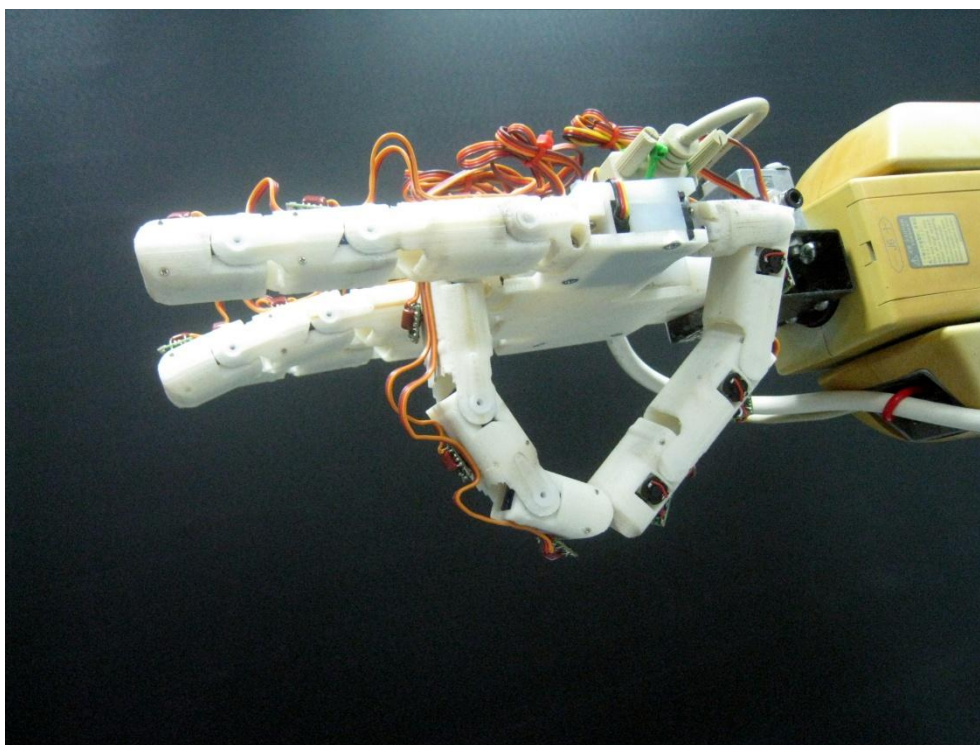




Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών
Τμήμα Μηχανολογίας

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Κινηματική ανάλυση και έλεγχος κίνησης-λαβής ανθρωπόμορφου
ρομποτικού χεριού**



Σπουδαστής:
Κριτσωτάκης Νικόλαος

A.M:
4776

Επιβλέπων καθηγητής:
Φασουλάς Ιωάννης
Επίκουρος Καθηγητής τμήματος Μηχανολογίας Τ.Ε.Ι Κρήτης

Ηράκλειο
2012

Ευχαριστίες

Η πτυχιακή αυτή εργασία εκπονήθηκε στον τομέα της Μηχατρονικής στο τμήμα Μηχανολογίας του ΤΕΙ Ηρακλείου Κρήτης. Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν στην υλοποίηση αυτής της εργασίας, όλο αυτό το χρονικό διάστημα.

Πρώτα από όλα θέλω να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον καθηγητή μου, Επίκουρο Καθηγητή Φασουλά Γιάννη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε δίνοντας μου τη δυνατότητα να εκπονήσω την πτυχιακή μου εργασία στον επιστημονικό τομέα που επιθυμούσα. Όπως επίσης και για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του, για την επίλυση διάφορων θεμάτων.

Θερμές ευχαριστίες απευθύνω σε όλους τους καθηγητές που είχα όλα τα χρόνια της μέχρι στιγμής ακαδημαϊκής μου ζωής, για τις γνώσεις που μου μετέδωσαν και με έκαναν καλύτερο άνθρωπο. Ιδιαίτερα δε, οφείλω να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου στην κατεύθυνση 'Μηχατρονική', καθότι με βοήθησαν καθ' όλη την διάρκεια της παρακολούθησης των μαθημάτων της κατεύθυνσης.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου και ιδιαίτερα τον φίλο μου Κωνσταντουδάκη Γιάννη, με τον οποίο ολοκληρώσαμε μαζί, με τις πτυχιακές μας εργασίες, το ανθρωπόμορφο ρομποτικό χέρι.

Τέλος ένα μεγάλο και εγκάρδιο ευχαριστώ στους γονείς μου, Ελένη και Γεώργιο Κριτσωτάκη αλλά και στον αδερφό μου Μανόλη Κριτσωτάκη, που με στήριζαν ηθικά και οικονομικά όλα αυτά τα χρόνια, δίνοντας μου κουράγιο να φτάσω στο στόχο μου.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή.....	4
Κεφάλαιο 1: Ανθρώπινα και ρομποτικά χέρια	5
1.1 Εισαγωγή	5
1.2 Το ανθρώπινο χέρι	5
1.3 Περιγραφή των βασικών κινήσεων του ρομποτικού χεριού	6
1.4 Οι αρθρώσεις και οι φάλαγγες του χεριού	8
1.5 Τα ρομποτικά χέρια και οι εφαρμογές τους	10
1.6 Τα υποσυστήματα που απαρτίζουν το ρομποτικό χέρι.....	15
Κεφάλαιο 2: Κινηματική Ανάλυση	17
2.1 Εισαγωγή	17
2.2 Κινηματική ανάλυση του ανθρώπινου χεριού.....	18
2.2.1 Βασικές έννοιες για την κινηματική ανάλυση	18
2.2.2 Επίλυση του ευθύ κινηματικού προβλήματος για το ανθρώπινο χέρι.....	20
2.2.3 Επίλυση του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος για τα ανθρώπινα δάχτυλα.....	31
2.2.3.1 Επίλυση του αντίστροφου κινηματικού, για το δάκτυλο του δείκτη πάνω στο επίπεδο που σχηματίζουν οι φάλαγγες	31
2.2.3.2 Επίλυση του αντίστροφου κινηματικού, για το δάκτυλο του δείκτη στον τριδιάστατο χώρο	34
2.2.3.3 Υλοποίηση του αντίστροφου κινηματικού στο MATLAB.....	37
Κεφάλαιο 3: Διασύνδεση του ρομποτικού χεριού με το σύστημα ελέγχου.....	39
3.1 Εισαγωγή.....	39
3.2 Το σύστημα ελέγχου του ρομποτικού χεριού	39
3.3 Το λογισμικό MATLAB	40
3.4 Οι σερβοκινητήρες RC servo	41
3.5 Ο σέρβο ελεγκτής SSC-32.....	44

Κεφάλαιο 4: Χειρονομίες και λαβές που επιτεύχθηκαν με το ρομποτικό χέρι.....	51
4.1 Εισαγωγή.....	51
4.2 Χειρονομίες που επιτεύχθηκαν με το ρομποτικό χέρι	51
4.3 Λαβές που επιτεύχθηκαν με το ρομποτικό χέρι.....	59
 Κεφάλαιο 5: Συλλογή δεδομένων από πραγματικά δάχτυλα με την χρήση του Arduino.....	 67
5.1 Εισαγωγή.....	67
5.2 Ο μικροεπεξεργαστής Arduino	68
5.3 Η κατασκευή.....	69
5.4 Το πρόγραμμα και η συλλογή δεδομένων.....	71
5.5 Η σύνδεση του Arduino με το λογισμικό Matlab	73
 Συμπεράσματα	 77
Βιβλιογραφία.....	79

Εισαγωγή

Η παρούσα πτυχιακή εργασία μελετά την κινηματική ανάλυση καθώς και τον έλεγχο ενός ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο Αυτοματικής και Ρομποτικής του ΤΕΙ Κρήτης.

Για την κινηματική ανάλυση γίνεται η επίλυση του ευθύ και αντίστροφου κινηματικού προβλήματος μέσω μαθηματικών εξισώσεων και χρήση πινάκων. Αυτά επιτυγχάνονται με την βοήθεια του λογισμικού Matlab στο οποίο πραγματοποιείται και η κινηματική προσομοίωση του ρομποτικού χεριού.

Ο έλεγχος του ρομποτικού χεριού γίνεται μέσω του σέρβο-ελεγκτή SSC-32 και σερβοκινητήρων, τα οποία συνδεδεμένα με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και με το λογισμικό Matlab, παίρνουν τα δεδομένα μέσω κατάλληλου κώδικα και γίνεται ο έλεγχος των αρθρώσεων του κάθε δαχτύλου. Έτσι το ρομποτικό χέρι μπορεί να πραγματοποιήσει διάφορες χειρονομίες και πρότυπες λαβές.

Επιπλέον γίνεται η συλλογή δεδομένων από πραγματικά δάκτυλα με την βοήθεια μιας κατασκευής με ποτενσιόμετρα, του Arduino και των λογισμικών Matlab και Arduino. Η κατασκευή αυτή προσαρμόζεται στο δάχτυλο μας και καθώς το κινούμεν παίρνουμε τιμές που αντιστοιχούν στις γωνίες των αρθρώσεων του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΝΘΡΩΠΙΝΑ ΚΑΙ ΡΟΜΠΟΤΙΚΑ ΧΕΡΙΑ

1.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στο ανθρώπινο χέρι όσον αφορά τις αρθρώσεις και τις φάλαγγες που το αποτελούν. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στο τι είναι ρομποτικό χέρι και σε μερικές από τις εφαρμογές του. Επίσης αναφέρονται διάφορα ανθρωπόμορφα ρομποτικά χέρια που έχουν κατασκευαστεί.

1.2 Το ανθρώπινο χέρι

Το χέρι είναι ένα από τα πιο σημαντικά όργανα του ανθρώπινου σώματος καθώς καθορίζει την αλληλεπίδραση μας με τον υλικό κόσμο. Με τέσσερα εύκαμπτα δάχτυλα και τον αντίχειρα, κάνει το 26% των δυνατοτήτων κίνησης του ανθρώπινου σώματος. Η λειτουργική μοναδικότητα του ανθρώπινου χεριού προκύπτει από την πολυπλοκότητα της γεωμετρικής διάταξης των συνδέσμων, αρθρώσεων και μυών, που λειτουργούν ως μια συντονισμένη οντότητα για να παράγουν ένα ευρύ φάσμα ευέλικτων κινήσεων. Η περίπλοκη κινηματική και δυναμική του μυοσκελετικού συστήματος του ανθρώπινου χεριού επιτρέπει την εκπληκτική λειτουργική ικανότητα του. Μάλιστα οι επιστήμονες αναφέρουν ότι «το ανθρώπινο χέρι αποτελεί την προέκταση του μυαλού», θέλοντας να δείξουν με αυτόν τον τρόπο το μέγεθος των ικανοτήτων του χεριού μας.

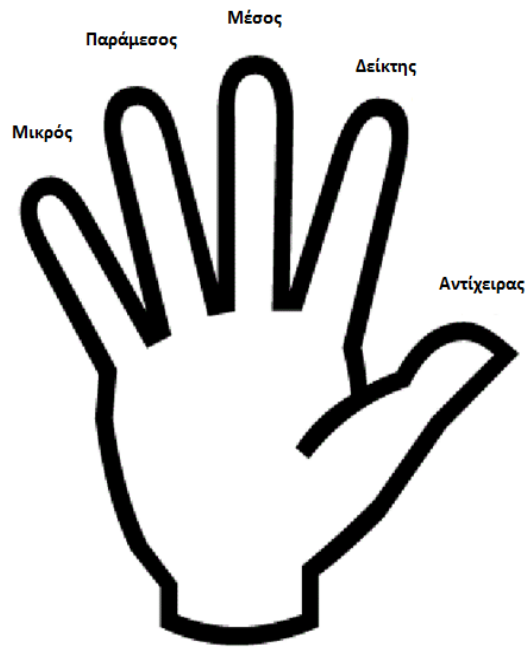
Τα δάχτυλα και ο αντίχειρας μπορούν να λυγίσουν κάνοντας διάφορες λαβές έτσι μπορούμε να κρατήσουμε μια καρφίτσα ή να περιστρέψουμε τα δάχτυλα μας ξεβιδώνοντας το καπάκι από ένα μπουκάλι ή ακόμα και να κρατήσουμε δυνατά ένα σφυρί ώστε να καρφώσουμε ένα καρφί στον τοίχο.

Στις άκρες των δαχτύλων υπάρχουν πυκνές περιοχές με νευρικές απολήξεις οι οποίες καθιστούν το χέρι την πλουσιότερη πηγή αισθητήριας ανάδρασης του ανθρώπινου σώματος. Τέλος, το χέρι χρησιμοποιείται επίσης ως μέσο επικοινωνίας και επιτρέπει την έκφραση των συναισθημάτων. Ο άνθρωπος χρησιμοποιεί επίσης τα χέρια του, σχεδόν καθημερινά, ως μέσο επικοινωνίας και έκφρασης. Αξίζει να αναφερθεί ότι οι χειρονομίες αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της γλώσσας του ανθρώπινου σώματος και επιτρέπουν την ενίσχυση του προφορικού μας λόγου.

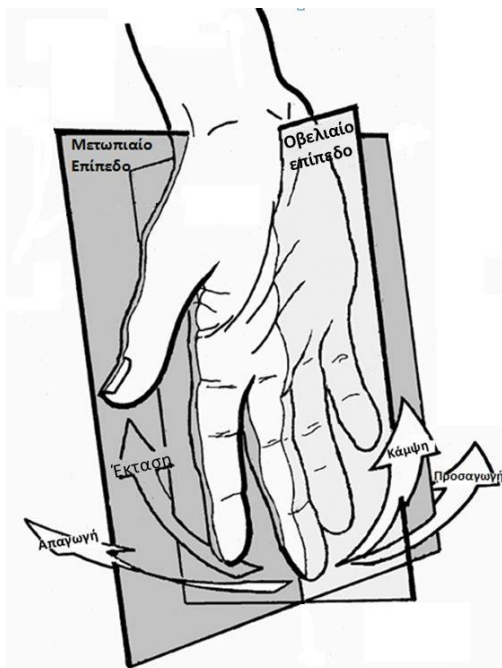
1.3 Περιγραφή των βασικών κινήσεων του ανθρώπινου χεριού

Το ανθρώπινο χέρι αποτελείται από πέντε δάχτυλα, τον αντίχειρα, τον δείκτη, τον μέσο, τον παράμεσο και τον μικρό. (Εικ. 1.3.1) Με δεδομένη όμως την ανατομική πολυπλοκότητα του ανθρώπινου χεριού, είναι απαραίτητο να οριστούν και να διευρυνθούν, σε αυτό το κεφάλαιο, μερικοί από τους συνήθεις όρους για την διευκόλυνση της περιγραφής του.

