



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

**Έλεγχος και προγραμματισμός ρομποτικής διάταξης τύλιξης νήματος
για κατασκευή απλών τεμαχίων από σύνθετα υλικά**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΠΙΓΓΙΩΤΗΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ

Επιβλέπων : Γ.-Χ. Βοσνιάκος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2017

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής εργασίας, τον κ. Γεώργιο Χ. Βοσνιάκο για την ευκαιρία που μου έδωσε καθώς και για την συνεργασία μας κατά την διάρκεια εκπόνησης της.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Μελισσά και τον κ. Κερασιώτη για την συμβολή τους στο κατασκευαστικό κομμάτι της εργασίας καθώς επίσης τον Γ. Παπαζέτη και τον Χ. Μαραγκό για την βοήθειά τους.

Ευχαριστώ επίσης τους συμφοιτητές που δουλέψαμε μαζί στο εργαστήριο, Α. Ντίνε, Χ. Πατρινό και Κ. Πετρόπουλο.

Τέλος, θερμές ευχαριστίες οφείλω στην οικογένεια μου που μου συμπαραστέκεται όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η υλοποίηση μιας ρομποτικής διάταξης η οποία θα χρησιμοποιεί την κεφαλή τύλιξης νήματος που έχει κατασκευαστεί στο εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών στα πλαίσια παλαιότερης διπλωματικής εργασίας και προσαρμόζεται στο ρομπότ Staubli RX90.

Στην αρχή της εργασίας , πραγματοποιείται μία παρουσίαση για τα χαρακτηριστικά, τα είδη και τις εφαρμογές των βιομηχανικών ρομπότ στην σημερινή εποχή. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά και οι δυνατότητες του ρομπότ που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία. Επίσης, αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας του ρομποτικού βραχίονα και οι βασικές εντολές της γλώσσας προγραμματισμού που χρησιμοποιείται για τον προγραμματισμό του.

Έπειτα, γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση της κατεργασίας της περιέλιξης ινών (filament winding) και των υπαρχουσών τεχνολογιών που αφορούν την χρήση ρομποτικών βραχιόνων στην συγκεκριμένη κατεργασία.

Στα επόμενα κεφάλαια γίνεται παρουσίαση της βάσης που κατασκευάστηκε για την στήριξη του καλουπιού. Στην παρουσίαση αυτή αναλύονται τα ηλεκτρονικά συστήματα (βηματικός κινητήρας, οδηγός κινητήρα και μικροελεγκτής) και το σύστημα μετάδοσης κίνησης που χρησιμοποιήθηκαν για την περιστροφή του καλουπιού.

Τέλος, παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της κατεργασίας για κυλινδρικό καλούπι με δύο διαφορετικές γωνίες περιέλιξης καθώς επίσης και για κωνικό καλούπι ενώ παρουσιάζεται και ο τρόπος με τον οποίο έγινε ο συγχρονισμός της ταχύτητας κίνησης του τελικού σημείο δράσης του ρομποτικού βραχίονα και της περιστροφικής κίνησης του καλουπιού.

Λέξεις Κλειδιά: Ρομπότ Staubli RX90, V+ language, Arduino, μικροελεγκτής, SolidWorks, filament winding

Abstract

The aim of this dissertation is the design and the construction of a robotic array which will use the filament winding head that has been manufactured in the laboratory of the Manufacturing Technology as a part of a previous dissertation and it is installed to the Staubli RX90 robot.

The introduction of the dissertation includes a presentation of the characteristics and the applications of the industrial robots today. Then, the characteristics and the technical specification of the robot used in this thesis are discussed. Moreover, the programming language which is used to program the robot is analyzed.

The next chapter provides a literature overview of the filament winding process and the current technologies regarding the use of robotic arms in the specific process.

The following chapter includes the presentation of the base which was constructed to support the mandrel. The electronic systems which were used (stepper motor, stepper motor driver and micro controller) as well as the drive system used for the rotation of the mandrel are analyzed.

Finally, the last chapter presents the outcome of the process perform in a cylinder mandrel with two different winding angles and the winding in a conical mandrel. In this chapter the method used to synchronize the speed of the robotic arm with the rotational movement of the mandrel is indicated.

Keywords: Staubli RX90 robot , V+ language, Arduino, micro controller, SolidWorks, filament Winding

Πίνακας Περιεχομένων

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT	4
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	8
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	11
1 ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ	12
1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ – ΟΡΙΣΜΟΙ	12
1.2 ΕΙΔΗ ΡΟΜΠΟΤ	13
1.3 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΙ ΒΡΑΧΙΟΝΕΣ	14
1.3.1 Περιγραφή	14
1.3.2 Είδη αρθρώσεων	16
1.3.3 Ταξινόμηση Βραχιόνων βάση της γεωμετρικής διαμόρφωσης	17
1.3.4 Σύστημα κίνησης	19
1.3.5 Χρήση	20
1.3.6 Μέθοδοι Προγραμματισμού Ρομπότ	21
2 ΣΤΑΥΒΛΙ RX90L	24
2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	24
2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	25
2.2.1 Χώρος εργασίας	26
2.3 ΕΛΕΓΚΤΗΣ CS7	27
2.4 ΧΕΙΡΙΣΤΗΡΙΟ (TEACH PENDANT)	28
2.4.1 Mode selection keys	28
2.4.2 Manual control keys	29
2.4.3 Functions keys	29
2.5 ΓΛΩΣΣΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ V+	29
2.5.1 Βασικές εντολές	30
2.5.2 Περιγραφή θέσεων	33
2.5.3 Εντολές κίνησης	33
2.6 SYSTEM INPUT/OUTPUT MODULE (SIO)	34
2.6.1 Γενικά Χαρακτηριστικά	34
2.6.2 Συνδέσεις και ενδείξεις	34
2.6.3 Σειριακές Συνδέσεις	35
2.6.4 RS-232 και V+	35
3 FILAMENT WINDING	37
3.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΕΡΙΕΛΙΞΗΣ ΙΝΩΝ	37
3.2 ΤΥΠΟΙ ΙΝΩΝ	38
3.3 ΡΗΤΙΝΕΣ/ ΜΗΤΡΕΣ (RESINS)	39

3.4	ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΜΠΟΤΙΣΜΟΥ.....	40
3.5	ΕΝΤΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΤΑ ΝΗΜΑΤΑ	41
3.6	ΕΙΔΗ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ.....	41
3.7	ΜΗΧΑΝΕΣ ΤΥΛΙΞΗΣ ΙΝΩΝ.....	43
3.8	ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΕΡΙΕΛΙΞΗΣ ΙΝΩΝ	43
3.9	ΠΕΡΙΕΛΙΞΗ ΙΝΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΡΟΜΠΟΤ.....	45
4	ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗΣ-ARDUINO	47
4.1	ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	47
4.2	ARDUINO UNO.....	47
4.3	ΕΙΣΟΔΟΙ - ΈΞΟΔΟΙ.....	48
4.4	ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ.....	49
4.5	ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ARDUINO	49
4.6	ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ.....	50
5	ΒΗΜΑΤΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ- ΕΛΕΓΚΤΕΣ.....	51
5.1	ΒΗΜΑΤΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ	51
5.1.1	<i>Χαρακτηριστικά.....</i>	<i>51</i>
5.1.2	<i>Αρχή λειτουργίας</i>	<i>51</i>
5.1.3	<i>Διαχωρισμός.....</i>	<i>53</i>
5.1.4	<i>Μέθοδοι βηματισμού (Step modes)</i>	<i>56</i>
5.1.5	<i>Εφαρμογή.....</i>	<i>58</i>
5.2	ΕΛΕΓΚΤΗΣ “BIG EASY DRIVER”	59
5.2.1	<i>Pins οδηγού (driver)</i>	<i>60</i>
5.2.2	<i>Τροφοδοσία</i>	<i>62</i>
5.2.3	<i>Συνδεσμολογία [25]</i>	<i>63</i>
5.3	ΚΩΔΙΚΑΣ ARDUINO.....	64
6	ΚΕΦΑΛΗ ΤΥΛΙΞΗΣ ΙΝΩΝ	66
6.1	ΒΑΣΙΚΟΣ ΣΚΕΛΕΤΟΣ.....	67
6.2	ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΑΤΗΡΙΩΝ	68
6.3	ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ	68
6.4	ΣΤΗΡΙΞΗ ΑΝΕΜΗΣ	69
6.5	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	70
7	ΒΑΣΗ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ	71
7.1	ΒΑΣΗ ΣΤΗΡΙΞΗΣ	71
7.2	ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ	74
7.3	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	79
8	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ - ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ.....	82

8.1	ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ- ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ	82
8.2	ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ ΚΑΛΟΥΠΙ	85
8.2.1	<i>Γωνία περιέλιξης 45°</i>	87
8.2.2	<i>Γωνία περιέλιξης 70°</i>	90
8.3	ΚΩΝΙΚΟ ΚΑΛΟΥΠΙ.....	94
9	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ	100
9.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	100
9.2	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ	100
10	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	102
11	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	104
11.1	ΚΩΔΙΚΕΣ	104
11.1.1	<i>Γνωστή ταχύτητα κεφαλής, εύρεση περιστροφικής ταχύτητας</i>	104
11.1.2	<i>Γνωστή περιστροφική ταχύτητα, εύρεση ταχύτητα κεφαλής</i>	105
11.1.3	<i>Πρόγραμμα ρομποτικού βραχίονα για κυλινδρικό καλούπι</i>	105
11.1.4	<i>Πρόγραμμα ρομποτικού βραχίονα για κωνικό καλούπι</i>	106

Πίνακας εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1-1 Ο ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΣ ΒΡΑΧΙΟΝΑΣ PUMA 560 ΤΗΣ UNIMATION INC	13
ΕΙΚΟΝΑ 1-2 ΤΥΠΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΡΟΜΠΌΤ	14
ΕΙΚΟΝΑ 1-3 ΤΥΠΙΚΕΣ ΑΡΘΡΩΣΕΙΣ	16
ΕΙΚΟΝΑ 1-4 ΚΑΡΤΕΣΙΑΝΟΣ ΒΡΑΧΙΟΝΑΣ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΒΡΑΧΙΟΝΑΣ GANTRY (ΔΕΞΙΑ)	18
ΕΙΚΟΝΑ 1-5 ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟΣ ΒΡΑΧΙΟΝΑΣ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΣΦΑΙΡΙΚΟΣ ΒΡΑΧΙΟΝΑΣ (ΔΕΞΙΑ)	18
ΕΙΚΟΝΑ 1-6 ΒΡΑΧΙΟΝΑΣ SCARA (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΑΝΘΡΩΠΟΜΟΡΦΙΚΟΣ ΒΡΑΧΙΟΝΑΣ (ΔΕΞΙΑ).....	19
ΕΙΚΟΝΑ 1-7 ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΡΤΕΣΙΑΝΩΝ, ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ, ΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΡΘΡΩΤΩΝ ΡΟΜΠΟΤ ΣΤΙΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	21
ΕΙΚΟΝΑ 2-1 ΣΤΑΥΒΛΙ RX90L.....	24
ΕΙΚΟΝΑ 2-2 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ RX90L.....	25
ΕΙΚΟΝΑ 2-3 ΧΩΡΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΑΥΒΛΙ RX90L.....	27
ΕΙΚΟΝΑ 3-1 ΤΥΠΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΜΗΧΑΝΗΣ ΠΕΡΙΕΛΙΞΗΣ ΙΝΩΝ	37
ΕΙΚΟΝΑ 3-2 ΤΕΜΑΧΙΟ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΕ ΑΠΟ FILAMENT WINDING	38
ΕΙΚΟΝΑ 3-3 ΪΝΕΣ ΥΑΛΟΥ, ΑΡΑΜΙΔΙΟΥ ΚΑΙ ΑΝΘΡΑΚΑ	39
ΕΙΚΟΝΑ 3-4 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΜΠΟΤΙΣΜΟΥ	40
ΕΙΚΟΝΑ 3-5 ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΚΑΛΥΜΜΑ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΟΥ ΠΥΡΑΥΛΟΥ (ORBITAL ATK)	42
ΕΙΚΟΝΑ 3-6 ΕΛΙΚΟΙΔΗΣ ΠΕΡΙΕΛΙΞΗ	44
ΕΙΚΟΝΑ 3-7 ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΠΕΡΙΕΛΙΞΗ	44
ΕΙΚΟΝΑ 3-8 ΠΟΛΙΚΗ ΠΕΡΙΕΛΙΞΗ	45
ΕΙΚΟΝΑ 3-9 ΡΟΜΠΟΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΕΡΙΕΛΙΞΗΣ ΙΝΩΝ ΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΕΜΑΧΙΟΥ ΓΙΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΛΙΚΟΠΤΕΡΟΥ [16].....	46
ΕΙΚΟΝΑ 3-10 ΡΟΜΠΟΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΕΡΙΕΛΙΞΗΣ ΙΝΩΝ [17].....	46
ΕΙΚΟΝΑ 4-1 ARDUINO UNO	48
ΕΙΚΟΝΑ 5-1 ΤΟΜΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	52
ΕΙΚΟΝΑ 5-2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΡΟΠΗΣ ΣΤΡΟΦΩΝ ΓΙΑ ΒΗΜΑΤΙΚΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ	53
ΕΙΚΟΝΑ 5-3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΟΝΟΠΟΛΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ	54
ΕΙΚΟΝΑ 5-4 ΥΒΡΙΔΙΚΟΣ ΒΗΜΑΤΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ	55
ΕΙΚΟΝΑ 5-5 SINGLE STEP	56
ΕΙΚΟΝΑ 5-6 HIGH TORQUE STEP.....	57
ΕΙΚΟΝΑ 5-7 HALF STEP	58
ΕΙΚΟΝΑ 5-8 NEMA 23 57BYGH420	59
ΕΙΚΟΝΑ 5-9 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΠΗΣ ΣΤΡΟΦΩΝ	59
ΕΙΚΟΝΑ 5-10 BIG EASY DRIVER	60
ΕΙΚΟΝΑ 5-11 ΡΑΝΩ ΠΛΕΥΡΑ ΤΗΣ ΠΛΑΚΕΤΑΣ	60
ΕΙΚΟΝΑ 5-12 ΚΑΤΩ ΠΛΕΥΡΑ ΤΗΣ ΠΛΑΚΕΤΑΣ	61
ΕΙΚΟΝΑ 5-13 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑΣ.....	63
ΕΙΚΟΝΑ 5-14 ΣΥΝΔΕΣΗ ΕΛΕΓΚΤΗ-ARDUINO-ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....	63
ΕΙΚΟΝΑ 5-15 ΔΟΜΗ ΠΑΛΜΟΣΞΕΙΡΑΣ	64

ΕΙΚΟΝΑ 6-1 ΚΕΦΑΛΗ ΠΕΡΙΕΛΙΞΗΣ ΙΝΩΝ	66
ΕΙΚΟΝΑ 6-2 ΒΑΣΙΚΟΣ ΣΚΕΛΕΤΟΣ	67
ΕΙΚΟΝΑ 6-3 ΤΕΜΑΧΙΟ ΕΝΩΣΗΣ ΚΕΦΑΛΗΣ-ΡΟΜΠΟΤ	67
ΕΙΚΟΝΑ 6-4 ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΑΚΡΟΥ ΡΟΜΠΟΤ	67
ΕΙΚΟΝΑ 6-5 ΕΛΑΤΗΡΙΟ ΕΛΞΕΩΣ ΣΕ ΜΕΓΙΣΤΗ ΘΕΣΗ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ ΣΕ ΘΕΣΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ (ΔΕΞΙΑ)	68
ΕΙΚΟΝΑ 6-6 ΦΥΣΙΚΗ ΘΕΣΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ.....	68
ΕΙΚΟΝΑ 6-7 ΕΛΑΤΗΡΙΟ ΠΙΕΣΕΩΣ, ΑΛΟΥΜΙΝΕΝΙΟΣ ΔΙΣΚΟΣ ΚΑΙ ΠΛΑΣΤΙΚΟΣ ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ.....	69
ΕΙΚΟΝΑ 6-8 ΤΕΛΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΑΣΗΣ	69
ΕΙΚΟΝΑ 6-9 ΣΤΗΡΙΓΜΑ ΑΝΕΜΗΣ	69
ΕΙΚΟΝΑ 6-10 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΗΣ ΚΕΦΑΛΗΣ.	70
ΕΙΚΟΝΑ 6-11 ΤΕΛΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ	70
ΕΙΚΟΝΑ 7-1 ΣΧΕΔΙΟ ΒΑΣΗΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ	72
ΕΙΚΟΝΑ 7-2 ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΒΑΣΗΣ	72
ΕΙΚΟΝΑ 7-3 ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟΥ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ	73
ΕΙΚΟΝΑ 7-4 ΣΧΕΔΙΟ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΣΤΟ SOLIDWORKS	74
ΕΙΚΟΝΑ 7-5 ΡΙΝΙΟΝ PULLEY XL - 10T - 6.35MM / 0.25" BORE	75
ΕΙΚΟΝΑ 7-6 ΙΜΑΝΤΑΣ ΧΡΟΝΙΣΜΟΥ	75
ΕΙΚΟΝΑ 7-7 ΡΟΥΛΕΜΑΝ.....	75
ΕΙΚΟΝΑ 7-8 ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΡΟΥΛΕΜΑΝ	76
ΕΙΚΟΝΑ 7-9 ΕΙΚΟΝΑ ΒΑΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ	76
ΕΙΚΟΝΑ 7-10 ΕΙΚΟΝΑ ΒΑΣΗΣ	76
ΕΙΚΟΝΑ 7-11 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΑΠΟ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ	77
ΕΙΚΟΝΑ 7-12 ΤΕΛΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΒΑΣΗΣ- ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ.....	77
ΕΙΚΟΝΑ 7-13 ΔΙΑΤΟΜΗ ΔΟΚΟΥ	78
ΕΙΚΟΝΑ 7-14 3D SKETCH.....	78
ΕΙΚΟΝΑ 7-15 ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	79
ΕΙΚΟΝΑ 7-16 Έλεγχος Αντοχής κατά Von Mises με την Δύναμη στο Μέσο του Καλούπιου	80
ΕΙΚΟΝΑ 7-17 Μετατοπίσεις με την Δύναμη στο Μέσο του Καλούπιου	80
ΕΙΚΟΝΑ 7-18 Έλεγχος Αντοχής κατά Von Mises με την Δύναμη στο Άκρο του Καλούπιου	81
ΕΙΚΟΝΑ 7-19 Μετατοπίσεις με την Δύναμη στο Άκρο του Καλούπιου.....	81
ΕΙΚΟΝΑ 7-20 Η ΒΑΣΗ ΚΑΙ ΤΟ ΡΟΜΠΟΤ	81
ΕΙΚΟΝΑ 8-1 SERIAL ADAPTER RS232/TTL (MICROBOT)	82
ΕΙΚΟΝΑ 8-2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ ΙΝΑΣ.....	85
ΕΙΚΟΝΑ 8-3 ΑΡΧΙΚΗ ΦΑΣΗ (ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ ΚΑΛΟΥΠΙ, 45 ΜΟΙΡΕΣ).....	88
ΕΙΚΟΝΑ 8-4 ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ ΚΑΛΟΥΠΙ 45 ΜΟΙΡΕΣ , Η ΚΕΦΑΛΗ ΣΕ ΑΚΙΝΗΣΙΑ ΣΤΟ ΑΚΡΟ ΤΟΥ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ	89
ΕΙΚΟΝΑ 8-5 ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ ΚΑΛΟΥΠΙ, 45 ΜΟΙΡΕΣ , ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΘΕΣΗ	89
ΕΙΚΟΝΑ 8-6 ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ ΚΑΛΟΥΠΙ, 45 ΜΟΙΡΕΣ, ΤΕΛΙΚΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ.....	89
ΕΙΚΟΝΑ 8-7 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΛΕΥΡΩΝ.....	90
ΕΙΚΟΝΑ 8-8 ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ ΚΑΛΟΥΠΙ, 70 ΜΟΙΡΕΣ, ΑΡΧΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ	92
ΕΙΚΟΝΑ 8-9 ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ ΚΑΛΟΥΠΙ, 70 ΜΟΙΡΕΣ, 2Η ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ	92

ΕΙΚΟΝΑ 8-10 ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ ΚΑΛΟΥΠΙ, 70 ΜΟΙΡΕΣ, ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΦΑΣΗ	92
ΕΙΚΟΝΑ 8-11 ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ ΚΑΛΟΥΠΙ, 70 ΜΟΙΡΕΣ, ΤΕΛΙΚΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ	93
ΕΙΚΟΝΑ 8-12 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΗΚΩΝ ΤΡΙΓΩΝΟΥ	93
ΕΙΚΟΝΑ 8-13 ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΚΩΝΙΚΟΥ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ-ΑΞΟΝΩΝ	94
ΕΙΚΟΝΑ 8-14 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΚΩΝΙΚΟΥ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ	94
ΕΙΚΟΝΑ 8-15 ΧΩΡΙΣΜΟΣ ΚΩΝΟΥ ΣΕ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥΣ	95
ΕΙΚΟΝΑ 8-16 ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ)- ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΚΟΜΜΑΤΙ ΤΟΥ ΚΩΝΟΥ(ΔΕΞΙΑ)	96
ΕΙΚΟΝΑ 8-17 ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΚΕΦΑΛΗ ΡΟΜΠΟΤ	96
ΕΙΚΟΝΑ 8-18 ΚΩΝΙΚΟ ΚΑΛΟΥΠΙ, ΑΡΧΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ	99
ΕΙΚΟΝΑ 8-19 ΚΩΝΙΚΟ ΚΑΛΟΥΠΙ, ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΦΑΣΗ	99
ΕΙΚΟΝΑ 8-20 ΚΩΝΙΚΟ ΚΑΛΟΥΠΙ, ΤΕΛΙΚΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ	99

Πίνακας πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 2-1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ RX90L.....	25
ΠΙΝΑΚΑΣ 2-2 ΩΦΕΛΙΜΟ ΦΟΡΤΙΟ	25
ΠΙΝΑΚΑΣ 2-3 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	26
ΠΙΝΑΚΑΣ 2-4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ	26
ΠΙΝΑΚΑΣ 2-5 RS-232 ΘΥΡΑ.....	35
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ARDUINO UNO	48
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-1 SINGLE STEP	56
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-2 HIGH TORQUE STEP	57
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-3 HALF STEP.....	57
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-4 ΕΠΙΛΟΓΗ MICROSTEPPING	61

1

Ρομποτική

1.1 Γενικά στοιχεία – Ορισμοί

Η ρομποτική είναι ο τομέας της επιστήμης της μηχανικής που ασχολείται με τη σύλληψη, το σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία ρομπότ. Τα ρομπότ είναι μηχανές, οι οποίες χρησιμοποιούνται αντί των ανθρώπων για την εκτέλεση εργασιών. Η αντικατάσταση αυτή αφορά τόσο την φυσική παρουσία όσο και στο επίπεδο λήψης απόφασης.[1]

Στη σύγχρονη εποχή, η εισαγωγή της έννοιας των ρομπότ έγινε το 1921 από τον Τσέχο θεατρικό συγγραφέα Karel Čapek στο θεατρικό έργο “Rossum’s Universal Robots”. Σε αυτό ο συγγραφέας φαντάζεται ένα μηχανικό κατασκεύασμα, το οποίο και ονομάζει robot από την τσέχικη λέξη robota για την καταναγκαστική εργασία. Το «αυτόματο» του Rossum στρέφεται τελικά εναντίον της ανθρωπότητας. Σύμφωνα με το Robot Institute of America, ως ρομπότ ορίζεται ένας μηχανισμός σχεδιασμένος με τέτοιο τρόπο ώστε μέσω προγραμματιζόμενων κινήσεων, να μεταφέρει υλικά, τεμάχια, εργαλεία ή ειδικευμένες συσκευές με σκοπό την εκτέλεση ποικίλων εργασιών. Ένας τέτοιος μηχανισμός αποτελείται από τα ακόλουθα μέρη:

- Ένα μηχανολογικό υποσύστημα το οποίο περιλαμβάνει τους μηχανισμούς που είναι απαραίτητοι για την κίνηση του ρομπότ και κατ’ επέκταση για την δυνατότητα του για εκτέλεση έργου. Παραδείγματα τέτοιων μηχανισμών είναι: οι αρθρώσεις, το σύστημα μετάδοσης κίνησης, επενεργητές-κινητήρες.
- Ένα υποσύστημα αίσθησης μέσω του οποίου το ρομπότ συγκεντρώνει πληροφορίες για την κατάσταση στην οποία βρίσκεται τόσο το ίδιο όσο και το περιβάλλον του. Επιπλέον, είναι υπεύθυνο για την αποδοχή των εξωτερικών εντολών, την επεξεργασία τους και την μετάφραση τους σε ηλεκτρική ισχύ που θα δοθεί στους κινητήρες του ρομπότ καθώς επίσης δημιουργεί σήματα εξόδου τα οποία θα πληροφορούν για την κατάσταση του συστήματος. Στο υποσύστημα αίσθησης περιλαμβάνονται όργανα μέτρησης, αισθητήρες, ηλεκτρονικά στοιχεία, κ.λ.π..

- Ένα σύστημα ελέγχου, το οποίο συνδυάζει με κατάλληλο τρόπο τα σήματα που δέχεται έτσι ώστε το ρομπότ να λειτουργεί αποτελεσματικά και με βάση τον επιθυμητό τρόπο. Ο ελεγκτής του ρομπότ επιβλέπει και συντονίζει ολόκληρο το σύστημα. [1]

1.2 Είδη ρομπότ

Κατά την πολυετή εξέλιξη του κλάδου της ρομποτικής προέκυψαν διάφορα είδη ρομποτικών μηχανισμών με σημαντικά διαφορετική μορφή μεταξύ τους, οι οποίοι όμως αποτελούνται από τα υποσυστήματα που αναλύθηκαν προηγουμένως. Τα σημαντικότερα είδη ρομπότ είναι τα παρακάτω:

- Ρομπότ σταθερής βάσης: τα ρομπότ της κατηγορίας αυτής αποτελούνται από διαδοχικά στερεά σώματα (σύνδεσμοι) που συνδέονται μέσω αρθρώσεων σχηματίζοντας μια κινηματική αλυσίδα. Η αλυσίδα αυτή έχει το ένα άκρο της (βάση) σταθερά συνδεδεμένο με κάποιο σημείο του περιβάλλοντος χώρου.



Εικόνα 1-1 Ο Βιομηχανικός Ρομποτικός Βραχίονας PUMA 560 της Unimation Inc

- Κινούμενα ρομπότ: ως κινούμενα χαρακτηρίζονται τα ρομπότ τα οποία έχουν την δυνατότητα να μετακινούν όλα τα σημεία του μηχανισμού τους. Η μετακίνηση αυτή πραγματοποιείται από συστήματα προώθησης τα οποία είναι είτε απλά όπως για παράδειγμα είναι οι τροχοί, είτε πιο εξελιγμένα όπως για παράδειγμα προπέλες και μηχανικά πόδια. Τα κινούμενα ρομπότ μπορούν να διακριθούν σε επιμέρους κατηγορίες ανάλογα με το βαθμό αυτονομίας του. Με βάση αυτό το κριτήριο υπάρχουν:
 - AGV (Automatic Guided Vehicles): τα ρομπότ αυτά έχουν περιορισμένη αυτονομία καθώς η τροχιά που ακολουθούν είναι προκαθορισμένη.
 - Αυτόνομα Έντροχα Ρομπότ: τα ρομπότ αυτά λειτουργούν με αρκετά υψηλό βαθμό αυτονομίας. Έχουν την δυνατότητα να λειτουργούν χωρίς συνεχή εξωτερική επίβλεψη και να εκτελούν εργασίες αυτόνομα δεχόμενα μόνο ορισμένες υψηλού επιπέδου εντολές.
 - Βαδίζοντα ρομπότ: τα ρομπότ αυτά χρησιμοποιούν μηχανικά πόδια για την κίνησή τους και όχι συμβατικούς τροχούς όπως στις προηγούμενες δύο κατηγορίες. Η

συγκεκριμένη δομή τους δίνει μεγαλύτερα πλεονεκτήματα όσο αφορά την ικανότητα αποφυγής εμποδίων και την ικανότητα μετακίνησης σε ανώμαλα εδάφη και μη επίπεδες επιφάνειες.

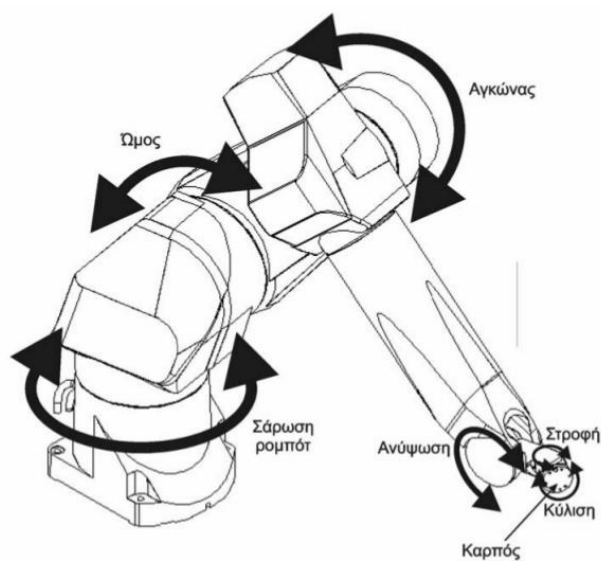
- ROV (Remotely Operated Vehicles): τα ρομπότ αυτά αφορούν μη επανδρωμένα υποβρύχια τα οποία δεν διαθέτουν μεγάλο βαθμό αυτονομίας καθώς είναι συνδεδεμένα με το κύριο πλοίο μέσω καλωδίου. Η απαραίτητη ισχύς και οι πληροφορίες που απαιτούνται για την λειτουργία του οχήματος μεταφέρονται μέσω του καλωδίου αυτού.
- AUV (Autonomous Underwater Vehicles): τα ρομπότ αυτά είναι πλήρως αυτόνομα υποβρύχια.
- Εναέρια ρομπότ: αφορά μη επανδρωμένα ιπτάμενα ρομπότ, όπως ελικόπτερα και αεροπλάνα.

1.3 Βιομηχανικοί Ρομποτικοί Βραχίονες

Ο όρος βιομηχανικός ρομπότ (industrial robot) αρχικά χρησιμοποιήθηκε από τον G.C. Devol (ΗΠΑ) το 1954. Ο Devol υποστήριξε πως είναι δυνατό να κατασκευαστεί ένα ελεγχόμενο μηχανικό χέρι το οποίο θα έχει την δυνατότητα να εκτελεί διάφορες εργασίες στην βιομηχανία. Το πρώτο βιομηχανικό ρομπότ κατασκευάστηκε από την εταιρεία Unimation και τέθηκε σε λειτουργία το 1961.

1.3.1 Περιγραφή

Η τυπική μορφή ενός βιομηχανικού ρομποτικού βραχίονα παρουσιάζεται στην Εικόνα 1-2



Εικόνα 1-2 Τυπική μορφή βιομηχανικού ρομπότ

Όπως φαίνεται και στην εικόνα ένα ρομπότ έχει μορφή ανάλογη με αυτή του ανθρώπινου χεριού με αρθρώσεις (ώμο, αγκώνα, καρπό) και παλάμη (αρπάγη, δάκτυλα). Οι αρθρώσεις αυτές κινούνται με την

βοήθεια επενεργητών οι οποίοι μπορεί να είναι ηλεκτρικοί, πνευματικοί ή και υδραυλικοί ανάλογα με τις απαιτήσεις της εργασίας που πραγματοποιούν.

Βασική συνιστώσα κάθε ρομπότ, όπως και για κάθε βιομηχανικό αυτοματισμό, είναι ο ηλεκτρονικός υπολογιστής ο οποίος χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του. Ο υπολογιστής αυτός περιέχει ένα πρόγραμμα ελέγχου (control program) και ένα πρόγραμμα εργασίας (task program). Το πρώτο παρέχεται από τον κατασκευαστή και ρυθμίζει την κίνηση κάθε άρθρωσης ενώ το δεύτερο δημιουργείται από τον χρήστη και μέσω αυτού καθορίζονται οι απαραίτητες κινήσεις για την ολοκλήρωση του έργου. Ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται ο προγραμματισμός θα αναλυθεί περισσότερο στη συνέχεια.

Για την καλύτερη κατανόηση των δυνατοτήτων και του τρόπου λειτουργίας των ρομποτικών βραχιόνων χρειάζεται να παρουσιαστούν ορισμένες βασικές έννοιες.

Χώρος εργασίας: Ορίζεται ως ο τρισδιάστατος χώρος τον οποίο μπορεί να σαρώσει η άκρη του ρομποτικού μηχανισμού. Οι διαστάσεις και η γεωμετρική του μορφή εξαρτάται από την δομή του ρομπότ.

Ωφέλιμο φορτίο: Ορίζεται το βάρος που μπορεί να μεταφέρει το άκρο του βραχίονα. Το φορτίο αυτό προδιαγράφεται από τον κατασκευαστή του ρομπότ και δεν είναι σταθερό αλλά εξαρτάται από την ταχύτητα με την οποία πρόκειται να κινηθεί ο καρπός.

Επαναληψιμότητα: Ορίζεται ως η δυνατότητα του βραχίονα να επιστρέψει στο ίδιο σημείο μετά από ένα αριθμό επαναλήψεων της ίδιας κίνησης. Δίνεται ως εύρος μέσα στο οποίο θα τερματίσει την κίνηση. Η απόκλιση που μπορεί να παρατηρηθεί οφείλεται στο ότι κατά την λειτουργία του ρομπότ ο αισθητήρας που δίνει την θέση, είναι πιθανό να χάσει την μέτρηση της θέσης με αποτέλεσμα να μην μπορεί να επιστρέψει στη ζητούμενη θέση μετά από ορισμένους κύκλους λειτουργίας.

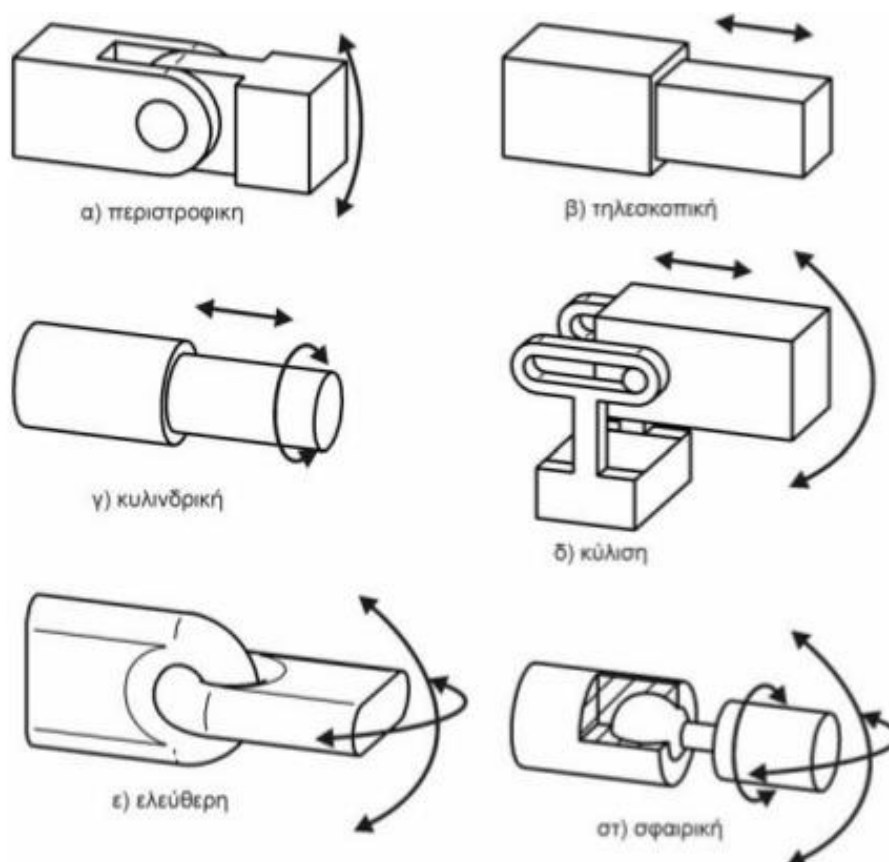
Ακρίβεια: Ορίζεται ως η ικανότητα του ρομπότ να πηγαίνει ακριβώς στη θέση που του έχει δοθεί εντολή να πάει. Η ακρίβεια εξαρτάται από ένα αριθμό παραγόντων με κυριότερους την διακριτότητα των εξαρτημάτων ελέγχου και την μηχανολογική σύνδεση των μελών του ενώ επηρεάζεται από το είδος και το μέγεθος του φορτίου.

