

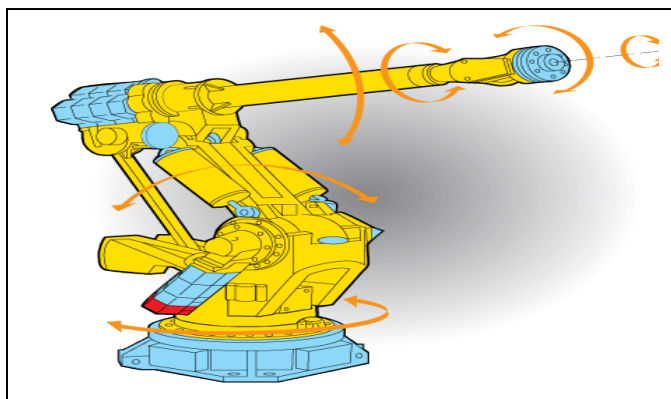


**ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ**

ΘΕΜΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

"Ρομποτικός Βραχίονας 4 Βαθμών Ελευθερίας"



ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΗ: ΠΡΟΚΟΠΗΣ ΚΙΟΥΣΗΣ ΑΜ:41896

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΜΙΧΑΛΗΣ ΠΑΠΟΥΤΣΙΔΑΚΗΣ

ΑΙΓΑΛΕΩ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2017

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο /~~Η~~ κάτωθι υπογγραμμένος/α ΠΡΟΚΟΠΗΣ ΚΙΟΥΣΗΣ,
του ... ΓΕΩΡΓΙΟΥ, με αριθμό μητρώου ... 41896
φοιτητής / ~~τρια~~ του Τμήματος Μηχανικών Αυτοματισμού Τ.Ε. του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ. πριν
αναλάβω την εκπόνηση της Πτυχιακής Εργασίας μου, δηλώνω ότι ενημερώθηκα για τα
παρακάτω

«Η Πτυχιακή Εργασία (Π.Ε.) αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο του
συγγραφέα, όσο και του Ιδρύματος και θα πρέπει να έχει μοναδικό χαρακτήρα και πρωτότυπο
περιεχόμενο.

Απαγορεύεται αυστηρά οποιοδήποτε κομμάτι κειμένου της να εμφανίζεται αυτούσιο ή
μεταφρασμένο από κάποια άλλη δημοσιευμένη πηγή. Κάθε τέτοια πράξη αποτελεί προϊόν
λογοκλοπής και εγείρει θέμα Ηθικής Τάξης για τα πνευματικά δικαιώματα του άλλου
συγγραφέα. Αποκλειστικός υπεύθυνος είναι ο συγγραφέας της Π.Ε., ο οποίος φέρει και την
ευθύνη των συνεπειών, ποινικών και άλλων, αυτής της πράξης.

Πέραν των όποιων ποινικών ευθυνών του συγγραφέα σε περίπτωση που το Ίδρυμα του
έχει απονεμίσει Πτυχίο, αυτό ανακαλείται με απόφαση της Συνέλευσης του Τμήματος. Η
Συνέλευση του Τμήματος με νέα απόφασης της, μετά από αίτηση του ενδιαφερόμενου, του
αναθέτει εκ νέου την εκπόνηση της Π.Ε. με άλλο θέμα και διαφορετικό επιβλέποντα καθηγητή.
Η εκπόνηση της εν λόγω Π.Ε. πρέπει να ολοκληρωθεί εντός τουλάχιστον ενός ημερολογιακού
δμήνου από την ημερομηνία ανάθεσης της. Κατά τα λοιπά εφαρμόζονται τα προβλεπόμενα στο
άρθρο 18, παρ. 5 του ισχύοντος Εσωτερικού Κανονισμού.»

Ο Δηλών



ΠΡΟΚΟΠΗΣ ΚΙΟΥΣΗΣ

Ημερομηνία

18/09/2017

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός ρομποτικού βραχίονα τεσσάρων βαθμών ελευθερίας με χειροκίνητη και αυτόματη λειτουργία. Ο βραχίονας αποτελείται από μια άρθρωση με ελεύθερη κίνηση, μία στροφική άρθρωση και μια αρπάγη. Είναι σχεδιασμένος και προγραμματισμένος να μεταφέρει ένα αντικείμενο μεταξύ δύο σημείων με αυτοματοποιημένη point to point κίνηση. Επίσης με τη χρήση joystick, ποτενσιόμετρων, διακοπών και κουμπιών ο χρήστης θα μπορεί να ελέγχει τις κινήσεις του αλλά και να αποθηκεύσει στη μνήμη του μικροελεγκτή μια σειρά κινήσεων ώστε με το πάτημα ενός κουμπιού ο βραχίονας θα εκτελέσει τις κινήσεις που του όρισε ο χρήστης. Ο έλεγχος γίνεται με την χρήση της πλατφόρμας Arduino Uno.

Περιεχόμενα

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	1
Περίληψη	2
Περιεχόμενα.....	3
Κατάλογος Εικόνων	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο	7
1. Εισαγωγή στη Ρομποτική	7
1.1. Τι είναι η ρομποτική - Ορισμός.....	7
1.2. Ιστορικά Στοιχεία.....	8
1.3. Σύγχρονες Εφαρμογές.....	10
1.4. Είδη και κατηγορίες ρομπότ	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο	15
2. Ρομποτικοί Βραχίονες.....	15
2.1. Δομικά χαρακτηριστικά.....	15
2.1.1. Είδη Αρθρώσεων	16
2.1.2. Βαθμοί ελευθερίας και κινητικότητας	17
2.1.3. Ενεργοποιητές-Κινητήρες.....	18
2.1.4. Χώρος εργασίας.....	20
2.1.5. Ελεγκτής	20
2.2. Είδη ρομποτικού βραχίονα	20
2.2.1 Καρτεσιανοί ρομποτικοί βραχίονες	21
2.2.2. Κυλινδρικοί ρομποτικοί βραχίονες.....	22
2.2.3. Σφαιρικοί ρομποτικοί βραχίονες.....	22
2.2.4. Ρομποτικοί βραχίονες SCARA.....	22
2.2.5. Αρθρωτοί ρομποτικοί βραχίονες	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο	24
3. Κινηματική Θεωρία	24
3.1. Εισαγωγή στην κινηματική.....	24
3.2. Κινηματική αλυσίδα	24

3.3. Ευθύ κινηματικό πρόβλημα.....	25
3.4. Μέθοδος Denavit – Hartenberg	26
3.5. Αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα.....	27
Κεφάλαιο 4°	29
4. Σχεδιασμός και υλοποίηση ρομποτικού βραχίονα.....	29
4.1. Εισαγωγή	29
4.2. Περιγραφή λειτουργίας του ρομποτικού βραχίονα	29
4.3. Εξαρτήματα.....	30
4.3.1. Μηχανολογικά στοιχεία.....	31
4.3.2 Ηλεκτρονικά Στοιχεία.....	34
4.4. Ηλεκτρονικό κύκλωμα.....	37
4.5. Συναρμολόγηση ρομποτικού βραχίονα	40
4.6. Το Arduino.....	45
4.6.1. Είσοδοι – Έξοδοι	46
4.6.2. Μνήμη.....	48
4.7. Επίλυση ευθύ κινηματικού προβλήματος.....	48
4.8. Επίλυση αντίστροφου κινηματικού προβλήματος.....	52
4.9. Ανάλυση κώδικα του Arduino.....	54
5. Συμπεράσματα και Μελλοντικές Βελτιώσεις.....	62
5.1.Συμπεράσματα	62
5.2. Μελλοντικές βελτιώσεις	62
Βιβλιογραφία	63
Ιστοσελίδες	63

Κατάλογος Εικόνων

1.1. Σχέδιο για το αυτόματο άνοιγμα πόρτας Ναού.....	8
1.2. Ρομποτικός βραχίονας βιομηχανικών διεργασιών.....	10
1.3. Ρομποτικό χέρι.....	11
1.4. Βραχίονας χειρουργικών επεμβάσεων.....	11
1.5. Ρομπότ με μηχανικά πόδια για την μεταφορά υλικών.....	12
1.6. Κινούμενο ρομπότ με τροχούς.....	12
1.7. Ρομπότ με μηχανικά πόδια.....	13
1.8. Υποβρύχιο Ρομπότ.....	13
1.9. Εναέριο τηλεκατευθυνόμενο ρομπότ.....	14
2.1. Διάταξη ρομποτικού βραχίονα.....	16
2.2. Είδη ρομποτικών αρθρώσεων.....	17
2.3. AC και DC κινητήρες.....	19
2.4. Βηματικός κινητήρας.....	19
2.5. Κινητήρας Servo.....	19
2.6. Υδραυλικά Έμβολα.....	19
2.7. Είδη ρομποτικού βραχίονα.....	21
2.8. Βραχίονας Gantry.....	22
2.9. Ρομποτικός βραχίονας SCARA.....	23
4.1. Μέρη του σκελετού του βραχίονα.....	31
4.2. Εσωτερική διάταξη σερβοκινητήρα.....	32
4.3. Hitec Connector.....	33
4.4. Futaba Connector.....	33

4.5. Σερβοκινητήρας MG995	33
4.6. Σερβοκινητήρας JX5521MG	34
4.7. Φωτοαντίσταση	35
4.8. Ποτενσιόμετρο	35
4.9. Joystick	36
4.10. Push button	36
4.11. Διακόπτης	37
4.12. LED	37
4.13. Κύκλωμα εργασίας	39
4.14. Ξύλινη βάση εργασίας	40
4.15. Τοποθέτηση πλακέτας, ελεγκτή και πάνελ	41
4.16. Βάση βραχίονα	41
4.17. Βάση και σύνδεσμος βραχίονα	42
4.18. Αρπάγη	42
4.19. Πλάγια όψη διάταξης ρομποτικού βραχίονα	43
4.20. Κάτοψη διάταξης βραχίονα	44
4.21. Συνολική διάταξη	45
4.22. Πλατφόρμα Arduino Uno	46
4.23. Ρομποτικός βραχίονας άξονες Y,Z πλάγια όψη διάταξη	49
4.24. Κίνηση βραχίονα γύρω από τον άξονα Z κάτοψη διάταξης	49

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

1. Εισαγωγή στη Ρομποτική

1.1. Τι είναι η ρομποτική - Ορισμός

Ρομποτική είναι ο σύγχρονος επιστημονικός κλάδος ο οποίος ασχολείται με τη σύλληψη, τη σχεδίαση, την κατασκευή, τη θεωρία και τις εφαρμογές των ρομπότ. Σύμφωνα με το Robot Institute της Αμερικής τα ρομπότ είναι αναπρογραμματιζόμενοι και πολυλειτουργικοί χωρικοί μηχανισμοί, σχεδιασμένοι να μετακινούν υλικά, αντικείμενα, τεμάχια, εργαλεία ή εξειδικευμένες συσκευές, με κατάλληλες προγραμματισμένες κινήσεις που στοχεύουν στη βελτίωση της απόδοσης μιας σειράς εργασιών. Η χρήση τους αποσκοπεί στην αντικατάσταση του ανθρώπου στην εκτέλεση εργασιών που αφορά τόσο το φυσικό επίπεδο, όσο και το επίπεδο λήψης απόφασης.

Το κύριο πλεονέκτημα των ρομπότ είναι η ευελιξία τους. Μπορούν να προσαρμοστούν σε διάφορα προϊόντα στην ίδια γραμμή παραγωγής, όπως απαιτούν οι αλλαγές αγοράς, αλλά και να επαναπρογραμματιστούν, έτσι ώστε να είναι κατάλληλα για μικρές ή μεγάλες μεταβολές στη γραμμή παραγωγής.

Η εξέλιξη των ρομπότ έχει περάσει από πολλά στάδια. Τα ρομπότ της πρώτης γενιάς δεν είχαν την ικανότητα υπολογισμού και αίσθησης, σε αντίθεση με τα ρομπότ της δεύτερης γενιάς, τα οποία διαθέτουν περιορισμένη υπολογιστική ισχύ, γλώσσες προγραμματισμού υψηλού επιπέδου και αισθητήρες ανατροφοδότησης. Τα ρομπότ της τρίτης γενιάς διαθέτουν νοημοσύνη δηλαδή είναι ικανά να παίρνουν αποφάσεις κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της εργασίας τους. Τις ικανότητες αυτές τις αποκτούν μέσω τεχνικών της τεχνητής νοημοσύνης σε συνδυασμό με εξελιγμένες μορφές αισθητήρων αφής, δύναμης, απόστασης, όρασης κ.α. Τα βιομηχανικά ρομπότ είναι εξελιγμένα συστήματα αυτοματισμού, που χρησιμοποιούν ηλεκτρονικό υπολογισή προκειμένου να επιτευχθεί ο έλεγχός τους. Σήμερα οι υπολογιστές αποτελούν ένα αναπόσπαστο τμήμα του βιομηχανικού αυτοματισμού. Κατευθύνουν γραμμές παραγωγής και ελέγχουν συστήματα κατασκευής (όπως εργαλειομηχανές, συγκολλητές, κοπτικές διατάξεις LASER κ.α.) Τα νέα ρομπότ εκτελούν πληθώρα εργασιών στα βιομηχανικά συστήματα και γενικά συμμετέχουν στον πλήρη αυτοματισμό των εργοστασίων.

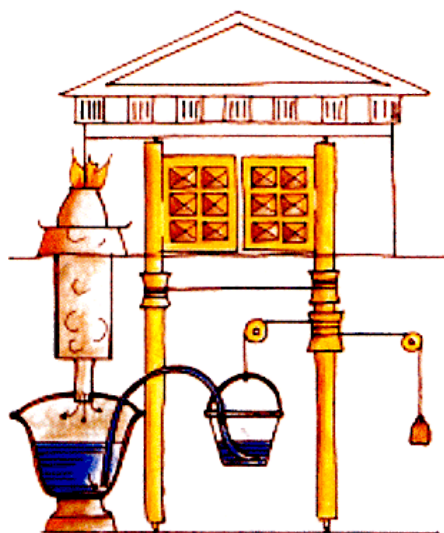
Η έρευνα στην περιοχή της ρομποτικής εκτείνεται σε τρεις κυρίως κατευθύνσεις. Η πρώτη αφορά την εφαρμογή ή την ανάπτυξη τεχνικών ελέγχου για τη βελτίωση της απόδοσης των ρομπότ. Η δεύτερη αφορά την εφαρμογή και την ανάπτυξη λογισμικού για τη διαχείριση των εργασιών των ρομπότ. Και η τρίτη σχετίζεται με τη σχεδίαση υλικού υπολογιστών για την εκτέλεση του λογισμικού και την καλύτερη επικοινωνία με τους αισθητήρες και τους ενεργοποιητές των ρομπότ. Είναι γεγονός ότι η ρομποτική ωφελείται από τις εξελίξεις σε

αρκετούς κλάδους, όπως είναι η ηλεκτρολογία, η μηχανολογία, τα μαθηματικά κ.α.

Τα ρομπότ αποτελούνται από δύο υποσυστήματα προκειμένου να εκτελέσουν την εργασία τους. Αυτά είναι το μηχανολογικό και της αίσθησης. Το μηχανολογικό υποσύστημα που αποτελείται από τη βάση του ρομπότ, τις αρθρώσεις, τους συνδέσμους κ.α. επιτρέπει στο ρομπότ να εκτελέσει τη λειτουργία του, σε συνδυασμό με το υποσύστημα της αίσθησης. Το υποσύστημα της αίσθησης συλλέγει πληροφορίες από τους αισθητήρες ή άλλα όργανα μέτρησης, ελέγχει την κατάσταση του ρομπότ, δέχεται και επεξεργάζεται τις εντολές που θα του δώσει ο χρήστης ή οι αισθητήρες και τα όργανα μέτρησης, τις επεξεργάζεται και τις μετατρέπει σε ισχύ για τους κινητήρες, οι οποίοι θα εκτελέσουν στο τέλος την εντολή.

1.2. Ιστορικά Στοιχεία

Η απαλλαγή από διάφορες χειρωνακτικές εργασίες δύσκολες και μονότονες, αποτελούσε πάντα ανθρώπινη επιθυμία. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την συνεχή έρευνα του ανθρώπου για την κατασκευή μιας ανθρωπόμορφης μηχανής. Αναζητώντας κανείς την αρχή της ρομποτικής, θα οδηγηθεί αρκετά πίσω στο χρόνο και συγκεκριμένα στην Ιλιάδα του Ομήρου. Τις πρώτες αναφορές για τα αυτόματα τις κάνει ο Όμηρος περιγράφοντας το εργαστήριο του θεού Ήφαιστου με τους αυτόματους τρίποδες, τα αυτορυθμιζόμενα φουσερά και τις χρυσές θερααινίδες. Οι θερααινίδες του Ήφαιστου μαζί με το μπρούτζινο γίγαντα Τάλω είναι οι πρώτες μυθολογικές αναφορές που γίνονται σε ανθρωποειδή αυτόματα ή αλλιώς ρομπότ. Οι θερααινίδες κατά τον Όμηρο, έμοιαζαν με κοπέλες οι οποίες είχαν φωνή, λογική και κίνηση όπως οι άνθρωποι, ενώ ο Τάλως ήταν ένα γιγάντιο μηχανικό υδραυλικό σύστημα με ανθρώπινη μορφή και κίνηση.



Εικόνα 1.1. Σχέδιο για το αυτόματο άνοιγμα πόρτας Ναού

Αναφορές αλλά και ανακαλύψεις (κατασκευές) γίνονταν σε όλη την περίοδο του αρχαίου κόσμου από αρκετούς μηχανικούς όπως ο Κτησίβιος, ο Φίλων και ο Ήρων ο Αλεξανδρινός. Όπως για παράδειγμα αυτόματοι βωμοί, αυτόματες πύλες ναού, αυτόματοι κερματοδέκτες κ.α. Για την κίνηση των αυτόματων χρησιμοποιούσαν διάφορα πνευματικά και βαρυτικά συστήματα κατά τα οποία τοποθετούσαν στην αρχή κάθε μηχανισμού βαρίδια ώστε να ξεκινήσει η κατασκευή να δουλεύει.

Εκτός από τον αρχαίο κόσμο η μηχανική και τα αυτόματα συνεχίστηκαν και στα Βυζαντινά χρόνια. Υπάρχουν αναφορές σε αυτόματα μουσικά όργανα καθώς και στον Σολομώντειο θρόνο της Μαγναύρας. Ο θρόνος αυτός είναι ίσως το κυριότερο αυτόματο αυτής της περιόδου μιας και το ύψος του αυξομειωνόταν αυτόματα.