Για την περιγραφή της κίνησης των δαχτύλων χρησιμοποιούμε δύο επίπεδα αναφοράς, το μετωπιαίο και το οβελιαίο ή μεσαίο επίπεδο, ως προς τα οποία κινούνται τα δάχτυλα του (Εικ. 1.3.2, 1.3.3). Το μετωπιαίο επίπεδο είναι αυτό που δημιουργείται όταν τα δάχτυλα είναι σε πλήρη έκταση παράλληλα με την παλάμη του χεριού. Το οβελιαίο ή μεσαίο επίπεδο βρίσκεται κάθετα προς την παλάμη του χεριού, δηλαδή κάθετα στο μετωπιαίο επίπεδο. Η κάμψη και η έκταση για το χέρι χρησιμοποιεί το μετωπιαίο επίπεδο ως σημείο αναφοράς. Η κάμψη αναφέρεται στο λύγισμα των αρθρώσεων του δαχτύλου, με σκοπό να κλείσει το χέρι, σε αυτή την περίπτωση απομακρύνεται από το μετωπιαίο επίπεδο. Η έκταση στο χέρι, είναι η κίνηση κατά την οποία τα δάχτυλα προσεγγίζουν το μετωπιαίο επίπεδο για τον σχηματισμό μιας επίπεδης-ανοιχτής παλάμης. Προσαγωγή είναι η κίνηση που φέρνει το δάχτυλο πιο κοντά στο μεσαίο/οβελιαίο επίπεδο. Η απαγωγή αναφέρεται στο τράβηγμα του δαχτύλου μακριά από το μεσαίο/οβελιαίο επίπεδο. [7]



Εικόνα 1.3.1 Οι ονομασίες των δαχτύλων του ανθρώπινου χεριού



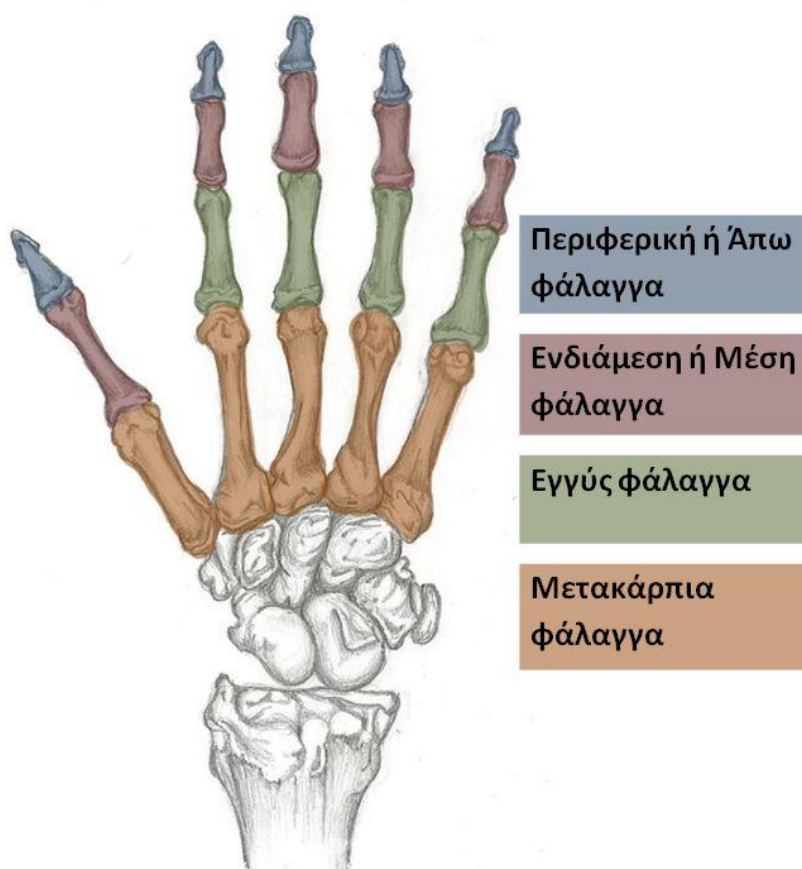
Εικόνα 1.3.2 Οι κινήσεις των δαχτύλων και τα επίπεδα της παλάμης



Εικόνα 1.3.3 Οι κινήσεις των δαχτύλων στα δύο επίπεδα

1.4 Οι αρθρώσεις και οι φάλαγγες του χεριού

Το ανθρώπινο χέρι αποτελείται από φάλαγγες και αρθρώσεις. Οι φάλαγγες είναι παρένθετα τμήματα κοκάλων που αποτελούν το κάθε δάχτυλο και χωρίζονται στην **εγγύς φάλαγγα**, την **ενδιάμεση ή μέση φάλαγγα** και την **περιφερική ή άπω φάλαγγα**. Ο αντίχειρας έχει τις δικές του ονομασίες για τις φάλαγγες του οι οποίες είναι, η **μετακάρπια φάλαγγα**, η **εγγύς φάλαγγα** και η **περιφερική ή άπω φάλαγγα** (Εικ. 1.4.1) [7]



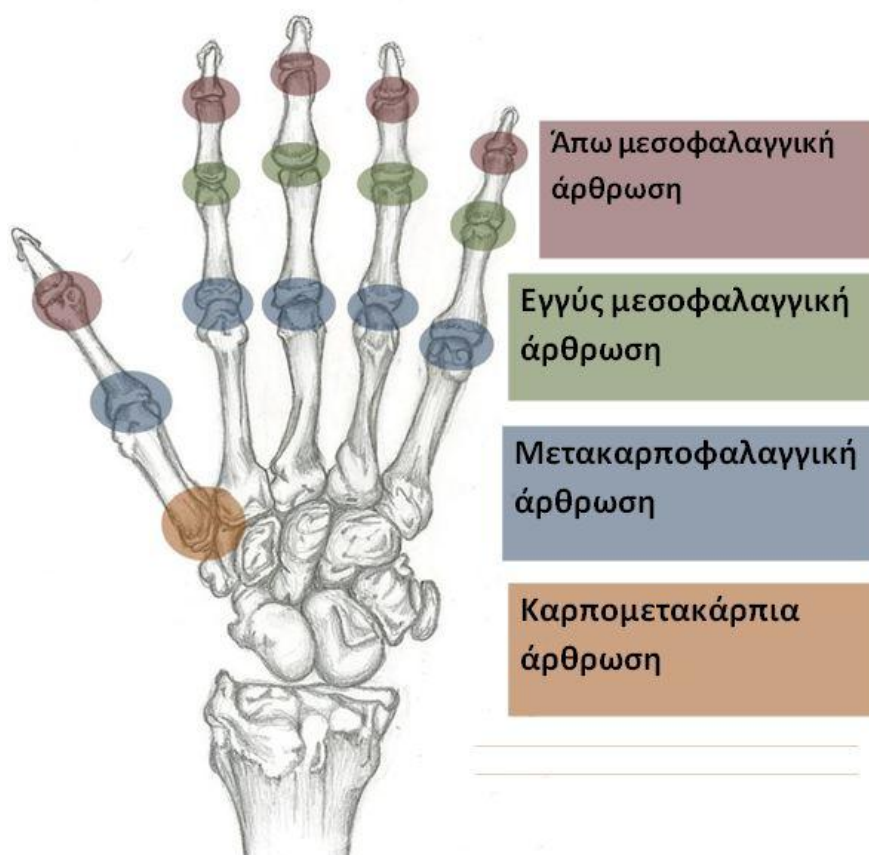
Εικόνα 1.4.1 Οι φάλαγγες των δαχτύλων

Οι αρθρώσεις είναι αυτές που συνδέουν τις φάλαγγες μεταξύ τους και χωρίζονται στις **μεσοφαλαγγικές αρθρώσεις**, τις **μετακαρποφαλαγγικές (ΜΚΦ)** και την **πηξοκαρπική** αυτή δηλαδή του καρπού. Οι μεσοφαλαγγικές αρθρώσεις έχουν ένα βαθμό ελευθερίας καθώς επιτρέπουν στα δάχτυλα να κινηθούν προς μια κατεύθυνση. Οι

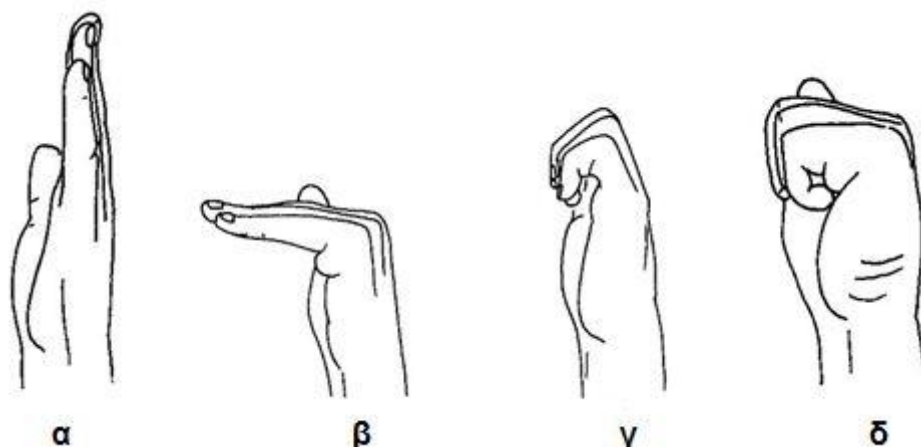
μετακαρποφαλαγγικές (ΜΚΦ) είναι οι αρθρώσεις αμέσως μετά την παλάμη και έχουν δύο βαθμούς ελευθερίας. Η πηχεοκαρπική άρθρωση έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας δίνοντας στο χέρι μεγάλη ευελιξία. [7]

Έτσι λοιπόν τα δάχτυλα του χεριού, όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, χάρις τις αρθρώσεις, είναι ικανά να κάνουν προσαγωγή και απαγωγή ως προς το οβελιαίο επίπεδο, έκταση και κάμψη ως προς το μετωπιαίο επίπεδο. (Εικόνα 1.3.3)

Το κάθε δάχτυλο έχει δική του ονομασία για την κάθε μία από τις τρεις αρθρώσεις που έχει. Ο αντίχειρας λόγω του ότι αποτελεί τον κύριο μοχλό για την δράση των υπόλοιπων δαχτύλων και όλου του χεριού συνολικά έχει ξεχωριστές ονομασίες για την κάθε άρθρωση του οι οποίες είναι (Εικόνα 1.4.2), η **καρπομετακάρπια** άρθρωση που συνδέεται με τα κόκαλα του καρπού, η **μετακαρποφαλαγγική** άρθρωση η οποία βρίσκεται πιο κοντά στην παλάμη και η **μεσοφαλαγγική** που είναι η τελευταία άρθρωση του αντίχειρα. Τα υπόλοιπα δάχτυλα έχουν τις δικές τους ονομασίες για τις τρεις αρθρώσεις τους (Εικόνα 1.4.2), η **μετακαρποφαλαγγική** η οποία είναι αμέσως μετά τον καρπό του χεριού, η **εγγύς μεσοφαλαγγική** που είναι η μεσαία άρθρωση του δαχτύλου και η **άπω μεσοφαλαγγική** που είναι η τελευταία άρθρωση του δαχτύλου. [7]



Εικόνα 1.4.2 Οι αρθρώσεις των δαχτύλων



Εικόνα 1.4.3 Η σταδιακή κάμψη των δαχτύλων του χεριού
 α) Έκταση όλων των αρθρώσεων του χεριού.
 β) Κάμψη των μετακαρποφαλαγγικών αρθρώσεων.
 γ) Κάμψη των εγγύς μεσοκαρποφαλαγγικών αρθρώσεων χωρίς την κάμψη των μετακαρποφαλαγγικών αρθρώσεων.
 δ) Κάμψη όλων των αρθρώσεων.

1.5 Τα ρομποτικά χέρια και οι εφαρμογές τους

Ένα ρομποτικό χέρι είναι συνήθως ένα μηχανικό, προγραμματιζόμενο χέρι με λειτουργίες και χαρακτηριστικά παρόμοια με αυτά του ανθρώπινου χεριού. Έχει συνδέσμους (φάλαγγες) που ενώνονται με αρθρώσεις και αυτά του δίνουν την δυνατότητα της κίνησης. Έτσι έχοντας συνήθως ένα μεγάλο βαθμό ελευθερίας και ένα σύνθετο σύστημα ελέγχου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συγκεκριμένες εφαρμογές, πειράματα εργαστηριακά και διάφορες μελέτες.

Για την κατασκευή, την μελέτη και τον έλεγχο ενός ρομποτικού χεριού σήμερα, λαμβάνονται υπόψη διάφορα πράγματα. Βασικό χαρακτηριστικό είναι να μοιάζει σε εμφάνιση με αυτό του ανθρώπου, δηλαδή να είναι ανθρωπόμορφο όπως λέμε. Ο ανθρωπομορφισμός όμως δεν είναι αρκετός στην κατασκευή ενός ρομποτικού χεριού. Πολύ βασικό χαρακτηριστικό είναι να έχει την ικανότητα να χειρίζεται διάφορα αντικείμενα με ευκολία και να μπορεί να τους αλλάξει θέση και προσανατολισμό. Αυτό είναι που ονομάζουμε επιδεξιότητα του ρομποτικού χεριού. Επίσης πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό

είναι η ευελιξία. Ο χειρισμός των αντικειμένων θα πρέπει να γίνεται ευέλικτα χωρίς να υπάρχει ο κίνδυνος διαφυγής τους από το ρομποτικό χέρι.

Τα ανθρωπόμορφα ρομποτικά χέρια ανάλογα με τον σχεδιασμό, την ευελιξία και την επιδεξιότητα τους έχουν διάφορες εφαρμογές και οι πιο βασικές από αυτές είναι:

1) **λειτουργία σε ανθρωπόμορφα ρομπότ**, ώστε να γίνουν μελλοντικά πιο ικανά να βοηθούν τους ανθρώπους στο νοικοκυριό αλλά γενικά σε διάφορες εργασίες όπως το να χρησιμοποιηθούν ως εργαλείο έρευνας σε διάφορους επιστημονικούς τομείς. Δύο από τα πιο γνωστά ανθρωπόμορφα ρομπότ σήμερα, το Asimo της Honda. (Εικόνα 1.5.1) και το Robonaut της NASA (Εικόνα 1.5.2).

2) **προσθετικά μέλη**, δηλαδή σαν συσκευή που θα αντικαταστήσει σε ανθρώπους τα ακρωτηριασμένα άνω άκρα τους, όχι μόνο για αισθητικούς αλλά και για υποτυπώδες λειτουργικούς λόγους. Ένα καλό παράδειγμα τέτοιου χεριού είναι το Deka Arm (Εικόνα 1.5.3) το οποίο είναι ένα επιδέξιο ανθρωπόμορφο ρομποτικό χέρι με μεγάλη ευελιξία και χαμηλό βάρος.

3) **εξειδικευμένη αρπάγη σε ρομποτικούς βραχίονες**, διότι οι ρομποτικοί βραχίονες μπορούν να κάνουν περιορισμένες κινήσεις και περιορίζονται σε αντικείμενα βασικών γεωμετρικών σχημάτων. Έτσι με την βοήθεια των ρομποτικών χεριών σαν αρπάγη, οι βραχίονες έχουν μεγαλύτερη ευελιξία κινήσεων και λαβών αλλά επίσης μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία. Ένα τέτοιο ρομποτικό χέρι που χρησιμοποιήθηκε σαν αρπάγη σε ρομποτικό βραχίονα είναι το Squase Robot Hand G Type της Fooma Japan (Εικόνα 1.5.4).

Η χρήση των ρομποτικών χεριών ως προσθετικά μέλη και ως εξειδικευμένη αρπάγη σε ρομποτικούς βραχίονες, είναι οι πιο απαιτητικές και φιλόδοξες εφαρμογές.

Για παράδειγμα ο σχεδιασμός για τεχνητά μέλη είναι πολύπλοκος καθώς τα γεωμετρικά, εργονομικά, και λειτουργικά χαρακτηριστικά του ανθρώπινου χεριού πρέπει να ταιριάζουν έτσι ώστε να έχουμε μια επιτυχημένη πρόσθεση τεχνητού μέλους.