Βαθμοί κινητικότητας: Για ένα βραχίονα το πλήθος των βαθμών κινητικότητας είναι σταθερό και ίσο με τον αριθμό των αρθρώσεων του. Κρίνεται σκόπιμο να επισημανθεί η διαφορά ανάμεσα στους βαθμούς κινητικότητας ενός βραχίονα και στους βαθμούς ελευθερίας που απαιτούνται για την εκτέλεση ενός έργου. Οι πρώτοι είναι σταθεροί ενώ οι δεύτεροι είναι συνδεδεμένοι με το συγκεκριμένο έργο που εκτελεί. Για την γενική περίπτωση που απαιτείται η τοποθέτηση και ο προσανατολισμός ενός αντικειμένου στο χώρο χρειάζονται έξι βαθμοί ελευθερίας, τρεις για την τοποθέτηση και τρεις για τον προσανατολισμό του αντικειμένου ως προς ένα σύστημα συντεταγμένων αναφοράς. Επομένως για την εκπλήρωση της παραπάνω διαδικασίας απαιτείται ένας ρομποτικός βραχίονας με έξι βαθμούς κινητικότητας. [2]

1.3.2 Είδη αρθρώσεων

Άρθρωση ονομάζεται η διάταξη που συνδέει που συνδέει δύο σώματα μεταξύ τους περιορίζοντας ένας ή , συχνότερα περισσότερους από τους μεταξύ τους βαθμούς ελευθερίας. Οι αρθρώσεις που εμφανίζονται με μεγαλύτερη συχνότητα σε μηχανισμούς είναι:

- Περιστροφική άρθρωση. Δίνει ένα βαθμό ελευθερίας παρέχοντας τη δυνατότητα στο σώμα να περιστραφεί σε ένα επίπεδο και απαγορεύει κάθε άλλη δυνατότητα κίνησης.
- Τηλεσκοπική άρθρωση. Δίνει ένα βαθμό ελευθερίας αφήνοντας το σώμα να μετατοπίζεται στη διεύθυνση ενός από τους άξονες, αποκόπτοντας οποιαδήποτε άλλη δυνατότητα κίνησης.
- Κυλινδρική άρθρωση. Δίνει δύο βαθμούς ελευθερίας αφήνοντας μία μεταφορική κίνηση στη διεύθυνση ενός άξονα και μία περιστροφική γύρω από τον άξονα αυτό.
- Άρθρωση κύλισης. Δίνει δύο βαθμούς ελευθερίας , μία μεταφορική και μία περιστροφική κίνηση. Ο άξονας της περιστροφικής κίνησης είναι κάθετος στη διεύθυνση του άξονα της μεταφορικής κίνησης.
- Ελεύθερη άρθρωση. Δίνει δύο βαθμούς ελευθερίας καθώς το σώμα έχει την δυνατότητα να κάνει δύο περιστροφικές κινήσεις.
- Σφαιρική άρθρωση. Δίνει τρεις βαθμούς ελευθερίας αφήνοντας και τις τρεις περιστροφικές κινήσεις ελεύθερες και εμποδίζοντας όλες τις μεταφορικές.



Εικόνα 1-3 Τυπικές αρθρώσεις

Τα βιομηχανικά ρομπότ είναι μηχανισμοί με μεγάλο εύρος δυνατοτήτων, οι οποίοι κατά κύριο λόγο αποτελούνται από βραχίονες που συνδέονται μεταξύ τους με αρθρώσεις ενός βαθμού ελευθερίας. Για να επιτευχθεί η απαιτούμενη αυτή ευελιξία κατασκευάζονται με πολλές αρθρώσεις, συνήθως από τρεις μέχρι έξι, τοποθετημένες με κατάλληλο τρόπο. Οι αρθρώσεις που συναντώνται στους ρομποτικούς βραχίονες είναι οι παρακάτω:

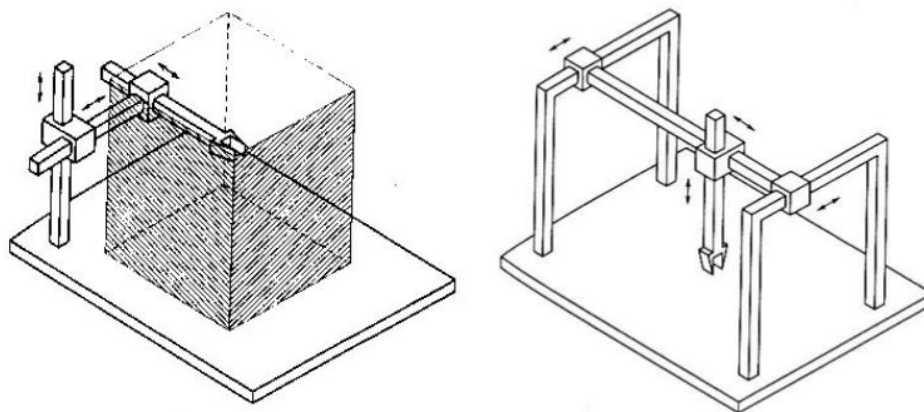
- **Περιστροφική άρθρωση (συμβολικά R:revolute joint).** Οι περιστροφικές αρθρώσεις επιτρέπουν την ελεγχόμενη περιστροφή γύρω από τον άξονά της. Η περιστροφική άρθρωση κυρίως λόγω της μεγάλης ταχύτητάς της είναι η κοινότερη άρθρωση σε ρομποτικούς βραχίονες.
- **Γραμμικές αρθρώσεις.** Οι γραμμικές αρθρώσεις χωρίζονται σε ολίσθησης (συμβολικά S:sliding) και πρισματικές (συμβολικά P:prismatic) και επιτρέπουν την ελεγχόμενη μετατόπιση προς μια κατεύθυνση. Χαρακτηριστικό γνώρισμα των συγκεκριμένων αρθρώσεων είναι η μεγάλη ακρίβεια.

Ο τύπος ενός ρομπότ μπορεί να περιγραφεί με βάση τις αρθρώσεις που διαθέτει με την αλληλουχία των συμβόλων S, P και R που αντιστοιχούν σε αρθρώσεις ολίσθησης, πρισματικές και περιστροφικές, όπως αναλύθηκε προηγουμένως. Ο χαρακτηρισμός αυτός ξεκινάει από την βάση και προχωράει προς τον καρπό. Για παράδειγμα ένα σφαιρικό ρομπότ μπορεί να είναι της μορφής RRP και ένα αρθρωτό ρομπότ της μορφής RRR.

1.3.3 Ταξινόμηση Βραχιόνων Βάση της γεωμετρικής διαμόρφωσης

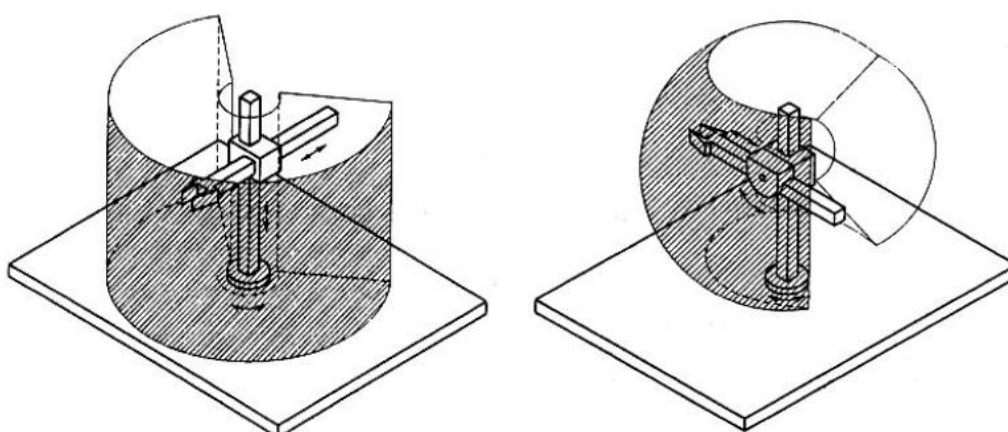
Ο τύπος και η διαδοχή των αρθρώσεων ενός ρομποτικού βραχίονα επιτρέπει την ταξινόμηση τους σε κατηγορίες. Στο διαχωρισμό αυτό λαμβάνονται υπόψη οι τρεις πρώτες αρθρώσεις του βραχίονα και κατά συνέπεια εξαιρούνται οι αρθρώσεις του καρπού. Διακρίνονται οι εξής κατηγορίες:

- **Καρτεσιανοί βραχίονες:** Η συγκεκριμένη κατηγορία υλοποιείται με τρεις διαδοχικές πρισματικές αρθρώσεις. Οι άξονες των αρθρώσεων είναι ανά δύο κάθετοι μεταξύ τους. Η καρτεσιανή δομή παρέχει μεγάλη δυσκαμψία και σταθερή ακρίβεια σε όλο τον χώρο εργασίας οποίος είναι ένα παραλληλεπίπεδο. Το κυριότερο μειονέκτημα του συγκεκριμένου τύπου βραχιόνων είναι η μειωμένη επιδεξιότητα κίνησης εξαιτίας των πρισματικών αρθρώσεων που διαθέτει.
- **Βραχίονες Gantry:** οι βραχίονες Gantry είναι στην ουσία καρτεσιανοί, διαφέρουν όμως στον τρόπο προσέγγισης του αντικείμενου ενδιαφέροντος. Αναλυτικότερα, ο κλασικός καρτεσιανός βραχίονας προσεγγίζει το αντικείμενο από πάνω ενώ ο βραχίονας Gantry από το πλάι. Εξαιτίας αυτής της διαφοροποίησης παρατηρείται αύξηση του χώρου εργασίας, της δυσκαμψίας ενώ είναι δυνατός ο χειρισμός μεγάλων και βαριών αντικειμένων.



Εικόνα 1-4 Καρτεσιανός Βραχίονας (Αριστερά) Βραχίονας Gantry (δεξιά)

- Κυλινδρικοί βραχίονες: Στην κατηγορία αυτή βραχιόνων έχει αντικατασταθεί η πρώτη πρισματική άρθρωση της καρτεσιανής δομής από μια περιστροφική άρθρωση. Οι βραχίονες αυτοί χαρακτηρίζονται από καλή δυσκαμψία και μείωση της ακρίβειας με την αύξηση της οριζόντιας μετατόπισης. Ο χώρος εργασίας για την κατηγορία αυτή είναι τμήμα κυλίνδρου. Σημαντικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης γεωμετρίας είναι ότι ο βραχίονας εισέρχεται στο χώρο εργασίας και τον περιορίζει.
- Σφαιρικοί βραχίονες: Στη κατηγορία αυτή βραχιόνων έχει αντικατασταθεί και η δεύτερη πρισματική άρθρωση της καρτεσιανής δομής από μια περιστροφική. Συνέπεια της αλλαγής αυτής είναι η αύξηση της μηχανολογικής πολυπλοκότητας. Η δυσκαμψία της κατασκευής μειώνεται και η ακρίβεια του καρπού μειώνεται με την αύξηση της ακτινικής απόστασης. Ο χώρος εργασίας είναι τμήμα σφαίρας και περιέχει ένα μέρος της βάσης με συνέπεια να παρέχεται η δυνατότητα χειρισμού αντικειμένων που βρίσκονται στο έδαφος.

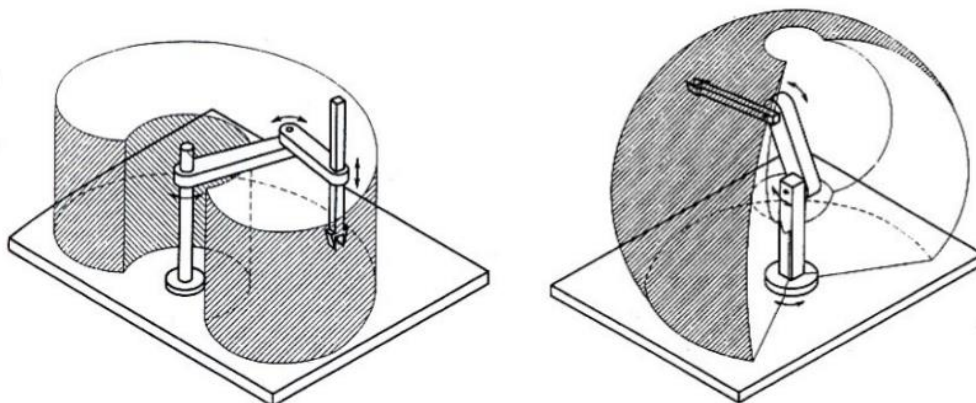


Εικόνα 1-5 Κυλινδρικός Βραχίονας (αριστερά) Σφαιρικός βραχίονας (δεξιά)

- Βραχίονες SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm): η γεωμετρία SCARA είναι ειδική και περιλαμβάνει δύο περιστροφικές και μια πρισματική άρθρωση τοποθετημένες με τέτοιο τρόπο ώστε οι άξονες κίνησης να είναι παράλληλοι μεταξύ τους. Η συγκεκριμένη γεωμετρία

παρουσιάζει μεγάλη δυσκαμψία σε κατακόρυφη φόρτιση και ελαστικότητα σε οριζόντια. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ακρίβεια τοποθέτησης του καρπού μειώνεται με την αύξηση της απόστασης του από τον άξονα της πρώτης άρθρωσης.

- Ανθρωπομορφικοί βραχίονες: η ανθρωπομορφική γεωμετρία υλοποιείται με τρεις διαδοχικές περιστροφικές αρθρώσεις. Αναλυτικότερα, ο άξονας περιστροφής της πρώτης άρθρωσης είναι κατακόρυφος και κάθετος στους άξονες περιστροφής των επόμενων δύο αρθρώσεων που είναι παράλληλοι μεταξύ τους. Κύριο γνώρισμα της συγκεκριμένης γεωμετρίας είναι η μεγάλη επιδεξιότητα που προσφέρει. Ο χώρος εργασίας έχει τη μορφή σφαίρας.



Εικόνα 1-6 Βραχίονας SCARA (αριστερά) Ανθρωπομορφικός βραχίονας (δεξιά)

1.3.4 Σύστημα κίνησης

Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι επενεργητών για την κίνηση των αρθρώσεων. Οι τύποι των συστημάτων κίνησης είναι:

- Υδραυλικά συστήματα κίνησης. Τα συστήματα αυτά κάνουν χρήση υδραυλικών επενεργητών που μετατρέπουν την υδραυλική πίεση και ροή σε μηχανική κίνηση. Οι υδραυλικοί επενεργητές επιλέγονται όταν ζητούμενο είναι η μετακίνηση μέτριων και υψηλών φορτίων με λογικές ταχύτητες. Βασικά γνώρισμα των συστημάτων αυτών είναι η μεγάλη ανυψωτική τους ικανότητα και η υψηλή ενεργειακή απόδοση ενώ τα κύρια μειονεκτήματά τους είναι το υψηλό κόστος και η μειωμένη ακρίβεια στις κινήσεις σε σχέση με τους σερβοκινητήρες.
- Πνευματικά συστήματα κίνησης. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν πνευματικούς κινητήρες για την κίνηση, οι οποίοι μετατρέπουν πεπιεσμένο αέρα σε μηχανική κίνηση. Τα συστήματα αυτά αποτελούν την πιο φθηνή λύση από αυτά που θα παρουσιαστούν. Συναντώνται κυρίως σε χαμηλού κόστους ρομποτικούς βραχίονες με μικρή ανυψωτική ικανότητα, ενώ χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία απλών stop-to-stop κινήσεων.
- Ηλεκτρικά συστήματα κίνησης. Τα συστήματα αυτά έχουν επενεργητές ηλεκτρικούς κινητήρες. Συνήθως χρησιμοποιούνται βηματικοί κινητήρες ή εναλλακτικά σερβοκινητήρες για υψηλότερη

απόδοση. . Επειδή τα ηλεκτρικά οδηγούμενα ρομπότ δεν απαιτούν μια υδραυλική μονάδα ισχύος, εξοικονομούν χώρο στο δάπεδο και μειώνουν τα επίπεδα θορύβου.

1.3.5 Χρήση

Τα ρομπότ είναι ιδανικά για εργασίες μη ευχάριστες ή επικίνδυνες για τον άνθρωπο όπως για παράδειγμα το βάψιμο με ψεκασμό και ο χειρισμός ραδιενεργών στοιχείων. Επιπλέον τα ρομπότ έχουν την ικανότητα να εκτελούν επαναλαμβανόμενες εργασίες οι οποίες όμως δεν είναι ιδιαίτερα πολύπλοκες.

Σε γενικές γραμμές τα βιομηχανικά ρομπότ παρέχουν:

- Υποκατάστατο ανθρώπινου χεριού.
- Ευελιξία, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ίδια δουλεία μετά από μεταβολή του προϊόντος που χειρίζονται.
- Ευφυΐα , με την χρήση ειδικών αισθητήρων π.χ. κάμερες για μηχανική όραση.
- Ταχύτητα και ακρίβεια.
- Μεγαλύτερη δύναμη συγκριτικά με τον άνθρωπο.
- Γρήγορη ανάπτυξη.
- Σταθερή ποιότητα προϊόντος και παραγωγικότητα.

Οι κυριότερες εργασίες στις οποίες χρησιμοποιούνται ρομποτικοί βραχίονες στην βιομηχανία είναι:

- Φόρτωμα και ξεφόρτωμα μηχανών.
- Σημειακή συγκόλληση.
- Συγκόλληση τόξου.
- Βάψιμο ψεκασμού.
- Συναρμολόγηση εξαρτημάτων.
- Έλεγχος ποιότητας.
- Κατεργασίες(λείανση, διάτρηση, κοπή κ.α.)
- Έγχυση μετάλλων σε καλούπια χύτευσης.

Πρέπει να σημειωθεί ότι για κάθε κατηγορία εφαρμογών απαιτούνται διαφορετικά χαρακτηριστικά όσων αφορά την ακρίβεια, την γεωμετρία κατασκευής και το σύστημα ελέγχου. Με βάση τα παραπάνω, ένα ρομπότ βαφής για παράδειγμα δεν μπορεί να αντικαταστήσει ένα ρομπότ συναρμολόγησης. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται σε ποιες βιομηχανικές εφαρμογές επιλέγονται τα καρτεσιανά, κυλινδρικά, σφαιρικά και αρθρωτά ρομπότ.



Εικόνα 1-7 Χρήση των καρτεσιανών, κυλινδρικών, σφαιρικών και αρθρωτών ρομπότ στις διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές

1.3.6 Μέθοδοι Προγραμματισμού Ρομπότ

Σε πρακτικές βιομηχανικές εφαρμογές σήμερα υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες προγραμματισμού των ρομπότ:

- Online Προγραμματισμός (συμπεριλαμβανομένων των lead-through walk-through)
- Offline Προγραμματισμός (OLP)

Online προγραμματισμός

Με τον online προγραμματισμό ή προγραμματισμό με διδασκαλία, το ρομπότ κινείται κατά μήκος της επιθυμητής πορείας με σκοπό να καταγραφεί η πορεία στην μνήμη των ελεγκτών. Υπάρχουν δύο τρόποι διδασκαλίας:

- Τροφοδοτούμενη
- Χειροκίνητη

Στην τροφοδοτούμενη διδασκαλία χρησιμοποιείται ένα χειριστήριο διδασκαλίας (teach pendant) για τον έλεγχο των κινητήρων που βρίσκονται σε κάθε άρθρωση και την καθοδήγηση του ρομποτικού βραχίονα και του καρπού μέσω μιας σειράς σημείων στο χώρο. Κάθε σημείο λειτουργίας καταγράφεται στην μνήμη με σκοπό να χρησιμοποιηθεί κατά την διάρκεια της λειτουργίας της βιομηχανικής παραγωγής. Ο συγκεκριμένος τρόπος προγραμματισμού περιορίζεται κατά μεγάλο μέρος στις κινήσεις από σημείο σε σημείο και δεν χρησιμοποιείται εύκολα στη συνεχή μετακίνηση λόγω της δυσκολίας που παρουσιάζει το χειριστήριο διδασκαλίας να ρυθμίσει τις σύνθετες γεωμετρικές κινήσεις στο χώρο. Εφαρμογές στη βιομηχανία του προγραμματισμού με τροφοδοτούμενη διδασκαλία είναι: μεταφορά κομματιών, φόρτωση και εκφόρτωση μηχανών και σημειακή συγκόλληση.

Η χειροκίνητη διδασκαλία (αποκαλείται και μέθοδος «περάσματος») χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για τον προγραμματισμό συνεχούς πορείας όπου ο κύκλος κινήσεων περιλαμβάνει ομαλές σύνθετες καμπυλόγραμμες μετακινήσεις του ρομποτικού βραχίονα. Στη χειροκίνητη μέθοδο ο προγραμματιστής πιάνει ο ίδιος το βραχίονα (το τελικό σημείο δράσης και τον κινεί με το χέρι κατά μήκος της επιθυμητής τροχιάς. Στην περίπτωση που το ρομπότ είναι μεγάλο και είναι δύσκολο να κινηθεί από τον προγραμματιστή, μια ειδική συσκευή προγραμματισμού αντικαθιστά το πραγματικό ρομπότ. Κατά την διαδικασία αυτή ο ελεγκτής του ρομπότ διαιρεί τον κύκλο κίνησης σε πολλά μικρά σημεία τα οποία είναι σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους και στη συνέχεια αποθηκεύονται στην μνήμη. Το πιο κοινό παράδειγμα χρήσης αυτού του είδους εφαρμογής είναι η βαφή ψεκασμού στην οποία ο καρπός του ρομπότ με το πιστόλι ψεκασμού πρέπει να εκτελέσει ένα ομαλό σχέδιο κινήσεων προκειμένου να εφαρμοστεί το χρώμα ομοιόμορφα σε ολόκληρη την επιφάνεια. Άλλο ένα παράδειγμα στο οποίο απαιτείται περιγραφή συνεχούς πορείας και εφαρμόζεται η συγκεκριμένη τεχνική είναι οι συγκολλήσεις τόξου.

Offline προγραμματισμός

Με αυτήν την μέθοδο, ο προγραμματισμός πραγματοποιείται χωρίς την σύνδεση του υπολογιστή με το ρομπότ και υλοποιείται μέσω γλωσσών προγραμματισμού. Αναλυτικότερα, στην offline διδασκαλία ο χειριστής χειρίζεται ένα εικονικό ρομπότ μέσα σε ένα εικονικό περιβάλλον και κινεί τις αρθρώσεις μέχρι να μετακινηθεί στην επιθυμητή θέση. Στη συνέχεια ο εικονικός ελεγκτής, ο οποίος ταυτίζεται με τον πραγματικό, παρεμβάλει αυτές τις θέσεις και οδηγεί το ρομπότ έτσι ώστε να πραγματοποιήσει την επιθυμητή τροχιά. Απαραίτητη προϋπόθεση για την σωστή λειτουργία είναι η βαθμονόμηση (calibration) του συστήματος πριν γίνει η φόρτωση του προγράμματος στο σύστημα. Επιπλέον, ο προγραμματισμός γίνεται με περισσότερη ασφάλεια καθώς οι συγκρούσεις μεταξύ του ρομπότ και του περιβάλλοντος ανιχνεύονται αυτόματα. Με βάση τις πληροφορίες σύγκρουσης, η διαδρομή μπορεί να τροποποιηθεί είτε αυτόματα είτε χειροκίνητα.

Ο offline προγραμματισμός έχει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τον online. Αρχικά η διαδικασία προγραμματισμού δεν απαιτεί την παρουσία του ρομπότ. Τα προγράμματα μπορούν να αναπτυχθούν

κατά τη φάση σχεδιασμού/κύκλου παραγωγής και ο προγραμματισμός μπορεί να γίνει παράλληλα με την παραγωγή. Επίσης, τα προγράμματα είναι πιο ευέλικτα, υπό την έννοια ότι τυχόν τροποποιήσεις μπορούν να ενσωματωθούν άμεσα. Ένα από τα πιο θετικά στοιχεία είναι η προσομοίωση. Μέσω αυτής τα προγράμματα μπορούν να ελεγχθούν, επιβεβαιώνοντας τις κινήσεις του ρομπότ, με συνέπεια να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα σφάλματος. [3]

Προγραμματισμός με επαυξημένη πραγματικότητα

Η επαυξημένη πραγματικότητα (Augmented Reality –AR) είναι μια καινούργια τεχνολογία στην οποία αντικείμενα που έχουν δημιουργηθεί στον υπολογιστή, «μπλέκονται» σε μια σκηνή του πραγματικού κόσμου, με σκοπό να ενισχύσουν τη διαδραστικότητα του χρήστη με τον πραγματικό κόσμο.

Ο τύπος αυτός του προγραμματισμού επιτρέπει μια μορφή offline προγραμματισμού χωρίς να είναι απαραίτητη η μοντελοποίηση του τεμαχίου εργασίας στο εικονικό περιβάλλον. Επιπλέον είναι χρήσιμος όταν απαιτείται μια επί τόπου προσέγγιση σε ένα κύτταρο εργασιών. Με τον τρόπο αυτό εξαλείφονται κάποιες τεχνικές δυσκολίες οι οποίες σχετίζονται με θέματα βαθμονόμησης ανάμεσα στον εικονικό και πραγματικό κόσμο. [4]

2

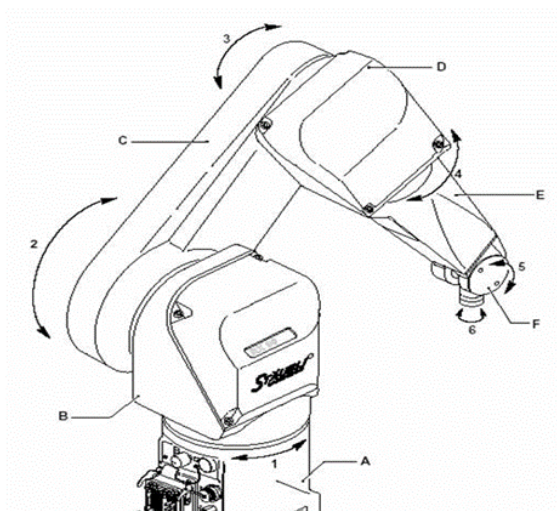
Staubli RX90L

2.1 Γενικά στοιχεία

Ο βραχίονας αποτελείται από τμήματα ή μέλη διασυνδεδεμένα με αρθρώσεις. Κάθε σύνδεσμος περιλαμβάνει έναν άξονα γύρω από τον οποίο περιστρέφονται δύο μέλη. Η κίνηση των αρθρώσεων του ρομπότ, παράγεται από κινητήρες χωρίς ψήκτρες (brushless motors) συζευγμένους με γωνιοαναλυτές (resolvers).

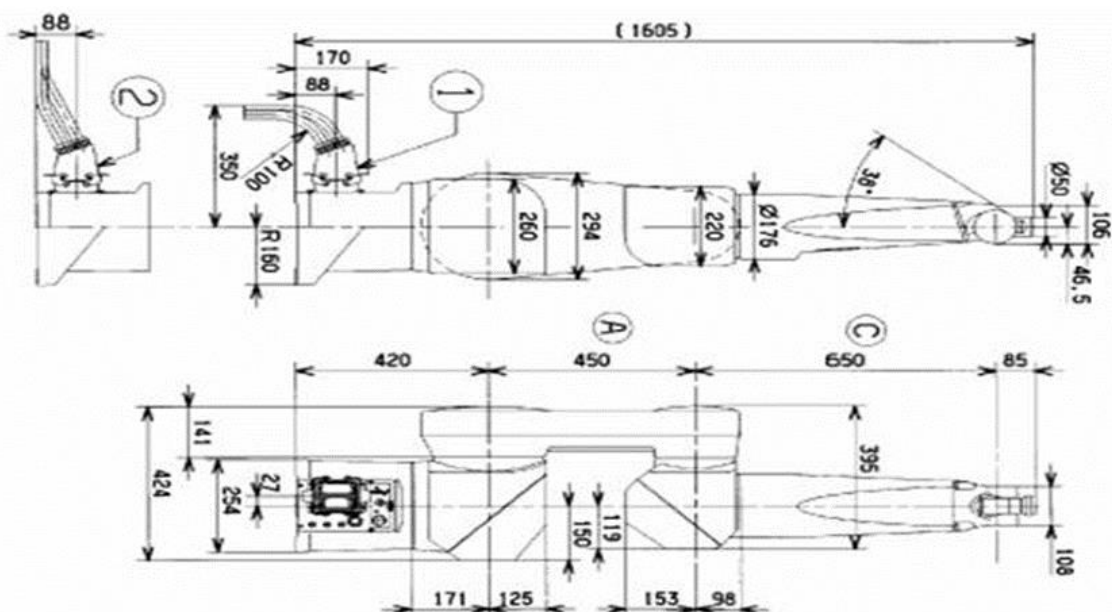
Αυτή η εύρωστη και αξιόπιστη συναρμολόγηση, σε συνδυασμό με ένα σύστημα καταμέτρησης, επιτρέπει τη γνώση της απόλυτης θέσης του ρομπότ οποιαδήποτε στιγμή. Είναι αρκετά ευέλικτος και είναι σε θέση να εκτελέσει μια ποικιλία εφαρμογών, όπως χειρισμός φορτίων (handling of loads), συναρμολόγηση (assembly), διαδικασιών (process) κόλλησης σφαιριδίων (application of adhesive beads), ελέγχου/επιβεβαίωσης (control/check), καθώς και εφαρμογές χώρων εκκένωσης (clean room applications).

Τα κύρια στοιχεία του ρομποτικού βραχίονα είναι : βάση- base (A), ώμος-shoulder (B), βραχίονας-arm (C), αγκώνας-elbow (D), πήχης-forearm (E) και καρπός-wrist (F) και είναι εμφανή στην Εικόνα 2-1.



Εικόνα 2-1 Staubli RX90L

2.2 Χαρακτηριστικά



Εικόνα 2-2 Διαστάσεις RX90L

Χαρακτηριστικά	
Βαθμοί Ελευθερίας	6
Εγκατάσταση	Πάτωμα/Οροφή
Μάζα	112 kg
Μέγιστη Ταχύτητα Εργασίας	11 m/s
Χαμηλή Ταχύτητα για Χειροκίνητη Λειτουργία με το Χειριστήριο	Καρτεσιανή Λειτουργία: 250 mm/s Περιστροφική Λειτουργία: 10% της ονομαστικής ταχύτητας
Μαχ Καρτεσιανή Ταχύτητα	1.5m/s
Ελεγκτής	CS7
Βάρος	113 kg

Πίνακας 2-1 Χαρακτηριστικά RX90L

Ωφέλιμο Φορτίο	
Στην Ονομαστική Ταχύτητα	6 kg
Σε Μειωμένη Ταχύτητα	9 kg

Πίνακας 2-2 Ωφέλιμο φορτίο

Περιβάλλον Εργασίας	
Θερμοκρασία Λειτουργίας	+5°C έως +40°C
Υγρασία	30% έως 95% max χωρίς συμπύκνωση (σύμφωνα με το πρότυπο NF EN 60 204-1)
Υψόμετρο	2000m max

Πίνακας 2-3 Περιβάλλον εργασίας

Άρθρωση	1	2	3	4	5	6
Εύρος (°)	320	275	285	540	225	540
Εύρος Εργασίας(°)	A=±160	B=±137.5	C=±142.5	D=±270	E=+120,- 105	F=±270
Ονομαστική	236	200	286	401	320	580
Ταχύτητα(°/s)						
Μέγιστη Ταχύτητα(°/s)	356	356	296	409	480	1125
Γωνιακή Ανάλυση(°·10 ⁻³)	0.87	0.87	0.72	1	1.17	2.75

Πίνακας 2-4 Χαρακτηριστικά αρθρώσεων

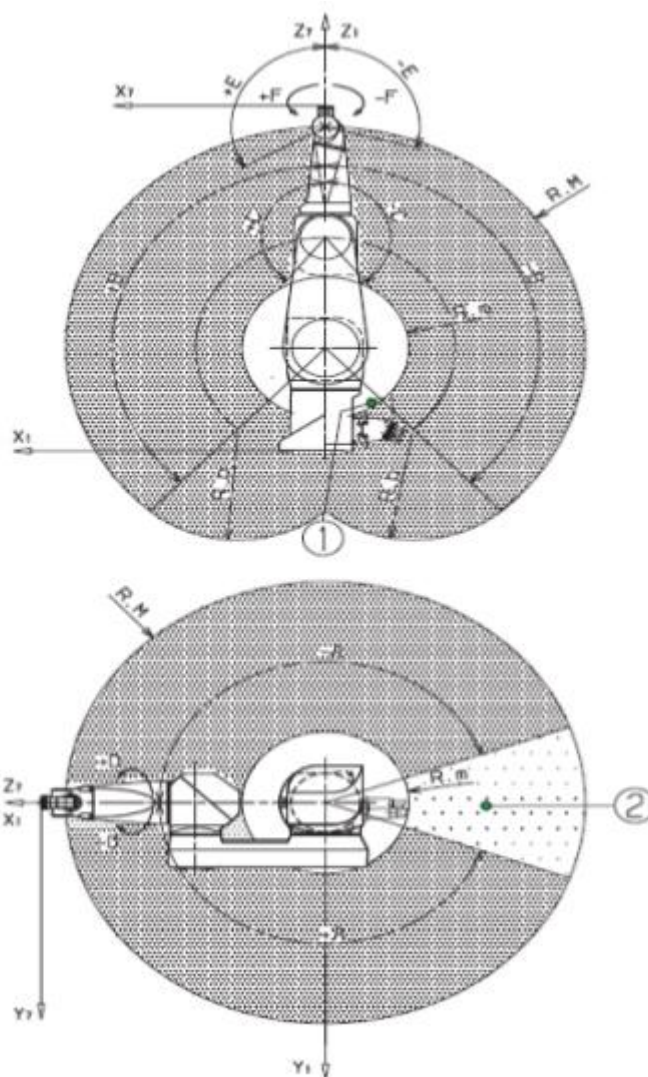
Το απλής κατασκευής, συναρμολόγημα του βραχίονα RX90 αποτελείται από σταθερή και εγκιβωτισμένη δομή (προστασία IP με το πρότυπο NF EN 60529), για να το προστατεύει από εξωτερικές παρεμβάσεις. Ο σχεδιασμός του βασίζεται σε μονάδες μετάδοσης: JCS (Stäubli Combined Joint) χρησιμοποιούμενος στις αρθρώσεις 1, 2, 3 και 4. Ο καρπός (wrist) αποτελείται από τις αρθρώσεις 5 και 6. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι ο βραχίονας έχει ενσωματωμένο σύστημα αντιστάθμισης ελατηρίου, το οποίο του προσδίδει ένα ελκυστικό σύστημα χαμηλού βάρους .

2.2.1 Χώρος εργασίας

Οι μέγιστες και οι ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ των συνδέσμων είναι:

- Μέγιστη απόσταση μεταξύ αρθρώσεων 2 και 5 (R.M):1100mm
- Ελάχιστη απόσταση μεταξύ αρθρώσεων 2 και 5 (R.m):401mm
- Απόσταση μεταξύ αρθρώσεων 3 και 5 (R.b): 650 mm

Τα μεγέθη R.M , R.m και R.b περιγράφονται στην Εικόνα 2-3.



Εικόνα 2-3 Χώρος εργασίας Staubli RX90L

2.3 Ελεγκτής CS7

Η καμπίνα του ελεγκτή αποτελείται από τον ελεγκτή, το έξυπνο μέρος της εγκατάστασης, ο οποίος ελέγχει το ρομπότ μέσω ενισχυτών ισχύος, έναν για κάθε άρθρωση του βραχίονα. Η παρεμβολή που χρησιμοποιείται είναι γραμμική. Η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται από ένα μπλοκ τροφοδοσίας, το οποίο τροφοδοτεί καθένα από τα παραπάνω στοιχεία με τις κατάλληλες τάσεις που απαιτούνται για τη σωστή λειτουργία, ξεκινώντας από τριφασική τάση που παρέχεται από το ηλεκτρικό δίκτυο. Όλα τα σήματα και τα εξαρτήματα που διασφαλίζουν το τρέξιμο της εγκατάστασης κάτω από κατάλληλες συνθήκες ασφαλείας περιλαμβάνονται στην πλακέτα ασφαλείας.

Όλα τα παραπάνω τοποθετούνται σε έναν ελεγκτή ώστε να αποτελέσουν μέρος μιας συνδεσμολογίας η οποία θα διασφαλίζει επίπεδο προστασίας IP54 {Προστασία από τη σκόνη (διαπερατότητα μόνο από ορατά σωματίδια) και προστασία από πτώση νερού από όλες τις κατευθύνσεις} και μια μέγιστη θερμοκρασία 40 βαθμών κελσίου στο περικλειόμενο χώρο. Ο ελεγκτής είναι υπεύθυνος για την

διατήρηση των κατάλληλων συνθηκών για τη λειτουργία των συστημάτων και την αποφυγή δυσλειτουργιών λόγω πιθανών υψηλών θερμοκρασιών ή παρουσίας σκόνης ή υγρασίας, τα οποία είναι δυνατό να καταστρέψουν τα ηλεκτρονικά στοιχεία. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας εξασφαλίζεται από έναν εναλλάκτη θερμότητας αέρα προς αέρα. Δύο ανεμιστήρες ψύχουν τα κυκλώματα του ελεγκτή.