Την περίοδο της Αναγέννησης συναντάμε αρκετές μελέτες του Leonardo da Vinci με κυριότερη ένα ρομπότ με μορφή πολεμιστή-ιππότη το οποίο μετακινεί τα χέρια του και περιστρέφει το κεφάλι του ανοιγοκλείνοντας το σαγόνι του.

Με την εμφάνιση του υπολογιστικού αριθμητικού ελέγχου CNC (Computer Numerical Control) αναπτύχθηκαν και τα βιομηχανικά ρομπότ. Η ανάπτυξη τους ξεκίνησε με τον εμπλουτισμό των χωρικών μηχανισμών με ενεργοποιητές και αργότερα με αισθητήρες και «εγκέφαλο» (κυρίως H/Y).

Η έννοια «ρομπότ» εμφανίστηκε και χρησιμοποιήθηκε το 1921 από τον Τσέχο δραματογράφο Karel Capek, ο οποίος χρησιμοποίησε αυτό τον όρο στο έργο του R.U.R. (Rossum's Universal Robots). Ο Capek εμπνεύστηκε τον όρο αυτό από τη Τσεχική λέξη *robot* η οποία σημαίνει καταναγκαστική εργασία. Στο έργο του ο συγγραφέας φαντάζεται ένα αυτόματο μηχανικό κατασκεύασμα το "Rossum" όπου στο τέλος στρέφεται τελικά εναντίον της αθροπότητας.

Ένας άλλος συγγραφέας επιστημονικής φαντασίας, ο Ρώσος Isaac Asimov, τη δεκαετία του 1940, προκειμένου να εξηγήσει την επιστήμη που ασχολείται με τα ρομπότ χρησιμοποίησε τον όρο «ρομποτική». Στη συνέχεια καθιερώθηκε ως όρος της επιστήμης για την μελέτη και ανάπτυξη των ρομπότ. Ο Asimov περιέγραψε τα ρομπότ σαν μια ανθρωποειδής μηχανή απαλλαγμένη από συναισθήματα η οποία προγραμματίζεται από έναν άνθρωπο-χρήστη με τέτοιο τρόπο ώστε το μυαλό του ρομπότ να ανταποκρίνεται σε συγκεκριμένες ηθικές αρχές. Ο όρος αυτός χρησιμοποιήθηκε εν τέλει ως σύμβολο της επιστήμης που είναι αφιερωμένη στη μελέτη των ρομπότ.

Το 1954 στις ΗΠΑ ο G.C.Devol χρησιμοποίησε τον όρο βιομηχανικό ρομπότ (*industrial robot*) για να περιγράψει το πώς μπορεί να κατασκευαστεί ένα ελεγχόμενο μηχανικό χέρι, το οποίο θα μπορεί να εκτελεί διάφορες εργασίες στη βιομηχανία, που μέχρι τότε τις έκανε ο άνθρωπος. Έτσι το πρώτο βιομηχανικό ρομπότ κατασκευάστηκε και λειτούργησε από την εταιρία

Unimation το 1961. Από τότε έχουν αναπτυχθεί και τεθεί σε λειτουργία χιλιάδες ρομπότ ανά τον κόσμο.

Οι πρώτες προσπάθειες κατασκευής ρομπότ απέχουν αρκετά από τα ανθρωπόμορφα μηχανήματα μιας και οι περισσότεροι ερευνητές δεν σκόπευαν να μιμηθούν τον άνθρωπο. Το ρομπότ της Unimation το οποίο αρχικά μπορούσε να κινεί ένα χέρι προς διάφορες κατευθύνσεις και να ανοιγοκλείνει την παλάμη του, ήταν η αρχή για να την εξάπλωση της επιστήμης της ρομποτικής με κατασκευές οι οποίες προσεγγίζουν σε μεγάλο βαθμό τις ανθρώπινες κινήσεις.

1.3. Σύγχρονες Εφαρμογές

Στη σύγχρονη εποχή οι ανάγκες σε ποικίλες εφαρμογές για ακρίβεια, ασφάλεια, δύναμη, ευελιξία μεταξύ των εφαρμογών και η ταχύτερη λειτουργία είναι απαραίτητες και στις περισσότερες περιπτώσεις η ικανότητα του ανθρώπου δεν επαρκεί. Για τον λόγο αυτό η ρομποτική όχι μόνο αναδύεται αλλά και κυριαρχεί. Έτσι, τα ρομπότ αντικαθιστούν σε αρκετές εφαρμογές τον άνθρωπο καθώς έχουν την δυνατότητα, εκτός από τα παραπάνω, να αυξήσουν μια γραμμή παραγωγής, να βελτιώσουν την ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων, να μειώσουν το κόστος αλλά και να τον αντικαταστήσουν σε αρκετές εφαρμογές που υπάρχει αυξημένος κίνδυνος τραυματισμού του. Γι'αυτό και χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό έχοντας συνεχή ανάπτυξη και έρευνα.



Εικόνα 1.2. Ρομποτικός βραχίονας βιομηχανικών διεργασιών

Κύριοι τομείς στους οποίους χρησιμοποιούνται τα ρομπότ είναι η βιομηχανία, ο στρατός και τα τελευταία χρόνια υπάρχει μια ραγδαία ανάπτυξη των ρομπότ στην ιατρική. Στη βιομηχανία χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως η μεταφορά υλικών, η ταξινόμηση αποθηκών, η συναρμολόγηση συσκευών και μηχανισμών, η συγκόλληση μεταλλικών κατασκευών και ηλεκτρικών στοιχείων, οι εργασίες σε επικίνδυνους και ανθυγιεινούς χώρους κ.α.



Εικόνα 1.3. Ρομποτικό χέρι

Σε στρατιωτικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται στην απόπλιση εκρηκτικών μηχανισμών, στην πλοήγηση, στη μεταφορά αγαθών, στα οπλικά συστήματα κ.α. Τις τελευταίες δεκαετίες η ρομποτική αναπτύσσεται στην ιατρική σε χειρουργικές επεμβάσεις ή σε προσομοίωση αυτών, σε διαγνώσεις ασθενειών αλλά και σε μηχανήματα αποκατάστασης ανθρώπινων μελών. Τα μηχανήματα αποκατάστασης όπως οι ρομποτικοί βραχίονες κ.α. μπορούν να χρησιμοποιηθούν πλέον από ανθρώπους μιας και οι κινήσεις γίνονται ολοένα πιο ρεαλιστικές και ανθρώπινες.



Εικόνα 1.4. Βραχίονας χειρουργικών επεμβάσεων

1.4. Είδη και κατηγορίες ρομπότ

Στη σημερινή εποχή τα ρομπότ καταλαμβάνουν ένα μεγάλο εύρος σε εφαρμογές και τομείς ανάπτυξης με αποτέλεσμα να υπάρχουν διάφορα είδη ρομπότ τα οποία προσαρμόζονται ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Τα κυριότερα είδη ρομπότ είναι τα εξής:

- Ρομπότ σταθερής βάσης: Το είδος των ρομπότ αυτών αποτελείται από μια βάση η οποία είναι σταθερή στο χώρο εργασίας των ρομπότ και πάνω σε αυτή είναι τοποθετημένοι σύνδεσμοι, αρθρώσεις και το εργαλείο τελικής δράσης. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι ρομποτικοί βραχίονες όπως αυτός που θα παρουσιασθεί και θα αναλυθεί στην παρούσα εργασία.

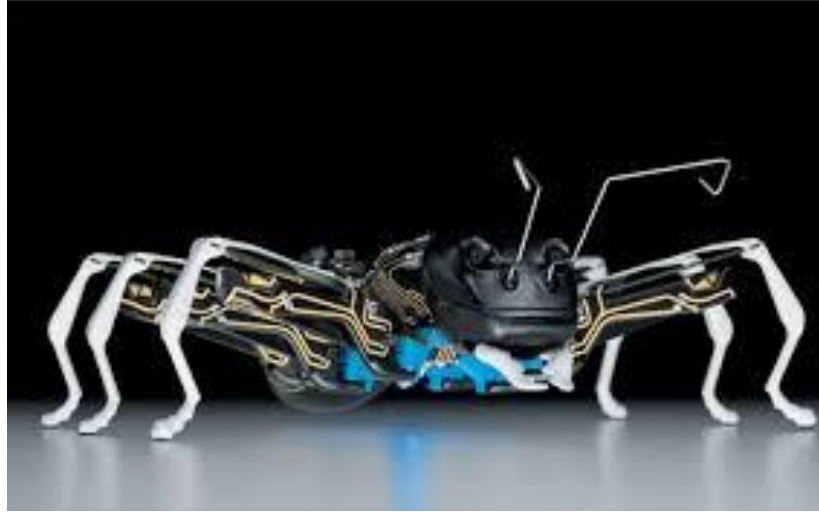


Εικόνα 1.5. Ρομπότ με μηχανικά πόδια για την μεταφορά υλικών

- Κινούμενα ρομπότ: Την κατηγορία αυτή αποτελούν ρομπότ τα οποία μπορούν να μετακινηθούν στο χώρο είτε με τροχούς, είτε με έλικες, είτε με προπέλες, είτε με μηχανικά πόδια κ.α. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχουν υποκατηγορίες κινούμενων ρομπότ ανάλογα με τον τρόπο κίνησής τους.



Εικόνα 1.6. Κινούμενο ρομπότ με τροχούς



Εικόνα 1.7. Ρομπότ με μηχανικά πόδια

Έτσι έχουμε:

- Έντροχα ρομπότ: Η κίνησή τους γίνεται με την χρήση τροχών.
- Βαδίζοντα ρομπότ: Για την κίνησή τους χρησιμοποιούνται μηχανικά πόδια διαφόρων τύπων.
- Εναέρια ρομπότ: Σε αυτήν την κατηγορία συναντάμε μη επανδρωμένα αεροπλάνα ή άλλα ιπτάμενα ρομπότ όπως drone.
- Υποβρύχια ρομπότ: Τα ρομπότ αυτά είναι κατάλληλα για υποθαλάσσιες λειτουργίες και κινούνται με τη χρήση προπέλας.



Εικόνα 1.8. Υποβρύχιο Ρομπότ

Όλα τα είδη ρομπότ μπορούν να εκτελέσουν μια λειτουργία ή μια κίνηση, είτε μέσω ενός χρήστη είτε αυτοματοποιημένα με την χρήση αισθητήρων και πομπών.



Εικόνα 1.9. Εναέριο τηλεκατευθυνόμενο ρομπότ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

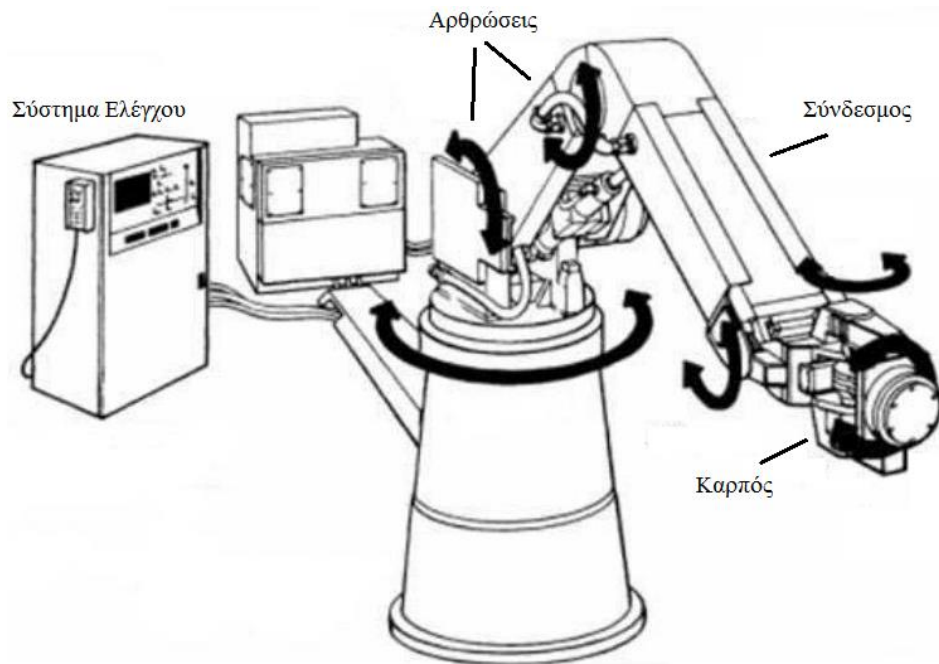
2. Ρομποτικοί Βραχίονες

2.1. Δομικά χαρακτηριστικά

Οι ρομποτικοί βραχίονες αποντελούνται από τη βάση, τις αρθρώσεις, τους συνδέσμους και το τελικό εργαλείο δράσης. Η βάση είναι στερεωμένη στον χώρο εργασίας του ρομποτικού βραχίονα και πάνω σε αυτή συνδέονται διαδοχικά οι αρθρώσεις, οι σύνδεσμοι με κατάληξη το τελικό εργαλείο δράσης. Οι σύνδεσμοι είναι ο «σκελετός» των ρομπότ και είναι στερεά σώματα. Οι αρθρώσεις είναι οι μηχανισμοί κίνησης μεταξύ των συνδέσμων. Τέλος, το εργαλείο τελικής δράσης είναι το εργαλείο με το οποίο το ρομπότ εκτελεί τη δοσμένη εργασία. Ανάλογα με την εργασία που εκτελεί ένας ρομποτικός βραχίονας, το εργαλείο τελικής δράσης μπορεί να προσαρμοστεί σε αυτή (π.χ. μπορεί να είναι εργαλείο ηλεκτροσυγκόλλησης, κατσαβίδι ή το συνηθέστερο να είναι μια αρπάγη). Η αρπάγη μπορεί και αυτή με τη σειρά της να έχει διάφορες μορφές όπως για παράδειγμα βεντούζα ή δαγκάνα κ.ά. Η αρίθμηση των αρθρώσεων και των συνδέσμων γίνεται από τη βάση του βραχίονα προς το εργαλείο τελικής δράσης, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Ο κάθε βραχίονας αποτελείται από τρία μέρη: α) τη βάση, β) τον κορμό και γ) τον καρπό του. Όπως προαναφέρθηκε η βάση είναι το στήριγμα του βραχίονα όπου πάνω σε αυτή βρίσκεται ο κορμός του ο οποίος αποτελείται από διαδοχικούς συνδέσμους και αρθρώσεις. Το εργαλείο τελικής δράσης κινείται με μια ομάδα αρθρώσεων που ονομάζεται «καρπός». Η κάθε άρθρωση αντιστοιχεί σε έναν βαθμό ελευθερίας, οπότε ένας βραχίονας ο οποίος έχει n αριθμό αρθρώσεων θα έχει και n βαθμούς ελευθερίας.

Ένας ρομποτικός βραχίονας αποτελείται ακόμα από ενεργοποιητές «κινητήρες», αισθητήρες, σύστημα επικοινωνίας «εγκέφαλο», που συνήθως είναι ηλεκτρονικός υπολογιστής, και σύστημα αυτόματου ελέγχου (Σ.Α.Ε.). Με την χρήση των παραπάνω ο χρήστης μπορεί να προγραμματίσει το ρομπότ ώστε αυτό να εκτελέσει μια σειρά κινήσεων.



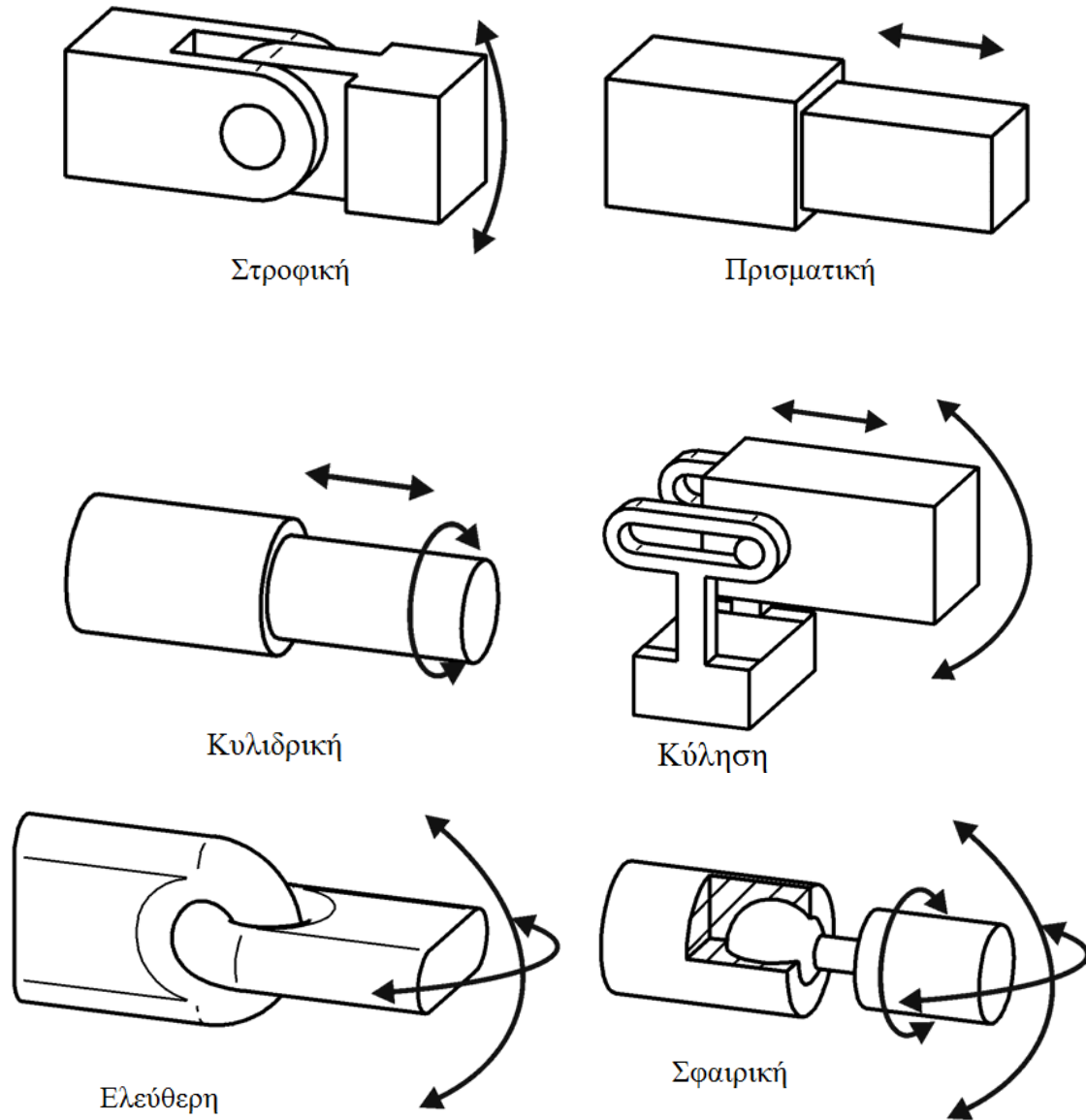
Εικόνα 2.1. Διάταξη ρομποτικού βραχίονα

2.1.1. Είδη Αρθρώσεων

Αρθρώσεις είναι οι διατάξεις οι οποίες συνδέουν δύο συνδέσμους μεταξύ τους. Με τη βοήθεια των ενεργοποιητών κινούν τους συνδέσμους και κατα συνέπεια τον βραχίονα. Στον χώρο των τριών διαστάσεων (μήκος, πλάτος και ύψος) οι κινήσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν μεταξύ δύο στερεών σωμάτων εκ των οποίων το ένα θεωρείται ακίνητο, είναι τρεις μεταφορικές κινήσεις στις διευθύνσεις των αξόνων του καρτεσιανού συστήματος και τρεις περιστροφικές κινήσεις.

