Ελικοειδές μυϊκό σύστημα.

Τέλος τοποθετήθηκαν οι δακτύλιοι συγκράτησης και καθοδήγησης του ελικοειδούς μυϊκού συστήματος και το τεμάχιο συγκράτησης του βιομιμητικού ρομποτικού βραχίονα στη βάση

του. Τα δυο μυϊκά συστήματα διαθέτουν ξεχωριστούς δακτυλίους συγκράτησης και καθοδήγησης λόγω του ότι με το σχεδιασμό αυτό το κάθε μυϊκό σύστημα δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το άλλο. Σε αντίθετη περίπτωση υπάρχει ο κίνδυνος σύνθλιψης των θαλάμων του ενός μυϊκού συστήματος κατά τη λειτουργία του άλλου, το οποίο δεν είναι επιθυμητό καθώς επηρεάζει την ομοιογένεια της λειτουργίας του βραχίονα.

Ο τελικός βιομημητικός ρομποτικός βραχίονας (Εικόνα 28) χαρακτηρίζεται από διαστάσεις 17 mm μήκος, 3 mm διάμετρο άκρου, 5 mm διάμετρο βάσης, έχει βάρος 250 gr και διαθέτει δέκα τέσσερα σωληνάκια σιλικόνης, διαμέτρου 2mm εσωτερικά και 4 mm εξωτερικά, για τους θαλάμους των μυϊκών συστημάτων του.



Εικόνα 28 Το τελικό πρωτότυπο του βιομημητικού ρομποτικού βραχίονα, τοποθετημένο στη βάση έδρασης του.

4. Σχεδιασμός και Κατασκευή Μονάδας Οδήγησης Βιομιμητικού Ρομποτικού Βραχίονα

4.1. Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο χωρίζεται σε τρεις ενότητες. Στην πρώτη ενότητα παρουσιάζονται τα εξαρτήματα τα οποία περιλαμβάνονται εντός της μονάδας οδήγησης του βιομιμητικού ρομποτικού βραχίονα. Στη δεύτερη ενότητα παρουσιάζεται η πορεία σχεδιασμού της μονάδας οδήγησης, ενώ στη τρίτη ενότητα παρουσιάζεται η πορεία κατασκευής της μονάδας οδήγησης και εξηγείται ο τρόπος λειτουργίας της.

4.2. Εξαρτήματα μονάδας οδήγησης

Εντός της μονάδας οδήγησης του βιομιμητικού ρομποτικού βραχίονα περιλαμβάνονται οι σωληνοειδείς βαλβίδες για τον έλεγχο των θαλάμων του βραχίονα, ένας μικροελεγκτής για τον έλεγχο της οδήγησης των σωληνοειδών βαλβίδων, και τέλος μια πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος η οποία τροφοδοτεί και διασυνδέει όλα τα τμήματα της μονάδας οδήγησης.

4.2.1. Σωληνοειδή

Για τον έλεγχο της εισόδου και εξόδου αέρα στους θαλάμους του βιομημητικού ρομποτικού βραχίονα επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν σωληνοειδείς βαλβίδες (Εικόνα 29) αέρος μικρού μεγέθους. Οι σωληνοειδείς βαλβίδες χρησιμοποιούνται έτσι ώστε να επιτρέπουν την είσοδο πεπιεσμένου αέρα σε μορφή παλμών. Λόγω του ότι η παροχή του πεπιεσμένου αέρα είναι σταθερή κατά τη λειτουργία του συστήματος, με τον έλεγχο του χρόνου που παραμένουν ανοικτές οι βαλβίδες, περνάει συγκεκριμένη ποσότητα αέρα μέσα στον θάλαμο, ο οποίος φουσκώνει με αποτέλεσμα ο βραχίονας να κινείται. Όσο μικρότερος είναι ο χρόνος μεταξύ της ανοικτής και της κλειστής θέσης των σωληνοειδών, τόσο μικρότερη είναι η μετατόπιση του βραχίονα και επομένως έχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια στον έλεγχο της θέσης του. Λόγω του μικρού μεγέθους των σωληνοειδών επιτρέπεται η μικρού μεγέθους κατασκευή της μονάδας ελέγχου, στοιχείο ιδιαίτερα σημαντικό καθώς απαιτείται η χρήση είκοσι οκτώ σωληνοειδών βαλβίδων για την πλήρη λειτουργία του συστήματος.

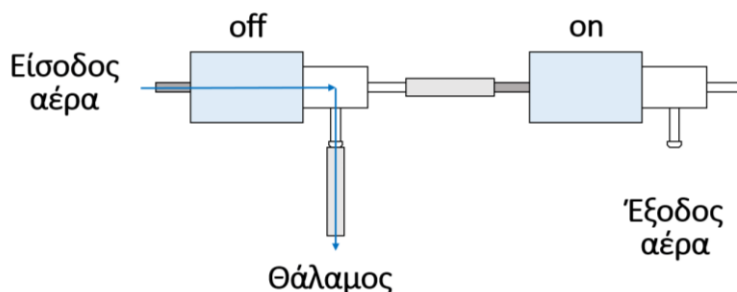
Οι εν λόγω σωληνοειδείς βαλβίδες έχουν τάση λειτουργίας 5-6V DC με απαίτηση 220mA και έχουν βάρος 16g. Κατά την έλλειψη τροφοδοσίας της βαλβίδας, οι δίοδοι 2 και 3 είναι συνδεδεμένες ενώ η δίοδος 1 παραμένει κλειστή. Κατά την τροφοδοσία της, το εσωτερικό έμβολο της βαλβίδας μετακινείται και οι δίοδοι 1 και 2 είναι συνδεδεμένες ενώ η δίοδος 3 κλείνει.



Εικόνα 29 Τρίοδη σωληνοειδής βαλβίδα αέρος.

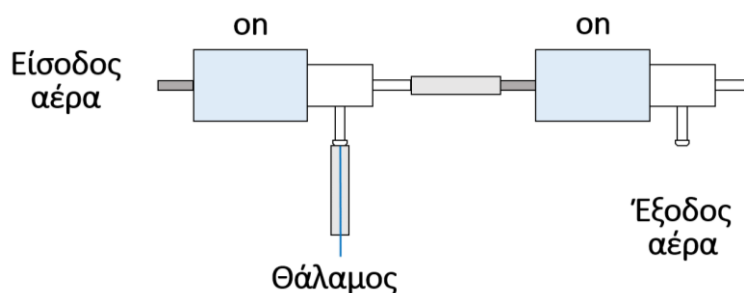
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για τον έλεγχο της εισόδου και εξόδου του πεπιεσμένου αέρα εντός των θαλάμων απαιτούνται δυο σωληνοειδείς βαλβίδες. Παρακάτω παρουσιάζεται η απαραίτητη συνδεσμολογία των σωληνοειδών ώστε να είναι εφικτή η είσοδος (Εικόνα 30) του αέρα μέσα στον θάλαμο, η συγκράτηση (Εικόνα 31) του αέρα και τέλος η έξοδός του (Εικόνα 32).

Για την είσοδο του πεπιεσμένου αέρα στους θαλάμους του βιομημητικού ρομποτικού βραχίονα, η βαλβίδα εισαγωγής πρέπει να είναι κλειστή, επιτρέποντας στον αέρα να περάσει από τη δίοδο 3, η οποία είναι συνδεδεμένη με την παροχή του πεπιεσμένου αέρα, προς την δίοδο 2 η οποία συνδέεται με έναν θάλαμο του βραχίονα.



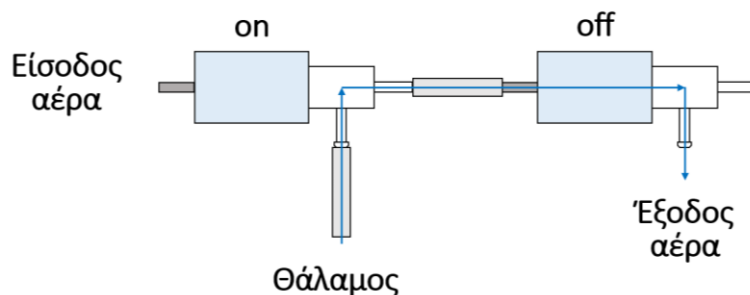
Εικόνα 30 Συνδεσμολογία σωληνοειδών, λειτουργία εισόδου αέρα.

Για τη συγκράτηση του πεπιεσμένου αέρα μέσα στους θαλάμους του βραχίονα οι σωληνοειδείς βαλβίδες εισόδου και εξόδου θα πρέπει να παραμείνουν κλειστές, εγκλωβίζοντας τον πεπιεσμένο αέρα που βρίσκεται μέσα στον θάλαμο, καθώς η δίοδος 2 της βαλβίδας εισόδου είναι σε σύνδεση με την δίοδο 1 η οποία συνδέεται μέσω σωλήνωσης με την δίοδο 3 της βαλβίδας εξόδου η οποία είναι κλειστή.



Εικόνα 31 Συνδεσμολογία σωληνοειδών, λειτουργία συγκράτησης αέρα.

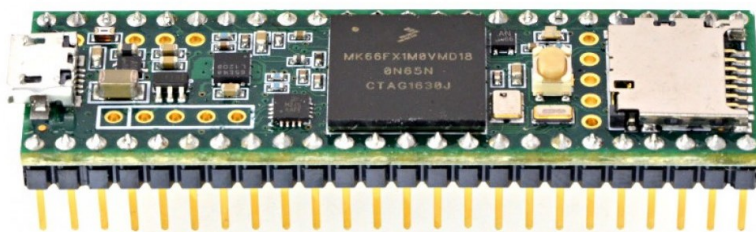
Τέλος, για τον έλεγχο της εξόδου του αέρα από τον βραχίονα, η σωληνοειδής βαλβίδα εισόδου πρέπει να είναι ενεργοποιημένη ενώ η βαλβίδα εξόδου πρέπει να είναι απενεργοποιημένη, επιτρέποντας έτσι τη διέλευση του αέρα που βρίσκεται μέσα στον θάλαμο του βραχίονα, από την δίοδο 2 της βαλβίδας εισόδου στην δίοδο 1 και στη συνέχεια στη δίοδο 3 της βαλβίδας εξόδου και τέλος να εξέλθει από το σύστημα στο περιβάλλον μέσω της δίοδο 2 της βαλβίδας εξόδου.



Εικόνα 32 Συνδεσμολογία σωληνοειδών, λειτουργία εξόδου αέρα.

4.2.2. Μικροελεγκτής

Για τον έλεγχο της λειτουργίας των σωληνοειδών βαλβίδων και την διασύνδεση του συστήματος με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή επιλέχθηκε και χρησιμοποιήθηκε ο μικροελεγκτής Teensy 3.6 (Εικόνα 33).



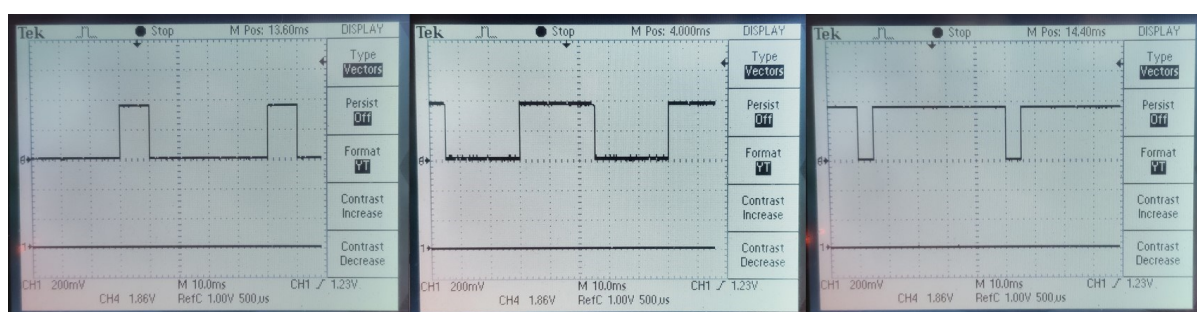
Εικόνα 33 Teensy3.6

Ο συγκεκριμένος μικροελεγκτής περιλαμβάνει έναν 32 bit 180 MHz Cortex-M4 επεξεργαστή, 1M Flash μνήμη, 256K ram μνήμη και 4K EEPROM μνήμη. Επίσης παρέχει μια θύρα USB υψηλής ταχύτητας (480 Mbit/sec), δυο CAN bus θύρες, 4 I2C θύρες, καθώς και 22 PWM εξόδους. Συνολικά το Teensy 3.6 παρέχει 39 εξόδους εκ των οποίων όλες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ψηφιακές εισοδοι και έξοδοι, 22 από αυτές ως PWM έξοδοι και είκοσι πέντε ως αναλογικές εισοδοι και έξοδοι. Για τον έλεγχο του βιομημητικού ρομποτικού βραχίονα απαιτούνται είκοσι οκτώ ψηφιακές έξοδοι. Αυτή η απαίτηση είναι ο βασικότερος λόγος βάσει του οποίου επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος μικροελεγκτής, σε συνδυασμό με το μικρό του μέγεθος, καθώς οι περισσότεροι μικροελεγκτές δεν διαθέτουν ανάλογο αριθμό εξόδων όπως το Teensy 3.6 και το μέγεθος τους είναι σημαντικά μεγαλύτερο.

Για τον έλεγχο των σωληνοειδών απαιτείται η παραγωγή PWM σήματος στις 28 εξόδους του μικροελεγκτή. Λόγω του ότι όπως προαναφέρθηκε, ο μικροελεγκτής διαθέτει είκοσι δυο

PWM εξόδους, χρησιμοποιήσαμε την βιβλιοθήκη TimerOne για την παραγωγή των σημάτων ελέγχου. Το PWM σήμα που κατασκευάζεται έχει συχνότητα 20 Hz, δίνοντάς του περίοδο 50 msec. Λόγω του ότι η εισαγωγή και εξαγωγή του αέρα από τους θαλάμους πραγματοποιείται κατά την παύση λειτουργίας των σωληνοειδών, το σήμα ελέγχου είναι ανεστραμμένο και αυτό έχει ως αποτέλεσμα όταν το duty cycle της εξόδου του μικροελεγκτή είναι 10% , ο παλμός του αέρα που εισέρχεται ή εξέρχεται να έχει duty cycle 90%.

Για την εξακρίβωση της ορθής παραγωγής του σήματος ελέγχου χρησιμοποιήθηκε παλμογράφος. Παρακάτω παρουσιάζεται το σήμα ελέγχου που παράγεται με τη χρήση του Timer 1 (Εικόνα 34).

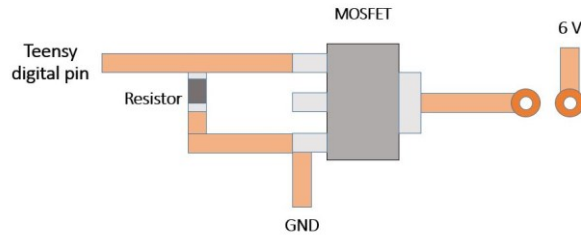


Εικόνα 34 PWM σήμα ελέγχου i) 80% duty cycle ii) 50% duty cycle iii) 10% duty cycle

Από τα παραπάνω μπορούμε να διακρίνουμε ότι η περίοδος του σήματος είναι ακριβώς 50 msec και ότι το duty cycle είναι απόλυτα σωστό.

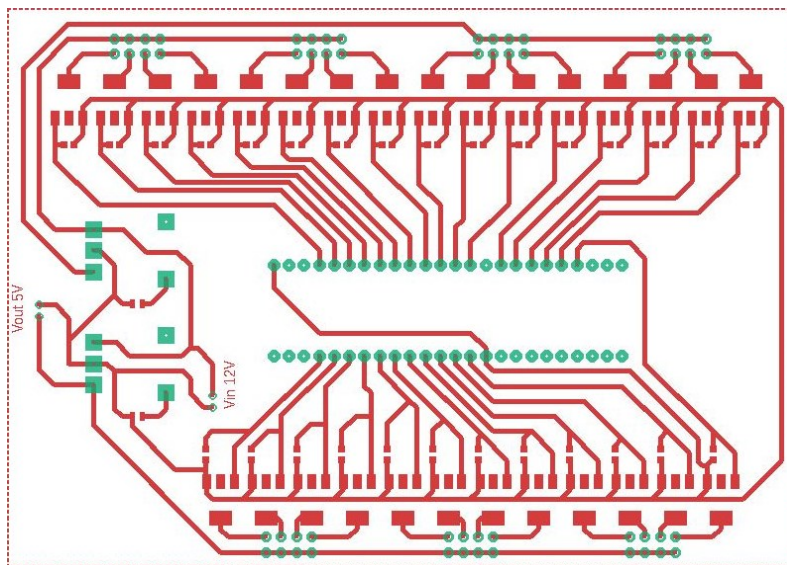
4.2.3. Πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (PCB)

Για τη λειτουργία και τον έλεγχο των σωληνοειδών βαλβίδων σχεδιάστηκε μια πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος στην οποία συνδέονται τα είκοσι οκτώ σωληνοειδή, ο μικροελεγκτής Teensy 3.6 και η τροφοδοσία για τα σωληνοειδή. Καθώς τα σωληνοειδή δε μπορούν να τροφοδοτηθούν από τον μικροελεγκτή, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν mosfet (511-STN4NF03L) που χρησιμοποιούνται ως διακόπτες και όταν λαμβάνουν μια χαμηλή τάση στη μια είσοδό τους τότε κλείνουν το κύκλωμα στους άλλους δύο ακροδέκτες τους, διαφορετικά το κύκλωμα παραμένει ανοικτό. Παρακάτω παρουσιάζεται η συνδεσμολογία που ακολουθήθηκε (Εικόνα 35).



Εικόνα 35 Κύκλωμα ελέγχου σωληνοειδούς βαλβίδας αέρος.

Το σχεδιάγραμμα της πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος (Εικόνα 36) σχεδιάστηκε με τη χρήση του προγράμματος Eagle της Autodesk. Λόγω της απλότητας της πλακέτας, επιλέχθηκε να σχεδιαστεί και να εκτυπωθεί σε ένα επίπεδο, έτσι ώστε όλα τα pins για τη σύνδεση των επιμέρους μελών να βρίσκονται στην ίδια πλευρά, ενώ τα mosfet και οι αντιστάσεις που απαιτούνται να βρίσκονται στην αντίθετη πλευρά. Τα ηλεκτρονικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι τύπου SMD ώστε να έχουν όσο το δυνατόν μικρότερο μέγεθος, το οποίο είναι θεμιτό λόγω του μεγάλου αριθμού τους.



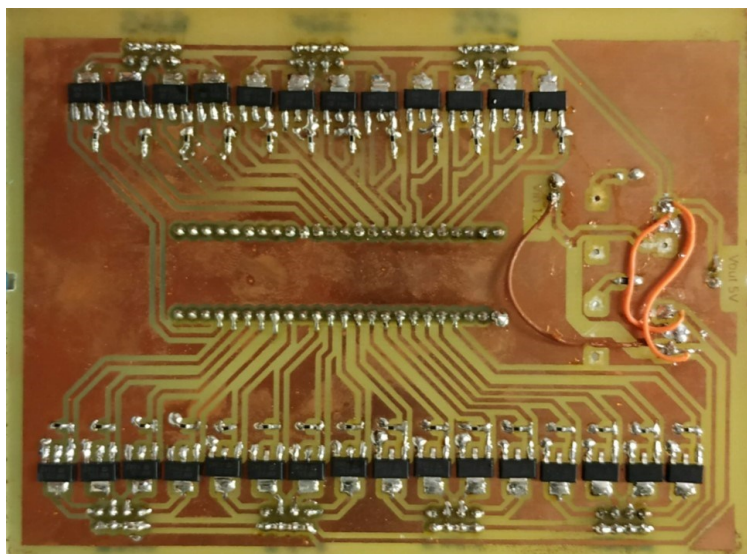
Εικόνα 36 Σχεδιάγραμμα τυπωμένου κυκλώματος.

Η κατασκευή της πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος πραγματοποιήθηκε εντός του εργαστήριου. Μετά τον σχεδιασμό του σχεδιαγράμματος, το κύκλωμα εκτυπώθηκε σε διαφάνεια και ελέγχθηκε για ατέλειες και ασυνέχειες στις γραμμές του κυκλώματος. Στη συνέχεια, η πλακέτα εκτέθηκε σε UV ακτινοβολία χρησιμοποιώντας την τυπωμένη διαφάνεια του σχεδίου ως μάσκα, επιτρέποντας έτσι στην UV ακτινοβολία να διαβρώσει το φωτοευαίσθητο φιλμ πάνω στην πλακέτα ενώ δεν επέτρεπε τη διάβρωση του υλικού κάτω

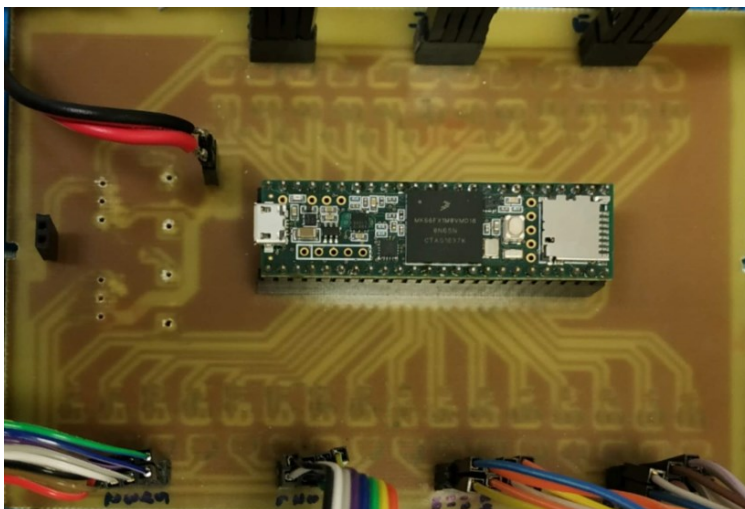
από τα μαύρα σημεία της μάσκας. Τέλος, η πλακέτα καθαρίστηκε με χρήση καυστικής ποτάσας ώστε να απομακρυνθούν τα υπολείμματα από το διαβρωμένο φωτοευαίσθητο φιλμ και τοποθετήθηκε σε διάλυμα υδροχλωρικού οξέος και υπεροξειδίου, το οποίο διαβρώνει με γρήγορο ρυθμό τον εκτεθειμένο χαλκό αλλά δεν επηρεάζει τον χαλκό που βρίσκεται κάτω από το φιλμ. Το τελικό αποτέλεσμα καθαρίστηκε με νερό και ήταν πλέον έτοιμο για να συγκολληθούν τα ηλεκτρονικά στοιχεία πάνω του.

Πάνω στην τελική πλακέτα συγκολλήθηκαν 28 mosfet, 28 αντιστάσεις 10 kΩ και 106 συνολικά θηλυκά pins. Μετά την ολοκλήρωση της συγκόλλησης όλων των στοιχείων, η πλακέτα επικαλύφθηκε με ειδικό βερνίκι για την προστασία του κυκλώματος.

Παρακάτω παρουσιάζονται εικόνες από την τελική πλακέτα και συγκεκριμένα η κάτω πλευρά της πλακέτας (Εικόνα 37), όπου βρίσκονται τα ηλεκτρονικά στοιχεία της και το χάλκινο κύκλωμα, και η πάνω πλευρά της (Εικόνα 38) στην οποία έχουν τοποθετηθεί τα θηλυκά pins στα οποία έχουν συνδεθεί ο μικροελεγκτής, η τροφοδοσία του συστήματος και τα καλώδια τροφοδοσίας των σωληνοειδών.



Εικόνα 37 Κάτω πλευρά πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος.



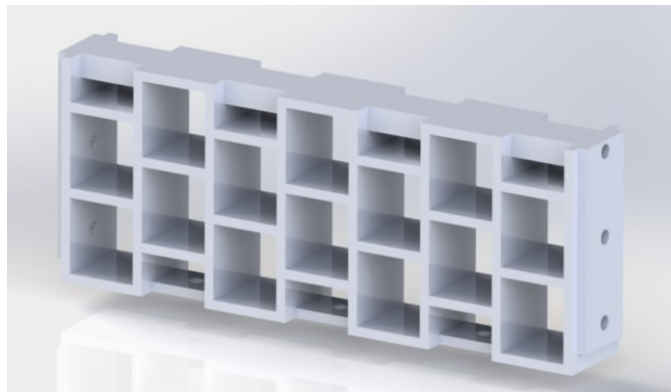
Εικόνα 38 Πάνω πλευρά πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος.

4.3. Σχεδιασμός μονάδας οδήγησης

Η μονάδα οδήγησης του βιομηχανικού ρομποτικού βραχίονα σχεδιάστηκε λαμβάνοντας υπόψιν την απαίτηση εύκολης συντήρησής της. Για αυτό το λόγο, η κατασκευή αποτελείται από επιμέρους τμήματα τα οποία μπορούν να συναρμολογηθούν και να αποσυναρμολογηθούν με εύκολο τρόπο. Η κατασκευή χωρίζεται σε τρία βασικά μέρη - τον θάλαμο των σωληνοειδών, τη θέση τοποθέτησης της πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος και του μικροελεγκτή και τέλος τα εξωτερικά καπάκια της μονάδας.

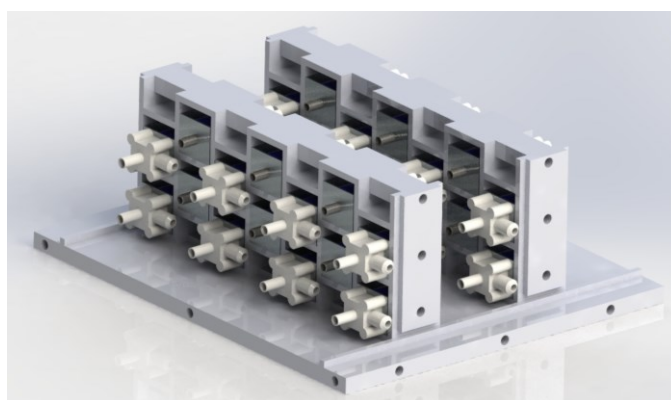
Ο σχεδιασμός ξεκίνησε από τον θάλαμο των σωληνοειδών. Ο θάλαμος θα πρέπει να έχει επαρκές μέγεθος για να μπορεί να υποστηρίξει την τοποθέτηση είκοσι οκτώ σωληνοειδών, καθώς και τις απαραίτητες σωληνώσεις τους. Όπως εξηγείται στο κεφάλαιο 5, για τον έλεγχο της πίεσης του αέρα σε κάθε θάλαμο απαιτούνται δυο σωληνοειδή, εκ των οποίων το πρώτο ευθύνεται για την ελεγχόμενη είσοδο του πεπιεσμένου αέρα μέσα στο θάλαμο του βιομηχανικού ρομποτικού βραχίονα, ενώ το δεύτερο για την ελεγχόμενη έξοδο του αέρα από τον θάλαμο. Για τον λόγο αυτό, επιλέχθηκε να δημιουργηθούν δυο όμοιες συστοιχίες με δεκατέσσερις θέσεις σωληνοειδών η κάθε μια, δηλαδή συνολικά είκοσι οκτώ θέσεις για την τοποθέτηση των σωληνοειδών. Κάθε ζευγάρι σωληνοειδών τοποθετείται το ένα απέναντί από το άλλο, ώστε να απαιτείται το λιγότερο δυνατόν μήκος σωληνώσεων. Οι δυο συστοιχίες τοποθετούνται σταθερά στη βάση της μονάδας οδήγησης και ασφαλίζονται με βίδες, εξασφαλίζοντας με αυτό τον τρόπο τη σταθερή συγκράτηση των σωληνοειδών στη σωστή

θέση καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του, όπου τα σωληνοειδή ταλαντώνονται σε διάφορες συχνότητες και τείνουν να μετακινηθούν.



Εικόνα 39 Συστοιχία σωληνοειδών.