Οι ρομποτικοί βραχίονες με την εξειδικευμένη αρπάγη πρέπει να έχουν μεγάλη ευελιξία έτσι ώστε το σύστημα να εκτελεί ακριβής κινήσεις αλλά επίσης πρέπει να παρέχουν την δυνατότητα χειρισμού μεγάλων και βαρέων αντικειμένων.



Εικόνα 1.5.1 Το ανθρωπόμορφο ρομπότ Asimo της Honda



Εικόνα 1.5.2 Το ανθρωπόμορφο ρομπότ Robonaut της Nasa



Εικόνα 1.5.3 Η χρήση του πρόσθετου χεριού Deka Arm



Εικόνα 1.5.4 Η χρήση του ρομποτικού χεριού Robot Hand G type σε ρομποτικό βραχίονα

Τα τελευταία χρόνια έχουν κατασκευαστεί πολλά ανθρωπόμορφα ρομποτικά χέρια από διάφορες ερευνητικές εταιρίες και τα οποία προσπαθούν να προσεγγίσουν την ανατομία, την ευελιξία αλλά και την επιδεξιότητα του ανθρώπινου χεριού.

Το ρομποτικό χέρι **Dexhand** (Εικόνα 1.5.5), έχει διαστάσεις όμοιες με αυτές ενός ανθρώπινου χεριού. Έχει τέσσερα δάχτυλα και αντίχειρα, τα οποία καθοδηγούνται από RC servo και το καθένα από αυτά έχει 2 βαθμούς ελευθερίας. Η κάθε άρθρωση ελέγχεται από ένα χαλύβδινο σύρμα το οποίο βοηθάει στην κίνηση των δαχτύλων ώστε να πραγματοποιήσουν διάφορες λαβές.

Το ρομποτικό χέρι **Herada Hand** [9] (Εικόνα 1.5.6), έχει πέντε δάχτυλα και έχει διαστάσεις περίπου όσο ενός κανονικού χεριού. Κάθε ένα από τα δάχτυλα έχει τρεις συνδέσμους και τρεις αρθρώσεις ενώ ο αντίχειρας έχει δύο συνδέσμους και δύο αρθρώσεις. Όλοι οι κινητήρες και οι οδοντωτοί τροχοί που το κινούν, βρίσκονται μέσα στην παλάμη.

Το ρομποτικό χέρι **MechaTE** [9] (Εικόνα 1.5.7), αναπτύχθηκε για ένα μεγάλο αριθμό απαιτήσεων. Ο σχεδιασμός του επιτρέπει στον προγραμματιστή να κινήσει το χέρι εύκολα και γρήγορα καθώς έχει πέντε κινητήρες για να κινήσει και τις 14 αρθρώσεις των πέντε δαχτύλων

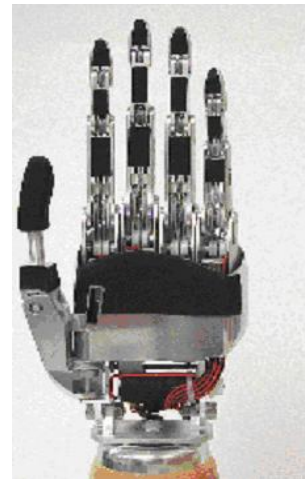
Το ρομποτικό χέρι **Elu-2 Hand** [9] (Εικόνα 1.5.8), έχει πέντε δάχτυλα και μπορεί να κάνει κινήσεις ενός κανονικού χεριού σε ταχύτητες όπως του ανθρώπου. Έχει εννέα σερβοκινητήρες που ελέγχουν τον καθένα από τους εννέα βαθμούς ελευθερίας εξαιρετικά εύελικτα και επιδέξια. Το Elu-2 Hand έχει μεγάλες περιοχές από μαλακό υλικό το οποίο το βοηθάει να χειρίζεται εύκολα διάφορα αντικείμενα. Επίσης κάτω από αυτές τι μαλακές επιφάνειες έχει αισθητήρια αφής.

Το ρομποτικό χέρι **Ocu-Hand** [9] (Εικόνα 1.5.9) είναι ένα ανθρωπόμορφο ρομποτικό χέρι το οποίο έχει το μέγεθος ενός ανθρώπινου χεριού και έχει την ικανότητα να πιάνει αντικείμενα διαφόρων σχημάτων. Έχει πέντε δάχτυλα με συνολικά 15 βαθμούς ελευθερίας. Επιπλέον, έχει 3 βαθμούς ελευθερίας στον καρπό του. Πάνω στο χέρι είναι τοποθετημένα αισθητήρια αφής και ισχύος ως ένα σύστημα ανάδρασης προκειμένου το χέρι να πιάσει ένα αντικείμενο σταθερά.

Το ρομποτικό χέρι που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο Αυτοματικής και Ρομποτικής του ΤΕΙ Κρήτης (Εικ. 1.5.10) έχει πέντε δάχτυλα τα οποία κινούνται με την βοήθεια σέρβο-κινητήρων. Κάθε δάχτυλο έχει τρεις συνδέσμους και τρεις αρθρώσεις εκτός από τον αντίχειρα που έχει τέσσερις αρθρώσεις. Ο σχεδιασμός του ρομποτικού χεριού έγινε με την χρήση του λογισμικού Creo Elements/Pro (Pro Engineer) το οποίο είναι ένα πρόγραμμα τρισδιάστατης σχεδίασης με την χρήση της τεχνολογίας CAD (Computer Aid Design). Στην συνέχεια έγινε η σύνδεση του με μηχανές ταχείας μοντελοποίησης (3D printers) έτσι ώστε να περαστούν τα σχέδια και να ξεκινήσει η κατασκευή των κομματιών που αποτελούν το ρομποτικό χέρι. Τα δάχτυλα και το εξωτερικό της παλάμης που κατασκευάστηκαν όλα στον 3D Printer, είναι από πολυμερή πλαστικό ABS. Για την κατασκευή όμως του ρομποτικού χεριού χρησιμοποιήθηκε επίσης και CNC φρέζα. Εκεί κόπηκε και φτιάχτηκε το εσωτερικό της παλάμης από υλικό teflon. Περισσότερες λεπτομέρειες για την κινηματική του ρομποτικού χεριού θα αναφέρουμε στο επόμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 1.5.5 Το ρομποτικό χέρι Dexhand



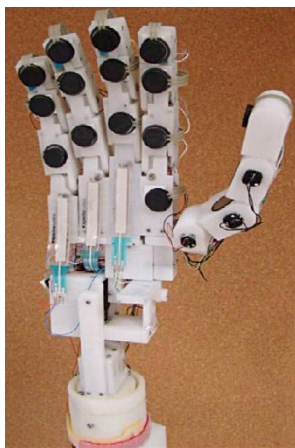
Εικόνα 1.5.6 Το ρομποτικό χέρι Harada Hand



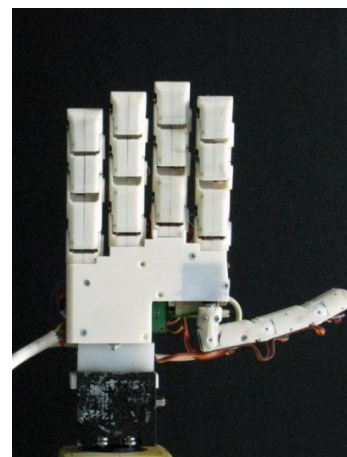
Εικόνα 1.5.7 Το ρομποτικό χέρι MechaTe



Εικόνα 1.5.8 Το ρομποτικό χέρι Elu-2 Hand



Εικόνα 1.5.9 Το ρομποτικό χέρι Ocu-Hand



Εικόνα 1.5.10 Το ρομποτικό χέρι που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο Αυτοματικής-Ρομποτικής του ΤΕΙ Κρήτης

1.6 Τα υποσυστήματα που απαρτίζουν το ρομποτικό χέρι

Τα ρομποτικά χέρια, όπως είπαμε και παραπάνω, μπορούμε να τα ορίσουμε ως ένα μηχανισμό σχεδιασμένο ώστε μέσω προγραμματισμού, να κάνουν διάφορες κινήσεις όπως το να χειρίζονται αντικείμενα με επιδέξιο και ευέλικτο τρόπο. Ένας τέτοιος μηχανισμός περιλαμβάνει συνήθως τις εξής συνιστώσες, το μηχανολογικό υποσύστημα, το υποσύστημα αίσθησης και το σύστημα ελέγχου.

Το **μηχανολογικό υποσύστημα** είναι το μηχανολογικό σύνολο χάρις το οποίο το ρομποτικό χέρι μπορεί να εκτελέσει έργο. Το υποσύστημα αυτό αποτελείται από διάφορους μηχανισμούς που όλοι μαζί συντελούν έτσι ώστε το ρομποτικό χέρι να κινείται. Κάποιοι από τους μηχανισμούς αυτούς είναι οι αρθρώσεις, οι σύνδεσμοι, το σύστημα μετάδοσης κίνησης και οι επενεργητές.

Οι σύνδεσμοι στα ρομποτικά χέρια θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι αυτοί που συγκροτούν τον σκελετό του ρομποτικού χεριού. Η κατασκευή τους γενικά εξαρτάται από τον τρόπο προσέγγισης του κατασκευαστή αλλά γενικά προτιμάται να είναι από κάποιο ελαφρύ υλικό όπως από κράματα αλουμινίου ή από σκληρό πλαστικό. Οι αρθρώσεις είναι οι μηχανισμοί που επιτρέπουν τη σχετική κίνηση μεταξύ των συνδέσμων και είναι περιστροφικές, σφαιρικές ή πρισματικές. Συνήθως χρησιμοποιούνται περιστροφικές λόγω του ότι επιτρέπουν την κίνηση γύρω από τον άξονα τους. Ο τρόπος κίνησης των αρθρώσεων γίνεται συνήθως με την χρήση επενεργητών και η μετάδοση κίνησης μπορεί να γίνει άμεσα από τον επενεργητή αλλά αυτό συνήθως είναι δύσκολο λόγω περιορισμού χώρου. Έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα μέσα μετάδοσης της κίνησης όπως ντίζες, οδοντωτοί τροχοί και τροχαλίες. Επενεργητές που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως κινήτηρες DC και RC/Servo, μορφομήμονα μεταλλικά κράματα (SMA) και κινήτηρες Ultra Sonic.

Το **υποσύστημα αίσθησης**, είναι το σύστημα χάρις το οποίο το ρομποτικό χέρι μπορεί να συγκεντρώσει πληροφορίες για το ίδιο αλλά και για το περιβάλλον που βρίσκεται. Το υποσύστημα αυτό επίσης είναι υπεύθυνο για την αποδοχή εξωτερικών εντολών, την επεξεργασία τους, την μετατροπή τους σε ηλεκτρική τάση που θα δοθεί στους κινήτηρες που ελέγχουν το ρομποτικό χέρι, καθώς επίσης και για την παραγωγή σημάτων εξόδου που θα πληροφορούν για την κατάσταση του συστήματος. Σε αυτό το υποσύστημα συνήθως περιλαμβάνονται όργανα μετρήσεως και αισθητήρια.

Με τα όργανα μετρήσεως και τα αισθητήρια λοιπόν λαμβανουμε πλήθος πληροφοριών που προέρχονται από το περιβάλλον του ρομποτικού χεριού, όπως για παράδειγμα η ροπή,

η πίεση κτλ. Επίσης πληροφορίες για την θέση και την ταχύτητα κάθε άρθρωσης ξεχωριστά. Η σπουδαιότητα τους είναι πολύ μεγάλη καθώς χάρις αυτούς γίνονται όλες οι μετρήσεις όταν επιζητείται η μέτρηση μια φυσικής μεταβλητής. Για την συλλογή των πληροφοριών λοιπόν χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι αισθητήρων, από απλά ποτενσιόμετρα μέχρι και ψηφιακοί κωδικοποιητές (encoders).

Το **σύστημα ελέγχου** είναι αυτό που συνδιάζει κατάλληλα την αίσθηση με τη δράση, έτσι ώστε το ρομποτικό χέρι να λειτουργεί αποτελεσματικά και με τον τρόπο που θέλουμε εμείς. Είναι δηλαδή η ηλεκτρονική μονάδα που μας δίνει την δυνατότητα να προγραμματίσουμε το ρομποτικό χέρι και αποτελείται από τα ηλεκτρονικά (Hardware) και το λογισμικό (Software). Ο ελεγκτής του ρομποτικού χεριού, χάρις αυτών επιβλέπει και συντονίζει ολόκληρο το σύστημα.

Όσον αφορά τα ηλεκτρονικά του συστήματος ελέγχου, περιλαμβάνουν έναν υπολογιστή, στον οποίο αποθηκεύεται το πρόγραμμα που θα εκτελεστεί και θα κινήσει το ρομποτικό χέρι, τα ηλεκτρονικά επικοινωνίας μεταξύ του ελεγκτή, του μηχανικού μέρους και του εξωτερικού περιβάλλοντος του ρομποτικού χεριού τους ενισχυτές ισχύος που ενισχύουν τα σήματα ελέγχου στο επίπεδο που απαιτείται ώστε οι κινητήρες να κινούν τις αρθρώσεις του ρομποτικού χεριού.

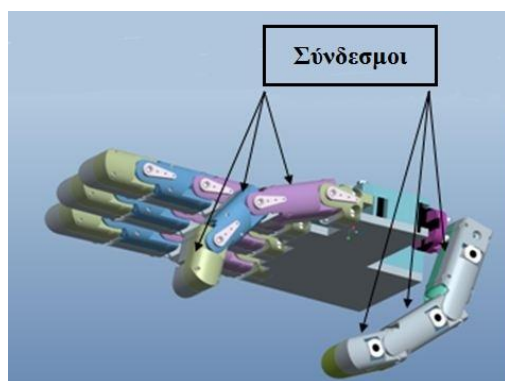
Το λογισμικό, είναι συνήθως κάποιο προγραμματιστικό πρόγραμμα, υπεύθυνο κυρίως για την δημιουργία κατάλληλων σημάτων ελέγχου, σύμφωνα με κάποιον αλγόριθμο, λαμβάνοντας υπόψη διάφορες μεταβλητές όπως τα μεγέθη των συνδέσμων, τη θέση και την ταχύτητα του ρομποτικού χεριού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

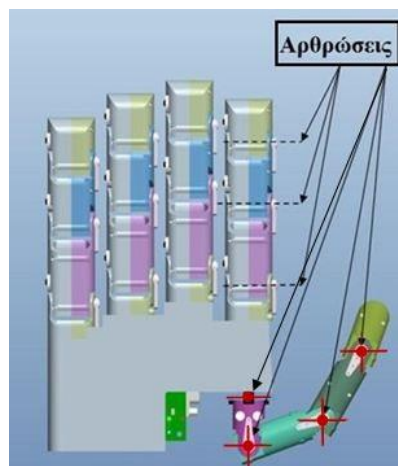
2.1 Εισαγωγή

Σ' αυτό το κεφάλαιο δημιουργούμε ένα κινηματικό μοντέλο για το ανθρώπινο χέρι. Το κινηματικό αυτό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί, με μικρές τροποποιήσεις, για να περιγράψει το ρομποτικό χέρι που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο Αυτοματικής και Ρομποτικής του ΤΕΙ Κρήτης.