Ένας βραχίονας με τη χρήση δύο αρθρώσεων μπορεί να κινηθεί μεταξύ δύο αξόνων X,Y (μήκος και πλάτος). Με τρεις αρθρώσεις μπορεί να κινηθεί στο χώρο μεταξύ τριών αξόνων X,Y,Z (μήκος, πλάτος και ύψος).

Οι αρθρώσεις ενός βραχίονα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες; τις στροφικές και τις πρισματικές (τηλεσκοπικές). Υπάρχουν και άλλα είδη αρθρώσεων όπως είναι οι κυλινδρικές, οι ελεύθερες, οι σφαιρικές και οι αρθρώσεις κύλησης οι οποίες προκύπτουν από τη σύνδεση των δύο βασικών αρθρώσεων. Τα σχήματα που ακολουθούν αναπαριστούν τα είδη των αρθρώσεων.



Εικόνα 2.2. Είδη ρομποτικών αρθρώσεων

2.1.2. Βαθμοί ελευθερίας και κινητικότητα

Ως βαθμός ελευθερίας ορίζεται ο αριθμός των ανεξάρτητων μεταβλητών θέσεων ενός ρομποτικού βραχίονα. Σε κάθε διάταξη ο αριθμός αυτός πρέπει να είναι γνωστός και ορισμένος προκειμένου να γίνεται εφικτός ο προσδιορισμός των θέσεων των τμημάτων που την αποτελούν.

Σε ένα ρομπότ εκτός από τους βαθμούς ελευθερίας υπάρχουν και οι βαθμοί κινητικότητας. Το πλήθος των βαθμών κινητικότητας είναι ίσο με το πλήθος των αρθρώσεων

του ρομπότ, ενώ οι βαθμοί ελευθερίας προκύπτουν από την εκάστοτε εργασία την οποία εκτελεί το ρομπότ. Οπότε, σε μερικές διεργασίες το πλήθος των βαθμών ελευθερίας μπορεί να είναι διαφορετικό από το πλήθος των βαθμών κινητικότητας. Υπάρχουν ωστόσο και διεργασίες όπου το πλήθος των βαθμών είναι ίσο μεταξύ τους, για παράδειγμα στην απλή περίπτωση που θέλουμε να μετακινήσουμε και να τοποθετήσουμε ένα αντικείμενο στο χώρο χρειαζόμαστε έξι βαθμούς ελευθερίας. Από αυτούς οι τρεις χρειάζονται για την μετακίνηση του αντικείμενου και οι άλλοι τρεις για τον προσανατολισμό του. Σε αυτή την περίπτωση ένας βραχίονας ο οποίος αποτελείται από έξι αρθρώσεις και κατά συνέπεια ίσους βαθμούς κινητικότητας, μπορεί να πραγματοποιήσει αυτή τη λειτουργία.

2.1.3. Ενεργοποιητές-Κινητήρες

Οι ενεργοποιητές είναι συσκευές που ενεργοποιούν την κίνηση των τμημάτων του βραχίονα. Δέχονται σαν είσοδο ένα ηλεκτρικό σήμα από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή προκειμένου να ξεκινήσει η λειτουργία τους. Τέτοιες συσκευές είναι τα υδραυλικά συστήματα και οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος, οι βηματικοί κινητήρες και οι servo κινητήρες. Η κάθε κατηγορία των κινητήρων έχει τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, γι' αυτό σε κάθε διεργασία χρησιμοποιείται ο κατάλληλος κινητήρας.

Οι κινητήρες συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος με γωνία στρέψης τις 360° , έχουν μεγάλη ροπή. Ένα μεγάλο μειονέκτημα είναι ότι δεν υπάρχει έλεγχος της θέσης του άξονά τους και γι' αυτό χρειάζονται εξωτερικό κύκλωμα οδήγησης. Οι βηματικοί κινητήρες έχουν και αυτοί γωνία στρέψης τις 360° , οπότε έχουν μικρή ροπή. Όπως και στη προηγούμενη κατηγορία κινητήρων έτσι και οι βηματικοί δεν έχουν κάποιο κύκλωμα προκειμένου να ελεγχτεί η θέση τους, έτσι χρειάζονται και αυτοί εξωτερικό κύκλωμα οδήγησης. Οι κινητήρες servo έχουν γωνία περιστροφής τις 180° , έχουν μεγάλη ροπή και διαθέτουν ενσωματωμένο κύκλωμα οδήγησης ώστε να μπορούμε να ελέγξουμε την θέση τους. Αυτό γίνεται με τη χρήση ενός ποτενσιόμετρου το οποίο μαζί με το κύκλωμα είναι ενσωματωμένα στον σερβοκινητήρα.

Τέλος, τα υδραυλικά συστήματα είναι έμβολα που με τη χρήση υγρού, κυρίως λάδι, κινούν την άρθρωση κατάλληλα. Λόγω της υδραυλικής πίεσης η ροπή τους είναι μεγαλύτερη από αυτή των προηγούμενων ενεργοποιητών-κινητήρων.



Εικόνα 2.3. AC και DC κινητήρες



Εικόνα 2.4. Βηματικός κινητήρας



Εικόνα 2.5. Κινητήρας Servo



Εικόνα 2.6. Υδραυλικά Έμβολα

2.1.4. Χώρος εργασίας

Ως χώρος εργασίας ορίζεται ο γεωμετρικός τόπος των σημείων του χώρου τα οποία μπορεί να τα προσεγγίσει το εργαλείο τελικής δράσης του ρομποτικού βραχίονα. Ανάλογα με το είδος του ρομποτικού βραχίονα, ο χώρος μπορεί να είναι ακίνητος ως προς αυτόν ή όχι.

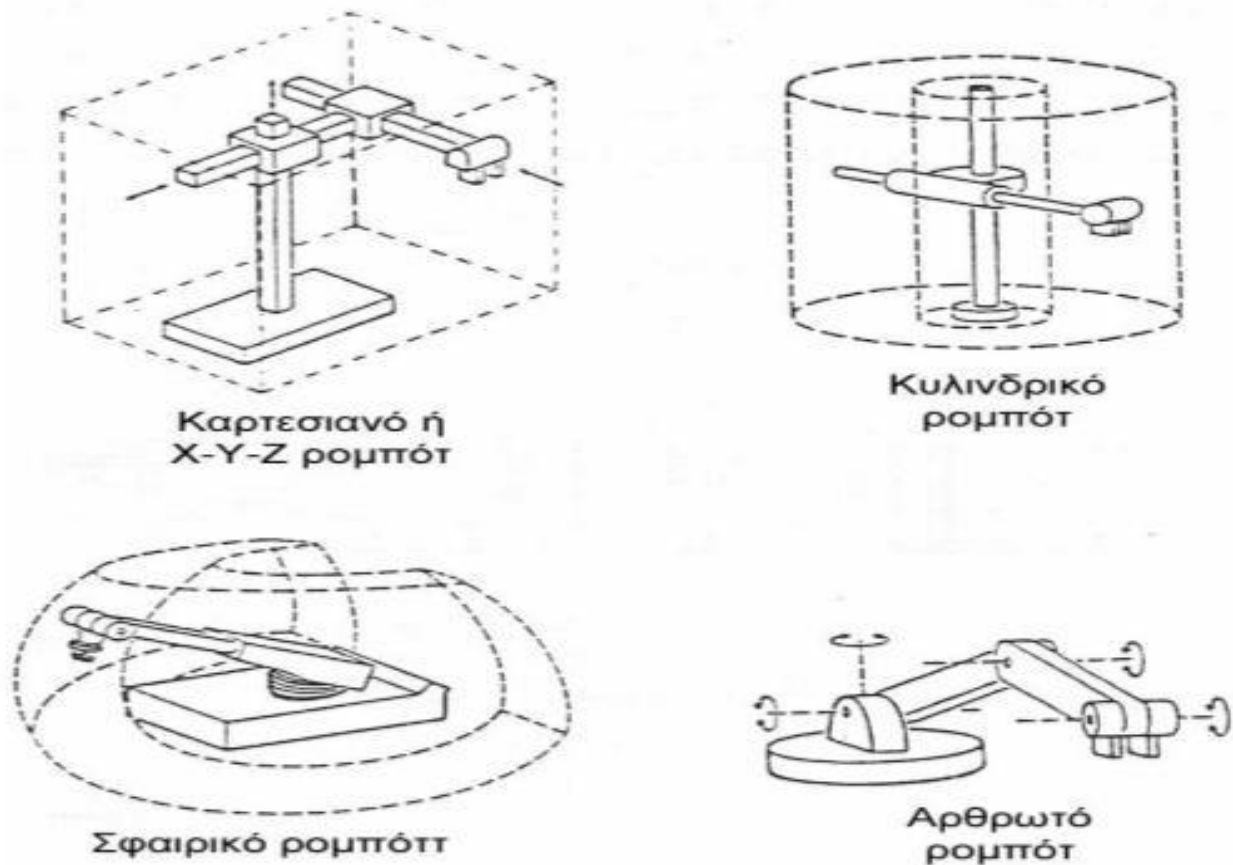
2.1.5. Ελεγκτής

Σε κάθε βραχίονα υπάρχει μια μονάδα ελεγκτή η οποία λαμβάνει δεδομένα του ρομποτικού βραχίονα μέσω του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Τα δεδομένα ή μεταβλητές του ρομποτικού βραχίονα είναι η θέση, η ταχύτητα και η γωνία μετατόπισης των αρθρώσεων αλλά και του εργαλείου τελικής δράσης. Ο ελεγκτής επεξεργάζεται αυτές τις μεταβλητές προκειμένου η λειτουργία και οι κινήσεις του βραχίονα να είναι ιδανικές για την λειτουργία του.

2.2. Είδη ρομποτικού βραχίονα

Η ταξινόμηση του είδους ενός βραχίονα εξαρτάται από το είδος των αρθρώσεών του. Έτσι, οι βραχίονες χωρίζονται σε πέντε κατηγορίες:

- Καρτεσιανοί
- Σφαιρικοί
- Κυλινδρικοί
- SCARA
- Αρθρωτοί

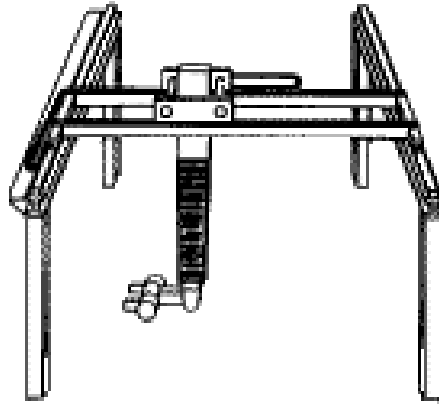


Εικόνα 2.7. Είδη ρομποτικού βραχίονα

2.2.1 Καρτεσιανοί ρομποτικοί βραχίονες

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7. οι βραχίονες των καρτεσιανών συντεταγμένων αποτελούνται από τρεις πρισματικές (γραμμικές) αρθρώσεις. Τα ρομπότ αυτού του είδους είναι δύσκαμπτα αλλά με μεγάλη ακρίβεια σε όλο το χώρο εργασίας. Αυτά τα χαρακτηριστικά τα καθιστούν ικανά για διεργασίες που απαιτείται αριθμητικός έλεγχος (CNC).

Επίσης οι βραχίονες Gantry αποτελούν μια κατηγορία καρτεσιανών καθώς αποτελούνται και αυτοί από πρισματικούς συνδέσμους. Διαφέρουν όμως στο τρόπο προσέγγισης του αντικείμενου. Οι βραχίονες Gantry προσεγγίζουν το αντικείμενο από πάνω, σε αντίθεση με τον καρτεσιανό βραχίονα που το προσεγγίζει από το πλάι. Συνεπώς οι βραχίονες Gantry έχουν μεγαλύτερο χώρο εργασίας και μπορούν να μεταφέρουν μεγαλύτερα και πιο βαριά αντικείμενα.



Εικόνα 2.8. Βραχίονας Gantry

2.2.2. Κυλινδρικοί ρομποτικοί βραχίονες

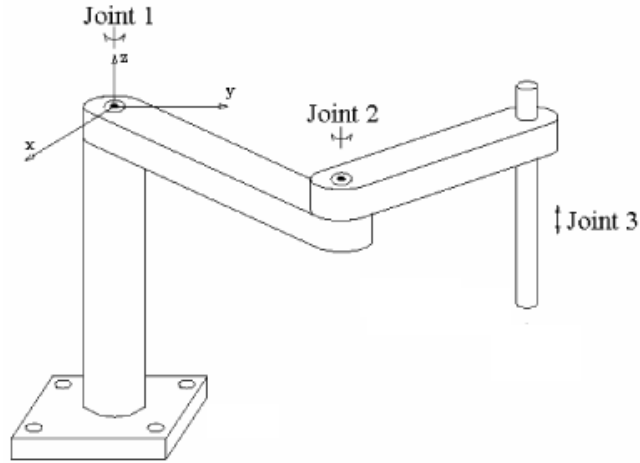
Σε αντίθεση με την πρισματική άρθρωση που συναντήσαμε στους καρτεσιανούς ρομποτικούς βραχίονες, στην περίπτωση των κυλινδρικών ρομποτικών βραχιόνων η άρθρωση είναι στροφική. Αυτό σημαίνει πως ο βραχίονας κινείται περιστροφικά γύρω από τον άξονά του και γι' αυτό οι κινήσεις του είναι περιορισμένες.

2.2.3. Σφαιρικοί ρομποτικοί βραχίονες

Σε αυτήν την κατηγορία οι αρθρώσεις πλέον είναι περιστροφικές με αποτέλεσμα να αυξάνεται η μηχανολογική ευελιξία των ρομπότ, ενώ παράλληλα μειώνεται η δυσκαμψία που συναντάμε στους καρτεσιανούς και κυλινδρικούς βραχίονες. Εκτός από την αυξημένη ευελιξία έχουν και άλλο ένα πλεονέκτημα: την ταχύτητα κίνησης των αξόνων τους.

2.2.4. Ρομποτικοί βραχίονες SCARA

Οι βραχίονες SCARA (Selective Compliant Articulated Robot for Assembly) αποτελούνται από τουλάχιστον δύο περιστροφικές αρθρώσεις και μια πρισματική με τέτοιο τρόπο ώστε οι άξονες κίνησης να είναι παράλληλοι μεταξύ τους. Το όνομά τους προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων Selective Compliance Assembly Robot Arm (SCARA). Το συγκεκριμένο είδος είναι δύσκαμτο στο κατακόρυφο επίπεδο ενώ στο οριζόντιο παρέχει μια ελαστικότητα.



Εικόνα 2.9. Ρομποτικός βραχίονας SCARA

2.2.5. Αρθρωτοί ρομποτικοί βραχίονες

Οι αρθρωτοί βραχίονες αποτελούνται από στροφικές αρθρώσεις οι οποίες μαζί με τους συνδέσμους, είναι τοποθετημένοι στη βάση η οποία περιστρέφεται. Η διάταξή τους μοιάζει με αυτή του ανθρώπινου χεριού. Η βάση του βραχίονα είναι ανάλογη με τον ώμο, η αρπάγη με την παλάμη και το ενδιάμεσο σημείο ο αγκώνας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

3. Κινηματική Θεωρία

3.1. Εισαγωγή στην κινηματική

Κινηματική είναι η επιστήμη που μελετά την κίνηση χωρίς να λαμβάνει υπόψη τις δυνάμεις που τις προκαλούν. Στην κινηματική εστιάζουμε στη θέση, την ταχύτητα, την επιτάχυνση και όλες τις μεταβλητές που περιγράφουν τη θέση του ρομποτικού βραχίονα.

Ο επιστημονικός αυτός κλάδος, επικεντρώνεται στην επίλυση δύο προβλημάτων στην κινηματική ανάλυση ενός βραχίονα. Αυτά είναι το ευθύ και το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα. Στο ευθύ κινηματικό πρόβλημα συνιστάται η εύρεση της θέσης και ο προσανατολισμός του εργαλείου τελικής δράσης, ως προς το σύστημα συντεταγμένων του χώρου εργασίας, γνωρίζοντας τη θέση κάθε άρθρωσης. Στο αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα προσδιορίζονται οι θέσεις των αρθρώσεων ως προς το σύστημα συντεταγμένων του χώρου εργασίας, γνωρίζοντας σε αυτή την περίπτωση τη θέση και τον προσανατολισμό του εργαλείου τελικής δράσης ή ενδιάμεσων σημείων.

3.2. Κινηματική αλυσίδα

Για να μελετήσουμε την κινηματική του εκάστοτε ρομπότ, πρέπει πρώτα να αναλύσουμε τα επιμέρους κινηματικά προβλήματα των συνδέσμων και των αρθρώσεων του ρομπότ. Κινηματική αλυσίδα ονομάζουμε τους διαδοχικούς συνδέσμους και τις αρθρώσεις του ρομπότ που αντιστοιχούν σε μια αλληλουχία κινηματικών προβλημάτων. Η μελέτη αυτή στηρίζεται στην εξής παραδοχή: Κάθε άρθρωση έχει ένα μόνο βαθμό ελευθερίας που συμβολίζεται με τη μεταβλητή q_n . Όπου n είναι το σύνολο των αρθρώσεων ενός ρομπότ. Αν και οι σφαιρικές αρθρώσεις αποτελούνται από δύο στροφικές, δε θα μετρήσουμε δύο αλλά ένα βαθμό ελευθερίας ακολουθώντας την παραπάνω παραδοχή.