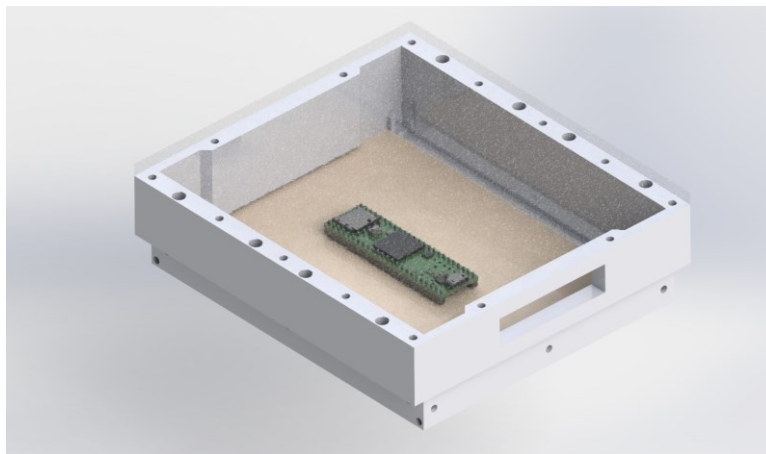
Παραπάνω παρουσιάζεται μια συστοιχία για την τοποθέτηση των σωληνοειδών (Εικόνα 39). Κάθε μια συστοιχία αποτελείται από τρία κομμάτια τα οποία συγκρατούνται μεταξύ τους με δυο οδηγούς δεξιά και αριστερά. Οι οδηγοί εξασφαλίζουν την ορθή συναρμολόγηση των τριών βασικών κομματιών στα οποία τοποθετούνται τα σωληνοειδή, κρατώντας τα πάντα παράλληλα και σφιχτά συναρμολογημένα ώστε τα σωληνοειδή που εδράζονται μέσα τους να είναι σφιχτά συγκρατημένα και να αποφευχθεί η μετακίνησή τους κατά τη λειτουργία του συστήματος. Η τελική συναρμολόγηση της βάσης της μονάδας ελέγχου με τις δυο συστοιχίες των σωληνοειδών και τα είκοσι οκτώ σωληνοειδή παρουσιάζεται παρακάτω (Εικόνα 40). Οι δυο συστοιχίες ασφαλιζονται με τρεις βίδες η κάθε μια, πάνω στη βάση η οποία περιλαμβάνει οδηγούς για την εξασφάλιση της παράλληλης τοποθέτησης των συστοιχιών.



Εικόνα 40 Συναρμολόγηση σωληνοειδών στη βάση της μονάδας οδήγησης.

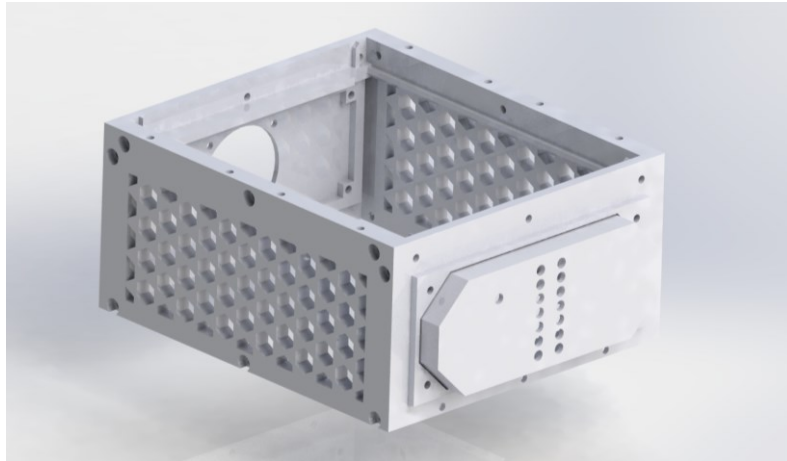
Στη συνέχεια, σχεδιάστηκε ο χώρος έδρασης της πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος και του μικροελεγκτή (Εικόνα 41). Το τμήμα αυτό αποτελείται από τρία κομμάτια - τη βάση της

πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος, το κομμάτι συγκράτησης και ασφάλισης της πλακέτας και τέλος το καπάκι. Κατά τον σχεδιασμό του εν λόγω τμήματος λήφθηκε υπόψιν η απαίτηση σε ελεύθερο χώρο για τη διέλευση των απαραίτητων καλωδιώσεων των σωληνοειδών καθώς και των καλωδιώσεων για την εξωτερική τροφοδοσία του συστήματος και του καλωδίου για την επικοινωνία του μικροελεγκτή με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Για τους λόγους αυτούς, τα πλάγια τοιχώματα έχουν απόσταση από την πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος 7 mm, το οποίο επαρκεί για τη διέλευση των καλωδίων και τη σύνδεσή τους στο πάνω μέρος της πλακέτας. Στην εμπρόσθια πλευρά έχει σχεδιαστεί άνοιγμα το οποίο επαρκεί για την άνετη διέλευση του καλωδίου τροφοδοσίας του συστήματος καθώς και του καλωδίου διασύνδεσης με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή.



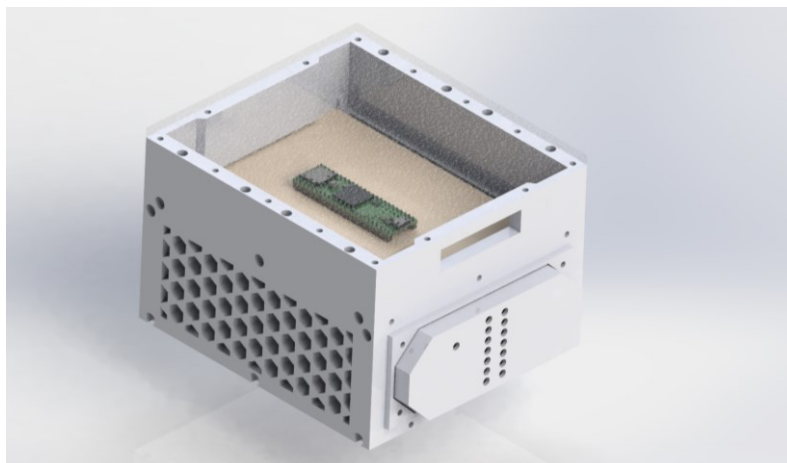
Εικόνα 41 Τμήμα πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος και μικροελεγκτή.

Τέλος, σχεδιάστηκαν τα εξωτερικά τοιχώματα της μονάδας οδήγησης (Εικόνα 42). Το εμπρόσθιο τοίχωμα σχεδιάστηκε με τρόπο ώστε πάνω του να τοποθετηθούν σύνδεσμοι για τη σύνδεση των σωληνώσεων με τα σωληνοειδή και με τον βραχίονα, καθώς και η παροχή του πεπιεσμένου αέρα για την λειτουργία του συστήματος. Το οπίσθιο τοίχωμα περιλαμβάνει θέση τοποθέτησης ανεμιστήρα για την ψύξη των σωληνοειδών, καθώς κατά τη συνεχόμενη λειτουργία τους μπορούν να ανεβάσουν μεγάλες θερμοκρασίες οι οποίες μπορεί να επηρεάσουν τη λειτουργία τους σε αρκετά μεγάλο βαθμό. Τέλος, για τα πλευρικά τοιχώματα επιλέχθηκε διάτρητος σχεδιασμός ώστε να επιτρέπεται εύκολη κυκλοφορία του αέρα εντός του θαλάμου για την καλύτερη ψύξη των σωληνοειδών.



Εικόνα 42 Εξωτερικά τοιχώματα μονάδας οδήγησης.

Παρακάτω παρουσιάζεται μια φωτορεαλιστική απεικόνιση της συναρμολογημένης μονάδας οδήγησης του βιομημητικού ρομποτικού βραχίονα (Εικόνα 43). Η μονάδα αποτελείται από είκοσι πέντε κομμάτια τα οποία συναρμολογούνται και συγκρατούνται μεταξύ τους με πενήντα οκτώ βίδες.



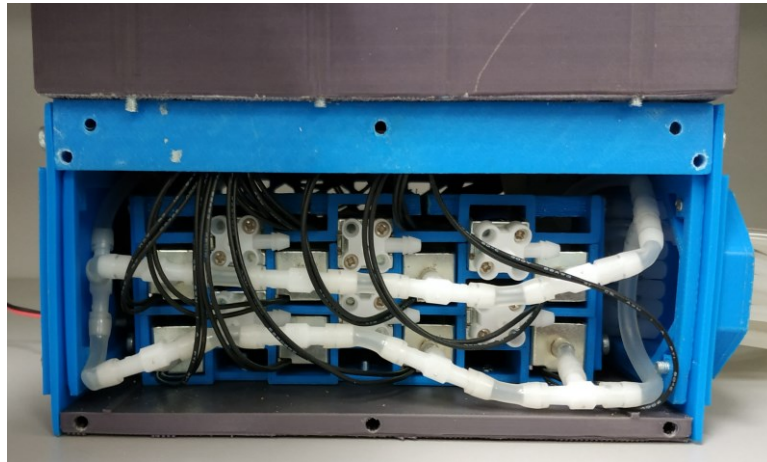
Εικόνα 43 Συναρμολογημένη μονάδα οδήγησης βιομημητικού ρομποτικού βραχίονα.

4.4. Κατασκευή μονάδας οδήγησης

Για την κατασκευή της μονάδας οδήγησης του βιομημητικού ρομποτικού βραχίονα χρησιμοποιήθηκε ένας τρισδιάστατος εκτυπωτής μέσω του οποίου κατασκευάστηκαν εξολοκλήρου όλα τα τεμάχια της μονάδας. Τα τρισδιάστατα τεμάχια εξήχθησαν σε μορφή stl αρχείων ώστε να εισαχθούν στο πρόγραμμα του τρισδιάστατου εκτυπωτή.

Με την ολοκλήρωση της κατασκευής των τεμαχίων, ακολούθησε η συναρμολόγησή τους. Αρχικά συναρμολογήθηκαν οι συστοιχίες όπου τοποθετούνται οι σωληνοειδείς βαλβίδες και

τοποθετήθηκαν τα σωληνοειδή, έπειτα ασφαλίστηκαν πάνω στη βάση της μονάδας και συνδέθηκαν οι σωληνώσεις (Εικόνα 44).

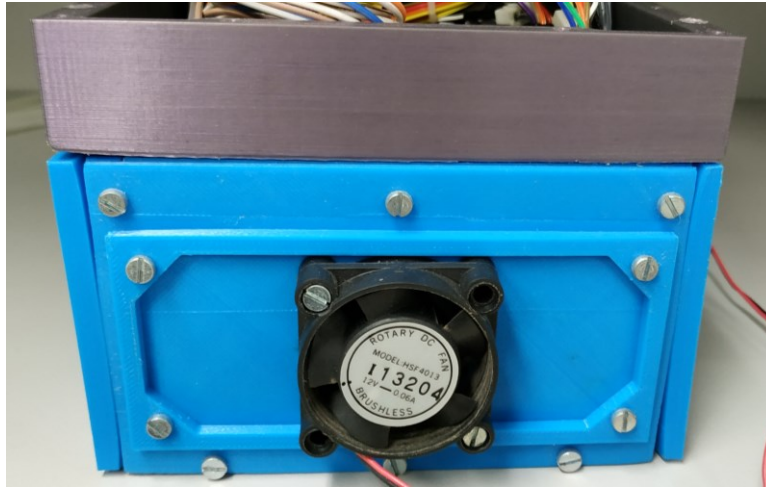


Εικόνα 44 Εγκατεστημένες σωληνοειδείς βαλβίδες.

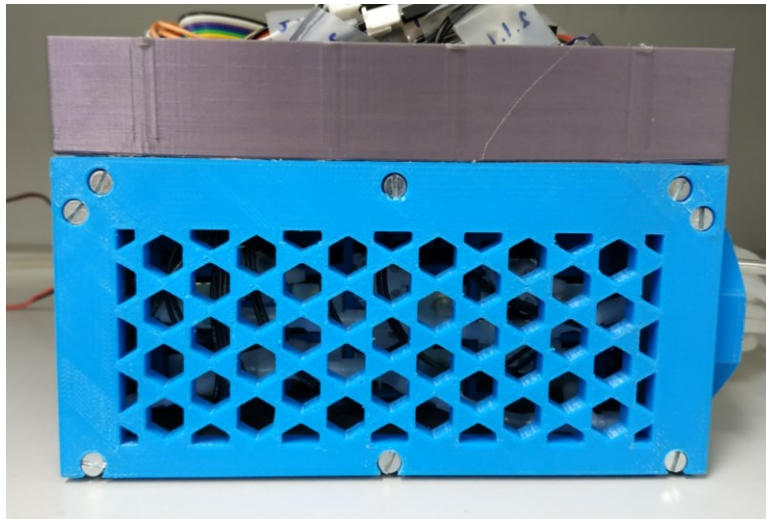
Μετά την ολοκλήρωση της σύνδεσης των σωληνοειδών βαλβίδων, τοποθετήθηκαν τα εξωτερικά τοιχώματα της μονάδας (Εικόνα 45-47), συνδέθηκαν οι σωληνώσεις στο εμπρόσθιο τοίχωμα της μονάδας (Εικόνα 45), και τέλος τοποθετήθηκε ο ανεμιστήρας ψύξης των σωληνοειδών στο πίσω τοίχωμα της μονάδας (Εικόνα 46) ολοκληρώνοντας έτσι την κατασκευή του θαλάμου των σωληνοειδών.



Εικόνα 45 Εμπρόσθια όψη μονάδας οδήγησης.

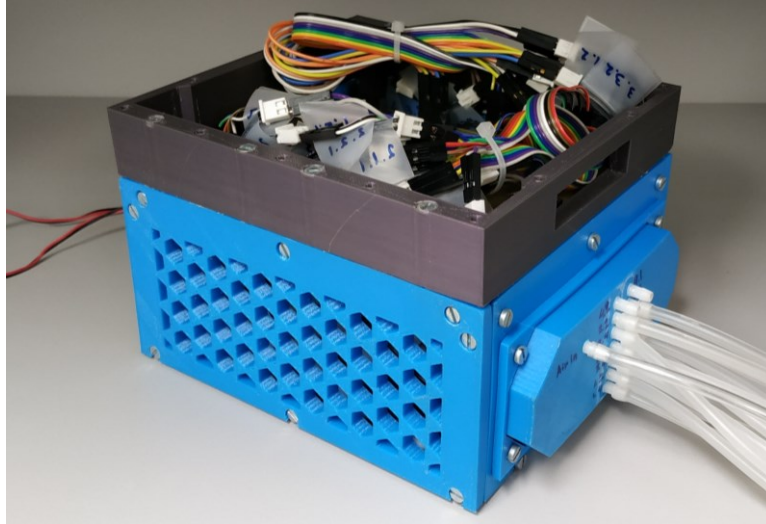


Εικόνα 46 Οπίσθια όψη μονάδας οδήγησης.



Εικόνα 47 Πλάγια όψη μονάδας οδήγησης.

Για την ολοκλήρωση της μονάδας τοποθετήθηκε η πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος, συνδέθηκαν τα καλώδια τροφοδοσίας των σωληνοειδών στην πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος και ασφαλίστηκε η πλακέτα στη θέση της. Τέλος, τοποθετήθηκε το πάνω καπάκι της μονάδας.



Εικόνα 48 Ολοκληρωμένη κατασκευή μονάδας οδήγησης.

5. Έλεγχος Βιομιμητικού Ρομποτικού Βραχίονα

5.1. Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό επικεντρώνεται στην αναλυτική περιγραφή της αρχιτεκτονικής ελέγχου που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε για την οδήγηση του βιομιμητικού ρομποτικού βραχίονα. Επίσης, παρουσιάζεται το λογισμικό ελέγχου το οποίο αναπτύχθηκε για την εύκολη χρήση του βραχίονα και την πραγματοποίηση πειραμάτων που θα εκτελεστούν στην συνέχεια για την εξακρίβωση των χαρακτηριστικών και των δυνατοτήτων του συστήματος.

5.2. Μέθοδος λειτουργίας

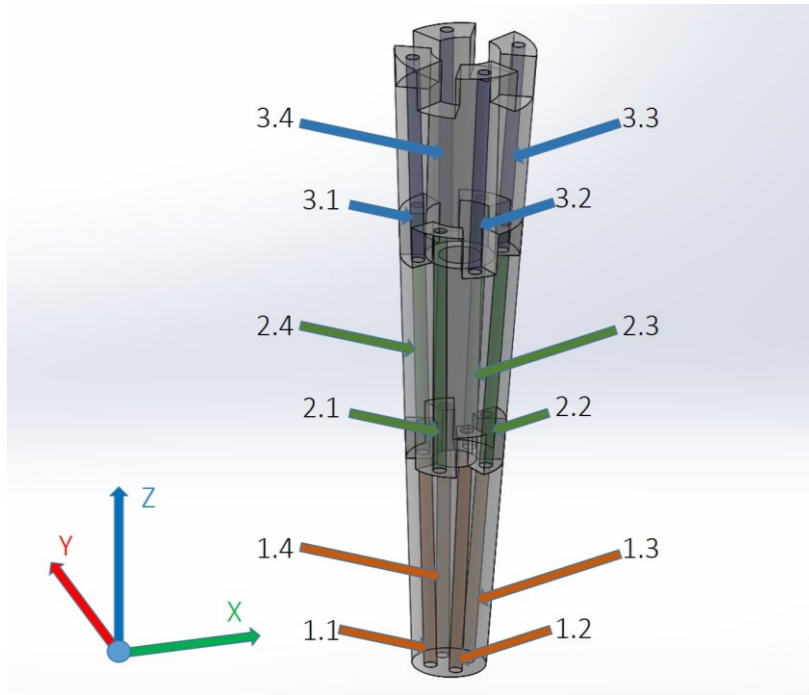
Για την ελεγχόμενη λειτουργία του βιομιμητικού ρομποτικού βραχίονα υλοποιήθηκε κατάλληλο λογισμικό με διεπαφή χρήστη το οποίο μέσω ενσύρματης επικοινωνίας με τον μικροελεγκτή, που περιλαμβάνεται στη μονάδα οδήγησης, ελέγχει τις σωληνοειδείς βαλβίδες ώστε ο βραχίονας να κινείται με τον επιθυμητό τρόπο.

Κεφάλαιο 5

Βάσει της γεωμετρίας του βιομημητικού ρομποτικού βραχίονα προκύπτει η μέθοδος με την οποία επιβάλλεται να αυξάνεται η πίεση σε κάθε θάλαμο ώστε να επιτευχθεί η κίνησή του. Πιο συγκεκριμένα, για τη μετακίνηση του βραχίονα προς τη θετική κατεύθυνση του Χ άξονα, πρέπει να αυξηθεί η πίεση του αέρα στους θαλάμους που βρίσκονται στην αντίθετη πλευρά της κίνησης. Συνεπώς, όπως παρουσιάζεται στην (Εικόνα 49), οι θάλαμοι 1.1, 2.1, 2.4 και 3.1 πρέπει να ενεργοποιηθούν.

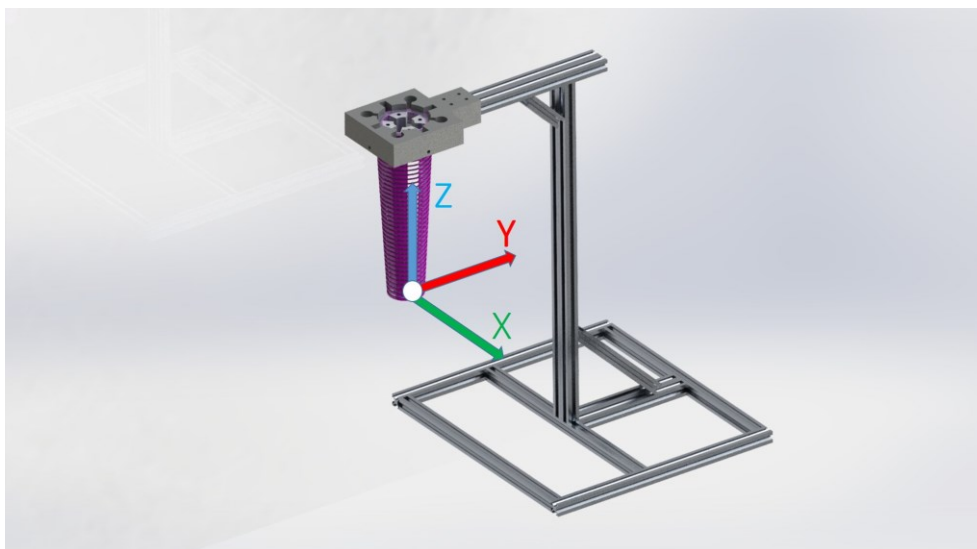
Κατεύθυνση κίνησης	Τμήμα 1				Τμήμα 2				Τμήμα 3			
	1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2	3.3	3.4
Χ	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✗
Υ	✗	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗
Z	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
-Χ	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✗
-Υ	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✗	✓
Σιγμοειδής	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✗

Σημειώνεται ότι στο μεσαίο τμήμα του βραχίονα επιβάλλεται η ενεργοποίηση δυο θαλάμων λόγω της συστροφής (45 μοιρών) που υπάρχει μεταξύ των τμημάτων, του κατά μήκος μυϊκού συστήματος. Με αντίστοιχο τρόπο, ο βραχίονας μπορεί να λυγίσει προς όλες τις κατευθύνσεις. Επιπλέον, λόγω της τμηματικότητας του βραχίονα, παρέχεται και η δυνατότητα να επιλέξουμε προς ποια κατεύθυνση θα λυγίσει κάθε τμήμα, επιτυγχάνοντας με τον τρόπο αυτό περίπλοκες γεωμετρίες (πόζες). Παρομοίως, με τον τρόπο λειτουργίας του κατά μήκος μυϊκού συστήματος πραγματοποιείται και ο έλεγχος του ελικοειδούς μυϊκού συστήματος. Για τη συστροφή του βραχίονα με κατεύθυνση προς τα αριστερά, ενεργοποιούνται οι αριστερόστροφοι θάλαμοι ενώ οι δεξιόστροφοι παραμένουν ανενεργοί. Αντίστοιχα ελέγχεται και η δεξιόστροφη συστροφή. Πέραν της δυνατότητας λυγισμού και περιστροφής του βραχίονα, παρέχεται και η δυνατότητα επιμήκυνσης. Αυτό επιτυγχάνεται με την ταυτόχρονη αύξηση της πίεσης όλων των θαλάμων του τμήματος που επιθυμούμε να επιμηκυνθεί.



Εικόνα 49 Αρίθμηση κατά μήκος μυϊκού συστήματος.

Συνδυάζοντας τις παραπάνω μεθόδους ελέγχου, ο βιομηχανικός ρομποτικός βραχίονας μπορεί να πραγματοποιήσει κινήσεις στους τρεις άξονες X, Y και Z, καθώς και περιστροφή γύρω από τον Z άξονα, παρέχοντας έτσι τέσσερις βαθμούς ελευθερίας στον βραχίονα.



Εικόνα 50 Σύστημα συντεταγμένων.

Λόγω της έλλειψης αισθητηριακών μονάδων εντός του βραχίονα, για την καταγραφή του σχήματος του, χρησιμοποιήθηκαν δυο κάμερες οι οποίες παρακολουθούν τον βραχίονα, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα στο λογισμικό να υπολογίσει την ακριβής θέση και πόζα του

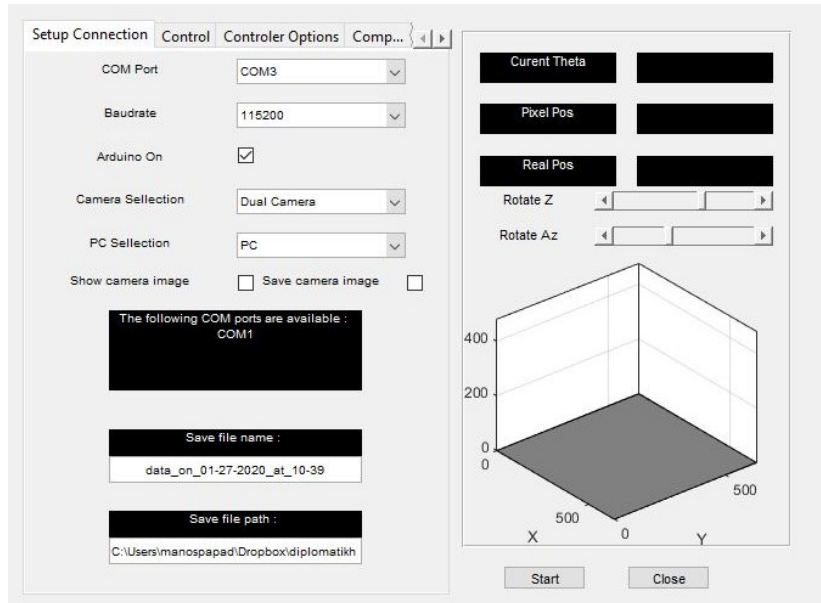
βραχίονα. Το σύστημα αυτό αξιοποιήθηκε ακολούθως και για την υλοποίηση στρατηγικών κλειστού βρόχου για τον έλεγχο του σχήματος του βραχίονα.

5.3. Λειτουργικό σύστημα βιομιμητικού ρομποτικού βραχίονα

Για την εύκολη χρήση του βραχίονα υλοποιήθηκε λειτουργικό σύστημα με διεπαφή χρήστη μέσω του λογισμικού Matlab της MathWorks. Το εν λόγω λογισμικό αναλαμβάνει την διασύνδεση του ηλεκτρονικού υπολογιστή με τη μονάδα οδήγησης του βιομιμητικού ρομποτικού βραχίονα, αποστέλλει εντολές ελέγχου των σωληνοειδών βάσει των επιλογών του χρήστη, παρακολουθεί μέσω δυο καμερών τον βραχίονα και υπολογίζει τη θέση και την πόζα του. Συνδυάζοντας τις εντολές του χρήστη και την πληροφορία από τις κάμερες, υπολογίζει τον τρόπο με τον οποίο πρέπει να ενεργοποιηθούν οι σωληνοειδείς βαλβίδες προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή κίνηση.

5.3.1. Περιβάλλον διεπαφής χρήστη

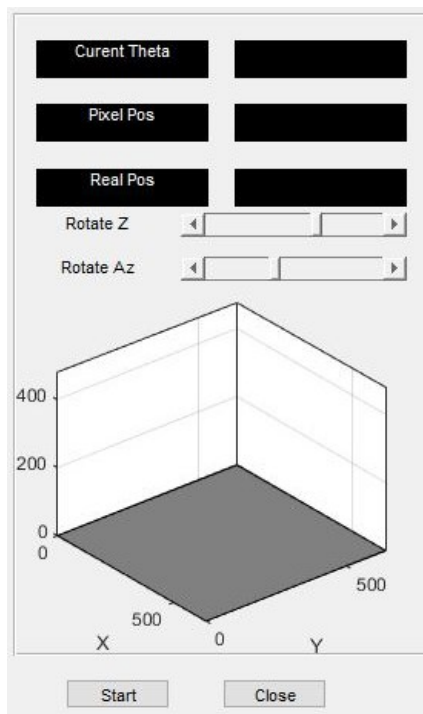
Το κεντρικό του παράθυρο του λογισμικού διεπαφής διαχωρίζεται σε τέσσερις καρτέλες (tabs). Η αρχική καρτέλα περιέχει επιλογές ρυθμίσεων για τη διασύνδεση του ηλεκτρονικού υπολογιστή με τη μονάδα οδήγησης του βιομιμητικού ρομποτικού βραχίονα. Η δεύτερη καρτέλα περιλαμβάνει επιλογές για τον έλεγχο του βραχίονα, ενώ η τρίτη καρτέλα περιλαμβάνει την επιλογή ανάμεσα σε διάφορους τρόπους ελέγχου της λειτουργίας κλειστού βρόχου. Τέλος, η τέταρτη καρτέλα περιέχει επιλογές που αφορούν στο σύστημα υπολογιστικής όρασης που υλοποιήθηκε για την παρακολούθηση του βραχίονα. Πέραν των καρτελών, το λογισμικό παρέχει και ορισμένες πληροφορίες της λειτουργίας του συστήματος, οι οποίες είναι συνεχώς εμφανείς ώστε ο χρήστης να μπορεί να τις συμβουλευτεί όταν πραγματοποιεί αλλαγή επιλογών στον τρόπο ελέγχου ή όταν περιηγείται μεταξύ των καρτελών του προγράμματος.



Εικόνα 51 Το κεντρικό παράθυρο του λογισμικού διεπαφής κατά την εκκίνηση.