Το ανθρωπόμορφο αυτό ρομποτικό χέρι έχει πέντε δάχτυλα και παλάμη. Τα δάχτυλα αποτελούνται από τρεις συνδέσμους το καθένα (Εικ. 2.1.1), έχουν το ίδιο μήκος μεταξύ τους με μικρές διαφορές για την περίπτωση του αντίχειρα. Γενικά, οι διαστάσεις του χεριού είναι λίγο μεγαλύτερες από αυτές ενός ανθρώπινου χεριού. Το κάθε δάχτυλο έχει τρεις αρθρώσεις ενώ ο αντίχειρας έχει τέσσερις (Εικ 2.1.2), έτσι μπορούμε να πούμε ότι το ρομποτικό χέρι έχει 16 συνολικά βαθμούς ελευθερίας. Σε κάθε μία από τις αρθρώσεις του ρομποτικού χεριού υπάρχει ένας σερβοκινητήρας ενώ τα χαρακτηριστικά κίνησης του σχεδιάστηκαν ώστε να ανταποκρίνονται στην εκτέλεση διαφόρων χειρονομιών αλλά και προτυποποίησης κάποιων πρωτογενών λαβών. Η κατασκευή του ρομποτικού χεριού έγινε σε μηχανές ταχείας μοντελοποίησης (3D printers) που διαθέτει το εργαστήριο. Πιο λεπτομερής και εκτενής αναφορά για τον σχεδιασμό και την κατασκευή του ρομποτικού χεριού έγινε στην πτυχιακή εργασία [4].



Εικόνα 2.1.1 Οι σύνδεσμοι του ρομποτικού χεριού



Εικόνα 2.1.2 Οι αρθρώσεις του ρομποτικού χεριού

2.2 Κινηματική ανάλυση του ανθρώπινου χεριού

Η κινηματική ανάλυση που γίνεται σε αυτό το κεφάλαιο αφορά το ανθρώπινο χέρι και με μία μικρή μετατροπή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει το ρομποτικό χέρι που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο Ρομποτικής και Αυτοματισμού του ΤΕΙ Κρήτης.

2.2.1 Βασικές έννοιες για την κινηματική ανάλυση

Πριν προχωρήσουμε στην κινηματική ανάλυση του χεριού, θα γίνει αναφορά σε κάποιες βασικές έννοιες που είναι απαραίτητες για την πλήρη κατανόηση του κειμένου.

Για να βρούμε την θέση και τον προσανατολισμό ενός αντικειμένου στο χώρο, πρέπει να επισυνάψουμε σε αυτό ένα σύστημα συντεταγμένων. Στη συνέχεια περιγράφουμε τη θέση και τον προσανατολισμό του πλαισίου αυτού, ως προς κάποιο αδρανειακό πλαίσιο αναφοράς. Η περιγραφή της θέσης γίνεται με ένα άνυσμα θέσης και η περιγραφή του προσανατολισμού με ένα πίνακα στροφής. Αναλυτικότερα για αυτά θα δούμε στις παρακάτω παραγράφους.

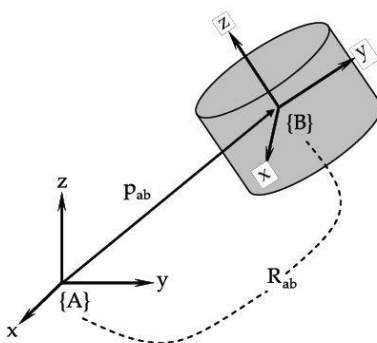
Η κίνηση μίας σημειακής μάζας στον καρτεσιανό χώρο περιγράφεται από την θέση της αναφορικά με ένα αδρανειακό πλαίσιο συντεταγμένων π.χ. $\{A\}$. Η τριάδα $p = (x, y, z) \in \mathcal{R}^3$ των συντεταγμένων εκφράζει την προβολή της θέσης του σημείου στους άξονες x, y, z του $\{A\}$. Η μαθηματική περιγραφή της θέσης της σημειακής μάζας μπορεί

να αναπαρασταθεί είτε με το άνωσμα στήλη $p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^3$ είτε με το ανυσματικό άθροισμα

$$p = x\bar{x} + y\bar{y} + z\bar{z} \quad \text{όπου} \quad \bar{x} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \bar{y} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \bar{z} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{αποτελούν τα μοναδιαία ανύσματα}$$

{A}

Στην περίπτωση που αντί σημειακής μάζας έχουμε ένα στερεό σώμα μπορούμε να επισυνάψουμε σε ένα αυθαίρετο σημείο του, π.χ. στο κέντρο μάζας του, ένα πλαίσιο συντεταγμένων {B} και να αντιστοιχίσουμε την θέση του στερεού σώματος σε αυτή της σημειακής αρχής του {B} ως προς το {A}. Εδώ αξίζει να παρατηρήσουμε ότι στην περίπτωση σημειακής μάζας δεν ορίζεται η έννοια του προσανατολισμού πράγμα το οποίο είναι αυτονόητο για την περίπτωση των στερεών σωμάτων [6].



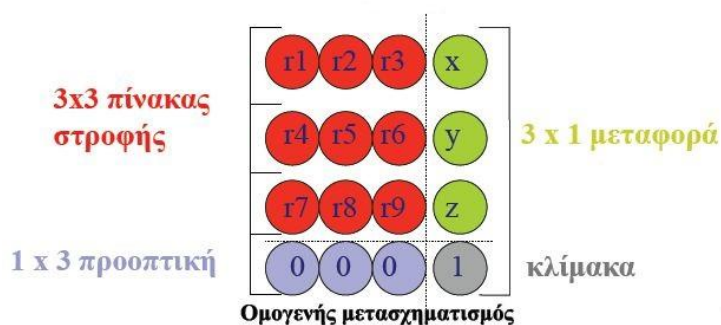
Εικόνα 2.2.1.1 Πλαίσια συντεταγμένων {A} και {B} στον καρτεσιανό χώρο

Το άνωσμα θέσης $p_{ab} \in \mathfrak{R}^3$ της αρχής του πλαισίου {B} ως προς το πλαίσιο {A} περιγράφει την θέση του στερεού σώματος και ο **πίνακας στροφής** του πλαισίου {B} σε σχέση με το πλαίσιο {A} τον προσανατολισμό του. Ο πίνακας στροφής είναι ένας πίνακας 3×3 . Επομένως, μια μορφή περιγραφής της **θέσης** και του **προσανατολισμού** του στερεού σώματος στο χώρο αποτελείται από το ζεύγος (p_{ab}, R_{ab})

Μία περισσότερο δόκιμη και συμπαγής αναπαράσταση για την περιγραφή της θέσης και του προσανατολισμού ενός αντικειμένου στον χώρο, αποτελεί ο **ομογενής μετασχηματισμός (Ο.Μ.)** που συνήθως συμβολίζεται με το γράμμα g_{ab} και συνδέει τα δύο πλαίσια συντεταγμένων όπως αυτά ορίζονται σαν κάτω δείκτες. Ο ομογενής μετασχηματισμός συντίθεται από το ζεύγος (p_{ab}, R_{ab}) σε ειδική δομή όπως παρουσιάζεται παρακάτω:

$$g_{ab} = \begin{bmatrix} R_{ab} & p_{ab} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}$$

και μας παρέχει πληροφορία για την σχετική θέση και τον προσανατολισμό των πλαισίων που εμπλέκει. Αποτελεί ένα **τετραγωνικό πίνακα 4x4** με την τελευταία γραμμή να μένει अपαράλλαχτη όπως αυτή συμπληρώνεται με τα τρία μηδενικά και τον άσο. Με λίγα λόγια ο πίνακας ομογενούς μετασχηματισμού g_{ab} μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετασχηματίσουμε τις συντεταγμένες ενός σημείου από ένα σύστημα συντεταγμένων σε ένα άλλο. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η βασική δομή ενός Ο.Μ. [6].



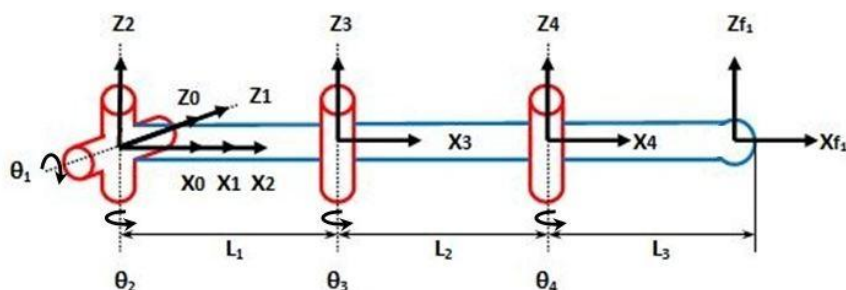
Εικόνα 2.2.1.2 Ο ομογενής μετασχηματισμός

2.2.2 Επίλυση του ευθύ κινηματικού προβλήματος για το ανθρώπινο χέρι

Η επίλυση του ευθύ κινηματικού προβλήματος για τα δάχτυλα του ανθρώπινου χεριού απαιτεί τον υπολογισμό της θέσης και του προσανατολισμού του κάθε δαχτύλου ως προς ένα πλαίσιο αναφοράς που θα ορίσουμε στην παλάμη. Η θέση και ο προσανατολισμός του κάθε δαχτύλου είναι συνάρτηση των μεταβλητών των αρθρώσεων θ_i . Προς χάρην απλότητας και συντομίας στους μαθηματικούς υπολογισμούς θα αναλύσουμε το ευθύ κινηματικό πρόβλημα για το δάχτυλο του δείκτη, το οποίο μπορεί να επεκταθεί και στα υπόλοιπα δάχτυλα.

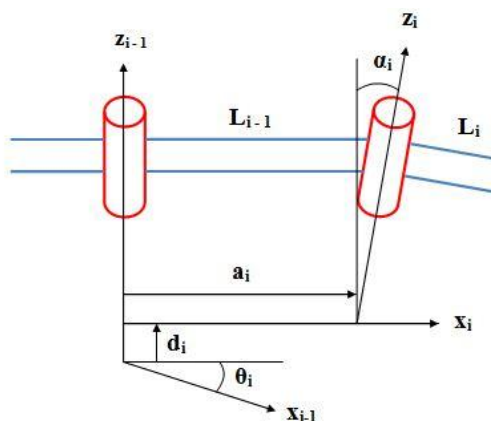
Για παράδειγμα έστω ότι έχουμε το δάχτυλο του δείκτη όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.2.2.1 το οποίο αποτελείται από τέσσερις αρθρώσεις $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ και τρεις συνδέσμους με μήκη L_1, L_2, L_3 . Γνωρίζοντας τα μήκη των συνδέσμων και τις γωνίες των αρθρώσεων, πρέπει να υπολογιστεί η θέση και ο προσανατολισμός του άκρου του δαχτύλου.

Αρχικά στο δάχτυλο του δείκτη τοποθετούμε τα πλαίσια συντεταγμένων $\{0\}$, $\{1\}$, $\{2\}$, $\{3\}$, $\{4\}$ και $\{f_1\}$. Από αυτά, τα $\{2\}$, $\{3\}$, $\{4\}$ αντιστοιχούν στα επισυναπτόμενα πλαίσια στους συνδέσμους L_1, L_2, L_3 ενώ το $\{1\}$ αντιστοιχεί στην πρώτη άρθρωση θ_1 και το $\{f_1\}$ αντιστοιχεί στο άκρο του δείκτη. Το πλαίσιο $\{0\}$ είναι ακίνητο σε σχέση με τα υπόλοιπα και όταν η μεταβλητή της πρώτης άρθρωσης είναι μηδέν τότε αυτό ταυτίζεται με το πλαίσιο $\{1\}$. Για την τοποθέτηση των πλαισίων στους συνδέσμους χρησιμοποιήθηκε η σύμβαση των Denavit- Hartenberg τροποποιημένη κατά Craig. [2]



Εικόνα 2.2.2.1 Το δάχτυλο του Δείκτη με τις αρθρώσεις και τα πλαίσια συντεταγμένων.

Μετά την τοποθέτηση των τοπικών συστημάτων συντεταγμένων κατασκευάζεται ο πίνακας με τις κινηματικές παραμέτρους του δαχτύλου (Πίνακας 2.2.2.1). Οι κινηματικοί παράμετροι που περιλαμβάνονται στον πίνακα αναλύονται παρακάτω και εμπλέκουν κάθε σύνδεσμο με τον επόμενο.



Εικόνα 2.2.2.2 Σχηματική αναπαράσταση των παραμέτρων Denavit-Hartenberg

α_i : η γωνία κάμψης = γωνία μεταξύ των z_i και z_{i+1} μετρούμενη ως προς x_i

a_i : το μήκος συνδέσμου = απόσταση μεταξύ των z_i και z_{i+1} μετρούμενη κατά μήκος του x_i

d_i : η απομάκρυνση = η απόσταση μεταξύ των x_{i-1} και x_i μετρούμενη κατά μήκος του z_i

θ_i : η γωνία άρθρωσης = η γωνία μεταξύ των x_{i-1} και x_i μετρούμενη ως προς z_i

Έτσι γίνεται η συμπλήρωση του πίνακα των παραμέτρων Denavit-Hartenberg κατά Craig για το δάχτυλο του δείκτη.

	Γωνία Κάμψης	Μήκος Συνδέσμου	Απομάκρυνση	Γωνία Άρθρωσης
i	a_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	90	0	0	θ_2
3	0	L_1	0	θ_3
4	0	L_2	0	θ_4

Πίνακας 2.2.2.1 Πίνακας παραμέτρων Denavit-Hartenberg

Με βάση τις παραμέτρους αυτές και την παρακάτω σχέση είναι δυνατόν να υπολογιστεί ο Ο.Μ. που συνδέει δύο γειτονικούς συνδέσμους :

$$g_{i-1,i} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i \cos a_{i-1} & \cos\theta_i \cos a_{i-1} & -\sin a_{i-1} & -\sin a_{i-1} d_i \\ \sin\theta_i \sin a_{i-1} & \cos\theta_i \sin a_{i-1} & \cos a_{i-1} & \cos a_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Έτσι ο Ο.Μ. που συνδέει τα πλαίσια συντεταγμένων {0}, {1}, {2}, {3}, {4} και {f₁} του δείκτη είναι:

$$g_{01} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, g_{12} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

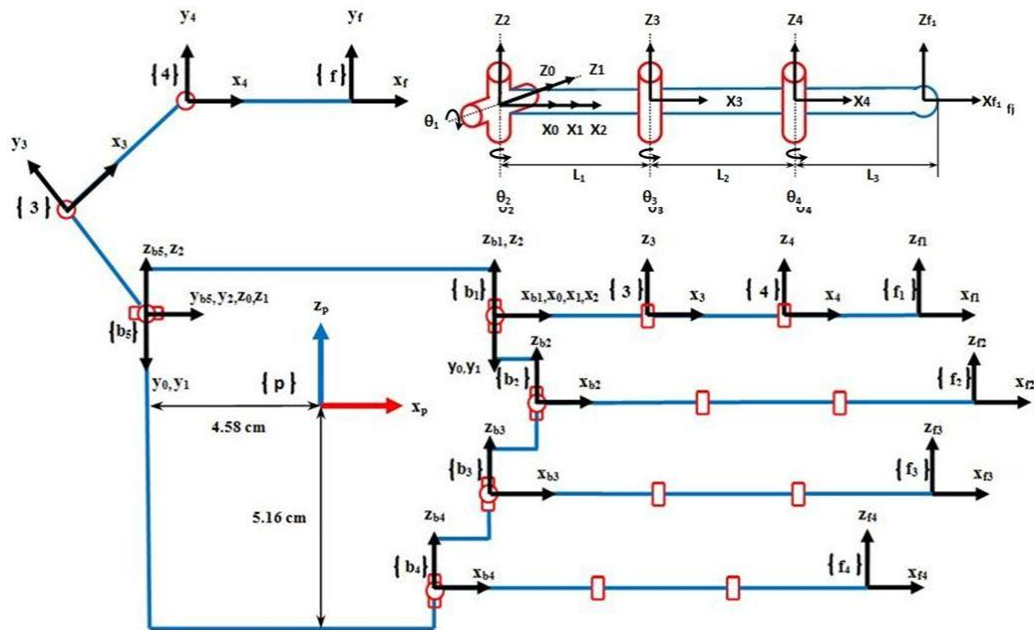
$$g_{23} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & -\sin(\theta_3) & 0 & L_1 \\ \sin(\theta_3) & \cos(\theta_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, g_{34} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) & -\sin(\theta_4) & 0 & L_2 \\ \sin(\theta_4) & \cos(\theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$g_{4f_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