Για να μελετήσουμε σωστά την κινηματική ενός ρομποτικού βραχίονα μελετάμε ξεχωριστά τη διάταξη μεταξύ των αρθρώσεων και συνδέσμων καθώς και το σύστημα συντεταγμένων του. Η μελέτη αυτή γίνεται εκτελώντας τα εξής βήματα:

- Η βάση του βραχίονα είναι ο σύνδεσμος 0
- Ο σύνδεσμος μεταξύ της βάσης και της πρώτης άρθρωσης είναι ο σύνδεσμος 1
- Η άρθρωση μεταξύ των 0 και 1 συνδέσμων καλείται άρθρωση 0.
- Γενικότερα η άρθρωση μεταξύ του συνδέσμου $n-1$ και n είναι η άρθρωση i (όπου $i=1,2,3,\dots,n-1$).
- Τέλος, ως τελευταίο σύνδεσμο θεωρούμε το εργαλείο τελικής δράσης σαν σύνδεσμο np

αριθμόν n .

Για την επιλογή του συστήματος συντεταγμένων ακολουθούμε την εξής λογική:

Ο κάθε σύνδεσμος αντιστοιχίζεται σε ένα σύστημα συντεταγμένων $\{O_i, x_i, y_i, z_i\}$.

Οι γενικευμένες συντεταγμένες ενός τυχαίου σημείου A σε χώρο με σημεία a_i και a_{i-1} ως προς τα συστήματα συντεταγμένων $\{O_i, x_i, y_i, z_i\}$ και $\{O_{i-1}, x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}\}$ συνδέονται με την ακόλουθη σχέση $a_{i-1} = H_{i-1}^i(q_i)a_i$ όπου $H_{i-1}^i(q_i)$ είναι ο ομογενής μετασχηματισμός που συνδέει τα δύο αυτά συστήματα και q_i η γωνία μετατόπισης της i άρθρωσης. Η γωνία μετατόπισης επηρεάζει τον παραπάνω μετασχηματισμό με τελική μορφή την πάρακάτω.

$$H_{i-1}^i(q_i) = \begin{bmatrix} R_{i-1}^i(q_i) & d_{i-1}^i(q_i) \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}$$

Όπου $d_{i-1}^i(q_i)$ πίνακας μετατόπισης ο οποίος περιλαμβάνει τις συντεταγμένες με αρχή το σημείο O_i και τελικό σημείο το O_{i-1} του συστήματος $i-1$. Και ο R_{i-1}^i είναι πίνακας στροφής του συστήματος i ως προς το $i-1$ σύστημα.

Για την σύνδεση δύο συστημάτων συντεταγμένων i και j του σημείου A από το σύστημα i ως προς το σύστημα j γίνεται με τον μετασχηματισμό H_i^j και δίνεται από τις σχέσεις:

$$\text{Για } i < j \quad H_i^j = H_{i+1}^{i+1} H_{i+2}^{i+1} \dots H_{j-1}^j$$

$$\text{Για } i > j \quad H_i^j = (H_i^i)^{-1}$$

$$\text{Για } i = j \quad H_i^i = I_4 \text{ όπου } I_4 \text{ μοναδιαίος πίνακας } 4 \times 4$$

Στην περίπτωση που ισχύει η συνθήκη $i < j$ έχουμε:

$$H_i^j = \begin{bmatrix} R_i^j & d_i^j \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}$$

3.3. Ευθύ κινηματικό πρόβλημα

Όπως προαναφέρθηκε, ένας βραχίονας αποτελείται από συνδέσμους και αρθρώσεις οι οποίοι είναι τοποθετημένοι από τη βάση του μέχρι το εργαλείο τελικής δράσης. Προκειμένου να εφαρμοστεί το ευθύ κινηματικό πρόβλημα, πρέπει να γνωρίζουμε το κατάλληλο κινηματικό μοντέλο του βραχίονα. Για την επίλυση του προβλήματος αυτού, εκτελούμε τη μέθοδο Denavit – Hartenberg χρησιμοποιώντας τέσσερις παραμέτρους. Αυτές είναι: το μήκος, η στρέψη, το περιθώριο και η γωνία μεταξύ των αξόνων. Με τη μέθοδο Denavit – Hartenberg επισυνάπτουμε

σε κάθε άρθρωση και σε κάθε σύνδεσμο το σύστημα συντεταγμένων που τα αποτελούν καταφέρνοντας έτσι να προσδιορίσουμε την θέση και τον προσανατολισμό του εργαλείου τελικής δράσης.

3.4. Μέθοδος Denavit – Hartenberg

Στη μέθοδο Denavit – Hartenberg μελετάμε το ευθύ κινηματικό πρόβλημα ενός ρομποτικού βραχίονα ώστε να προσδιορίσουμε το εργαλείο τελικής δράσης ως προς το χώρο εργασίας του, γνωρίζοντας τις μεταβλητές των αρθρώσεων του βραχίονα. Για την επίλυση του προβλήματος με τη χρήση αυτής της μεθόδου, τοποθετούνται δεξιόστροφα ορθοκανονικά συστήματα συντεταγμένων μεταξύ των συνδέσμων του βραχίονα, θεωρώντας το χώρο εργασίας σταθερό και αμετάβλητο.

Αρχικά καθορίζουμε τα συστήματα συντεταγμένων $\{0_n, x_n, y_n, z_n\}$ ξεκινώντας από τη βάση του βραχίονα, ορίζοντάς το ως σημείο 0 και καταλήγοντας στο εργαλείο τελικής δράσης το οποίο είναι το n σημείο του βραχίονα. Για να συνεχίσουμε πρέπει να ορίσουμε κατάλληλα την κάθε άρθρωση. Για να επιτευχθεί αυτό ακολουθούμε την παρακάτω διαδικασία.

- Επιλέγουμε τους κατάλληλους άξονες κατά μήκος των αρθρώσεων είτε αυτές είναι στροφικές είτε πρισματικές.
- Τοποθετούμε τα κέντρα 0_i σε κάθε τομή των αξόνων.
- Επιλέγουμε τους άξονες στους οποίους θα κινηθεί ο βραχίονας κατά μήκος της κοινής καθέτους των.
- Ορίζουμε τον σωστό άξονα προκειμένου να έχουμε σύστημα συντεταγμένων με δεξιόστροφη φορά.
- Έχοντας εκτελέσει την παραπάνω διαδικασία για κάθε άρθρωση, προσδιορίζουμε τις παραμέτρους της μεθόδου D-H οι οποίες είναι:
 - Το μήκος a_n μεταξύ των αξόνων.
 - Η γωνία στρέψης b_n .
 - Το περιθώριο d_n .
 - Και η γωνία μετατόπισης θ_i μεταξύ των σημείων n και n+1.

Πλέον, μπορούν να υπολογιστούν οι πίνακες R_0^n ομογενούς μετασχηματισμού από το αρχικό σύστημα συντεταγμένων $\{0_0, x_0, y_0, z_0\}$ μέχρι το $\{0_n, x_n, y_n, z_n\}$. Επίσης υπολογίζουμε τον πίνακα d^n_0 για κάθε σύστημα συντεταγμένων μεταξύ των σημείων 0 και n. Έτσι μπορεί να υπολογιστεί ο μετασχηματισμός του συστήματος συντεταγμένων που ορίζεται με τον πίνακα H^n_0 όπως αυτός έχει αναλυθεί στην υποενότητα 3.2. Για να συνδυάσουμε τους μετασχηματισμούς από το σημείο 0 μέχρι το n, αξιοποιούμε την σχέση $H^n_0 = H^1_0 H^2_1 \dots H^{n-1}_{n-2} H^n_{n-1}$.

Ορίζουμε άλλον ένα πίνακα S_A ο οποίος περιέχει τις γενικευμένες συντεταγμένες του σημείου A ως προς το σύστημα $\{0_n, x_n, y_n, z_n\}$. Τέλος, οι συντεταγμένες του σημείου A προκύπτουν από τη σχέση:

$$P_{0=}^A = H_0^n * S_A$$

Με τη χρήση του παραπάνω τύπου μπορούμε να βρούμε και τις συντεταγμένες των ενδιάμεσων σημείων μεταξύ του σημείου 0 και A.

3.5. Αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα

Σε αυτήν την περίπτωση, γνωρίζοντας τη θέση και τον προσανατολισμό του εργαλείου τελικής δράσης, προσδιορίζουμε τις μεταβλητές των αρθρώσεων του βραχίονα. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι μη γραμμικές και οι μορφές τους είναι πολυωνυμικές και τριγωνομετρικές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην είναι εφικτή η αναλυτική επίλυση του προβλήματος.

Αρχικά, βρίσκουμε τους πίνακες H_0^n συντεταγμένων του συστήματος όπως έγινε και κατά την μέθοδο Denavit-Hartenberg. Μιας και δεν γνωρίζουμε τα μήκη των συνδέσμων αλλά ούτε και τις γωνίες στρέψης των κινητήρων, θα τα αντικαταστήσουμε με τις μεταβλητές X,Y,Z και φ.

Όπου X,Y,Z τα μήκη των συνδέσμων ως προς τον κάθε άξονα και φ η γωνία μετατόπισης των αρθρώσεων.

Από τον πίνακα H_0^n υπολογίζουμε τις μη γραμμικές εξισώσεις με σκοπό την εύρεση της θέσης της n άρθρωσης η οποία είναι μεταξύ του εργαλείου τελικής δράσης και του τελευταίου συνδέσμου της διάταξης του βραχίονα.

Για να βρεθεί η κίνηση μια άρθρωσης θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε συνάρτηση δύο ορισμάτων του τόξου εφαπτομένης της.

$$\theta_n = A * \tan^2 * (\sin(n), \cos n)$$

Το πρόσημο του ημιτόνου καθορίζει την διεύθυνση που θα έχει ο βραχίονας. Έτσι μπορούμε να επιλέξουμε τη λύση προκειμένου ο βραχίονας να κινηθεί κατάλληλα προς το επιθυμητό σημείο. Προκειμένου να υπολογιστεί η γωνία, θα υπολογιστεί το ημιτόνιο και το συνημιτόνιο για να εκχωρηθούν ως ορίσματα στην συνάρτηση του τόξου εφαπτομένης. Έτσι εξασφαλίζουμε όλες τις πιθανές λύσεις.

Γνωρίζοντας την n γωνία, είναι εφικτό να υπολογιστεί η n-1 με την χρήση των ίδιων μη

γραμμικών εξισώσεων. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου μείνει να προσδιοριστεί η τελευταία άρθρωση. Ο υπολογισμός της θα γίνει με το άθροισμα των γωνιών και των ορισμάτων του τόξου εφαπτομένης της γωνίας φ που ορίσαμε στην αρχή.

$$(\theta_0 + \theta_1 + \dots + \theta_{n-1} + \theta_n) = A \cdot \tan^2(\sin\varphi, \cos\varphi)$$

Αν από τις γραμμικές εξισώσεις οι μεταβλητές X, Y, Z είναι 0 τότε οι γωνίες μπορεί να έχουν την οποιαδήποτε τιμή και να είναι αόριστες. Τέλος οι τιμές που θα δοθούν στις γωνίες είναι υποθετικές προκειμένου να βρεθούν οι πιθανές πορείες όλων των αρθρώσεων

Κεφάλαιο 4°

4. Σχεδιασμός και υλοποίηση ρομποτικού βραχίονα

4.1. Εισαγωγή

Ο στόχος της εργασίας είναι καθαρά εκπαιδευτικός και αποσκοπεί στην υλοποίηση των γνώσεων που αποκομίστηκαν μέσα από το πρόγραμμα σπουδών του τμήματος Αυτοματισμού του Πανεπιστημίου Πειραιά Τεχνολογικού Τομέα.

Στην εργασία αυτή πραγματοποιείται η υλοποίηση ενός ρομποτικού βραχίονα τεσσάρων βαθμών ελευθερίας. Ο βραχίονας είναι προγραμματισμένος να μεταφέρει ένα αντικείμενο μεταξύ δύο σημείων με αυτοματοποιημένη αλλά και χειροκίνητη λειτουργία. Ο έλεγχος του βραχίονα γίνεται μέσω του μικροελεγκτή Arduino Uno.

Ως εργαλείο τελικής δράσης χρησιμοποιήθηκε μια αρπάγη και επιλύθηκε με τη χρήση της μεθόδου Denavit-Hatemberg το ευθύ κινηματικό πρόβλημα της θέσης της.

4.2. Περιγραφή λειτουργίας του ρομποτικού βραχίονα

Ο βραχίονας εκτελεί δύο λειτουργίες την αυτόματη και την χειροκίνητη. Κατά την αυτόματη λειτουργία, ο βραχίονας είναι ρυθμισμένος να εκτελεί κίνηση Point-To-Point έτσι ώστε να μεταφέρει ένα αντικείμενο από το σημείο A στο σημείο B και πίσω. Στην χειροκίνητη λειτουργία ο βραχίονας ελέγχεται από χρήστη μέσω joystick, ποτενσιόμετρων και κουμπιών, προκειμένου ο χρήστης να μετακινήσει το αντικείμενο μεταξύ των σημείων A και B ή να ορίσει σημεία στο χώρο εργασίας του βραχίονα ώστε να εκτελεστούν με την μέθοδο κίνησης Point-To-Point.

Στη κίνηση Point-To-Point ο βραχίονας μετακινείται από την αρχική του θέση στην τελική, μέσα από μια σειρά δοσμένων σημείων για την κάθε άρθρωση.

Η αυτόματη λειτουργία ξεκινά μόλις ο διακόπτης για τον έλεγχο λειτουργίας του βραχίονα γυρίσει στη θέση της αυτόματης λειτουργίας. Όταν γίνει αυτό, ο βραχίονας θα ξεκινήσει μια λειτουργία με Point-To-Point κίνηση, από την αρχική θέση προς τα σημεία A ή B. Ο μικροελεγκτής θα διαβάσει τις τιμές εισόδου των φωτοαντιστάσεων που είναι τοποθετημένα στα A και B σημεία, αναγνωρίζοντας έτσι σε ποιο από τα δύο σημεία είναι το αντικείμενο που θέλουμε να μεταφέρουμε. Στη συνέχεια στέλνονται οι εντολές στους κινητήρες και γίνεται η

εξής διαδικασία. Ο πρώτος σερβοκινητήρας που είναι τοποθετημένος στη βάση, μετακινεί όλη τη διάταξη προς το σημείο που είναι τοποθετημένο το αντικείμενο, στη συνέχεια ο δεύτερος κατεβάζει τον σύνδεσμο με την αρπάγη ακριβώς πάνω από το αντικείμενο. Σε αυτό το σημείο ο τρίτος σερβοκινητήρας που είναι τοποθετημένος στον σύνδεσμο της αρπάγης, την κατεβάζει στο αντικείμενο όπου στο τέλος η αρπάγη κλείνει πιάνοντας έτσι το αντικείμενο. Πλέον ξεκινάει η αντίστροφη διαδικασία προκειμένου τώρα ο βραχίονας μαζί με το αντικείμενο που μεταφέρει να μετακινηθεί στην αρχική του κατάσταση. Μόλις γίνει αυτό με τις ίδιες κινήσεις ο βραχίονας τοποθετεί την αρπάγη πάνω από το τελικό σημείο ώστε αυτή να ανοίξει και να αφήσει το αντικείμενο στη κατάλληλη θέση. Οι σερβοκινητήρες κινούνται με αργή ταχύτητα για να ελέγχεται καλύτερα η κίνησή τους αλλά και να μην υπάρξει τυχόν αστάθεια από τις απότομες και γρήγορες κινήσεις.

Η έναρξη της χειροκίνητης λειτουργίας ξεκινάει μόλις ο διακόπτης για τον έλεγχο κινήσεων γυρίσει στην ανάλογη θέση. Τότε ο μικροελεγκτής διαβάζει τις τιμές από τις εξόδους των joystick, των ποτενσιόμετρων και των κουμπιών και μετακινεί αντίστοιχα στις κατάλληλες θέσεις τις αρθρώσεις. Πιο συγκεκριμένα το joystick κινεί τους σερβοκινητήρες που είναι τοποθετημένοι στη βάση της κατασκευής. Το ένα ποτενσιόμετρο κινεί τον σερβοκινητήρα που είναι τοποθετημένος μεταξύ του συνδέσμου και της αρπάγης, ενώ το άνοιγμα και το κλείσιμο της αρπάγης καθορίζεται από το πάτημα ενός κουμπιού. Έτσι, ο χρήστης μπορεί να μετακινήσει το αντικείμενο μόνος του στο χώρο εργασίας. Μέσω του δεύτερου ποτενσιόμετρου, γίνεται έλεγχος της ταχύτητας όλων των σερβοκινητήρων ώστε να κινούνται αργά ή γρήγορα.

Επίσης, με τη χρήση ενός ακόμα διακόπτη είναι δυνατό ο χρήστης να αποθηκεύσει αρκετά σημεία κινήσεως του κάθε σερβοκινητήρα στη μνήμη του μικροελεγκτή. Αυτό θα γίνει όταν μετακινήσει τον σερβοκινητήρα της επιλογής του στο επιθυμητό σημείο και με το πάτημα του κουμπιού θα αποθηκεύεται η θέση αυτή. Έτσι, μόλις ο διακόπτης γυρίσει στην κατάλληλη θέση και ο μικροελεγκτής λάβει την κατάλληλη τιμή εισόδου από το κουμπί, τότε ο βραχίονας θα μετακινείται από το πρώτο σημείο προς το τελευταίο που του έχει ορίσει ο χρήστης. Η διαδικασία αυτή θα επαναλαμβάνεται όσο ο διακόπτης θα είναι στην κατάλληλη θέση και ο χρήστης θα πατάει το κουμπί εκκίνησης.

Για να μπορούν να λειτουργήσουν οι κινητήρες του βραχίονα και ο μικροελεγκτής, χρησιμοποιήθηκε τροφοδοτικό με έξοδο τα 6Volt και 2.2A.

4.3. Εξαρτήματα

Ο σκελετός του βραχίονα είναι αλουμινένιος και αποτελείται από μια ξύλινη βάση, τέσσερις σερβοκινητήρες, βάση βραχίονα, δύο συνδέσμους και την αρπάγη. Επίσης για τον έλεγχο θέσης του αντικειμένου μεταξύ των σημείων μεταφοράς του, έχουν χρησιμοποιηθεί δύο

φωτοαντιστάσεις. Και όπως προαναφέρθηκε ο έλεγχος και οι κινήσεις του βραχίονα ελέγχονται από τον μικροελεγκτή Arduino Uno ο οποίος θα αναλυθεί παρακάτω.