Παραπάνω παρουσιάζεται η μορφή του προγράμματος κατά την εκκίνησή του (Εικόνα 51). Στα δεξιά του παραθύρου βρίσκονται οι καρτέλες μέσω των οποίων πραγματοποιούνται αλλαγές στις ρυθμίσεις του προγράμματος καθώς και ο έλεγχος του βραχίονα, ενώ στα αριστερά παρατίθενται οι γενικές πληροφορίες του συστήματος και τα πλήκτρα έναρξης και τερματισμού του προγράμματος.

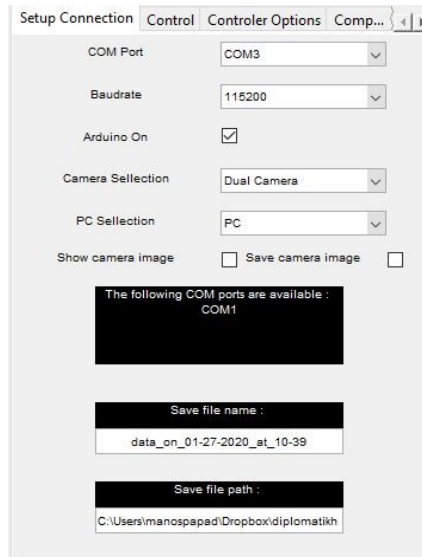
Κατά τη λειτουργία του συστήματος εικονίζονται ανά πάσα στιγμή οι πληροφορίες της τρέχουσας θέσης σε εικονοστοιχεία και σε χιλιοστά, η τρέχουσα κλίση του άκρου του βραχίονα, καθώς και μια τρισδιάστατη απεικόνιση η οποία προκύπτει από τον συνδυασμό των πληροφοριών που απορρέουν από την επεξεργασία των δυο εικόνων. Επιπλέον, παρέχεται η δυνατότητα περιστροφής της τρισδιάστατης απεικόνισης με τη χρήση δυο γραμμών κλίσης (scroll bars) ως προς τον άξονα Z και το αζιμούθιο (Εικόνα 52).



Εικόνα 52 Πεδίο γενικών πληροφοριών συστήματος.

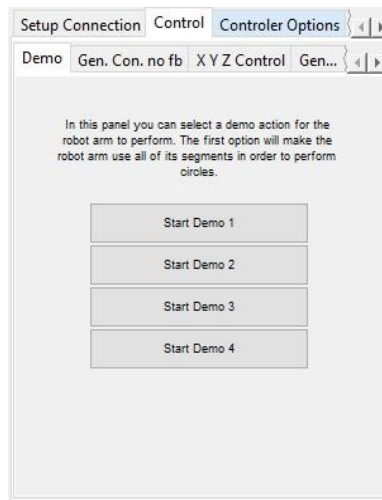
Η αρχική καρτέλα του προγράμματος αφορά στη ρύθμιση της επικοινωνίας. Μέσω αυτής, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τη σειριακή θύρα (COM Port) στην οποία είναι συνδεδεμένη η μονάδα οδήγησης, τον ρυθμό μετάδοσης (Baud rate), εάν θα χρησιμοποιηθεί ο μικροελεγκτής, εάν θα χρησιμοποιηθεί κάμερα και εάν ναι πόσες κάμερες, εάν θα χρησιμοποιηθεί ηλεκτρονικός υπολογιστής ο οποίος περιλαμβάνει κάμερα ή εάν θα χρησιμοποιηθεί εξωτερική κάμερα, εάν θα εμφανίζονται οι εικόνες από τις κάμερες που χρησιμοποιούνται και εάν θα αποθηκευτεί το βίντεο από την παρακολούθηση του βραχίονα. Επιπλέον, υπάρχουν και δυο πεδία στα οποία μπορεί να επιλέξει τον φάκελο στον οποίο θα αποθηκευτούν τα δεδομένα που συλλέγονται κατά τη λειτουργία του βραχίονα και το όνομα του αρχείου. Εάν η επιλογή του μικροελεγκτή δεν είναι επιλεγμένη, το πρόγραμμα εκτελείται κανονικά, με τη διαφορά ότι δεν συνδέεται στη μονάδα οδήγησης του βραχίονα αλλά μας επιτρέπει να έχουμε τη γραφική απεικόνιση του βραχίονα από τις κάμερες. Με αυτό τον τρόπο, μπορούμε να ρυθμίσουμε τις επιλογές των καμερών πριν την λειτουργία του βραχίονα. Στο πεδίο επιλογής της κάμερας παρέχονται οι επιλογές ανάμεσα σε καμία κάμερα, μια κάμερα, δυο κάμερες. Όταν επιλεχθεί η λειτουργία χωρίς κάμερες, ο βραχίονας βρίσκεται σε χειροκίνητη λειτουργία. Σε αυτή την περίπτωση, ο βραχίονας ελέγχεται χωρίς τη χρήση ανάδρασης, το σύστημα δε γνωρίζει τη θέση του βραχίονα και οι εκτελούμενες

κινήσεις προκύπτουν από τη χειροκίνητη λειτουργία του χρήστη. Όταν επιλεγθεί η χρήση μια κάμερας, το σύστημα έχει δισδιάστατη πληροφορία της θέσης του βραχίονα, η οποία είναι ιδανική σε περίπτωση που επιθυμούμε κίνηση σε ένα επίπεδο (XZ επίπεδο ή YZ επίπεδο). Τέλος, με την επιλογή χρήσης των δυο καμερών παρέχεται η πληροφορία της τρισδιάστατης θέσης του βραχίονα (X Y Z θέση και κλίση), επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο τη χρήση ανάδρασης για τον βέλτιστο έλεγχο του βραχίονα σε τρεις διαστάσεις.



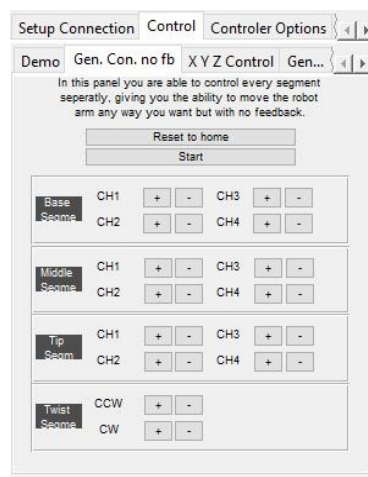
Εικόνα 53 Καρτέλα ρύθμισης επικοινωνίας.

Η δεύτερη καρτέλα αφορά στον έλεγχο του βραχίονα και διαχωρίζεται σε τέσσερις επιμέρους καρτέλες - στην καρτέλα επίδειξης, την καρτέλα ελέγχου θαλάμων χωρίς χρήση ανάδρασης, την καρτέλα ελέγχου XYZ του βραχίονα χωρίς χρήση ανάδρασης και τέλος την καρτέλα ελέγχου του βραχίονα με χρήση ανάδρασης. Η καρτέλα επίδειξης (Εικόνα 54) περιλαμβάνει τέσσερις ξεχωριστές επιδεικτικές κινήσεις, οι οποίες πραγματοποιούνται με την επιλογή του αντίστοιχου πλήκτρου. Κατά τη διεξαγωγή επίδειξης, ο χρήστης δεν έχει τη δυνατότητα να επηρεάσει τον βραχίονα μέχρις ότου να ολοκληρωθεί η επίδειξη.



Εικόνα 54 Καρτέλα επίδειξης λειτουργίας (demo).

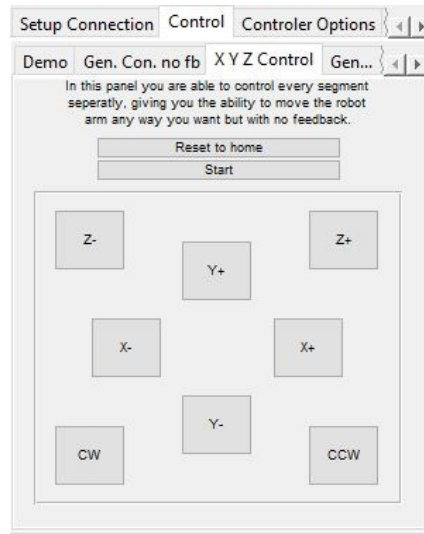
Η καρτέλα ελέγχου θαλάμων χωρίς χρήση ανάδρασης (Εικόνα 55) περιλαμβάνει ένα πλήκτρο για την εκκίνηση της εν λόγω μεθόδου ελέγχου του βραχίονα, ένα πλήκτρο για την επαναφορά του βραχίονα στην αρχική του κατάσταση, καθώς και πλήκτρα για αύξηση και μείωση της πίεσης αέρα για κάθε θάλαμο, διαχωρισμένα ανά τμήμα του βραχίονα. Κατά τη μέθοδο ελέγχου του βραχίονα με έλεγχο των θαλάμων, ο χειριστής του βραχίονα έχει τη δυνατότητα να ελέγξει κάθε θάλαμο του βραχίονα ξεχωριστά χωρίς να παρέχεται ανάδραση από το σύστημα.



Εικόνα 55 Καρτέλα ελέγχου θαλάμων χωρίς χρήση ανάδρασης.

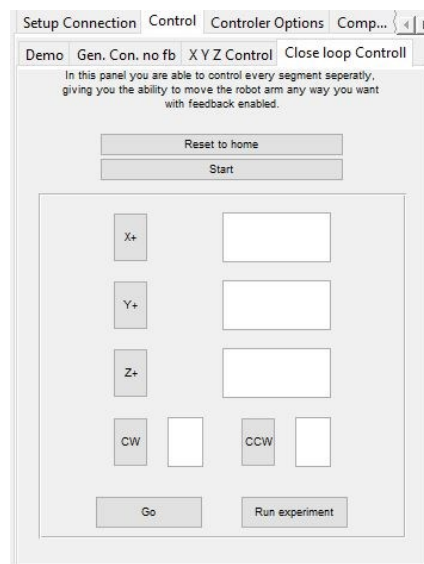
Ομοίως, η καρτέλα ελέγχου XYZ του βραχίονα χωρίς χρήση ανάδρασης (Εικόνα 56) περιλαμβάνει πλήκτρο έναρξης και πλήκτρο επαναφοράς. Στην παρούσα λειτουργία, παρέχεται δυνατότητα μετακίνησης του βραχίονα σε κάθε άξονα ξεχωριστά, καθώς και

περιστροφή του. Το λογισμικό υπολογίζει τους θαλάμους που πρέπει να ενεργοποιηθούν για την επίτευξη της επιθυμητής κίνησης.



Εικόνα 56 Καρτέλα ελέγχου κατά XYZ.

Στην τελευταία καρτέλα ελέγχου του βραχίονα με χρήση ανάδρασης, παρέχεται όπως και προηγουμένως, πλήκτρο έναρξης και επαναφοράς. Η παρούσα λειτουργία διαφέρει λόγω του ότι διαθέτει ανάδραση από το σύστημα, βάσει της οποίας υλοποιείται έλεγχος κλειστού βρόχου και το λογισμικό υπολογίζει τη θέση του βραχίονα.



Εικόνα 57 Καρτέλα ελέγχου με χρήση ανάδρασης.

Ο χειριστής του βραχίονα μπορεί να επιλέξει να κινήσει τον βραχίονα προς όλες τις κατευθύνσεις καθώς και να εισάγει συντεταγμένες ή την κλίση που επιθυμεί να υλοποιήσει

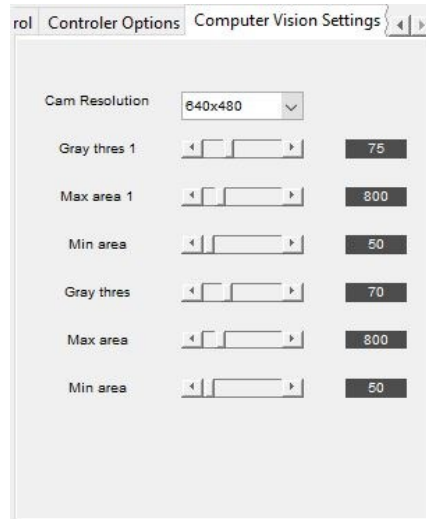
ο βραχίονας. Στη συνέχεια, το λογισμικό αναλαμβάνει να υπολογίσει τον τρόπο με τον οποίο θα ενεργοποιηθούν οι σωληνοειδείς βαλβίδες για την επίτευξη του στόχου.

Η τρίτη καρτέλα του λογισμικού αφορά στην επιλογή της μεθόδου που χρησιμοποιείται για την υλοποίηση ελέγχου κλειστού βρόχου και χρησιμοποιείται κατά τη λειτουργία ελέγχου του βραχίονα με χρήση ανάδρασης (Εικόνα 58). Ο χειριστής μπορεί να επιλέξει ανάμεσα σε τέσσερις διαφορετικές μεθόδους ελέγχου, P έλεγχο, PD έλεγχο, και ασαφή έλεγχο (Fuzzy control).



Εικόνα 58 Καρτέλα επιλογής τύπου ελεγκτή.

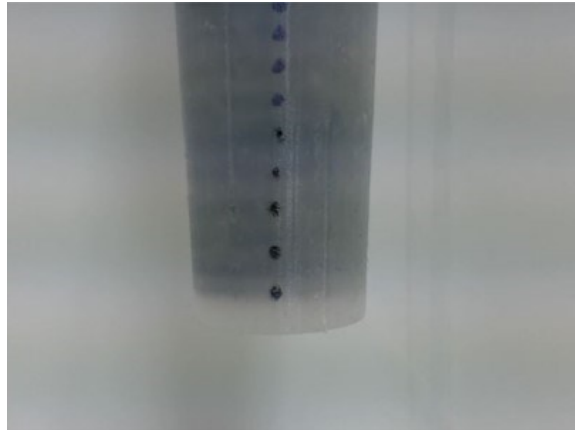
Η τέταρτη και τελευταία καρτέλα του συστήματος ευθύνεται για τον έλεγχο των ρυθμίσεων των καμερών. Στην εν λόγω καρτέλα ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ρυθμίσει, ξεχωριστά σε κάθε μια από τις κάμερες, την κατωφλίωση στο φιλτράρισμα της εικόνας, το μέγιστο εμβαδόν των σημείων που εντοπίζονται, το ελάχιστο εμβαδόν των σημείων που εντοπίζονται και τέλος την ανάλυση των καμερών. Οι επιλογές αυτές παρέχονται λόγω του ότι ο αλγόριθμος μηχανικής όρασης που αναπτύχθηκε είναι επιρρεπής στην αλλαγή του φωτισμού του περιβάλλοντος, συνεπώς εάν το σύστημα χρησιμοποιηθεί σε διαφορετική τοποθεσία, φωτισμό ή διάταξη επιβάλλεται να πραγματοποιηθεί ρύθμιση για τη βέλτιστη λειτουργία του.



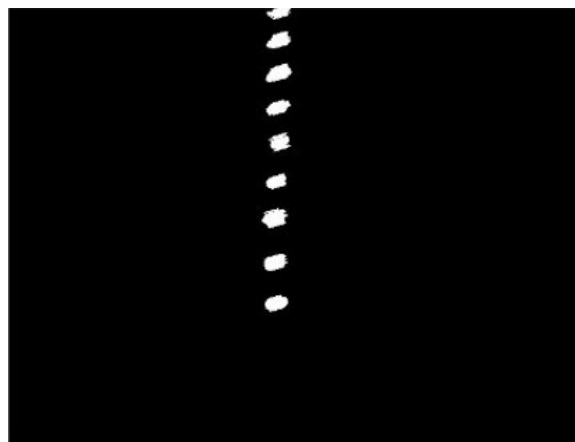
Εικόνα 59 καρτέλα ρυθμίσεων οπτικών μέσων.

5.3.2. Μηχανική όραση

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για την καταγραφή του σχήματος του βραχίονα και την επίτευξη ελέγχου κλειστού βρόχου χρησιμοποιήθηκε η τεχνολογία της μηχανικής όρασης ως μέσο ανάδρασης. Για τον σκοπό αυτό, υλοποιήθηκε κατάλληλος αλγόριθμος, ο οποίος εντοπίζει λευκά σημεία αναφοράς πάνω στον βιομημητικό ρομποτικό βραχίονα και στη συνέχεια υπολογίζει, βάσει της θέσης των σημείων μέσα στην εικόνα, την πόζα στην οποία βρίσκεται ο βραχίονας. Για τον εντοπισμό των λευκών σημείων εντός της εικόνας, αρχικά η έγχρωμη εικόνα που λαμβάνεται από την κάμερα μετατρέπεται σε ασπρόμαυρη εικόνα και στη συνέχεια πραγματοποιείται κατωφλίωση στη νέα εικόνα. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργείται μια νέα εικόνα η οποία είναι μαύρη με τα σημεία ενδιαφέροντος να είναι λευκά. Τέλος, στην εικόνα εντοπίζονται τα κέντρα των λευκών σημείων με τις συντεταγμένες τους εντός της εικόνας καθώς και το εμβαδόν τους.



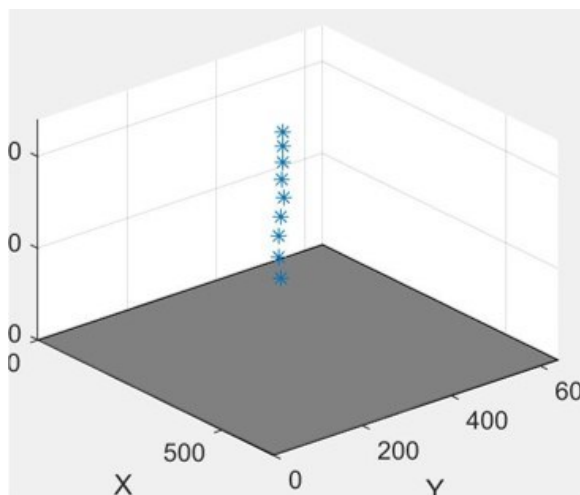
Εικόνα 60 Εικόνα RGB πλοκαμιού.



Εικόνα 61 Φιλτραρισμένη binary εικόνα.

Έχοντας γνώση της απόστασης της κάμερας από τον βραχίονα, έχουμε τη δυνατότητα να υπολογίσουμε με μεγάλη ακρίβεια το μέγεθος κάθε εικονοστοιχείου (pixel). Επομένως, εντοπίζοντας τη θέση του βραχίονα κατά τη διάρκεια μιας κίνησής του, μπορούμε να υπολογίσουμε την απόσταση που διένυσε καθώς και την ταχύτητα με την οποία κινήθηκε.

Όταν η μέθοδος που περιεγράφηκε παραπάνω εφαρμόζεται με χρήση μιας κάμερας, παρέχεται η δυνατότητα υπολογισμού των παραπάνω μόνο σε ένα επίπεδο του βραχίονα (επίπεδο YZ), το οποίο σε περίπτωση που ο βραχίονας κινείται σε δεύτερο επίπεδο μας δίνει λανθασμένα αποτελέσματα. Χρησιμοποιώντας μια επιπλέον κάμερα τοποθετημένη σε όμοια απόσταση από τον βραχίονα με διαφορά ενενήντα μοιρών από την πρώτη, έχουμε τη δυνατότητα να παρατηρήσουμε την κίνηση και πόζα του βραχίονα σε δυο επίπεδα, στο YZ και το XZ αντίστοιχα.



Εικόνα 62 Τρισδιάστατη απεικόνιση εντοπισμένων σημείων.

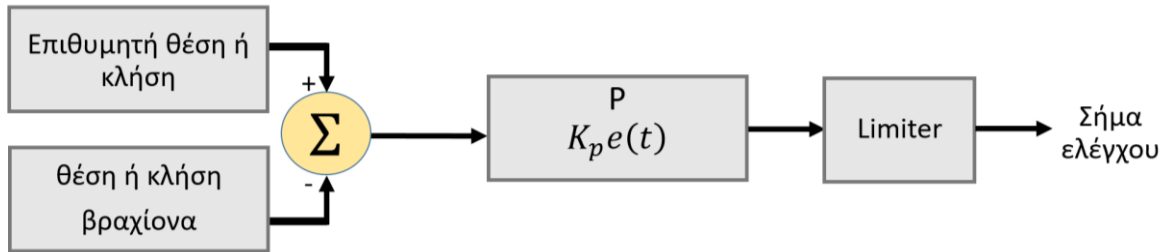
Τα σημεία που εντοπίζονται σε κάθε ένα από τα εν λόγω επίπεδα χρησιμοποιούνται για την τρισδιάστατη απεικόνιση του βραχίονα, καθώς από την πρώτη κάμερα έχουμε τις συντεταγμένες Y και Z των σημείων ενώ από τη δεύτερη υπολογίζουμε τη συντεταγμένη X. Η χρήση της διάταξης με δυο κάμερες παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού με μεγάλη ακρίβεια της θέσης, κλίσης, πόζας και ταχύτητας του βραχίονα στις τρεις διαστάσεις του χώρου.

5.3.3. Στρατηγικές ελέγχου

Όπως προαναφέρθηκε παραπάνω, για τον έλεγχο κλειστού βρόχου του βιομηχανικού ρομποτικού βραχίονα σχεδιάστηκαν και δοκιμάστηκαν δύο διαφορετικοί ελεγκτές. Ένας αναλογικός (P controller) και ένας αναλογικός - διαφορικός ελεγκτής (PD controller). Κάθε ελεγκτής έχει ως είσοδο την τρέχουσα θέση ή κλίση του άκρου του βραχίονα καθώς και την επιθυμητή θέση ή κλίση του, και καλείται να ελέγξει τις σωληνοειδείς βαλβίδες ώστε το άκρο του βραχίονα να κινηθεί στο επιθυμητό σημείο ή κλίση.

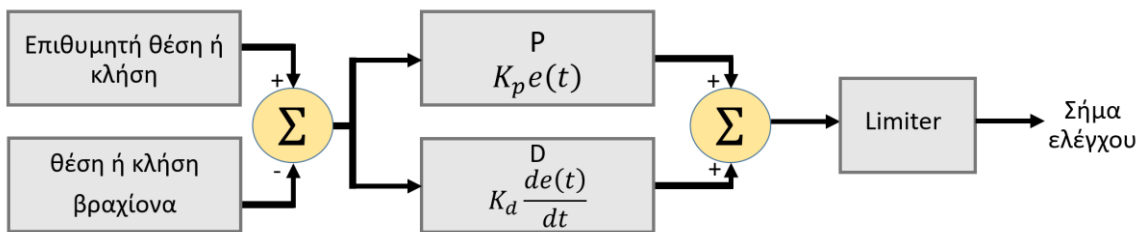
Ο πρώτος ελεγκτής που σχεδιάστηκε και δοκιμάστηκε είναι ένας αναλογικός ελεγκτής, ο οποίος έχει ως είσοδο την επιθυμητή θέση ή κλίση του άκρου του βραχίονα και ως έξοδο το σήμα ελέγχου για τις σωληνοειδείς βαλβίδες που ευθύνονται για την κίνηση του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζεται η διαφορά θέσης του βραχίονα από την επιθυμητή θέση και στη συνέχεια πολλαπλασιάζεται με τον αναλογικό όρο Kp και το αποτέλεσμα το οποίο προκύπτει είναι το σήμα ελέγχου. Λόγω του ότι το σύστημα χρησιμοποιεί για τον έλεγχο του το duty cycle των σωληνοειδών βαλβίδων, το αποτέλεσμα

του αναλογικού ελεγκτή είναι το duty cycle το οποίο αποστέλλεται στη μονάδα ελέγχου του βραχίονα. Για αυτό τον λόγο, το μέγιστο σήμα που προκύπτει από τον ελεγκτή δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερο του 100%.



Εικόνα 63 Αναλογικός ελεγκτής (P controller).

Ο δεύτερος ελεγκτής ο οποίος υλοποιήθηκε είναι ο αναλογικός – διαφορικός ελεγκτής (PD controller). Ο εν λόγω ελεγκτής, πέραν του αναλογικού όρου K_p , χρησιμοποιεί και τον διαφορικό όρο K_d ο οποίος πολλαπλασιάζεται επί το dx/dt και στη συνέχεια αθροίζονται τα αποτελέσματα των δυο αυτών πολλαπλασιασμών και προκύπτει το τελικό σήμα ελέγχου.



Εικόνα 64 Αναλογικός – διαφορικός ελεγκτής (PD controller).

6. Δυνατότητες Βιομιμητικού Ρομποτικού Βραχίονα

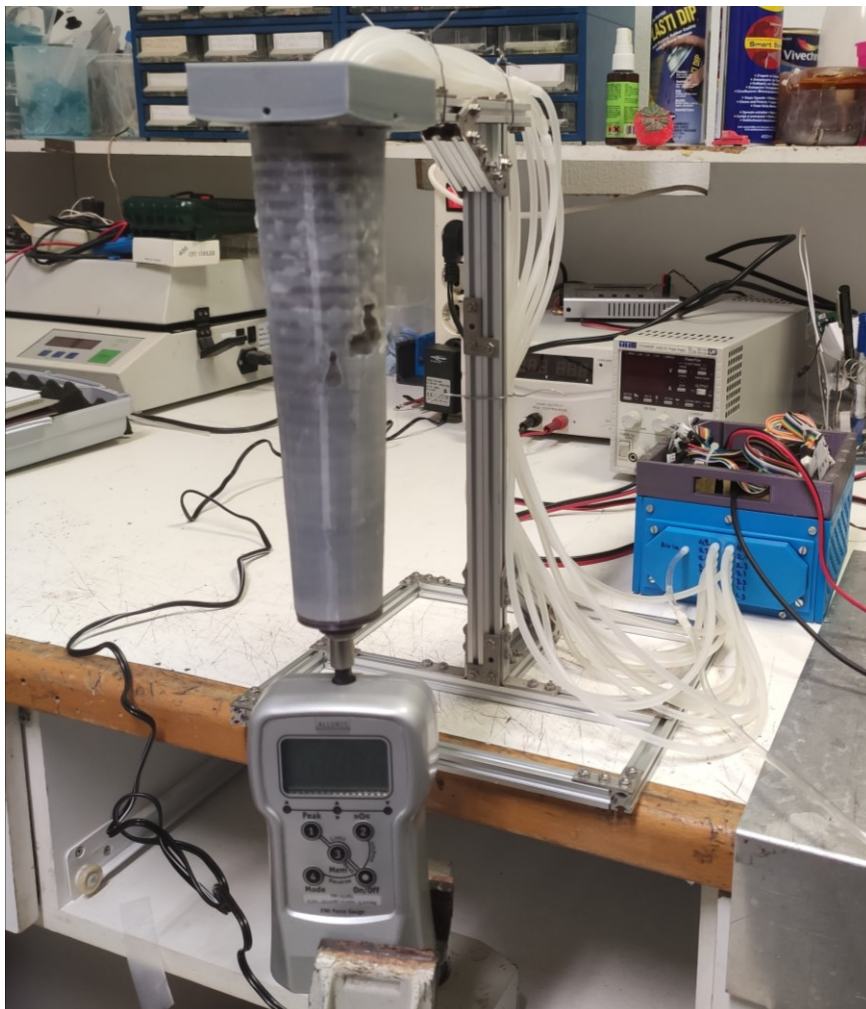
6.1. Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό επικεντρώνεται στον σχεδιασμό και στην εκτέλεση πειραμάτων για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του πρωτοτύπου βιομιμητικού ρομποτικού βραχίονα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Τα πειράματα που θα υλοποιηθούν θα εστιάσουν στον προσδιορισμό των δυνάμεων που μπορεί να ασκήσει ο βραχίονας, την ταχύτητα με την οποία κινείται και τις διάφορες πόζες που μπορεί να επιτύχει. Ποιο συγκεκριμένα θα πραγματοποιηθούν πειράματα σχετικά με την δύναμη που μπορεί να ασκήσει ο βραχίονας σε σχέση με την πίεση του πεπιεσμένου αέρα, την ταχύτητα σε σχέση με την πίεση του αέρα, την μετατόπιση του άκρου σε σχέση με τον αριθμό παλμών και την πίεση του αέρα, καθώς και πειράματα για τον έλεγχο κλειστού βρόχου.