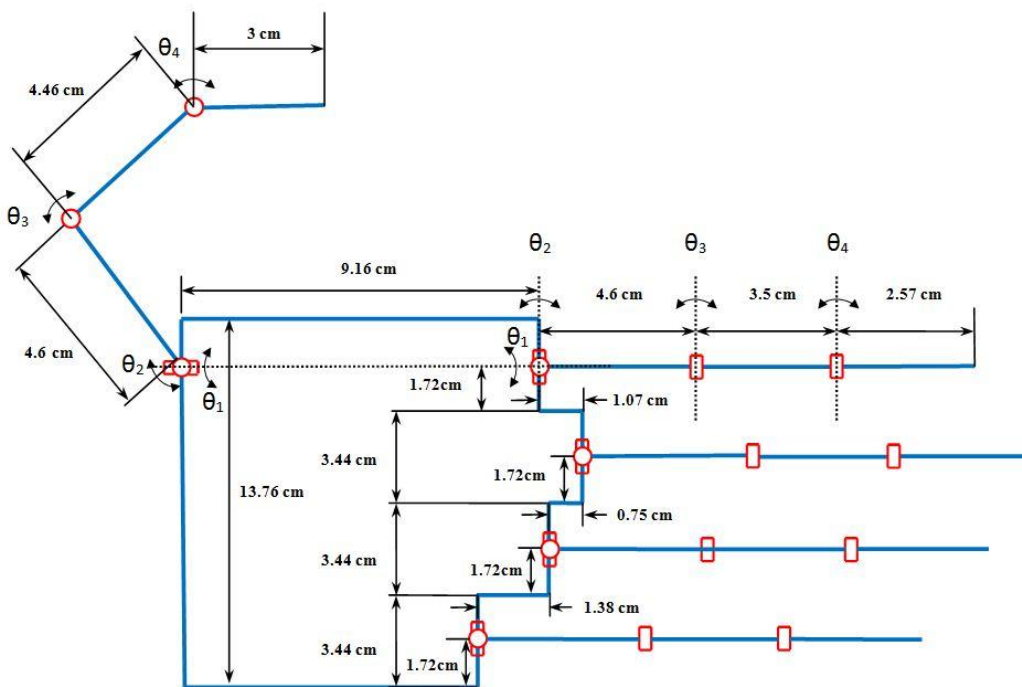
Πολλαπλασιάζοντας τους πίνακες των παραπάνω ομογενών μετασχηματισμών υπολογίζουμε αυτόν που συνδέει το πλαίσιο {0} με το πλαίσιο του άκρου {f₁}:

$$g_{0f_1} = g_{01}g_{12}g_{23}g_{34}g_{4f_1} \quad (1)$$

Παρακάτω στις Εικόνες 2.2.2.3-2.2.2.4, βλέπουμε την ράχη της παλάμης του χεριού με τα δάχτυλα και τις αρθρώσεις τους όπως αυτές έχουν επιλέγει προκειμένου να μοντελοποιήσουμε την κινηματική του ανθρώπινου χεριού.



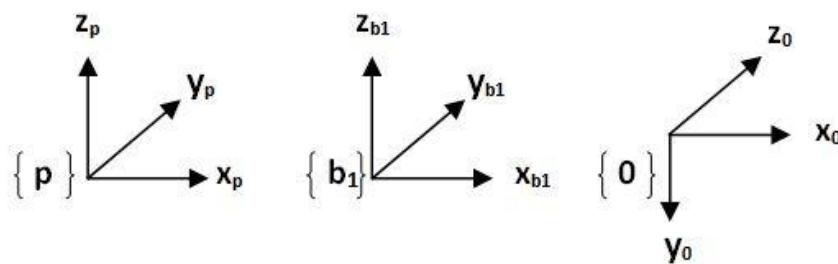
Εικόνα 2.2.2.3 Το χέρι με τα πλαίσια συντεταγμένων του.



Εικόνα 2.2.2.4 Το χέρι με τις διαστάσεις του.

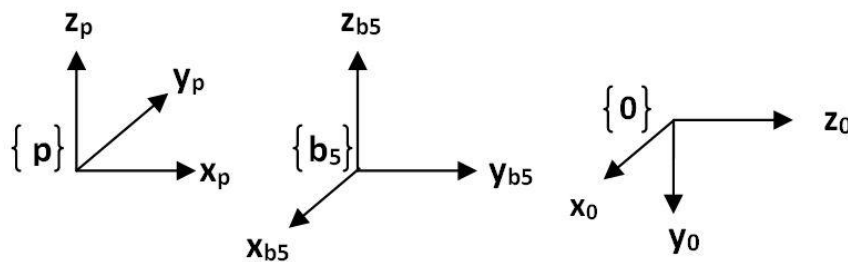
Στη συνέχεια ορίζουμε με $\{p\}$ το πλαίσιο αναφοράς της παλάμη και με $\{b_j\}$ τα πλαίσια συντεταγμένων που βρίσκονται επισυναπτόμενα στις βάσεις των δαχτύλων. Πιο συγκεκριμένα, όπου $j=1, \dots, 5$ αποτελεί ένα από τα πέντε δάχτυλα ($j=1$ για το δείκτη, $j=2$ για το μέσο, $j=3$ για τον παράμεσο, $j=4$ για το μικρό, και $j=5$ για τον αντίχειρα).

Επίσης, στο παρακάτω σχήμα δίνουμε τους σχετικούς προσανατολισμούς των πλαισίων $\{p\}$, $\{b_1\}$ και $\{z_0\}$ για το δάχτυλο του δείκτη. Να σημειώσουμε ότι τα πλαίσια $\{b_1\}$ και $\{0\}$ βρίσκονται στο ίδιο σημείο αλλά έχουν διαφορετικό προσανατολισμό όπως φαίνεται παρακάτω. Το ίδιο ισχύει και για τα δάχτυλα μέσο, παράμεσο και μικρό.



Εικόνα 2.2.2.5 Τα πλαίσια συντεταγμένων της παλάμης και της βάσης του δείκτη. Ομοίως για τον μέσο, παράμεσο και μικρό.

Οι προσανατολισμοί για τα πλαίσια $\{p\}$, $\{b_5\}$ και $\{0\}$ για τον αντίχειρα είναι λίγο διαφορετικά και δίνονται παρακάτω. Εδώ ισχύει πάλι ότι τα πλαίσια $\{b_5\}$ και $\{0\}$ βρίσκονται στο ίδιο σημείο αλλά έχουν διαφορετικό προσανατολισμό ο οποίος περιγράφεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2.2.2.6 Τα πλαίσια συντεταγμένων της παλάμης και της βάσης του αντίχειρα .

Με βάση τα παραπάνω ο Ο.Μ. που συνδέει το πλαίσιο $\{0\}$ με αυτό της βάσης $\{b_1\}$ του δείκτη είναι:

$$g_{b_1 0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Επομένως από τις (1) και (2) λαμβάνουμε ότι η σχετική θέση του άκρου του δείκτη ως προς το πλαίσιο της βάσης του είναι

$$g_{b_1 f_1} = g_{b_1 0} g_{0 f_1} \quad (3)$$

Γενικά για οποιοδήποτε δάχτυλο μπορούμε να βρούμε την σχετική τοποθέτηση του ως προς το πλαίσιο της βάσης του από την παρακάτω σχέση:

$$g_{b_j f_j} = g_{b_j 0} g_{0 f_j} \quad (4)$$

με $g_{b_j 0} = g_{b_1 0}$ και όπου $j=1, \dots, 5$ αποτελεί ένα από τα πέντε δάχτυλα. Τα παραπάνω ισχύουν για όλα τα δάχτυλα με βάση τα μήκη που δίνονται στον πίνακα 2.2.2.2.

Για τον Δείκτη, Μέσο, Παράμεσο και Μικρό		Για τον Αντίχειρα	
Σύνδεσμος	Μήκος	Σύνδεσμος	Μήκος
L_1	4.60cm	L_1	4.60cm
L_2	3.50cm	L_2	4.46cm
L_3	2.57cm	L_3	3cm

Πίνακας 2.2.2.2 Τα μήκη των συνδέσμων των δαχτύλων.

Τα πλαίσια βάσης των δαχτύλων, όπως φαίνονται από τις Εικόνες 2.2.2.5-2.2.2.6, είναι τοποθετημένα έτσι ώστε να ισχύουν τα παρακάτω:

$$\begin{array}{ccc}
 \text{Δείκτης} & \text{Μέσος} & \text{Παράμεσος} \\
 g_{pb_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 4.58 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 3.44 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & g_{pb_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 5.65 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & g_{pb_3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 3.58 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -3.44 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{cc}
 \text{Μικρός} & \text{Αντίχειρας} \\
 g_{pb_4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 3.2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -6.88 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & g_{pb_5} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -4.58 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 3.44 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{array}$$

Τελικά ο υπολογισμός του ευθύ κινηματικού για τα δάχτυλα του χεριού είναι:

$$g_{pf_j} = g_{pb_j} g_{b_j 0} g_{0f_j} \quad (5)$$

Συγκεκριμένα ο g_{pf_j} είναι ένας πίνακας 4x4 ο οποίος θα μας δώσει τις συντεταγμένες x_j, y_j, z_j που αντιστοιχούν στο δάκτυλο j ως προς το πλαίσιο της παλάμης και τον προσανατολισμό μέσω του πίνακα στροφής. Ο προσανατολισμός του δαχτύλου στην περίπτωση μας είναι δυνατόν να προσδιορίζεται από δύο παραμέτρους. Η πρώτη είναι η $(f_1) = \theta_1$, η οποία είναι η πρώτη άρθρωση του κάθε δαχτύλου, που του επιτρέπει να κάνει απαγωγή και προσαγωγή ως προς το οβελιαίο επίπεδο. Η δεύτερη είναι η $(f_2) = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4$ που είναι ο προσανατολισμός του δαχτύλου στο επίπεδο που δημιουργείται από τις τρεις φάλαγγες του δαχτύλου.

Για τον υπολογισμό του ομογενή μετασχηματισμού g_{pf_j} χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Matlab υλοποιώντας τη συνάρτηση `EuthiKin(j, q1, q2, q3, q4)`. Η συνάρτηση αυτή παίρνει σαν ορίσματα, την μεταβλητή " j " και τις γωνίες " q_1, q_2, q_3, q_4 " και επιστρέφει τα

" x, y, z " και τις παραμέτρους του προσανατολισμού " f_1 " και " f_2 " που ειπώθηκαν παραπάνω.

Επίσης έγιναν κάποιες συναρτήσεις για την απεικόνιση του χεριού οι οποίες είναι η $Apeikonish_Daxtylou(F, i)$, η $Apeikoniseis_Daxtylwn()$ και η $palami()$. Οι συναρτήσεις αυτές απαιτούν να πάρουν κάποιες πληροφορίες από την συνάρτηση του ευθύ κινηματικού για να κάνουν σωστά την εικονική αναπαράσταση του χεριού.

Με βάση όλες τις παραπάνω συναρτήσεις, φτιάχτηκαν επιπλέον κάποιες συναρτήσεις οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την επίτευξη διαφόρων χειρονομιών αλλά και λαβών αντικειμένων συγκεκριμένης γεωμετρίας. Οι συναρτήσεις αυτές φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Χειρονομίες		
$x_grothia()$	$x_point_mikros()$	$x_OK()$
$x_palami_anoixth()$	$x_like()$	$x_Mesos_Antix()$
$x_point()$	$x_aksones_xyz()$	$x_Param_Antix()$

Πίνακας 2.2.2.3 Οι συναρτήσεις των χειρονομιών

Λαβές		
$grab_karta()$	$grab_pistoli()$	$grab_mpoukali()$
$grab_potiri()$	$grab_kouti()$	$grab_karta_dyo()$
$grab_pinelo()$	$grab_mpalaki()$	

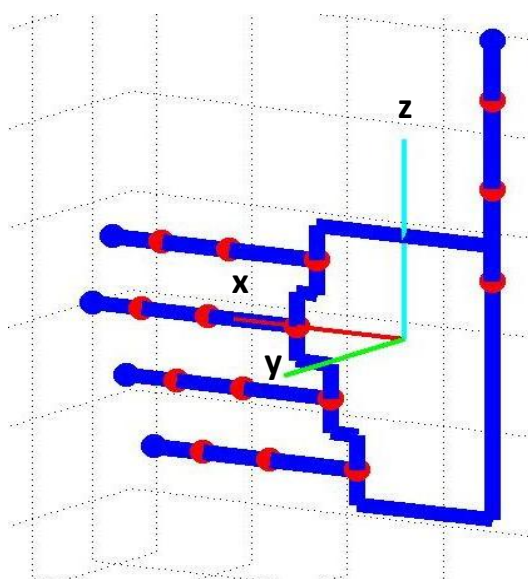
Πίνακας 2.2.2.4 Οι συναρτήσεις των λαβών

Με βάση την συνάρτηση του ευθύ κινηματικού αλλά και τις συναρτήσεις για την απεικόνιση του χεριού, θα επιχειρήσουμε να δείξουμε το πώς το κινηματικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε σωστά. Έστω λοιπόν ότι θέλουμε να κάνουμε μια χειρονομία στην οποία η παλάμη είναι ανοιχτή και όλα τα δάχτυλα είναι σε πλήρη έκταση. Για να οδηγήσουμε τα

δάχτυλα στις επιθυμητές θέσεις χρησιμοποιούμε την συνάρτηση EuthiKin () όπως δίνεται παρακάτω για τα πέντε δάχτυλα του χεριού:

Δείκτης: EuthiKin (1,0,0,0,0);
 Μέσος: EuthiKin (2,0,0,0,0);
 Παράμεσος: EuthiKin (3,0,0,0,0);
 Μικρός: EuthiKin (4,0,0,0,0);
 Αντίχειρας: EuthiKin (5,270,0,0,0);

Στη συνέχεια καλούμε τις απαραίτητες συναρτήσεις για την απεικόνιση του χεριού.



Εικόνα 2.2.2.7 Χειρονομία στην οποία τα δάχτυλα είναι σε πλήρη έκταση. (Στην εικόνα εμφανίζονται οι άξονες του πλαισίου της παλάμης. Με κόκκινο είναι ο άξονας 'x', με πράσινο ο 'y' και με κυανό ο 'z'.)