Χρησιμοποιήθηκε ξύλινη βάση για να σταθεροποιηθεί πάνω σε αυτή η βάση του βραχίονα ώστε να μειωθεί η αστάθειά του και τοποθετήθηκαν επίσης πάνω σε αυτή ο μικροελεγκτής και η ηλεκτρονική πλακέτα μαζί με όλα τα εξαρτήματά του.

Για την χειροκίνητη λειτουργία χρησιμοποιήθηκαν τα εξαρτήματα:

- ❖ 1x Joystick
- ❖ 2x Ποτενσιόμετρα
- ❖ 2x Push buttons

4.3.1. Μηχανολογικά στοιχεία

	Βάρος	Μήκος
Βάση	410gr	35 cm (L)
Σύνδεσμος 1	330gr	27 cm (L1)
Σύνδεσμος 2 και Αρπάγη	215gr	15 cm (L2)

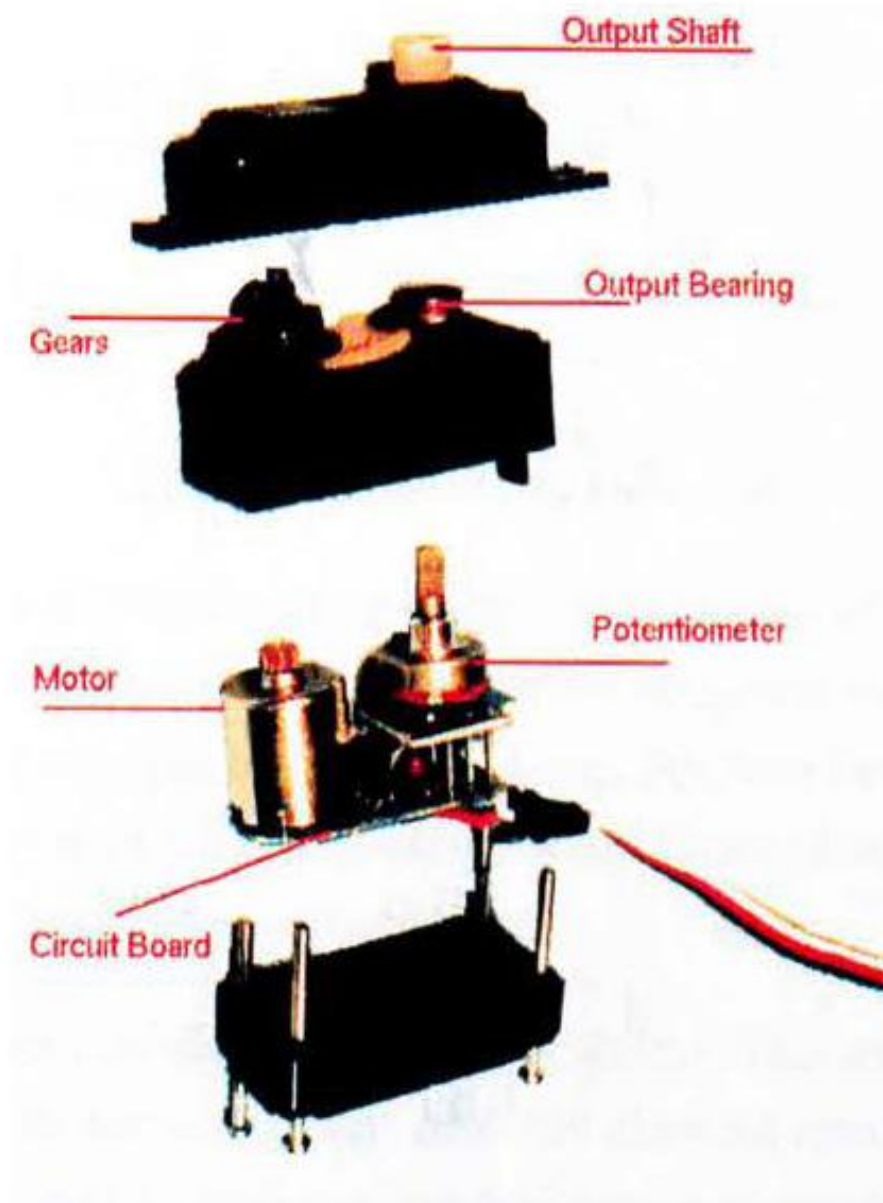
Τα μήκη και το βάρος που μετρήθηκαν είναι αυτά μεταξύ του αναγραφόμενου συνδέσμου μέχρι την αρπάγη, όπως φαίνεται στην εικόνα 4..



Εικόνα 4.1. Μέρη του σκελετού του βραχίονα

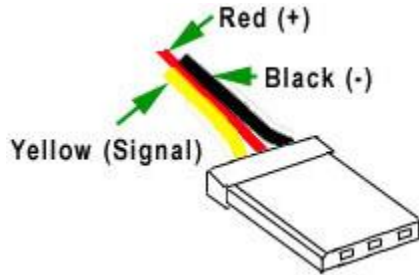
Οι κινήσεις των αρθρώσεων είναι στροφικές και εκτελούνται μέσω των σερβοκινητήρων που είναι τοποθετημένοι σε αυτές. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν ένας σερβοκινητήρας τύπου JX5521MG και τρεις MG995.

Και οι τέσσερις σερβοκινητήρες αποτελούνται στο εσωτερικό τους από ένα κύκλωμα ελέγχου, ποτενσιόμετρο, έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος και μεταλλικά γρανάζια. Η τάση εισόδου που δέχονται μπορεί να είναι από 4,8Volt μέχρι 6Volt. Φυσικά ανάλογα με την τιμή της τάσης εισόδου μεταβάλλεται η δύναμη στρέψης του κάθε σερβοκινητήρα όπως θα διατυπωθεί στη συνέχεια.

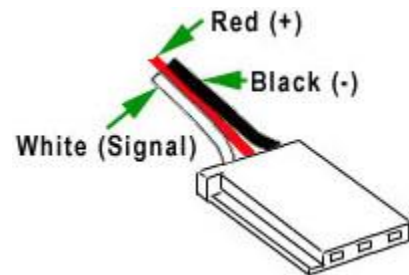


Εικόνα 4.2. Εσωτερική διάταξη σερβοκινητήρα

Επίσης οι σερβοκινητήρες αποτελούνται από τρία καλώδια. Μέσω του κόκκινου καλωδίου δέχονται την τάση εισόδου και με το μαύρο ενώνονται στη γείωση. Το τρίτο καλώδιο είναι αυτό μέσω του οποίου στέλνονται στον σερβοκινητήρα οι πληροφορίες για την κίνησή του. Στους MG995 το καλώδιο είναι πορτοκαλί ενώ στον JX5521MG είναι άσπρο. Αυτό δηλώνει την διαφορά ως προς το είδος ακροδεκτών τους, δηλαδή οι MG995 έχουν ακροδέκτες τύπου Hitec ενώ ο JX5521MG είναι τύπος Futaba.



Εικόνα 4.3. Hitec Connector



Εικόνα 4.4. Futaba Connector

Οι ακροδέκτες Hitec παρέχουν ασφάλεια στο σερβοκινητήρα σε περίπτωση που οι συνδέσεις των ακροδεκτών γίνουν ανάποδα. Σε αυτή την περίπτωση ο κινήρας απλά δε θα λειτουργεί. Οι υπόλοιποι τύποι ακροδεκτών δεν παρέχουν ασφάλεια σε περίπτωση αντίστροφης τοποθέτησης και έτσι είναι πιθανό να καταστραφεί ο σερβοκινητήρας.

Οι σερβοκινητήρες MG995 είναι ψηφιακοί και έχουν διαστάσεις 40,7mm x 19,7 x 42,9mm και βάρος 55gr. Για τάση εισόδου 4,8 Volt έχουν ροπή 8,5 kgcm και τύχητα 0.2s/60° ενώ στα 6 Volt η ροπή είναι 10 kgcm και η γωνιακή ταχύτητα 0.16s/60°.



Εικόνα 4.5. Σερβοκινητήρας MG995

Ο σερβοκινητήρας JX5521MG είναι αναλογικός και έχει διαστάσεις 40,5 mm x 20,2mm x 41 mm και βάρος 55,6 gr. Για τάση εισόδου 4,8 Volt έχει ροπή 17,25 kgcm και γωνιακή ταχύτητα 0,18 cm/60°. Για τάση εισόδου 6 Volt η ροπή φτάνει τα 20,32 kgcm και η γωνιακή ταχύτητα τα 0,16 cm/60°. Η επιλογή του συγκεκριμένου μοντέλου έγινε έτσι ώστε να τοποθετηθεί στη βάση του πρώτου συνδέσμου και να ανεβοκατεβάζει την διάταξη, μιας και η συγκεκριμένη άρθρωση απαιτεί αρκετή ροπή για να κινηθεί ο βραχίονας χωρίς πρόβλημα.



Εικόνα 4.6. Σερβοκινητήρας JX5521MG

Οι ψηφιακοί σερβοκινητήρες συγκριτικά με του αναλογικούς, έχουν μικρότερο duty cycle και η περίοδος χρόνου για τον παλμό κίνησής τους είναι μικρότερη από τον αντίστοιχο των αναλογικών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να είναι πιο λειτουργικοί με γρηγορότερο χρόνο ανταπόκρισης και μεγαλύτερη δύναμη από τα αντίστοιχα αναλογικά μοντέλα.

Ως duty cycle ορίζεται η περίοδος στην οποία ο κινητήρας περιμένει ένα σήμα παλμού. Για τους αναλογικούς σερβοκινητήρες η περίοδος αυτή είναι τα 50Hz ενώ για τους ψηφιακούς είναι τα 300Hz. Αν με το πέρας ενός duty cycle, ο κινητήρας δεν λάβει κάποιο σήμα υπάρχει πιθανότητα να κινηθεί αυθαίρετα.

Και οι δύο προγραμματίζονται με τον ίδιο τρόπο. Η διαφορά είναι στον χρόνο που θα δοθεί το σήμα, όπως προαναφέρθηκε.

4.3.2 Ηλεκτρονικά Στοιχεία

Προκειμένου να λειτουργήσει ομαλά ο βραχίονας, χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω ηλεκτρονικά στοιχεία:

- **Φωτοαντιστάσεις:** Πρόκειται για αντιστάσεις οι οποίες αυξομειώνουν την τιμή της αντίστασής τους ανάλογα με την φωτεινότητα που λαμβάνουν. Στην παρούσα πτυχιακή χρησιμοποιήθηκαν δύο φωτοαντιστάσεις στα δύο σημεία εναπόθεσης του αντικειμένου με σκοπό τον έλεγχο της θέσης του. Όταν η φωτοαντίσταση λαμβάνει φως η αντίστασή της είναι υψηλή ενώ όταν δεν λαμβάνει η τιμή μειώνεται.



Εικόνα 4.7. Φωτοαντίσταση

- **Ποτενσιόμετρο:** Τα ποτενσιόμετρα είναι αντιστάσεις μεταβλητής τιμής με τρεις ακροδέκτες. Ο ένας ακροδέκτης συνδέεται στο + της πηγής, ο δεύτερος στη γείωση και ο τρίτος στον ελεγκτή. Επίσης, ο τρίτος ακροδέκτης είναι άμεσα συνδεδεμένος με τον ρότορα του ποτενσιόμετρου, έτσι ώστε όταν αυτός μετακινείται η αντίσταση που δίνει στην έξοδό του το ποτενσιόμετρο μεταβάλλεται. Χρησιμοποιήθηκαν δύο γραμμικά ποτενσιόμετρα των $5k\Omega$. Το ένα ελέγχει την θέση του τρίτου σερβοκινητήρα ο οποίος ανεβοκατεβάζει την αρπάγη και το δεύτερο ελέγχει την ταχύτητα με την οποία στρέφονται οι σερβοκινητήρες.



Εικόνα 4.8. Ποτενσιόμετρο

- **Joystick:** Αποτελείται από τον συνδυασμό δύο πετενσιόμετρων κάθετα το ένα προς το άλλο. Η συγκεκριμένη διάταξη περιέχει και ένα κουμπί το οποίο δεν χρησιμοποιήθηκε. Η χρήση του βοηθά στην κίνηση των δύο σερβοκινητήρων της βάσης έτσι ώστε ο βραχίονας να κινείται δεξιά-αριστερά και πάνω-κάτω.



Εικόνα 4.9. Joystick

- **Push Buttons:** Πρόκειται για επαφές τις οποίες διαπερνά ρεύμα μόλις πατηθούν. Τα δύο push button που χρησιμοποιήθηκαν, το ένα ανοίγει και κλείνει την αρπάγη ενώ το άλλο αποθηκεύει και εκτελεί στην μνήμη του μικροελεγκτή τα σημεία που θα ορίσει ο χρήστης.



Εικόνα 4.10. Push button

- **Διακόπτες:** Οι διακόπτες είναι επαφές δύο (ON-OFF) ή τριών (ON-OFF-ON) καταστάσεων. Στην εργασία αυτή υπάρχουν τρεις διακόπτες: ο ένας ανοιγοκλείνει την τροφοδοσία, ο δεύτερος ελέγχει αν η λειτουργία του βραχίονα θα είναι αυτόματη ή χειροκίνητη και ο τρίτος ελέγχει αν η αυτόματη λειτουργία θα αποθηκεύει ή όχι σημεία δοσμένα από τον χρήστη.



Εικόνα 4.11. Διακόπτης

- **LED:** Τα LED ή αλλιώς φωτοдиодοι, λειτουργούν όπως οι κανονικές δίοδοι όταν τα διαπεράσει ρεύμα, αυτά εκπέμπουν μια ακτινοβολία στενού φάσματος. Χρησιμοποιήθηκαν τρία LED για την πτυχιακή: το πρώτο, χρώματος κόκκινου, που δηλώνει την τροφοδοσία του κυκλώματος και των κινητήρων, το δεύτερο, χρώματος μπλε, που δηλώνει την εκτέλεση της αυτόματης λειτουργίας και το τελευταίο, χρώματος κίτρινου, που δηλώνει την εκτέλεση της χειροκίνητης λειτουργίας.



Εικόνα 4.12. LED

4.4. Ηλεκτρονικό κύκλωμα

Παρακάτω παρουσιάζεται το ηλεκτρονικό κύκλωμα της πτυχιακής και γίνεται ανάλυση αυτού. Αρχικά όλα τα ηλεκτρονικά στοιχεία μαζί με τον επεξεργαστή, το τροφοδοτικό και τους κινητήρες έχουν κοινή γείωση. Επίσης σε αρκετά στοιχεία έχει τοποθετηθεί μια αντίσταση μεταξύ αυτών και της γείωσης, το joystick δε χρειάστηκε κάποια αντίσταση. Τα LED χρειάζονται την αντίσταση στην γείωσή τους προκειμένου να μην καταστραφούν από το ρεύμα εισόδου. Επίσης, οι αντιστάσεις στις γειώσεις των στοιχείων βοηθούν στο να ελαττώνεται ο θόρυβος από αυτά και να γίνεται καλύτερη δειγματοληψία στις εισόδους του μικροελεγκτή από το κάθε στοιχείο.

Η πηγή τροφοδοτεί τους τέσσερις σερβοκινητήρες με τάση 6Volt και ένταση 2.2A. Όλα τα υπόλοιπα ηλεκτρονικά στοιχεία τροφοδοτούνται μέσω του μικροελεγκτή με τάση 5Volt και ένταση 500mA.

Στα ψηφιακά pins του Arduino έχουν τοποθετηθεί οι σερβοκινητήρες που καταλαμβάνουν τα 8,9,10 και 11 pin. Ο διακόπτης για τον έλεγχο της λειτουργίας είναι τοποθετημένος στα pin 2 και 3. Το button για το άνοιγμα και το κλείσιμο της αρπάγης στο pin 6, ο διακόπτης για τον έλεγχο της καταχώρησης σημείων από τον χρήστη στα pin 4 και 5 και τέλος το button για την εκτέλεση των καταχωρημένων σημείων είναι στο pin 7.

Στα αναλογικά pin είναι οι φωτοαντιστάσεις στα A0 και A1, το ποτενσιόμετρο για τη θέση του 3^{ου} βραχίονα στο pin A2, ενώ το ποτενσιόμετρο για την ρύθμιση της ταχύτητας των σερβοκινητήρων είναι στο pin A3. Τέλος οι έξοδοι του joystick και συγκεκριμένα η έξοδος για τον άξονα X είναι τοποθετημένος στο pin A4 ενώ η έξοδος για τον άξονα Y είναι στο pin A5.

4.5. Συναρμολόγηση ρομποτικού βραχίονα

Η διάταξη του βραχίονα είναι η εξής:

Η βάση είναι τοποθετημένη στην ξύλινη επιφάνεια ώστε όλος ο βραχίονας να είναι σταθερός. Πάνω στη βάση του βραχίονα είναι τοποθετημένοι δύο σερβοκινητήρες. Οι κινήσεις που γίνονται είναι στρωφικές, έτσι ο ένας σερβοκινητήρας περιστρέφει όλη τη διάταξη δεξιά και αριστερά και ο δεύτερος σερβοκινητήρας ανεβάζει και κατεβάζει την υπόλοιπη διάταξη. Εκτός από τον σερβοκινητήρα της αρπάγης, οι υπόλοιποι χρειάζονται ένα πλαίσιο στήριξης για να τοποθετηθούν σωστά στον σκελετό του βραχίονα. Μετά από τους δύο πρώτους κινητήρες υπάρχει ένας σύνδεσμος που καταλήγει στον τρίτο κατά σειρά σερβοκινητήρα του οποίου το πλαίσιο στήριξης είναι βιδωμένος ο σύνδεσμος στήριξης της αρπάγης. Τέλος, στη μια δαγκάνα της αρπάγης είναι τοποθετημένος σερβοκινητήρας ο οποίος κατά τη λειτουργία του κινεί μέσω γραναζίων τη δεύτερη δαγκάνα της αρπάγης. Έτσι η αρπάγη μπορεί και ανοιγοκλείνει κατά βούληση πιάνοντας ή αφήνοντας αντικείμενα.