6.2. Πειράματα

Ακολουθώντας την ολοκλήρωση της κατασκευής του βιομιμητικού ρομποτικού βραχίονα, καθώς και του λογισμικού οδήγησής του, πραγματοποιήθηκε εκτενής σειρά πειραμάτων για

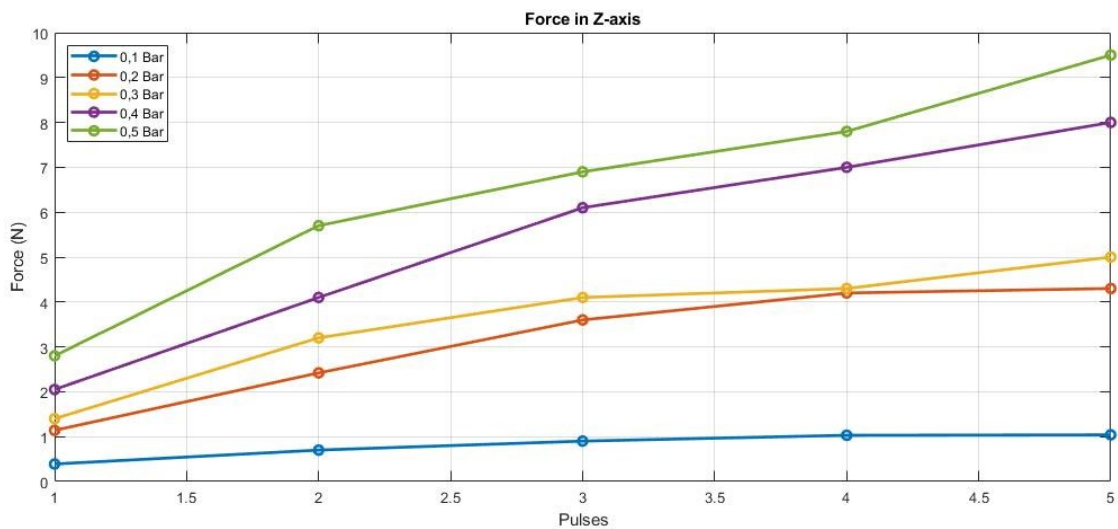
την διαπίστωση της ορθής λειτουργίας και τον προσδιορισμό των δυνατοτήτων του. Τα πειράματα σχεδιάστηκαν με τρόπο ώστε να αξιολογηθεί ο βιομημητικός βραχίονας, καθώς και το λογισμικό οδήγησής του.



Εικόνα 65 Πειραματική διάταξη βιομημητικού ρομποτικού βραχίονα - Aluris.

Το πρώτο πείραμα που πραγματοποιήθηκε αφορά τον προσδιορισμό της δύναμης που μπορεί να ασκήσει ο βραχίονας στην κατεύθυνση του Z άξονα όταν πραγματοποιείται η λειτουργία επιμήκυνσής του. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από την πειραματική διάταξη του βραχίονα σε κάθετη θέση, ένα σύστημα Aluris τοποθετημένο σε επαφή με το άκρο του βραχίονα και έναν ρυθμιστή πίεσης πεπιεσμένου αέρα στην τροφοδοσία αέρα του συστήματος. Ο βραχίονας επιλέχθηκε να βρίσκεται σε κατακόρυφη θέση ώστε η επίδραση της βαρύτητας να είναι παράλληλη στον Z άξονα του. Οι μετρήσεις δύναμης λήφθηκαν για διάφορες τιμές της πίεσης της παροχής πεπιεσμένου αέρα, από 0.1 *bar* έως 0.5 *bar*, και των παλμών για την είσοδο του πεπιεσμένου αέρα στους θαλάμους του

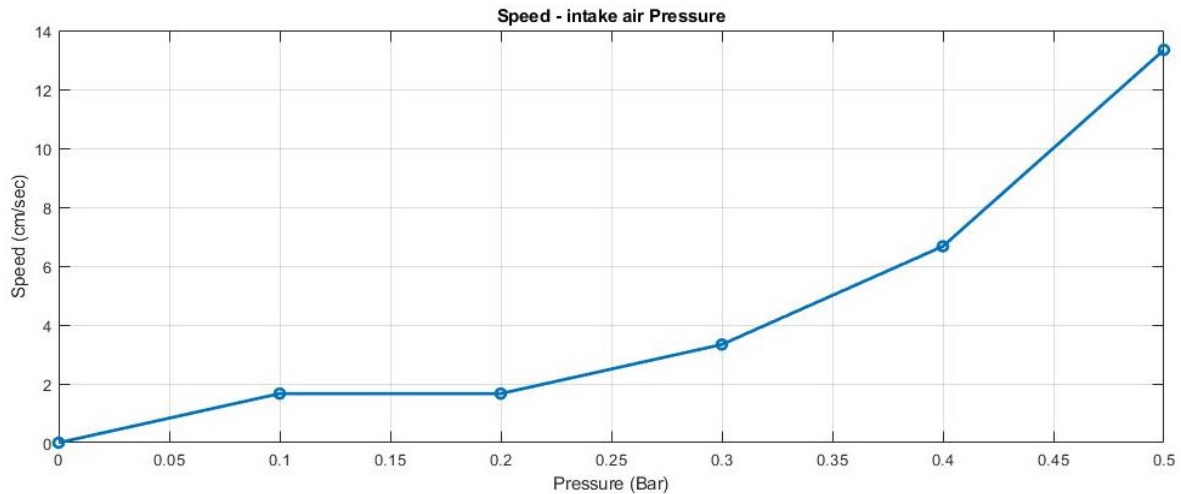
βιομηχανικού ρομποτικού βραχίονα. Με το εν λόγω πείραμα διαπιστώσαμε την αναμενόμενη συσχέτιση της δύναμης του βραχίονα με την πίεση πεπιεσμένου αέρα του συστήματος, καθώς η δύναμη αυξάνεται με αντίστοιχη αύξηση της πίεσης αέρα εισόδου του συστήματος. Επίσης διαπιστώθηκε ότι η δύναμη ανά παλμό αυξάνεται αναλογικά με την αύξηση της πίεσης του πεπιεσμένου αέρα στην είσοδο του συστήματος, βάσει του οποίου μπορούμε να συμπεράνουμε επίσης ότι η ποσότητα του αέρα η οποία εισέρχεται εντός των θαλάμων στη διάρκεια ενός παλμού, είναι ανάλογη της πίεσης του δικτύου τροφοδοσίας του.



Εικόνα 66 Διάγραμμα Δύναμης – αριθμός παλμών για πίεση αέρα από 0,1 bar έως 0,5 bar στον Z άξονα του βραχίονα.

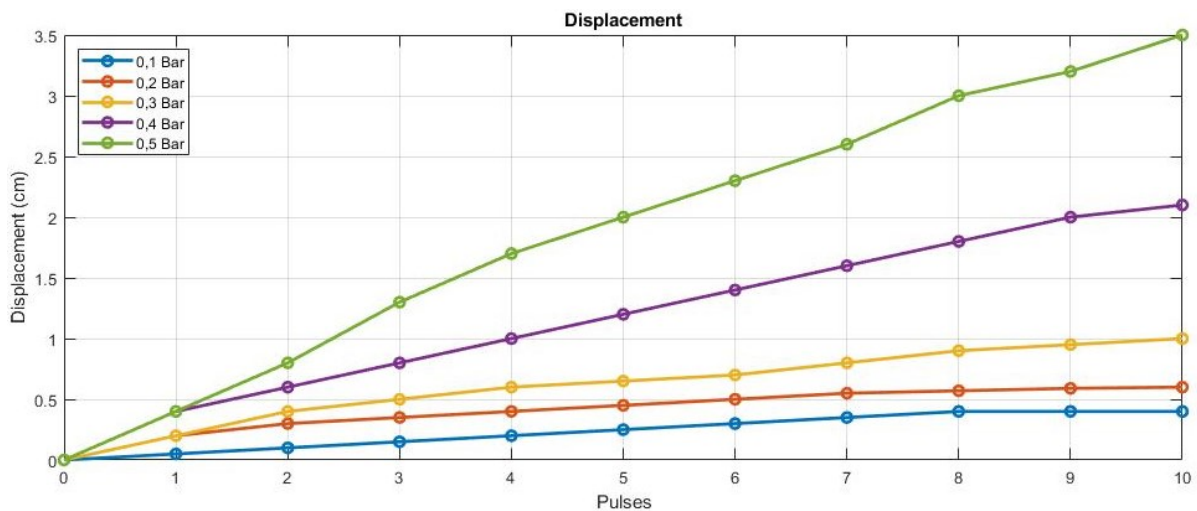
Το δεύτερο πείραμα που πραγματοποιήθηκε αφορά τον προσδιορισμό της ταχύτητας του άκρου του βιομηχανικού ρομποτικού βραχίονα και την αντιστοίχιση των παλμών εισαγωγής πεπιεσμένου αέρα στους θαλάμους με την μετατόπισή του. Στο εν λόγω πείραμα ο βραχίονας βρισκόταν σε κάθετη διάταξη και οι παλμοί δίδονταν σε όλους τους θαλάμους του ισόποσα, με αποτέλεσμα ο βραχίονας να εκκινεί στην αρνητική διεύθυνση του Z άξονα.

Κεφάλαιο 6



Εικόνα 67 Διάγραμμα ταχύτητας – πίεσης αέρα εισόδου.

Το τρίτο σε σειρά πείραμα σχεδιάστηκε για τον προσδιορισμό της μετατόπισης του άκρου του βραχίονα σε σχέση με την πίεση του πεπιεσμένου αέρα εισόδου. Με τον τρόπο αυτό, προσδιορίζεται το ελάχιστο βήμα που μπορεί να πραγματοποιήσει ο βιομημητικός ρομποτικός βραχίονας ανάλογα με την πίεση του αέρα που του παρέχεται.



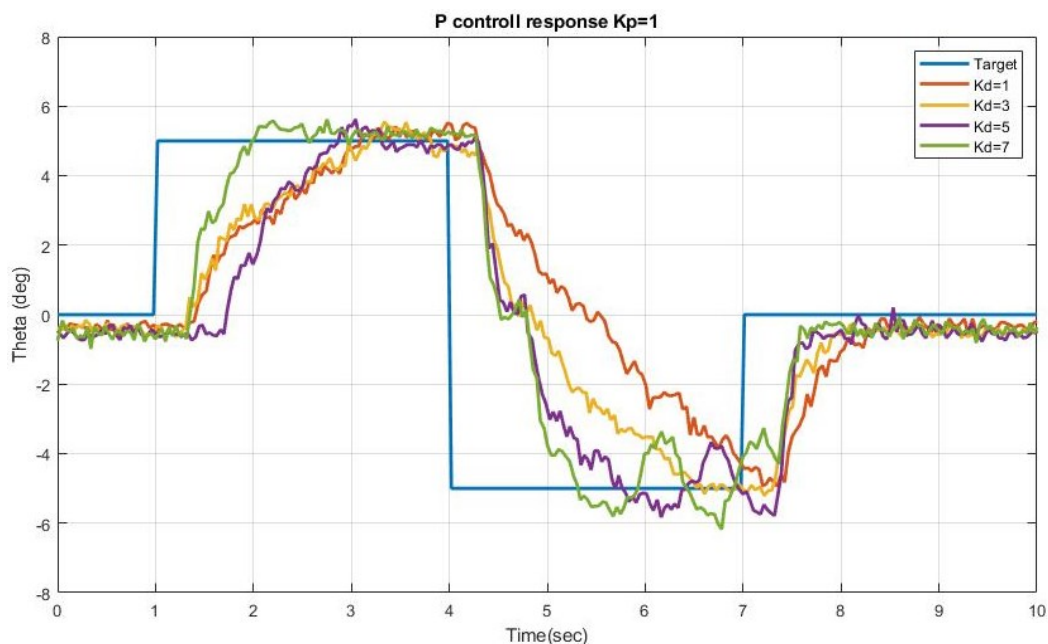
Εικόνα 68 Διάγραμμα μετατόπισης – παλμών αέρα.

Αναλύοντας τα παραπάνω δεδομένα, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η μετατόπιση του βραχίονα είναι ανάλογη της πίεσης εισόδου του πεπιεσμένου αέρα.



Εικόνα 69 Πειραματική διάταξη βιομμητικού ρομποτικού βραχίονα ελεγχου κλειστού βρογχου.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν πειράματα για τη βελτιστοποίηση της απόκρισης του συστήματος σε λειτουργία ελέγχου κλειστού βρόχου. Για την υλοποίηση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε η πειραματική διάταξη που παρουσιάζεται παραπάνω (Εικόνα 69 Πειραματική διάταξη βιομμητικού ρομποτικού βραχίονα ελεγχου κλειστού βρογχου.), η οποία αποτελείται από τον βραχίονα σε κατακόρυφη θέση και δυο κάμερες (Logitech carl zeiss tessar hd 1080p) οι οποίες είναι τοποθετημένες κάθετα μεταξύ τους ώστε η κάθε μια να παρακολουθεί ένα από τα τρία επίπεδα του βραχίονα, πιο συγκεκριμένα η πρώτη κάμερα παρακολουθεί το επίπεδο ZX ενώ η δεύτερη παρακολουθεί το επίπεδο ZY. Λόγω της ανάλυσης των καμερών (640*480) καθώς και λόγω του φωτισμού κατά την διάρκεια των πειραμάτων, τα δεδομένα από την εύρεση θέσης και κλίσης του βραχίονα περιέχουν θόρυβο ο οποίος εμφανίζεται στα διαγράμματα απόκρισης του συστήματος σε έλεγχο κλειστού βρόχου. Για λόγους ασφάλειας τα πειράματα τα οποία παρουσιάζονται οι μετακινήσεις του βραχίονα έχουν επιλεγθεί να είναι μικρές, 5 deg σε έλεγχο κλίσης και 3 cm σε έλεγχο θέσης, οι οποίες δεν είναι τα μέγιστα όρια του βραχίονα. Αρχικά, καταγράφηκε η απόκριση του βραχίονα με χρήση αναλογικού ελεγκτή (P controller) σε έλεγχο κλίσης στον Y άξονα.

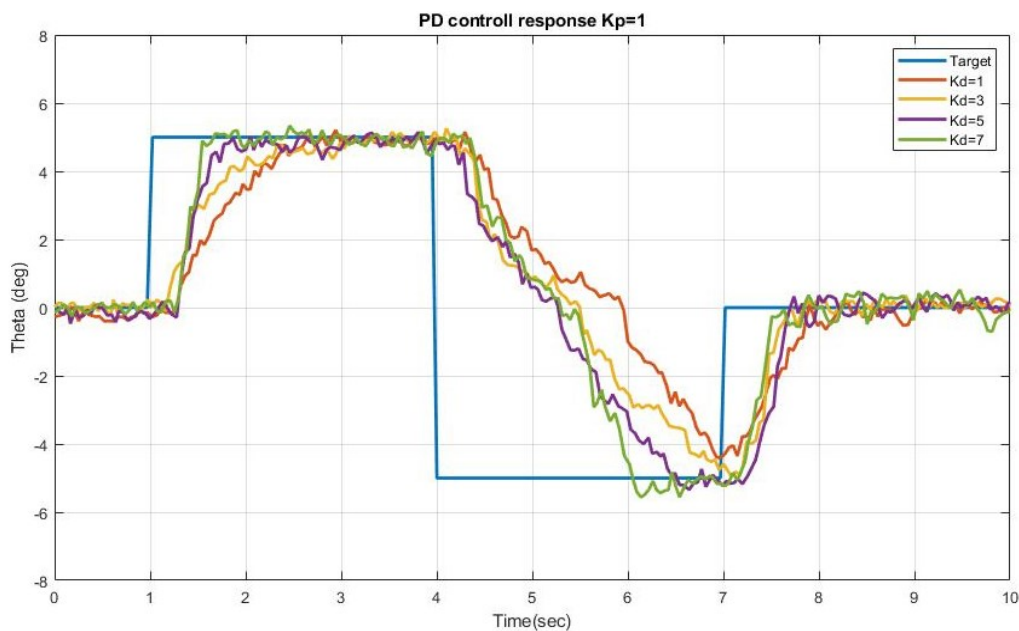


Εικόνα 70 Απόκριση συστήματος σε έλεγχο κλίσης για $K_p = 1,4,7,10,13$.

Από το παραπάνω διάγραμμα απόκρισης του συστήματος για διαφορετικές τιμές του αναλογικού όρου K_p , μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι το σύστημα παρουσιάζει υστέρηση κατά την εκκίνηση του κατά 14-26 msec, και για όλες τις τιμές του K_p το σύστημα είναι σε θέση να φτάσει στην επιθυμητή θέση. Επίσης, κατά το μεταβατικό στάδιο στο σημείο μηδέν όπου πραγματοποιείται εναλλαγή στον ενεργό θάλαμο του συστήματος από τον θάλαμο δυο στον θάλαμο τέσσερα, παρατηρείται μια ασυνέχεια για μεγάλες τιμές K_p . Αυτό οφείλεται στην υστέρηση που παρουσιάζει το σύστημα κατά την έναρξη λειτουργίας των θαλάμων του. Επίσης παρατηρείται η εξάλειψη της εν λόγω ασυνέχειας για μικρές τιμές K_p . Για τιμές K_p μεγαλύτερες του 13 το σύστημα γίνεται ασταθές και δεν μπορεί να σταθεροποιηθεί στην επιθυμητή θέση. Τέλος, παρατηρήθηκε διαφοροποίηση της απόκρισης του συστήματος κατά την απομάκρυνσή του από την μηδενική θέση, όπου στους θαλάμους εισέρχεται αέρας, σε σχέση με την απόκρισή του κατά την επιστροφή προς τη μηδενική θέση, όπου από τους θαλάμους εξέρχεται αέρας. Αυτό οφείλεται στο ότι κατά την εισαγωγή του αέρα στους θαλάμους, η πίεση του αέρα αυξάνεται (από 1 bar έως 1,5 bar) μειώνοντας έτσι τη διαφορά πίεσης μεταξύ της εισόδου και του θαλάμου και μειώνοντας αντίστοιχα την ποσότητα του αέρα που εισέρχεται ανά παλμό εισαγωγής. Αντιθέτως, κατά την έξοδο του αέρα από τους θαλάμους, η διαφορά πίεσης παραμένει σταθερή λόγω του ότι η έξοδος του αέρα καταλήγει στο περιβάλλον, οπότε και η ποσότητα του αέρα που εξέρχεται παραμένει σταθερή ανά

παλμό. Το αποτέλεσμα του παραπάνω μπορεί να παρατηρηθεί στην απόκριση του συστήματος κατά τη μετακίνησή του από το σημείο μηδέν μοιρών προς τις πέντε μοίρες όπου απαιτείται χρόνος 0.98 sec , ενώ στην επαναφορά του από τις μείον πέντε μοίρες στο μηδέν απαιτείται χρόνος 0.49 sec .

Έπειτα καταγράφηκε η απόκριση του συστήματος με χρήση αναλογικού – διαφορικού ελεγκτή (PD controller) όπου για σταθερή τιμή του αναλογικού όρου K_p μεταβάλαμε τον διαφορικό συντελεστή K_d .

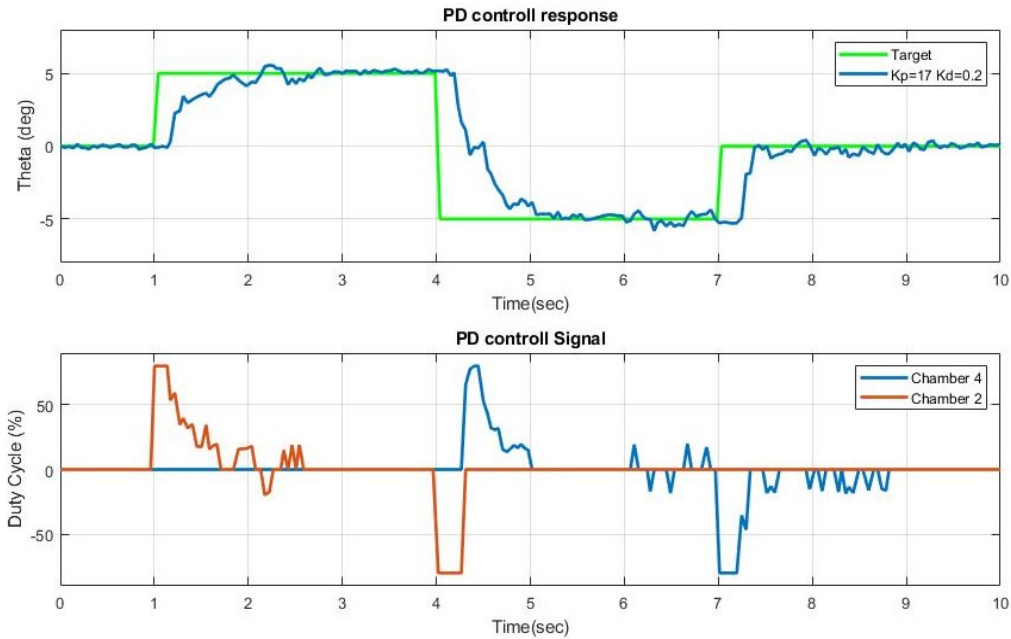


Εικόνα 71 Απόκριση συστήματος σε έλεγχο κλίσης για $K_d = 1,3,5,7$ και $K_p = 1$.

Στο εν λόγω πείραμα παρατηρείται η επίδραση του διαφορικού συντελεστή στην απόκριση του συστήματος με σταθερό αναλογικό συντελεστή $K_p=1$. Για μεγάλες τιμές του διαφορικού συντελεστή K_d παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας του συστήματος.

Τέλος, βάσει των παραπάνω, ρυθμίστηκε ο αναλογικός – διαφορικός ελεγκτής για τη βέλτιστη απόκριση του συστήματος.

Κεφάλαιο 6

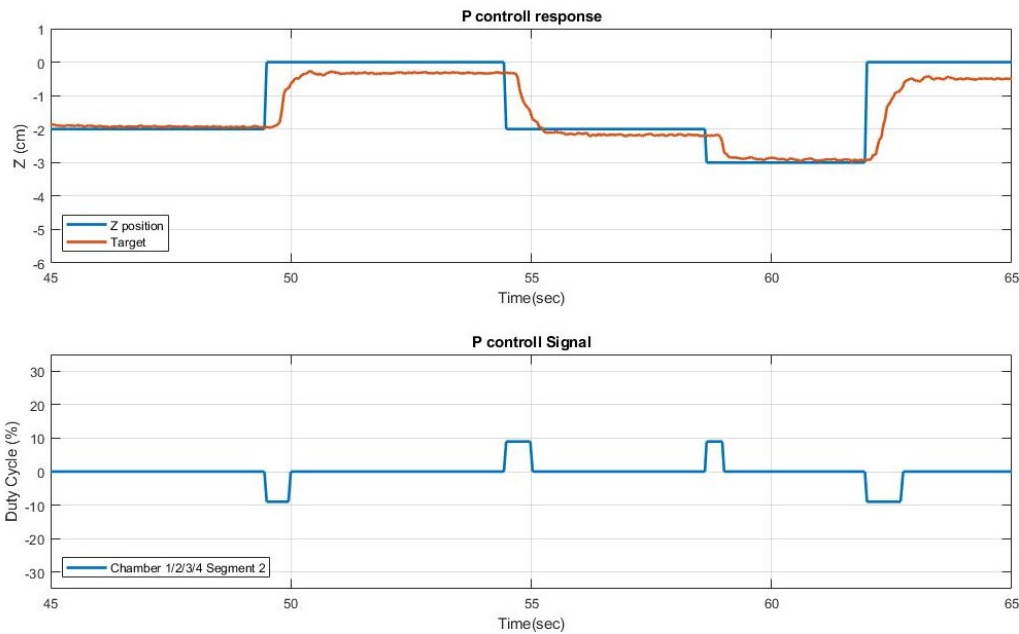


Εικόνα 72 α) Απόκριση συστήματος σε έλεγχο κλίσης για $K_d = 0,2$ και $K_p = 17$ β) Σήμα ελέγχου σωληνοειδών βαλβίδων.

Όπως παρατηρείται από τα παραπάνω, η απόκριση του συστήματος με χρήση του ρυθμιζόμενου PD ελεγκτή έχει βελτιωθεί σε σχέση με τον απλό αναλογικό ελεγκτή. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται μείωση στον χρόνο ανόδου από 980 msec σε 840 msec όπως και μείωση του χρόνου επιστροφής προς τη μηδενική θέση από 490 msec σε 385 msec , τα οποία αντιστοιχούν σε βελτίωση 14.28% στην άνοδο και 21.43% στην επιστροφή του συστήματος.

Πέραν των παραπάνω πειραμάτων που σχετίζονται με τον έλεγχο κλίσης του συστήματος, πραγματοποιήθηκαν πειράματα και για τον έλεγχο θέσης του συστήματος. Για τα εν λόγω πειράματα, επιλέχθηκε η κίνηση στον Z άξονα, όπου απαιτείται η χρήση όλων των θαλάμων κάθε τμήματος του συστήματος.

Κεφάλαιο 6



Εικόνα 73 α) Απόκριση συστήματος σε έλεγχο θέσης για $K_p = 6$ β) Σήμα ελέγχου σωληνοειδών βαλβίδων.

Από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, και σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται η χρονική υστέρηση των 14-26 $msec$ καθώς και η διαφοροποίηση της απόκρισης του συστήματος μεταξύ των κινήσεων που απαιτούν εισαγωγή αέρα εντός των θαλάμων και των κινήσεων όπου ο αέρας εξάγεται από τους θαλάμους.

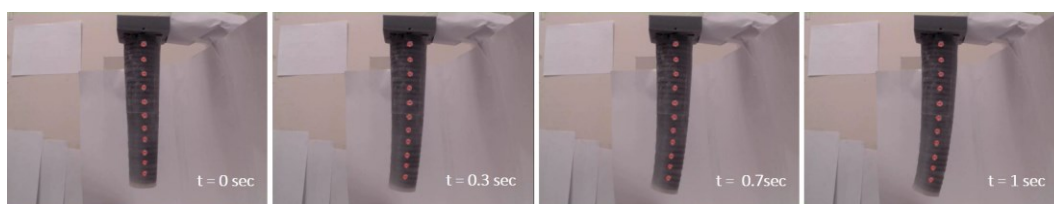
Λόγω του ότι στην εν λόγω κίνηση ενεργοποιούνται και οι τέσσερις θάλαμοι του τμήματος, το ελάχιστο βήμα που μπορεί να πραγματοποιηθεί είναι περίπου 0.7 mm , το οποίο έχει ως αποτέλεσμα η κίνηση να είναι γρήγορη έχοντας όμως το μειονέκτημα ότι ο έλεγχος θέσης του είναι σχετικά δύσκολος. Για τον λόγο αυτό, στα πειράματα επιλέχθηκε η αποδοχή σφάλματος από -0,5 mm έως +0,5 mm , το οποίο μπορεί να παρατηρηθεί και στο παραπάνω γράφημα. Βάσει αυτών, επιλέχθηκε η χρήση του αναλογικού ελεγκτή με τον αναλογικό συντελεστή $K_p = 6$.

Τέλος πραγματοποιήθηκαν πειράματα για την εξακρίβωση της δυνατότητας του βραχίονα να πραγματοποιήσει περίπλοκες κινήσεις. Η πρώτη κίνηση αφορά την επιμήκυνση του βραχίονα κατά τη διεύθυνση του Z άξονα χρησιμοποιώντας όλα τα τμήματά του ταυτοχρόνως.



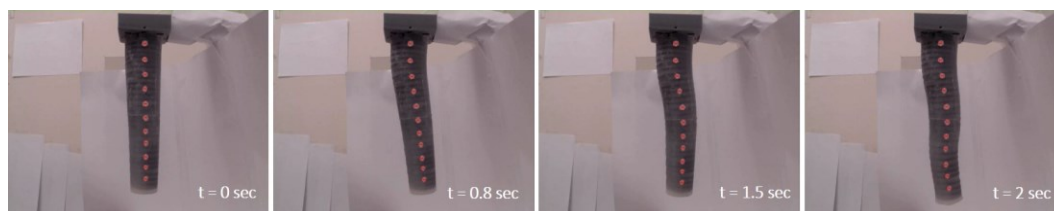
Εικόνα 74 Χρονοδιάγραμμα (timelapse) επιμήκυνσης βραχίονα.

Η δεύτερη κίνηση που πραγματοποιήθηκε είναι η ταυτόχρονη κάμψη όλων των τμημάτων του βραχίονα προς την ίδια κατεύθυνση.