Ο ελεγκτής έχει κατασκευαστεί με αρχιτεκτονική VME (Versa Module Europe bus) και περιλαμβάνει:

- Μονάδα επεξεργασίας τους συστήματος (CPU 030) για έλεγχο.
- Περιφερειακή μονάδα διαχείρισης (SIO), η οποία ελέγχει τον σκληρό δίσκο, τα σήματα εισόδου/εξόδου, τις σειριακές συνδέσεις γενικού σκοπού καθώς και την επικοινωνία με το χειριστήριο του ελεγκτή και τον πίνακα ελέγχου.
- Μονάδα κοινής διεπαφής (MI6), με ενισχυτές ελέγχου των κινητήρων.
- Μονάδα απόλυτης βαθμονόμησης (ACB), όταν ενεργοποιείται το ρομπότ

2.4 Χειριστήριο (Teach Pendant)

Ο ελεγκτής επιτρέπει στον χρήστη να ελέγξει τον ρομποτικό βραχίονα μέσω του χειριστηρίου (Teach Pendant). Οι βασικές λειτουργίες του χειριστηρίου οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν και κατά την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζονται στη συνέχεια.

2.4.1 Mode selection keys

Τα κουμπιά αυτά είναι : κουμπί έκτακτης ανάγκης (EMERGENCY STOP key), κουμπί RUN/HOLD, κουμπί DIS PWR, κουμπί COMP PWR και τέλος το κουμπί MAN/HALT.

Κουμπί έκτακτης ανάγκης (EMERGENCY STOP key)

Το κουμπί αυτό σταματά το πρόγραμμα χρησιμοποιώντας μια εντολή HALT και παράλληλα σταματά το ρομπότ κόβοντας το ρεύμα του που διέρχεται από αυτό και ενεργοποιώντας τα φρένα του.

Κουμπί RUN/HOLD

Το κουμπί αυτό προκαλεί το άμεσο σταμάτημα του ρομποτικού βραχίονα. Η ακολουθία του προγράμματος διακόπτεται και το μήνυμα «HOLD» εμφανίζεται στην οθόνη του χειριστηρίου. Εάν πατηθεί ξανά, το πρόγραμμα συνεχίζει από εκεί που σταμάτησε.

Κουμπί COMP PWR

Το κουμπί αυτό τοποθετεί το σύστημα σε computer mode (COMP), δηλαδή σε προετοιμασία για την ενεργοποίηση του ρομποτικού βραχίονα. Επιπλέον το κουμπί αυτό χρησιμοποιείται όταν ο χρήστης θέλει να εκτελέσει ένα πρόγραμμα από τον υπολογιστή.

Κουμπί MAN/HALT

Το κουμπί αυτό προκαλεί το άμεσο σταμάτημα του ρομποτικού βραχίονα. Η εκτέλεση του προγράμματος διακόπτεται και εμφανίζεται στην οθόνη το μήνυμα «E-STOP». Επιπλέον, με την λειτουργία αυτή ο χρήστης μπορεί να μετακινήσει τον ρομποτικό βραχίονα χειροκίνητα.

Manual mode selection

Αφού ο ελεγκτής έχει εισέρθει σε χειροκίνητη λειτουργία «MAN», ανάλογα με τα πιο κουμπί είναι ενεργοποιημένο, ο χρήστης μπορεί να μετακινήσει το ρομπότ χειροκίνητα με διαφορετικό τρόπο (χρήση διαφορετικού συστήματος συντεταγμένων). Οι τρόποι αυτοί είναι: WORLD, TOOL, JOINT, FREE.

2.4.2 Manual control keys

Τα manual control keys βρίσκονται στο δεξί μέρος του χειριστηρίου. Όταν ο χρήστης βρίσκεται σε manual mode, αυτά τα κουμπιά επιτρέπουν στον χρήστη να επιλέξει την κατεύθυνση της κάθε άρθρωσης. Τα κουμπιά είναι : X/1, Y/2, Z/3, RX/4, RY/5, RZ/6. Τα κουμπιά X,Y,Z,RX,RY,RZ αφορούν την κίνηση του ρομποτικού βραχίονα όταν ο χρήστης βρίσκεται σε WORLD MODE, ενώ τα ίδια κουμπιά 1,2,3,4,5,6 όταν ο χρήστης βρίσκεται σε JOINT MODE (εδώ μπορεί ο χρήστης να κινήσει την κάθε άρθρωση ξεχωριστά).

Speed bars

Οι μπάρες ταχύτητας επιτρέπουν στον χρήστη να επιλέξει την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ρομποτικού βραχίονα (στα θετικά ή στα αρνητικά είτε πρόκειται για γωνία άρθρωσης είτε για σημείο στον τρισδιάστατο χώρο).

2.4.3 Functions keys

Τα functions keys είναι τα κουμπιά εκείνα που επιτρέπουν στον χρήστη να ξεκινήσει συγκεκριμένες λειτουργίες. Αυτά είναι τα EDIT, DISP, CLR ERR, CMD και PROG SET.

Κουμπί DISP

Το συγκεκριμένο κουμπί χρησιμοποιείται για να εμφανίσει στην οθόνη του χειριστηρίου (κατά σειρά από αριστερά προς τα δεξιά) τις λέξεις: γωνίες των αρθρώσεων (joint values), την καρτεσιανή θέση του ρομπότ (world location), την κατάσταση του συστήματος (status), την κατάσταση των εισόδων/εξόδων (binary I/O), και τέλος το τελευταίο λάθος που προέκυψε από την χρήση του ρομπότ (last error).

2.5 Γλώσσα Προγραμματισμού V+

Το V+, είναι ένα βασισμένο σε υπολογιστή σύστημα ελέγχου και μία γλώσσα προγραμματισμού ειδικά σχεδιασμένη για να χρησιμοποιείται στα βιομηχανικά ρομπότ της Adept Technology, σε συστήματα όρασης, καθώς και σε συστήματα ελέγχου κίνησης.

Ως ένα σύστημα πραγματικού χρόνου, ο συνεχής υπολογισμός της τροχιάς από το V+, επιτρέπει την εκτέλεση σύνθετων κινήσεων άμεσα, με αποδοτική χρήση της μνήμης του συστήματος, καθώς και με μείωση της πολυπλοκότητας του συστήματος συνολικά. Το σύστημα V+, δημιουργεί συνέχεια εντολές ρομπότ-ελέγχου και μπορεί ταυτόχρονα να αλληλεπιδρά με ένα χειριστή, επιτρέποντας έτσι την online δημιουργία και τροποποίηση προγραμμάτων.

Το V+ παρέχει όλη τη λειτουργικότητα των μοντέρνων υψηλού επιπέδου γλωσσών προγραμματισμού, όπως:

- Η κλήση υπορουτίνων
- Οι δομές ελέγχου
- Περιβάλλον πολλαπλών εργασιών
- Εκτέλεση προγραμμάτων αναδρομικά και με επανείσοδο

2.5.1 Βασικές εντολές

Προετοιμασία Παραθύρου

Setup → Window → Scroll Buffer → κάνοντας τικ στην επιλογή και πληκτρολογούμε ένα μεγάλο αριθμό γραμμών, όπως π.χ. 10.000 lines για να μπορούν να εμφανιστούν όσο το δυνατόν περισσότερες γραμμές στο τερματικό (έτσι ώστε να υπάρχει καλύτερη εποπτεία και γνώση των προηγούμενων εντολών).

Στη συνέχεια γίνεται χρήση ενός παραδείγματος για να γίνει κατανοητή η επεξεργασία και η εκτέλεση ενός αρχείου κώδικα. Αρχικά όλη η διαδρομή του αρχείου που μας ενδιαφέρει είναι η εξής: "C:\MAIN\FAKELOS.PG\TEST".

Στην οθόνη του τερματικού πληκτρολογούμε τις παρακάτω εντολές:

- **FDIR:** (προαιρετική εντολή) εμφανίζει τα ονόματα των φακέλων του δίσκου (με βάση το παράδειγμα, εμφανίζονται τα αρχεία που βρίσκονται στον δίσκο C)
- **CD MAIN:** μετακίνηση στο φάκελο MAIN
- **FDIR MAIN:** (προαιρετική εντολή) εμφανίζει τα ονόματα των στοιχείων του φακέλου ο οποίος είναι υπό επεξεργασία (στη συγκεκριμένη περίπτωση εμφανίζονται τα αρχεία του φακέλου MAIN).
- **LOAD FAKELOS.PG:** φόρτωση φακέλου στη μνήμη.
 - Για την δημιουργία ή την επεξεργασία κάποιου αρχείου κώδικα μέσα στο FAKELOS.PG:
 - **SEE PROGRAMMA:** Αυτή η εντολή αφορά τη δημιουργία προγραμμάτων. Αν το πρόγραμμα υπάρχει τότε θα ανοίξει, αλλιώς αν δεν υπάρχει θα δημιουργηθεί.
 - Αμέσως μετά την εντολή SEE ο χρήστης βρίσκεται σε **COMMAND MODE**. Στην λειτουργία αυτή ο χρήστης μπορεί απλά να δει μια λευκή σελίδα εάν το

πρόγραμμα δεν υπάρχει στην μνήμη ή να δει το πρόγραμμα εάν αυτό υπάρχει ήδη στην μνήμη.

- Για να μπορεί να γίνει επεξεργασία και για να μπορεί ο χρήστης να εισαγάγει ότι επιθυμεί μέσα στο πρόγραμμα πρέπει να γίνει είσοδος σε **INSERT MODE**. Για να γίνει αυτό πρέπει να πατηθεί το πλήκτρο «I».
 - Μόλις ολοκληρωθεί η επεξεργασία με τα παρακάτω πλήκτρα γίνεται η έξοδος από τον editor:
 - **ESCAPE**
 - **F4**
 - **REPLACE MODE** : Με το πάτημα του κουμπιού R στο πληκτρολόγιο ο χρήστης μπαίνει σε αυτήν την λειτουργία. Σε αυτή ο χρήστης μπορεί να αντικαταστήσει τον χαρακτήρα που βρίσκεται μετά από τον κέρσορα.
- Για την αποθήκευση του προγράμματος στον ελεγκτή του ρομπότ χρειάζεται να εκτελεστεί συγκεκριμένη εντολή. Υπάρχουν διαφορετικές παραλλαγές με τις οποίες ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τι μπορεί να αποθηκεύσει. Αναλυτικότερα:
- **STOREP NEW_NAME**. Τότε το πρόγραμμα αποθηκεύεται μέσα στο νέο φάκελο NEW_NAME.PG
 - **STORE FAKELOS**: Τότε το πρόγραμμα αποθηκεύεται στη θέση FAKELOS.V2
- Η διαφορά τους είναι ότι με την πρώτη αποθηκεύεται μόνο ο κώδικας. Στην δεύτερη πέρα από τον κώδικα αποθηκεύονται και τα: Locations, Reals, Doubles και Strings. Υπάρχουν και άλλες μορφές της συγκεκριμένης εντολής, οι οποίες αποθηκεύουν και δημιουργούν άλλες επεκτάσεις, αλλά ξεφεύγουν από τα όρια της παρούσας διπλωματικής.
- Μία άλλη αξιολογούμενη εντολή είναι η FDELETE. Συντάσσεται ως FDELETE FAKELOS.V2 ή FDELETE FAKELOS.PG . Με αυτή την εντολή διαγράφετε κάποιος φάκελος όταν ο χρήστης βρίσκεται στο directory, που αυτός είναι αποθηκευμένος. Μία άλλη εντολή διαγραφής είναι η ZERO, η οποία διαγράφει τα δεδομένα που είναι αποθηκευμένα στη μνήμη κατά την τρέχουσα περίοδο λειτουργίας του τερματικού, όπως παράδειγμα οι μεταβλητές.

Κάποιες σημαντικές εντολές, επίσης, είναι και οι παρακάτω:

- **TRACE**: συντάσσεται ως **ENABLE/DISABLE TRACE**. Στο μόνιτορ εμφανίζεται ή όχι (ενεργοποιεί/ απενεργοποιεί την παρακολούθηση) η ροή του προγράμματος που εκτελείται.
- **READY**: μετακίνηση του ρομπότ στη θέση READY, δηλαδή στη θέση του βασικού σχηματισμού του (standard configuration)

- **SPEED:** θέτει την ταχύτητα κίνησης του ρομπότ. Αξίζει να σημειωθεί ότι μπορούν να οριστούν δύο ταχύτητες. Η πρώτη, η ονομαστική, μπορεί να ελεγχθεί από τον χρήστη από την οθόνη του υπολογιστή όταν δεν εκτελείται κάποιο πρόγραμμα. Η δεύτερη είναι αυτή που ορίζεται μέσα στο πρόγραμμα. Αναλυτικότερα:
 - Αν η ονομαστική έχει οριστεί στο 100 τότε το ρομπότ κινείται με την μέγιστη ταχύτητά του.
 - Εάν στο τέλος της εντολής SPEED περιλαμβάνεται η λέξη ALWAYS, τότε η ταχύτητα θα είναι σταθερή για όλες τις εντολές που ακολουθούν μέχρι να ορισθεί νέα ταχύτητα. Εάν στο τέλος της εντολής SPEED δεν περιλαμβάνεται η λέξη ALWAYS, τότε η ταχύτητα θα αφορά μόνο την επόμενη κίνηση του ρομπότ.
 - Εάν δεν έχουν οριστεί οι μονάδες μέτρησης στην εντολή SPEED, τότε η τιμή θα θεωρηθεί ως ένα ποσοστό της ονομαστικής ταχύτητας (100%), κάτι το οποίο σημαίνει ότι εάν η ονομαστική ταχύτητα είναι 80% και η ταχύτητα μέσα στο πρόγραμμα έχει οριστεί ως 50%, τότε η τελική ταχύτητα του ρομπότ θα είναι 40% της ονομαστικής.
 - Εάν οι μονάδες που έχουν οριστεί είναι MMPS, τότε η κίνηση εκφράζεται σε χιλιοστά ανά δευτερόλεπτο. Βασική προϋπόθεση είναι η ονομαστική να έχει οριστεί στο 100.
 - Εάν οι μονάδες που έχουν οριστεί είναι IPS, τότε η κίνηση εκφράζεται σε ίντσες ανά δευτερόλεπτο. Βασική προϋπόθεση είναι η ονομαστική να έχει οριστεί στο 100.

Παράδειγμα:

SPEED 80MMPS

MOVE A

MOVE B

SPEED 60IPS ALWAYS

MOVE C

Η ταχύτητα θα είναι 80 χιλιοστά το δευτερόλεπτο για την κίνηση στο σημείο A και από το A στο B και 60 ίντσες το δευτερόλεπτο για την από το σημείο B στο C.

- **HERE:** χρησιμεύει για την εύρεση της τρέχουσας θέσης του ρομπότ

Σε αυτό το σημείο, πρέπει να αναφερθεί, ότι όταν ο χρήστης βρίσκεται στην οθόνη του τερματικού και όχι μέσα σε λειτουργία συγγραφής κάποιου προγράμματος, για να εκτελεστούν οι εντολές είναι απαραίτητο να υπάρχει ένα DO, πριν από την κάθε εντολή. Έτσι για παράδειγμα οι παραπάνω εντολές στην οθόνη του τερματικού συντάσσονται ως εξής: DO SPEED number, DO ENABLE TRACE και DO READY.

2.5.2 Περιγραφή θέσεων

Μία θέση μπορεί να περιγραφεί από έξι στοιχεία, με δύο τρόπους: είτε από τις έξι αρθρώσεις της, είτε από τις τρεις συνιστώσες της θέσης (X,Y,Z) και τις τρεις συνιστώσες του προσανατολισμού (yaw, pitch, roll). Για αυτές τις δύο περιγραφές υπάρχουν κατάλληλες εντολές στη V+.

Οι Θέσεις Ακριβείας (Precision Points), καταγράφουν τις τιμές όλων των αρθρώσεων στη συσκευή. Είναι ακριβείς και είναι ο μόνος τρόπος εξαγωγής πληροφορίας για την κάθε άρθρωση, σε περίπτωση για παράδειγμα όπου είναι επιθυμητή η κίνηση μιας μόνο άρθρωσης. Οι Precision Points, συντάσσονται με ένα σύμβολο δίσωσης (#). Για παράδειγμα η εντολή HERE αν συνταχθεί ως HERE #pick, θα δημιουργήσει μια θέση ακριβείας, την #pick αντίστοιχη των τρεχόντων τιμών των αρθρώσεων του ρομπότ. Η σύνταξη είναι: #PPOINT (j1_value, j2_value, j3_value, j4_value, j5_value, j6_value), όπου αν δοθούν περισσότερες μεταβλητές από τις αρθρώσεις του ρομπότ, παραλείπονται.

Ο δεύτερος τρόπος απεικόνισης μιας θέσης είναι μέσω της εντολής Μετασχηματισμού (Transformations). Είναι πιο ευέλικτες και αποδοτικές μεταβλητές τοποθεσίας (Locations variables). Η σύνταξη είναι η εξής: TRANS (X_value, Y_value, Z_value, y_value, p_value, r_value).

Για την ανάθεση των συντεταγμένων σημείων σε μεταβλητές χρησιμοποιείται η εντολή SET. Η σύνταξη της είναι διαφορετική για κάθε είδους σημείου. Αναλυτικότερα:

- Για σημείο ακρίβειας : SET #a = #ppoint(j1_value, j2_value, j3_value, j4_value, j5_value, j6_value)
- Για καρτεσιανό σημείο : SET a = trans(X_value, Y_value, Z_value, y_value, p_value, r_value)

2.5.3 Εντολές κίνησης

- Εντολή MOVE THESI: Η συγκεκριμένη εντολή κάνει το ρομπότ να κινηθεί στη θέση THESI μέσω παρεμβολής των αρθρώσεών του.
- Εντολή MOVES THESI: Η συγκεκριμένη εντολή κάνει το ρομπότ να κινηθεί στη θέση THESI μέσω κίνησης ευθείας γραμμής.
- Εντολή DELAY: Η συγκεκριμένη εντολή σταματά το ρομπότ για ένα συγκεκριμένο χρόνο που δηλώνεται μαζί με την εντολή. Ο χρόνος αυτός μπορεί να δοθεί σε δευτερόλεπτα(second) και δεν μπορεί να είναι μικρότερος από 16ms(millisecond).
- Εντολή BREAK: Η συγκεκριμένη εντολή καθυστερεί την εκτέλεση του προγράμματος μέχρις ότου το ρομπότ φτάσει στον προορισμό του. Η εντολή αυτή προτιμάται όταν ο χρήστης θέλει να αποφύγει τυχόν υπολογισμούς ή την διαχείριση εντολών για τις εισόδους/εξόδους όταν η κίνηση του ρομπότ πραγματοποιείται μεταξύ δύο σημείων.

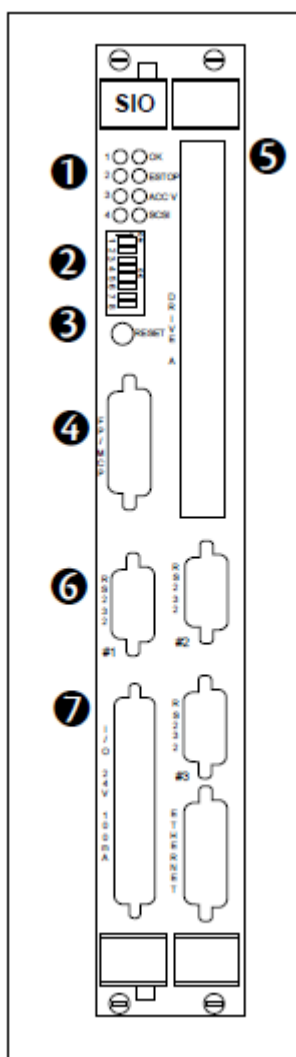
2.6 System Input/Output Module (SIO)

Η μονάδα των σημάτων εισόδων/εξόδων του ρομπότ παίζει σημαντικό ρόλο για την επικοινωνία μεταξύ του ελεγκτή του ρομποτικού βραχίονα και του μικροελεγκτή που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του βηματικού κινητήρα.

2.6.1 Γενικά Χαρακτηριστικά

Η μονάδα σημάτων εισόδων/εξόδων αποτελεί μία από τις βασικές μονάδες σε όλους του ελεγκτές της Adept, όπως αυτός που διαθέτει το εργαστήριο. Χρησιμοποιείται για την διασύνδεση του συστήματος με το σύστημα μαζικής αποθήκευσης (δισκέτα, σκληρός δίσκος), το σύστημα σταματήματος εκτάκτου ανάγκης (E-stop) και την επικοινωνία με το χειριστήριο του ελεγκτή και του πίνακα ελέγχου. Διαθέτει 3 σειριακές θύρες για τις οποίες μπορεί να χρησιμοποιήσει ο τελικός χρήστης, 20 ψηφιακές είσοδοι και έξοδοι

2.6.2 Συνδέσεις και ενδείξεις



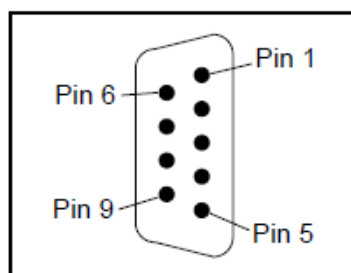
1. Status LED. Όταν είναι αναμμένο:
 - OK: υποδεικνύει ότι η μονάδα περνάει το τεστ της V+ που πραγματοποιείται κατά την εκκίνηση.
 - E-STOP: υποδεικνύει ότι έχουν ενεργοποιηθεί τα φρένα έκτακτης ανάγκης
2. DIP Switch
3. Reset Switch: επαναφέρει την κατάσταση της μονάδας στην εργοστασιακή
4. FP/MCP connector
5. Drive A: Υποδοχή δισκέτας
6. RS-232 θύρες: Δίπλα σε κάθε θύρα αναφέρεται ο αριθμός με τον οποίο αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέσα από το πρόγραμμα.
7. Ψηφιακές συνδέσεις

2.6.3 Σειριακές Συνδέσεις

Υπάρχουν τρεις σειριακές θύρες RS-232 για γενική χρήση εισόδων/εξόδων. Οι θύρες αυτές αναφέρονται ως συσκευές: «SERIAL:1», «SERIAL:2» και «SERIAL:3». Η πρόσβαση στις σειριακές θύρες γίνεται μέσω του VMEbus, δυνατότητα που παρέχεται μέσω οποιοδήποτε επεξεργαστή της Adept που έχει τροποποιηθεί να τρέχει την V+.

Οι θύρες είναι τύπου DB-9P «αρσενικές» (δηλαδή αποτελούνται από 9 πιν). Λεπτομέρειες για την λειτουργία κάθε πιν ξεχωριστά παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Pin	Signal Name	Pin	Signal Name
1	not used	6	DSR (Data Set Ready)
2	RXD (From Device)	7	RTS (Request to Send)
3	TXD (To Device)	8	CTS (Clear to Send)
4	DTR (Data Terminal Ready)	9	not used
5	SG (Signal Ground)		



Πίνακας 2-5 RS-232 θύρα

2.6.4 RS-232 και V+

Αρχικά θα πρέπει μέσα στον πρόγραμμα να ενεργοποιηθεί η θύρα που θα χρησιμοποιηθεί και να γίνει διαθέσιμη για τον χρήστη. Η διαδικασία αυτή γίνεται με την εντολή ATTACH, η σύνταξη της οποίας είναι:

ATTACH (lun, mode) \$device

- lun: αριθμός ο οποίος συνδέεται με την συσκευή που έχει συσχετισθεί με την εντολή ATTACH.
- mode: προαιρετικός αριθμός με τον οποίο ο οποίος καθορίζει τον τρόπο με το οποίο εκτελείται η εντολή
- \$device : ορίζει ποια θύρα έχει ενεργοποιηθεί με βάση όσα έχουν αναλυθεί προηγουμένως

Για να σταλθεί μια μεταβλητή ή ένας χαρακτήρας η μια έκφραση χρησιμοποιείται η εντολή WRITE, η σύνταξη της οποίας είναι:

WRITE (lun) expression

Δηλαδή στέλνεται στην συσκευή που έχει συσχετισθεί μέσω της ATTACH (lun) η ζητούμενη έκφραση.

Στο τέλος του προγράμματος η θύρα θα πρέπει να αποσυνδεθεί με το πρόγραμμα. Αυτό επιτυγχάνεται με την εντολή DETACH.

Παράδειγμα προγράμματος για την χρήση σειριακής θύρας:

```
AUTO slun // ορισμός μεταβλητών
```

```
ATTACH (slun, 4) "SERIAL:2" //επιστρέφεται μέσω της slun ο αριθμός που αντιστοιχεί στην  
ζητούμενη θύρα, χρησιμοποιείται η δεύτερη σειριακή θύρα
```

```
WRITE (slun) ">"
```

```
DETACH (slun)
```

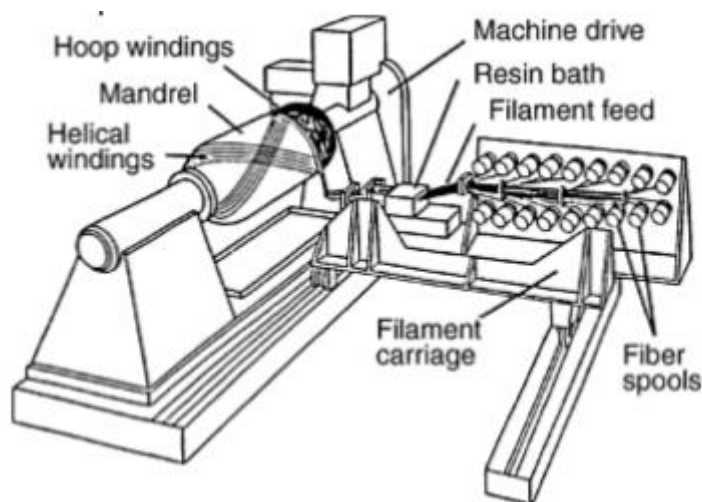
Για το συγκεκριμένο κεφάλαιο, οι πληροφορίες συντέθηκαν από τα manual της Adept Technology Inc και συγκεκριμένα από τα [5]–[8].

3

Filament Winding

3.1 Διαδικασία περιέλιξης ινών

Η διαδικασία τύλιξης ινών είναι μια μέθοδος κατασκευής τεμαχίων από σύνθετα υλικά. Αποτελεί μια πλήρως αυτοματοποιημένη κατεργασία κατά την οποία συνεχείς ίνες τοποθετούνται σε καλούπι που περιστρέφεται με ένα προκαθορισμένο και επαναλαμβανόμενο τρόπο ενώ παράλληλα καλύπτει τα κριτήρια τάσης που απαιτούνται. Όταν ο απαιτούμενος αριθμός στρώσεων έχει πραγματοποιηθεί, το τελικό τεμάχιο υπόκειται σε θερμική επεξεργασία (curing) και το καλούπι είτε απομακρύνεται είτε παραμένει ως στοιχείο του τεμαχίου. [9]



Εικόνα 3-1 Τυπική μορφή μηχανής περιέλιξης ινών

Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για κατασκευή τεμαχίων με γραμμικό άξονα περιστροφής όπως δεξαμενές πίεσης, σωλήνες, μαστούνια του γκολφ, περιβλήματα πυραύλων, πύργοι μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, ζάντες ποδηλάτων, άτρακτοι αεροσκαφών, κατάρτια ιστιοφόρων.

Η μέθοδος τύλιξης ινών ξεκίνησε για πρώτη φορά την δεκαετία του 1950 και είναι μία από τις παλαιότερες μεθόδους για την επεξεργασία σύνθετων υλικών. Οι πρώτες μηχανές για την τύλιξη ινών

κατασκευάστηκαν με σκοπό τον αυτοματισμό της παραγωγής περιβλημάτων πυραύλων. Οι μηχανές αυτές διέθεταν δύο ταχύτητες κίνησης (περιστροφική κίνηση του άξονα του καλουπιού και μεταφορική κίνηση του φορείου στον οριζόντιο άξονα μέσω του οποίου γίνεται η εναπόθεση των ινών) και αποτελούσαν παραλλαγές των συμβατικών τόννων. Στις μηχανές τύπου τόννου έγιναν τροποποιήσεις με σκοπό να γίνει δυνατή η κατεργασία πιο σύνθετων μορφολογικά τεμαχίων. Για να επιτευχθεί αυτό προστέθηκαν περισσότεροι βαθμοί ελευθερίας (κίνηση του φορείου και στον κατακόρυφο άξονα) αλλά και με την προσθήκη αυτή μπορούσαν να παραχθούν μόνο αξονοσυμμετρικά τεμάχια. Στη συνέχεια δοκιμάστηκαν διαφορετικές συνθέσεις (διαμορφώσεις) μηχανών οι κυριότερες από τις οποίες θα παρουσιαστούν στην συνέχεια. [10]

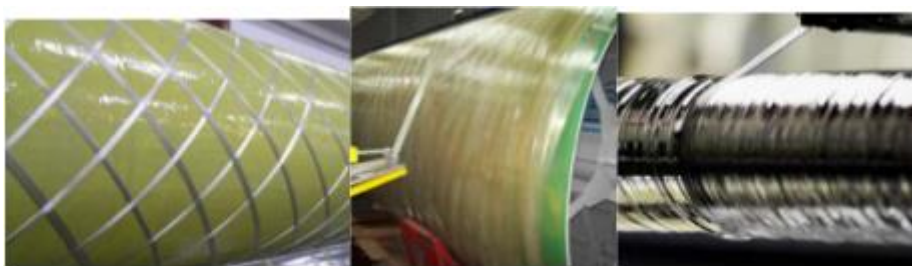


Εικόνα 3-2 Τεμάχιο που προέκυψε από filament winding

Με την ανάπτυξη των υπολογιστών και του αριθμητικού ελέγχου στις εργαλειομηχανές (CNC technology) επιτεύχθηκε ένα μεγάλο βήμα όσο αφορά την κατασκευή μηχανών τύλιξης ινών. Με την ανάπτυξη των παραπάνω τεχνολογιών κατέστη δυνατός ο καλύτερος έλεγχος της τοποθέτησης των ινών και της ακρίβειας με την οποία αυτή επιτυγχάνεται καθώς αύξηση της ταχύτητας της κατεργασίας. Με την ανάπτυξη λογισμικών που επιτρέπουν την προσομοίωση κατασκευάστηκαν πιο σύνθετες γεωμετρικές τεμαχίων. Με το πέρασμα των χρόνων δημιουργήθηκαν εμπορικά προγράμματα τα οποία δημιουργούν ένα πρόγραμμα CNC που φορτώνεται στην μηχανή για την παραγωγή ενός τεμαχίου με τύλιξη ινών. Τέτοια προγράμματα είναι: Cadfil, CADMAC, CADFIBER/CADWIND, CompositaD. Εκτός των προγραμμάτων αυτών οι βιομηχανίες έχουν δημιουργήσει δικά τους προγράμματα για τις περιπτώσεις που το τεμάχιο δεν εμπίπτει στις συνηθισμένες κατηγορίες και σχήματα που καλύπτουν τα γενικά πακέτα. [11]

3.2 Τύποι ινών

Τα πιο συνηθισμένα υλικά περιέλιξης είναι οι ίνες άνθρακα και οι ίνες γυαλιού ενώ συχνά χρησιμοποιούνται και ίνες αραμιδίου.



Εικόνα 3-3 Ίνες υάλου, αραμιδίου και άνθρακα

Ίνες γυαλιού

Οι ίνες γυαλιού που χρησιμοποιούνται στην τύλιξη ινών ανήκουν στις κατηγορίες “E” , “S” και “C” . Για βιομηχανικά προϊόντα επιλέγεται ο τύπος υαλονήματος E-glass. Για αεροδιαστημικά και υψηλής απόδοσης δοχεία πίεσης χρησιμοποιείται ο τύπος S-2 glass, διότι έχει υψηλότερη αντοχή και μέτρο ελαστικότητας .Χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται ακρίβεια στις διαστάσεις , αντίσταση στη διάβρωση και χαμηλό κόστος κατασκευής. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για την μείωση του χρόνου παραγωγής χρησιμοποιούνται ταινίες αντί για νήματα μιας και η επιφάνεια καλύπτεται ταχύτερα. [12]

Ίνες άνθρακα/γραφίτη

Οι ίνες άνθρακα χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις που απαιτείται η μέγιστη απόδοση. Έχουν χαμηλή πυκνότητα, μεγάλη αντοχή και υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Ωστόσο τα ανθρακονήματα είναι πολύ πιο ακριβά από ότι οι ίνες υάλου ή αραμιδίου.

Ίνες αραμιδίου (Kevlar)

Οι ίνες αραμιδίου χρησιμοποιούνται σε τεμάχια με μεγαλύτερες καταπονήσεις εφελκυσμού μιας και έχουν μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας από τις ίνες υάλου, αλλά το μειονέκτημά τους είναι ότι έχουν μικρή αντοχή σε θλίψη και διάτμηση. Από τις ίνες αυτές παρασκευάζονται κυρίως δοχεία που βρίσκονται υπό πίεση. [9]

3.3 Ρητίνες/ Μήτρες (resins)

Ο ρόλος των ρητινών στην τύλιξη ινών είναι ίδιος με αυτόν που εκτελούν και σε οποιαδήποτε κατασκευή από σύνθετα υλικά:

- Συγκράτηση των ινών μεταξύ τους.
- Μεταβίβαση των μηχανικών τάσεων που ασκούνται συνολικά προς τις ίνες.
- Προστασία των ινών από περιβαλλοντικές φθορές και προσβολές.
- Ανακοπή της διάδοσης των ρωγμών

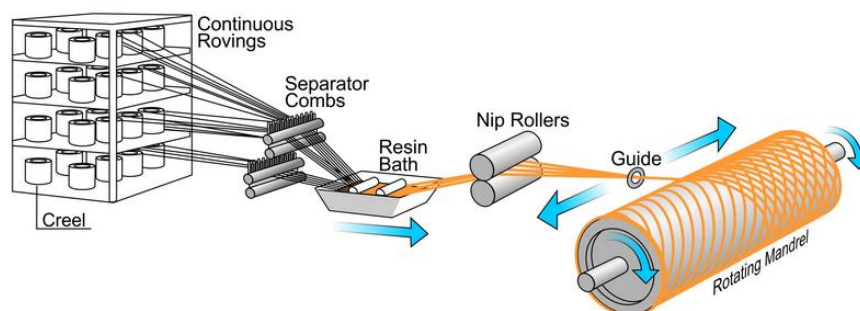
Για να ικανοποιεί το ρόλο με τον οποίο είναι επιφορτισμένη η μήτρα πρέπει να χαρακτηρίζεται από:

- Ολκιμότητα.
- Ανθεκτικότητα.

- Σχετική ευκαμψία.
- Σημείο τήξης μεγαλύτερο από το σημείο λειτουργίας του υλικού [9]

3.4 Σύστημα εμποτισμού

Οι ίνες είναι συνεχείς και ξετυλίγονται από ένα καρούλι με σκοπό να προεπεξεργαστούν πριν να περιτυλιχθούν γύρω από το καλούπι. Υπάρχουν τρεις μέθοδοι για εμβάπτιση του νήματος σε ρητίνη.



Εικόνα 3-4 Σύστημα εμποτισμού

Η πρώτη βασική μέθοδος, που αναφέρεται σαν «υγρό» σύστημα (wet winding), περιλαμβάνει την εμβάπτιση των νημάτων σε ρητίνη υγρής μορφής πριν την περιέλιξη. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του συγκεκριμένου συστήματος είναι η οικονομία καθώς δεν χρησιμοποιούνται ειδικές συσκευές για τον προεμποτισμό των ινών. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εξασφαλίσει πολύ καλή εμβάπτιση των ενισχυτικών ινών στην ρητίνη αλλά επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την προσοχή που δίνεται από τον χειριστή κατά την διάρκεια της κατεργασίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι η μέθοδος αυτή παρουσιάζει αρκετά μειονεκτήματα. Αρχικά, η διαδικασία είναι αργή καθώς τα νήματα δεν είναι δυνατό να περιτυλιχθούν γύρω από το καλούπι γρηγορότερα από ότι μπορούν να περνούν μέσα από την ρητίνη και να εμποτίζονται. Αν περάσει ένα νήμα γρήγορα μέσα από το λουτρό τότε στην επιφάνεια του θα παραμείνει λιγότερη ποσότητα από την απαιτούμενη. Επιπλέον, δεν είναι δυνατό να υπάρχει ομοιομορφία στην περιεκτικότητα σε ρητίνη από κομμάτι σε κομμάτι καθιστώντας την διαδικασία μη ακριβή. Επίσης υπάρχει περιορισμός στο είδος των ρητινών που μπορεί να χρησιμοποιηθούν λόγω της πυκνότητας των τελευταίων. Μια παραλλαγή της διαδικασίας είναι η περιέλιξη των ινών να γίνεται στο καλούπι ενώ αυτές είναι στεγνές και ύστερα να γίνεται ο εμποτισμός τους πάνω στο καλούπι. Αυτή η μέθοδος τείνει να εγκαταλειφθεί από τους περισσότερους κατασκευαστές καθώς είναι ασύμφορη αφού αφενός μεν υπάρχει μεγάλη σπατάλη ρητίνης αφετέρου ο χώρος εργασίας χρειάζεται συνεχώς καθάρισμα από τις σταγόνες ρητίνης που χύνονται στο πάτωμα.