Στάδια κατασκευής της διάταξης:

Αρχικά κατασκευάστηκε μια ξύλινη βάση στην οποία τοποθετήθηκε η διάταξη του βραχίονα, η πλατφόρμα Arduino και η πλακέτα με το ηλεκτρονικό κύκλωμα. Για να γίνει αυτή η βάση κόπηκαν δύο κομμάτια από ξύλο με διαστάσεις 34,5cm/12cm/1,5cm.

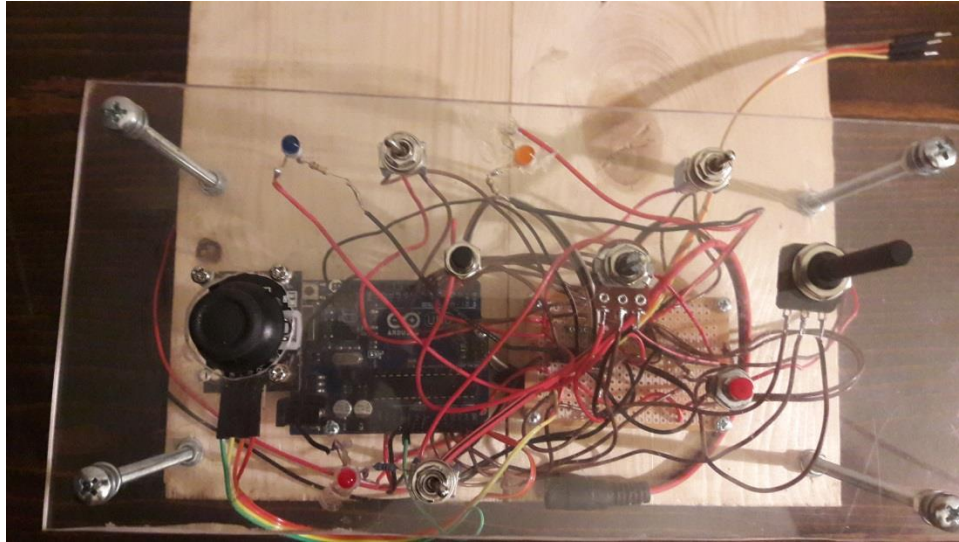


Εικόνα 4.14. Ξύλινη βάση εργασίας

Στην συνέχεια τοποθετήθηκε άλλη μια ξύλινη επιφάνεια, κάθετη προς τις δύο

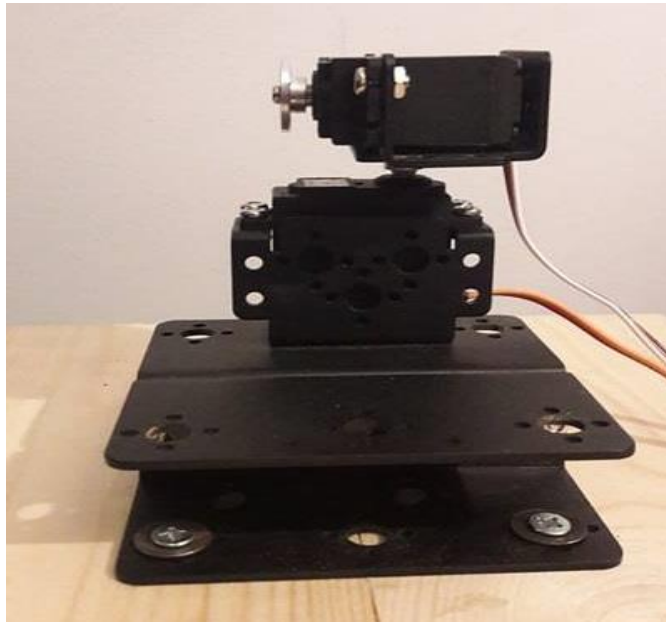
προηγούμενες, στην οποία τοποθετήθηκαν οι φωτοαντιστάσεις.

Έπειτα βιδώθηκαν πάνω στην βάση η πλακέτα με τα ηλεκτρονικά στοιχεία, το Arduino και ένα πάνελ με τα κουμπιά, τα LED, τους διακόπτες, τα ποτενσιόμετρα και το Joystick.



Εικόνα 4.15. Τοποθέτηση πλακέτας, ελεγκτή και πάνελ

Στη συνέχεια πάνω στην ξύλινη επιφάνεια τοποθετήθηκε η βάση του βραχίονα στην οποία είναι βιδωμένοι οι δύο πρώτοι σερβοκινητήρες. Ο πρώτος σερβοκινητήρας που μετακινεί δεξιά και αριστερά την διάταξη είναι ο MG995. Πάνω σε αυτόν είναι τοποθετημένος ο σερβοκινητήρας που ανεβάζει και κατεβάζει τον σύνδεσμο και είναι ο JX5521MG.



Εικόνα 4.16. Βάση βραχίονα

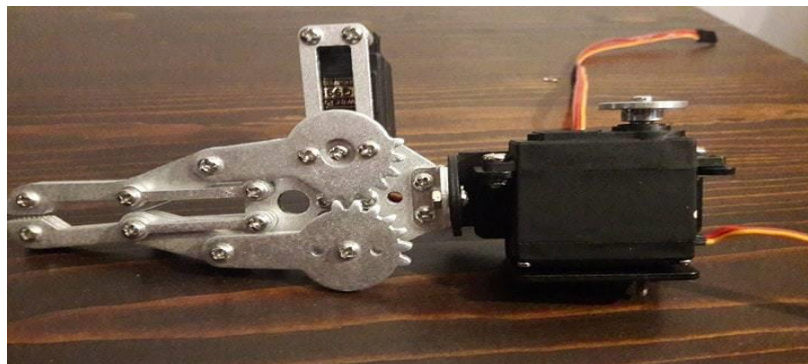
Οι σερβοκινητήρες είναι τοποθετημένοι σε ένα πλαίσιο το οποίο επιτρέπει την σωστή

τοποθέτησή τους στη διάταξη του βραχίονα, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.16. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκε στον σερβοκινητήρα ο πρώτος σύνδεσμος.



Εικόνα 4.17. Βάση και σύνδεσμος βραχίονα

Εν συνεχεία τοποθετήθηκε στην αρπάγη ένας σερβοκινητήρας στις 90° ώστε να ανοίγει και να κλείνει η αρπάγη χωρίς προβλήματα. Επίσης, στην βάση της αρπάγης προσαρμόστηκε ο τελευταίος σερβοκινητήρας με το πλαίσιο του και τον σύνδεσμο για την στήριξη της αρπάγης.



Εικόνα 4.18. Αρπάγη

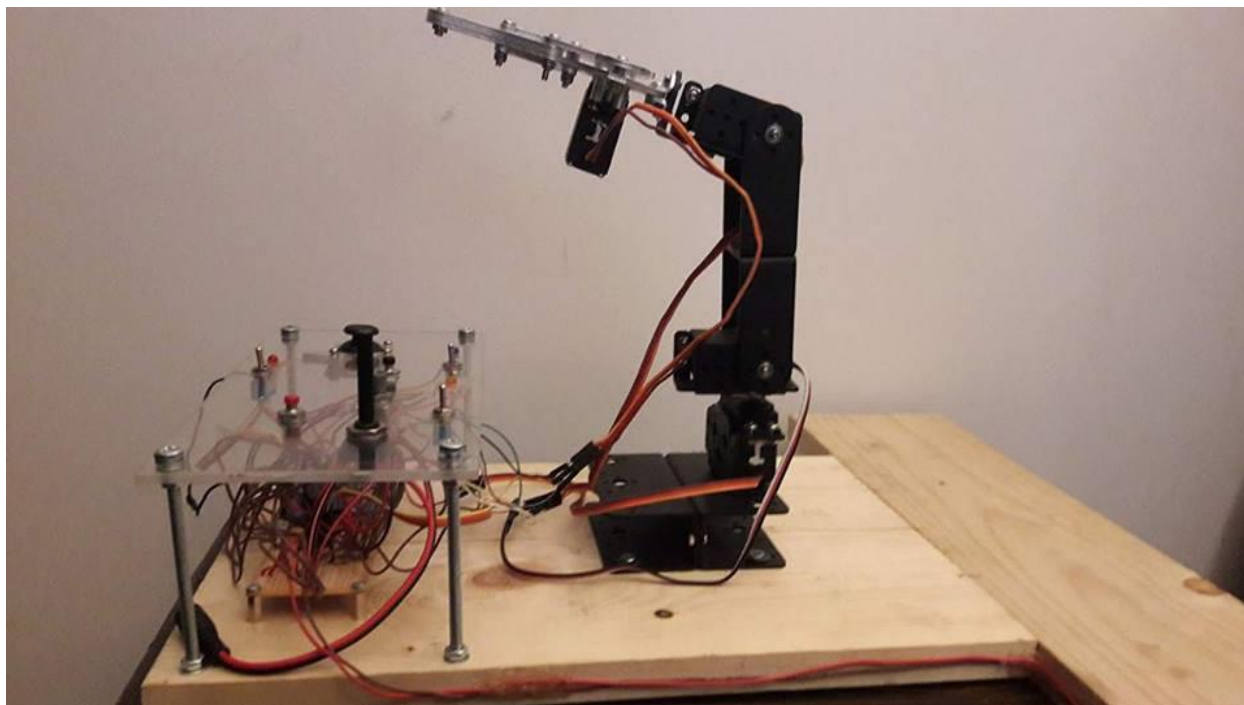
Τέλος, η βάση της αρπάγης τοποθετήθηκε στο σύνδεσμο της διάταξης κι ο βραχίονας ολοκληρώθηκε.



Εικόνα 4.19. Πλάγια όψη διάταξης ρομποτικού βραχίονα



Εικόνα 4.20. Κάτοψη διάταξης βραχίονα



Εικόνα 4.21. Συνολική διάταξη

4.6. Το Arduino

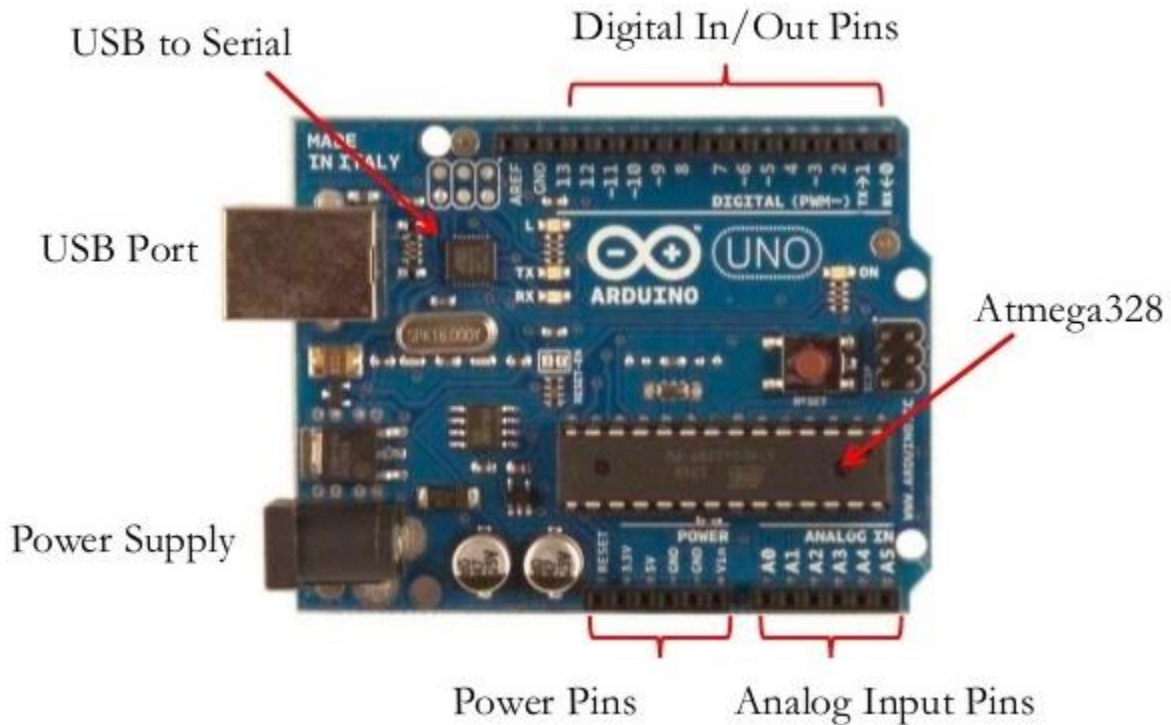
Το Arduino είναι μια πλατφόρμα που διαθέτει ενσωματωμένο μικροελεγκτή, ο οποίος αποτελεί τη βάση της πλατφόρμας. Επίσης αποτελείται από εισόδους και εξόδους για την επικοινωνία με κινητήρες, αισθητήρες και ηλεκτρονικά στοιχεία. Υπάρχουν διάφορες εκδόσεις της πλατφόρμας του Arduino οι οποίες διαφέρουν ως προς τον μικροελεγκτή και το πλήθος των εισόδων και εξόδων. Στην εργασία αυτή έχει χρησιμοποιηθεί η εκδόση Arduino Uno.

Η πλατφόρμα προγραμματίζεται με την γλώσσα Arduino programming language η οποία είναι βασισμένη στην Wiring. Είναι δυνατόν οι εφαρμογές του να εκτελούνται μόνες τους ή να επικοινωνούν με άλλες πλατφόρμες όπως είναι το Raspberry Pi αλλά και με διάφορα προγράμματα σε υπολογιστή όπως Matlab, Labview και άλλα. Μπορεί επιπλέον να γίνει κατάλληλη σύνδεση με compiler μιας άλλης γλώσσας προγραμματισμού όπως JAVA, Python κ.α. Το πρόγραμμα του compiler του Arduino λειτουργεί για όλες τις εκδόσεις και διανέμεται δωρεάν από το επίσημο site (arduino.cc). Τέλος το περιβάλλον ανάπτυξης (compiler), η γλώσσα προγραμματισμού αλλά και οι βιβλιοθήκες της, διατίθενται ελεύθερα προς όλους τους χρήστες προσφέροντας έτσι την εύκολη χρήση και γνώση σε όλους.

Η πλατφόρμα περιέχει και άλλα κυκλώματα για την διευκόλυνση του χρήστη στον προγραμματισμό, όπως το κύκλωμα μετατροπής της θύρας USB σε σειριακή, ώστε να

επικοινωνεί με ηλεκτρονικό υπολογιστή, αλλά και την ενσωμάτωση περισσότερων κυκλωμάτων. Επίσης, περιλαμβάνουν ένα σταθεροποιητή τάσης στα 5Volt και έναν κρυσταλλικό ταλαντωτή 16MHz.

Το μοντέλο Arduino Uno διαθέτει τον μικροελεγκτή ATmega328 ο οποίος, προκειμένου να γίνεται ευκολότερα η διαδικασία εγκατάστασης προγραμμάτων στην μνήμη Flash, είναι προγραμματισμένος κατάλληλα με ένα bootloader και περιέχει φορτωτή εκκίνησης, έτσι ώστε να μην χρειάζεται κάποια επιπλέον εξωτερική συσκευή προγραμματισμού AVR ελεγκτών.



Εικόνα 4.22. Πλατφόρμα Arduino Uno

4.6.1. Είσοδοι – Έξοδοι

Η πλατφόρμα Arduino Uno αποτελείται από την σειριακή είσοδο, την είσοδο τροφοδοσίας και τα θηλυκά pin που βρίσκονται αριστερά και δεξιά της πλατφόρμας και χωρίζονται σε αναλογικά και ψηφιακά pin.

- Η σειριακή θύρα βοηθά στην επικοινωνία της πλατφόρμας με έναν υπολογιστή μέσω USB καλωδίου. Η μετατροπή από USB σε σειριακή όπως η FTDI FT232 γίνεται με την χρήση κυκλώματος μετατροπής.

- Η πλατφόρμα μπορεί να τροφοδοτηθεί μέσω του υπολογιστή και της σειριακής θύρας ή με την χρήση εξωτερικής τροφοδοσίας μέσω της εισόδου τροφοδοσίας που βρίσκεται στην αριστερή πλευρά της πλατφόρμας. Για να λειτουργεί σωστά η πλατφόρμα η τροφοδοσία πρέπει να είναι από 7Volt μέχρι 12Volt.
- Στην κάτω αριστερή πλευρά με την ένδειξη ANALOG IN, βρίσκονται τα αναλογικά pin που είναι έξι από A0 έως A5. Πρόκειται για αναλογικές εισόδους που η κάθε μια χρησιμοποιεί Analog Digital Converter για να αναγνωρίζει την τιμή εισόδου ενός αισθητήρα. Αν για παράδειγμα έχουμε συνδέσει ένα ποτενσιόμετρο και η τάση που δέχεται μια από τις αναλογικές εισόδους είναι 0Volt, τότε πρόγραμμα θα διαβάσει από την πλατφόρμα την τιμή 0, ενώ αν είναι 5Volt θα διαβάσει την τιμή 1023. Η τιμή που διαβάσει ο compiler από το Arduino είναι ένας ακέραιος αριθμός αναλύσης με 10-bit.
- Τα ψηφιακά pin βρίσκονται στην δεξιά πλευρά της πλατφόρμας και στο σύνολό τους είναι 14. Όλα αυτά τα ψηφιακά pin μπορούν να αναβοσβήσουν ένα LED, να κινήσουν κάποιον κινητήρα ή να δεχτούν μια τιμή εισόδου από έναν διακόπτη κ.α. Κάποιες όμως έχουν και άλλες λειτουργίες όπως:
 - Τα pin 0 και 1 λειτουργούν στην σειριακή θύρα ως RX και TX. Έτσι, όταν σταλούν δεδομένα από την πλατφόρμα προς τη θύρα, αυτά μεταφέρονται στην θύρα USB μέσω του μετατροπέα, αλλά και στο pin 0 για να διαβαστούν από άλλη συσκευή συνδεδεμένη στην πλατφόρμα.
 - Τα pin 2 και 3 λειτουργούν ως εξωτερικά interrupt. Αυτό σημαίνει πως με τον κατάλληλο προγραμματισμό μπορούν να ρυθμιστούν με τέτοιο τρόπο ώστε, δίνοντας μια εντολή, να σταματούν την κανονική ροή του προγράμματος και εκτελούν μια συγκεκριμένη συνάρτηση.
 - Τέλος τα 3,5,6,9,10 και 11 pin μπορούν να παρέχουν σήμα PWM (Pulse Width Modulation). Έτσι μπορούν να δώσουν τιμές από 0 έως 255. Για παράδειγμα αν δοθεί η τιμή 0 σε ένα LED, αυτό θα είναι σβηστό, ενώ αν δοθεί η τιμή 255 αυτό θα ακτινοβολεί. Οι ενδιάμεσες τιμές αυξομειώνουν την ακτινοβολία του. Ενώ τα υπόλοιπα pin απλά θα ανάβουν ή θα σβήνουν το LED.
- Τέλος τα Power pin βρίσκονται πάνω από τα analog pin. Το Reset όταν ενωθεί με μια από τις τρεις γειώσεις της πλατφόρμας κάνει επανεκκίνηση του Arduino. Τα pin με την ένδειξη 3,3V και 5V τροφοδοτούν εξαρτήματα ή κυκλώματα με την ανάλογη τάση. Το pin με την ένδειξη Vin μπορεί είτε να περάσει την εξωτερική τάση (7V-12V) που δέχεται το Arduino από την είσοδο τροφοδοσίας σε άλλα κυκλώματα ή εξαρτήματα, είτε να

λειτουργήσει όπως η είσοδος εξωτερικής τροφοδοσίας όταν συνδεθεί με μια γείωση της πλατφόρμας.