Εικόνα 75 Χρονοδιάγραμμα (timelapse) κάμψης βραχίονα.

Η τρίτη κίνηση η οποία πραγματοποιήθηκε είναι η κυματοειδής κίνηση, στην οποία τα τμήματα λυγίζουν προς την αντίθετη κατεύθυνση από το ακριβώς προηγούμενό τους, αρχίζοντας από το τμήμα της βάσης το οποίο λυγίζει προς τη θετική κατεύθυνση. Έπειτα το μεσαίο τμήμα λυγίζει προς την αρνητική κατεύθυνση και τέλος το τελευταίο τμήμα λυγίζει προς τη θετική κατεύθυνση.



Εικόνα 76 Χρονοδιάγραμμα (timelapse) κυματοειδής κίνησης βραχίονα.

6.3. Δυνατότητες

Με την ολοκλήρωση των πειραμάτων τα οποία εκτελέστηκαν με τον βιομημητικό ρομποτικό βραχίονα καταλήξαμε στα παρακάτω συμπεράσματα σχετικά με τις δυνατότητες του.

Ο βραχίονας είναι σε θέση να ασκήσει δυνάμεις έως και $10N$ οι οποίες είναι ανάλογες της πίεσης του πεπιεσμένου αέρα στην εισαγωγή της μονάδας ελέγχου του. Εάν η πίεση του αέρα εισαγωγής είναι της τάξης των 0.1 bar μπορούμε να ασκήσουμε ελεγχόμενα μικρές δυνάμεις αλλά όχι μεγάλες, ενώ εάν η πίεση είναι της τάξης των 0.5 bar μπορούμε να

ασκήσουμε μεγάλες δυνάμεις και όχι μικρές. Μπορούμε έτσι να συμπεράνουμε ότι εάν επιθυμούμε να έχουμε την δυνατότητα ο βραχίονας να ασκεί ελεγχόμενα δυνάμεις οι οποίες να διαφέρουν από μικρές ($<0,2 N$) έως μεγάλες ($>10 N$) θα πρέπει να πραγματοποιείτε έλεγχος της πίεσης του πεπιεσμένου αέρα στην είσοδο της μονάδας ελέγχου του ή και σε κάθε θάλαμο του βραχίονα ξεχωριστά.

Επίσης ο βραχίονας έχει την ικανότητα να κινηθεί με ταχύτητες από $1,8 cm/sec$ έως και $13,6 cm/sec$, οι οποίες είναι αντίστοιχες της πίεσης του πεπιεσμένου αέρα της εισόδου, καθώς εάν η πίεση του δικτύου είναι μεγάλη, η ποσότητα αέρα η οποία εισέρχεται στον θάλαμο ανά παλμό αυξάνεται με τελικό αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας κίνησης του συστήματος ανά παλμό ελέγχου. Παρομοίως με τον έλεγχο δύναμης, ο έλεγχος πίεσης του συστήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καλύτερο έλεγχο της ταχύτητας του βραχίονα.

Επιπλέον, λόγω του ότι ο βραχίονας διαθέτει τρία ξεχωριστά τμήματα τα οποία ελέγχονται ξεχωριστά το κάθε ένα, έχει τη δυνατότητα να κινηθεί με ακρίβεια σε διάφορες επιθυμητές κλίσεις ή και θέσεις του άκρου καθώς και σε ξεχωριστές κλίσεις για κάθε τμήμα του μεμονωμένα ή σε συντονισμό με τα λοιπά τμήματα.

7. Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα

7.1. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάπτυξη και αξιολόγηση του πρωτότυπου βιομιμητικού βραχίονα και διατυπώνονται προτάσεις μελλοντικής έρευνας ως συνέχεια των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας.

7.2. Ανασκόπηση και συμπεράσματα μεταπτυχιακής εργασίας

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε μελέτη για τον σχεδιασμό και την κατασκευή ενός βιομιμητικού ρομποτικού βραχίονα από μαλακά υλικά βασισμένος στην μορφολογία του πλοκαμιού των χταποδιών. Πέραν της υλοποίησης του βραχίονα υλοποιήθηκε η μονάδα οδήγησης του, καθώς και το απαραίτητο λογισμικό για τον έλεγχο του συστήματος. Με την ολοκλήρωση του συστήματος πραγματοποιήθηκε πληθώρα πειραμάτων βάση των οποίων καταλήξαμε στα παρακάτω συμπεράσματα :

- ❖ Μέσω της μελέτης της φυσιολογίας του μυϊκού συστήματος του πλοκαμιού των χταποδιών και με χρήση μαλακών υλικών είναι εφικτή η κατασκευή βιομιμητικών ρομποτικών βραχιόνων που αναπαράγουν με ικανοποιητική πιστότητα τις βασικές αρχές κίνησης του πραγματικού πλοκαμιού.

- ❖ Μέσω του σχεδιασμού και της κατασκευής του βιομιμητικού ρομποτικού βραχίονα καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι η γεωμετρία των θαλάμων ενός μαλακού επενεργητή μπορεί να υπερβεί την κίνηση της κάμψης, παραδείγματος χάριν ένας ελικοειδής θάλαμος μπορεί να προσφέρει συστροφή του επενεργητή.
- ❖ Οι δοκιμές κατά την περίοδο σχεδιασμού της κατασκευής κατέδειξαν ότι η χρήση δακτυλίων, για τον περιορισμό της κατεύθυνση παραμόρφωσης των θαλάμων, προσφέρει μεγάλη αύξηση της παραμόρφωσης προς την επιθυμητή κατεύθυνση καθώς και σταθερότητα στην κατασκευή.
- ❖ Με τη διεκπεραίωση της κατασκευής και των πειραμάτων που εκτελέστηκαν με αυτήν, επιβεβαιώθηκε ότι η κατασκευή είναι ικανή να αναπαράγει ρεαλιστικά κινήσεις ενός πλοκαμιού με ικανοποιητική ταχύτητα και ακρίβεια.
- ❖ Η επιλογή του τρισδιάστατου εκτυπωτή που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή των καλουπιών για την χύτευση των τμημάτων του βραχίονα είναι σημαντική καθώς η ανάλυση του εκτυπωτή καθορίζει την ελαχίστη διάσταση που μπορεί να κατασκευάσει.
- ❖ Το κόστος για την κατασκευή του βραχίονα έχει σημαντικό ρόλο για τον σχεδιασμό του καθώς και για την μεθοδολογία ελέγχου του βραχίονα. Ο εν λόγω βραχίονας κοστολογείται κατά προσέγγιση στο ποσό των διακοσίων πενήντα ευρώ, το οποίο είναι αρκετά χαμηλό ποσό και εισάγει περιορισμούς όπως το είδος των σωληνοειδών βαλβίδων και αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκαν.

7.3. Μελλοντική έρευνα

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, στην οποία σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ο βιομιμητικός ρομποτικός βραχίονας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υπόβαθρο για μελλοντική έρευνα σε βιομιμητικά ρομποτικά συστήματα εμπνευσμένα από έμβιους οργανισμούς. Μελλοντικά πεδία έρευνας αποτελούν τα παρακάτω :

- ❖ Περαιτέρω έρευνα για την αύξηση των βαθμών ελευθέριας του βιομιμητικού ρομποτικού βραχίονα, καθώς και μείωση του μεγέθους του. Με την μείωση του μεγέθους κάθε τμήματος, ο βραχίονας μπορεί να κατασκευαστεί αποτελούμενος από περισσότερα τμήματα και θα είναι σε θέση να πραγματοποιήσει κινήσεις και πόζες με μεγαλύτερο βαθμό δυσκολίας και μεγαλύτερη ακρίβεια.

- ❖ Περαιτέρω έρευνα στην κινήσεις των πλοκαμιών των χταποδιών για βελτίωση της μίμησης των κινήσεων ενός χταποδιού. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να κατασκευαστούν βιομιμητικά ρομποτικά χταπόδια τα οποία ,πέραν από την εμφάνισή τους , μπορούν να μιμηθούν και την κίνηση ενός χταποδιού ρεαλιστικά, βρίσκοντας εφαρμογή στην παρακολούθηση έμβιων οργανισμών σε θαλάσσιο περιβάλλον χωρίς να τους διαταράσσει.
- ❖ Κατασκευή του εν λόγω βραχίονα σε μικροσκοπική κλίμακα για χρήση ως λαπαροσκοπικό εργαλείο σε ιατρικές επεμβάσεις. Λόγω του μεγάλου αριθμού βαθμών ελευθερίας του εν λόγω βραχίονα, καθώς και τη μικρή σκληρότητά του, εάν ο βραχίονας κατασκευαστεί στο μέγεθος λαπαροσκοπικού εργαλείου μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε επεμβάσεις όπου το εργαλείο έρχεται σε επαφή με μαλακούς ιστούς του σώματος.
- ❖ Κατασκευή καλουπιών με χρήση τρισδιάστατου εκτυπωτή τύπου SLA ο οποίος έχει κατά μεγάλο βαθμό καλύτερη ανάλυση από τους εκτυπωτές τύπου FDM. Με την εν λόγω μέθοδο μπορεί να κατασκευαστεί αντίστοιχος βραχίονας με μικρότερο μέγεθος και καλύτερη ακριβιά διαστάσεων.
- ❖ Χρήση ενσωματωμένων αισθητήρων επιμήκυνσης κατά μήκος του βραχίονα για τον υπολογισμό της θέσης και πόζας του βραχίονα χωρίς χρήση εξωτερικών αισθητήρων.

Αναφορές

- [1] Tavakoli M., Rocha R.P., Lourenço J., Lu T., Majidi C. (2017) Soft Bionics Hands with a Sense of Touch Through an Electronic Skin. In: Laschi C., Rossiter J., Iida F., Cianchetti M., Margheri L. (eds) "Soft Robotics: Trends, Applications and Challenges". Biosystems & Biorobotics, vol 17. Springer, Cham, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-46460-2_2
- [2] Geng S., Wang Y., Wang C., Kang R. (2018) A Space Tendon-Driven Continuum Robot. In: Tan Y., Shi Y., Tang Q. (eds) "Advances in Swarm Intelligence". ICSI 2018. Lecture Notes in Computer Science, vol 10942. Springer, Cham, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-93818-9_3
- [3] Trimmer, Barry & Lin, Huai-Ti & Leisk,. (2013). "Soft Robots in Space: A Perspective for Soft Robotics". Acta Futura. 6. 69-79. DOI: 10.2420/AF06.2013.69.
- [3] C. Laschi, M. Cianchetti, B. Mazzolai, L. Margheri, M. Follador & P. Dario (2012) "Soft Robot Arm Inspired by the Octopus", Advanced Robotics, 26:7, 709-727, DOI: [10.1163/156855312X626343](https://doi.org/10.1163/156855312X626343)
- [5] V. Vavourakis, D. Bampasakis, A. Kazakidi, N. Pateromichelakis, J. A. Ekaterinaris and D. P. Tsakiris, "Generation of primitive behaviors for non-linear hyperelastic octopus-inspired robotic arm" *2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical*

Robotics and Biomechatronics (BioRob), Rome, 2012, pp.725-730. doi: 10.1109/BioRob.2012.6290684

[6] P. Polygerinos, Z. Wang, K. C. Galloway, R. J. Wood, C. J. Walsh, "Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation", *Robotics and Autonomous Systems*, Volume 73, 2015, Pages 135-143, ISSN 0921-8890, <https://doi.org/10.1016/j.robot.2014.08.014>.

[7] *Shepherd, Robert F. et al "Multigait soft robot." Proceedings of the National Academy of Sciences 108.51 (2011): 20400-20403. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1116564108>*

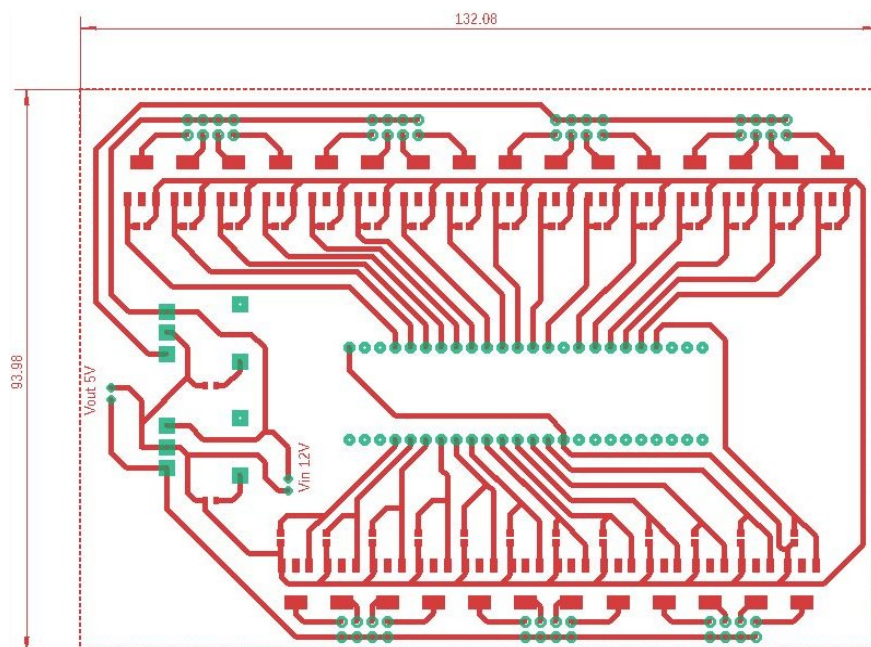
[8] Cianchetti, Matteo & Ranzani, Tommaso & Gerboni, Giada & De Falco, Iris & Laschi, Cecilia & Menciassi, Arianna. (2013). "STIFF-FLOP surgical manipulator: Mechanical design and experimental characterization of the single module". *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 3576-3581. 10.1109/IROS.2013.6696866.

[9] M. Sfakiotakis, A. Kazakidi, T. Evdaimon, A. Chatzidaki and D. P. Tsakiris, "Multi-arm robotic swimmer actuated by antagonistic SMA springs", *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Hamburg, 2015, pp. 1540-1545. doi: 10.1109/IROS.2015.7353572

[10] M. Sfakiotakis, A. Kazakidi, D. P. Tsakiris, "Octopus-inspired multi-arm robotic swimming", *2015 Bioinspir. Biomim.* 10 035005. DOI: 10.1088/1748-3190/10/3/035005

Παράρτημα Α : Κατασκευή Πλακέτας Τυπωμένου Κυκλώματος (PCB)

Για την κατασκευή της πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος χρειάστηκε αρχικά να σχεδιαστεί το κύκλωμα στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Ο σχεδιασμός της πλακέτας υλοποιήθηκε μέσω του προγράμματος Eagle της Autodesk.

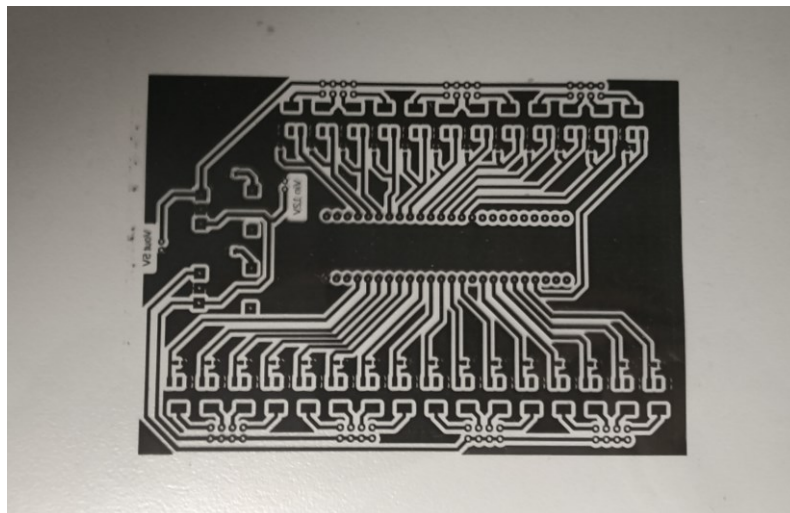


Εικόνα 77 Σχεδιάγραμμα πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος.

Μετά τον σχεδιασμό του κυκλώματος τα σχέδια τυπώθηκαν σε χαρτί διαφάνειας. Για αυτόν τον λόγο εξαγάγαμε από το πρόγραμμα Eagle αρχείο εικόνας σε μορφή pdf όπου το σχέδιο αναπαρίστανται μονόχρωμο μαύρο.

Για την εκτύπωση του κυκλώματος σε πλακέτα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της χαλκογραφίας. Με τη μέθοδο αυτή, είμαστε σε θέση να μεταφέρουμε το σχέδιο του κυκλώματος από το χαρτί στην πλακέτα. Η πλακέτα που χρησιμοποιείται στη μέθοδο αυτή αποτελείται από μια επίστρωση χαλκού στη μπροστά όψη της ενώ η βάση της αποτελείται από πλαστικό. Πάνω από τον χαλκό υπάρχει επικάλυψη από φωτοευαίσθητο φιλμ.

Αρχικά κατασκευάζεται ένας «φάκελος» ο οποίος αποτελείται από τα δυο ρυζόχαρτα που περιέχουν τις δυο όψεις του κυκλώματος που θέλουμε να εκτυπώσουμε. Ο φάκελος πρέπει να είναι καλά ευθυγραμμισμένος ώστε να ταιριάζουν απόλυτα όλες οι τρύπες των δυο σχεδίων. Αν η ευθυγράμμιση δεν είναι καλή, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα η πλακέτα που θα τυπωθεί να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Στη συνέχεια τοποθετείται η πλακέτα που θα εκτυπωθεί μέσα στον φάκελο και τοποθετείται μέσα στη μηχανή έκθεσης UV ακτινοβολίας. Με την έκθεση στην UV ακτινοβολία η φωτοευαίσθητη επικάλυψη που βρίσκεται πάνω στον χαλκό και είναι εκτεθειμένη στην ακτινοβολία καταστρέφεται, ενώ η επικάλυψη κάτω από τα εκτυπωμένα κομμάτια προστατεύεται.



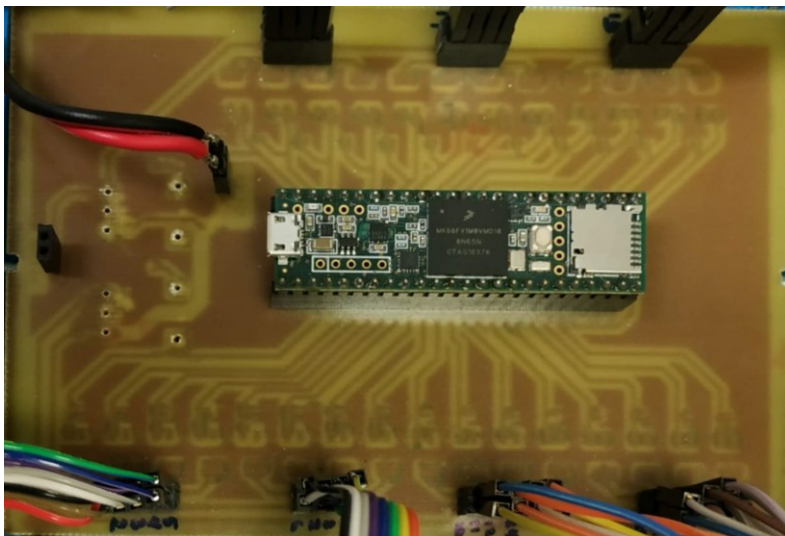
Εικόνα 78 εκτυπωμένο σχεδιάγραμμα πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος.

Μετά την έκθεση των δυο όψεων σε UV ακτινοβολία, η πλακέτα καθαρίζεται από τα υπολείμματα του προστατευτικού φιλμ με μείγμα υδροξειδίου του νατρίου (καυστική σόδα).

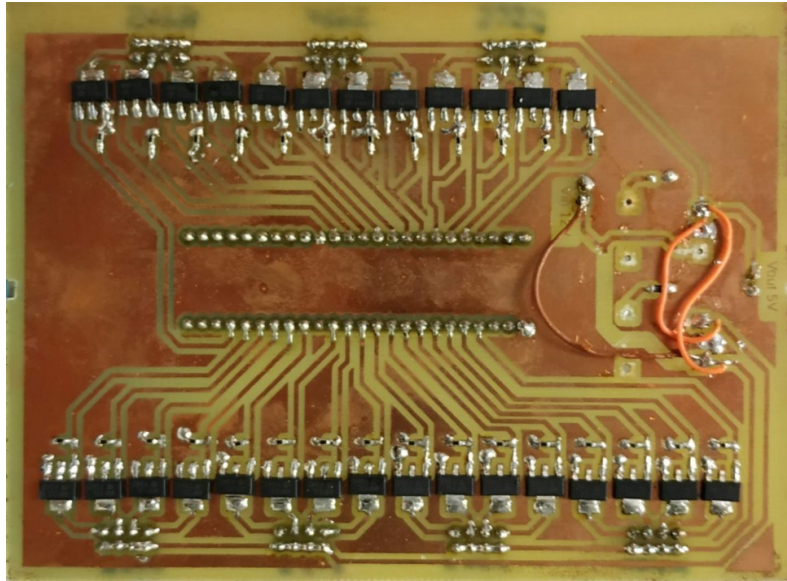
Στη συνέχεια, η πλακέτα ξεπλένεται από το μείγμα διοξειδίου του νατρίου με νερό και τοποθετείται σε λουτρό διαλύματος χλωριούχου σιδήρου. Μέσα στο διάλυμα του χλωριούχου σιδήρου, ο χαλκός που δεν προστατεύεται από φιλμ διαβρώνεται μέχρι να εξαλειφθεί εντελώς, ενώ ο χαλκός που προστατεύεται από το φιλμ παραμένει ανέπαφος. Σε περίπτωση που το λουτρό διαρκέσει περισσότερο χρόνο από το απαραίτητο υπάρχει κίνδυνος να διαβρωθεί και ο χαλκός που προστατεύεται κάτω από το φιλμ με αποτέλεσμα την αχρήστευση της πλακέτας.

Στη συνέχεια η πλακέτα καθαρίζεται με ακετόνη για την απομάκρυνση του φιλμ που έχει παραμείνει πάνω στον χαλκό. Σε περίπτωση που η πλακέτα δεν καθαριστεί, η συγκόλληση πάνω στην πλακέτα θα είναι δύσκολη έως και αδύνατη λόγω του φιλμ το οποίο δεν επιτρέπει την εύκολη συγκόλληση των στοιχείων με τον χαλκό.

Μετά τον καθαρισμό, η πλακέτα πρέπει να τρυπηθεί με κατάλληλο τρυπάνι για την τοποθέτηση των στοιχείων. Τέλος, τοποθετούνται τα ηλεκτρονικά στοιχεία πάνω στην πλακέτα και συγκολλούνται προσεκτικά. Παρακάτω, παρουσιάζεται η τελική πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος που κατασκευάστηκε, με τα στοιχεία τοποθετημένα.



Εικόνα 79 Άνω όψη πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος.



Εικόνα 80 Κάτω όψη πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος.

Παράρτημα Β :Κώδικας Λογισμικού Οδήγησης Βιομιμητικού Ρομποτικού Βραχίονα

Ο έλεγχος λειτουργίας του βιομιμητικού ρομποτικού βραχίονα πραγματοποιείται με χρήση του λογισμικού οδήγησης που κατασκευάστηκε μέσω του προγράμματος Matlab. Παρακάτω παρατίθεται ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίησή του.

```
clear; close; clc; instrreset;
%% OctoArm control UI - mrk8.0
% This is the 9.3 vesion of octoarm control UI for the perpose of
% controlling the soft bio-mimetic robotic arm
%% Arxikopoihseis
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
format compact
PathNow=pwd;      Filename = sprintf('data_%s', datestr(now, 'on_mm-dd-
yyyymmdd_at_HH-MM'));  FolderName='data';
paize=0;
targetThetaXY=0;  errorTheta=0;
totalTime=0;
dt=0;
Kp=0;
Kd=0;
controllerToUse=0;
thetaTargetX=0;
thetaTargetY=0;
targetZ=0;
counterE=0;
countT=0;
```

```

Segments=1;
plotAll=0;

%% UI creation
UIparameters.f=figure(1);
UIparameters.f.Position=[480 350 680 500];
UIparameters.f.Visible='on';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Tabs %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
UIparameters.tabgp = uitabgroup(UIparameters.f, 'Position', [.02 .02 .52
.95]);
UIparameters.tab1 = uitab(UIparameters.tabgp, 'Title', 'Setup Connection');
UIparameters.tab2 = uitab(UIparameters.tabgp, 'Title', 'Control');
UIparameters.tab3 = uitab(UIparameters.tabgp, 'Title', 'Controller Options');
UIparameters.tab4 = uitab(UIparameters.tabgp, 'Title', 'Computer Vision
Settings');

UIparameters.tabgp2= uitabgroup(UIparameters.tab2, 'Position', [.0 .0 1 1]);
UIparameters.tab22 = uitab(UIparameters.tabgp2, 'Title', 'Demo');
UIparameters.tab24 = uitab(UIparameters.tabgp2, 'Title', 'Gen. Con. no fb');
UIparameters.tab21 = uitab(UIparameters.tabgp2, 'Title', 'X Y Z Control');
UIparameters.tab23 = uitab(UIparameters.tabgp2, 'Title', 'Theta Control');
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Computer vision set %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% tab 4 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
UIparameters.txtCamRes=icontrol(UIparameters.tab4, 'Style', 'Text', 'String',
'Cam Resolution', 'Units', 'normalized', 'Position', [.05 .85 .3 .04]);
UIparameters.txtCamRes.FontUnits='normalized';
UIparameters.CamRes =
icontrol(UIparameters.tab4, 'Style', 'popup', 'String', {'640x480', '160x90',
'160x120', '176x144', ...
'320x180', '320x240', '352x288', '432x240', '640x360', '800x448',
'800x600', '864x480', '960x720', ...
'1024x576', '1280x720', '1600x896', '1920x1080', '2304x1296',
'2304x1536' }, 'Units', 'normalized', 'Position', [.4 .85 .3 .04]);
UIparameters.CamRes.FontUnits='normalized';

UIparameters.GrayThres1=icontrol(UIparameters.tab4, 'Style', 'Slider', 'Min',
0, 'Max', 1, 'SliderStep', [0.01 0.010], 'Units', 'normalized', 'Position', [.4
.75 .3 .04]);
UIparameters.GrayThres1.Value=0.4;
UIparameters.txtGrayThres1=icontrol(UIparameters.tab4, 'Style', 'Text', 'Stri
ng', 'Gray thres 1', 'Units', 'normalized', 'Position', [.05 .75 .3 .04]);
UIparameters.txtGrayThres1.FontUnits='normalized';
UIparameters.txtGrayThres1Val=icontrol(UIparameters.tab4, 'Style', 'Text', 'S
tring', '', 'Units', 'normalized', 'Position', [.8 .75 .15 .04], ...
'BackgroundColor', [.3 .3 .3], 'ForegroundColor', 'w');
UIparameters.txtGrayThres1Val.FontUnits='normalized';
UIparameters.txtGrayThres1Val.String=UIparameters.GrayThres1.Value;

UIparameters.AreaMax1=icontrol(UIparameters.tab4, 'Style', 'Slider', 'Min', 0,
'Max', 500, 'SliderStep', [0.01 0.010], 'Units', 'normalized', 'Position', [.4
.65 .3 .04]);
UIparameters.AreaMax1.Value=300;
UIparameters.txtAreaMax1=icontrol(UIparameters.tab4, 'Style', 'Text', 'String
', 'Max area 1', 'Units', 'normalized', 'Position', [.05 .65 .3 .04]);
UIparameters.txtAreaMax1.FontUnits='normalized';
UIparameters.txtAreaMax1Val=icontrol(UIparameters.tab4, 'Style', 'Text', 'Str
ing', '', 'Units', 'normalized', 'Position', [.8 .65 .15 .04], ...
'BackgroundColor', [.3 .3 .3], 'ForegroundColor', 'w');

```

```

UIparameters.txtAreaMax1Val.FontUnits='normalized';
UIparameters.txtAreaMax1Val.String=UIparameters.AreaMax1.Value;

UIparameters.AreaMin1=icontrol(UIparameters.tab4,'Style','Slider','Min',0,
'Max',500,'SliderStep',[0.01 0.010],'Units','normalized','Position',[.4
.55 .3 .04]);
UIparameters.AreaMin1.Value=25;
UIparameters.txtAreaMin1=icontrol(UIparameters.tab4,'Style','Text','String',
'Min area','Units','normalized','Position',[.05 .55 .3 .04]);
UIparameters.txtAreaMin1.FontUnits='normalized';
UIparameters.txtAreaMin1Val=icontrol(UIparameters.tab4,'Style','Text','String',
'', 'Units','normalized','Position',[.8 .55 .15 .04],...
'BackgroundColor',[.3 .3 .3],'ForegroundColor','w');
UIparameters.txtAreaMin1Val.FontUnits='normalized';
UIparameters.txtAreaMin1Val.String=UIparameters.AreaMin1.Value;

UIparameters.GrayThres2=icontrol(UIparameters.tab4,'Style','Slider','Min',
0,'Max',1,'SliderStep',[0.01 0.010],'Units','normalized','Position',[.4
.45 .3 .04]);
UIparameters.GrayThres2.Value=0.4;
UIparameters.txtGrayThres2=icontrol(UIparameters.tab4,'Style','Text','String',
'Gray thres','Units','normalized','Position',[.05 .45 .3 .04]);
UIparameters.txtGrayThres2.FontUnits='normalized';
UIparameters.txtGrayThres2Val=icontrol(UIparameters.tab4,'Style','Text','String',
'', 'Units','normalized','Position',[.8 .45 .15 .04],...
'BackgroundColor',[.3 .3 .3],'ForegroundColor','w');
UIparameters.txtGrayThres2Val.FontUnits='normalized';
UIparameters.txtGrayThres2Val.String=UIparameters.GrayThres2.Value;

UIparameters.AreaMax2=icontrol(UIparameters.tab4,'Style','Slider','Min',0,
'Max',500,'SliderStep',[0.01 0.010],'Units','normalized','Position',[.4
.35 .3 .04]);
UIparameters.AreaMax2.Value=300;
UIparameters.txtAreaMax2=icontrol(UIparameters.tab4,'Style','Text','String',
'Max area','Units','normalized','Position',[.05 .35 .3 .04]);
UIparameters.txtAreaMax2.FontUnits='normalized';
UIparameters.txtAreaMax2Val=icontrol(UIparameters.tab4,'Style','Text','String',
'', 'Units','normalized','Position',[.8 .35 .15 .04],...
'BackgroundColor',[.3 .3 .3],'ForegroundColor','w');
UIparameters.txtAreaMax2Val.FontUnits='normalized';
UIparameters.txtAreaMax2Val.String=UIparameters.AreaMax2.Value;

UIparameters.AreaMin2=icontrol(UIparameters.tab4,'Style','Slider','Min',0,
'Max',500,'SliderStep',[0.01 0.010],'Units','normalized','Position',[.4
.25 .3 .04]);
UIparameters.AreaMin2.Value=25;
UIparameters.txtAreaMin2=icontrol(UIparameters.tab4,'Style','Text','String',
'Min area','Units','normalized','Position',[.05 .25 .3 .04]);
UIparameters.txtAreaMin2.FontUnits='normalized';
UIparameters.txtAreaMin2Val=icontrol(UIparameters.tab4,'Style','Text','String',
'', 'Units','normalized','Position',[.8 .25 .15 .04],...
'BackgroundColor',[.3 .3 .3],'ForegroundColor','w');
UIparameters.txtAreaMin2Val.FontUnits='normalized';
UIparameters.txtAreaMin2Val.String=UIparameters.AreaMin2.Value;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Controllers %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% tab 3 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
UIparameters.textContrSet=icontrol(UIparameters.tab3,'Style','Text','String',
g',...