Στη δεύτερη μέθοδο χρησιμοποιούνται νήματα τα οποία είναι προεμποτισμένα σε ρητίνη (prepreg). Η τύλιξη ινών με προεμποτισμένα νήματα προσφέρει ορισμένα πλεονεκτήματα απ'ότι αυτή με το υγρό νήμα. Αρχικά, τα προεμποτισμένα νήματα επιτρέπουν τον έλεγχο της περιεκτικότητας σε ρητίνη μιας

κατασκευής με συνέπεια οι μηχανικές ιδιότητες του τελικού τεμαχίου να είναι πιο ομαλές και προβλέψιμες. Επίσης, οι ίνες τοποθετούνται ταχύτερα και η παραγωγή αυξάνεται αφού η ταχύτητα περιέλιξης δεν περιορίζεται από την ταχύτητα του επαρκούς εμποτισμού των νημάτων. Για την κατασκευή των νημάτων αυτών απαιτούνται ειδικός εξοπλισμός ο οποίος είναι ακριβός και μη πρακτικός με συνέπεια να μην προτιμάται η παραγωγή τους τοπικά αλλά να αγοράζονται. Η πλειοψηφία των νημάτων αυτών αποθηκεύονται σε ειδικούς χώρους και έχουν μικρό χρόνο ζωής σε συνθήκες περιβάλλοντος. Επιπλέον περιέχουν συντηρητικά που επιδρούν αρνητικά στην ποιότητα τους.

Στη τρίτη μέθοδο χρησιμοποιούνται νήματα τα οποία έχουν προεμποτιστεί σε ρητίνη αλλά απαιτείται επιπλέον προσθήκη ρητίνης πριν από την τοποθέτηση τους στο καλούπι.

Κατά τη διάρκεια της περιέλιξης ινών τα νήματα υπόκεινται σε μία συστροφή καθώς βγαίνουν από την ανέμη και τοποθετούνται στο καλούπι (περιστρεφόμενο ή και όχι). Σε εμπορικές εφαρμογές θεωρείται αποδεκτή η συστροφή στα νήματα ώστε να απλουστεύεται ο χειρισμός τους, στην αεροδιαστημική βιομηχανία ωστόσο και σε άλλες κρίσιμες εφαρμογές προτιμώνται νήματα χωρίς συστροφή για να επιτυγχάνονται υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες.

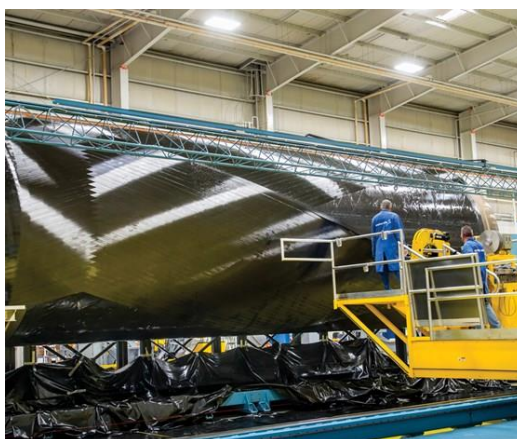
3.5 Εντατική κατάσταση στα νήματα

Για την παραγωγή διαφόρων ειδών σύνθετων προϊόντων, είναι απαραίτητος ο έλεγχος της τάσης των ινών. Η απαιτούμενη τάση εξαρτάται άμεσα από το είδος και υλικό των ινών που χρησιμοποιείται, από τη διάμετρο του κομματιού και από τον προσανατολισμό των ινών και πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο ομοιόμορφα κατανομημένη. Το βασικό σύστημα που χρησιμοποιείται για τον παραπάνω έλεγχο είναι ο έλεγχος της ανέμης με το νήμα από Ηλεκτρονικό Υπολογιστή. Αυτό το σύστημα παρέχει ακριβή επιμέρους ελεγχόμενη τάση της κάθε ίνας .[13]

3.6 Είδη καλουπιών

Το κομμάτι που περιστρέφεται είναι το καλούπι το οποίο αντιστοιχεί στην εσωτερική γεωμετρία του τεμαχίου. Τροποποιώντας το καλούπι μπορεί να επηρεαστεί η εσωτερική επιφάνεια και η τραχύτητα του τελικού κομματιού. Αντίστοιχα, άλλες φορές είναι απαραίτητη η επιπλέον κατεργασία της εξωτερικής επιφάνειας του τελικού αποτελέσματος αφότου έχει ολοκληρωθεί η περιέλιξη, κυρίως σε τεμάχια που αφορούν την αεροπορική βιομηχανία. Με την ολοκλήρωση της κατεργασίας το καλούπι στην πλειοψηφία των περιπτώσεων αφαιρείται. Σε κάποιες όμως περιπτώσεις παραμένει ως μέρος του τελικού προϊόντος. Η επιλογή του καλουπιού γίνεται με βάση την εκάστοτε κατάσταση, τις ανοχές θερμότητας και τη γεωμετρία. Μερικές επιλογές για τη σύνθεση του καλουπιού περιλαμβάνουν κομμάτια υδατοδιαλυτά (π.χ. από άμμο), από εύτηκτα άλατα, από γύψο, μεταλλικά πτυσσόμενα, φουσκωτά, από κράματα με χαμηλό σημείο τήξης. Μετά τη σκλήρυνση το καλούπι διαλύεται με ζεστό νερό, λιώνει ή τεμαχίζεται σε μικρά κομμάτια για να αφαιρεθεί, ενώ το φουσκωτό καλούπι μπορεί να

εξαχθεί από κάποιο άνοιγμα. Το είδος καλουπιού που θα επιλεγθεί εξαρτάται από τα διάφορα χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις της διαδικασίας τύλιξης ινών.[14]



Εικόνα 3-5 Εξωτερικό κάλυμμα διαστημικού πυραύλου (Orbital ATK)

Μια άλλη κατηγορία καλουπιών είναι τα επαναχρησιμοποιούμενα. Αυτά μπορούν να αποτελούνται και από περισσότερα από ένα τμήματα. Συνήθως αυτά που αποτελούνται από περισσότερα τμήματα είναι πιο ακριβά και χρησιμοποιούνται σε γεωμετρίες που η μονοκόμματη αφαίρεση του καλουπιού δεν είναι δυνατή. Τα καλούπια αυτά κατασκευάζονται από χάλυβα, αλουμίνιο ή άλλα ανθεκτικά υλικά που διαθέτουν τα απαραίτητα θερμικά χαρακτηριστικά ενώ η επιφάνεια τους καλύπτεται από ένα χάρτινο φύλλο με σκοπό την ευκολότερη αφαίρεση. Τα πολύ μεγάλα καλούπια κατασκευάζονται με εσωτερικά στηρίγματα. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η ευκολία στην αναδημιουργία των κομματιών ενώ στα μειονεκτήματα περιλαμβάνονται η δυσκολία στην αφαίρεση τους καθώς επίσης το κόστος τους λόγω πολυπλοκότητας είναι ψηλό.

Υπάρχουν αρκετά σχεδιαστικά κριτήρια τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την διαδικασία σχεδίασης ενός καλουπιού που θα χρησιμοποιηθεί σε τύλιξη ινών. Αυτά είναι:

- **Αντοχή και σταθερότητα:** Το καλούπι πρέπει να μπορεί να αντέχει τόσο το βάρος του όσο και το βάρος του τεμαχίου κατά την διάρκεια της τύλιξης και της επεξεργασίας που ενδεχομένως θα ακολουθήσει. Πρέπει ακόμα να είναι σε θερμοκρασιακή σταθερότητα στην υψηλότερη θερμοκρασία που θα αναπτυχθεί κατά την διάρκεια της θερμοσκλήρυνσης.
- **Βάρος:** Το καλούπι θα πρέπει να είναι όσο πιο ελαφρύ είναι δυνατό. Όσο πιο βαρύ είναι, τόσο πιο δύσκολος είναι ο χειρισμός και παρουσιάζει αργές μεταβολές στη θερμοκρασία κατά την διάρκεια της κατεργασίας.
- **Θερμική διαστολή:** Το καλούπι πρέπει να σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να διασταλεί κατά την θέρμανση και να ασκεί πίεση στο τελικό τεμάχιο και να συσταλεί κατά την ψύξη για να αφαιρεθεί πιο εύκολα.
- **Εύκολη αφαίρεση:** Στην περίπτωση που το καλούπι θα πρέπει να αφαιρεθεί, αυτό να γίνεται εύκολα και γρήγορα.

- Κόστος: Πρέπει να ορισθεί με βάση την πολυπλοκότητα του κομματιού, την τελική του αξία και το πλήθος τους.[15]

3.7 Μηχανές τύλιξης ινών

Οι πιο απλές μηχανές που χρησιμοποιούνται στην τύλιξη νήματος έχουν δύο άξονες κίνησης, την περιστροφή του καλουπιού και την μεταφορική κίνηση του φορέα μέσω του οποίου γίνεται η τοποθέτηση του νήματος. Οι μηχανές αυτές είναι κατάλληλες για την παραγωγή μόνο σωλήνων. Για την παραγωγή δοχείων με δυνατότητα αποθήκευσης υπό πίεση είναι συνήθης η χρήση μηχανών με τέσσερις άξονες κίνησης οι οποίες διαθέτουν εκτός από τους αρχικούς άξονες, ένα ακτινικό άξονα κάθετο στην κίνηση του φορέα και ένα περιστρεφόμενο άξονα στην κεφαλή τοποθέτησης της ίνας για την αποφυγή συστρώφης της ίνας. Μηχανές με περισσότερους από τέσσερις άξονες χρησιμοποιούνται για πιο σύνθετες γεωμετρίες και διαθέτουν αριθμητικό έλεγχο.

Συνοψίζοντας για τον συνδυασμό μηχανών και τελικού προϊόντος :

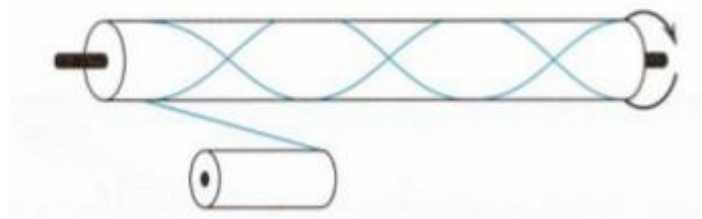
- Δύο άξονες κίνησης- σωλήνες όλων των μεγεθών.
- Δύο άξονες κίνησης με περισσότερες κεφαλές τοποθέτησης ινών- περισσότερους από δύο σωλήνες ταυτόχρονα (αύξηση παραγωγής).
- Τέσσερις άξονες κίνησης- μηχανές γενικής χρήσης (δεξαμενές κ.τ.λ).
- Τέσσερις άξονες κίνησης με περισσότερες κεφαλές τοποθέτησης ινών- (αύξηση παραγωγής).
- Έξι άξονες κίνησης- αεροπορικές εφαρμογές/ερευνητικές δραστηριότητες/ πολύπλοκες γεωμετρίες

3.8 Μέθοδοι περιέλιξης ινών

Οι τρεις βασικές μέθοδοι περιέλιξης ινών είναι η ελικοειδής περιέλιξη (helical winding) , η περιφερειακή περιέλιξη (circumferential winding) και η πολική περιέλιξη (polar winding).

Ελικοειδής περιέλιξη

Στη μέθοδο αυτή το καλούπι περιστρέφεται ενώ το φορείο μετακινείται από την μία μεριά της μηχανής στην άλλη με την κατάλληλη ταχύτητα για την επίτευξη της ζητούμενης γωνίας περιέλιξης. Με την ελικοειδή περιέλιξη μπορούν να κατασκευαστούν σχεδόν όλα τα τεμάχια ανεξάρτητα από τον συνδυασμό μήκους και διαμέτρου. Είναι αναγκαίο, ανάλογα με τη γωνία περιέλιξης, το καλούπι να περιστραφεί αρκετές φορές μέχρι να καλυφθεί ολόκληρη η επιφάνειά του.



Εικόνα 3-6 Ελικοειδής περιέλιξη

Η σχέση που συνδέει την γωνία περιέλιξης και τις παραμέτρους της μηχανής είναι:

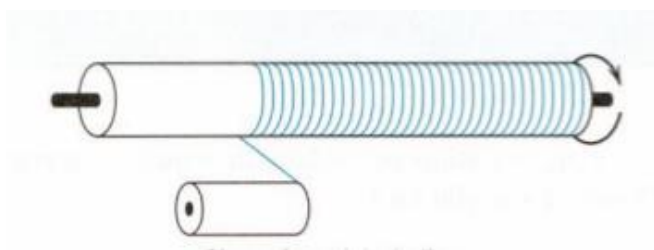
$$a = \frac{v}{\pi DN}$$

όπου a η γωνία της έλικας, v η ταχύτητα σάρωσης κατά μήκος του καλουπιού σε m/sec , D η διάμετρος της ανέμης σε m (meters), N η ταχύτητα περιστροφής του κομματιού σε rev/sec .

Όπως φαίνεται από την παραπάνω εξίσωση ο λόγος $v/\pi DN$ πρέπει να παραμένει σταθερός καθόλη την διάρκεια της κατεργασίας για να επιτευχθεί σταθερή γωνία περιέλιξης. Για το λόγο αυτό πρέπει να ρυθμίζεται είτε η ταχύτητα περιστροφής του καλουπιού είτε η ταχύτητα κίνησης του φορείου για να αντισταθμιστεί η αλλαγή στη διάμετρο.

Περιφερειακή περιέλιξη

Στη μέθοδο αυτή, η ταχύτητα περιστροφής της ανέμης είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν του βραχίονα περιέλιξης. Μετά από κάθε πλήρη περιστροφή του καλουπιού το φορείο μετακινείται τόσο όσο είναι το πάχος του νήματος ώστε οι στρώσεις να είναι η μία δίπλα στην άλλη. Οι ίνες τυλίγονται στο περιστρεφόμενο καλούπι υπό γωνία περίπου 90 μοίρες με τον άξονα του καλουπιού. Συνήθως συνδυάζεται η περιφερειακή με την ελικοειδή περιέλιξη για την παροχή κατάλληλης αντοχής και στιβαρότητας.

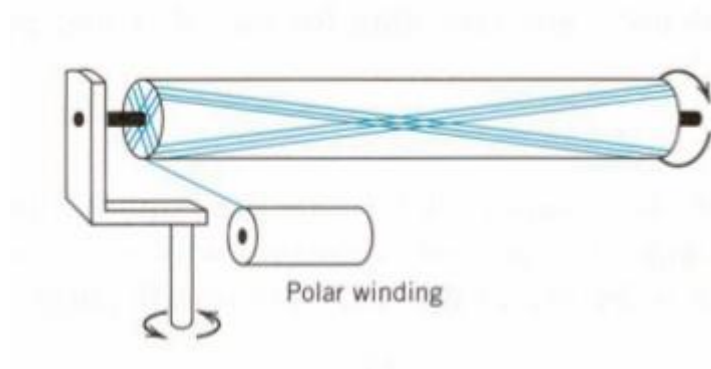


Εικόνα 3-7 Περιφερειακή περιέλιξη

Πολική περιέλιξη

Αποτελεί πιο απλή από την ελικοειδή υπό την έννοια ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σταθερή ταχύτητα περιέλιξης και ο φορέας δεν είναι απαραίτητο να επιστρέφει στην αρχική του θέση. Με αυτή τη μέθοδο το νήμα περνάει εφαπτομενικά στο άνοιγμα στην μία άκρη του κομματιού, αντιστρέφεται η κατεύθυνση και έπειτα μετακινείται πάλι εφαπτομενικά στο άλλο άκρο του κομματιού. Η εναπόθεση είναι επίπεδη και οι στρώσεις νήματος δίπλα η μία στην άλλη, μιας και ο βραχίονας περιέλιξης σχηματίζει ένα μεγάλο

κύκλο κατά τη διάρκεια του περάσματος του. Οι μηχανές πολικής περιέλιξης έχουν δύο άξονες κίνησης, αυτόν του καλουπιού και αυτόν του βραχίονα περιέλιξης.[15]

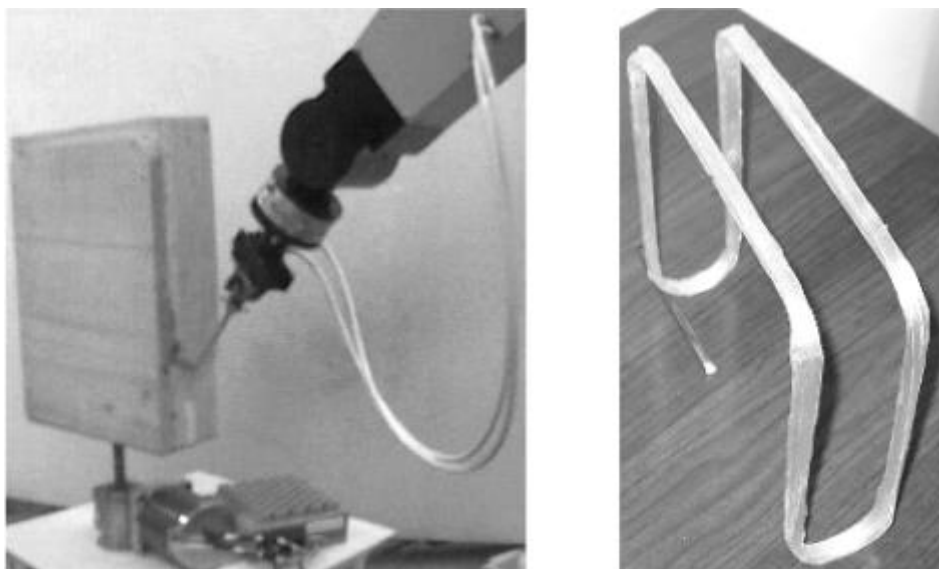


Εικόνα 3-8 Πολική περιέλιξη

3.9 Περιέλιξη ινών με την χρήση ρομπότ

Ένα ρομποτικό σύστημα που χρησιμοποιείται για περιέλιξη ινών παρουσιάζει τις ίδιες αρχές λειτουργίας με τα παραδοσιακά μηχανήματα που βασίζονται σε αριθμητικό έλεγχο. Σε σύγκριση με τα τελευταία, οι ρομποτικοί βραχίονες είναι περισσότερο ευέλικτοι. Τα ρομπότ μπορούν να κινήσουν με σχετική ευκολία ένα ελαφρύ φορτίο διαμέσου μιας περίπλοκης κίνησης και μπορεί να προγραμματιστούν έτσι ώστε να πραγματοποιούν την ίδια κίνηση κατ' επανάληψη. Επιπλέον, ένα ρομποτικό σύστημα είναι λιγότερο ακριβό, γρηγορότερο (στις περισσότερες περιπτώσεις) και πιο εύκολα παραμετροποιήσιμο από ένα παραδοσιακό σύστημα.[16]

Σε διάφορα ερευνητικά ιδρύματα έχουν αναπτυχθεί ρομποτικές κεφαλές και αλγόριθμοι για την περιέλιξη ινών σε απλές αλλά και σύνθετες γεωμετρίες, όπως για παράδειγμα για την κατασκευή τεμαχίων που χρησιμοποιούνται σε κινητήρες ελικοπτερόων[17] και περίπλοκων γεωμετριών όπως ένα «γόνατο» [18],[19].



Εικόνα 3-9 Ρομποτικό σύστημα περιέλιξης ιών για κατασκευή τεμαχίου για κινητήρα ελικοπτερου [17]



Εικόνα 3-10 ρομποτικό σύστημα περιέλιξης ιών [18]

4

Μικροελεγκτής-Arduino

4.1 Γενικά στοιχεία

Το Arduino είναι μια «ανοικτού κώδικα» πλατφόρμα «πρωτοτυποποίησης» ηλεκτρονικών. Αποτελείται από μια προγραμματιζόμενη πλακέτα (στην ουσία πρόκειται για έναν μικροελεγκτή) καθώς και από το λογισμικό που χρειάζεται για την λειτουργία του. Αναλυτικότερα, το Arduino είναι ένας single-board μικροελεγκτής, δηλαδή μια απλή μητρική πλακέτα ανοικτού κώδικα, με ενσωματωμένο μικροελεγκτή και εισόδους/εξόδους, και η οποία μπορεί να προγραμματιστεί με τη γλώσσα Wiring (πρόκειται για τη γλώσσα προγραμματισμού C++ και ένα σύνολο από βιβλιοθήκες, υλοποιημένες επίσης στην C++).[20],[21]

Στα πλαίσια της εργασίας έγινε χρήση του Arduino UNO για τον προγραμματισμό και την αυτοματοποίηση της κίνησης του βηματικού κινητήρα που χρησιμοποιήθηκε για την κίνηση του καλουπιού.

4.2 Arduino Uno

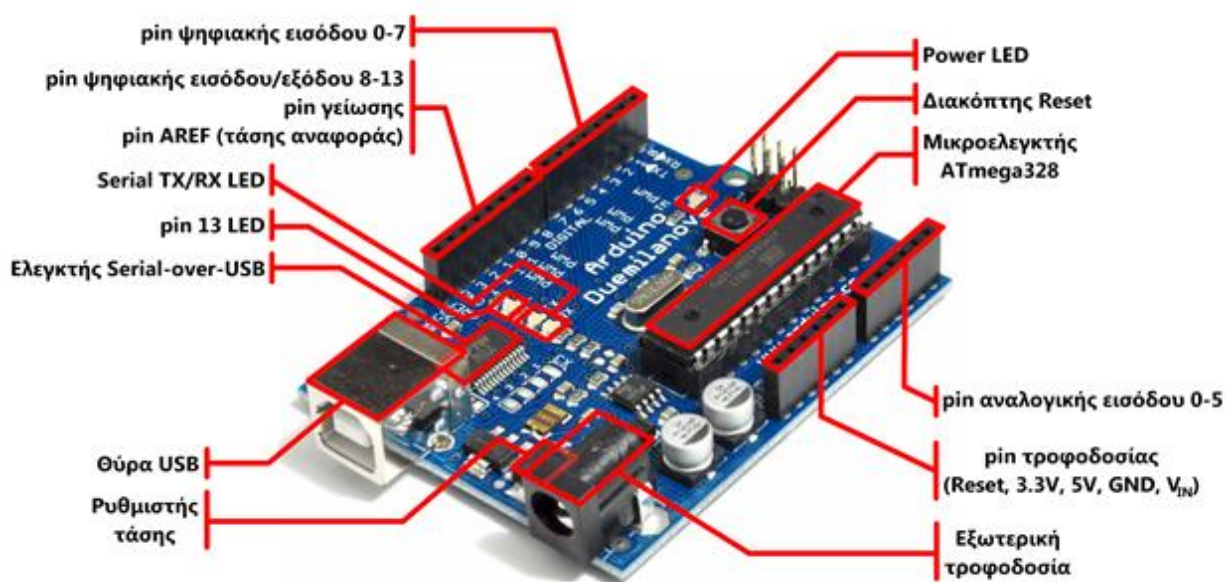
Microcontroller	ATmega328P
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
PWM Digital I/O Pins	6
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	20 mA

DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328P) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Clock Speed	16 MHz
LED_BUILTIN	13
Length	68.6 mm
Width	53.4 mm
Weight	25 g

Πίνακας 4-1 Χαρακτηριστικά Arduino Uno

4.3 Είσοδοι - Έξοδοι

Αρχικά, το Arduino διαθέτει σειριακό interface. Ο μικροελεγκτής ATmega υποστηρίζει σειριακή επικοινωνία, την οποία το Arduino προωθεί μέσα από έναν ελεγκτή Serial-over-USB ώστε να συνδέεται με τον υπολογιστή μέσω USB. Η σύνδεση αυτή χρησιμοποιείται για την μεταφορά των προγραμμάτων που σχεδιάζονται από τον υπολογιστή στο Arduino αλλά και για αμφίδρομη επικοινωνία του Arduino με τον υπολογιστή μέσα από το πρόγραμμα την ώρα που εκτελείται.



Εικόνα 4-1 Arduino Uno

Επιπλέον, στην πάνω πλευρά του Arduino βρίσκονται 14 θηλυκά pin, αριθμημένα από 0 ως 13, που μπορούν να λειτουργήσουν ως ψηφιακές εισοδοι και έξοδοι. Λειτουργούν στα 5V και καθένα μπορεί να παρέχει ή να δεχτεί το πολύ 20mA. Ως ψηφιακή έξοδος, ένα από αυτά τα pin μπορεί να τεθεί μέσα από το πρόγραμμα σε κατάσταση HIGH ή LOW, οπότε το Arduino θα ξέρει αν πρέπει να διοχετεύσει ή όχι

ρεύμα στο συγκεκριμένο pin. Στην περίπτωση που ρυθμιστεί ένα από αυτά τα pin ως ψηφιακή είσοδο μέσα από το πρόγραμμα, είναι δυνατό με την κατάλληλη εντολή να διαβαστεί η κατάστασή του (HIGH ή LOW) ανάλογα με το αν η εξωτερική συσκευή που έχει συνδεθεί σε αυτό το pin διοχετεύει ή όχι ρεύμα στο pin.

Επιπλέον τα pin 0 και 1 λειτουργούν ως RX και TX της σειριακής όταν το πρόγραμμα ενεργοποιεί την σειριακή θύρα. Έτσι, όταν λόγω χάρη το πρόγραμμα στέλνει δεδομένα στην σειριακή, αυτά προωθούνται και στην θύρα USB μέσω του ελεγκτή Serial-Over-USB αλλά και στο pin 0 για να τα διαβάσει ενδεχομένως μια άλλη συσκευή. Το πρωτόκολλο επικοινωνίας που χρησιμοποιείται για την μεταφορά των δεδομένων από τη μια συσκευή στην άλλη είναι το πρωτόκολλο UART.

Τα pin 3, 5, 6, 9, 10 και 11 μπορούν να λειτουργήσουν και ως ψευδοαναλογικές έξοδοι με το σύστημα PWM (Pulse Width Modulation). Ως PWM (Διαμόρφωση Εύρους Παλμών) ορίζεται η τεχνική η οποία δίνει αναλογικά αποτελέσματα με την χρήση ψηφιακών μέσων. Μέσω ψηφιακού ελέγχου δημιουργείται ένα τετραγωνικό κύμα, δηλαδή ένα σήμα που εναλλάσσεται μεταξύ on και off (ή αλλιώς μεταξύ 5V και 0V). Η διάρκεια του "on time" είναι το pulse width, δηλαδή το εύρος του παλμού (ή αλλιώς duty cycle). [20]

Στην κάτω πλευρά του Arduino, με τη σήμανση ANALOG IN, υπάρχει μια ακόμη σειρά από 6 pin, αριθμημένα από το 0 ως το 5. Το καθένα από αυτά λειτουργεί ως αναλογική είσοδος κάνοντας χρήση του ADC (Analog to Digital Converter) που είναι ενσωματωμένο στον μικροελεγκτή. Επομένως είναι δυνατό να τροφοδοτηθεί ένα από τα pin αυτά με μία τάση η οποία μπορεί να κυμαίνεται από 0V ως μια τάση αναφοράς Vref η οποία, αν δεν προηγηθεί κάποια αλλαγή είναι προ-ρυθμισμένη στα 5V. Τότε, μέσα από το πρόγραμμα λαμβάνεται η τιμή του pin ως ένα ακέραιο αριθμό ανάλυσης 10-bit, από 0 (όταν η τάση στο pin είναι 0V) μέχρι 1023 (όταν η τάση στο pin είναι 5V). Η τάση αναφοράς μπορεί να ρυθμιστεί με μια εντολή στο 1.1V, ή σε όποια άλλη τάση απαιτείται (μεταξύ 2 και 5V) τροφοδοτώντας εξωτερικά με αυτή την τάση το pin με την σήμανση AREF που βρίσκεται στην απέναντι πλευρά της πλακέτας. [22]

4.4 Τροφοδοσία

Το Arduino μπορεί να τροφοδοτηθεί με ρεύμα είτε από τον υπολογιστή μέσω της σύνδεσης USB, είτε από εξωτερική τροφοδοσία που παρέχεται μέσω μιας υποδοχής φικ των 2.1mm (θετικός πόλος στο κέντρο) και βρίσκεται στην κάτω-αριστερή γωνία του Arduino. [22]

4.5 Προγραμματισμός Arduino

Στην γλώσσα του Arduino κάθε πρόγραμμα αποτελείται από δύο βασικές ρουτίνες ώστε να έχει την γενική δομή:

```
void setup() {  
  // put your setup code here, to run once:  
}  
  
void loop() {  
  // put your main code here, to run repeatedly:  
}
```

Η βασική ρουτίνα `setup()` εκτελείται μια φορά μόνο κατά την εκκίνηση του προγράμματος ενώ η βασική ρουτίνα `loop()` περιέχει τον βασικό κορμό του προγράμματος και η εκτέλεσή της επαναλαμβάνεται συνέχεια σαν ένας βρόγχος `while(true)`.

4.6 Μεταβλητές

Μεταβλητή στις γλώσσες προγραμματισμού γενικά ονομάζετε ένα γλωσσικό αντικείμενο που μπορεί να λάβει διάφορες τιμές, μία κάθε φορά. Οι τιμές μιας μεταβλητής περιορίζονται συνήθως σε ένα τύπο δεδομένων.

1. `byte`: αποθηκεύει μια αριθμητική τιμή 8-bit χωρίς δεκαδικά ψηφία, παίρνουν τιμές από 0 μέχρι 255.
2. `int`: ακέραιοι, παίρνουν τιμές από -32,768 μέχρι 32767.
3. `long`: μεγάλου μεγέθους ακέραιοι, παίρνουν τιμές από -2,147,483,648 μέχρι 2,147,483,647
4. `float`: πραγματικοί αριθμοί, παίρνουν τιμές από 3.4×10^{-38} μέχρι 3.4×10^{38}
5. `char`: ένας χαρακτήρας (μέγεθος ένα Byte)
6. `string`: πίνακας χαρακτήρων
7. `boolean`: λογικές μεταβλητές με τιμές 0 και 1 (TRUE ή FALSE)

Οι μεταβλητές μπορούν να δηλωθούν στην αρχή του προγράμματος ενώ μπορεί να γίνει και αρχικοποίηση της τιμής της μεταβλητής με την δήλωση της.

5

Βηματικοί Κινητήρες- Ελεγκτές

5.1 Βηματικοί κινητήρες

5.1.1 Χαρακτηριστικά

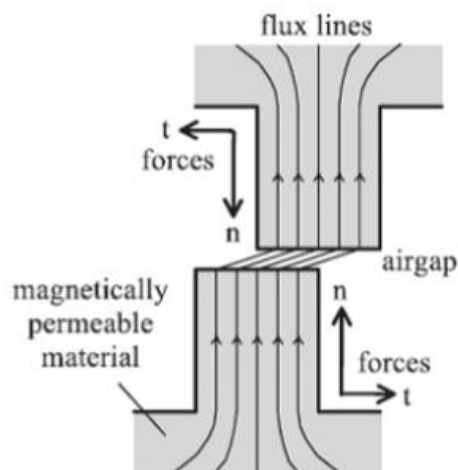
Ένας βηματικός κινητήρας είναι μια σύγχρονη μηχανή χωρίς ψήκτρες, με βασικό χαρακτηριστικό του το διαχωρισμό μιας πλήρους περιστροφής σε μια σειρά από βήματα. Κάθε βήμα είναι κλάσμα ενός πλήρους κύκλου. Αυτό το κλάσμα, εξαρτάται κυρίως από τα μηχανικά μέρη του κινητήρα αλλά και από τη μέθοδο της οδήγησης.

Οι βηματικοί κινητήρες διαφέρουν επίσης στον τρόπο με τον οποίο τροφοδοτούνται καθώς αντί για εναλλασσόμενη ή συνεχής τάση, οδηγούνται με παλμούς. Αναλυτικότερα, η οδήγηση τους μετατρέπει ψηφιακές εντολές σε διακριτούς παλμούς τάσης συνεχούς ρεύματος. Οι κινητήρες με την σειρά τους, μετατρέπουν τους παλμούς σε διακριτή γωνιακή μετατόπιση του δρομέα ή γωνιακό βήμα (step). Αυτό επιτυγχάνεται με τη διέγερση των κατάλληλων τυλιγμάτων του στάτη. Για παράδειγμα, ένας βηματικός κινητήρας 1.8°, περιστρέφει τον άξονά του 1.8° γωνία για κάθε παλμό που δέχεται. Κινητήρες με βηματική γωνία 1.8°, για παράδειγμα, παρέχουν μια ανάλυση $360^\circ/1,8^\circ=200$ βήματα ανά περιστροφή. Η συνολική γωνία που διανύει ο δρομέας είναι ίση με τη βηματική γωνία επί τον αριθμό των βημάτων. [23]

5.1.2 Αρχή λειτουργίας

Βασικό χαρακτηριστικό των βηματικών κινητήρων είναι ότι έχουν δόντια από μαγνητικά αγώγιμο υλικό τόσο στο σταθερό τους μέρος (στάτη) όσο και στο στρεφόμενο (δρομέα). Ανάλογα με τα διαφορετικά κατασκευαστικά μοντέλα βηματικών κινητήρων, τα οποία θα παρουσιαστούν στη συνέχεια, η πηγή της μαγνητικής ροής που διασχίζει το διάκενο αέρος μεταξύ των οδόντων του στάτη και του δρομέα, μπορεί να είναι ένας μόνιμος μαγνήτης, ένα τύλιγμα που διαρρέεται από ρεύμα ή συνδυασμός των δύο. Ανεξάρτητα από την δομή στα δόντια εφαρμόζονται ίσες και αντίθετες δυνάμεις, οι οποίες τείνουν να τα

φέρουν σε επαφή και να μειώσουν το διάκενο μεταξύ τους. Η κύρια συνιστώσα αυτών των δυνάμεων (n) τείνει να μειώσει το διάκενο, αλλά για τους βηματικούς κινητήρες, η πιο "χρήσιμη" δύναμη είναι η μικρότερη εφαπτομενική (t) η οποία τείνει να μετακινήσει τα δόντια πλαγίως, σε αντιστοιχία μεταξύ τους. Όταν η μαγνητική ροή που τα διαπερνά αφαιρείται ή εφαρμόζεται σε άλλο ζεύγος δοντιών, οι δυνάμεις έλξης μηδενίζονται.

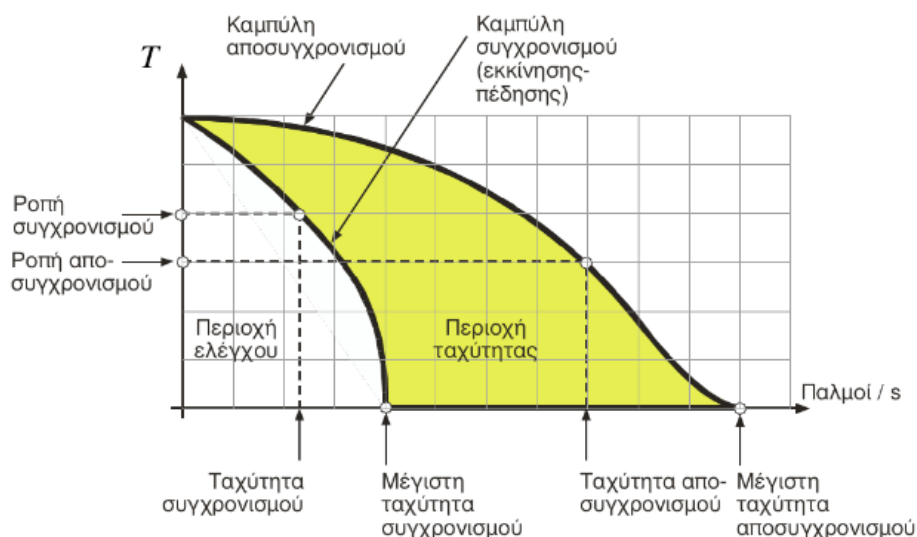


Εικόνα 5-1 Τομή κινητήρα

Η περιστροφή κατά γωνιακά βήματα συντελείται διεγείροντας το κατάλληλο τύλιγμα στο στάτη, ενώ μπορεί να αντιστρέφεται η φορά των βημάτων. Επειδή ο κινητήρας στρέφεται μόνο κατά διακριτά γωνιακά βήματα, ο δρομέας επιταχύνεται και επιβραδύνεται συνεχώς, ακόμη και όταν φαίνεται να περιστρέφεται με "σταθερή" ταχύτητα. Στην πραγματικότητα, η ταχύτητα δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται παλμικά.

Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δίνεται στη χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας του κινητήρα, έτσι ώστε να επιτυγχάνονται όσο το δυνατόν καλύτερα χαρακτηριστικά περιστροφής. Η γενική συμπεριφορά του κινητήρα εξαρτάται απόλυτα από την οδήγηση, και επομένως το αυτό ισχύει και για την καμπύλη ροπής-στροφών. Συχνά, η χαρακτηριστική δίνεται σαν ροπή-συχνότητα παλμών, επειδή η τελευταία είναι ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής.

Η χαρακτηριστική ροπής ταχύτητας των βηματικών κινητήρων περιλαμβάνει δύο καμπύλες, την καμπύλη συγχρονισμού (pull-in) και την καμπύλη αποσυγχρονισμού (pull-out), βλ. Εικόνα 5-2. Αυτές χωρίζουν το διάγραμμα ροπής ταχύτητας σε δύο περιοχές. Στην πρώτη, την περιοχή ελέγχου, ο κινητήρας μπορεί να εκκινήσει, να σταματήσει, ή να αλλάξει φορά με ένα μόνο παλμό. Στην περιοχή αυτή, ο κινητήρας μπορεί να εργάζεται σαν διάταξη ελέγχου θέσης ανοικτού βρόχου.



Εικόνα 5-2 Χαρακτηριστική ροπής στροφών για βηματικούς κινητήρες

Στη δεύτερη περιοχή, την περιοχή ταχύτητας, ο κινητήρας εργάζεται αφού επιταχυνθεί από την πρώτη. Ο κινητήρας στρέφεται χωρίς να αποσυγχρονίζεται, αλλά δεν μπορεί να σταματήσει ή να αλλάξει φορά περιστροφής. Για να συμβεί αυτό, ο κινητήρας θα πρέπει πρώτα να οδηγηθεί στην περιοχή ελέγχου.

Μερικοί χρήσιμοι ορισμοί μεγεθών που επηρεάζουν την επιλογή βηματικών κινητήρων είναι οι εξής:

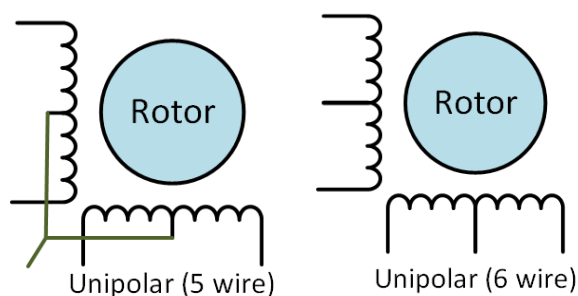
- Ροπή συγκράτησης (holding torque). Η μέγιστη ροπή που μπορεί να εφαρμοσθεί στον κινητήρα χωρίς να μετακινηθεί ο δρομέας του.
- Ροπή συγχρονισμού (pull-in torque). Η μέγιστη ροπή που μπορεί να εφαρμοσθεί στον κινητήρα, κάτω από την επίδραση της οποίας ο κινητήρας μπορεί να εκκινήσει χωρίς να χάσει παλμό, δηλ. σε κάθε παλμό να αντιστοιχεί ένα βήμα.
- Ροπή αποσυγχρονισμού (pull-out torque). Η μέγιστη ροπή που μπορεί να εφαρμοσθεί στον κινητήρα, κάτω από την επίδραση της οποίας ο περιστρεφόμενος δρομέας δεν χάνει βήμα.
- Ταχύτητα συγχρονισμού (pull-in rate). Ο μέγιστος αριθμός παλμών ανά δευτερόλεπτο με τον οποίο ο κινητήρας μπορεί να εκκινήσει με φορτίο, χωρίς να χάσει βήμα.
- Ταχύτητα αποσυγχρονισμού (pull-out rate). Ο μέγιστος αριθμός παλμών ανά δευτερόλεπτο με τον οποίο ο κινητήρας δεν χάνει βήμα, όταν η ταχύτητά του μειώνεται.[24]

5.1.3 Διαχωρισμός

Οι βηματικοί κινητήρες διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά κατασκευής τους αλλά και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους. Δύο βασικοί τρόποι διαχωρισμού τους, είναι με βάση το δρομέα και τα τυλίγματα στο στάτη.

5.1.3.1 Διαχωρισμός με βάση τα τυλίγματα στο στάτη

Μονοπολικοί: Οι μονοπολικοί βηματικοί κινητήρες έχουν στο στάτη τυλίγματα καθένα από τα οποία έχει μια κεντρική ελικοτομή (center tap). Οι ελικοτομές έχουν δύο τρόπους σύνδεσης. Ο πρώτος τρόπος σύνδεσης, είναι να φέρονται έξω από τον κινητήρα σαν δυο ξεχωριστά καλώδια ενώ ο δεύτερος είναι αυτά τα καλώδια να ενώνονται εσωτερικά και να φέρονται έξω από τον κινητήρα σαν ένα καλώδιο. Επομένως οι μονοπολικοί βηματικοί κινητήρες συνήθως έχουν έξι ή πέντε ακροδέκτες. Ανεξάρτητα με τον αριθμό καλωδίων οι κινητήρες αυτοί οδηγούνται με τον ίδιο τρόπο: τα κεντρικά καλώδια (ή το κεντρικό καλώδιο) συνδέεται με την τροφοδοσία και τα καλώδια από τις άκρες των τυλιγμάτων γειώνονται. Ενεργοποιώντας πρώτα το μισό τύλιγμα και στη συνέχεια το άλλο μισό, οι μαγνητικοί πόλοι αλλάζουν. Αυτό σημαίνει ότι το κύκλωμα για έναν κινητήρα διπλής κατεύθυνσης είναι πολύ απλό, και αποτελείται συνήθως από δύο μόνο τρανζίστορ ανά φάση. Ένα σημαντικό μειονέκτημα τους είναι ότι, κάθε φορά, χρησιμοποιείται μόνο το ήμισυ των διαθέσιμων περιελίξεων. Αυτό έχει ως συνέπεια, η παραγόμενη ροπή να είναι περίπου το ήμισυ της ροπής σε σχέση με τη ροπή που θα παραγόταν από τον αντίστοιχο διπολικό κινητήρα.



Εικόνα 5-3 Διαγράμματα μονοπολικών κινητήρων

Ο μονοπολικός κινητήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως διπολικός, μη συνδέοντας το κοινό τύλιγμα.

Διπολικοί: Αντίθετα με τους μονοπολικούς κινητήρες, οι διπολικοί δεν έχουν κεντρικές ελικοτομές στα τυλίγματα τους, δηλαδή δεν υπάρχει καλώδιο που να ξεκινά από τη μέση ενός τυλιγματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το ρεύμα να περνά μέσα από όλο το τύλιγμα και όχι από το μισό όπως συμβαίνει στους μονοπολικούς κινητήρες και έτσι οι διπολικοί κινητήρες παράγουν περισσότερη ροπή στρέψης από τους μονοπολικούς αντίστοιχου μεγέθους. Αξίζει να τονιστεί ότι οι διπολικοί κινητήρες απαιτούν ένα πολύπλοκο κύκλωμα ελέγχου

5.1.3.2 Διαχωρισμός με βάση τη δομή

Βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη

Ο δρομέας του κινητήρα μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet, PM) αποτελείται από κυλινδρικούς τομείς μόνιμων μαγνητών που προσαρμόζονται στην ίδια άτρακτο. Οι μόνιμοι μαγνήτες έχουν πόλους που τείνουν να ευθυγραμμίζονται με το πεδίο των πόλων του στάτη. Η περιστροφή του ρότορα επιτυγχάνεται με την εναλλαγή του ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη αλλάζοντας έτσι την φορά του

μαγνητικού πεδίου. Ελέγχοντας έτσι την συχνότητα εναλλαγής, είναι δυνατό να ελέγχεται το μαγνητικό πεδίο το οποίο περιστρέφεται στα τυλίγματα του στάτη με αποτέλεσμα ο ρότορας να περιστρέφεται σε συγχρονισμό. Οι κινητήρες PM αλλάζουν φορά περιστροφής εάν αλλάξει η φορά του ρεύματος που διαρρέει τα τυλίγματα του στάτη. Επίσης, λόγω της ύπαρξης των μόνιμων μαγνητών, ο δρομέας έχει διευθύνσεις στις οποίες προτιμά να ευθυγραμμίζεται. Ο δρομέας επαναφέρεται σε μία θέση ισορροπίας μετά από μικρή διαταραχή, εμφανίζει δηλαδή ροπή επαναφοράς ή ροπή συγκράτησης (holding torque) ακόμη και όταν διακοπεί η τροφοδοσία.

Η κατασκευή του κινητήρα δεν επιτρέπει μικρά γωνιακά βήματα, όμως γίνεται πολύ οικονομικά. Οι κινητήρες PM έχουν μικρή ροπή αδράνειας και παράγουν χαμηλή ροπή σε χαμηλές στροφές. Είναι οι πλέον χρησιμοποιούμενοι σε μη βιομηχανικές εφαρμογές, όπως σε μηχανές γραφείου.

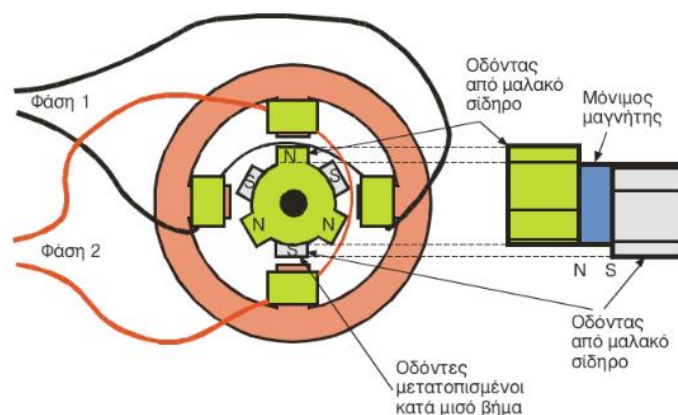
Βηματικοί κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης

Ο δρομέας του κινητήρα μαγνητικής αντίστασης έχει έκτυπους πόλους (οδόντες) των οποίων το πλήθος διαφέρει από τους πόλους του στάτη. Επομένως, πάντα υπάρχουν οδόντες που δεν είναι ευθυγραμμισμένοι με αυτούς του στάτη. Η διέγερση του τυλίγματος του κατάλληλου οδόντα αναγκάζει το δρομέα να περιστραφεί έτσι ώστε κάποιο ζεύγος οδόντων του να ευθυγραμμισθεί με τους πόλους του ενεργοποιημένου τυλίγματος. Με τον τρόπο αυτό ελαχιστοποιείται η μαγνητική αντίσταση στο δρόμο της μαγνητικής ροής.

Εάν διακοπεί η τροφοδοσία του τυλίγματος, δεν υπάρχει παραμένουσα μαγνήτιση και επομένως η ροπή μηδενίζεται και ο κινητήρας δεν μπορεί να συγκρατήσει φορτίο.

Υβριδικοί βηματικοί κινητήρες

Ο υβριδικός (hybrid) βηματικός κινητήρας συνδυάζει τα κύρια χαρακτηριστικά των δύο προηγούμενων τύπων. Ο δρομέας αποτελείται από μόνιμους μαγνήτες σε μορφή κυλίνδρου που είναι επιμήκης κατά την αξονική έννοια. Στα άκρα των μαγνητών, προσαρμόζονται τμήματα με μορφή οδοντωτών τροχών, που λόγω του ενδιάμεσου μαγνήτη μετατρέπονται σε βόρειο και νότιο πόλο.



Εικόνα 5-4 Υβριδικός βηματικός κινητήρας

Ο στάτης έχει έκτυπους πόλους ή οδόντες ενώ τα τυλιγμάτά του είναι συνεχή κατά μήκος του άξονα του κινητήρα. Συνήθως είναι δύο ή πέντε φάσεων. Το πλήθος των οδόντων στο στάτη και το δρομέα μπορεί να είναι το ίδιο ή διαφορετικό, ανάλογα με το αν μας ενδιαφέρει η μείωση των αρμονικών ή η αύξηση της ροπής, αντίστοιχα. Επειδή ο δρομέας είναι μόνιμος μαγνήτης, υπάρχει πάντα κάποια ροπή συγκράτησης.

Έχουν εξαιρετική δυναμική ροπή, και πολύ μικρό βήμα γωνίας, από 0.90 ως 50 , γεγονός που τους προσδίδει υψηλή ακρίβεια. Τα μηχανικά τους μέρη τους μπορεί να περιστρέφονται σε υψηλές ταχύτητες σε σχέση με τους άλλους τύπους βηματικών κινητήρων. Για τους παραπάνω λόγους, χρησιμοποιούνται σε μηχανές CNC και ρομπότ. Το κύριο μειονέκτημα είναι το υψηλό κόστος.

5.1.4 Μέθοδοι βηματισμού (Step modes)

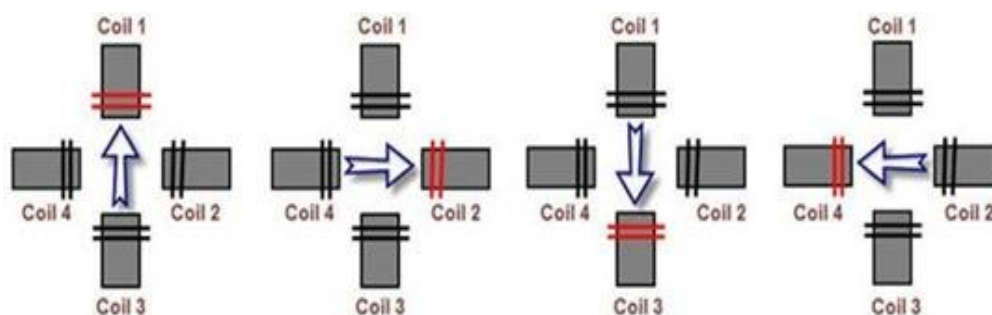
Για την επίτευξη του επιθυμητού βήματος, ανεξάρτητα από τις συνδεσμολογίες των τυλιγμάτων παίζει ρόλο η σειρά και η ταχύτητα ενεργοποίησής τους. [23]

Μονό βήμα - διέγερση μίας σπείρας (Single Step – Single Coil Excitation)

Αυτός είναι ο πιο απλός τρόπος βηματισμού ενός κινητήρα. Σε αυτή την περίπτωση ενεργοποιείται ένας ηλεκτρομαγνήτης κάθε φορά. Παρακάτω φαίνεται η ακολουθία παλμών για τη μέθοδο μονού βήματος:

Παλμός	Πηνίο 1	Πηνίο 2	Πηνίο 3	Πηνίο 4
1	1	0	0	0
2	0	1	0	0
3	0	0	1	0
4	0	0	0	1

Πίνακας 5-1 Single step



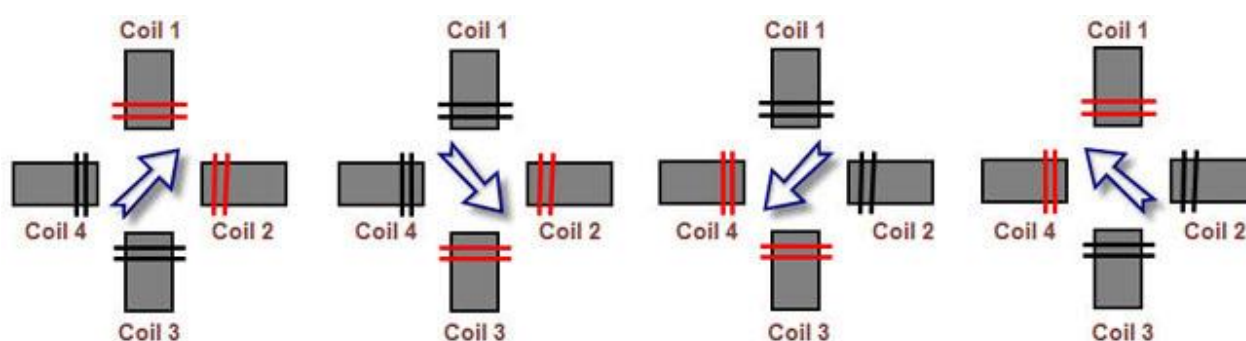
Εικόνα 5-5 Single Step

Βηματισμός για υψηλή ροπή (High Torque Step – Two Coil Excitation)

Όπως μαρτυρά και η επικεφαλίδα, με αυτόν τον τρόπο πετυχαίνουμε μεγάλες τιμές ροπής στην περιστροφή του ρότορα. Σε αυτή την περίπτωση ενεργοποιούνται δύο ηλεκτρομαγνήτες συγχρόνως κάθε φορά. Παρακάτω φαίνεται η ακολουθία παλμών για βηματισμό υψηλής ροπής:

Παλμός	Πηνίο 1	Πηνίο 2	Πηνίο 3	Πηνίο 4
1	1	1	0	0
2	0	1	1	0
3	0	0	1	1
4	1	0	0	1

Πίνακας 5-2 High Torque Step



Εικόνα 5-6 High Torque Step

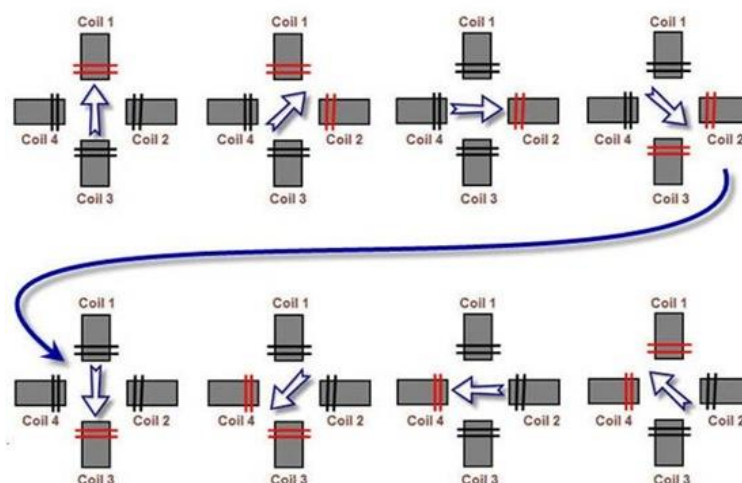
Μισό βήμα (Half step)

Η διαφορά μεταξύ μονού και μισού βήματος είναι ότι για το ίδιο γωνιακό βήμα, η μέθοδος του μισού βήματος δίνει μεγαλύτερη ακρίβεια κίνησης αφού ο ρότορας κινείται μισό βήμα τη φορά. Ωστόσο αυτό επιτυγχάνεται με τη μισή ταχύτητα περιστροφής.

Παρακάτω φαίνεται πως δουλεύει ο βηματισμός μισού βήματος:

Παλμός	Πηνίο 1	Πηνίο 2	Πηνίο 3	Πηνίο 4
1	1	0	0	0
2	1	1	0	0
3	0	1	0	0
4	0	1	1	0
5	0	0	1	0
6	0	0	1	1
7	0	0	0	1
8	1	0	0	1

Πίνακας 5-3 Half step



Εικόνα 5-7 Half step

Μικροβηματισμός (Microstep)

Ο μικροβηματισμός είναι σχετικά μία νέα τεχνολογία στην οδήγηση βηματικών κινητήρων. Ελέγχοντας με ηλεκτρονικό τρόπο τα ρεύματα των τυλιγμάτων του στάτη δίνοντας παλμούς μέσω ενός μικροεπεξεργαστή, επιτυγχάνουμε υποπολλαπλάσια του βήματος.

5.1.5 Εφαρμογή

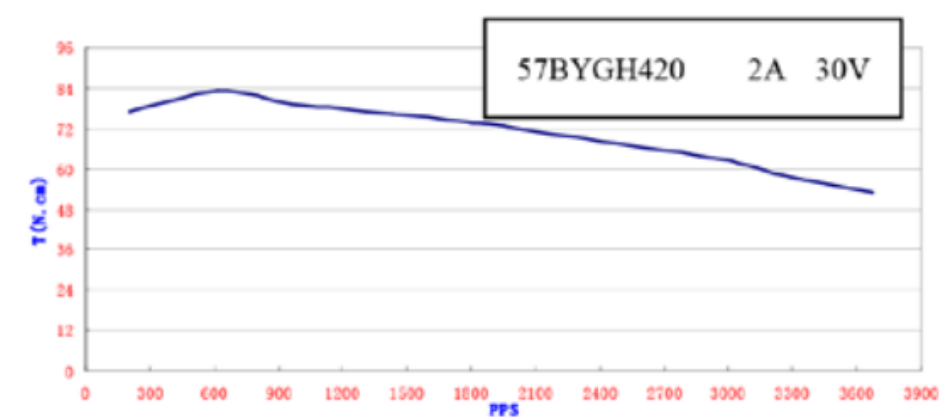
Ο κινητήρας που επιλέχθηκε είναι μονοπολικός, υβριδικός, με γωνία βήματος 1.8° . Πιο συγκεκριμένα ο κινητήρας που χρησιμοποιήθηκε για την περιστροφή του καλουπιού είναι ο Nema 23 57BYGH420 ο οποίος παράγει 9 kg.cm ροπής στα 2A . Τα ακριβή ηλεκτρικά και φυσικά χαρακτηριστικά του κινητήρα παρουσιάζονται παρακάτω:

- 4-Phase
- Steps per Revolution: 200
- Step Angle: 1.8°
- Voltage: 3.0V
- Current: 2.0A/Phase
- Resistance: $1.5 \pm 10\% \Omega$ /Phase
- Inductance: $2.5 \pm 20\% \text{ mH}$ /Phase
- Recommended Holding Torque: 125 oz.in- 90 N.cm
- NEMA 23 Form Factor
- 600mm Long AWG22 Wire

- Drive Shaft Diameter: 1/4" (6.35mm)



Εικόνα 5-8 Nema 23 57BYGH420



Εικόνα 5-9 Διάγραμμα ροπής στροφών

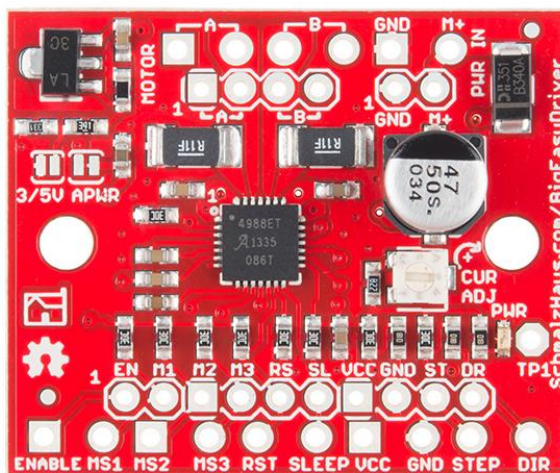
5.2 Ελεγκτής “Big Easy Driver”

Για την οδήγηση του βηματικού κινητήρα χρησιμοποιήθηκε η ηλεκτρονική πλακέτα “Big Easy Driver” η οποία σχεδιάστηκε από τον Brian Schmalz, και βασίζεται στον ολοκληρωμένο κύκλωμα A4988.

Ο A4988 driver χρησιμοποιείται για την οδήγηση διπολικών βηματικών κινητήρων αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την οδήγηση μονοπολικών κινητήρων, όπως έγινε και στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής. Ο συγκεκριμένος οδηγός μπορεί να παρέχει ως και 2A/ φάση (για την λειτουργία με εντάσεις ρεύματος 1.4-1.7 A/φάση δεν απαιτείτε η χρήση ενεργής ψύξης ενώ η χρήση ψήκτρας είναι απαραίτητη για φορτία που προσεγγίζουν τα 2A/φάση). Είναι οδηγός που εφαρμόζει οδήγηση κατατμητού (chopper drive), δηλαδή χρησιμοποιεί διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM) για να ελέγξει το μέσο ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματα του στάτη. Επιπλέον, έχει πέντε διαφορετικές διαβαθμίσεις microstepping (πλήρους βήματος, 1/2, 1/4, 1/8 και 1/16 της γωνίας βήματος). Η προκαθορισμένη τιμή είναι μικροβηματισμός 1/16.

Ο ελεγκτής λειτουργεί με τάση εισόδου από 8V έως 30V και στην πλακέτα υπάρχει ενσωματωμένος ρυθμιστής τάσης 5V/3.3V με συνέπεια να χρειάζεται μία πηγή ρεύματος για την τροφοδοσία τόσο του ελεγκτή όσο και του κινητήρα. Πολύ σημαντικό είναι το γεγονός ότι μπορούμε να αυξομειώσουμε την ένταση του ρεύματος με ένα ποτενσιόμετρο, το οποίο μας επιτρέπει να χρησιμοποιούμε τάσεις πάνω από την ονομαστική τάση του βηματικού κινητήρα, έτσι ώστε να επιτύχουμε υψηλότερο ρυθμό βήματος.

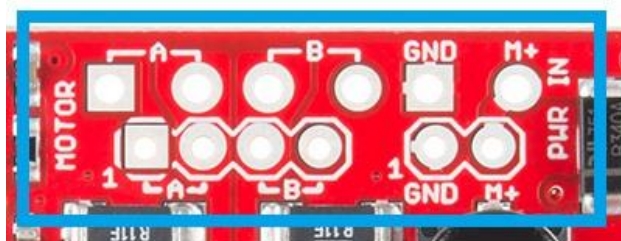
5.2.1 Pins οδηγού (driver)



Εικόνα 5-10 Big Easy Driver

Στη συνέχεια αναλύονται τα pins του driver και αναλύονται οι λειτουργίες που αυτές επιτελούν.

Στην πάνω πλευρά της πλακέτας:



Εικόνα 5-11 Ράνω πλευρά της πλακέτας

- A και B (τέσσερα pins): Συνδέσεις του κινητήρα. Το A αντιστοιχεί στη μία φάση του κινητήρα και το B στην άλλη. Ο τρόπος σύνδεσης θα παρουσιαστεί αναλυτικότερα στην συνέχεια.
- GND: Σύνδεση με τη γείωση της τροφοδοσίας
- M+: Σύνδεση με την τροφοδοσία και αφορά την τάση η οποία εφαρμόζεται στον κινητήρες. Στην εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε τάση 12V που είναι και η συνιστώμενη τάση λειτουργίας του κινητήρα.

Στην κάτω πλευρά της πλακέτας:



Εικόνα 5-12 κάτω πλευρά της πλακέτας

- **ENABLE:** Αυτή η είσοδος ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί όλες τις εξόδους των FET. Όταν τίθεται σε λογικό HIGH, οι εξόδοι είναι απενεργοποιημένες και ο κινητήρας δεν μπορεί να κινηθεί. Όταν τεθεί σε λογικό LOW, ενεργοποιείται το ολοκληρωμένο κύκλωμα και είναι δυνατός ο έλεγχος του κινητήρα. Η προκαθορισμένη τιμή είναι LOW, δηλαδή είναι δυνατή η χρήση του οδηγού χωρίς να έχει συνδεθεί το συγκεκριμένο pin.
- **MS1, MS2, MS3:** Τα pins αυτά χρησιμοποιούνται για microstepping. Ανάλογα με το αν είναι HIGH ή LOW επιλέγουμε και το επίπεδο microstepping. Οι συνδέσεις αυτές έχουν εσωτερικές pull-up αντιστάσεις 20 kOhms. Έτσι, αφήνοντας αυτά τα pins επιλογής microstepping χωρίς σύνδεση, οδηγούμαστε σε κατάσταση microstepping 1/16. Στον παρακάτω πίνακα αληθείας αναφέρονται οι συνδυασμοί για διαφορετικά επίπεδα microstepping:

Microstep Select Resolution Truth Table				
MS1	MS2	MS3	Microstep Resolution	Excitation Mode
L	L	L	Full Step	2 Phase
H	L	L	Half Step	1-2 Phase
L	H	L	Quarter Step	W1-2 Phase
H	H	L	Eighth Step	2W1-2 Phase
H	H	H	Sixteenth Step	4W1-2 Phase

Πίνακας 5-4 Επιλογή Microstepping

- **RST:** Λογική είσοδος. Στην περίπτωση που η είσοδος αυτή έχει τεθεί σε λογικό LOW, όλες οι εντολές STEP αγνοούνται. Επιπλέον ο οδηγός επιστρέφει στην αρχική κατάσταση, δηλαδή οι τιμές επιστρέφουν στις προκαθορισμένες. Για να λειτουργήσει ο ελεγκτής πρέπει να τεθεί σε λογικό HIGH.
- **SLEEP:** Για να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας όταν ο κινητήρας δεν είναι σε χρήση, αυτή η είσοδος απενεργοποιεί ένα μεγάλο μέρος των εσωτερικών κυκλωμάτων συμπεριλαμβανομένων και των FET εξόδου. Ένα λογικό LOW στο SLEEP pin βάζει το A4988 σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας. Ένα λογικό HIGH επιτρέπει την κανονική λειτουργία, καθώς και εκκίνηση.
- **Vcc:** Έξοδος που παρέχει τάση σε εξωτερική πλακέτα. Η τάση αυτή μπορεί να είναι είτε 3V είτε 5V.

- GND: γείωση.
- DIR: Στο pin DIR συνδέουμε μια έξοδο του Arduino καθορίζοντας με τον τρόπο αυτό τη σειρά εναλλαγής εφαρμογής τάσης στις φάσεις των κινητήρων, μεταβάλλοντας έτσι τη φορά περιστροφής τους.
- STEP: Κάθε παλμός στην είσοδο STEP αντιστοιχεί σε ένα βήμα του βηματικού κινητήρα κατά την κατεύθυνση που επιλέγεται από το pin DIR. Ο παλμός αυτός δίνεται μέσω του μικροελεγκτή. Σημειώνεται ότι τα pins STEP και DIR δε συνδέονται με κάποια τάση στο εσωτερικό, έτσι δε θα πρέπει να είναι ασύνδετα, καθώς μπορεί να οδηγηθούν σε “floating”, δηλαδή σε μια κατάσταση η οποία είναι ασταθής και μπορεί να οδηγήσει σε απρόβλεπτες μεταβολές της κατάστασής τους π.χ. λόγω παρεμβολών ή θορύβου. [25]

5.2.2 Τροφοδοσία

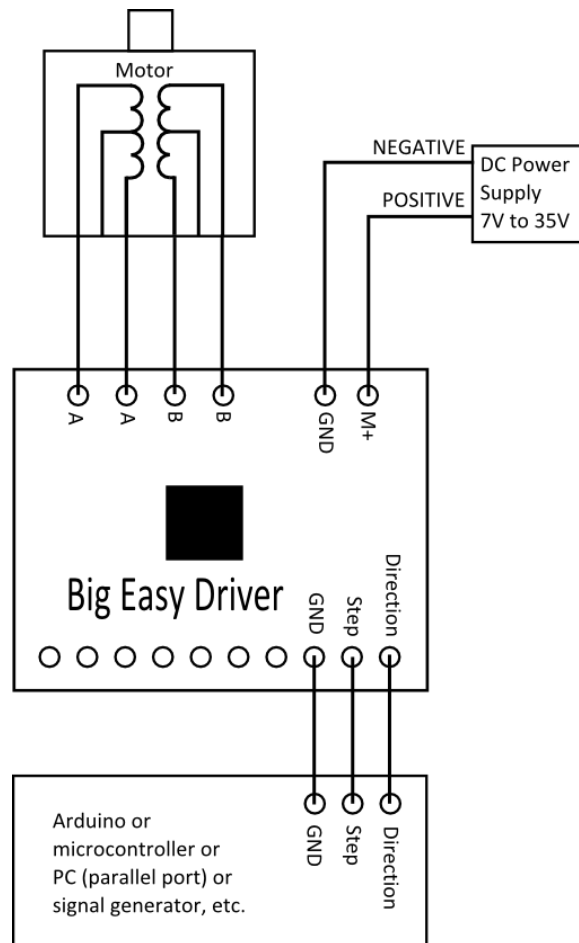
Για την ομαλή λειτουργία του κινητήρα είναι σημαντική η σωστή επιλογή της τάσης λειτουργίας του και η ένταση του ρεύματος να μην ξεπερνάει την μέγιστη τιμή που έχει δοθεί από τον κατασκευαστή. Για παράδειγμα, ένας τυπικός βηματικός κινητήρας με αντίσταση πηνίου 5Ω στη συχνότητα διέγερσης, μπορεί να διαρρέεται από ένα μέγιστο ρεύμα 1 A , το οποίο υποδεικνύει μέγιστη τάση στον κινητήρα τα 5V . Για την επίτευξη υψηλού ρυθμού βήματος, η παροχή τάσης στον κινητήρα πρέπει να είναι υψηλότερη από αυτή που θα ήταν επιτρεπτή χωρίς κάποιο περιορισμό ρεύματος. Εφαρμόζοντας στον κινητήρα αυτό υψηλότερη τάση (π.χ. 12 V) με σκοπό να επιτευχθεί υψηλότερος ρυθμός βήματος, πρέπει να υπάρχει κάποιος περιορισμός ρεύματος κάτω από 1A για να μην καταστραφεί ο κινητήρας.

Η πλακέτα που χρησιμοποιήθηκε υποστηρίζει τον εν λόγω ενεργό περιορισμό. Για να τεθεί το νέο όριο ρεύματος αρκεί να χρησιμοποιηθεί το ποτενσιόμετρο το οποίο βρίσκεται πάνω στην πλακέτα. Για τον εύρεση της ζητούμενης έντασης ρεύματος στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί διαφορετική τάση, το ποτενσιόμετρο τοποθετείται στην χαμηλότερη τιμή. Στη συνέχεια, καθώς ο κινητήρας κινείται με μια μικρή και σταθερή ταχύτητα, η τιμή της αντίστασης στο ποτενσιόμετρο αυξάνεται μέχρις ότου παρατηρηθούν ταλαντώσεις και αστάθειες στην κίνηση του κινητήρα.

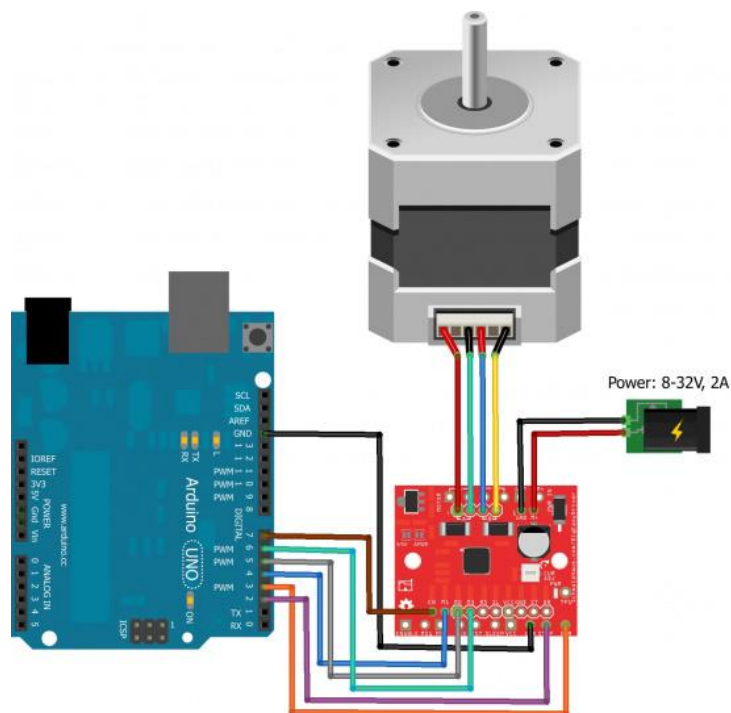
Στην εργασία χρησιμοποιήθηκε τροφοδοτικό με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Power: 24Watt
- Output Voltage: 12VDC
- Output Current: 2Amp
- Supply Voltage: $100\text{...}240\text{V AC}$
- Efficiency: 78%
- Output connector: Jack 5.5×2.1

5.2.3 Συνδεσμολογία [25]



Εικόνα 5-13 Διάγραμμα συνδεσμολογίας

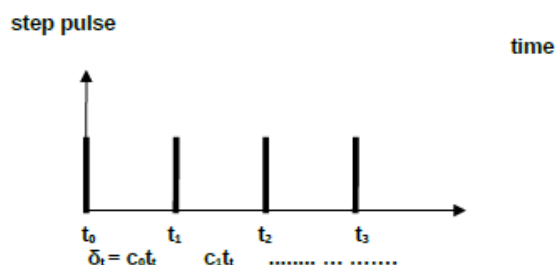


Made with Fritzing.org

Εικόνα 5-14 Σύνδεση ελεγκτή-arduino-κινητήρα

5.3 Κώδικας Arduino

Με βάση την αρχή λειτουργίας των βηματικών κινητήρων, για την περιστροφή του κινητήρα θα πρέπει να εφαρμοστεί μια παλμοσειρά στην είσοδο της μονάδας που παράγει τα σήματα ελέγχου των φάσεων με κάθε παλμό να αντιστοιχεί σε κίνηση του άξονα για ένα βήμα. Εάν η παλμοσειρά έχει σταθερή συχνότητα ο κινητήρας περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα.