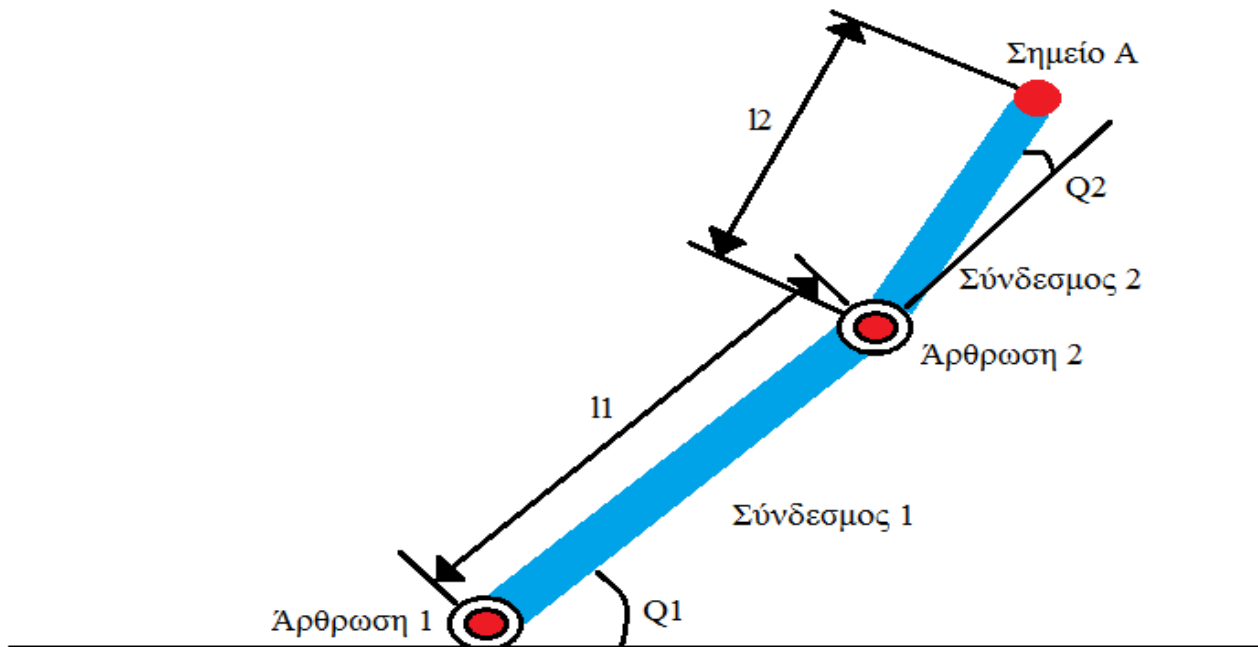
4.6.2. Μνήμη

Η πλατφόρμα Arduino Uno περιέχει τριών ειδών μνήμες: την SRAM, την EEPROM και την Flash.

- Μνήμη SRAM είναι 2Kb και μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τα προγράμματα του χρήστη προκειμένου να αποθηκευτούν τυχόν μεταβλητές, πίνακες κ.α. Φυσικά μόλις σταματήσει η παροχή ρεύματος προς το Arduino, γίνεται reset στην μνήμη.
- Η μνήμη EEPROM έχει χώρο 1Kb. Σε αυτή μπορούμε να αποθηκεύσουμε δεδομένα ανά byte, ενώ σε περίπτωση που υπάρξει απώλεια ρεύματος δε θα γίνει reset στη μνήμη.
- Τέλος η μνήμη Flash έχει χώρο 32Kb, εκ των οποίων τα 5Kb χρησιμοποιούνται για το bootload του μικροελεγκτή. Στον υπόλοιπο χώρο της μνήμης αυτής αποθηκεύεται το πρόγραμμα που θα δώσει ο χρήστης. Η μνήμη Flash όπως και η EEPROM δεν θα κάνουν reset μόλις σταματήσει η παροχή ρεύματος προς το Arduino.

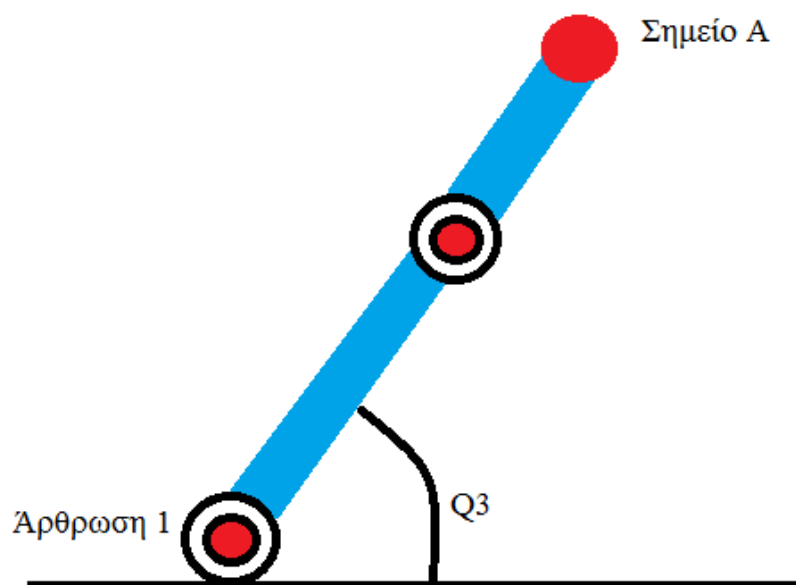
4.7. Επίλυση ευθύ κινηματικού προβλήματος

Στα πλαίσια της ανάπτυξης και λειτουργίας τους ρομποτικού βραχίονα επιλύθηκε το ευθύ κινηματικό πρόβλημα προς το σημείο A χρησιμοποιώντας την μέθοδο Denavit-Hatemberg. Όπως αναφέρθηκε και εξηγήθηκε στο Κεφάλαιο 3 το ευθύ κινηματικό πρόβλημα, προσπαθούμε να εντοπίσουμε την κίνηση του σημείου A ως προς τις συντεταγμένες του χώρου εργασίας του βραχίονα γνωρίζοντας τις γωνίες μετατόπισης των αρθρώσεων του.



Εικόνα 4.23. Ρομποτικός βραχίονας άξονες Y,Z πλάγια όψη διάταξη

Για να μπορέσουμε να λύσουμε το ευθύ κινηματικό πρόβλημα του βραχίονα πρέπει πρώτα να οριοθετήσουμε τους άξονες κίνησης. Έτσι στην εικόνα 4.23, οι αρθρώσεις κινούνται γύρω από τον άξονα X.



Εικόνα 4.24. Κίνηση βραχίονα γύρω από τον άξονα Z κάτοψη διάταξης

Η εικόνα 4.23. δείχνει την πλάγια όψη του ρομποτικού βραχίονα. Οι κινήσεις των αρθρώσεων 1 και 2 εκτελούνται μεταξύ των Y και Z αξόνων με σταθερό άξονα τον X.

Η εικόνα 4.24. δείχνει την κάτοψη του βραχίονα με την άρθρωση 1 να κινείται στους άξονες X και Y με σταθερό άξονα τον Z.

Στην εικόνα 4.23. η άρθρωση 1 είναι το σημείο O_0 , η άρθρωση 2 το σημείο O_2 και το σημείο A της αρπάγης είναι το σημείο O_3 . Στην εικόνα 4.24. το σημείο O_1 ταυτίζεται με το σημείο O_0 της 1 άρθρωσης και θα χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος για την στρέψη της διάταξης στον άξονα Z.

Οι μεταβλητές για της μεθόδου Denavit-Hatemberg είναι τα μήκη $a=L$, $a_1=L_1$ και $a_2=L_2$, η γωνία στρέψης είναι $b=q_3$, το περιθώριο d έχει την τιμή 0 και οι γωνίες είναι $\theta_1=q_1$ και $\theta_2=q_2$.

Οι κινήσεις του βραχίονα γύρω από τον άξονα X εκφράζονται από τους μετασχηματισμούς του συστήματος συντεταγμένων H^3_0 και ισχύει η σχέση $H^3_0 = H^2_0 * H^3_2$. Ενώ για την κίνηση του βραχίονα γύρω από τον άξονα Z έχουμε τον ομογενή μετασχηματισμό H^1_0 .

Πριν ξεκινήσει η εύρεση των πινάκων ως προς το σύστημα συντεταγμένων θα καθοριστούν οι πίνακες μετατόπισης $d^2_0 = [0 \ L_1 * c_{q1} \ L_1 * s_{q1} \ 1]$, $d^3_2 = [0 \ L_2 c_{q2} \ L_2 * s_{q2} \ 1]$ και $S_A = [0 \ 0 \ 0 \ 1]$. Οι παραπάνω πίνακες έχουν μέγεθος 1 x 4.

Για τις κινήσεις από τα σημεία O_0 προς το O_3 έχουμε $H^3_0 = Rot_{x,qn}$. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3 ο πίνακας H^3_0 έχει την μορφή:

$$H^3_0 = \begin{bmatrix} R^3_0 & d^3_0 \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}$$

Για λόγους συντομίας έχουν χρησιμοποιηθεί $cq = \cos q$ και $sq = \sin q$.

Οι πίνακες στρέψης R^3_2, R^2_0, R^1_0 έχουν τις παρακάτω μορφές:

$$R^2_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{q1} & -s_{q1} \\ 0 & s_{q1} & c_{q1} \end{bmatrix}$$

$$R^3_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{q2} & -s_{q2} \\ 0 & s_{q2} & c_{q2} \end{bmatrix}$$

$$R^1_0 = \begin{bmatrix} c_{q3} & -s_{q3} & 0 \\ s_{q3} & c_{q3} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R^3_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{q2} & -s_{q2} \\ 0 & s_{q2} & c_{q2} \end{bmatrix}$$

Έτσι, οι πίνακες του ομογενούς μετασχηματισμού του συστήματος συντεταγμένων έχουν ως εξής:

$$H^2_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{q1} & -s_{q1} & L1c_{q1} \\ 0 & s_{q1} & c_{q1} & L1s_{q1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$H^3_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{q2} & -s_{q2} & L2c_{q2} \\ 0 & s_{q2} & c_{q2} & L2s_{q2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$H^1_0 = \begin{bmatrix} c_{q3} & -s_{q3} & 0 & Lc_{q3} \\ s_{q3} & c_{q3} & 0 & Ls_{q3} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Πλέον μπορούμε να καθορίσουμε τον πίνακα $H^3_0 = H^2_0 * H^3_2$.

$$H^3_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{q1}c_{q2} - s_{q1}s_{q2} & -(s_{q2}c_{q1} + s_{q1}c_{q2}) & L2c_{q1}c_{q2} - L2s_{q1}s_{q2} + L1c_{q1} \\ 0 & c_{q1}c_{q2} - s_{q1}s_{q2} & -s_{q2}c_{q1} + s_{q1}c_{q2} & L2c_{q1}c_{q2} - L2s_{q1}s_{q2} + L1c_{q1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Με τη χρήση τριγωνομετρικών ταυτοτήτων $c_{q1+q2} = c_{q1}c_{q2} - s_{q1}s_{q2}$ και $s_{q1+q2} = s_{q1}c_{q2} - c_{q1}s_{q2}$ ο πίνακας παίρνει την μορφή:

$$H^3_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{q1+q2} & -s_{q1+q2} & L2c_{q1+q2} + L1c_{q1} \\ 0 & s_{q1+q2} & c_{q1+q2} & L2s_{q1+q2} + L1s_{q1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Τέλος έχουμε τον $H^3_0 = H^3_1 * H^3_2$ για την κίνησή του σε όλους τους άξονες.

$$H^3_0 = \begin{bmatrix} c_{q3} & -s_{q3} & 0 & Lc_{q3} \\ s_{q3}c_{q1+q2} & c_{q3}c_{q1+q2} & -s_{q1+q2} & Lc_{q3}c_{q1+q2} + L2c_{q1+q2} + L1c_{q1} \\ s_{q3}s_{q1+q2} & c_{q3}s_{q1+q2} & c_{q1+q2} & Ls_{q3}s_{q1+q2} + L2s_{q1+q2} + L1s_{q1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ο πίνακας των γενικευμένων συντεταγμένων του σημείου A ως προς τις συντεταγμένες του χώρου εργασίας με στροφή γύρω από τον άξονα X, καθορίζεται από την εξής σχέση: $P_A = H^3_0 * S_A$.

$$P_A = \begin{bmatrix} Lc_{q3} \\ Lc_{q3}c_{q1+q2} + L2c_{q1+q2} + L1c_{q1} \\ Ls_{q3}s_{q1+q2} + L2s_{q1+q2} + L1s_{q1} \\ 1 \end{bmatrix}$$

4.8. Επίλυση αντίστροφου κινηματικού προβλήματος

Στην προηγούμενη ενότητα με την μέθοδο Denavit-Hatemberg γνωρίζοντας τις γωνίες στρέψης προσδιορίστηκε η θέση του σημείου A στον χώρο, έτσι σε αυτή την ενότητα προσπαθούμε να προσδιορίσουμε τις γωνίες στρέψης έχοντας σαν δεδομένο την θέση του σημείου A. Προκειμένου να μελετηθεί το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα, έγινε μελέτη αρχικά για την γωνία q_3 της βάσης της διάταξης και στη συνέχεια βρέθηκαν οι γωνίες q_1 και q_2 οι οποίες είναι οι γωνίες στρέψης ως προς τον άξονα X. Ο πίνακας H^3_0 της μεθόδου Denavit-Hartenberg ισχύει και για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος.

Εύκολα μπορεί να υπολογιστεί η γωνία q_3 με την χρήση του τόξου εφαπτομένης των ορισμάτων dx και dy από τον εξής τύπο:

$$q_3 = \tan^{-1}\left(\frac{dx}{dy}\right), \text{ όπου } dx = Lc_{q3} \text{ και } dy = L1c_{q1} + L2c_{q1+q2} + Lc_{q3}c_{q1+q2}$$

Η γωνία q_2 υπολογίζεται από το άθροισμα των τετραγώνων των y και z όπου

$$y = L_1 c_{q_1} + L_2 c_{q_1+q_2} \quad (1) \text{ και}$$

$$z = L_1 s_{q_1} + L_2 s_{q_1+q_2} \quad (2)$$

Επομένως: $y^2+z^2=L_1^2+L_2^2 + 2L_1L_2c_{q_2}$

Λύνοντας ως προς c_{q_2} καταλήγουμε στην εξίσωση $c_{q_2} = \frac{y^2+z^2-L_1^2-L_2^2}{2L_1L_2}$

Για να ισχύει η παραπάνω εξίσωση πρέπει το δεξιό μέρος της να βρίσκεται εντός του πεδίου $[-1,1]$, αν βρίσκεται εκτός του πεδίου αυτού δεν μπορούμε να έχουμε λύση. Θεωρώντας ότι η κίνηση γίνεται εντός του επιθυμητού χώρου εργασίας, υπολογίζουμε το $s_{q_2} = \pm\sqrt{1 + cq_2^2}$. Το πρόσημο \pm καθορίζει τη φορά της γωνίας στρέψης. Τέλος, η γωνία q_2 υπολογίζεται από το τόξο εφαπτομένης των ορισμάτων c_{q_2} και s_{q_2} : $q_2 = \tan^{-1}(s_{q_2}, c_{q_2})$.

Τέλος για να υπολογίσουμε την γωνία q_1 πρέπει να βρεθούν τα ορίσματα για δύο τόξα εφαπτομένης, έτσι ορίζουμε τις μεταβλητές

$$a = L_1 + L_2 c_{q_2} \quad (3) \text{ και } b = L_2 s_{q_2} \quad (4)$$

Πλέον οι εξισώσεις (1) και (2) γράφονται:

$$y = a c_{q_1} - b s_{q_1} \quad (5) \text{ και } z = a s_{q_1} + b c_{q_1} \quad (6)$$

Θεωρούμε ότι $c = \pm\sqrt{a^2 + b^2}$ (7) το πρόσημο \pm όπως και προηγουμένως καθορίζει την κατεύθυνση που θα ακολουθήσει η γωνία. Έτσι το πρώτο τόξο εφαπτομένης με ορίσματα τις μεταβλητές a και b που ορίσαμε είναι: $z = \tan^{-1}(a, b)$.

Από τις εξισώσεις (3),(4) και (7) οι μεταβλητές παίρνουν την μορφή:

$$a = c \cdot \cos(z) \text{ και } b = c \cdot \sin(z)$$

Έτσι οι εξισώσεις (1) και (2) μπορούν να γραφτούν και ως εξής:

$$\frac{y}{c} = \cos(z)\cos(q_1) - \sin(z)\sin(q_1) \text{ και}$$

$$\frac{z}{c} = \cos(z)\cos(q_1) + \sin(z)\sin(q_1)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις έχουμε:

$$\cos(z+q_1) = \frac{y}{c} \text{ και } \sin(z+q_1) = \frac{z}{c}$$

Έτσι το δεύτερο τόξο εφαπτομένης είναι: $z + q_1 = \tan^{-1}(z, y)$

Τέλος μπορούμε να υπολογίσουμε την τελευταία γωνία q_1 από την εξίσωση:

$$q_1 = \tan^{-1}(z,y) - \tan^{-1}(a,b).$$

4.9. Ανάλυση κώδικα του Arduino

Ο κώδικας είναι το κομμάτι εκείνο που ελέγχει την θέση του βραχίονα και τις κινήσεις των αρθρώσεων αλλά και δέχεται και επεξεργάζεται τα δεδομένα από τους αισθητήρες. Στην αρχή του προγράμματος καταχωρούνται οι απαραίτητες βιβλιοθήκες για την ομαλή λειτουργία του και δηλώνονται οι μεταβλητές και τα pin που θα χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια. Κατόπιν, δηλώνονται οι είσοδοι (INPUTS) και οι έξοδοι (OUTPUTS) της πλατφόρμας. Τέλος γράφεται το κύριο μέρος του κώδικά λειτουργίας του προγράμματος.