```

```

    'In this panel you can chose the type of controller that will be used in
order to controle OctoArm.',...
    'Units','normalized','Position',[.1 .7 .8 .2]);
UIparameters.textContrSet.FontUnits='normalized';

UIparameters.P =
uicontrol(UIparameters.tab3,'Style','checkbox','Units','normalized','Positi
on',[.2 .7 .1 .04]);
UIparameters.P.FontUnits='normalized';
UIparameters.P.Value=1;
UIparameters.textP=uicontrol(UIparameters.tab3,'Style','Text','String','P',
'Units','normalized','Position',[.05 .7 .1 .04]);
UIparameters.textP.FontUnits='normalized';

UIparameters.PD =
uicontrol(UIparameters.tab3,'Style','checkbox','Units','normalized','Positi
on',[.45 .7 .1 .04]);
UIparameters.PD.FontUnits='normalized';
UIparameters.PD.Value=0;
UIparameters.textPD=uicontrol(UIparameters.tab3,'Style','Text','String','PD
','Units','normalized','Position',[.3 .7 .1 .04]);
UIparameters.textPD.FontUnits='normalized';

UIparameters.fuzzy =
uicontrol(UIparameters.tab3,'Style','checkbox','Units','normalized','Positi
on',[.7 .7 .1 .04]);
UIparameters.fuzzy.FontUnits='normalized';
UIparameters.fuzzy.Value=0;
UIparameters.textfuzzy=uicontrol(UIparameters.tab3,'Style','Text','String',
'Fuzzy','Units','normalized','Position',[.55 .7 .1 .04]);
UIparameters.textfuzzy.FontUnits='normalized';

UIparameters.Kptext=uicontrol(UIparameters.tab3,'Style','Text','String','Kp
','Units','normalized','Position',...
[.1 .5 .1 .04],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.Kptext.FontUnits='normalized';
UIparameters.Kp=uicontrol(UIparameters.tab3,'Style','edit','Units','normali
zed','Position',[.2 .5 .1 .04]);
UIparameters.Kp.FontUnits='normalized';
UIparameters.Kp.String='6';

UIparameters.Kdtext=uicontrol(UIparameters.tab3,'Style','Text','String','Kd
','Units','normalized','Position',...
[.3 .5 .1 .04],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.Kdtext.FontUnits='normalized';
UIparameters.Kd=uicontrol(UIparameters.tab3,'Style','edit','Units','normali
zed','Position',[.4 .5 .1 .04]);
UIparameters.Kd.FontUnits='normalized';
UIparameters.Kd.String='0';

UIparameters.UpdateController=uicontrol(UIparameters.tab3,'Style','togglebu
tton','String','Update Controller','Units','normalized','Position',...
[.2 .1 .6 .1],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.UpdateController.Value=1;
UIparameters.UpdateController.FontUnits='normalized';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Start options %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% tab 1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

UIparameters.Com =
uicontrol(UIparameters.tab1,'Style','popup','String',{'COM1','COM2','COM3',
'COM4',...
'COM5','COM6','COM7','COM8','COM9','COM10','COM11','COM12','COM13','COM14',
'COM15'},'Units','normalized','Position',[.5 .945 .4 .04]);
UIparameters.Com.FontUnits='normalized';
UIparameters.Com.Value=3;
UIparameters.textCom=uicontrol(UIparameters.tab1,'Style','Text','String','C
OM Port','Units','normalized','Position',[.05 .94 .4 .04]);
UIparameters.textCom.FontUnits='normalized';
UIparameters.Baud =
uicontrol(UIparameters.tab1,'Style','popup','String',{'2400','4800','9600',
'14400',...
'19200','115200','250000'},'Units','normalized','Position',[.5 .865 .4
.04]);
UIparameters.Baud.FontUnits='normalized';
UIparameters.Baud.Value=6;
UIparameters.textBaud=uicontrol(UIparameters.tab1,'Style','Text','String','
Baudrate','Units','normalized','Position',[.05 .86 .4 .04]);
UIparameters.textBaud.FontUnits='normalized';

UIparameters.Ard =
uicontrol(UIparameters.tab1,'Style','checkbox','Units','normalized','Positi
on',[.5 .785 .4 .04]);
UIparameters.Ard.FontUnits='normalized';
UIparameters.Ard.Value=1;
UIparameters.textArd=uicontrol(UIparameters.tab1,'Style','Text','String','A
rduino On','Units','normalized','Position',[.05 .78 .4 .04]);
UIparameters.textArd.FontUnits='normalized';

UIparameters.Camer =
uicontrol(UIparameters.tab1,'Style','popup','String',{'Camera 1','Camera
2','Dual Camera','No camera'},'Units','normalized','Position',[.5 .705 .4
.04]);
UIparameters.Camer.Value=3;
UIparameters.Camer.FontUnits='normalized';
UIparameters.textCamer=uicontrol(UIparameters.tab1,'Style','Text','String',
'Camera Sellation','Units','normalized','Position',[.05 .7 .4 .04]);
UIparameters.textCamer.FontUnits='normalized';

UIparameters.PC =
uicontrol(UIparameters.tab1,'Style','popup','String',{'PC','LapTop'},'Units
','normalized','Position',[.5 .625 .4 .04]);
UIparameters.PC.FontUnits='normalized';
UIparameters.textPC=uicontrol(UIparameters.tab1,'Style','Text','String','PC
Sellection','Units','normalized','Position',[.05 .62 .4 .04]);
UIparameters.textPC.FontUnits='normalized';

UIparameters.CameraOn =
uicontrol(UIparameters.tab1,'Style','checkbox','Units','normalized','Positi
on',[.5 .55 .4 .04]);
UIparameters.CameraOn.FontUnits='normalized';
UIparameters.textCameraOn=uicontrol(UIparameters.tab1,'Style','Text','Strin
g','Show camera image','Units','normalized','Position',[.05 .55 .4 .04]);
UIparameters.textCameraOn.FontUnits='normalized';

UIparameters.CameraS =
uicontrol(UIparameters.tab1,'Style','checkbox','Units','normalized','Positi
on',[.9 .55 .4 .04]);

```

```

UIparameters.CameraS.FontUnits='normalized';
UIparameters.textCameraS=icontrol(UIparameters.tab1,'Style','Text','String',
    'Save camera image','Units','normalized','Position',[.55 .55 .3 .04]);
UIparameters.textCameraS.FontUnits='normalized';

UIparameters.textCom=icontrol(UIparameters.tab1,'Style','Text','String',['
The following COM ports are available :
',seriallist],'Units','normalized','Position',[.2 .37 .6 .15],...
    'BackgroundColor',[1 1 1],'ForegroundColor','w','BackgroundColor','k');
UIparameters.textCom.FontUnits='normalized';

UIparameters.textFileName=icontrol(UIparameters.tab1,'Style','Text','String',
    'Save file name : ','Units','normalized','Position',[.2 .25 .6 .05],...
    'BackgroundColor',[1 1 1],'ForegroundColor','w','BackgroundColor','k');
UIparameters.textFileName.FontUnits='normalized';
UIparameters.FileName=icontrol(UIparameters.tab1,'Style','edit','Units','normalized',
    'Position',[.2 .2 .6 .05]);
UIparameters.FileName.FontUnits='normalized';
UIparameters.FileName.String=filename;

UIparameters.textCom=icontrol(UIparameters.tab1,'Style','Text','String','Save
file path : ','Units','normalized','Position',[.2 .1 .6 .05],...
    'BackgroundColor',[1 1 1],'ForegroundColor','w','BackgroundColor','k');
UIparameters.textCom.FontUnits='normalized';
UIparameters.FilePath=icontrol(UIparameters.tab1,'Style','edit','Units','normalized',
    'Position',[.2 .05 .6 .05]);
UIparameters.FilePath.FontUnits='normalized';
UIparameters.FilePath.String=[PathNow,'\ ',FolderName];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Demo %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% tab 2.1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
UIparameters.demo1=icontrol(UIparameters.tab22,'Style','togglebutton','String',
    'Start Demo 1','Units','normalized','Position',...
    [.2 .6 .6 .1],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.demo1.FontUnits='normalized';

UIparameters.demo2=icontrol(UIparameters.tab22,'Style','togglebutton','String',
    'Start Demo 2','Units','normalized','Position',...
    [.2 .5 .6 .1],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.demo2.FontUnits='normalized';

UIparameters.demo3=icontrol(UIparameters.tab22,'Style','togglebutton','String',
    'Start Demo 3','Units','normalized','Position',...
    [.2 .4 .6 .1],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.demo3.FontUnits='normalized';

UIparameters.demo4=icontrol(UIparameters.tab22,'Style','togglebutton','String',
    'Start Demo 4','Units','normalized','Position',...
    [.2 .3 .6 .1],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.demo4.FontUnits='normalized';

UIparameters.textDemoInfo=icontrol(UIparameters.tab22,'Style','Text','String',...
    'In this panel you can select a demo action for the robot arm to
perform. The first option will make the robot arm use all of its segments
in order to perform circles.',...
    'Units','normalized','Position',[.1 .7 .8 .2]);
UIparameters.textDemoInfo.FontUnits='normalized';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Segment control no feedback %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% tab 2.2 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
UIparameters.pan1t4=uipanel(UIparameters.tab24,'Units','pixels','Units','no
rmalized','Position',[.05 .575 .9 .175]);
UIparameters.textSeg1=icontrol(UIparameters.pan1t4,'Style','Text','String'
,'Base Segment','Units','normalized','Position',[.01 .3 .15 .4],...
'BackgroundColor',[.3 .3 .3],'ForegroundColor','w');
UIparameters.textSeg1.FontUnits='normalized';

UIparameters.S3CH2P=icontrol(UIparameters.pan1t4,'Style','togglebutton','S
tring','+', 'Units','normalized','Position',...
[.35 .1 .1 .35],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.S3CH2P.FontUnits='normalized';
UIparameters.S3CH2M=icontrol(UIparameters.pan1t4,'Style','togglebutton','S
tring','-','Units','normalized','Position',...
[.45 .1 .1 .35],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.S3CH2M.FontUnits='normalized';

UIparameters.S3CH1P=icontrol(UIparameters.pan1t4,'Style','togglebutton','S
tring','+', 'Units','normalized','Position',...
[.35 .5 .1 .35],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.S3CH1P.FontUnits='normalized';
UIparameters.S3CH1M=icontrol(UIparameters.pan1t4,'Style','togglebutton','S
tring','-','Units','normalized','Position',...
[.45 .5 .1 .35],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.S3CH1M.FontUnits='normalized';

UIparameters.S3CH4P=icontrol(UIparameters.pan1t4,'Style','togglebutton','S
tring','+', 'Units','normalized','Position',...
[.7 .1 .1 .35],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.S3CH4P.FontUnits='normalized';
UIparameters.S3CH4M=icontrol(UIparameters.pan1t4,'Style','togglebutton','S
tring','-','Units','normalized','Position',...
[.8 .1 .1 .35],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.S3CH4M.FontUnits='normalized';

UIparameters.S3CH3P=icontrol(UIparameters.pan1t4,'Style','togglebutton','S
tring','+', 'Units','normalized','Position',...
[.7 .5 .1 .35],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.S3CH3P.FontUnits='normalized';
UIparameters.S3CH3M=icontrol(UIparameters.pan1t4,'Style','togglebutton','S
tring','-','Units','normalized','Position',...
[.8 .5 .1 .35],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.S3CH3M.FontUnits='normalized';

UIparameters.txt1=icontrol(UIparameters.pan1t4,'Style','Text','String','CH
2','Units','normalized','Position',[.17 .1 .15 .3]);
UIparameters.txt1.FontUnits='normalized';
UIparameters.txt2=icontrol(UIparameters.pan1t4,'Style','Text','String','CH
1','Units','normalized','Position',[.17 .5 .15 .3]);
UIparameters.txt2.FontUnits='normalized';
UIparameters.txt3=icontrol(UIparameters.pan1t4,'Style','Text','String','CH
4','Units','normalized','Position',[.55 .1 .15 .3]);
UIparameters.txt3.FontUnits='normalized';
UIparameters.txt4=icontrol(UIparameters.pan1t4,'Style','Text','String','CH
3','Units','normalized','Position',[.55 .5 .15 .3]);
UIparameters.txt4.FontUnits='normalized';

```



```

UIparameters.pan2t4=uipanel(UIparameters.tab24,'Units','pixels','Units','no
rmalized','Position',[.05 .4 .9 .175]);
UIparameters.textSeg1=uicontrol(UIparameters.pan2t4,'Style','Text','String'
,'Middle Segment','Units','normalized','Position',[.01 .3 .15 .4],...
'BackgroundColor',[.3 .3 .3],'ForegroundColor','w');
UIparameters.textSeg1.FontUnits='normalized';

UIparameters.S2CH2P=uicontrol(UIparameters.pan2t4,'Style','togglebutton','S
tring','+', 'Units','normalized','Position',...
[.35 .1 .1 .35],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.S2CH2P.FontUnits='normalized';
UIparameters.S2CH2M=uicontrol(UIparameters.pan2t4,'Style','togglebutton','S
tring','-','Units','normalized','Position',...
[.45 .1 .1 .35],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.S2CH2M.FontUnits='normalized';

UIparameters.S2CH1P=uicontrol(UIparameters.pan2t4,'Style','togglebutton','S
tring','+', 'Units','normalized','Position',...
[.35 .5 .1 .35],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.S2CH1P.FontUnits='normalized';
UIparameters.S2CH1M=uicontrol(UIparameters.pan2t4,'Style','togglebutton','S
tring','-','Units','normalized','Position',...
[.45 .5 .1 .35],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.S2CH1M.FontUnits='normalized';

UIparameters.S2CH4P=uicontrol(UIparameters.pan2t4,'Style','togglebutton','S
tring','+', 'Units','normalized','Position',...
[.7 .1 .1 .35],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.S2CH4P.FontUnits='normalized';
UIparameters.S2CH4M=uicontrol(UIparameters.pan2t4,'Style','togglebutton','S
tring','-','Units','normalized','Position',...
[.8 .1 .1 .35],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.S2CH4M.FontUnits='normalized';

UIparameters.S2CH3P=uicontrol(UIparameters.pan2t4,'Style','togglebutton','S
tring','+', 'Units','normalized','Position',...
[.7 .5 .1 .35],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.S2CH3P.FontUnits='normalized';
UIparameters.S2CH3M=uicontrol(UIparameters.pan2t4,'Style','togglebutton','S
tring','-','Units','normalized','Position',...
[.8 .5 .1 .35],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.S2CH3M.FontUnits='normalized';

UIparameters.txt1=uicontrol(UIparameters.pan2t4,'Style','Text','String','CH
2','Units','normalized','Position',[.17 .1 .15 .3]);
UIparameters.txt1.FontUnits='normalized';
UIparameters.txt2=uicontrol(UIparameters.pan2t4,'Style','Text','String','CH
1','Units','normalized','Position',[.17 .5 .15 .3]);
UIparameters.txt2.FontUnits='normalized';
UIparameters.txt3=uicontrol(UIparameters.pan2t4,'Style','Text','String','CH
4','Units','normalized','Position',[.55 .1 .15 .3]);
UIparameters.txt3.FontUnits='normalized';
UIparameters.txt4=uicontrol(UIparameters.pan2t4,'Style','Text','String','CH
3','Units','normalized','Position',[.55 .5 .15 .3]);
UIparameters.txt4.FontUnits='normalized';

UIparameters.pan3t4=uipanel(UIparameters.tab24,'Units','pixels','Units','no
rmalized','Position',[.05 .225 .9 .175]);
UIparameters.textSeg1=uicontrol(UIparameters.pan3t4,'Style','Text','String'
,'Tip Segment','Units','normalized','Position',[.01 .3 .15 .4],...

```

```

        'BackgroundColor',[.3 .3 .3],'ForegroundColor','w');
UIparameters.textSeg1.FontUnits='normalized';

UIparameters.S1CH2P=uicontrol(UIparameters.pan3t4,'Style','togglebutton','S
tring','+', 'Units','normalized','Position',...
    [.35 .1 .1 .35],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.S1CH2P.FontUnits='normalized';
UIparameters.S1CH2M=uicontrol(UIparameters.pan3t4,'Style','togglebutton','S
tring','-','Units','normalized','Position',...
    [.45 .1 .1 .35],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.S1CH2M.FontUnits='normalized';

UIparameters.S1CH1P=uicontrol(UIparameters.pan3t4,'Style','togglebutton','S
tring','+', 'Units','normalized','Position',...
    [.35 .5 .1 .35],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.S1CH1P.FontUnits='normalized';
UIparameters.S1CH1M=uicontrol(UIparameters.pan3t4,'Style','togglebutton','S
tring','-','Units','normalized','Position',...
    [.45 .5 .1 .35],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.S1CH1M.FontUnits='normalized';

UIparameters.S1CH4P=uicontrol(UIparameters.pan3t4,'Style','togglebutton','S
tring','+', 'Units','normalized','Position',...
    [.7 .1 .1 .35],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.S1CH4P.FontUnits='normalized';
UIparameters.S1CH4M=uicontrol(UIparameters.pan3t4,'Style','togglebutton','S
tring','-','Units','normalized','Position',...
    [.8 .1 .1 .35],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.S1CH4M.FontUnits='normalized';

UIparameters.S1CH3P=uicontrol(UIparameters.pan3t4,'Style','togglebutton','S
tring','+', 'Units','normalized','Position',...
    [.7 .5 .1 .35],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.S1CH3P.FontUnits='normalized';
UIparameters.S1CH3M=uicontrol(UIparameters.pan3t4,'Style','togglebutton','S
tring','-','Units','normalized','Position',...
    [.8 .5 .1 .35],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.S1CH3M.FontUnits='normalized';

UIparameters.txt1=uicontrol(UIparameters.pan3t4,'Style','Text','String','CH
2','Units','normalized','Position',[.17 .1 .15 .3]);
UIparameters.txt1.FontUnits='normalized';
UIparameters.txt2=uicontrol(UIparameters.pan3t4,'Style','Text','String','CH
1','Units','normalized','Position',[.17 .5 .15 .3]);
UIparameters.txt2.FontUnits='normalized';
UIparameters.txt3=uicontrol(UIparameters.pan3t4,'Style','Text','String','CH
4','Units','normalized','Position',[.55 .1 .15 .3]);
UIparameters.txt3.FontUnits='normalized';
UIparameters.txt4=uicontrol(UIparameters.pan3t4,'Style','Text','String','CH
3','Units','normalized','Position',[.55 .5 .15 .3]);
UIparameters.txt4.FontUnits='normalized';

UIparameters.pan4t4=uipanel(UIparameters.tab24,'Units','pixels','Units','no
rmalized','Position',[.05 .05 .9 .175]);
UIparameters.textSeg1=uicontrol(UIparameters.pan4t4,'Style','Text','String
','Twist Segment','Units','normalized','Position',[.01 .3 .15 .4],...
    'BackgroundColor',[.3 .3 .3],'ForegroundColor','w');
UIparameters.textSeg1.FontUnits='normalized';

```

```

UIparameters.S4CH2P=icontrol(UIparameters.pan4t4,'Style','togglebutton','S
tring','+', 'Units','normalized','Position',...
    [.35 .1 .1 .35], 'Callback', {@Close_Prog});
UIparameters.S4CH2P.FontUnits='normalized';
UIparameters.S4CH2M=icontrol(UIparameters.pan4t4,'Style','togglebutton','S
tring','-','Units','normalized','Position',...
    [.45 .1 .1 .35], 'Callback', {@Close_Prog});
UIparameters.S4CH2M.FontUnits='normalized';

UIparameters.S4CH1P=icontrol(UIparameters.pan4t4,'Style','togglebutton','S
tring','+', 'Units','normalized','Position',...
    [.35 .5 .1 .35], 'Callback', {@Close_Prog});
UIparameters.S4CH1P.FontUnits='normalized';
UIparameters.S4CH1M=icontrol(UIparameters.pan4t4,'Style','togglebutton','S
tring','-','Units','normalized','Position',...
    [.45 .5 .1 .35], 'Callback', {@Close_Prog});
UIparameters.S4CH1M.FontUnits='normalized';

UIparameters.txt1=icontrol(UIparameters.pan4t4,'Style','Text','String','CW
','Units','normalized','Position', [.17 .1 .15 .3]);
UIparameters.txt1.FontUnits='normalized';
UIparameters.txt2=icontrol(UIparameters.pan4t4,'Style','Text','String','CC
W','Units','normalized','Position', [.17 .5 .15 .3]);
UIparameters.txt2.FontUnits='normalized';

UIparameters.textSegC=icontrol(UIparameters.tab24,'Style','Text','String',
...
    'In this panel you are able to control every segment seperatly, giving
you the ability to move the robot arm any way you want but with no
feedback.',...
    'Units','normalized','Position', [.1 .8 .8 .2]);
UIparameters.textSegC.FontUnits='normalized';

UIparameters.resetbtn=icontrol(UIparameters.tab24,'Style','togglebutton','
String','Reset to home','Units','normalized','Position',...
    [.2 .82 .6 .05], 'Callback', {@Close_Prog});
UIparameters.resetbtn.FontUnits='normalized';

UIparameters.startManualtbtn=icontrol(UIparameters.tab24,'Style','togglebu
tton','String','Start','Units','normalized','Position',...
    [.2 .77 .6 .05], 'Callback', {@Close_Prog});
UIparameters.startManualtbtn.FontUnits='normalized';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% XYZ control %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% tab 2.3 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
UIparameters.pan1t4=uipanel(UIparameters.tab21,'Units','pixels','Units','no
rmalized','Position',[.05 .05 .9 .7]);

UIparameters.Xp=icontrol(UIparameters.pan1t4,'Style','togglebutton','Strin
g','X+', 'Units','normalized','Position',...
    [.65 .4 .2 .2], 'Callback', {@Close_Prog});
UIparameters.Xp.FontUnits='normalized';
UIparameters.Xm=icontrol(UIparameters.pan1t4,'Style','togglebutton','Strin
g','X-', 'Units','normalized','Position',...
    [.15 .4 .2 .2], 'Callback', {@Close_Prog});
UIparameters.Xm.FontUnits='normalized';

UIparameters.Yp=icontrol(UIparameters.pan1t4,'Style','togglebutton','Strin
g','Y+', 'Units','normalized','Position',...