Εικόνα 5-15 Δομή παλμοσειράς

Για την δημιουργία της παλμοσειράς αυτής υπάρχουν έτοιμες βιβλιοθήκες, όπως για παράδειγμα είναι η “AccelStepper”, η οποίες μέσω μιας εντολής μπορούν να κινήσουν ένα κινητήρα καθορίζοντας μόνο τον αριθμό των steps ανά δευτερόλεπτο. Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής δεν χρησιμοποιήθηκε κάποια έτοιμη βιβλιοθήκη αλλά προτιμήθηκε να δημιουργηθεί α απαραίτητος κώδικας από την αρχή για καλύτερο έλεγχο του συστήματος.

Για τον υπολογισμό του χρόνου μεταξύ των παλμών που στέλνονται στον οδηγό, ακολουθήθηκε εξής διαδικασία:

- Ορισμός των steps που απαιτούνται για μία πλήρη περιστροφή με full steps.
- Ορισμός του μικροβηματισμού στην περίπτωση που αυτός χρησιμοποιείται (1 στην περίπτωση full step , 2 για μικροβηματισμό 1/2 , 4 για μικροβηματισμό 1/4 κ.ο.κ.)
- Υπολογισμός εκ νέου των steps που απαιτούνται για μία πλήρη περιστροφή με την χρήση του κατάλληλου συντελεστή ανάλογα με την χρήση ή όχι μικροβηματισμού.
- Υπολογισμός των αριθμών των steps που απαιτούνται ανά δευτερόλεπτο για την επίτευξη των ζητούμενων αριθμών στροφών ανά λεπτό (rpm):

$$\text{Steps_per_second} = \text{rpm} * \text{steps_revolution} / 60$$

- Χρόνος μεταξύ παλμών:

$$1000000/\text{Steps_per_second}$$

σε microseconds

Τα pins του arduino που χρησιμοποιήσαμε για τον έναν κινητήρα είναι τα A0, A1 ως αναλογικές εισόδους και τα pins 7, 8 και 9 σαν ψηφιακές εξόδους. [26]


```

#define RPMS                60.0
#define STEP_PIN            9
#define DIRECTION_PIN      8

#define STEPS_PER_REV       200
#define MICROSTEPS_PER_STEP 8
#define MICROSECONDS_PER_MICROSTEP (1000000/(STEPS_PER_REV *
MICROSTEPS_PER_STEP)/(RPMS / 60))
uint32_t LastStepTime = 0;
uint32_t CurrentTime = 0;
void setup() {
  pinMode(STEP_PIN, OUTPUT);
  pinMode(DIRECTION_PIN, OUTPUT);
  digitalWrite(STEP_PIN, LOW);
  digitalWrite(DIRECTION_PIN, LOW);
  pinMode(GO_PIN, INPUT);
}
void loop() {
  CurrentTime = micros();
  if ((CurrentTime - LastStepTime) > MICROSECONDS_PER_MICROSTEP)
  {
    LastStepTime = CurrentTime;
    digitalWrite(STEP_PIN, HIGH);
    delayMicroseconds(MICROSECONDS_PER_MICROSTEP /2);
    digitalWrite(STEP_PIN, LOW);
    delayMicroseconds(MICROSECONDS_PER_MICROSTEP /2);
  }
}

```

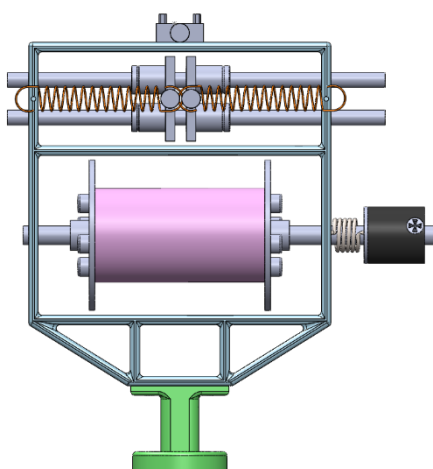
Παρατηρήσεις

- 1) Για την εύκολη αλλαγή της ταχύτητας του ζητείται σε κάθε περίπτωση, αυτή ορίζεται στην αρχή κάθε προγράμματος με την εντολή #define. Η εντολή αυτή δίνει την δυνατότητα στον προγραμματιστή να δώσει ένα όνομα σε μια σταθερή τιμή, πριν το πρόγραμμα μεταγλωττιστεί. Ο compiler θα αντικαταστήσει τις παραπομπές σε αυτές τις σταθερές με την καθορισμένη τιμή κατά τη μεταγλώττιση.
- 2) Ο ορισμός των pin που χρησιμοποιούνται για την σύνδεση του οδηγού με τον μικροελεγκτή γίνεται και αυτός στην αρχή του προγράμματος με την εντολή #define που αναλύθηκε προηγουμένως.
- 3) Ο υπολογισμός του χρόνου μεταξύ των παλμών γίνεται με τον τρόπο που παρουσιάστηκε προηγουμένως.
- 4) Ορίζουμε δύο μεταβλητές στις οποίες αποθηκεύουμε τον τρέχοντα χρόνο με την χρήση της εντολής micros() και την χρονική στιγμή κατά την οποία στάλθηκε ένας παλμός. Η αποθήκευση γίνεται σε ειδικού τύπου μεταβλητή(uint32_t). Μέσω του κώδικα ελέγχεται αν η διαφορά μεταξύ του τρέχοντα χρόνου και του χρόνου κατά τον οποίο στάλθηκε ο τελευταίος παλμός είναι μικρότερος από τον χρόνο που χρειάζεται για την επίτευξη της ζητούμενης ταχύτητας. Στην περίπτωση που είναι μεγαλύτερος εκτελείται το κυρίως μέρος του κώδικα. Σε αυτό θέτουμε την είσοδο STEP του οδηγού ON και OFF.

6

Κεφαλή τύλιξης ινών

Στα πλαίσια προηγούμενης διπλωματικής εργασίας[12], κατασκευάστηκε στο εργαστήριο Κατεργασίας των Υλικών μια κεφαλή για την περιέλιξη ινών καθώς διαπιστώθηκε ότι στα μοντέλα που κυκλοφορούν δεν υπάρχει καμία κεφαλή η οποία να διευκολύνει μικρά εργαστήρια τα οποία έχουν ανάγκη την κατασκευή μικρών κομματιών, με ένα πολύ φθηνό σύστημα διατήρησης της τάσης του νήματος, σε περιπτώσεις που υπάρχει για κάποιο λόγο αλλαγή πορείας του ρομπότ, με αποτέλεσμα τη χαλάρωση του νήματος.



Εικόνα 6-1 Κεφαλή περιέλιξης ινών

Η κεφαλή κατασκευάστηκε πληροί μια σειρά από χαρακτηριστικά που είχαν τεθεί κατά την διάρκεια του σχεδιασμού της. Αυτά είναι:

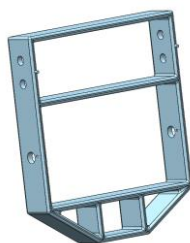
- Αυτόνομη κεφαλή (αλλά όχι πλήρη περιστροφή 360 μοιρών).
- Ικανότητα στήριξης ανέμης με νήμα από σύνθετα υλικά.
- Εύκολα αποσπώμενη ανέμη για άμεση αντικατάσταση νέου νήματος.
- Μέγιστο βάρος κεφαλής μαζί με το νήμα $\leq 5\text{Kg}$.

- Μικρός όγκος μηχανήματος για μεγαλύτερη ευελιξία γύρω από το καλούπι.
- Χαμηλό κόστος.
- Δε χρειάζεται ανθρώπινη παρέμβαση κατά τη διάρκεια της διαδικασίας περιέλιξης.
- Μηχανικό σύστημα για τη διατήρηση τάσης, ανάλογα με τις ανάγκες του τελικού προϊόντος.

Τα περισσότερα εξαρτήματα της κεφαλής κατασκευάστηκαν από πλαστικό PLA με την μέθοδο της τρισδιάστατης εκτύπωσης (3D printing) και όχι με κάποια εργαλειομηχανή για μεγαλύτερη ευκολία, αυτονομία και ταχύτητα, ενώ για τα εξαρτήματα που θα υπόκειντο σε μεγαλύτερες τάσεις επιλέχθηκε να κατασκευαστούν από αλουμίνιο.

6.1 Βασικός σκελετός

Ο βασικός σκελετός της κεφαλής ειδικότερα κατασκευάστηκε από PLA και ενισχύθηκε εξωτερικά με αλουμίνιο.

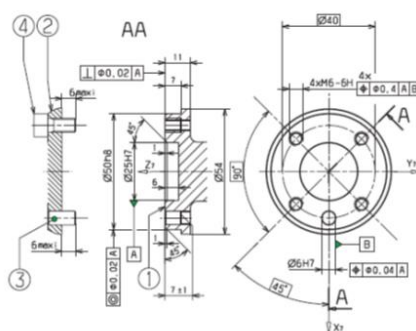


Εικόνα 6-2 Βασικός σκελετός

Ο σκελετός αυτός συνδέθηκε με το τελικό σημείο δράσης του ρομπότ με ένα τεμάχιο συγκράτησης το οποίο κατασκευάστηκε με την χρήση τρισδιάστατου εκτυπωτή. Οι διαστάσεις του προέκυψαν από το μηχανολογικό σχέδιο του άκρου σύνδεσης του ρομπότ(Εικόνα 6-4).



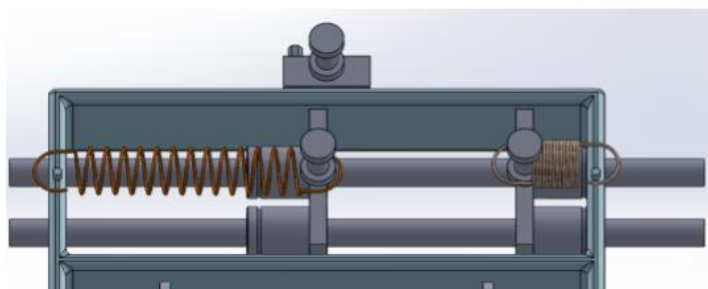
Εικόνα 6-3 Τεμάχιο ένωσης κεφαλής-ρομπότ



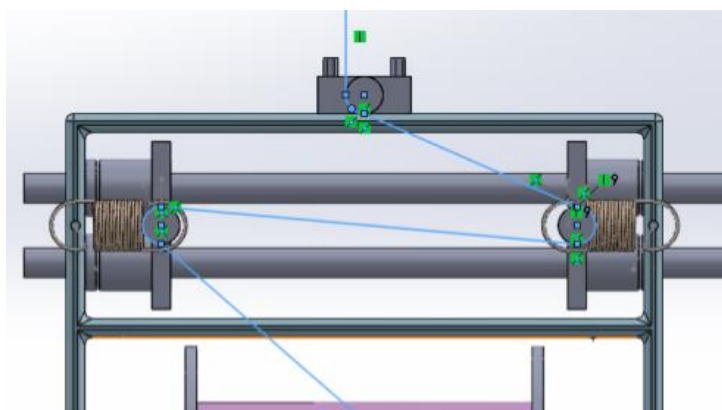
Εικόνα 6-4 Μηχανολογικό σχέδιο άκρου ρομπότ

6.2 Σύστημα ελατηρίων

Το σύστημα έχει ως σκοπό να κρατά το νήμα υπό τάση στην περίπτωση που αλλάξει ο προσανατολισμός. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6-5, τα γραμμικά ρουλεμάν έχουν τοποθετηθεί στους οδηγούς και συγκρατούνται με τα ελατήρια, σταθεράς K . Τα δύο ελατήρια στη θέση ισορροπίας του συστήματος βρίσκονται τεντωμένα και η τάση που ασκεί το ελατήριο είναι ίση με αυτή του νήματος στο τελικό σημείο. Θέση ισορροπίας του συστήματος ορίζεται όταν το νήμα ξετυλίγεται υπό τη σταθερή επιθυμητή τάση, χωρίς να χρειαστεί να ενεργήσουν οι τροχαλίες με τα ελατήρια. Μόλις το νήμα χαλαρώσει τα δύο ελατήρια τραβιούνται πίσω στη φυσική θέση ισορροπίας ελατηρίου, με αποτέλεσμα το νήμα μην είναι χαλαρό πια και να γίνεται αποκατάσταση της επιθυμητής τάσης.



Εικόνα 6-5 Ελατήριο έλξεως σε μέγιστη θέση (αριστερά) και σε θέση ισορροπίας (δεξιά).

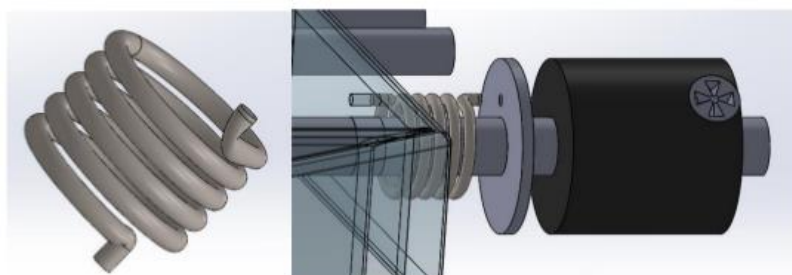


Εικόνα 6-6 Φυσική θέση ισορροπίας

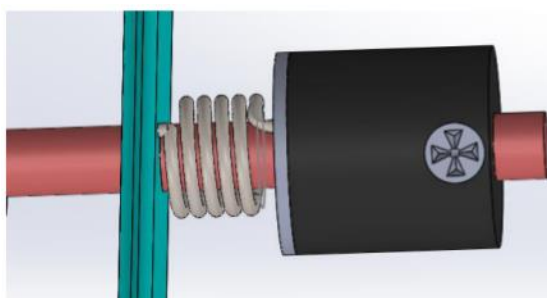
6.3 Σύστημα αντίστασης

Το σύστημα αντίστασης της ανέμης αποτελείται από δύο επιφάνειες τριβής οι οποίες αποτελούνται από ένα μεταλλικό δίσκο και ένα πλαστικό κύλινδρο. Οι επιφάνειες έχουν κατεργαστεί ώστε να υπάρχει αυξημένη τραχύτητα μεταξύ τους. Το ένα άκρο του ελατηρίου ενσωματώνεται στο μεταλλικό δίσκο και το άλλο στο σκελετό της κεφαλής, έτσι ώστε ο δίσκος αυτός να είναι σταθερός (Σχήμα). Το ελατήριο ασκεί συνεχή πίεση στο μεταλλικό δίσκο, ο οποίος εφάπτεται με τον πλαστικό δίσκο που είναι στερεωμένος στον άξονα της ανέμης, με αποτέλεσμα την ελεγχόμενη περιστροφή του. Αυξάνοντας

μειώνοντας την ακτίνα των δύο επιφανειών τριβής η ροπή μεγαλώνει και μικραίνει αντίστοιχα δημιουργώντας ένα ελεγχόμενο σύστημα. Στην παρούσα εργασία η έξοδος του νήματος έχει τάση 30 N.



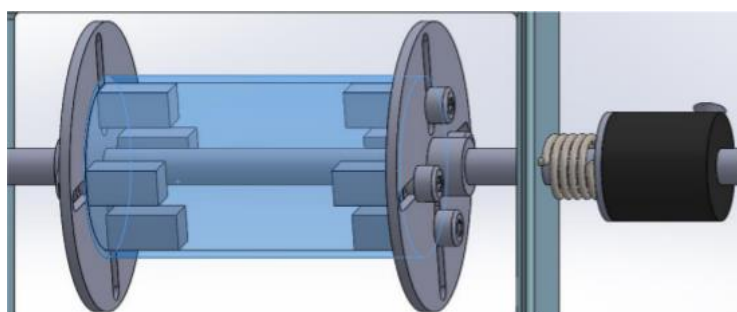
Εικόνα 6-7 Ελατήριο πίεσης, αλουμινένιος δίσκος και πλαστικός κύλινδρος



Εικόνα 6-8 Τελικό σύστημα τάσης

6.4 Στήριξη ανέμης

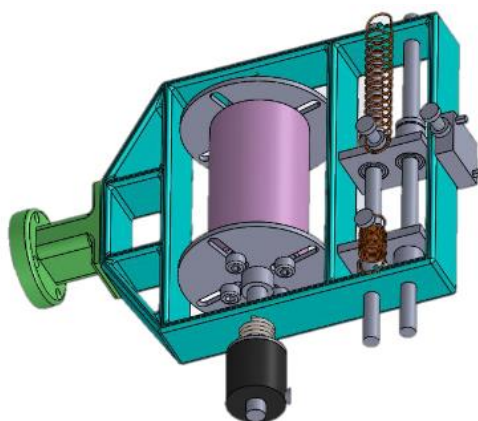
Ο τρόπος με τον οποίο θα στηριχθεί η ανέμη εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η προμήθεια του νήματος. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος είναι η αποθήκευση γύρω από ένα κυλινδρικό χαρτόνι ενώ οι πιο δημοφιλείς διάμετροι είναι μεταξύ 50 και 75 χιλιοστά. Για την στήριξη του κυλίνδρου χρησιμοποιήθηκαν δύο δίσκοι και τέσσερα εσωτερικά στηρίγματα που εφάπτονται εσωτερικά στη διάμετρο της ανέμης. Ο δίσκος διαμορφώθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να προσαρμόζονται διαφορετικών



Εικόνα 6-9 Στήριγμα ανέμης

διαμέτρων μπομπίνες με ακραίες τιμές αυτές που αναφέρθηκαν στην συνέχεια. Επίσης ρυθμίζεται η απόσταση μεταξύ των δύο δίσκων για διαφορετικά μήκη.

6.5 Συνολική διάταξη



Εικόνα 6-10 Συνολική διάταξη της κεφαλής.



Εικόνα 6-11 Τελική κατασκευή

7

Βάση στήριξης καλουπιού

7.1 Βάση στήριξης

Για την ομαλή εκτέλεση της διαδικασίας περιέλιξης ινών με βάση την κεφαλή που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής, είναι απαραίτητη η κατασκευή μιας βάσης πάνω στην οποία θα τοποθετηθεί το καλούπι και τα αναγκαία στοιχεία με τα οποία θα επιτυγχάνεται η περιστροφή του. Η σχεδίαση πραγματοποιήθηκε με βασικό κριτήριο την ελαχιστοποίηση του κόστους και για την επίτευξη του στόχου αυτή έγινε χρήση τόσο των εργαλείων και μηχανημάτων που διαθέτει η σχολή αλλά και υλικών είτε αυτά είναι δοκοί είτε κινητήρες και ελεγκτές. Τα διαθέσιμα αναλώσιμα του εργαστηρίου όρισαν ορισμένες διαστάσεις της βάσης αλλά και του καλουπιού όπως θα αναλυθεί και στην συνέχεια.

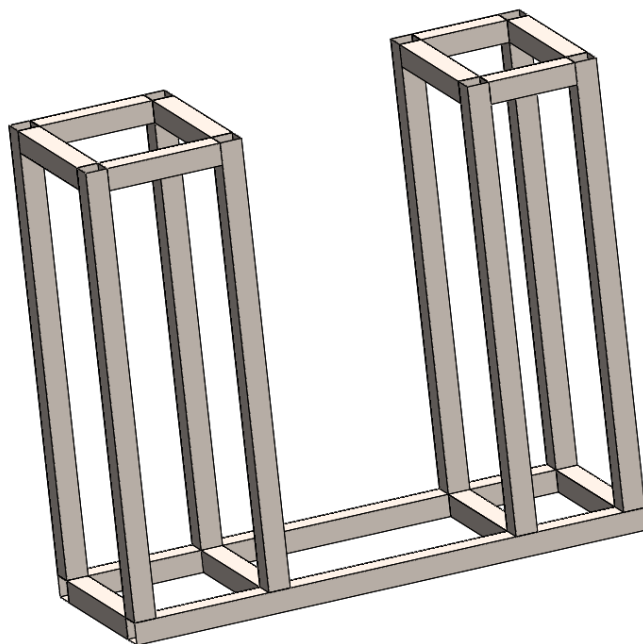
Οι τεχνικές προδιαγραφές τις οποίες θα έπρεπε να καλύπτει η κατασκευή είναι:

- Δομή τέτοια που να μην εμποδίζει την κίνηση της κεφαλής.
- Επαρκές ύψος ώστε το καλούπι να βρίσκεται μέσα στον χώρο εργασίας του ρομπότ δεδομένου ότι αυτό έχει τοποθετηθεί σε βάση στον χώρο του εργαστηρίου.
- Δυνατότητα περιέλιξης καλουπιών με μήκος τουλάχιστον 400 mm. (Η διάμετρος θα προσδιοριστεί στην συνέχεια καθώς εξαρτάται από την ροπή που παρέχει ο κινητήρας).
- Επαρκής χώρος για την τοποθέτηση του κινητήρα και των απαραίτητων στοιχείων για την λειτουργία του (ελεγκτή και τροφοδοσία) καθώς και του μηχανισμού μετάδοσης κίνησης από τον κινητήρα στο καλούπι.

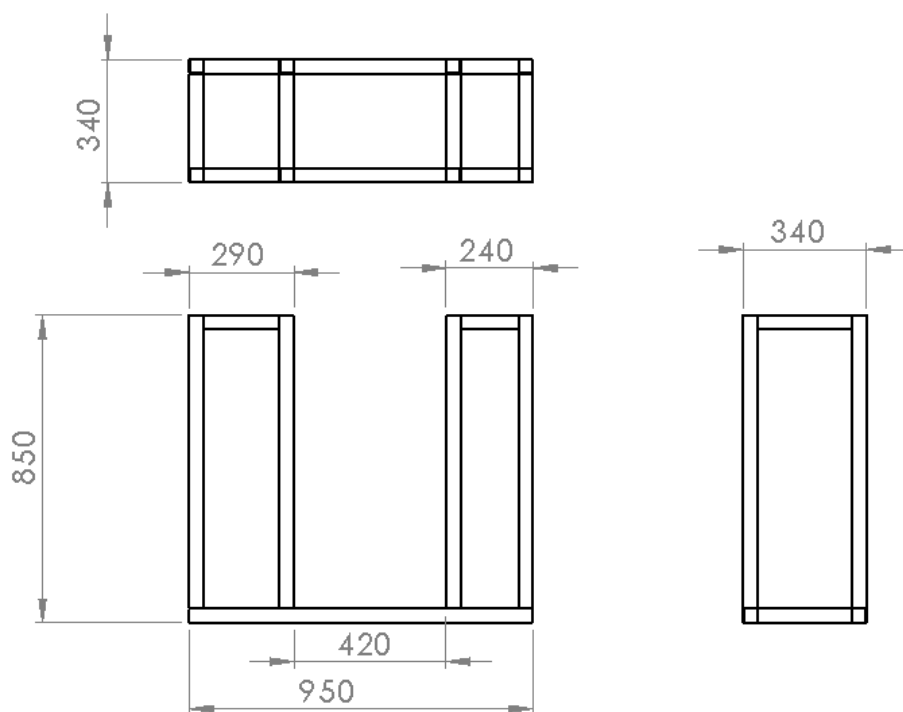
Η πρώτη απόφαση για την κατασκευή που έπρεπε να ληφθεί ήταν εάν θα χρησιμοποιούταν ένα τραπέζι πάνω στο οποίο θα στερεωνόταν η βάση ή όχι. Τελικά επιλέχθηκε να είναι αυτόνομη καθώς με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ευελιξία.

Με βάση τις προδιαγραφές που έχουν παρουσιαστεί παραπάνω έπρεπε στη περιοχή που θα περιστρέφεται το καλούπι να μην υπάρχει κάποιο στοιχείο της κατασκευής της βάσης που θα εμπόδιζε

την κίνηση της κεφαλής κατά την κίνησή της. Για το λόγο αυτό σχεδιάστηκε η παρακάτω μορφή για την βάση:



Εικόνα 7-1 Σχέδιο βάσης στήριξης καλούπιού



Εικόνα 7-2 Μηχανολογικό σχέδιο βάσης

Αναλυτικότερα, το ύψος ορίστηκε στα 850 mm ώστε το καλούπι να βρίσκεται στο χώρο εργασίας του ρομπότ. Το συνολικό μήκος της βάσης, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα καθορίστηκε στα

950mm. Από το μήκος αυτό, ο χώρος το οποίο μπορεί να καταλάβει το καλούπι είναι 420mm. Αριστερά και δεξιά από το ωφέλιμο χώρο υπάρχουν οι θέσεις για την στήριξη του καλουπιού, δηλαδή οι θέσεις για τα ρουλεμάν και τις βάσεις τους, καθώς και χώρος για τον κινητήρα τα απαραίτητα ηλεκτρονικά εξαρτήματα για την κίνηση του. Ο ελεγκτής μαζί με τον Arduino και τον κινητήρα θα τοποθετηθούν από την μία μεριά της βάσης για αυτό κρίθηκε σκόπιμο η μία πλευρά να έχει μεγαλύτερες διαστάσεις από την άλλη για την ευκολότερη τοποθέτησή τους. Αναλυτικότερα, η μία πλευρά έχει διαστάσεις 290mmx340mm και η άλλη 240mmx340mm.

Η κατασκευή της βάσης έγινε με την χρήση δοκών χάλυβα τετραγωνικής διατομής 40mmx40mm και πάχους 1mm οι οποίοι συγκολλήθηκαν στις εγκαταστάσεις του εργαστηρίου.

Με την ολοκλήρωση της κατασκευής, η βάση βάφτηκε και στο σημεία που θα τοποθετηθούν τα διάφορα εξαρτήματα τοποθετήθηκαν ελάσματα αλουμινίου.

Η διαστασιολόγηση έγινε με βάση το κυλινδρικό καλούπι. Υπενθυμίζεται ότι η δύναμη έλξης των ελατηρίων στο πάνω μέρος της κεφαλής έχει οριστεί οριακά μικρότερη από τη δύναμη του νήματος που οφείλεται στο συμπλέκτη τριβής. Με την παραπάνω συνθήκη εξασφαλίζεται ότι οι κινούμενες τροχαλίες δεν θα ξετυλίξουν ποτέ το νήμα από την ανέμη και θα είναι μόνο ο κινητήρας του καλουπιού ο οποίος θα οφείλεται για αυτήν την κίνηση. Επίσης, με βάση την ρύθμιση της μηχανής η έξοδος του νήματος έχει τάση 30 N, που οφείλονται στα 50N δύναμη στις επιφάνειες τριβής. Με βάση τα παραπάνω και με δεδομένο ότι ο βηματικός κινητήρας που θα χρησιμοποιηθεί μπορεί να παρέχει 9 kg.cm μπορεί να υπολογιστεί ότι η διάμετρος για το καλούπι είναι:

$$D \leq (2 * T) / F \Rightarrow D \leq 5.8 \text{ cm}$$

Για την εισαγωγή των απωλειών στα ρουλεμάν και την αδράνεια του καλουπιού υπολογίστηκε ξανά η διάμετρος με την εισαγωγή συντελεστή ασφαλείας με συνέπεια το τελικό καλούπι να έχει διαστάσεις:

- Μήκος 360mm
- Διάμετρος 40mm

Το καλούπι έγινε από πλαστικό ενώ στα άκρα του έχουν τοποθετηθεί δύο άξονες που έχουν διάμετρο 12 mm για την στήριξη του.



Εικόνα 7-3 Μηχανολογικό σχέδιο κυλινδρικού καλουπιού



Εικόνα 7-4 Σχέδιο καλουπιού στο Solidworks

7.2 Μετάδοση κίνησης

Για την μετάδοση της κίνησης από τον κινητήρα στο καλούπι υπάρχουν δύο λύσεις:

- Ένωση του κινητήρα και του άξονα του καλουπιού με κόπλερ
- Μεταφορά της κίνησης με τροχαλίες και μάντες (ιμαντοκίνηση)

Τελικά επιλέχθηκε η λύση της ιμαντοκίνησης καθώς μέσω αυτής επιτυγχάνεται ομαλή μετάδοση κίνησης χωρίς κραδασμούς. Επίσης, στην περίπτωση μας είναι ευκολότερη η τοποθέτηση του άξονα του κινητήρα παράλληλα με τον άξονα του καλουπιού, γεγονός που οδηγεί στην λύση του ιμάντα.

Με βάση τις διαμέτρους των αξόνων του κινητήρα και του καλουπιού επιλέχθηκαν προς τοποθέτηση 2 τροχαλίες αλουμινίου και ένας κλειστός οδοντωτός μάντας, τέτοιων διαστάσεων ώστε να επιτυγχάνεται σωστή κίνηση μεταξύ των εξαρτημάτων.

Αναλυτικότερα, από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του βηματικού κινητήρα που χρησιμοποιήθηκε είναι γνωστή η διάμετρος του άξονα και ίση με 1/4" (6.35mm). Επομένως, πρέπει να χρησιμοποιηθεί τροχαλία με εσωτερική διάμετρο ίση με την διάμετρο του άξονα. Τελικά επιλέχθηκε η τροχαλία (Pinion Pulley XL - 10T - 6.35mm / 0.25" Bore) με την ζητούμενη διάμετρο.

Αναλυτικότερα τα χαρακτηριστικά είναι:

- Υλικό: Αλουμίνιο 6061 T6
- Τρόπος σύνδεσης με τον άξονα: κοχλίας 10-32 (Set Screw)
- Μέγιστο πλάτος μάντα χρονισμού: 0.375" (3/8)
- Διάμετρος: 0.875" (22.225mm)
- Εσωτερική Διάμετρος: 6.35mm / 0.25"
- Αριθμός οδόντων: 10

Η διάμετρος του άξονα του καλουπιού είναι 12mm επομένως και η εσωτερική διάμετρος της τροχαλίας να έχει τη ίδια διάσταση. Επιλέχθηκε η τροχαλία (Pinion Pulley XL - 15T - 12mm Bore) με την ζητούμενη διάμετρο.

Αναλυτικότερα τα χαρακτηριστικά είναι:

- Υλικό: Αλουμίνιο 6061 T6
- Τρόπος σύνδεσης με τον άξονα: κοχλίας 10-32 (Set Screw)
- Μέγιστο πλάτος ιμάντα χρονισμού: 0.375" (3/8)
- Εσωτερική διάμετρος 12mm
- Αριθμός οδόντων: 15



**Εικόνα 7-5 Pinion Pulley XL - 10T -
6.35mm / 0.25" Bore**

Ο ιμάντας χρονισμού που χρησιμοποιήθηκε έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Τύπος ιμάντα: τραπεζοειδείς οδόντες στην μία πλευρά του ιμάντα
- Πλάτος: 0.375" (3/8)
- Tooth pitch: 1/5"
- Μήκος: 6" / 152mm
- Υλικό: Neoprene με Fiberglass cords



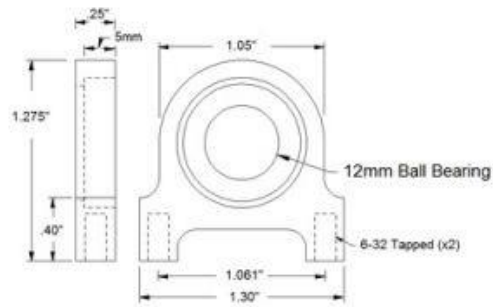
Εικόνα 7-6 Ιμάντας χρονισμού

Για την στήριξη των αξόνων του καλουπιού στη βάση χρησιμοποιήθηκαν ρουλεμάν. Για μεγαλύτερη σταθερότητα κατά την διάρκεια της κίνησης επιλέχθηκε να τοποθετηθούν δύο ρουλεμάν σε κάθε πλευρά. Επιλέχθηκαν τα εξής ρουλεμάν (κουζινέτα) τα χαρακτηριστικά των οποίων είναι:

- Εσωτερική διάμετρος ρουλεμάν: 12 mm
- Υλικό σφαιριδίων: 440 C Stainless Steel
- Στατικό φορτίο: 234 lbs / 106 kg
- Δυναμικό φορτίο: 430 lbs / 195 kg
- Μέγιστος αριθμός στροφών: 36,000 RPM
- Υλικό βάσης: Αλουμίνιο
- Βάρος: 0.48 oz / 13.6 g

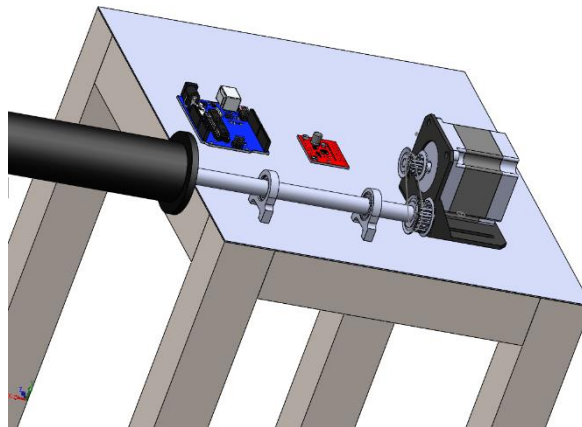


Εικόνα 7-7 Ρουλεμάν

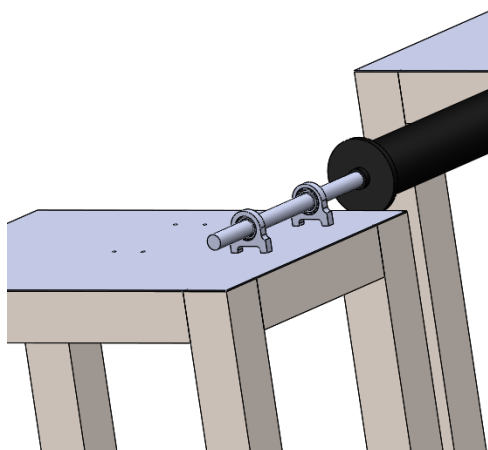


Εικόνα 7-8 Μηχανολογικό σχέδιο ρουλεμάν

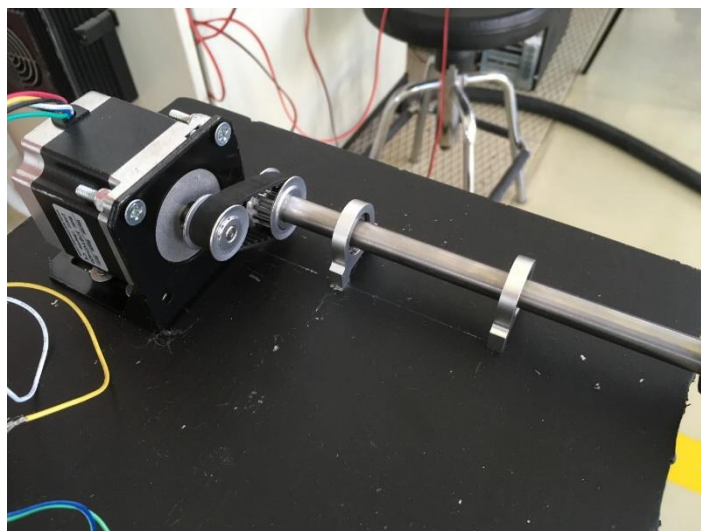
Για τον έλεγχο της διάταξης ως προς τις διαστάσεις που επιλέχθηκαν, αυτή σχεδιάστηκε στο SolidWorks. Επίσης, έγινε ανάλυση της αντοχής των συστημάτων από τα οποία αποτελείται με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων μέσα από το SolidWorks. Στη συνέχεια παρουσιάζονται εικόνες από την βάση όπως αυτή σχεδιάστηκε στο σχεδιαστικό πρόγραμμα στις οποίες παρουσιάζονται τα σημαντικότερα στοιχεία και φωτογραφίες από την τελική κατασκευή όπως αυτή χρησιμοποιήθηκε για την περιέλιξη ινών σε κυλινδρικό καλούπι.