Η βιβλιοθήκη που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το πρόγραμμα είναι η VarSpeedServo, η οποία μας επιτρέπει τον έλεγχο ταχύτητας των κινητήρων. Οι σερβοκινητήρες για να λειτουργήσουν ομαλά χρειάζονται σήμα PWM. Η βιβλιοθήκη με την χρήση των εντολών `servo.write(degrees)` και `servo.slowmove(degrees, speed)` επιτρέπει από τον χρήστη να δηλώσει τις επιθυμητές μοίρες στρέψης του κινητήρα και η πλατφόρμα μετατρέπει το σήμα σε PWM ώστε να στραφεί στην επιθυμητή θέση. Αν και οι Digital με τους Analog σερβοκινητήρες, λειτουργούν σε διαφορετικά duty cycle και αντιλαμβάνονται το PWM με διαφορετικές περιόδους, με τις δύο παραπάνω εντολές μπορούμε να λειτουργήσουμε και τα δύο είδη σερβοκινητήρων χωρίς να επηρεαζόμαστε από αυτό.

Με την εντολή `servo.slowmove(degrees, speed)` μπορεί να γίνει έλεγχος και της ταχύτητας στρέψης των σερβοκινητήρων. Πιο συγκεκριμένα η μεταβλητή `speed` παίρνει τις τιμές από 0 έως 255. Η τιμή 0 και η τιμή 255 δίνουν εντολή στον κινητήρα να κινηθεί με μέγιστη ταχύτητα, ενώ η τιμή 1 δίνει την εντολή για την χαμηλότερη δυνατή ταχύτητα και όσο η τιμή αυξάνεται προς την τιμή 255 αυξάνεται και η ταχύτητα. Ανάλογα με το μοντέλο του κινητήρα, οι τιμές για την μέγιστη ταχύτητα στρέψης του μπορεί να είναι περισσότερες. Για παράδειγμα, για τους κινητήρες του ρομποτικού βραχίονα της εργασίας οι τιμές για τις μέγιστες ταχύτητες κυμαίνονται από την τιμή 100 μέχρι την τιμή 255 και η ταχύτητα είναι η μέγιστη για όλες τις ενδιάμεσες τιμές.

Για την ομαλή λειτουργία των μεταβλητών και των ηλεκτρονικών στοιχείων όπως το joystick, τα push button και τα ποτενσιόμετρα, έχουν χρησιμοποιηθεί δύο μεταβλητές για το κάθε ένα από αυτά. Η μια είναι η μεταβλητή εισόδου και η δεύτερη είναι η μεταβλητή την οποία μπορεί το πρόγραμμα να την αξιοποιήσει κατάλληλα για την σωστή εκτέλεσή του.

Στους πίνακες `s1[]`, `s2[]`, `s3[]`, `s4[]` αποθηκεύονται στη μνήμη του Arduino UNO οι τιμές της θέσης των σερβοκινητήρων τις οποίες ορίζει ο χρήστης. Στον πίνακα `sa[]` αποθηκεύεται η

ταχύτητα για την κίνηση των σερβοκινητήρων. Στην κύρια ρουτίνα του κώδικα καλούνται δύο υπορουτίνες. Αυτές είναι: η setptr() και η runptr(). Η υπορουτίνα setptr αποθηκεύει τις τιμές των θέσεων αλλά και της ταχύτητας των κινητήρων στους πίνακες, ενώ η ρουτίνα runptr θα δώσει εντολή στους κινητήρες να μετακινηθούν στις θέσεις που έχουν αποθηκευτεί στους πίνακες.

Για την ευκολότερη κατανόηση του κώδικα έχουν χρησιμοποιηθεί επιπλέον σχόλια, τα οποία το πρόγραμμα δε τα αντιλαμβάνεται για εντολές, με τη χρήση των χαρακτήρων «//», οι οποίοι δηλώνουν πως ό,τι υπάρχει μετά από αυτούς αποτελεί σχόλιο.

```
#include <VarSpeedServo.h>
```

```
VarSpeedServo servo1; //1ος Servo της βάσης για κίνηση δεξιά και αριστερά  
VarSpeedServo servo2; //2ος Servo της βάσης για κίνηση πάνω και κάτω  
VarSpeedServo servo3; //3ος Servo για την κίνηση της αρπάγης πάνω και κάτω  
VarSpeedServo servo4; //4ος Servo αρπάγη
```

```
int ra = A0; //A φωτοαντίσταση  
int rb = A1; //B φωτοαντίσταση  
int potpin = A2; // ποτενσιόμετρο θέσης 3ου servo  
int potspeed = A3; //ποτενσιόμετρο ταχύτητας  
int joyX = A4; // άξονας X του Joystick  
int joyY = A5; // άξονας Y του Joystick
```

```
int switcha = 2; //διακόπτης για αυτόματη λειτουργία  
int switchx = 3; //διακόπτης για χειροκίνητη λειτουργία  
int sptr = 4; //διακόπτης για την έναρξη καταχώρησης των θέσεων της διάταξης από τον χρήστη  
int rauto = 5; //διακόπτης για την εκτέλεση των καταχωρημένων θέσεων  
int bArpaghs = 6; //button για το άνοιγμα και το κλείσιμο της αρπάγης  
int bptr = 7; //button για την καταχώρηση ή εκτέλεση των δοσμένων θέσεων
```

```
int sa[100]; //speed array  
int s1[100]; //servo 1 array  
int s2[100]; //servo 2 array  
int s3[100]; //servo 3 array  
int s4[100]; //servo 4 array
```

```
//καταχώρηση μεταβλητών τιμών από τις αναλογικές και ψηφιακές εισόδους  
int joystickValX;  
int joystickValY;  
int potval;  
int valspeed;  
int stateArpaghs = 0;  
int statePTP = 0;
```



```

int a=0; //μετρητής για τη θέση της αρπάγης
int n=0; //πλήθος του μέγεθους των πινάκων

void setup() {

    //ορίζονται τα Pin των σερβοκινητήρων
    servo1.attach(8);
    servo2.attach(9);
    servo3.attach(10);
    servo4.attach(11);

    //καθορίζεται η αρχική θέση της διάταξης
    servo1.write(92);
    servo2.write(50);
    servo3.write(90);
    servo4.write(30);

    //ορίζονται τα Pin εισόδων
    pinMode(ra, INPUT); //φωτοαντίσταση A σημείου
    pinMode(rb, INPUT); //φωτοαντίσταση B σημείου
    pinMode(switcha, INPUT); //διακόπτης αυτόματης λειτουργίας
    pinMode(switchx, INPUT); //διακόπτης χειροκίνητης λειτουργίας
    pinMode(joyX, INPUT); //joystick
    pinMode(joyY, INPUT); //joystick
    pinMode(potp, INPUT); //ποτενσιόμετρο για τη θέση του servo
    pinMode(bArpaghs, INPUT); //Button αρπάγης
    pinMode(potspeed, INPUT); //ποτενσιόμετρο ταχύτητας
    pinMode(sptp, INPUT); //διακόπτης για λειτουργία point to point
    pinMode(bptp, INPUT); //button για καταχώρηση σημείων point to point
    pinMode(rauto, INPUT); //διακόπτης για την έναρξη λειτουργίας pont to point
    Serial.begin(9600);
}

void loop() {

    int pha=analogRead(ra); //διαβάζει την τιμή από την φωτοαντίσταση στο σημείο A
    int phb=analogRead(rb); //διαβάζει την τιμή από την φωτοαντίσταση στο σημείο B
    int sa=digitalRead(switcha);
    //διαβάζει την τιμή από τον διακόπτη για την εκτέλεση της αυτόματης λειτουργίας
    int sx=digitalRead(switchx);
    //διαβάζει την τιμή από τον διακόπτη για την εκτέλεση της χειροκίνητης λειτουργίας
    int set=digitalRead(sptp);
    //διαβάζει την τιμή από τον διακόπτη για την έναρξη καταχώρησης θέσεων
    int runauto=digitalRead(rauto);
    //διαβάζει την τιμή από τον διακόπτη για την εκτέλεση των καταχωρημένων θέσεων
    int stateArpaghs=digitalRead(bArpaghs); //διαβάζει την τιμή από το button της αρπάγης

```

```
int statePTP=digitalRead(bptp);  
//διαβάζει την τιμή από το button για την καταχώρηση ή την εκτέλεση των δοσμένων θέσεων
```

```
if (sa == HIGH){  
  //ξεκινάει η αυτόματη λειτουργία αν έρθει σήμα από τον διακόπτη switcha  
  //ελέγχει σε ποιο από τα A και B σημεία είναι το αντικείμενο  
  if (pha < 300 && phb > 300){  
    //μετακίνηση του αντικειμένου από το A προς το B σημείο  
    servo1.slowmove(45,40);  
    delay(1500);  
    servo2.slowmove(105,40);  
    delay(1500);  
    servo3.slowmove(30,40);  
    delay(1500);  
    servo4.slowmove(95,40);  
    delay(1500);  
    servo3.slowmove(120,40);  
    delay(1500);  
    servo2.slowmove(30,50);  
    delay(2000);  
    servo1.slowmove(135,60);  
    delay(1500);  
    servo2.slowmove(100,40);  
    delay(1500);  
    servo3.slowmove(30,40);  
    delay(1500);  
    servo4.slowmove(30,40);  
    delay(1500);  
    servo3.slowmove(120,40);  
    delay(1500);  
    servo2.slowmove(30,50);  
    delay(2000);  
    servo3.slowmove(90,40);  
    delay(1500);  
    servo1.slowmove(90,40);  
    delay(1500);  
  }  
  
  if (pha > 300 && phb < 300){  
    //μετακίνηση αντικειμένου από το B προς το A σημείο  
    servo1.slowmove(135,40);  
    delay(1500);  
    servo2.slowmove(105,40);  
    delay(1500);  
    servo3.slowmove(30,40);  
    delay(1500);
```

```

servo4.slowmove(95,40);
delay(1500);
servo3.slowmove(160,40);
delay(1500);
servo2.slowmove(30,50);
delay(2000);
servo1.slowmove(45,40);
delay(1500);
servo2.slowmove(100,40);
delay(1500);
servo3.slowmove(30,40);
delay(1500);
servo4.slowmove(30, 40);
delay(1500);
servo3.slowmove(160,40);
delay(1500);
servo2.slowmove(30,50);
delay(2000);
servo3.slowmove(90,40);
delay(1500);
servo1.slowmove(90,40);
delay(1500);
}
}

```

```

if (sx == HIGH){

```

//ξεκινάει η χειροκίνητη λειτουργία αν έρθει σήμα από τον διακόπτη switchx

//ποτενσιόμετρο ταχύτητας

```

valspeed = analogRead(potspeed);

```

```

valspeed = map(valspeed, 0, 1023, 10,110);

```

//κώδικας για το joystick

```

joystickValX = analogRead(joyX);

```

```

joystickValX = map(joystickValX, 0, 1023, 20, 140);

```

```

servo2.slowmove(joystickValX,valspeed);

```

```

joystickValY = analogRead(joyY);

```

```

joystickValY = map(joystickValY, 0, 1023, 178, 2);

```

```

servo1.slowmove(joystickValY,valspeed);

```

//κώδικας για την θέση του 3ου Servo με τη χρήση ποτενσιόμετρου

```

potval = analogRead(potpin);

```

```

potval = map(potval, 0, 1023, 2, 178);

```

```

servo3.slowmove(potval,valspeed);

```

//κώδικας για το άνοιγμα και το κλείσιμο της αρπάγης με τη χρήση button

```

stateArpaghs = digitalRead(bArpaghs);
if(a == 0 && stateArpaghs == HIGH)
{
  servo4.slowmove(95,valspeed); //η αρπάγη κλείνει
  a = 1;
}
else if(a == 1 && stateArpaghs == HIGH)
{
  servo4.slowmove(45,valspeed); //η αρπάγη ανοίγει
  a = 0;
}

//κώδικας για την καταχώρηση τυχαίων θέσεων της διάταξης από τον χρήστη
if( sx == HIGH && set == 1 && statePTP >= HIGH){
  setptp();
}

//κώδικας για την εκτέλεση των καταχωρημένων θέσεων
if (sx == HIGH && runauto == 1 && statePTP == HIGH ){
  runptp();
  n=0;
}
}
Serial.print (" pha-->");
Serial.print(pha);
Serial.print (" phb-->");
Serial.print(phb);
Serial.print (" joystickValX-->");
Serial.print(joystickValX);
Serial.print (" joystickValY-->");
Serial.print(joystickValY);
Serial.print(" potval-->");
Serial.print(potval);
Serial.print(" valspeed-->");
Serial.print(valspeed);
Serial.print(" sptp-->");
Serial.print(set);
Serial.print(" rauto-->");
Serial.print(runauto);
Serial.print(" stateArpaghs-->");
Serial.print(stateArpaghs);
Serial.print(" statePTP-->");
Serial.print(statePTP);
delay(150);
}

```

```

//Function για την καταχώρηση των θέσεων
void setptp (){
  sa[n]=valspeed;
  s1[n]=joystickValY;
  s2[n]=joystickValX;
  s3[n]=potval;
  if( a == 1){
    s4[n]=95;
  }
  else if( a==0 ){
    s4[n]=45;
  }
  Serial.print(" pinakas sa[]--->");
  Serial.print(sa[n]);
  Serial.print(" pinakas s1[]--->");
  Serial.print(s1[n]);
  Serial.print(" pinakas s2[]--->");
  Serial.print(s2[n]);
  Serial.print(" pinakas s3[]--->");
  Serial.print(s3[n]);
  Serial.print(" pinakas s4[]--->");
  Serial.print(s4[n]);
  n=n+1;
  Serial.print(" times n--->");
  Serial.println(n);
  delay(1000);
}

//Function για την εκτέλεση των καταχωρημένων θέσεων
void runptp (){
  int j=n-1;
  int sp; int b; int c; int d; int e;
  for (int x=0; x<=j; x++){
    sp=sa[x];
    b=s1[x];
    c=s2[x];
    d=s3[x];
    e=s4[x];
    servo1.slowmove(b,sp);
    servo2.slowmove(c,sp);
    servo3.slowmove(d,sp);
    servo4.slowmove(e,sp);
    Serial.print(" pinakas sa[]--->");
    Serial.print(sa[n]);
    Serial.print(" pinakas s1[]--->");
    Serial.print(s1[n]);

```

```
Serial.print(" pinakas s2[]--->");
Serial.print(s2[n]);
Serial.print(" pinakas s3[]--->");
Serial.print(s3[n]);
Serial.print(" pinakas s4[]--->");
Serial.print(s4[n]);
delay(1500);
}
servo1.slowmove(s1[0],sa[0]);
servo2.slowmove(s2[0],sa[0]);
servo3.slowmove(s3[0],sa[0]);
servo4.slowmove(s4[0],sa[0]);
delay(1500);
}
```

Κεφάλαιο 5ο

5. Συμπεράσματα και Μελλοντικές Βελτιώσεις

5.1. Συμπεράσματα

Κατά την εκτέλεση της εργασίας μελετήσαμε τα στάδια για την υλοποίηση ενός ρομποτικού βραχίονα. Γνωστοποιήθηκαν τα κριτήρια για την υλοποίηση διαφόρων διατάξεων ανάλογα με την εκάστοτε διεργασία. Το κύριο κριτήριο για την συγκεκριμένη εργασία ήταν το χαμηλό κόστος, η απόδοση αλλά και ο αντίκτυπος σε περαιτέρω προσθήκες.

Στην τωρινή του μορφή ο βραχίονας μπορεί να εκτελέσει διάφορες λειτουργίες ανάλογα με το είδος του εργαλείου τελικής διεργασίας. Συμπεραίνουμε έτσι, πως η διάταξη του βραχίονα αποτελεί μια πρόιμη μορφή για βραχίονες όπως είναι οι βιομηχανικοί βραχίονες ή η προσομοίωση του ανθρώπινου χεριού.

5.2. Μελλοντικές βελτιώσεις

Όσον αφορά το μηχανολογικό κομμάτι, υπάρχει η δυνατότητα πρόσθεσης δύο ακόμα βαθμών ελευθερίας προκειμένου να πλησιάζει περισσότερο το ανθρώπινο χέρι. Άλλη μια αλλαγή είναι να τοποθετηθεί κάμερα σε ένα σταθερό σημείο και να «βλέπει» το χώρο εργασίας με το αντικείμενο. Έτσι ο βραχίονας θα μπορεί να βρίσκει και να μεταφέρει το αντικείμενο σε περισσότερα από δύο σημεία. Μιας και η πλατφόρμα Arduino θεωρείται open source, στο μέλλον θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν άλλες πλατφόρμες πιο πολύπλοκες στη θέση της ήδη υπάρχουσας.

Βιβλιογραφία

- [1] Φ.Ν. Κουμπούλης, Β.Γ. Μέρτζιος Εισαγωγή στη Ρομποτική Εκδόσεις Παπασωτηρίου Αθήνα 2002
- [2] Δ.Καλλιγερόπουλος, Σ.Βασιλειάδου ΑΕΙ Πειραιά Τ.Τ. Ιστορία της Τεχνολογίας & των Αυτομάτων, Σύγχρονη Εκδοτική, Αθήνα 2005
- [3] Νίκος Μ. Χατζηγιαννάκης Η γλώσσα C++ σε βάθος, Εκδόσεις Κλειδάριθμος Αθήνα 2011
- [4] <http://apothesis.teicm.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/814/sefi.pdf?sequence=1>
- [5] https://apothesis.lib.teicrete.gr/bitstream/handle/11713/7564/SmaragdakisEmmanouil_XoustoulakisKonstantinos2016.pdf?sequence=3
- [6] http://oceanis.lib.teipir.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/1700/aut_00550.pdf?sequence=1
- [7] http://oceanis.lib.teipir.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/1601/aut_00467.pdf?sequence=1
- [8] https://www.doc.ic.ac.uk/~zf509/Publications/2nd_National_Convention_of_ECE_Students.pdf

Ιστοσελίδες

- [1] <https://www.arduino.cc/>
- [2] <https://forum.arduino.cc/>
- [3] <https://el.wikipedia.org>
- [4] <https://servodatabase.com/servo/towerpro/mg995>