```

```

    [.4 .65 .2 .2], 'Callback', {@Close_Prog});
UIparameters.Yp.FontUnits='normalized';
UIparameters.Ym=icontrol(UIparameters.panlt4, 'Style', 'togglebutton', 'String', 'Y-', 'Units', 'normalized', 'Position', ...
    [.4 .15 .2 .2], 'Callback', {@Close_Prog});
UIparameters.Ym.FontUnits='normalized';

UIparameters.CW=icontrol(UIparameters.panlt4, 'Style', 'togglebutton', 'String', 'CW', 'Units', 'normalized', 'Position', ...
    [.05 .05 .2 .2], 'Callback', {@Close_Prog});
UIparameters.CW.FontUnits='normalized';
UIparameters.CCW=icontrol(UIparameters.panlt4, 'Style', 'togglebutton', 'String', 'CCW', 'Units', 'normalized', 'Position', ...
    [.75 .05 .2 .2], 'Callback', {@Close_Prog});
UIparameters.CCW.FontUnits='normalized';

UIparameters.Zp=icontrol(UIparameters.panlt4, 'Style', 'togglebutton', 'String', 'Z+', 'Units', 'normalized', 'Position', ...
    [.75 .75 .2 .2], 'Callback', {@Close_Prog});
UIparameters.Zp.FontUnits='normalized';
UIparameters.Zm=icontrol(UIparameters.panlt4, 'Style', 'togglebutton', 'String', 'Z-', 'Units', 'normalized', 'Position', ...
    [.05 .75 .2 .2], 'Callback', {@Close_Prog});
UIparameters.Zm.FontUnits='normalized';

UIparameters.textSegC=icontrol(UIparameters.tab21, 'Style', 'Text', 'String', ...
    'In this panel you are able to control every segment seperatly, giving you the ability to move the robot arm any way you want but with no feedback.', ...
    'Units', 'normalized', 'Position', [.1 .8 .8 .2]);
UIparameters.textSegC.FontUnits='normalized';

UIparameters.resetbtn2=icontrol(UIparameters.tab21, 'Style', 'togglebutton', 'String', 'Reset to home', 'Units', 'normalized', 'Position', ...
    [.2 .82 .6 .05], 'Callback', {@Close_Prog});
UIparameters.resetbtn2.FontUnits='normalized';

UIparameters.startManualtbtn2=icontrol(UIparameters.tab21, 'Style', 'togglebutton', 'String', 'Start', 'Units', 'normalized', 'Position', ...
    [.2 .77 .6 .05], 'Callback', {@Close_Prog});
UIparameters.startManualtbtn2.FontUnits='normalized';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Theta controlle with feedback %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% tab 2.4 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
UIparameters.panlt4=uipanel(UIparameters.tab23, 'Units', 'pixels', 'Units', 'normalized', 'Position', [.05 .05 .9 .7]);

UIparameters.ThetaX=icontrol(UIparameters.panlt4, 'Style', 'togglebutton', 'String', 'X+', 'Units', 'normalized', 'Position', ...
    [.2 .8 .1 .15], 'Callback', {@Close_Prog});
UIparameters.ThetaX.FontUnits='normalized';
UIparameters.ThetaXVal=icontrol(UIparameters.panlt4, 'Style', 'edit', 'Units', 'normalized', 'Position', [.5 .8 .3 .15]);
UIparameters.ThetaXVal.FontUnits='normalized';

UIparameters.Yp2=icontrol(UIparameters.panlt4, 'Style', 'togglebutton', 'String', 'Y+', 'Units', 'normalized', 'Position', ...
    [.2 .6 .1 .15], 'Callback', {@Close_Prog});

```

```

UIparameters.Yp2.FontUnits='normalized';
UIparameters.ThetaYVal=icontrol(UIparameters.panlt4,'Style','edit','Units',
,'normalized','Position',[.5 .6 .3 .15]);
UIparameters.ThetaYVal.FontUnits='normalized';

UIparameters.Zp2=icontrol(UIparameters.panlt4,'Style','togglebutton','Stri
ng','Z+', 'Units','normalized','Position',...
[.2 .4 .1 .15],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.Zp2.FontUnits='normalized';
UIparameters.Zp2Val=icontrol(UIparameters.panlt4,'Style','edit','Units','n
ormalized','Position',[.5 .4 .3 .15]);
UIparameters.Zp2Val.FontUnits='normalized';

UIparameters.CW2=icontrol(UIparameters.panlt4,'Style','togglebutton','Stri
ng','CW','Units','normalized','Position',...
[.2 .2 .1 .15],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.CW2.FontUnits='normalized';
UIparameters.CW2Val=icontrol(UIparameters.panlt4,'Style','edit','Units','n
ormalized','Position',[.35 .2 .1 .15]);
UIparameters.CW2Val.FontUnits='normalized';

UIparameters.CCW2=icontrol(UIparameters.panlt4,'Style','togglebutton','Stri
ng','CCW','Units','normalized','Position',...
[.55 .2 .1 .15],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.CCW2.FontUnits='normalized';
UIparameters.CCW2Val=icontrol(UIparameters.panlt4,'Style','edit','Units','
normalized','Position',[.7 .2 .1 .15]);
UIparameters.CCW2Val.FontUnits='normalized';

UIparameters.textSegC=icontrol(UIparameters.tab23,'Style','Text','String',
...
'In this panel you are able to control every segment seperatly, giving
you the ability to move the robot arm any way you want with feedback
enabled.',...
'Units','normalized','Position',[.1 .8 .8 .2]);
UIparameters.textSegC.FontUnits='normalized';

UIparameters.resetbtn2=icontrol(UIparameters.tab23,'Style','togglebutton',
'String','Reset to home','Units','normalized','Position',...
[.2 .82 .6 .05],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.resetbtn2.FontUnits='normalized';

UIparameters.startManualtbtn3=icontrol(UIparameters.tab23,'Style','toggleb
utton','String','Start','Units','normalized','Position',...
[.2 .77 .6 .05],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.startManualtbtn3.FontUnits='normalized';

UIparameters.GoWfeed=icontrol(UIparameters.panlt4,'Style','togglebutton','
String','Go','Units','normalized','Position',...
[.15 .02 .3 .1],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.GoWfeed.FontUnits='normalized';

UIparameters.GoExp=icontrol(UIparameters.panlt4,'Style','togglebutton','St
ring','Run experiment','Units','normalized','Position',...
[.55 .02 .3 .1],'Callback',{@Close_Prog});
UIparameters.GoExp.FontUnits='normalized';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

UIparameters.btnClose=icontrol('Style','togglebutton','String','Close','Un
its','normalized','Position',...

```

```

        [.75 .03 .1 .04], 'Callback', {@Close_Prog});
UIparameters.btnClose.FontUnits='normalized';
UIparameters.Startbtn=icontrol('Style','togglebutton','String','Start','Units','normalized','Position',...
        [.60 .03 .1 .04], 'Callback', {@Close_Prog});
UIparameters.Startbtn.FontUnits='normalized';

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% General info panel %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Panel 1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
UIparameters.pan1=uipanel(UIparameters.f,'Units','pixels','Units','normalized','Position',[.55 .1 .4 .85]);
UIparameters.txt1=icontrol(UIparameters.pan1,'Style','Text','String','Current Theta','Units','normalized','Position',[.05 .90 .42 .06],...
        'BackgroundColor',[1 1 1],'ForegroundColor','w','BackgroundColor','k');
UIparameters.txt1.FontUnits='normalized';
UIparameters.txtN3=icontrol(UIparameters.pan1,'Style','Text','String','','Units','normalized','Position',[.53 .90 .42 .06],...
        'BackgroundColor',[1 1 1],'ForegroundColor','w','BackgroundColor','k');
UIparameters.txtN3.FontUnits='normalized';
UIparameters.txt3=icontrol(UIparameters.pan1,'Style','Text','String','Real Pos','Units','normalized','Position',[.05 .7 .42 .06],...
        'BackgroundColor',[1 1 1],'ForegroundColor','w','BackgroundColor','k');
UIparameters.txt3.FontUnits='normalized';
UIparameters.txtN8=icontrol(UIparameters.pan1,'Style','Text','String','','Units','normalized','Position',[.53 .7 .42 .06],...
        'BackgroundColor',[1 1 1],'ForegroundColor','w','BackgroundColor','k');
UIparameters.txtN8.FontUnits='normalized';
UIparameters.txtN8.FontSize=0.4;
UIparameters.txt5=icontrol(UIparameters.pan1,'Style','Text','String','Pixel Pos','Units','normalized','Position',[.05 .8 .42 .06],...
        'BackgroundColor',[1 1 1],'ForegroundColor','w','BackgroundColor','k');
UIparameters.txt5.FontUnits='normalized';
UIparameters.txtN14=icontrol(UIparameters.pan1,'Style','Text','String','','Units','normalized','Position',[.53 .8 .42 .06],...
        'BackgroundColor',[1 1 1],'ForegroundColor','w','BackgroundColor','k');
UIparameters.txtN14.FontUnits='normalized';
UIparameters.txtN14.FontSize=0.4;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% 3d plot %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Panel 1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
UIparameters.edit5=icontrol(UIparameters.pan1,'Style','Slider','Min',-180,'Max',180,'SliderStep',[0.01 0.010],'Units','normalized','Position',[.4 .65 .55 .04]);
UIparameters.edit5.Value=50.4;
UIparameters.edit6=icontrol(UIparameters.pan1,'Style','Slider','Min',0,'Max',90,'SliderStep',[0.01 0.010],'Units','normalized','Position',[.4 .58 .55 .04]);
UIparameters.edit6.Value=34.2;
UIparameters.txtRz=icontrol(UIparameters.pan1,'Style','Text','String','Rotate Z','Units','normalized','Position',[.05 .65 .30 .04]);
UIparameters.txtRz.FontUnits='normalized';
UIparameters.txtRaz=icontrol(UIparameters.pan1,'Style','Text','String','Rotate Az','Units','normalized','Position',[.05 .58 .30 .04]);
UIparameters.txtRaz.FontUnits='normalized';
UIparameters.ax3 =
axes(UIparameters.pan1,'Units','Pixels','Units','normalized','Position',[.1 .05 .8 .5],'Box','on');
hold(UIparameters.ax3,'on');grid(UIparameters.ax3,'on');
patch(UIparameters.ax3,[0 640 640 0],[0 0 640 640],[0 0 0 0],[0.5 0.5 0.5]
)

```

```

view(UIparameters.ax3,get (UIparameters.edit5, 'Value'),get (UIparameters.edit
6, 'Value'));
grid on
xlabel('X'); xlim(UIparameters.ax3,[0 640])
ylabel('Y'); ylim(UIparameters.ax3,[0 640])
zlabel('Z'); zlim(UIparameters.ax3,[0 480])
PrevView1=get (UIparameters.edit5, 'Value');
PrevView2=get (UIparameters.edit6, 'Value');
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% lipsh kai epeksergasia eikonas
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
ii=0;
startProg=0;
pause(.1);
while(~startProg && ~paize)
    startProg=get (UIparameters.Startbtn, 'Value');
    pause(0.1);
end

if (get (UIparameters.Camer, 'Value')<3)
    if (get (UIparameters.PC, 'Value')==1)
        camera1=webcam (get (UIparameters.Camer, 'Value'));
        camera1.Resolution =
string (UIparameters.CamRes.String (UIparameters.CamRes.Value));
        videoFrame=snapshot (camera1);
        frameSize=size (videoFrame);
        videoPlayer=vision.VideoPlayer ('Position', [1 150
[frameSize (2), frameSize (1)]+30]);
        videoPlayer2=vision.VideoPlayer ('Position', [1 150
[frameSize (2), frameSize (1)]+30]);
        videoPlayer3=vision.VideoPlayer ('Position', [1 150
[frameSize (2), frameSize (1)]+30]);
        videoPlayer4=vision.VideoPlayer ('Position', [1 150
[frameSize (2), frameSize (1)]+30]);
    end
    if (get (UIparameters.PC, 'Value')==2)
        camera1=webcam (get (UIparameters.Camer, 'Value')+1);
        camera1.Resolution =
string (UIparameters.CamRes.String (UIparameters.CamRes.Value));
        videoFrame=snapshot (camera1);
        frameSize=size (videoFrame);
        videoPlayer=vision.VideoPlayer ('Position', [1 150
[frameSize (2), frameSize (1)]+30]);
        videoPlayer2=vision.VideoPlayer ('Position', [1 150
[frameSize (2), frameSize (1)]+30]);
        videoPlayer3=vision.VideoPlayer ('Position', [1 150
[frameSize (2), frameSize (1)]+30]);
        videoPlayer4=vision.VideoPlayer ('Position', [1 150
[frameSize (2), frameSize (1)]+30]);
    end
end

if (get (UIparameters.Camer, 'Value')==3)
    if (get (UIparameters.PC, 'Value')==1)
        camera1=webcam (1);
        camera2=webcam (2);
        camera1.Resolution =
string (UIparameters.CamRes.String (UIparameters.CamRes.Value));

```

```

        camera2.Resolution =
string(UIparameters.CamRes.String(UIparameters.CamRes.Value));
        videoFrame=snapshot(camera1);
        frameSize=size(videoFrame);
        videoPlayer=vision.VideoPlayer('Position',[1 150
[frameSize(2),frameSize(1)]+30]);
        videoPlayer2=vision.VideoPlayer('Position',[1 150
[frameSize(2),frameSize(1)]+30]);
        videoPlayer3=vision.VideoPlayer('Position',[1 150
[frameSize(2),frameSize(1)]+30]);
        videoPlayer4=vision.VideoPlayer('Position',[1 150
[frameSize(2),frameSize(1)]+30]);
    end
    if(get(UIparameters.PC,'Value')==2)
        camera1=webcam(1+1);
        camera2=webcam(2+1);
        camera1.Resolution =
string(UIparameters.CamRes.String(UIparameters.CamRes.Value));
        camera2.Resolution =
string(UIparameters.CamRes.String(UIparameters.CamRes.Value));
        videoFrame=snapshot(camera1);
        frameSize=size(videoFrame);
        videoPlayer=vision.VideoPlayer('Position',[1 150
[frameSize(2),frameSize(1)]+30]);
        videoPlayer2=vision.VideoPlayer('Position',[1 150
[frameSize(2),frameSize(1)]+30]);
        videoPlayer3=vision.VideoPlayer('Position',[1 150
[frameSize(2),frameSize(1)]+30]);
        videoPlayer4=vision.VideoPlayer('Position',[1 150
[frameSize(2),frameSize(1)]+30]);
    end
end

if(get(UIparameters.Ard,'Value'))

arduino=serial(string(UIparameters.Com.String(UIparameters.Com.Value)), 'BaudRate',str2double(string(UIparameters.Baud.String(UIparameters.Baud.Value)))
);
    fopen(arduino);
end
if(UIparameters.CameraS.Value)
    v1=VideoWriter(['video1_',datestr(now,'on_mm-dd-yyyy_at_HH-MM'),'avi']);
    v2=VideoWriter(['video2_',datestr(now,'on_mm-dd-yyyy_at_HH-MM'),'avi']);
    open(v1);
    open(v2);
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Camera Calibration %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
calibrationTime=1;
realDist=156;
realDist2=156;

while(calibrationTime && get(UIparameters.Camer,'Value')==3)
    pause(0.001);
    I1=snapshot(camera1);
    get(UIparameters.GrayThres1,'Value')

```



```

    [centroids1,degsz1] =
WhiteDotsInWB(I1,get(UIparameters.AreaMin1,'Value'),get(UIparameters.AreaMa
x1,'Value'),get(UIparameters.GrayThres1,'Value'));
    PixelDist=centroids1(1,2)-centroids1(end,2);
    PixelLength=realDist/PixelDist;

    I2=snapshot(camera2);
    [centroids2,degsz2] =
WhiteDotsInWB(I2,get(UIparameters.AreaMin2,'Value'),get(UIparameters.AreaMa
x2,'Value'),get(UIparameters.GrayThres2,'Value'));
    PixelDist2=centroids2(1,2)-centroids2(end,2);
    PixelLength2=realDist2/PixelDist2;
    calibrationTime=0;

    Results.ZeroPoint=[centroids1(:,1),centroids2(:,1),centroids1(:,2)-
round(5*PixelLength2)];

    patch(UIparameters.ax3,[0 640 640 0], [0 0 640 640],[0 0 0 0],[0.5 0.5
0.5] )
    xlabel('X'); xlim(UIparameters.ax3,[0 640])
    ylabel('Y'); ylim(UIparameters.ax3,[0 640])
    zlabel('Z'); zlim(UIparameters.ax3,[0 480])

plot3(UIparameters.ax3,centroids1(:,1),centroids2(:,1),abs(centroids1(:,2)-
480),'*')
    PrevView1=get(UIparameters.edit5,'Value');
    PrevView2=get(UIparameters.edit6,'Value');

    StartX=centroids1(end,1);
    StartY=centroids2(end,1);
    StartZ=centroids1(end,2);
end

pause(.1);
profile on

while(~paize)
    tic
    ii=ii+1;
    paize=get(UIparameters.btnClose,'Value');
    if(ii==1)
        Results.thetaError{ii}=0;
        Results.TragetTheta{ii}=0;
        Results.DutC{ii}=0;
        Results.thetaTipY{ii}=0;
        Results.Kp{ii}=0;
        Results.Kd{ii}=0;
        Results.controllerToUse{ii}=0;
        Results.TragetThetaX{ii}=0;
        Results.TragetThetaY{ii}=0;
    end
    if(ii>1)
        Results.thetaError{ii}=Results.thetaError{ii-1};
        Results.TragetThetaX{ii}=Results.TragetThetaX{ii-1};
        Results.TragetThetaY{ii}=Results.TragetThetaY{ii-1};
        Results.TragetTheta{ii}=Results.TragetTheta{ii-1};
        Results.DutC{ii}=0;
        Results.thetaTipY{ii}=0;
        Results.Kp{ii}=Results.Kp{ii-1};
        Results.Kd{ii}=Results.Kd{ii-1};
    end
end

```

```

        Results.controllerToUse{ii}=Results.controllerToUse{ii-1};
    end
    Results.thetaErrorX{ii}=0;
    Results.thetaErrorY{ii}=0;
    Results.TargetZ{ii}=0;

    if(UIparameters.UpdateController.Value)
        if(UIparameters.P.Value)
            controllerToUse=1;
        end
        if(UIparameters.PD.Value)
            controllerToUse=2;
        end
        if(UIparameters.fuzzy.Value)
            controllerToUse=3;
        end
        Kp=str2double((UIparameters.Kp.String));
        Kd=str2double((UIparameters.Kd.String));
        Results.Kp{ii}=Kp;
        Results.Kd{ii}=Kd;
        Results.controllerToUse{ii}=controllerToUse;
        UIparameters.UpdateController.Value=0;
    end

    if(UIparameters.GoWfeed.Value)
        thetaTargetX=str2double(UIparameters.ThetaXVal.String);
        thetaTargetY=str2double(UIparameters.ThetaYVal.String);
        targetZ=str2double(UIparameters.Zp2Val.String);
        UIparameters.GoWfeed.Value=0;
    end

    if(UIparameters.GoExp.Value)
        counterE=counterE+1;
        countT=countT+1;
        if(counterE==1)
            timerES=totalTime;
        end
        timerE=totalTime-timerES;
        if(timerE<=1)
            thetaTargetY=0;
        elseif(timerE>1 && timerE<=4)
            thetaTargetY=5;
        elseif(timerE>4 && timerE<=7)
            thetaTargetY=-5;
        elseif(timerE>7 && timerE<=10)
            thetaTargetY=0;
        elseif(timerE>10)
            UIparameters.GoExp.Value=0;
            counterE=0;
        end
        Results.TestTarget{countT}=thetaTargetY;
        Results.TestError{countT}=thetaError(2);
        Results.TestTheta{countT}=degsz2(end);
        Results.TestTime{countT}=timerE;
    end
end

```

```

DoMode=[UIparameters.demo1.Value,UIparameters.demo2.Value,UIparameters.demo
3.Value,UIparameters.demo4.Value,UIparameters.startManualtbtn.Value,UIparam
eters.startManualtbtn2.Value,UIparameters.startManualtbtn3.Value];

```

```

pause(0.001);
if(get(UIparameters.Camer, 'Value')<3) %
    I1=snapshot(camera1);
    [centroids1,degsz1] =
WhiteDotsInWB(I1,get(UIparameters.AreaMin1, 'Value'),get(UIparameters.AreaMa
x1, 'Value'),get(UIparameters.GrayThres1, 'Value'));

I1=insertMarker(I1,[centroids1(:,1),centroids1(:,2)], '*', 'Color','r','size'
,5);
    if(UIparameters.CameraS.Value)
        writeVideo(v1,I1);
    end
    if(~isempty(centroids1))
        errorTheta=round(targetThetaXY-degsz1(end));
    end
end
if(get(UIparameters.Camer, 'Value')==3)
    I1=snapshot(camera1);
    I2=snapshot(camera2);
    [centroids1,degsz1] =
WhiteDotsInWB(I1,get(UIparameters.AreaMin1, 'Value'),get(UIparameters.AreaMa
x1, 'Value'),get(UIparameters.GrayThres1, 'Value'));
    [centroids2,degsz2] =
WhiteDotsInWB(I2,get(UIparameters.AreaMin2, 'Value'),get(UIparameters.AreaMa
x2, 'Value'),get(UIparameters.GrayThres2, 'Value'));

I1=insertMarker(I1,[centroids1(:,1),centroids1(:,2)], '*', 'Color','r','size'
,5);

I2=insertMarker(I2,[centroids2(:,1),centroids2(:,2)], '*', 'Color','r','size'
,5);
    if(UIparameters.CameraS.Value)
        writeVideo(v1,I1);
        writeVideo(v2,I2);
    end
    if(~isempty(centroids1))
        errorTheta=round(targetThetaXY-degsz1(end));
    end
    if(~isempty(centroids2))
        errorTheta=round(targetThetaXY-degsz2(end));
    end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%      Sxediasmos kai apeikonish
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
view3D=0;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if(get(UIparameters.Camer, 'Value')<3)
    if(~isempty(centroids1) && (view3D))
        patch(UIparameters.ax3,[0 640 640 0], [0 0 640 640],[0 0 0
0],[0.5 0.5 0.5] )
        grid on
        xlabel('X'); xlim(UIparameters.ax3,[0 640])
        ylabel('Y'); ylim(UIparameters.ax3,[0 640])
        zlabel('Z'); zlim(UIparameters.ax3,[0 480])

plot3(UIparameters.ax3,centroids1(:,1),centroids1(:,1),abs(centroids1(:,2)-
480), '*')
    end
end

```

```

if(get(UIparameters.Camer,'Value')==3)
    if(~isempty(centroids1) && ~isempty(centroids2))
        if(view3D)
            if(size(centroids1)==size(centroids2))
                patch(UIparameters.ax3,[0 640 640 0], [0 0 640 640],[0
0 0 0],[0.5 0.5 0.5] )
                grid on
                xlabel('X'); xlim(UIparameters.ax3,[0 640])
                ylabel('Y'); ylim(UIparameters.ax3,[0 640])
                zlabel('Z'); zlim(UIparameters.ax3,[0 480])

plot3(UIparameters.ax3,centroids1(:,1),centroids2(:,1),abs(centroids1(:,2)-
480),'*')
            end
        end
    end
end
if(PrevView1~=get(UIparameters.edit5,'Value') ||
PrevView2~=get(UIparameters.edit6,'Value'))

view(UIparameters.ax3,get(UIparameters.edit5,'Value'),get(UIparameters.edit
6,'Value'));
end
PrevView1=get(UIparameters.edit5,'Value');
PrevView2=get(UIparameters.edit6,'Value');
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% im show %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if(get(UIparameters.Camer,'Value')==3 &&
get(UIparameters.CameraOn,'Value'))
    step(videoPlayer2,I1);
    step(videoPlayer4,I2);
end
if(get(UIparameters.Camer,'Value')<3 &&
get(UIparameters.CameraOn,'Value'))
    step(videoPlayer2,I1);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

UIparameters.txtGrayThres1Val.String=UIparameters.GrayThres1.Value;
UIparameters.txtAreaMax1Val.String=UIparameters.AreaMax1.Value;
UIparameters.txtAreaMin1Val.String=UIparameters.AreaMin1.Value;
UIparameters.txtGrayThres2Val.String=UIparameters.GrayThres2.Value;
UIparameters.txtAreaMax2Val.String=UIparameters.AreaMax2.Value;
UIparameters.txtAreaMin2Val.String=UIparameters.AreaMin2.Value;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Apostolh dedomenwn
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
modeToSend=find(DoMode==1);
if(get(UIparameters.Ard,'Value') && (sum(DoMode)==1))
    flushinput(arduino);
    if(modeToSend<5)

fprintf(arduino,'%s',[num2str(modeToSend),'0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
','p']);

fprintf([num2str(modeToSend),'0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,','p','\n'])
;
        if(modeToSend==1)
            UIparameters.demo1.Value=0;

```

```

end
if(modeToSend==2)
    UIparameters.demo2.Value=0;
end
if(modeToSend==3)
    UIparameters.demo3.Value=0;
end
if(modeToSend==4)
    UIparameters.demo4.Value=0;
end
end

if(modeToSend==5)
    sendChambers=createSend(UIparameters);

fprintf(arduino,'%s',[num2str(modeToSend),' ',num2str(sendChambers(1)),' ',
num2str(sendChambers(2)),' ',num2str(sendChambers(3)),' ',num2str(sendChambers(4)),'...

',' ',num2str(sendChambers(5)),' ',num2str(sendChambers(6)),' ',num2str(sendChambers(7)),' ',num2str(sendChambers(8)),'...

',' ',num2str(sendChambers(9)),' ',num2str(sendChambers(10)),' ',num2str(sendChambers(11)),' ',num2str(sendChambers(12)),'...

',' ',num2str(sendChambers(13)),' ',num2str(sendChambers(14)),'...
',' ', 'p']]);

fprintf([num2str(modeToSend),' ',num2str(sendChambers(1)),' ',num2str(sendChambers(2)),' ',num2str(sendChambers(3)),' ',num2str(sendChambers(4)),'...

',' ',num2str(sendChambers(5)),' ',num2str(sendChambers(6)),' ',num2str(sendChambers(7)),' ',num2str(sendChambers(8)),'...

',' ',num2str(sendChambers(9)),' ',num2str(sendChambers(10)),' ',num2str(sendChambers(11)),' ',num2str(sendChambers(12)),'...

',' ',num2str(sendChambers(13)),' ',num2str(sendChambers(14)),'...
',' ', 'p', '\n']]);
pause(0.001);
end
if(modeToSend==6)
    sendChambers=createSend2(UIparameters);

fprintf(arduino,'%s',[num2str(modeToSend),' ',num2str(sendChambers(1)),' ',
num2str(sendChambers(2)),' ',num2str(sendChambers(3)),' ',num2str(sendChambers(4)),'...

',' ',num2str(sendChambers(5)),' ',num2str(sendChambers(6)),' ',num2str(sendChambers(7)),' ',num2str(sendChambers(8)),'...

',' ',num2str(sendChambers(9)),' ',num2str(sendChambers(10)),' ',num2str(sendChambers(11)),' ',num2str(sendChambers(12)),'...

',' ',num2str(sendChambers(13)),' ',num2str(sendChambers(14)),'...
',' ', 'p']]);

fprintf([num2str(modeToSend),' ',num2str(sendChambers(1)),' ',num2str(sendChambers(2)),' ',num2str(sendChambers(3)),' ',num2str(sendChambers(4)),'...