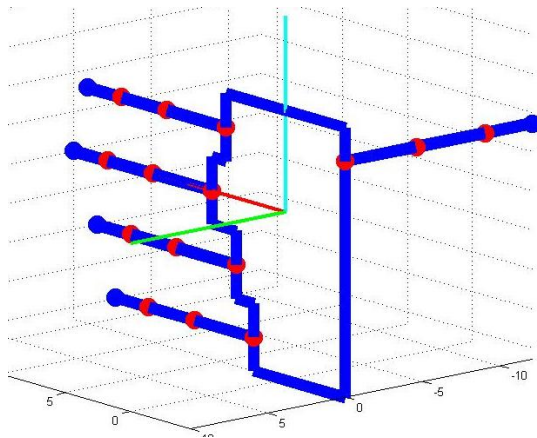
Τα αποτελέσματα που παίρνουμε από τον κώδικα αυτό για την θέση και τον προσανατολισμό του κάθε δακτύλου τα βλέπουμε στον Πίνακα 2.2.2.5.

	Δείκτης	Μέσος	Παράμεσος	Μικρός	Αντίχειρας
x	15.2500	16.3200	14.5000	13.8700	-4.5800
y	0	0	1.6738	0	0
z	3.4400	0	-3.4400	-6.8800	15.500
f_1	0	0	0	0	270
f_2	0	0	0	0	0

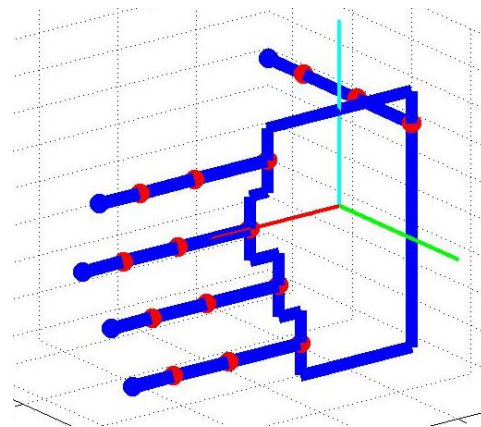
Πίνακας 2.2.2.5 Αποτελέσματα θέσης και προσανατολισμού κάθε δακτύλου για χειρονομία με όταν τα δάχτυλα είναι σε πλήρη έκταση

Παρακάτω θα δούμε δύο παραδείγματα στα οποία γίνεται η χρήση της άρθρωσης θ_1 του αντίχειρα.

Όταν η άρθρωση $\theta_1 = 0^\circ$ τότε ο αντίχειρας είναι αντιπαράλληλος με τον άξονα y όπως φαίνεται και στις Εικ. 2.2.2.8-2.2.2.9.

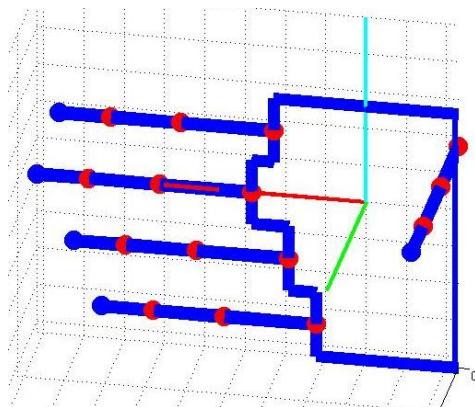


Εικόνα 2.2.2.8 Η θ_1 του αντίχειρα είναι μηδέν μοίρες

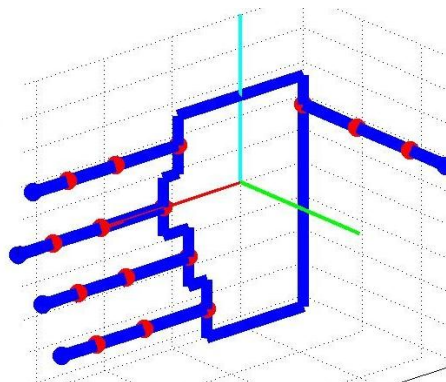


Εικόνα 2.2.2.9 Ο αντίχειρας με $\theta_1=0^\circ$ από άλλη όψη.

Όταν η $\theta_1 = 180^\circ$ τότε ο αντίχειρας είναι παράλληλος με τον άξονα y όπως φαίνεται στις Εικ. 2.2.2.10 - 2.2.2.11.

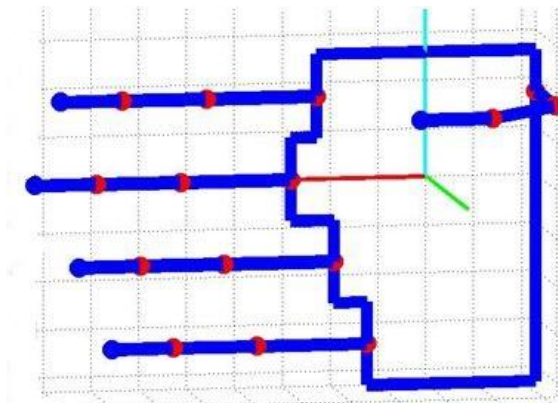


Εικόνα 2.2.2.10 Η θ_1 του αντίχειρα είναι 180°



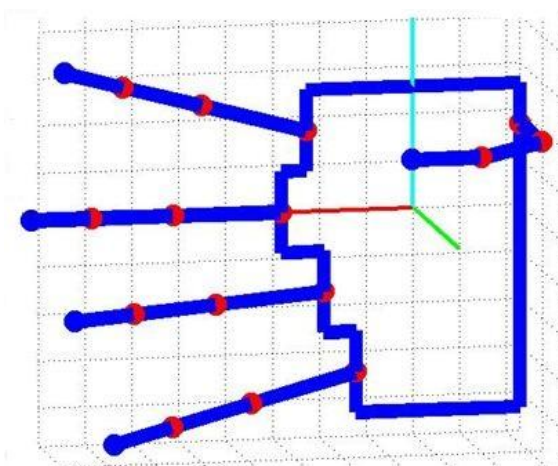
Εικόνα 2.3.11 Ο αντίχειρας με $\theta_1=180^\circ$ από άλλη όψη

Επίσης ένα παράδειγμα παρακάτω με την δυνατότητα του χεριού να κάνει κίνηση απαγωγής (Εικ. 2.2.2.12 - 2.2.2.13). Το χέρι με τα δάχτυλα του δείκτη, μέσου, παράμεσου και μικρού σε έκταση πάνω το μετωπιαίο επίπεδο.



Εικόνα 2.2.2.12 Το χέρι με τον δείκτη, μέσο, παράμεσο και μικρό σε έκταση.

Όταν το χέρι πραγματοποιεί την κίνηση της απαγωγής.



Εικόνα 2.2.2.13 Το χέρι πραγματοποιεί προσαγωγή.

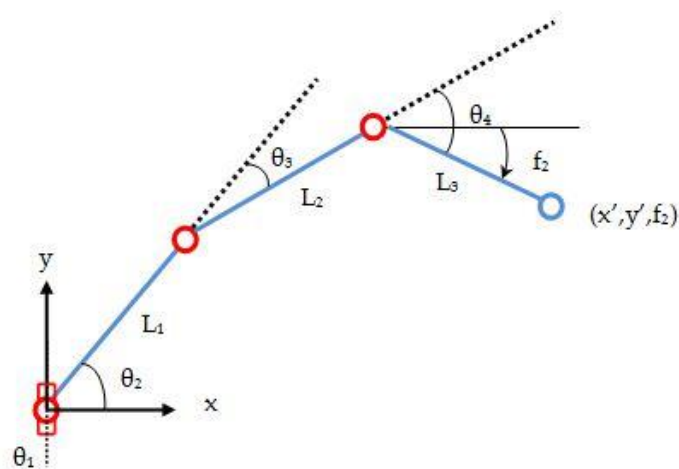
Τελειώνοντας θα θέλαμε να αναφέρουμε ότι το κινηματικό μοντέλο που υλοποιήθηκε σε αυτό το κεφάλαιο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο ρομποτικό χέρι που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο Αυτοματικής και Ρομποτικής του ΤΕΙ Κρήτης. Η μόνη παραδοχή είναι ότι η άρθρωση θ_1 , δεν χρησιμοποιείται (παρά μόνο στον αντίχειρα) καθώς τα ρομποτικά δάχτυλα δεν έχουν την άρθρωση που θα τους επιτρέψει να κάνουν προσαγωγή και απαγωγή ως προς το οβελιαίο επίπεδο.

2.2.3 Επίλυση του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος για τα ανθρώπινα δάχτυλα

Για την επίλυση του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος για τα δάχτυλα του χεριού απαιτείται ο υπολογισμός των γωνιών των αρθρώσεων του κάθε δαχτύλου. Οι γωνίες αυτές είναι συνάρτηση των μεταβλητών της θέσης και του προσανατολισμού του κάθε δαχτύλου. Για συντομία, όπως και με την επίλυση του ευθύ κινηματικού προβλήματος, θα γίνει ανάλυση του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος για το δάχτυλο του δείκτη, το οποίο με μικρές μετατροπές μπορεί να επεκταθεί στα υπόλοιπα δάχτυλα.

2.2.3.1 Επίλυση του αντίστροφου κινηματικού, για το δάχτυλο του δείκτη, πάνω στο επίπεδο που σχηματίζουν οι φάλαγγες.

Έστω ότι έχουμε το δάχτυλο του δείκτη πάνω στο επίπεδο x - y , όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.2.3.1.1 παρακάτω. Ας υποθέσουμε ότι γνωρίζουμε την θέση του άκρου του (x', y') , τον προσανατολισμό (f_2) στο επίπεδο και τα μήκη L_1, L_2, L_3 . Θέλουμε να υπολογιστούν οι γωνίες των αρθρώσεων θ_2, θ_3 και θ_4 . Η γωνία της άρθρωσης θ_1 δεν θα υπολογιστεί γιατί στο επίπεδο το δάχτυλο δεν την χρησιμοποιεί.



Εικόνα 2.2.3.1.1 Το δάχτυλο του δείκτη στο επίπεδο

Για την επίλυση του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος θα χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω κινηματικές εξισώσεις [1]

$$\begin{aligned}x' &= L_1 \cos(\theta_2) + L_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\y' &= L_1 \sin(\theta_2) + L_2 \sin(\theta_2 + \theta_3) + L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\f_2 &= \theta_2 + \theta_3 + \theta_4\end{aligned}$$

Οι παραπάνω κινηματικές εξισώσεις μπορούν να γραφτούν με αυτόν τον τρόπο για συντομία

$$x' - L_3 \cos f_2 = L_1 L_2 c_2 c_{23} \quad (6)$$

$$y' - L_3 \sin f_2 = L_1 L_2 s_2 s_{23} \quad (7)$$

όπου $c_2 = \cos \theta_2$, $c_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3)$ και $s_2 = \sin(\theta_2)$, $s_{23} = \sin(\theta_2 + \theta_3)$

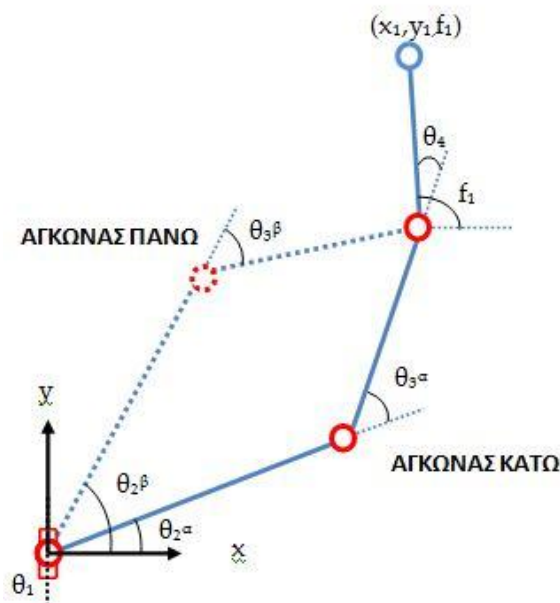
Υψώνοντας στο τετράγωνο τις δύο παραπάνω σχέσεις (6) και (7) και προσθέτοντας τις κατά μέλη προκύπτει μία εξίσωση ως προς $\cos \theta_3$, η οποία επιλυόμενη δίνει :

$$\cos \theta_3 = \frac{(x')^2 + (y')^2 - 2L_3 - 2L_3(x' \cos f_2 + y' \sin f_2) + L_3^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1 L_2} = \sigma$$

Προκειμένου να υπάρχει λύση για τη γωνία θ_3 , πρέπει το σ της παραπάνω εξίσωσης να μας δίνει μια τιμή μεταξύ 1 και -1. Στον αλγόριθμο επίλυσης, αυτή η συνθήκη πρέπει να ελεγχθεί ως προς την ισχύ της στο σημείο αυτό για να διαπιστωθεί αν υπάρχει λύση ή όχι. Εάν η συνθήκη αυτή δεν ικανοποιείται, τότε το ζητούμενο σημείο βρίσκεται εκτός του προσιτού χώρου εργασίας του δαχτύλου και επομένως δεν μπορεί να το φτάσει. Εάν ωστόσο ικανοποιείται, η γωνία θ_3 προσδιορίζεται από την σχέση :

$$\theta_3 = \text{atan2}(\pm \sqrt{1 - \sigma^2}, \sigma) \quad (8)$$

Βλέπουμε ότι για την γωνία θ_3 υπάρχουν δύο λύσεις, ανάλογα με το πρόσημο. Συγκεκριμένα μπορεί να πρόκειται για λύση Αγκώνα Πάνω ή Αγκώνα Κάτω (Εικ. 2.2.3.1.2).



Εικόνα 2.2.3.1.2 Λύση με Αγκώνα Πάνω και Αγκώνα Κάτω

Εξάλλου, οι εξισώσεις (6) και (7) μπορούν να γραφτούν ως εξής:

$$x' - L_3 \cos f_2 = (L_1 + L_2 c_3)c_2 + (-L_2 s_3)s_2$$

$$y' - L_3 \sin f_2 = (L_2 s_3)c_2 + (L_1 + L_2 c_3)s_2$$

Οπότε η γωνία θ_2 μπορεί να προσδιοριστεί ως :

$$\theta_2 = \text{atan2} \left[\frac{(y' - L_3 \sin f_2)(L_1 + L_2 c_3) - (x' - L_3 \cos f_2)L_2 s_3}{L_1^2 + L_2^2 + 2L_1 L_2 c_3}, \frac{(x' - L_3 \cos f_2)(L_1 + L_2 c_3) + (y' - L_3 \sin f_2)L_2 s_3}{L_1^2 + L_2^2 + 2L_1 L_2 c_3} \right] \quad (9)$$

Όσον αφορά την γωνία θ_4 , εύκολα προσδιορίζεται ως

$$\theta_4 = f_2 - \theta_2 - \theta_3 \quad (10)$$

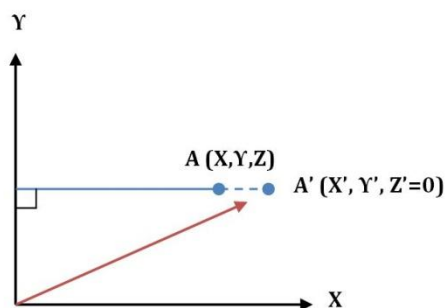
Έτσι λοιπόν γνωρίζοντας την θέση (x', y') και τον προσανατολισμό (f_2) του δείκτη στο επίπεδο x-y υπολογίσαμε τις γωνίες $\theta_2, \theta_3, \theta_4$ (εξισώσεις 8,9,10).

2.2.3.2 Επίλυση του αντίστροφου κινηματικού, για το δάχτυλο του δείκτη, στον τρισδιάστατο χώρο.