Εικόνα 7-9 Εικόνα βάσης με το σύστημα μετάδοσης κίνησης



Εικόνα 7-10 Εικόνα βάσης

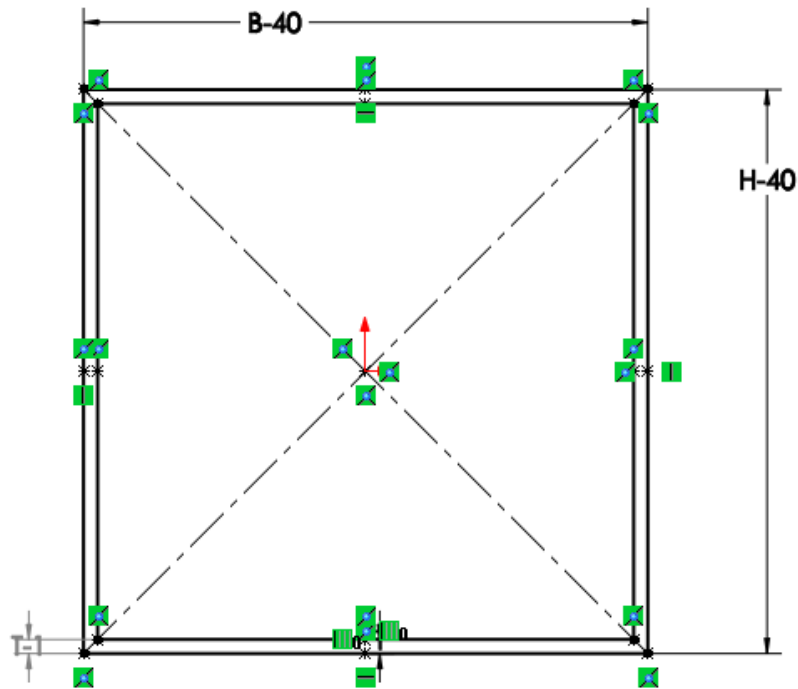


Εικόνα 7-12 Φωτογραφία από το σύστημα μετάδοσης κίνησης



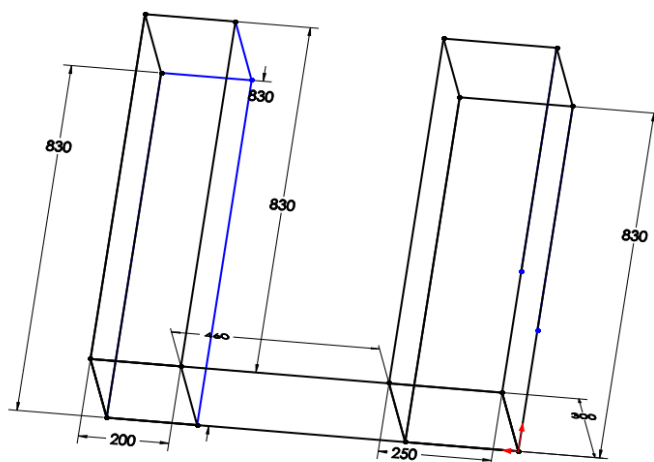
Εικόνα 7-11 Τελικό σύστημα βάσης- μετάδοσης κίνησης

Για την σχεδίαση της βάσης αρχικά σχεδιάστηκε η διατομή των δοκών που χρησιμοποιήθηκαν καθώς αυτή δεν υπήρχε σε αυτές που διαθέτει το Toolbox με τις διατομές που διαθέτει το Solidworks για την κατασκευή συγκολλητών κατασκευών. Υπενθυμίζεται ότι η διατομή που χρησιμοποιήθηκε είναι τετραγωνική με διαστάσεις 40mmx40mmx1mm. Η διατομή που σχεδιάστηκε παρουσιάζεται στην συνέχεια στην εικόνα. Τα σημεία που υπάρχουν περιμετρικά τόσο της εσωτερική όσο και της εξωτερικής διατομής τοποθετήθηκαν για την τοποθέτηση των δοκών σε διάφορες θέσεις πάνω στην ζητούμενη γεωμετρία. Για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δομικό στοιχείο σε συγκολλητή κατασκευή πρέπει να αποθηκευτεί ως αρχείο Lib Feat Part (*.sldlfp) σε προκαθορισμένο φάκελο. Ο φάκελος αυτός στην έκδοση του SolidWorks 2016 βρίσκεται στην εξής σημείο: C:\Program Files\SOLIDWORKS Corp\SOLIDWORKS\lang\english\weldment profiles.



Εικόνα 7-13 Διατομή δοκού

Στην συνέχεια σχεδιάστηκε ένα 3D Sketch (Weldments → 3D Sketch) που θα χρησιμοποιηθεί σαν οδηγός για την τοποθέτηση των δοκών που σχεδιάστηκαν προηγουμένως. Στη συνέχεια με βάση το τρισδιάστατο σχέδιο τοποθετήθηκαν οι δοκοί (Weldments → Structural Member → Επιλογή επιθυμητής διατομής). Στα σημεία που ενώνονταν δύο ή περισσότερες δοκοί παρατηρήθηκε ότι αυτές εισχωρούσαν η μία στην άλλη. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού χρησιμοποιήθηκε η διαδικασία Trim/Extend από το tab Weldments του SolidWorks.



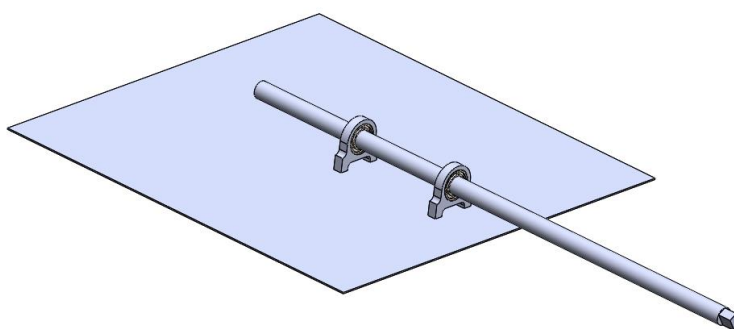
Εικόνα 7-14 3D Sketch

Στην συνέχεια δημιουργήθηκε ένα assembly με την βάση και τα υπόλοιπα στοιχεία της κατασκευής (ρουλεμάν, τροχαλίες χρονισμού κινητήρα και καλουπιού, βάση του κινητήρα και το καλούπι). Αφού εισήχθησαν όλα τα στοιχεία της κατασκευής, αυτά τοποθετήθηκαν στην προδιαγεγραμμένη θέση με την χρήση της εντολής Mate και της ανάλογες επιλογές με βάση τη γεωμετρία και την ζητούμενη θέση.

7.3 Προσομοίωση κατασκευής

Για τον έλεγχο της κατασκευής προς αποφυγή τυχόν αστοχίας έγινε προσομοίωση με τη χρήση του Solidworks. Επειδή το βάρος των ρουλεμάν, του κινητήρα και του καλουπιού είναι σχετικά μικρό δεν κρίθηκε απαραίτητο να γίνει μελέτη για την αντοχή της βάσης λόγω της υπερδιαστασιολόγησης που έγινε. Τα πιο πιθανά σημεία του συστήματος που μπορούν να αστοχήσουν είναι η σύνδεση των ρουλεμάν με το έλασμα. Επιπλέον σημαντικό για την ομαλή λειτουργία είναι και οι μετατοπίσεις των αξόνων του καλουπιού, οι οποίες θα υπολογιστούν μέσω της προσομοίωσης.

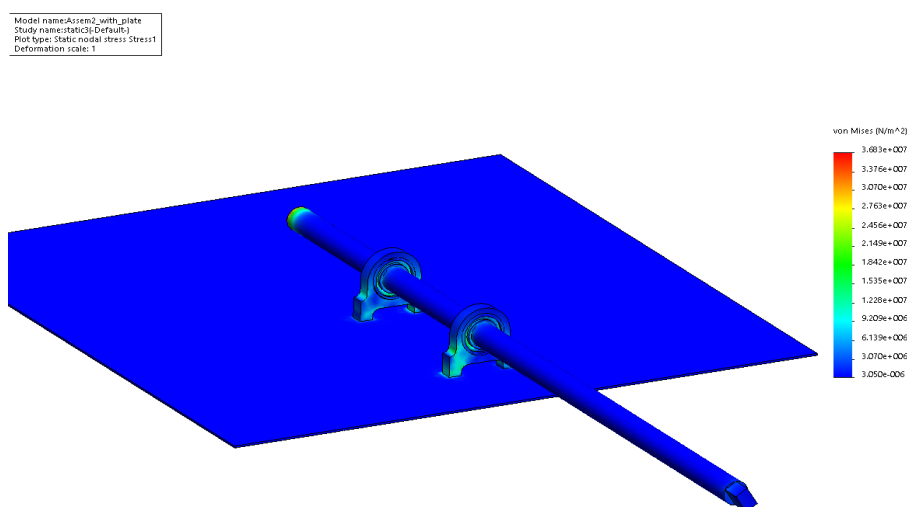
Για την γρηγορότερη εκτέλεση της προσομοίωσης δημιουργήθηκε ένα νέο μοντέλο το οποίο περιλαμβάνει τα απαραίτητα στοιχεία για την εύρεση των δεδομένων που ζητούνται όπως αυτά αναλύθηκαν προηγουμένως. Τα στοιχεία αυτά είναι το έλασμα που χρησιμοποιήθηκε, τα ρουλεμάν και ο άξονας του καλουπιού με διαστάσεις που αντιστοιχούν στις δύο ακραίες θέσεις που μπορεί να ασκηθεί η δύναμη, η μία κοντά στην βάση και η άλλη στη μέση του καλουπιού. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιούνται οι αρχικές διαστάσεις ενώ στην δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιείται άξονας με την ίδια διάμετρο με μεγαλύτερο όμως μήκος για να μπορεί να τοποθετηθεί η δύναμη που ασκείται στο καλούπι στην μέση του.



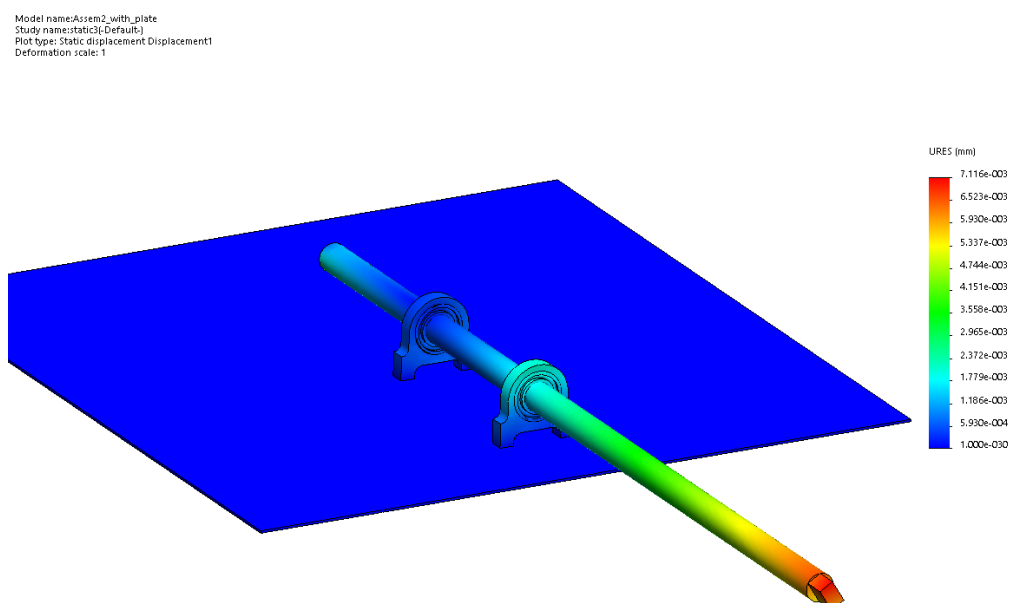
Εικόνα 7-15 Απλοποιημένο μοντέλο

Τα τυποποιημένα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν εισήχθησαν μέσω του Toolbox που περιλαμβάνει το Solidworks. Ειδικότερα, εισήχθησαν ρουλεμάν που είχαν ίδια χαρακτηριστικά με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν (διαστάσεις και αντοχές) και βίδες ίδιου βήματος σπειρώματος, διαμέτρου και μήκους.

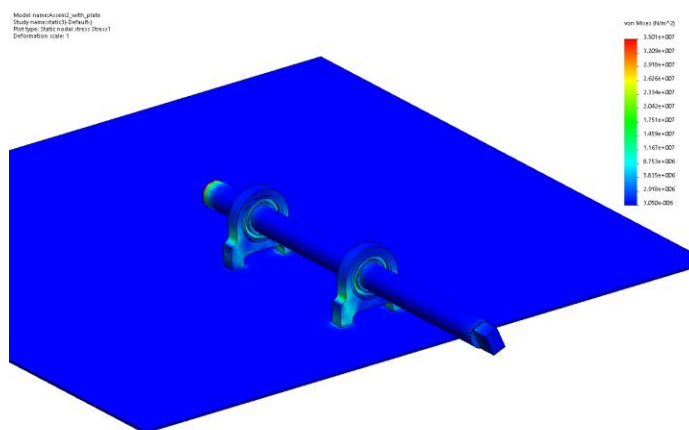
Για την προσομοίωση το έλασμα θεωρήθηκε πακτωμένο ενώ προσδιορίστηκαν οι κοχλιωτές συνδέσεις και οι επαφές μεταξύ άξονα και ρουλεμάν. Χρησιμοποιήθηκαν όσο το δυνατόν ρεαλιστικές παράμετροι για τις διάφορες σταθερές που απαιτούνται ενώ ορίστηκε ροπή σφύξης του κοχλία στα 5Nm. Εκτός από την βαρύτητα, και στις δύο περιπτώσεις ασκείται η μέγιστη ροπή που μπορεί να παρέχει η κινητήρας και η δύναμη που απαιτείται για την ξετύλιξη του νήματος από την κεφαλή.



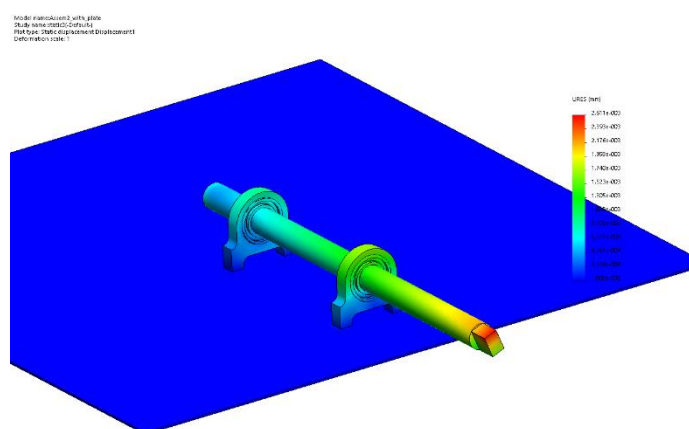
Εικόνα 7-16 Έλεγχος Αντοχής κατά Von Mises με την δύναμη στο μέσο του καλουπιού



Εικόνα 7-17 Μετατοπίσεις με την δύναμη στο μέσο του καλουπιού



Εικόνα 7-18 Έλεγχος Αντοχής κατά Von Mises με την δύναμη στο άκρο του καλουπιού



Εικόνα 7-19 Μετατοπίσεις με την δύναμη στο άκρο του καλουπιού

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων εξάγεται το συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει κίνδυνος αστοχίας της κατασκευής ενώ οι μετατοπίσεις που εμφανίζονται είναι μικρές και δεν επηρεάζουν την λειτουργία του συστήματος.



Εικόνα 7-20 Η βάση και το ρομπότ

8

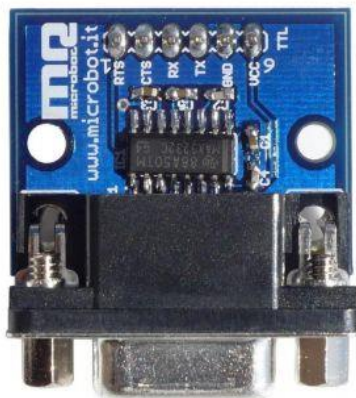
Λειτουργία - Πειράματα

8.1 Επικοινωνία μικροελεγκτή- ρομποτικού βραχίονα

Για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας θα πρέπει ο ελεγκτής του ρομποτικού βραχίονα να στέλνει σήμα στον μικροελεγκτή που είναι υπεύθυνος για την κίνηση του βηματικού κινητήρα έτσι ώστε ο τελευταίος να αρχίζει να περιστρέφεται. Με το τέλος της κίνησης του βραχίονα, θα πρέπει να γίνεται και παύση της λειτουργίας του κινητήρα.

Για την επικοινωνία του μικροελεγκτή (Arduino) και του ρομποτικού βραχίονα χρησιμοποιήθηκε μία σειριακή θύρα από τις τρεις που προσφέρει η μονάδα εισόδων/εξόδων του ελεγκτή του ρομπότ.

Το ρομπότ χρησιμοποιεί για την σειριακή επικοινωνία θύρες RS-232 που λειτουργούν με τάση +/- 12V ενώ ο Arduino χρησιμοποιεί TTL λογικά επίπεδα (5V ή 3.3V). Επομένως η απευθείας ένωση των δύο θα είχε καταστροφικές συνέπειες για την πλακέτα του Arduino καθώς θα δεχόταν μεγαλύτερη τάση από αυτή που είναι καθορισμένη από τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε κατάλληλος μετατροπέας. Ο μετατροπέας αυτός βασίζεται στο ολοκληρωμένο κύκλωμα MAX3232C.



Εικόνα 8-1 Serial Adapter RS232/TTL (Microbot)

Τα χαρακτηριστικά του μετατροπέα:

- Supply voltage 3 - 5,5V
- Supply current 0.3mA typ. (1mA max.)
- Serial standard TIA/EIA-232-F
- Data I/O voltage 3 - 5,5V
- Dimensions 31x35x11mm (connector and pins included)
- Weight 11g / 0.39oz
- Operating temperature 0 - 70°C
- Connector DB9 female

Η συνδεσμολογία μεταξύ του μετατροπέα και του Arduino είναι:

- Vcc -> 5V
- GND->GND
- TX -> TX
- RX ->RX

Για τον έλεγχο της διαδικασίας επιλέχθηκε να ελέγχονται οι πληροφορίες που στέλνονται μεταξύ των δύο συστημάτων με το στέλνονται και στον υπολογιστή που ελέγχει το σύστημα. Επομένως, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν δύο σειριακές επικοινωνίες στον Arduino. Χρησιμοποιήθηκε ένας Arduino Uno ο οποίος διαθέτει μία σειριακή θύρα. Για να ξεπεραστεί ο περιορισμός αυτός, χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη η «SoftwareSerial» η οποία μετατρέπει δύο ψηφιακές θύρες σε σειριακές. Έτσι, υπάρχουν πλέον δύο θύρες: η μία για την επικοινωνία ρομπότ-Arduino και η άλλη για επικοινωνία Arduino-υπολογιστή.

Η λογική που ακολουθήθηκε για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας είναι ότι το ρομπότ στέλνει ένα χαρακτήρα μέσω της σειριακής ,που έχει οριστεί από πριν. Στην μεριά του μικροελεγκτή έχει οριστεί μια μεταβλητή που ορίζει την κίνηση του κινητήρα. Αν έχει την τιμή ένα (1) τότε ο κινητήρας είναι ενεργοποιημένος, ενώ αν αποκτήσει την τιμή μηδέν (0) τότε σταματάει. Παράλληλα, γίνεται έλεγχος αν έχει σταλεί κάποιος χαρακτήρας μέσω της σειριακής. Στην περίπτωση που έχει σταλεί κάποιος χαρακτήρας, γίνεται έλεγχος αν αυτός αντιστοιχεί στον χαρακτήρα εκκίνησης. Αν αντιστοιχεί στον χαρακτήρα εκκίνησης, τότε η μεταβλητή γίνεται μονάδα και ο κινητήρας κινείται. Αντίστοιχα, όταν σταλεί ο χαρακτήρας που έχει οριστεί ότι θα διακόπτεται η κίνηση, η μεταβλητή γίνεται μηδέν και ο κινητήρας σταματάει.

Ο χαρακτήρας που ορίστηκε να στέλνεται από το ρομπότ για να ξεκινάει ο κινητήρας είναι ο «>» και για να σταματάει είναι «s». Με βάση αυτά που αναλύθηκαν προηγουμένως ο κώδικας που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4 τροποποιήθηκε ως εξής:

```

#define RPMS                70.3
#define STEP_PIN            9
#define DIRECTION_PIN      8
#define GO_PIN              3

#define STEPS_PER_REV       200
#define MICROSTEPS_PER_STEP 8
#define MICROSECONDS_PER_MICROSTEP (1000000/(STEPS_PER_REV *
MICROSTEPS_PER_STEP)/(RPMS / 60))

#include <SoftwareSerial.h>
SoftwareSerial mySerial(10, 11); // RX, TX

int start = 0;
uint32_t LastStepTime = 0;
uint32_t CurrentTime = 0;

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

  pinMode(STEP_PIN, OUTPUT);
  pinMode(DIRECTION_PIN, OUTPUT);
  digitalWrite(STEP_PIN, LOW);
  digitalWrite(DIRECTION_PIN, HIGH);
  pinMode(GO_PIN, INPUT);
}

void loop() {
  while (mySerial.available()) {
    char inChar = (char)mySerial.read();
    Serial.print(inChar);
    if (inChar == '>') {
      start = 1;
    } else if (inChar == 's') {
      start = 0;
    }
  }
  if (start == 1) {
    CurrentTime = micros();
    if ((CurrentTime - LastStepTime) > MICROSECONDS_PER_MICROSTEP)
    {
      LastStepTime = CurrentTime;
      digitalWrite(STEP_PIN, HIGH);
      delayMicroseconds(MICROSECONDS_PER_MICROSTEP / 2);
      digitalWrite(STEP_PIN, LOW);
      delayMicroseconds(MICROSECONDS_PER_MICROSTEP / 2);
    }
  }
}

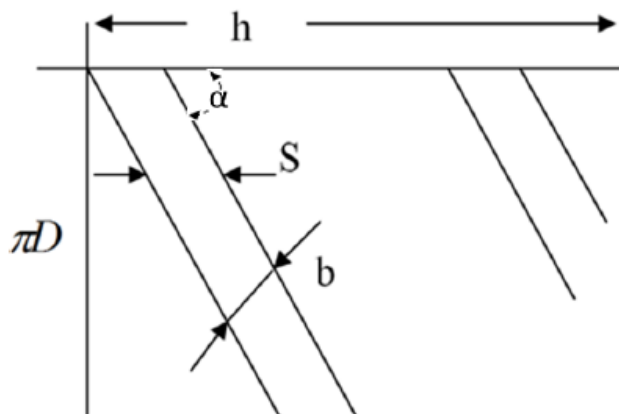
```

Ο παραπάνω κώδικας θα τροποποιηθεί με την αλλαγή της ταχύτητας στην πρώτη γραμμή και θα χρησιμοποιηθεί σε όλα τα πειράματα που θα πραγματοποιηθούν.

Ο ρυθμός με τον οποίο γίνεται η μεταφορά των δεδομένων μέσω των σειριακών συνδέσεων είναι 9600 bps. Ο ρυθμός αυτός ορίζεται στην πλευρά του Arduino στο πρόγραμμα, όπως φαίνεται παραπάνω, ενώ αποτελεί την προκαθορισμένη τιμή αποστολής δεδομένων για τον ελεγκτή του ρομποτικού βραχίονα.

8.2 Κυλινδρικό καλούπι

Στην περίπτωση της ελικοειδούς περιέλιξης, η διαδρομή που ακολουθεί το νήμα κατά την διάρκεια της κατεργασίας φαίνεται στην Εικόνα 8-2.



Εικόνα 8-2 Διάγραμμα διαδρομής ίνας

Αν α είναι η γωνία περιέλιξης σε ακτίνια (rad), έχουμε (εξίσωση 1):

$$\tan \alpha = \frac{N_m \pi D}{60 V_c}$$

Όπου

V_c = η ταχύτητα του φορείου (στην περίπτωση της παρούσας διπλωματικής η ταχύτητα του τελικού σημείου δράσης του ρομποτικού βραχίονα) σε m/s

N_m = η περιστροφική ταχύτητα του καλουπιού σε RPM

D = η διάμετρος του καλουπιού σε m

Το μήκος το οποίο καλύπτεται από το πλάτος μιας ίνας σε μία περιστροφή του καλουπιού μπορεί να υπολογιστεί με βάση τον τύπο:

$$L = \frac{\pi D}{\tan \alpha}$$

Αν h , είναι το συνολικό μήκος του καλουπιού, τότε ο αριθμός των περιστροφών που απαιτούνται για την πλήρη κάλυψη του καλουπιού είναι:

$$n = \frac{h}{L} = \frac{h * \tan \alpha}{\pi D}$$

$$n = h \frac{N_m \pi D}{60 V_c}$$

Όπως φαίνεται και από την εξίσωση 1 για την πλήρη καθορισμό των χαρακτηριστικών της κατεργασίας, έχοντας την επιθυμητή γωνία περιέλιξης, απαιτείται ο υπολογισμός δύο ταχυτήτων, της γραμμικής ταχύτητα της κεφαλής και της γωνιακής ταχύτητας του καλουπιού. Με βάση τα παραπάνω μπορούν να διακριθούν δύο περιπτώσεις για τον καθορισμό των παραμέτρων της κατεργασίας:

1. Καθορίζεται η ταχύτητα της κεφαλής και μέσω της εξίσωσης 1 υπολογίζεται η ταχύτητα περιστροφής.
2. Καθορίζεται η ταχύτητα περιστροφής και μέσω της εξίσωσης 1 υπολογίζεται η ταχύτητα κίνησης της κεφαλής.

Και για τις δύο περιπτώσεις γράφτηκε κώδικας σε Matlab , ο οποίος παρουσιάζεται στο παράρτημα της εργασίας. Ο ίδιος χρησιμοποιήθηκε και για τον υπολογισμό των ζητούμενων ταχυτήτων.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε ο πρώτος τρόπος υπολογισμού στον οποίο ορίστηκε η ταχύτητα κίνησης της κεφαλής με βάση τις τεχνικές προδιαγραφές που δόθηκαν από τον κατασκευαστή του ρομποτικού βραχίονα. Αναλυτικότερα, επιλέχθηκε το τελικό σημείο δράσης να έχει ταχύτητα 17 mm/s και με βάση τις τύπους που παρουσιάστηκαν προηγουμένως υπολογίστηκε, με την χρήση κατάλληλου κώδικα, η ταχύτητα περιστροφής του καλουπιού.

Έχοντας υπολογιστεί πλέον η ταχύτητα με την οποία πρέπει να περιστρέφεται το καλούπι, υπολογίζεται η ταχύτητα που θα πρέπει να εισαχθεί στον μικροελεγκτή για την κίνηση του κινητήρα. Ο λόγος μετάδοσης της μαντοκίνησης μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$i = \frac{n_2}{n_1} = \frac{d_1}{d_2}$$

Άρα:

$$n_1 = \frac{n_2 * d_2}{d_1}$$

Από τα μηχανολογικά σχέδια των τροχαλιών που χρησιμοποιήθηκαν για την μετάδοση της κίνησης έχουμε:

$$d_1 = 7.85 \text{ mm}$$

$$d_2 = 11.89 \text{ mm}$$

Για την ολοκλήρωση της κατεργασίας έπρεπε να βρεθούν τα σημεία που διαδραμάτιζαν καθοριστικό ρόλο στην κίνηση του τελικού σημείου δράσης. Τα σημεία αυτά είναι τα δύο άκρα του καλουπιού. Επιπλέον σημαντικός παράγοντας για την απόκτηση της επιθυμητής τροχιάς του νήματος είναι και η απόσταση του άκρου της κεφαλής που τοποθετεί το νήμα από το καλούπι. Η απόσταση αυτή συνίσταται να είναι όσο περίπου και η μέγιστη διάμετρος του καλουπιού.[27]

Στη συνέχεια, τίθεται σε λειτουργία ο ρομποτικός βραχίονας και μετακινείται ώστε να προσεγγίσει τα επιθυμητά σημεία. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για κάθε ένα από τα επιθυμητά σημεία ενώ με την χρήση του χειριστηρίου του ρομπότ καταγράφονται οι καρτεσιανές συντεταγμένες του.

Έπειτα τα σημεία αυτά ορίζονται ως σημεία στο πρόγραμμα που εισάγεται στον ελεγκτή του ρομπότ και ελέγχουν την κίνηση του ρομπότ.

8.2.1 Γωνία περιέλιξης 45°

Ακολουθώντας την διαδικασία που αναλύθηκε προηγουμένως, υπολογίστηκε η ταχύτητα περιστροφής του καλουπιού δεδομένη της ταχύτητας κίνησης της κεφαλής και της γωνίας περιέλιξης. Αυτή προέκυψε να είναι:

$$n_2 = 8.12 \text{ rpm}$$

Ενώ η ταχύτητα που πρέπει να εισαχθεί στον μικροελεγκτή για την κίνηση του κινητήρα είναι:

$$n_1 = 12.3 \text{ rpm}$$

Έχοντας τις ταχύτητες για την κίνηση της κεφαλής και του καλουπιού, μέσω του χειριστηρίου τοποθετείται το ρομπότ στις επιθυμητές θέσεις ώστε να βρεθούν οι συντεταγμένες και να εισαχθούν στο πρόγραμμα για την κίνηση του ρομποτικού βραχίονα.

Από τις πρώτες δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν παρατηρήθηκε ότι στα άκρα του καλουπιού η διαδρομή της ίνας δεν ήταν αυτή που αναμενόταν καθώς η μετακίνηση της κεφαλής ήταν γρήγορη και το νήμα δεν προλάβαινε να φτάσει στην επιθυμητή θέση. Επομένως, όταν η κεφαλή φτάσει στα άκρα του καλουπιού πρέπει να σταματήσει για κάποιο χρονικό διάστημα η κίνηση της μέχρι το νήμα να κάνει την απαιτούμενη κίνηση του. Το χρονικό αυτό διάστημα προσδιορίστηκε ως εξής:

Έστω l η απόσταση που έχει να διανύσει το νήμα από την θέση που είναι μέχρι το σημείο που είναι το άκρο του τεμαχίου. Για να καλυφθεί η απόσταση αυτή απαιτείται:

$$x = \frac{l}{L}$$

Όπου L η απόσταση που καλύπτεται σε μία περιστροφή. Ο χρόνος που απαιτείται για την περιστροφή αυτή είναι:

$$\Delta t = \frac{x}{N * 60} = \frac{60ltana}{\pi Dn}$$

Η απόσταση αυτή μετρήθηκε ως 100mm άρα το χρονικό διάστημα που θα πρέπει να είναι ακινητοποιημένη η κεφαλή είναι 6 sec.

Για τον έλεγχο της λειτουργίας της κεφαλής και του τελικού αποτελέσματος, αναφορικά με την τροχιά της ίνας πάνω στο κυλινδρικό καλούπι, επιλέχθηκε να μην γίνει πλήρη κάλυψη του καλουπιού αλλά να γίνουν 10 επαναλήψεις από την μία άκρη στην άλλη.

Με βάση τα παραπάνω ο κώδικας για την κίνηση του ρομποτικού βραχίονα είναι:

```
.PROGRAM CYL()
```

```
AUTO slun
```

```
ATTACH (slun ,4) "SERIAL:2"
```

```
SET start = TRANS(16.56, -678.01, -32.62, -88.35, 88.92, 0.65)
```

```
SET end= TRANS(339.51, -682.92, -17.15, -89.66, 90.6, 7.39)
```

```
SPEED 17 MMPS AKWAYS
```

```
MOVES start
```

```
BREAK
```

```
WRITE (slun) ">"
```

```
DELAY 10
```

```
FOR t = 1 TO 5
```

```
    MOVES end
```

```
    BREAK
```

```
    DEALAY 6
```

```
    MOVES start
```

```
    BREAK
```

```
    DELAY 6
```

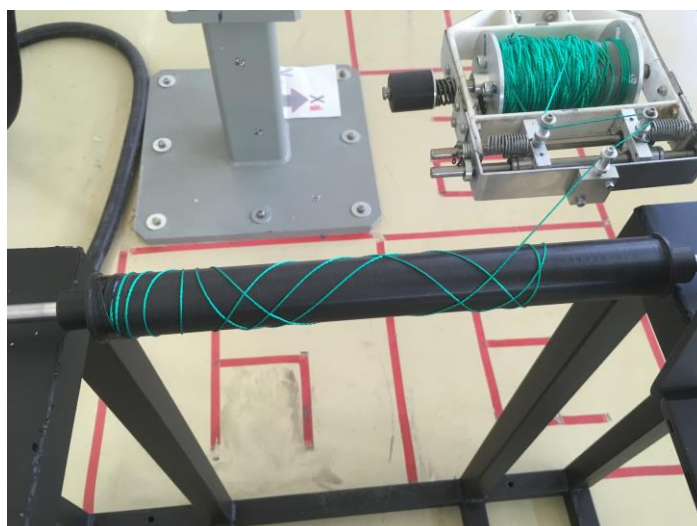
```
END
```

```
WRITE (slun) "s"
```

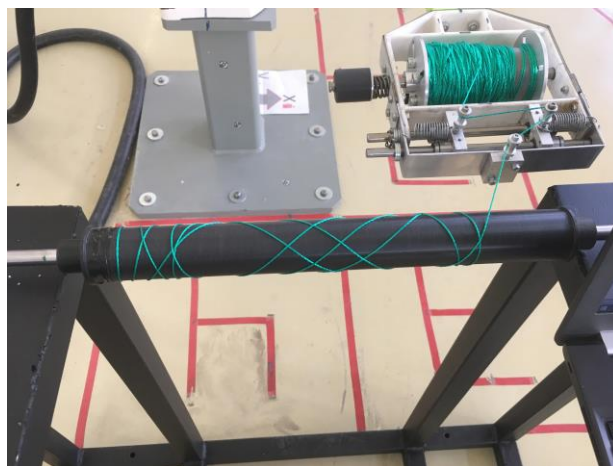
```
DETACH (slun)
```

Αρχικά, επειδή το νήμα δεν ήταν προεμποτισμένο σε ρητίνη αλλά ούτε τοποθετούνταν ρητίνη κατά την διάρκεια περιέλιξης έπρεπε στην αρχή της κατεργασίας το νήμα να στερεωθεί με την χρήση ταινίας για να μην «γλιστρήσει».

Στην συνέχεια παρουσιάζονται φωτογραφίες από την κατεργασία σε διάφορες φάσεις της.

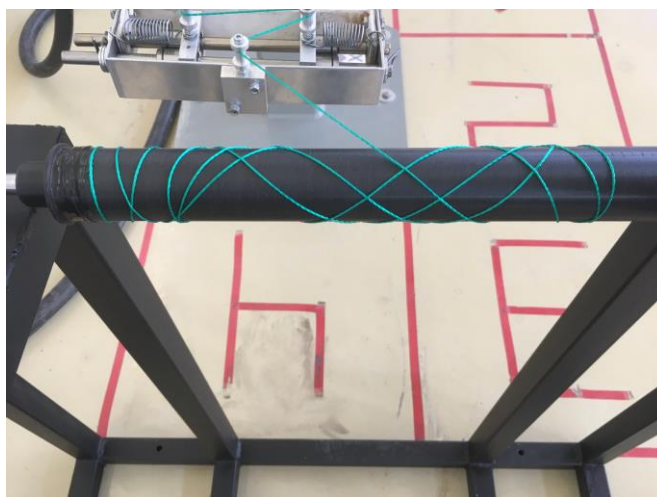


Εικόνα 8-3 Αρχική φάση (κυλινδρικό καλούπι, 45 μίρες)

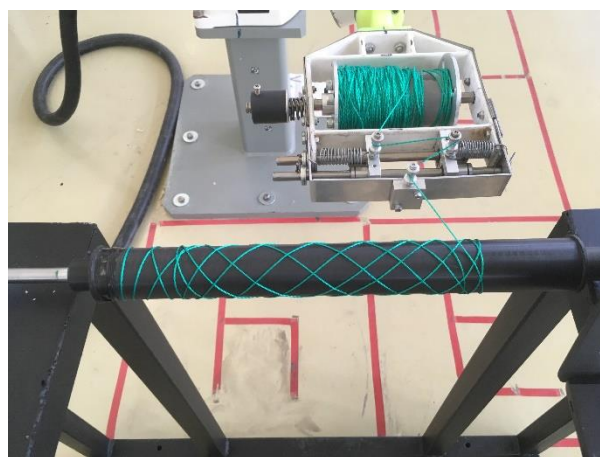


Εικόνα 8-4 Κυλινδρικό καλούπι 45 μοίρες , η κεφαλή σε ακινησία στο άκρο του καλουπιού

Στις δύο παραπάνω εικόνες (Εικόνα 8-3 και Εικόνα 8-4) παρουσιάζεται ο λόγος που οδήγησε στην εισαγωγή μιας περιόδου ακινησίας της κεφαλής όταν αυτή έχει φτάσει στο άκρο του καλουπιού. Αναλυτικότερα, στην πρώτη εικόνα είναι φανερό ότι ενώ η κεφαλή έχει φτάσει στο επιθυμητό σημείο, το νήμα δεν έχει προλάβει να κάνει την επιθυμητή διαδρομή. Σε περίπτωση που δεν υπήρχε η διακοπή στην κίνηση του ρομπότ, η διαδρομή της ίνας στα άκρα του καλουπιού δεν θα ήταν η επιθυμητή.