```

```

',', num2str(sendChambers(5)), ',', num2str(sendChambers(6)), ',', num2str(sendChambers(7)), ',', num2str(sendChambers(8)), ...

',', num2str(sendChambers(9)), ',', num2str(sendChambers(10)), ',', num2str(sendChambers(11)), ',', num2str(sendChambers(12)), ...

',', num2str(sendChambers(13)), ',', num2str(sendChambers(14)), ...
    ',', 'p', '\n'];
    pause(0.001);
end
if(modeToSend==7) % feedback control
    thetaError=[-(round(degsz1(end))-thetaTargetX);-
(round(degsz2(end))-thetaTargetY)];
    ZError=(round(centroids1(end,2)-StartZ)*PixelLength)-targetZ;
%
sendChambers=createSend3([round(degsz2(end));round(degsz2(end))],thetaError,controllerToUse,Kp,Kd,dt,dTheta,Segments);
    sendChambers=createSend4(round((round(centroids1(end,2)-StartZ)*PixelLength)),round(ZError),controllerToUse,Kp,Kd,dt,0);
    fprintf(arduino,'%s',[num2str(modeToSend-1), ',', num2str(sendChambers(1)), ',', num2str(sendChambers(2)), ',', num2str(sendChambers(3)), ',', num2str(sendChambers(4)), ...

',', num2str(sendChambers(5)), ',', num2str(sendChambers(6)), ',', num2str(sendChambers(7)), ',', num2str(sendChambers(8)), ...

',', num2str(sendChambers(9)), ',', num2str(sendChambers(10)), ',', num2str(sendChambers(11)), ',', num2str(sendChambers(12)), ...

',', num2str(sendChambers(13)), ',', num2str(sendChambers(14)), ...
    ',', 'p'];

Results.TargetThetaX{ii}=str2double(UIparameters.ThetaXVal.String);
    Results.TargetThetaY{ii}=thetaTargetY;
    Results.thetaErrorX{ii}=thetaError(1);
    Results.thetaErrorY{ii}=thetaError(2);
    Results.TargetZ{ii}=targetZ;
    if(countT>0)
        Results.TestSignal{countT}=sendChambers;
    end
    Results.DutC{ii}=sendChambers(4);
end

if(modeToSend>=5)
    Results.SignalSend{ii}=sendChambers;
end

end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if(get(UIparameters.Camer,'Value')==4)
    pause(0.001);
end

fps=1/toc;
dt=toc;
loopTime=toc;
totalTime=totalTime+loopTime;
if(get(UIparameters.Camer,'Value')==3)

```

```

        UIparameters.txtN3.String=['X:', num2str(round(degsz1(end))), ' Y:
', num2str(round(degsz2(end)))]];
        UIparameters.txtN8.String=['X:', num2str(round((centroids1(end,1)-
StartX)*PixelLength)), ' Y:', num2str(round((centroids2(end,1)-
StartY)*PixelLength)), ' Z:', num2str(round((centroids1(end,2)-
StartZ)*PixelLength))];
        UIparameters.txtN14.String=['X:', num2str(round(centroids1(end,1)-
StartX), ' Y:', num2str(round(centroids2(end,1)-StartY), '
Z:', num2str(round(abs(centroids1(end,2)-StartZ))))];
        Results.thetaTipX{ii}=degsz1(end);
        Results.thetaTipY{ii}=degsz2(end);
        Results.pixelX{ii}=centroids1(end,1)-StartX;
        Results.pixelY{ii}=centroids2(end,1)-StartY;
        Results.pixelZ{ii}=abs(centroids1(end,2)-480)-StartZ;
        Results.realX{ii}=(centroids1(end,1)-StartX)*PixelLength;
        Results.realY{ii}=(centroids2(end,1)-StartY)*PixelLength;
        Results.realZ{ii}=(abs(centroids1(end,2))-StartZ)*PixelLength;
    end
    if(isempty(modeToSend))
        Results.SignalSend{ii}=[0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
    end
    if(ii>1)
        dTheta=Results.thetaTipY{ii}-Results.thetaTipY{ii-1};
    end
    Results.OverAllTime{ii}=totalTime;
    Results.loopTime{ii}=loopTime;

end
if(UIparameters.CameraS.Value)
    close(v1)
    close(v2)
    Results.v1=v1;
    Results.v2=v2;
end
%% telos programmatos
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if(get(UIparameters.Ard, 'Value'))
    fclose(arduino);
end
MeanTimeOfLoop=totalTime/ii;
Meanfps=1/MeanTimeOfLoop;
%% save for optimization %%
p = profile('info');
save myprofiledata p
figure(100)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% save results %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Filename=get(UIparameters.FileName, 'String');
Filepath=get(UIparameters.FilePath, 'String');
FolderName=erase(Filepath, [pwd, '/']);
Filepath=erase(Filepath, FolderName);
if~exist(FolderName, 'dir')
    mkdir(FolderName)
end
save([[Filepath, FolderName], '\', Filename], 'Results');
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
plot(cell2mat(Results.loopTime))
if(get(UIparameters.Camer, 'Value')==3)
    plot(cell2mat(Results.thetaTipX))

```

```

end
close all;
clear camera1
clear camera2
if(plotAll)
    figure(4)

plot(cell2mat(Results.OverAllTime),cell2mat(Results.thetaTipY),'g','Linewidth',2)
    hold on

plot(cell2mat(Results.OverAllTime),cell2mat(Results.thetaErrorY),'b','Linewidth',2)

plot(cell2mat(Results.OverAllTime),cell2mat(Results.TragetThetaY),'r','Linewidth',2)
    figure(5)

plot(cell2mat(Results.OverAllTime),cell2mat(Results.DutC),'r','Linewidth',2)
)
    figure(7)
    plot(cell2mat(Results.TestTime),cell2mat(Results.TestTarget))
    hold on
    plot(cell2mat(Results.TestTime),cell2mat(Results.TestTheta))
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Functions %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [centroids,degsz] = WhiteDotsInWB(I,minS,maxS,bwThres)
%
I=im2bw(I,bwThres);
Ig = bwareafilt(I,[minS maxS]);
s = regionprops(Ig, 'centroid','Area','BoundingBox');
centroids = cat(1, s.Centroid);

if (~isempty(centroids))
    centroids=sortrows(centroids,2);
    sizeC=size(centroids);
    degsz=zeros(sizeC(1)-1,1);
    for ii=1:(size(centroids)-1)
        degsz(ii)=90-rad2deg(atan2(centroids(ii+1,2)-centroids(ii,2),centroids(ii+1,1)-centroids(ii,1)));
    end

else
    degsz=[];
    centroids=[];
end
end

function Close_Prog(~,~,~)
end

function sendChambers=createSend(UIparameters)
if(UIparameters.S1CH1P.Value)
    sendS1CH1=1;
end
if(UIparameters.S1CH1M.Value)
    sendS1CH1=-1;
end
if(~UIparameters.S1CH1P.Value && ~UIparameters.S1CH1M.Value)
    sendS1CH1=0;
end

```



```

end

if (UIparameters.S1CH2P.Value)
    sendS1CH2=1;
end
if (UIparameters.S1CH2M.Value)
    sendS1CH2=-1;
end
if (~UIparameters.S1CH2P.Value && ~UIparameters.S1CH2M.Value)
    sendS1CH2=0;
end

if (UIparameters.S1CH3P.Value)
    sendS1CH3=1;
end
if (UIparameters.S1CH3M.Value)
    sendS1CH3=-1;
end
if (~UIparameters.S1CH3P.Value && ~UIparameters.S1CH3M.Value)
    sendS1CH3=0;
end

if (UIparameters.S1CH4P.Value)
    sendS1CH4=1;
end
if (UIparameters.S1CH4M.Value)
    sendS1CH4=-1;
end
if (~UIparameters.S1CH4P.Value && ~UIparameters.S1CH4M.Value)
    sendS1CH4=0;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if (UIparameters.S2CH1P.Value)
    sendS2CH1=1;
end
if (UIparameters.S2CH1M.Value)
    sendS2CH1=-1;
end
if (~UIparameters.S2CH1P.Value && ~UIparameters.S2CH1M.Value)
    sendS2CH1=0;
end

if (UIparameters.S2CH2P.Value)
    sendS2CH2=1;
end
if (UIparameters.S2CH2M.Value)
    sendS2CH2=-1;
end
if (~UIparameters.S2CH2P.Value && ~UIparameters.S2CH2M.Value)
    sendS2CH2=0;
end

if (UIparameters.S2CH3P.Value)
    sendS2CH3=1;
end
if (UIparameters.S2CH3M.Value)
    sendS2CH3=-1;
end
if (~UIparameters.S2CH3P.Value && ~UIparameters.S2CH3M.Value)

```

```

        sendS2CH3=0;
end

if (UIparameters.S2CH4P.Value)
    sendS2CH4=1;
end
if (UIparameters.S2CH4M.Value)
    sendS2CH4=-1;
end
if (~UIparameters.S2CH4P.Value && ~UIparameters.S2CH4M.Value)
    sendS2CH4=0;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if (UIparameters.S3CH1P.Value)
    sendS3CH1=1;
end
if (UIparameters.S3CH1M.Value)
    sendS3CH1=-1;
end
if (~UIparameters.S3CH1P.Value && ~UIparameters.S3CH1M.Value)
    sendS3CH1=0;
end

if (UIparameters.S3CH2P.Value)
    sendS3CH2=1;
end
if (UIparameters.S3CH2M.Value)
    sendS3CH2=-1;
end
if (~UIparameters.S3CH2P.Value && ~UIparameters.S3CH2M.Value)
    sendS3CH2=0;
end

if (UIparameters.S3CH3P.Value)
    sendS3CH3=1;
end
if (UIparameters.S3CH3M.Value)
    sendS3CH3=-1;
end
if (~UIparameters.S3CH3P.Value && ~UIparameters.S3CH3M.Value)
    sendS3CH3=0;
end

if (UIparameters.S3CH4P.Value)
    sendS3CH4=1;
end
if (UIparameters.S3CH4M.Value)
    sendS3CH4=-1;
end
if (~UIparameters.S3CH4P.Value && ~UIparameters.S3CH4M.Value)
    sendS3CH4=0;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if (UIparameters.S4CH1P.Value)
    sendS4CH1=1;
end
if (UIparameters.S4CH1M.Value)
    sendS4CH1=-1;
end

```

```

end
if (~UIparameters.S4CH1P.Value && ~UIparameters.S4CH1M.Value)
    sendS4CH1=0;
end
if (UIparameters.S4CH2P.Value)
    sendS4CH2=1;
end
if (UIparameters.S4CH2M.Value)
    sendS4CH2=-1;
end
if (~UIparameters.S4CH2P.Value && ~UIparameters.S4CH2M.Value)
    sendS4CH2=0;
end
sendChambers=10*[sendS1CH1, sendS1CH2, sendS1CH3, sendS1CH4, ...
    sendS2CH1, sendS2CH2, sendS2CH3, sendS2CH4, ...
    sendS3CH1, sendS3CH2, sendS3CH3, sendS3CH4, ...
    sendS4CH1, sendS4CH2];
end

function sendChambers=createSend2 (UIparameters)
sendS1CH1=0;
sendS2CH1=0;
sendS3CH1=0;
sendS1CH2=0;
sendS2CH2=0;
sendS3CH2=0;
sendS1CH3=0;
sendS2CH3=0;
sendS3CH3=0;
sendS1CH4=0;
sendS2CH4=0;
sendS3CH4=0;
if (UIparameters.Xp.Value)
    sendS1CH1=1;
    sendS2CH1=1;
    sendS3CH1=1;
    sendS1CH3=-1;
    sendS2CH3=-1;
    sendS3CH3=-1;
end
if (UIparameters.Xm.Value)
    sendS1CH3=1;
    sendS2CH3=1;
    sendS3CH3=1;
    sendS1CH1=-1;
    sendS2CH1=-1;
    sendS3CH1=-1;
end
if (~UIparameters.Xp.Value && ~UIparameters.Xm.Value)
    sendS1CH3=0;
    sendS2CH3=0;
    sendS3CH3=0;
    sendS1CH1=0;
    sendS2CH1=0;
    sendS3CH1=0;
end
if (UIparameters.Yp.Value)
    sendS1CH2=1;
    sendS2CH2=1;
    sendS3CH2=1;
end

```

```

        sendS1CH4=-1;
        sendS2CH4=-1;
        sendS3CH4=-1;
end
if(UIparameters.Ym.Value)
    sendS1CH4=1;
    sendS2CH4=1;
    sendS3CH4=1;
    sendS1CH2=-1;
    sendS2CH2=-1;
    sendS3CH2=-1;
end
if(~UIparameters.Yp.Value && ~UIparameters.Ym.Value)
    sendS1CH2=0;
    sendS2CH2=0;
    sendS3CH2=0;
    sendS1CH4=0;
    sendS2CH4=0;
    sendS3CH4=0;
end
if(UIparameters.Zp.Value)
    sendS1CH1=-1;
    sendS2CH1=-1;
    sendS3CH1=-1;
    sendS1CH2=-1;
    sendS2CH2=-1;
    sendS3CH2=-1;
    sendS1CH3=-1;
    sendS2CH3=-1;
    sendS3CH3=-1;
    sendS1CH4=-1;
    sendS2CH4=-1;
    sendS3CH4=-1;
end
if(UIparameters.Zm.Value)
    sendS1CH1=1;
    sendS2CH1=1;
    sendS3CH1=1;
    sendS1CH2=1;
    sendS2CH2=1;
    sendS3CH2=1;
    sendS1CH3=1;
    sendS2CH3=1;
    sendS3CH3=1;
    sendS1CH4=1;
    sendS2CH4=1;
    sendS3CH4=1;
end
if(UIparameters.CW.Value)
    sendS4CH1=1;
    sendS4CH2=-1;
end
if(UIparameters.CCW.Value)
    sendS4CH1=-1;
    sendS4CH2=1;
end
if(~UIparameters.CW.Value && ~UIparameters.CCW.Value)
    sendS4CH1=0;
    sendS4CH2=0;
end
end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
sendChambers=10*[sendS1CH1, sendS1CH2, sendS1CH3, sendS1CH4, ...
    sendS2CH1, sendS2CH2, sendS2CH3, sendS2CH4, ...
    sendS3CH1, sendS3CH2, sendS3CH3, sendS3CH4, ...
    sendS4CH1, sendS4CH2];
end

function
sendChambers=createSend3(theta, thetaError, controllerToUse, Kp, Kd, dt, dTheta, S
egments)
sendS1CH1=0;
sendS2CH1=0;
sendS3CH1=0;
sendS1CH2=0;
sendS2CH2=0;
sendS3CH2=0;
sendS1CH3=0;
sendS2CH3=0;
sendS3CH3=0;
sendS1CH4=0;
sendS2CH4=0;
sendS3CH4=0;
sendS4CH1=0;
sendS4CH2=0;
if (Segments==3)
    if (theta(2)<0)
        if (thetaError(2)<0)
            sendS1CH4=1;
            sendS2CH3=1;
            sendS2CH4=1;
            sendS3CH4=1;
        end
        if (thetaError(2)>0)
            sendS1CH4=-1;
            sendS2CH3=-1;
            sendS2CH4=-1;
            sendS3CH4=-1;
        end
    end
    if (theta(2)>0)
        if (thetaError(2)<0)
            sendS1CH2=-1;
            sendS2CH1=-1;
            sendS2CH2=-1;
            sendS3CH2=-1;
        end
        if (thetaError(2)>0)
            sendS1CH2=1;
            sendS2CH1=1;
            sendS2CH2=1;
            sendS3CH2=1;
        end
    end
    if (theta(2)==0)
        if (thetaError(2)>0)
            sendS1CH2=1;
            sendS2CH1=1;
            sendS2CH2=1;
        end
    end
end

```

```

        sendS3CH2=1;
    end
    if(thetaError(2)<0)
        sendS1CH4=1;
        sendS2CH3=1;
        sendS2CH4=1;
        sendS3CH4=1;
    end
end
end
if(Segments==1)
    if(theta(2)<0)
        if(thetaError(2)<0)
            sendS1CH4=1;
        end
        if(thetaError(2)>0)
            sendS1CH4=-1;
        end
    end
    if(theta(2)>0)
        if(thetaError(2)<0)
            sendS1CH2=-1;
        end
        if(thetaError(2)>0)
            sendS1CH2=1;
        end
    end
    if(theta(2)==0)
        if(thetaError(2)>0)
            sendS1CH2=1;
        end
        if(thetaError(2)<0)
            sendS1CH4=1;
        end
    end
end
end

if(thetaError(2)==0)
    sendS1CH4=0;
    sendS1CH2=0;
    sendS2CH3=0;
    sendS2CH4=0;
    sendS2CH1=0;
    sendS2CH2=0;
    sendS3CH2=0;
    sendS3CH4=0;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
if(controllerToUse==1)
    sK=abs(thetaError(2))*Kp;
    if(sK>90)
        sK=90;
    end
    if(sK<9)
        sK=9;
    end
end
end
if(controllerToUse==2)
    Kd*(dTheta/dt)
end

```

```

    sK=Kp*abs(thetaError(2))+Kd*(dTheta/dt);
    if(sK>80)
        sK=80;
    end
    if(sK<9)
        sK=9;
    end
end
if(controllerToUse==3)
    Kd*(dTheta/dt);
    sK=Kp*abs(thetaError(2))+Kd*(dTheta/dt);
    if(sK>80)
        sK=80;
    end
    if(sK<9)
        sK=9;
    end
end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
sendChambers=sK*[sendS1CH1,sendS1CH2,sendS1CH3,sendS1CH4,...
    sendS2CH1,sendS2CH2,sendS2CH3,sendS2CH4,...
    sendS3CH1,sendS3CH2,sendS3CH3,sendS3CH4,...
    sendS4CH1,sendS4CH2];
end

function sendChambers=createSend4(Zpos,ZError,controllerToUse,Kp,Kd,dt,dZ)
sendS1CH1=0;
sendS2CH1=0;
sendS3CH1=0;
sendS1CH2=0;
sendS2CH2=0;
sendS3CH2=0;
sendS1CH3=0;
sendS2CH3=0;
sendS3CH3=0;
sendS1CH4=0;
sendS2CH4=0;
sendS3CH4=0;
sendS4CH1=0;
sendS4CH2=0;

if(ZError<0)
    sendS2CH1=-1;
    sendS2CH2=-1;
    sendS2CH3=-1;
    sendS2CH4=-1;
end
if(ZError>0)
    sendS2CH1=1;
    sendS2CH2=1;
    sendS2CH3=1;
    sendS2CH4=1;
end

if(ZError==0)
    sendS2CH1=0;
    sendS2CH2=0;
end

```

```

        sendS2CH3=0;
        sendS2CH4=0;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
if(controllerToUse==1)
    sK=abs(ZError)*Kp;
    if(sK>90)
        sK=90;
    end
    if(sK<9)
        sK=9;
    end
end
if(controllerToUse==2)
    %      Kd*(dTheta/dt)
    sK=Kp*abs(ZError)+Kd*(dZ/dt);
    if(sK>80)
        sK=80;
    end
    if(sK<10)
        sK=10;
    end
end
if(controllerToUse==3)
    Kd*(dTheta/dt);
    sK=Kp*abs(ZError)+Kd*(dTheta/dt);
    if(sK>80)
        sK=80;
    end
    if(sK<10)
        sK=10;
    end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
sendChambers=sK*[sendS1CH1,sendS1CH2,sendS1CH3,sendS1CH4,...
    sendS2CH1,sendS2CH2,sendS2CH3,sendS2CH4,...
    sendS3CH1,sendS3CH2,sendS3CH3,sendS3CH4,...
    sendS4CH1,sendS4CH2];
end

```


Παράρτημα Γ: Κώδικας Λογισμικού Μονάδας Οδήγησης Βιομιμητικού Ρομποτικού Βραχίονα

Ο έλεγχος λειτουργίας της μονάδας ελέγχου του βιομιμητικού ρομποτικού βραχίονα πραγματοποιείται με χρήση ενός μικροελεγκτή Teensy 3.6. Παρακάτω παρουσιάζεται ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την επικοινωνία με τον μικροελεγκτή με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή καθώς και τον έλεγχο των σωληνοειδών βαλβίδων.

```
#include <TimerOne.h>
```

```
int i=0;
```

```
String a1,a2,a3,a4,a5,a6,a7,a8,a9,a10,a11,a12,a13,a14,a15,a16;
```

```
String a1n,a2n,a3n,a4n,a5n,a6n,a7n,a8n,a9n,a10n,a11n,a12n,a13n,a14n,a15n,a16n;
```

```
char inputString;
```

```
boolean stringComplete = false;
```

```
volatile long c11=0,c12=0,c13=0,c14=0;
```

```
volatile long c21=0,c22=0,c23=0,c24=0;
```

```

volatile long c31=0,c32=0,c33=0,c34=0;

volatile long c41=0,c42=0;

volatile long dc=1;

volatile unsigned long maxT=100;

int c111=20,c112=17,c121=14,c122=16,c131=22,c132=3,c141=21,c142=2; // defining pins for first segment
int c211=13,c212=19,c221=29,c222=15,c231=23,c232=18,c241=5,c242=4; // defining pins for second
segment
int c311=12,c312=26,c321=7,c322=27,c331=6,c332=10,c341=24,c342=25; // defining pins for third segment
int c411=28,c412=11,c421=8,c422=9; // defining pins for twist segment

int mode1=0, count=1, flag=0;

void setup() {

pinMode(c111,OUTPUT);

pinMode(c112,OUTPUT);

pinMode(c121,OUTPUT);

pinMode(c122,OUTPUT);

pinMode(c131,OUTPUT);

pinMode(c132,OUTPUT);

pinMode(c141,OUTPUT);

pinMode(c142,OUTPUT);

pinMode(c211,OUTPUT);

pinMode(c212,OUTPUT);

pinMode(c221,OUTPUT);

pinMode(c222,OUTPUT);

pinMode(c231,OUTPUT);

pinMode(c232,OUTPUT);

pinMode(c241,OUTPUT);

pinMode(c242,OUTPUT);

pinMode(c311,OUTPUT);

pinMode(c312,OUTPUT);

```

```
pinMode(c321,OUTPUT);
pinMode(c322,OUTPUT);
pinMode(c331,OUTPUT);
pinMode(c332,OUTPUT);
pinMode(c341,OUTPUT);
pinMode(c342,OUTPUT);
pinMode(c411,OUTPUT);
pinMode(c412,OUTPUT);
pinMode(c421,OUTPUT);
pinMode(c422,OUTPUT);
digitalWrite(c111,HIGH);
digitalWrite(c121,HIGH);
digitalWrite(c131,HIGH);
digitalWrite(c141,HIGH);
digitalWrite(c211,HIGH);
digitalWrite(c221,HIGH);
digitalWrite(c231,HIGH);
digitalWrite(c241,HIGH);
digitalWrite(c311,HIGH);
digitalWrite(c321,HIGH);
digitalWrite(c331,HIGH);
digitalWrite(c341,HIGH);
digitalWrite(c411,HIGH);
digitalWrite(c421,HIGH);
```

```
Timer1.initialize(500);
```

```
Timer1.attachInterrupt(ControlValves);
```

```
Serial.begin(115200);
```

```

}

void loop() {

if (stringComplete){

mode1=a1.toInt();

a2n = a2.substring(1);  a3n = a3.substring(1);  a4n = a4.substring(1);  a5n = a5.substring(1);

a6n = a6.substring(1);  a7n = a7.substring(1);  a8n = a8.substring(1);  a9n = a9.substring(1);

a10n = a10.substring(1);  a11n = a11.substring(1);  a12n = a12.substring(1);  a13n = a13.substring(1);

a14n = a14.substring(1);  a15n = a15.substring(1);  a16n = a16.substring(1);

c11=a2n.toInt();  c12=a3n.toInt();  c13=a4n.toInt();  c14=a5n.toInt();

c21=a6n.toInt();  c22=a7n.toInt();  c23=a8n.toInt();  c24=a9n.toInt();

c31=a10n.toInt();  c32=a11n.toInt();  c33=a12n.toInt();  c34=a13n.toInt();

c41=a14n.toInt();  c42=c41; //c42=a15n.toInt();

flag=1;

a1="";a2="";a3="";a4="";a5="";a6="";a7="";a8="";a9="";a10="";a11="";a12="";a13="";a14="";a15="";a16="";

stringComplete=false;

}

}

void ControlValves(void){

if(c11>=0){digitalWrite(c112,HIGH);

if(dc<abs(c11)){digitalWrite(c111,LOW);}

if(dc>abs(c11)) {digitalWrite(c111,HIGH); }

if(abs(c11)==0) {digitalWrite(c111,HIGH); digitalWrite(c112,HIGH);}

}

if(c11<0){digitalWrite(c111,HIGH);

if(dc<abs(c11)){digitalWrite(c112,LOW); }

if(dc>=abs(c11)) {digitalWrite(c112,HIGH);}

}

if(c12>=0){digitalWrite(c122,HIGH);

```

```

if(dc<abs(c12)){digitalWrite(c121,LOW);}
if(dc>=abs(c12)) {digitalWrite(c121,HIGH); }
if(abs(c12)==0) {digitalWrite(c121,HIGH); digitalWrite(c122,HIGH);}
}
if(c12<0){digitalWrite(c121,HIGH);
if(dc<abs(c12)){digitalWrite(c122,LOW); }
if(dc>=abs(c12)) {digitalWrite(c122,HIGH);}
}
if(c13>=0){digitalWrite(c132,HIGH);
if(dc<abs(c13)){digitalWrite(c131,LOW);}
if(dc>=abs(c13)) {digitalWrite(c131,HIGH); }
if(abs(c13)==0) {digitalWrite(c131,HIGH); digitalWrite(c132,HIGH);}
}
if(c13<0){digitalWrite(c131,HIGH);
if(dc<abs(c13)){digitalWrite(c132,LOW); }
if(dc>=abs(c13)) {digitalWrite(c132,HIGH);}
}
if(c14>=0){digitalWrite(c142,HIGH);
if(dc<abs(c14)){digitalWrite(c141,LOW);}
if(dc>=abs(c14)) {digitalWrite(c141,HIGH); }
if(abs(c14)==0) {digitalWrite(c141,HIGH); digitalWrite(c142,HIGH);}
}
if(c14<0){digitalWrite(c121,HIGH);
if(dc<abs(c14)){digitalWrite(c142,LOW); }
if(dc>=abs(c14)) {digitalWrite(c142,HIGH);}
}
if(c21>=0){digitalWrite(c212,HIGH);
if(dc<abs(c21)){digitalWrite(c211,LOW);}

```

```

if(dc>=abs(c21)) {digitalWrite(c211,HIGH); }

if(abs(c21)==0) {digitalWrite(c211,HIGH); digitalWrite(c212,HIGH);}

}

if(c21<0){digitalWrite(c211,HIGH);

if(dc<abs(c21)){digitalWrite(c212,LOW); }

if(dc>=abs(c21)) {digitalWrite(c212,HIGH);}

}

if(c22>=0){digitalWrite(c222,HIGH);

if(dc<abs(c22)){digitalWrite(c221,LOW);}

if(dc>=abs(c22)) {digitalWrite(c221,HIGH); }

if(abs(c22)==0) {digitalWrite(c221,HIGH); digitalWrite(c222,HIGH);}

}

if(c22<0){digitalWrite(c221,HIGH);

if(dc<abs(c22)){digitalWrite(c222,LOW); }

if(dc>=abs(c22)) {digitalWrite(c222,HIGH);}

}

if(c23>=0){digitalWrite(c232,HIGH);

if(dc<abs(c23)){digitalWrite(c231,LOW);}

if(dc>=abs(c23)) {digitalWrite(c231,HIGH); }

if(abs(c23)==0) {digitalWrite(c231,HIGH); digitalWrite(c232,HIGH);}

}

if(c23<0){digitalWrite(c231,HIGH);

if(dc<abs(c23)){digitalWrite(c232,LOW); }

if(dc>=abs(c23)) {digitalWrite(c232,HIGH);}

}

if(c24>=0){digitalWrite(c242,HIGH);

if(dc<abs(c24)){digitalWrite(c241,LOW);}

```

```

if(dc>=abs(c24)) {digitalWrite(c241,HIGH); }

if(abs(c24)==0) {digitalWrite(c241,HIGH); digitalWrite(c242,HIGH);}

}

if(c24<0){digitalWrite(c221,HIGH);

if(dc<abs(c24)){digitalWrite(c242,LOW); }

if(dc>=abs(c24)) {digitalWrite(c242,HIGH);}

}

if(c31>=0){digitalWrite(c312,HIGH);

if(dc<abs(c31)){digitalWrite(c311,LOW);}

if(dc>=abs(c31)) {digitalWrite(c311,HIGH); }

if(abs(c31)==0) {digitalWrite(c311,HIGH); digitalWrite(c312,HIGH);}

}

if(c31<0){digitalWrite(c311,HIGH);

if(dc<abs(c31)){digitalWrite(c312,LOW); }

if(dc>=abs(c31)) {digitalWrite(c312,HIGH);}

}

if(c32>=0){digitalWrite(c322,HIGH);

if(dc<abs(c32)){digitalWrite(c321,LOW);}

if(dc>=abs(c32)) {digitalWrite(c321,HIGH); }

if(abs(c32)==0) {digitalWrite(c321,HIGH); digitalWrite(c322,HIGH);}

}

if(c32<0){digitalWrite(c321,HIGH);

if(dc<abs(c32)){digitalWrite(c322,LOW); }

if(dc>=abs(c32)) {digitalWrite(c322,HIGH);}

}

if(c33>=0){digitalWrite(c332,HIGH);

if(dc<abs(c33)){digitalWrite(c331,LOW);}

if(dc>=abs(c33)) {digitalWrite(c331,HIGH); }

```

```

if(abs(c33)==0) {digitalWrite(c331,HIGH); digitalWrite(c332,HIGH);}
}
if(c33<0){digitalWrite(c331,HIGH);
if(dc<abs(c33)){digitalWrite(c332,LOW); }
if(dc>=abs(c33)) {digitalWrite(c332,HIGH);}
}
if(c34>=0){digitalWrite(c342,HIGH);
if(dc<abs(c34)){digitalWrite(c341,LOW);}
if(dc>=abs(c34)) {digitalWrite(c341,HIGH); }
if(abs(c34)==0) {digitalWrite(c341,HIGH); digitalWrite(c342,HIGH);}
}
if(c34<0){digitalWrite(c321,HIGH);
if(dc<abs(c34)){digitalWrite(c342,LOW); }
if(dc>=abs(c34)) {digitalWrite(c342,HIGH);}
}
dc=dc+1;
if(dc>=maxT){
dc =0;}
}
void serialEvent() {
while (Serial.available()) {
// get the new byte:
char inChar = (char)Serial.read();
if (inChar == ',') { count = count + 1; }
if (count == 1) { a1 += inChar; }
if (count == 2) { a2 += inChar; }
if (count == 3) { a3 += inChar; }
if (count == 4) { a4 += inChar; }
}
}

```



```
if (count == 5) { a5 += inChar; }
if (count == 6) { a6 += inChar; }
if (count == 7) { a7 += inChar; }
if (count == 8) { a8 += inChar; }
if (count == 9) { a9 += inChar; }
if (count == 10){ a10 += inChar; }
if (count == 11){ a11 += inChar; }
if (count == 12){ a12 += inChar; }
if (count == 13){ a13 += inChar; }
if (count == 14){ a14 += inChar; }
if (count == 15){ a15 += inChar; }
if (count == 16){ a16 += inChar; }
if (inChar == 'p') {
stringComplete = true;
count = 1;
}
}
}
```