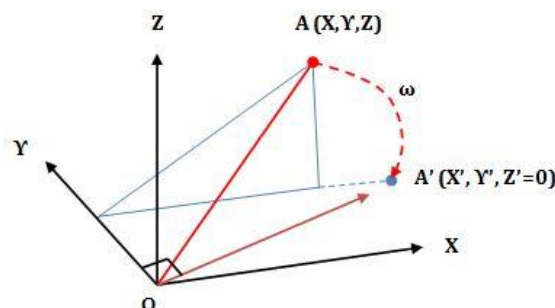
Έστω ότι θέλουμε να τοποθετηθεί ο δείκτης σε ένα επιθυμητό σημείο $A:(X,Y,Z)$ στον τρισδιάστατο χώρο και ως προς το πλαίσιο βάσης του δαχτύλου.

Στο σημείο A μπορεί να αντιστοιχηθεί ένα σημείο $A':(X',Y',Z'=0)$ του επίπεδου $X-Y$, (Εικ. 2.2.3.2.1) για το οποίο όταν το δάχτυλο βρίσκεται σε αυτό, μία στροφή με την κατάλληλη γωνία $-\omega$ γύρω από τον άξονα Y θα φέρει το A' στο A .

Με βάση την προηγούμενη παρατήρηση και την παράγραφο 2.2.3.1 μπορούμε να υπολογίσουμε τα $\theta_2, \theta_3, \theta_4$ όταν ξέρουμε την θέση (X',Y') και τον προσανατολισμό (f_2) του δείκτη στο επίπεδο $X-Y$. Αυτό που μένει να βρούμε είναι οι συντεταγμένες (X',Y') και η γωνία της πρώτης άρθρωσης του δαχτύλου δηλαδή, τον προσανατολισμό $f_1 = \theta_1$.



Εικόνα 2.2.3.2.1 Προοπτική κίνησης δαχτύλου



Εικόνα 2.2.3.2.2 Κάτοψη κίνησης δαχτύλου

Ο υπολογισμός της γωνίας ω γίνεται μέσω των συντεταγμένων X και Z

$$\omega = \theta_1 = f_1 = \text{atan2}(Z, X)$$

Η περιστροφή γύρω από τον άξονα Y κατά γωνία ω υπολογίζεται από τον πίνακα στροφής

$R_{Y,\omega}$ [6]:

$$R_{Y,\omega} = \begin{bmatrix} \cos \omega & 0 & \sin \omega \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \omega & 0 & \cos \omega \end{bmatrix}$$

Έπειτα θα πολλαπλασιάσουμε τον πίνακα $R_{Y,\omega}$ με τα X, Y, Z και θα βρούμε τις συντεταγμένες (X', Y')

$$R_{Y,\omega} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}$$

Αφού γνωρίζουμε πλέον τα X', Y' μπορούμε με βάση την παράγραφο 2.2.3.1 να βρούμε τα $\theta_2, \theta_3, \theta_4$.

Τα X, Y, Z που αντιστοιχούν στο σημείο A , είναι οι συντεταγμένες του ως προς το πλαίσιο συντεταγμένων της βάσης του δαχτύλου π.χ. b_1 . Εμείς γνωρίζουμε τις συντεταγμένες του σημείου A ως προς το πλαίσιο συντεταγμένων της παλάμης οι οποίες σε αυτή την περίπτωση είναι οι x, y, z . Μπορούμε λοιπόν να ανάγουμε τις συντεταγμένες x, y, z , ως προς το πλαίσιο βάσης του δαχτύλου (X, Y, Z) ως εξής :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = g_{b_1 p} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Όπου $g_{b_1 p}$ είναι ο ομογενής μετασχηματισμός που συνδέει το πλαίσιο συντεταγμένων της παλάμης με το πλαίσιο συντεταγμένων της βάσης του κάθε δαχτύλου.

Γενικά για όλα τα δάχτυλα ισχύει :

$$g_{pb_i} = \begin{bmatrix} R_{pb_i} & P_{pb_i} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad g_{pb_i}^{-1} = g_{b_i p} = \begin{bmatrix} R_{pb_i}^T & -R_{pb_i}^T P_{pb_i} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}$$

όπου για τον δείκτη, μέσο, παράμεσο και μικρό έχουμε :

$$R_{pb_i} = R^T_{pb_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad P_{pb_i} = \begin{bmatrix} x_{bi} \\ y_{bi} \\ z_{bi} \end{bmatrix} \quad \text{με } i = 1, 2, 3, 4$$

Δείκτης	Μέσος	Παράμεσος	Μικρός
$P_{pb_1} = \begin{bmatrix} 4.58 \\ 0 \\ 3.44 \end{bmatrix}$	$P_{pb_2} = \begin{bmatrix} 5.65 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$P_{pb_3} = \begin{bmatrix} 3.83 \\ 0 \\ -3.44 \end{bmatrix}$	$P_{pb_4} = \begin{bmatrix} 3.52 \\ 0 \\ -6.88 \end{bmatrix}$

Ενώ για τον αντίχειρα ισχύει :

$$R_{pb_5} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad P_{pb_5} = \begin{bmatrix} x_{bi} \\ y_{bi} \\ z_{bi} \end{bmatrix} \quad \text{με } i = 5, \quad P_{pb_5} = \begin{bmatrix} -4.58 \\ 0 \\ 3.44 \end{bmatrix}$$

Με αντικατάσταση των παραπάνω δεδομένων στην σχέση (11) μπορούμε να βρούμε τα X, Y, Z για κάθε περίπτωση.

$$\left. \begin{array}{l} \text{όπου } X = x - x_{b_i} \\ Y = y - y_{b_i} \\ Z = z - z_{b_i} \end{array} \right\} \text{ για τον δείκτη, μέσο, παράμεσο και μικρό με } i = 1, 2, 3, 4$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{και } X = -y + y_{b_i} \\ Y = x + x_{b_i} \\ Z = z - z_{b_i} \end{array} \right\} \text{ για τον αντίχειρα με } i = 5$$

2.2.3.3 Υλοποίηση του αντίστροφου κινηματικού στο MATLAB.

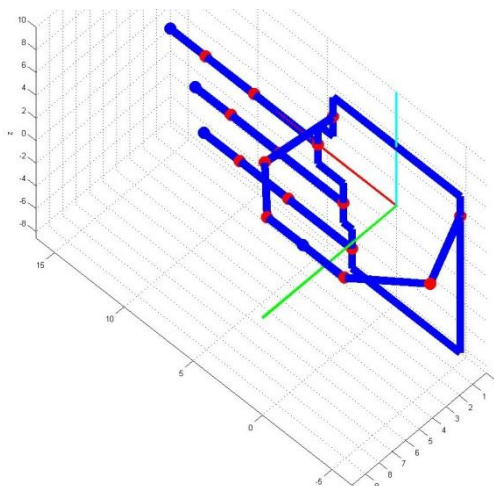
Για την επίλυση του αντίστροφου κινηματικού για το ρομποτικό χέρι, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Matlab υλοποιώντας μια συνάρτηση. Η συνάρτηση αυτή είναι η `AntiKin(j, x, y, z, f1)` η οποία παίρνει σαν ορίσματα το " j ", την θέση (x, y, z) και τον προσανατολισμό (f_1) του δαχτύλου και επιστρέφει τις γωνίες " q_1, q_2, q_3, q_4 ". Η μεταβλητή " j " μπορεί να πάρει τιμές από το ένα μέχρι το πέντε και αντιστοιχεί στο κάθε δάχτυλο με $j=1$ στον δείκτη, το $j=2$ στον μέσο, το $j=3$ στον παράμεσο, το $j=4$ στον μικρό και το $j=5$ στον αντίχειρα.

Επίσης όπως το ευθύ κινηματικό, έτσι και εδώ χρησιμοποιήθηκαν οι συναρτήσεις για την απεικόνιση του χεριού οι οποίες είναι η `Apeikonish_Daxtylou(F, i)`, η `Apeikoniseis_Daxtylwn()` και η `palami()`.

Με βάση την συνάρτηση του αντίστροφου κινηματικού αλλά και τις συναρτήσεις για την απεικόνιση του χεριού, θα επιχειρήσουμε να δείξουμε πως χρησιμοποιήθηκε το αντίστροφο κινηματικό μοντέλο. Παρακάτω λοιπόν θα δούμε μερικά παραδείγματα με την εφαρμογή της συνάρτησης `AntiKin()` όπως δίνεται για τα πέντε δάχτυλα του χεριού:

Επαφή των δαχτύλων αντίχειρα και δείκτη

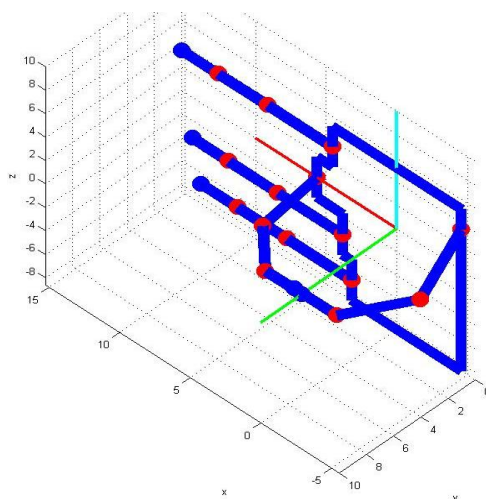
Δείκτης: `AntiKin(1, 0, 7.5, 3.44, 0);`
 Μέσος: `AntiKin(2, 16.3200, 0, 0, 0);`
 Παράμεσος: `AntiKin(3, 14.5000, 0, -3.44, 0);`
 Μικρός: `AntiKin(4, 14.1900, 0, -6.88, 0);`
 Αντίχειρας: `AntiKin(5, 0, 7.5, 3.44, 80);`



Εικόνα 2.2.3.3.1 Επαφή του αντίχειρα και δείκτη με την συνάρτηση του Αντίστροφου Κινηματικού

Επαφή των δαχτύλων αντίχειρα και μέσου

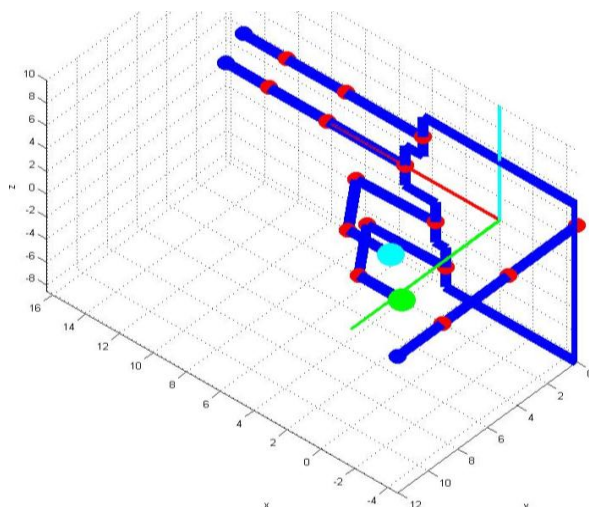
Δείκτης: AntiKin(1,15.2500,0,3.44,0);
 Μέσος: AntiKin(2,0,7,0,0);
 Παράμεσος: AntiKin(3,14.5000,0,-3.44,0);
 Μικρός: AntiKin(4,14.1900,0,-6.88,0);
 Αντίχειρας: AntiKin(5,0,7,0,90);



Εικόνα 2.2.3.3.2 Επαφή του αντίχειρα και μέσου με την συνάρτηση του Αντίστροφου Κινηματικού.

Τοποθέτηση των δαχτύλων του μικρού και του παράμεσου σε επιθυμητά σημεία που βρίσκονται πάνω από την βάση του κάθε δαχτύλου

Δείκτης: AntiKin(1,15.2500,0,3.44,0);
 Μέσος: AntiKin(2,16.3200,0,0,0);
 Παράμεσος: AntiKin(3,3.83,3,-3.44,180);
 Μικρός: AntiKin(4,3.2,3,-6.88,180);
 Αντίχειρας: AntiKin(5,-4.58,15.06,3.44,90);



Εικόνα 2.2.3.3.3 Τα δάχτυλα μικρός και δείκτης τοποθετημένα σε επιθυμητά σημεία που βρίσκονται πάνω από την βάση τους με την συνάρτηση του Αντίστροφου Κινηματικού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΧΕΡΙΟΥ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ

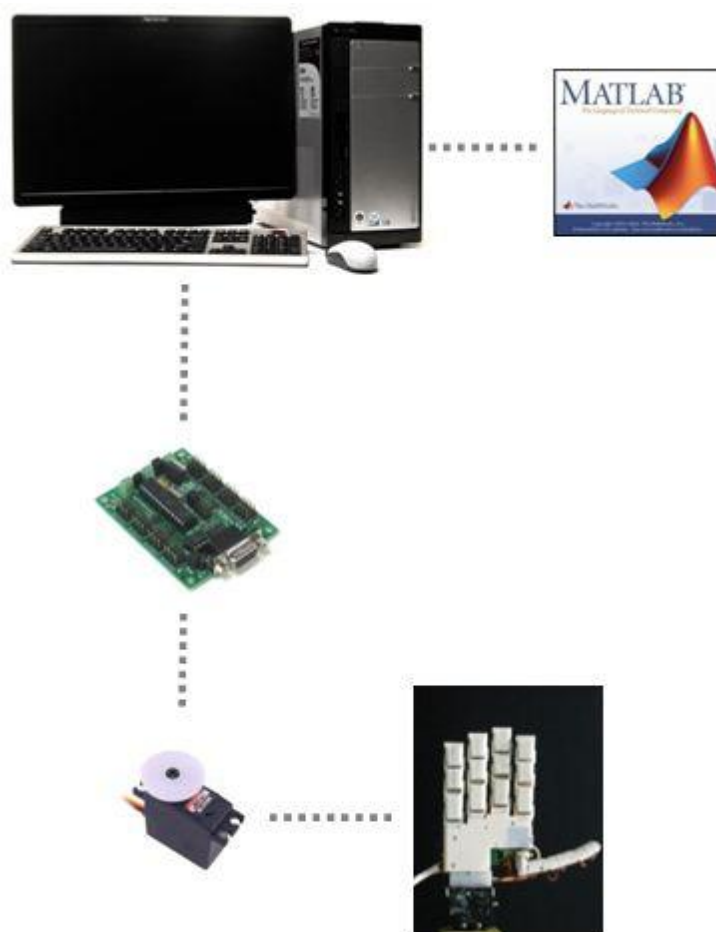
3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια περιγραφή της διασύνδεσης του ρομποτικού χεριού με το σύστημα ελέγχου καθώς και μια αναφορά για το κάθε μέρος του.

3.2 Το σύστημα ελέγχου του ρομποτικού χεριού

Το συνολικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε για τον προγραμματισμό της κίνησης του ρομποτικού χεριού αποτελείται από το ρομποτικό χέρι, τους σερβοκινητήρες, τον σερβοελεγκτή SSC-32, τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και το λογισμικό του Matlab (Εικ. 3.2.1).

Το ρομποτικό χέρι έχει συνολικά 16 σερβοκινητήρες RC/servo οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στις αρθρώσεις των δαχτύλων. Υπεύθυνος για την κίνηση των σερβοκινητήρων είναι ο σερβοελεγκτής SSC-32 ο οποίος επικοινωνεί με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω της σειριακής θύρας. Καθοριστικό ρόλο παίζει το λογισμικό του Matlab στο οποίο γράφεται ο κώδικας με τα κινηματικά για τον έλεγχο της κίνησης των σερβοκινητήρων.