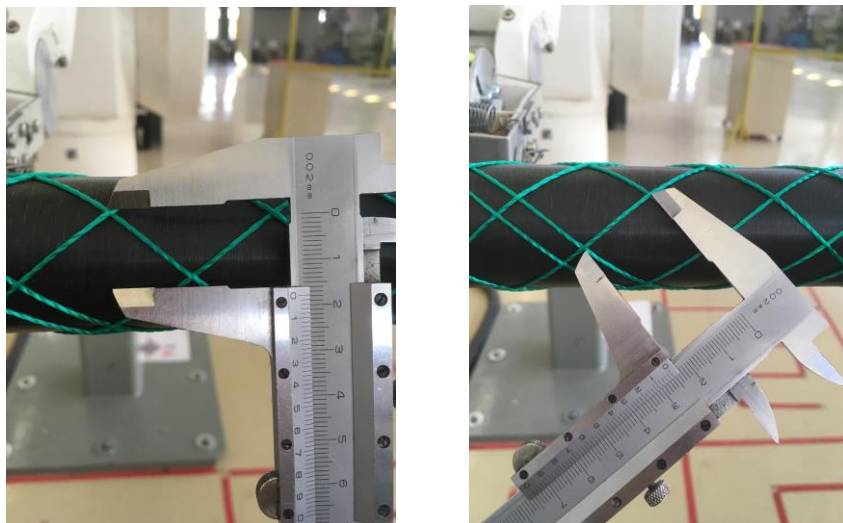
Εικόνα 8-5 Κυλινδρικό καλούπι, 45 μοίρες , ενδιάμεση θέση



Εικόνα 8-6 Κυλινδρικό καλούπι, 45 μοίρες, τελικό αποτέλεσμα

8.2.1.1 Υπολογισμός γωνίας περιέλιξης

Για τον έλεγχο του αποτελέσματος της κατεργασίας μετρήθηκε προσεγγιστικά η γωνία περιέλιξης. Η μέτρηση έγινε με την χρήση παχύμετρου και μετρήθηκαν τα μήκη των πλευρών του ορθογωνίου τριγώνου που σχηματίζεται.



Εικόνα 8-7 Μετρήσεις πλευρών

Από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν προκύπτει:

- Υποτείνουσα τριγώνου: $\cong 25 \text{ mm}$
- Απέναντι κάθετη πλευρά: $\cong 18 \text{ mm}$

Άρα:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{18}{25}\right) = 46^\circ$$

Λαμβάνοντας υπόψιν τα σφάλματα που προκύπτουν από τον τρόπο μέτρησης, το αποτέλεσμα είναι ικανοποιητικό.

8.2.2 Γωνία περιέλιξης 70°

Ακολουθώντας την διαδικασία που αναλύθηκε προηγουμένως, υπολογίστηκε η ταχύτητα περιστροφής του καλουπιού δεδομένη της ταχύτητας κίνησης της κεφαλής και της γωνίας περιέλιξης. Αυτή προέκυψε να είναι:

$$n_2 = 22.3 \text{ rpm}$$

Ενώ η ταχύτητα που πρέπει να εισαχθεί στον μικροελεγκτή για την κίνηση του κινητήρα είναι:

$$n_1 = 30.7 \text{ rpm}$$

Τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν για την κατεργασία είναι τα ίδια με την προηγούμενη περίπτωση και επειδή η ταχύτητα κίνησης του ρομποτικού βραχίονα είναι ίδια δεν χρειάστηκαν αλλαγές στο πρόγραμμα του ρομπότ. Οι μόνες αλλαγές αφορούν την κίνηση του βηματικού κινητήρα του καλουπιού.

Ο υπολογισμός του χρονικού διαστήματος έγινε με την διαδικασία που αναλύθηκε προηγουμένως, βάση του τύπου:

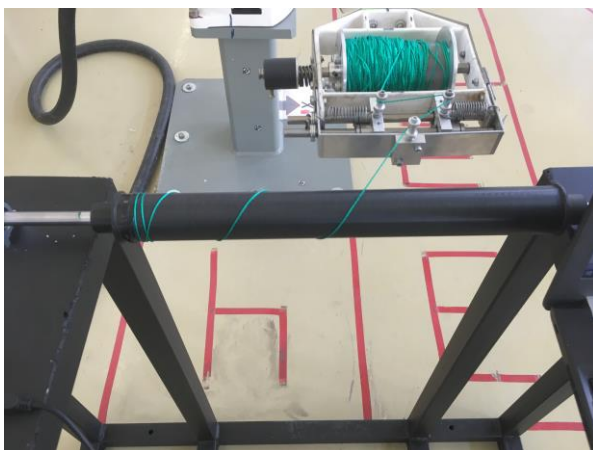
$$\Delta t = \frac{60l \tan \alpha}{\pi D n}$$

Η απόσταση l μετρήθηκε 100mm επομένως η χρονική διάρκεια είναι $\Delta t = 6 \text{ sec}$

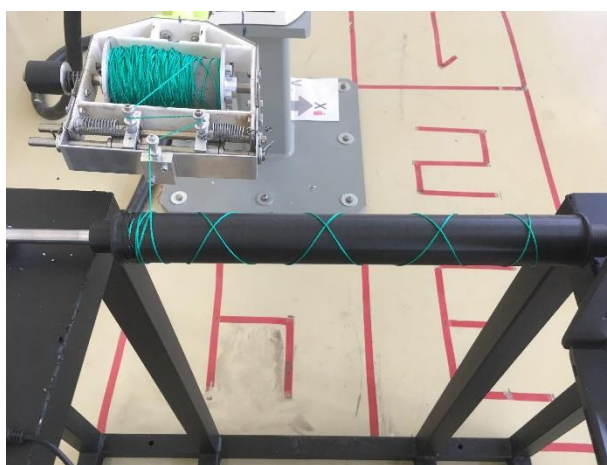
Το πρόγραμμα του ρομποτικού βραχίονα είναι:

```
.PROGRAM CYL()
  AUTO slun
  ATTACH (slun ,4) "SERIAL:2"
  SET start = TRANS(16.56, -678.01, -32.62, -88.35, 88.92, 0.65)
  SET end= TRANS(339.51, -682.92, -17.15, -89.66, 90.6, 7.39)
  SPEED 17 MMPS AKWAYS
  MOVES start
  BREAK
  WRITE (slun) ">"
  DELAY 10
  FOR t = 1 TO 5
    MOVES end
    BREAK
    DEALAY 6
    MOVES start
    BREAK
    DELAY 6
  END
  WRITE (slun) "s"
  DETACH (slun)
```

Φωτογραφίες από την κατεργασία παρουσιάζονται παρακάτω:



Εικόνα 8-8 Κυλινδρικό καλούπι, 70 μοίρες, αρχή κατεργασίας



Εικόνα 8-9 Κυλινδρικό καλούπι, 70 μοίρες, 2η επανάληψη



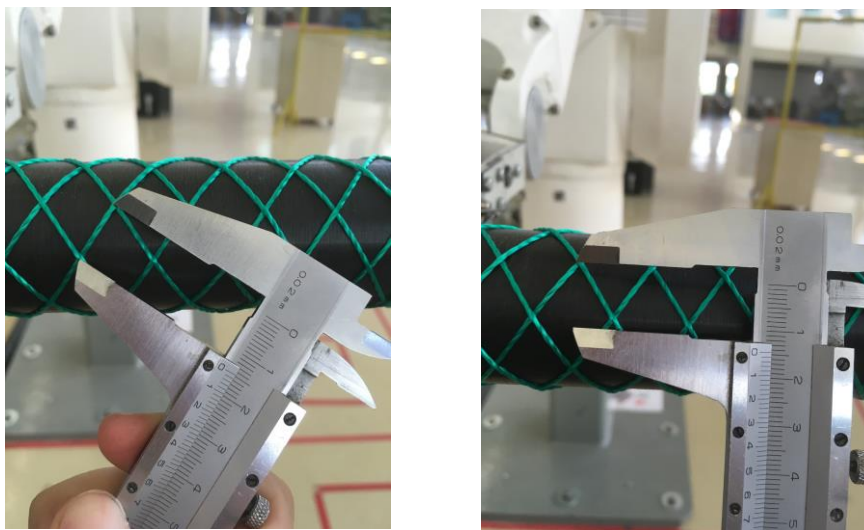
Εικόνα 8-10 Κυλινδρικό καλούπι, 70 μοίρες, ενδιάμεση φάση



Εικόνα 8-11 Κυλινδρικό καλούπι, 70 μοίρες, τελικό αποτέλεσμα

8.2.2.1 Υπολογισμός γωνίας περιέλιξης

Για τον έλεγχο του αποτελέσματος της κατεργασίας μετρήθηκε προσεγγιστικά η γωνία περιέλιξης. Η μέτρηση έγινε με την χρήση παχύμετρου και μετρήθηκαν τα μήκη των πλευρών του ορθογωνίου τριγώνου που σχηματίζεται, όπως έγινε και προηγουμένως.



Εικόνα 8-12 Μετρήσεις μηκών τριγώνου

Από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν προκύπτει:

- Υποτείνουσα τριγώνου: $\cong 15 \text{ mm}$
- Απέναντι κάθετη πλευρά: $\cong 14 \text{ mm}$

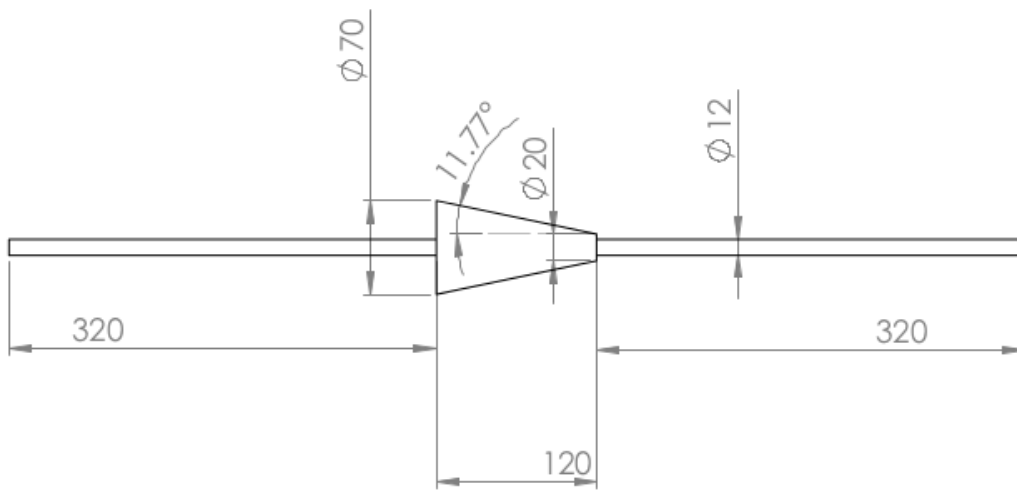
Άρα:

$$\alpha = \text{asin}\left(\frac{14}{15}\right) = 68.9^\circ$$

Λαμβάνοντας υπόψιν τα σφάλματα που προκύπτουν από τον τρόπο μέτρησης, το αποτέλεσμα είναι ικανοποιητικό.

8.3 Κωνικό καλούπι

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας της περιέλιξης ινών σε κυλινδρικό καλούπι, αναζητήθηκε μια πιο σύνθετη γεωμετρία. Τελικά επιλέχθηκε η κωνική γεωμετρία. Λόγω των περιορισμών που έθετε η ισχύς του κινητήρα η μέγιστη διάμετρος του κωνικού καλουπιού ορίστηκε στα 70mm. Για την ύπαρξη μεγάλης γωνίας κώνου, με δεδομένη την μία διάμετρο του κώνου, έπρεπε να μειωθεί το μήκος του καλουπιού σε σχέση με το κυλινδρικό που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές. Με βάση τους παραπάνω περιορισμούς και προδιαγραφές προέκυψαν οι τελικές διαστάσεις που παρουσιάζονται στη συνέχεια:



Εικόνα 8-13 Μηχανολογικό σχέδιο κωνικού καλουπιού-αξόνων

Η γωνία κώνου είναι:

$$\varphi = \text{atan}\left(\frac{(70 - 20)/2}{120}\right) = 11.77^\circ$$



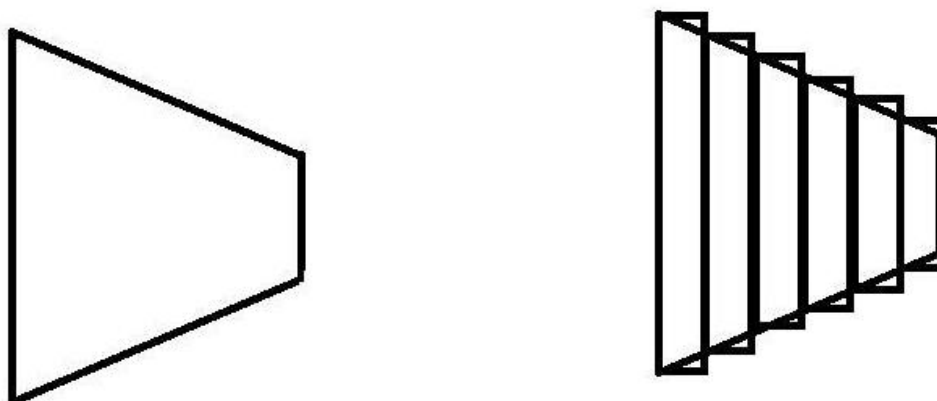
Εικόνα 8-14 Φωτογραφία κωνικού καλουπιού

Για την εκτέλεση της κατεργασίας με ,γωνία περιέλιξης 70° , στο κωνικό καλούπι ακολουθήθηκαν οι ίδιες βασικές αρχές με αυτές του κυλινδρικού. Ειδικότερα, το τελικό σημείο δράσης του ρομποτικού βραχίονα θα πρέπει να βρίσκεται σε απόσταση περίπου ίση με την διάμετρο του καλουπιού. Επίσης, η άκρη της κεφαλής θα πρέπει να βρίσκεται κάθετα με το άκρο του καλουπιού. Οι δύο παραπάνω προϋποθέσεις για την ομαλή εκτέλεση της κατεργασίας προσδιόρισαν τον τρόπο κίνησης του ρομπότ.

Αναφορικά με τις ταχύτητες κίνησης της κεφαλής και του καλουπιού, αυτές θα πρέπει να συγχρονίζονται ανάλογα με την θέση της κεφαλής σε σχέση με το καλούπι. Ο συγχρονισμός αυτός καθορίζεται με βάση την διάμετρο του καλουπιού στο σημείο που βρίσκεται η κεφαλή. Υπάρχουν δύο τρόποι για την επίτευξή του, όπως ίσχυε και στο κυλινδρικό καλούπι. Ο πρώτος γίνεται με κρατώντας σταθερή την ταχύτητα περιστροφής του καλουπιού και μεταβάλλοντας την ταχύτητα κίνησης του ρομπότ και ο δεύτερος με το αντίστροφο δηλαδή σταθερή κίνηση του ρομπότ και μεταβαλλόμενη περιστροφική κίνηση στο καλούπι. Τελικά, χρησιμοποιήθηκε ο πρώτος τρόπος.

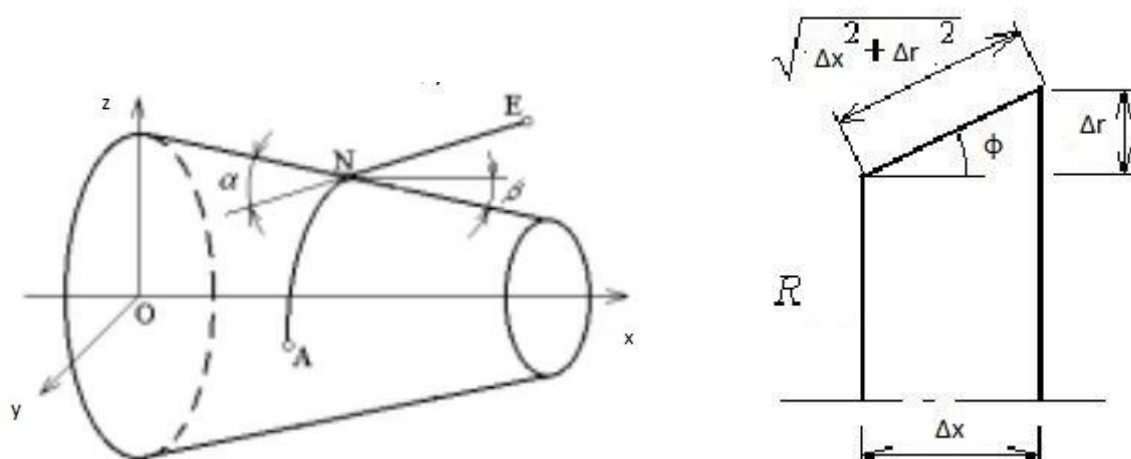
Για τον υπολογισμό των ταχυτήτων, θα έπρεπε να υπολογιστούν οι τιμές των ταχυτήτων για τις δύο ακραίες τιμές των διαμέτρων και να δημιουργηθεί ένα γραμμικό προφίλ ταχύτητας και να εισαχθεί είτε στον ελεγκτή του ρομπότ είτε στον ελεγκτή του βηματικού κινητήρα. Η πραγματοποίηση των παραπάνω δεν κατέστη εφικτή καθώς ο ελεγκτής του ρομπότ δεν διαθέτει την παραπάνω διαδικασία ενώ για την δημιουργία προφίλ ταχύτητας στον ελεγκτή που διαθέτει το εργαστήριο, με συγκεκριμένη επιτάχυνση και επιβράδυνση, θα έπρεπε η ταχύτητα του κινητήρα να ξεκινάει από το μηδέν. Αυτό θα είχε αρνητικές συνέπειες στον τροχιά της ίνας πάνω στο καλούπι.

Για να ξεπεραστούν οι παραπάνω περιορισμοί και να μπορούν οι ταχύτητες να εισαχθούν στον ελεγκτή του ρομπότ, θεωρήθηκε ότι ο κώνος αποτελείται από μια σειρά από κυλίνδρους, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 8-15 Χωρισμός κώνου σε κυλίνδρους

Για κάθε κύλινδρο είναι δυνατό πλέον να υπολογιστεί η ταχύτητα με βάση τους τύπους που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο.



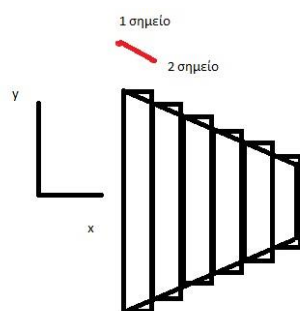
Εικόνα 8-16 Σύστημα συντεταγμένων (αριστερά)- αποστάσεις σε κομμάτι του κώνου(δεξιά)

Στην περίπτωση της παρούσας διπλωματική ο κώνος χωρίστηκε σε 12 κυλίνδρους μήκους $\Delta x = 10\text{mm}$. Άρα η διάμετρος κάθε κυλίνδρου, ξεκινώντας από την μεγαλύτερη, μειώνεται κατά:

$$\Delta r = \tan\phi * \Delta x = 2.08\text{mm}$$

Έχοντας πλέον τις διαμέτρους κάθε κυλίνδρου, και ορίζοντας ως ταχύτητα περιστροφής του καλούπιού τα 27 rpm, που από την χαρακτηριστική ροπής στροφών του κινητήρα, στο σημείο αυτό έχει την δυνατότητα να παρέχει την μέγιστη ροπή, υπολογίζεται η ταχύτητα κίνησης του ρομποτικού βραχίονα για κάθε κομμάτι της κίνησής του (απόσταση μεταξύ των άκρων του κυλίνδρου). Οι ταχύτητες αυτές αποθηκεύονται σε πίνακα στην αρχή του προγράμματος που υλοποιήθηκε για την κίνηση του ρομπότ.

Η κίνηση του ρομποτικού βραχίονα έγινε με βάση τις προδιαγραφές που παρουσιάστηκαν στην αρχή της ενότητας. Αρχικά, με την χρήση του χειριστηρίου το τελικό σημείο δράσης τοποθετήθηκε στην μεγαλύτερη διάμετρο του κώνου και σε απόσταση ίση με την διάμετρο του σημείου αυτού. Το σημείο αυτό αποθηκεύτηκε στο πρόγραμμα που κινεί το ρομπότ. Για το δεύτερο σημείο που απαιτείται για την κίνηση, αυτό προσδιορίστηκε με βάση το μήκος του κυλίνδρου που αντιστοιχεί στο κομμάτι της κίνησης, δηλαδή μετατόπιση κατά 10mm κατά τον άξονα x και 2 mm κατά τους άξονες y και z για να διατηρηθεί η ζητούμενη απόσταση από το καλούπι με την πρώτη μετατόπιση (κατά y) και το νήμα να είναι κάθετο στο σημείο που τοποθετείται με την δεύτερη μετατόπιση (κατά z).



Εικόνα 8-17 Γραφική αναπαράσταση κίνησης κεφαλή ρομπότ

Ο ορισμός των νέων σημείων έγινε με την χρήση της εντολής SHIFT της V+. Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε και για τα υπόλοιπα σημεία του καλουπιού.

Κατά την διάρκεια των πειραμάτων, το κυριότερο πρόβλημα που παρατηρήθηκε είναι ότι με την ύπαρξη κλίσης στο καλούπι και την χρήση απλού νήματος, αυτό γλιστρούσε από τη θέση του. Για την προσομοίωση της ύπαρξης κάποιας ρητίνης που θα μείωνε την εμφάνιση του φαινομένου αυτού, το καλούπι καλύφθηκε πλήρως με ταινία διπλής όψης του εμπορίου.

Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι θα πρέπει να υπάρχει μία περίοδος κατά την οποία όταν η κεφαλή βρίσκεται στα άκρα του καλουπιού, να μην κινείται για να μπορέσει το νήμα να προλάβει να τυλιχθεί με τον επιθυμητό τρόπο, όπως έγινε και με το κυλινδρικό καλούπι. Το χρονικό αυτό διάστημα, εξαρτάται από το σε ποιο άκρο βρίσκεται η κεφαλή.

Για το χρονικό διάστημα στην μικρή διάμετρο:

$$\Delta t = \frac{60l \tan \alpha}{\pi D n}$$

Όπου $l=35\text{mm}$ (μέτρηση) και $D = 26\text{mm}$ (μέση διάμετρος). Προκύπτει

$$\Delta t \cong 3 \text{ sec}$$

Για το χρονικό διάστημα στην μικρή διάμετρο:

$$\Delta t = \frac{60l \tan \alpha}{\pi D n}$$

Όπου $l=60\text{mm}$ (μέτρηση) και $D = 45\text{mm}$ (μέση διάμετρος). Προκύπτει

$$\Delta t \cong 6 \text{ sec}$$

Τελικά υπολογίστηκαν τα διαστήματα αυτά να είναι 3 sec και 6sec για το άκρο με την μικρότερη και μεγαλύτερη διάμετρο αντίστοιχα.

Ο κώδικας που γράφτηκε για την κίνηση του ρομπότ είναι ο εξής:

.PROGRAM CONE()

AUTO slun

ATTACH (slun ,4) "SERIAL:2"

SET a1= TRANS(16.56, -650, -12.4, -78.35, 90, 0.3)

speed.array[1]=22.8

speed.array[2]=19

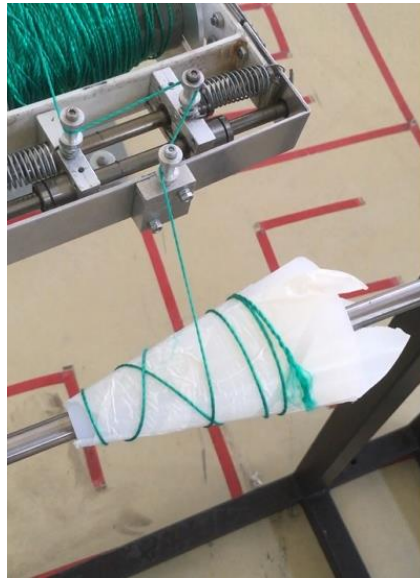
speed.array[3]=15

speed.array[4]=13

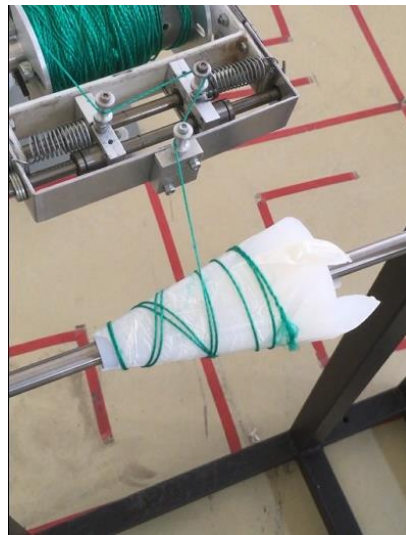
```
speed.array[5]=12
speed.array[6]=10
speed.array[7]=8
speed.array[8]=6
SPEED 17 MMPS AKWAYS
MOVES a1
BREAK
WRITE (slun) ">"
DELAY 10

FOR t=1 TO 5
  FOR i=1 TO 8
    SET a1=SHIFT (a1 BY -10,-2,-2)
    SPEED speed.array[i] MMPS
    MOVES a1
  END
  DELAY 3
  FOR n=8 TO 1 STEP -1
    SET a1=SHIFT (a1 BY 10,2,2)
    SPEED speed.array[n] MMPS
    MOVES a1
  END
  DELAY 6
END
WRITE (slun) "s"
DETACH (slun)
```

Στη συνέχεια παρουσιάζονται φωτογραφίες που ελήφθησαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων:



Εικόνα 8-18 Κωνικό καλούπι, αρχή κατασκευής



Εικόνα 8-19 Κωνικό καλούπι, ενδιάμεση φάση



Εικόνα 8-20 Κωνικό καλούπι, τελικό αποτέλεσμα

9

Συμπεράσματα- Μελλοντικές Επεκτάσεις

9.1 Συμπεράσματα

Από την εκτέλεση των πειραμάτων προέκυψε ότι η ρομποτική διάταξη που δημιουργήθηκε (κεφαλή και βάση για την στήριξη του καλουπιού) εκτελεί με επιτυχία τον σκοπό για τον οποίο κατασκευάστηκε. Το αποτέλεσμα της κατεργασίας για το κυλινδρικό καλούπι είναι ικανοποιητικό. Επιπλέον είναι δυνατή η περιέλιξη ινών και γύρω από καλούπι πιο σύνθετης γεωμετρίας που στην περίπτωση μας είναι το κωνικό.

Αναλυτικότερα τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τα πειράματα είναι:

- Θα πρέπει να υπάρχει σωστός συγχρονισμός των ταχυτήτων της κεφαλής και του καλουπιού. Ο τρόπος που επιτυγχάνεται παρουσιάστηκε στο κυρίως μέρος της διπλωματικής.
- Θα πρέπει να γίνει σωστή τοποθέτηση της κεφαλής στα αρχικά σημεία. Η επιλογή αυτή επηρεάζει την σωστή λειτουργία του προγράμματος του ρομπότ. Επιπλέον, λανθασμένος υπολογισμός θα έχει αρνητικές συνέπειες στην τροχιά της ίνας ιδιαίτερα στα άκρα του καλουπιού.
- Η μεγαλύτερη γωνία περιέλιξης έχει ως συνέπεια την παροχή ομοιόμορφου αποτελέσματος σε μεγαλύτερο μέρος του καλουπιού, και ιδιαίτερα στα άκρα του.
- Ανάλογα με την σύνθεση των ινών είναι πιθανή η τροχιά τους να μην είναι η επιθυμητή καθώς υπάρχει η πιθανότητα να μην μένουν στην θέση που τοποθετούνται.

9.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Το σύστημα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας θα μπορούσε να βελτιωθεί και να επεκταθεί περαιτέρω, ως προς τις παρακάτω κατευθύνσεις:

- Τοποθέτηση μεγαλύτερου κινητήρα για την περιστροφή του καλουπιού.

-
- Την κατασκευή του σκελετού από αλουμίνιο για μεγαλύτερη ανθεκτικότητα και στιβαρότητα με κατεργασία αποβολής υλικού
 - Πειράματα με ποιο σύνθετα καλούπια όπως για παράδειγμα elbow. Η κίνηση θα μπορούσε να προέλθει είτε από κάποιο εμπορικό πακέτο όπως Cadfil, CADMAC, CADFIBER/CADWIND, ComprosaD μετά από την απαραίτητη μετατροπή για να μπορεί να ελεγχθεί από τον ρομποτικό βραχίονα είτε να υπολογιστεί η γεωδαισιακή τροχιά και με βάση αυτή να προκύψουν οι κινήσεις του κινητήρα και των αρθρώσεων του ρομπότ.
 - Πειράματα στα οποία το νήμα θα έχει αντικατασταθεί από κάποιο σύνθετο υλικό για παράδειγμα ανθρακονήματα.

10

Βιβλιογραφία

- [1] Κ. Κυριακόπουλος, “Εισαγωγικές σημειώσεις ρομποτικής,” *Σημειώσεις μαθημάτων Ε.Μ.Π.*, pp. 1–7, 2004.
- [2] Α. Χρονόπουλος, “Προγραμματισμός Ρομπότ για Κύτταρα Κατεργασιών σε Περιβάλλον CAD με Χρήση Περιορισμών,” *Διπλωματική Εργασία*, pp. 1–36, 2007.
- [3] Ε. Μάνου, “Προγραμματισμός Ρομπότ σε Περιβάλλον Εικονικής Πραγματικότητας με τη Βοήθεια Μαγνητικού Αισθητήρα,” *Διπλωματική Εργασία*, pp. 18–26, 2015.
- [4] Z. Pan, J. Polden, N. Larkin, S. Van Duin, and J. Norrish, “Recent progress on programming methods for industrial robots,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 28, no. 2, pp. 87–94, 2012.
- [5] *V + Language*. Adept Technology Inc, 1997.
- [6] *Instructions for Adept Utility Programs*. Adept Technology Inc, 1997.
- [7] *V + Language User 's Guide*. Adept Technology Inc, 1997.
- [8] *V + Operating System User 's Guide*. Adept Technology Inc, 1997.
- [9] S. T. Peters, “Filament Winding,” *ASM Handb.*, vol. 21, pp. 536–548, 2011.
- [10] L. AINSWORTH, *The state of filament winding*, vol. 2. 1971.
- [11] S. Koussios, *Filament Winding: A Unified Approach*. 2004.
- [12] Ι. Κούστα, “Ανάπτυξη Ρομποτικής Κεφαλής Τύλιξης Ινών για Κατασκευή Τεμαχίων από Σύνθετα Υλικά,” Ε.Μ.Π., 2016.
- [13] N. Akkus, G. Genc, and C. Girgin, “Control of the pretension in filament winding process,” vol. 2, no. 3, pp. 5–10, 2008.
- [14] I. Skjaerholt and I. Skjærholt, “Integration Tools for Design and Process Control of Filament Winding,” *Nor. Univ. Sci. Technol. Master Thesis*, no. June, p. 144, 2012.
- [15] F. C. Campbell, “Chapter 5 - Ply Collation: A Major Cost Driver BT - Manufacturing Processes for Advanced Composites,” Amsterdam: Elsevier Science, 2004, pp. 131–173.

-
- [16] M. Munro, "Review of manufacturing of fiber composite components by filament winding," *Polym. Compos.*, vol. 9, no. 5, pp. 352–359, 1988.
- [17] A. Anglani, F. Nucci, and A. Spagnolo, "Filament Winding : Simulation for Robotic Cell Design," *Comput. Aided Des.*, pp. 603–608, 2002.
- [18] J. Xu, H. Yang, M. Liu, J. Tian, and B. Liu, "Research on winding trajectory planning for elbow pipe based on industrial robot," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, pp. 1–9, 2017.
- [19] W. Zhong, H. Yang, H. Li, and J. Xu, "Control system design of robotized filament winding for elbow pipe," *Proc. 2013 2nd Int. Conf. Meas. Inf. Control. ICMIC 2013*, vol. 2, pp. 1081–1085, 2013.
- [20] "Arduino." [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/>.
- [21] "Arduino - Wikipedia." [Online]. Available: <https://el.wikipedia.org/wiki/Arduino>.
- [22] "Εισαγωγή στο Arduino." [Online]. Available: <https://deltahacker.gr/arduino-intro/>.
- [23] E. Κυριακόπουλος, "' Κατασκευή μηχανής επιλεκτικής τήξης - πυροσυσσωμάτωσης με laser (SLS-SLM): Έλεγχος συστήματος εναπόθεσης σκόνης , έλεγχος και παραμετροποίηση διάταξης laser ,'" NTUA, 2016.
- [24] E. Παπαδόπουλος, *Ηλεκτρομηχανικά Συστήματα Μετατροπής Ενέργειας*. NTUA Press, 1999.
- [25] Sparkfun, "Big Easy Driver Hookup Guide." [Online]. Available: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/big-easy-driver-hookup-guide>.
- [26] "Easy Driver Examples." [Online]. Available: <http://www.schmalzhaus.com/EasyDriver/Examples/EasyDriverExamples.html>.
- [27] D. Trajkovski, "Kinematic Analysis of Trajectory Generation Algorithms for Filament Winding Machines," *Proc. 11th World Congr. Mech. Mach. Sci.*, 2003.

11

Παράρτημα

11.1 Κώδικες

11.1.1 Γνωστή ταχύτητα κεφαλής, εύρεση περιστροφικής ταχύτητας

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%                               MAIN PROGRAM
%Υπολογισμος ταχυτητας περιστροφis καλουπιου με bash gnwsti diametro
%καλουπιου, gwnias perieliksis kai taxytitas kinshs ths kefalis
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
a=45; %gwnia perieliksis se moires
a_rad= degtorad(a); %metatropi apo deg to rad

D=40; % diametros se mm
D_m=D/1000; %metatropi apo mm se m

Vc=20; %taxuthta toy robot mm/s
Vc_ms=Vc*0.001; %metatropi se m/s

N=(tan(a_rad)*60*Vc_ms)/(pi*D_m) %ypologismos strofwn kaloypiou

d1=7.85; %diametros troxalias aksona kinitita
d2=11.89; % diametros troxalias aksona kaloypiou

i=d1/d2; %sxesi metadosis
n1=N*d2/d1 %strofes ston kinititra

```


11.1.2 Γνωστή περιστροφική ταχύτητα, εύρεση ταχύτητα κεφαλής

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%                               MAIN PROGRAM
%Υπολογισμος ταχυτητας κινησης της κεφαλis με bash γνωsti diametro
%καλουριου, gwnias perieliksis kai taxyhtas peristrofis kaloupiou
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

a=45; %gwnia perieliksis se moires
a_rad= degtorad(a); %metatropi apo deg to rad

D=40; % diametros se mm
D_m=D/1000; %metatropi apo mm se m

N=10; %taxitita peristrofis kaloupiou se RPM

Vc=(pi*D_m*N)/(tan(a_rad)*60) %taxitita kefalis se m/s

Vc_mmmps=Vc*1000 ; %metatropi se mm/s

d1=7.85; %diametros troxalias aksona kinitita
d2=11.89; % diametros troxalias aksona kaloypiou

i=d1/d2; %sxesi metadosis
n1=N*d2/d1 %strofes ston kinitira

```

11.1.3 Πρόγραμμα ρομποτικού βραχίονα για κυλινδρικό καλούπι

```

.PROGRAM CYL()

    AUTO slun

    ATTACH (slun ,4) "SERIAL:2"

    SET start = TRANS(16.56, -678.01, -32.62, -88.35, 88.92, 0.65)

    SET end= TRANS(339.51, -682.92, -17.15, -89.66, 90.6, 7.39)

    SPEED 17 MMPS AKWAYS

    MOVES start

    BREAK

    WRITE (slun) ">"

    DELAY 10

    FOR t = 1 TO 5

        MOVES end

        BREAK

        DEALAY 6

        MOVES start

```

```
BREAK
DELAY 6
END
WRITE (slun) "s"
DETACH (slun)
```

11.1.4 Πρόγραμμα ρομποτικού βραχίονα για κωνικό καλούπι

```
.PROGRAM CONE()
  AUTO slun
  ATTACH (slun ,4) "SERIAL:2"
  SET a1= TRANS(16.56, -650, -12.4, -78.35, 90, 0.3)
  speed.array[1]=22.8
  speed.array[2]=19
  speed.array[3]=15
  speed.array[4]=13
  speed.array[5]=12
  speed.array[6]=10
  speed.array[7]=8
  speed.array[8]=6
  SPEED 17 MMPS AKWAYS
  MOVES a1
  BREAK
  WRITE (slun) ">"
  DELAY 10

  FOR t=1 TO 5
    FOR i=1 TO 8
      SET a1=SHIFT (a1 BY -10,-2,-2)
      SPEED speed.array[i] MMPS
      MOVES a1
    END
  END
  DELAY 3
```

```
FOR n=8 TO 1 STEP -1
    SET a1=SHIFT (a1 BY 10,2,2)
    SPEED speed.array[n] MMPS
    MOVES a1
END
DELAY 6
END
WRITE (slun) "s"
DETACH (slun)
```