Εικόνα 3.2.1 Το συνολικό σύστημα

3.3 Το λογισμικό Matlab

Το λογισμικό MATLAB, που παίρνει το όνομά του από τις λέξεις **MAT**rix **LAB**oratory, είναι ένα σύγχρονο ολοκληρωμένο μαθηματικό πακέτο για υψηλής απόδοσης αριθμητικούς υπολογισμούς (numerical computations). Είναι ένα διαδραστικό (interactive) πρόγραμμα για αριθμητικούς υπολογισμούς και για κατασκευή γραφημάτων, αλλά παρέχει επίσης και τη δυνατότητα προγραμματισμού, κάτι που το καθιστά ένα χρησιμότερο εργαλείο για όλους όσους ασχολούνται με τις θετικές επιστήμες (και όχι μόνο).

Αποτελεί ένα εξελιγμένο υπολογιστικό εργαλείο το οποίο μπορεί να βρει εφαρμογή σε διάφορους τομείς της επιστήμης αλλά βέβαια και της πράξης, όπως για παράδειγμα τη μηχανική, την ιατρική και τη βιομηχανική παραγωγή. Μάλιστα, το φάσμα των εφαρμογών

του συγκεκριμένου πακέτου λογισμικού διευρύνεται συνεχώς και περισσότερο, αναδεικνύοντας με αυτό τον τρόπο τις πολλαπλές δυνατότητες του, όπως την υψηλή απόδοση και ταχύτητα υπολογιστικών αναλύσεων, την δυνατότητα προσομοίωσης φυσικών συστημάτων, την δυνατότητα υλοποίησης αλγορίθμων, την δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας με πληθώρα άλλων προγραμμάτων και εφαρμογών και την υψηλής ποιότητας γραφικές απεικονίσεις και animations.

Σε αυτή την εργασία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό του Matlab για τον προγραμματισμό, τον έλεγχο και την προσομοίωση του ρομποτικού χεριού. Με την δημιουργία εντολών προς εκτέλεση και συγκεκριμένα με την βοήθεια των μαθηματικών εξισώσεων και πινάκων για το ευθύ και αντίστροφο κινηματικό μέσω συναρτήσεων, έγιναν με επιτυχία οι διάφορες χειρονομίες και λαβές του ρομποτικού χεριού που θα δούμε σε παρακάτω κεφάλαιο.

3.4 Οι Σερβοκινητήρες RC servo

Οι σερβοκινητήρες [5], είναι κυρίως μικροί κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ενσωματωμένο σύστημα γραναζιών και κύκλωμα ελέγχου ανάδρασης (feedback control loop). Χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της γωνίας ή της ταχύτητας περιστροφής του άξονα, ο οποίος μπορεί να κινεί μια άρθρωση, ένα τροχό ή κάποιο άλλο αντικείμενο που συνδέεται με τον σερβοκινητήρα. Μπορεί να είναι μικροί, αλλά παράγουν μια σχετικά μεγάλη ροπή για το μέγεθός τους και μπορούν να περιστραφούν με ταχύτητες της τάξης των 60 έως 160 rpm, για αυτό είναι κατάλληλοι για χρήση σε ρομποτικά συστήματα μικρής κλίμακας.

Χωρίζονται σε δυο κύριες κατηγορίες, τους **τυπικούς σερβοκινητήρες** (standard servos) και τους **σερβοκινητήρες ταχύτητας** (continues servos). Οι τυπικοί σερβοκινητήρες προσπαθούν να καταλήξουν σε μια θέση που καθορίζεται από τον χρήστη και έχουν περιορισμένο εύρος κίνησης (0° - 180°), ενώ οι σερβοκινητήρες ταχύτητας επιχειρούν να επιτύχουν μια ταχύτητα που καθορίζεται από τον χρήστη και μπορούν να κινηθούν σε όλο το φάσμα του κύκλου, εκτελώντας πλήρη περιστροφές (360°).

Εσωτερικά οι σερβοκινητήρες RC servo [8], περιέχουν ένα **κύκλωμα ελέγχου** που είναι ο εγκέφαλος του σερβοκινητήρα, το οποίο διαβάζει το σήμα (PWM) που δίνει ο χρήστης και ελέγχει τον κινητήρα με τέτοιο τρόπο ώστε ο **κινητήριος άξονας** να περιστραφεί προς την επιθυμητή θέση. Επίσης έχουν ένα **ποτενσιόμετρο** το οποίο συνδέεται με τον κινητήριο άξονα, έτσι όταν περιστρέφεται ο κινητήριος άξονας περιστρέφεται και αυτό. Με αυτόν τον τρόπο μεταβάλλεται η αντίσταση του ποτενσιόμετρου και ο ελεγκτής διαβάζοντας το,



μπορεί να ξέρει την ακριβή γωνία του κινητήριου άξονα του σερβοκινητήρα. Μέσα στο σερβοκινητήρα υπάρχει επίσης και ένα μικρό **μοτέρ** συνεχούς ρεύματος το οποίο συνδέεται με ένα **σύστημα γραναζιών** τα οποία μεταφέρουν την κίνηση του μοτέρ στον κινητήριό άξονα. (Εικ. 3.4.1)

Ο λόγος που κάνει αυτούς τους σερβοκινητήρες πολύ χρήσιμους είναι ότι έχουν ένα πολύ εύκολο τρόπο ελέγχου, ο οποίος γίνεται από ένα εξωτερικό σήμα τετραγωνικών παλμών PWM (Pulse Width Modulation) συχνότητας 50Hz (περίοδο 20ms). Το εύρος του παλμού μπορεί να πάρει τιμές από 1-2 ms. Ένας παλμός με εύρος 1ms αντιστοιχεί σε μηδέν μοίρες και ένας παλμός των 1.5 ms αντιστοιχεί σε 90° ενώ ένας παλμός διάρκειας 2ms αντιστοιχεί σε γωνία περίπου 180° (Εικ. 3.4.2).

Το PWM σήμα έχει τρεις παραμέτρους που το χαρακτηρίζουν: α) Η **περίοδος (period)**, πόσο χρονικό διάστημα χρειάζεται για κάθε πλήρη κύκλο του παλμού. β) Η **συχνότητα (frequency)**, το πόσο συχνά δημιουργούνται οι παλμοί. Αυτή η τιμή καθορίζεται συνήθως σε Hz (κύκλοι ανά δευτερόλεπτο). γ) Η τελευταία και πιο κρίσιμη παράμετρος είναι αυτό που λέμε **κύκλος λειτουργίας (duty cycle)**, ο οποίος αναφέρεται στο χρονικό διάστημα όπου ο παλμός του PWM είναι ενεργός ή σε κατάσταση υψηλή (high) και εκφράζεται ως % ποσοστό της πλήρους περιόδου (Εικ 3.4.3).

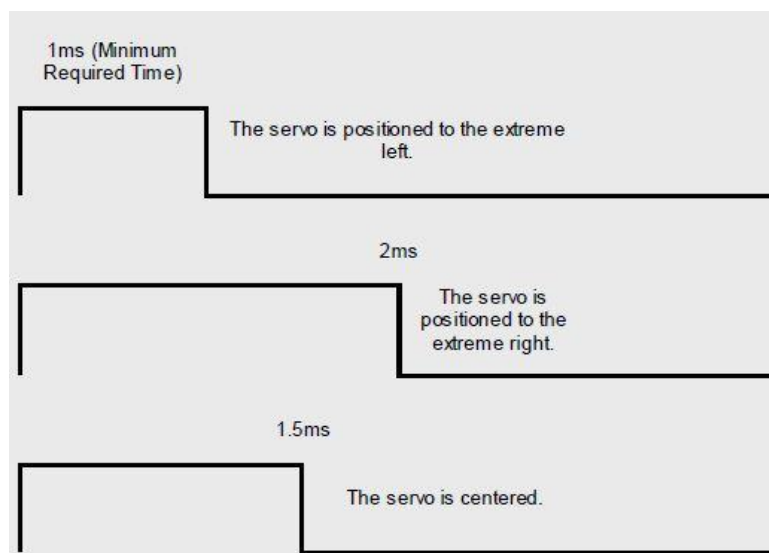
Το κόστος των σερβοκινητήρων RC servo είναι αρκετά χαμηλό και η συνδεσμολογία τους πολύ απλή, αφού χρησιμοποιούνται τρία μόλις καλώδια εκ των οποίων τα δύο αφορούν την τροφοδοσία, (γείωση και τάση τροφοδοσίας) και το τρίτο αφορά τον έλεγχο της θέσης του (σήμα PWM).

Οι σερβοκινητήρες που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία για το ρομποτικό χέρι είναι ο κινητήρας Hitec HS-225BB για την πρώτη άρθρωση του αντίχειρα και ο κινητήρας Tower Pro SG90 για όλες τις υπόλοιπες αρθρώσεις (Πίνακας 3.4.1).

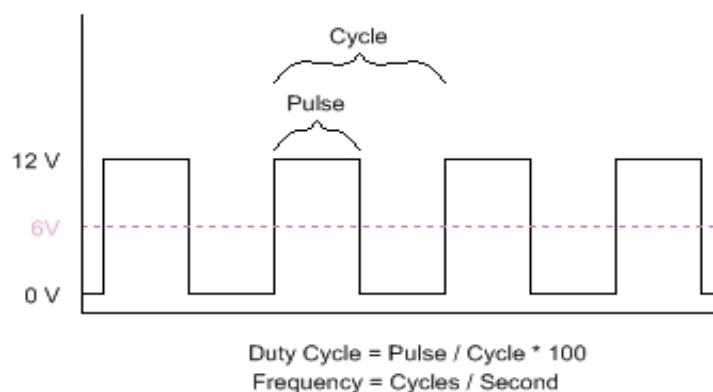
Hitec HS-225BB	Tower Pro SG90
	
Είδος Σερβοκινητήρα : Αναλογικός	Είδος Σερβοκινητήρα : Αναλογικός
Ταχύτητα : 0.14-0.11 sec/ 60°.	Ταχύτητα : 0.10 sec/60°
Ροπή Kg/cm : 3.9-4.8 Kg/cm	Ροπή Kg/cm : 1.80 Kg/cm
Διαστάσεις (mm) : 32.3 x 16.8 x 31.0	Διαστάσεις (mm) : 23.1 x 12.2 x 29.0
Βάρος (gr) : 26.93gr	Βάρος (gr) : 9gr
Εύρος παλμού (μsec): 900-2100μsec	Εύρος παλμού (μsec): 500-2400μsec
Πίνακας 3.4.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά των σερβοκινητήρων Hitec HS-225BB και Tower Pro	



Εικόνα 3.4.1 Η ανατομία ενός σερβοκινητήρα RC servo



Εικόνα 3.4.2 Το πλάτος των τετραγωνικών παλμών PWM.



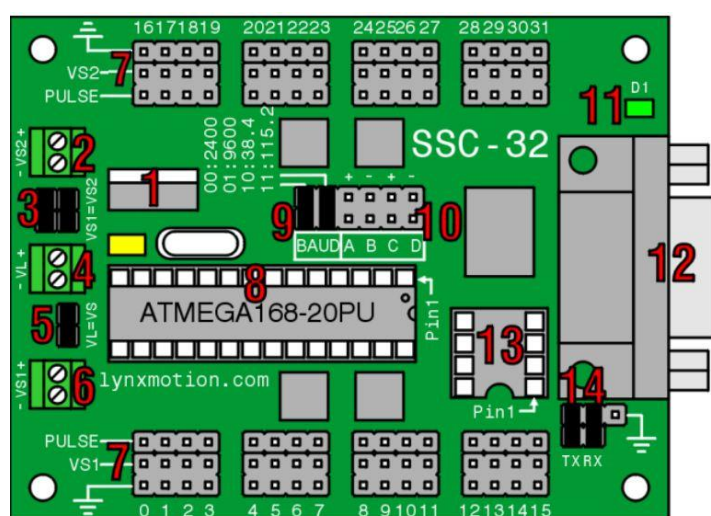
Εικόνα 3.4.3 Οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν το PWM.

3.5 Ο σέρβο ελεγκτής SSC-32

Ο SSC-32 (Serial Servo Controller) (Εικ. 3.5.1) της Lynxmotion είναι ένας πολύ γνωστός ελεγκτής σερβοκινητήρων με δυνατότητα σύνδεσης και ελέγχου μέχρι και με 32 RC servo. Στην πάνω και κάτω μεριά της πλακέτας του, όπως φαίνεται στο '7', έχει αριθμημένα από το 0 μέχρι το 31 τα κανάλια διασύνδεσης του με τους RC servo. Έχει την δυνατότητα να επικοινωνεί σειριακά με χαρακτήρες ASCII, με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή ή άλλους μικροεπεξεργαστές όπως π.χ. ο Arduino.

Όταν γίνει η διασύνδεση του με κάποια συσκευή, ανάβει ένα led στο '11' το οποίο γενικά όποτε δίνεται κάποια εντολή αναβοσβήνει. Επίσης πάνω στη πλακέτα υπάρχει το τσιπάκι της Atmel στο '8' και το BAUD στο '10' το οποίο ρυθμίζει την ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων.

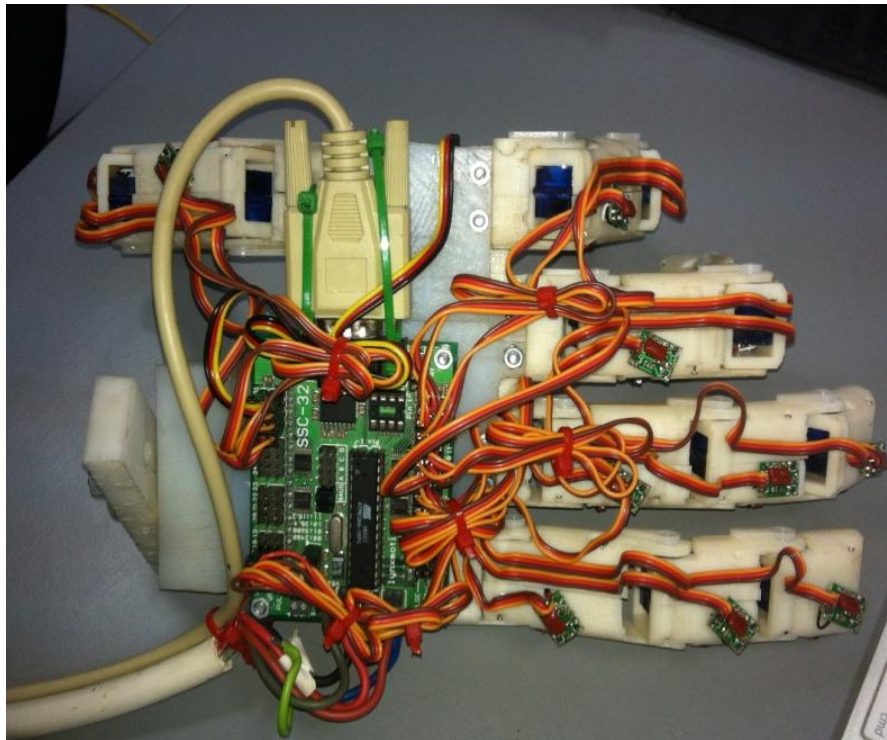
Για την τροφοδοσία του, ο SSC-32, έχει τρία σημεία τροφοδοσίας, το '2', το '4' και το '6', ενώ το κάθε σημείο τροφοδοσίας έχει δύο υποδοχές, VS1- και VS2+, για τα καλώδια που συνδέονται με το τροφοδοτικό. Η τροφοδοσία του '2' οδηγείται στα κανάλια 16 έως και 31 που συνδέονται οι σερβοκινητήρες, η τροφοδοσία του '6' στα κανάλια 0 έως 16 ενώ η '4' μπορεί να τροφοδοτήσει όλα τα κανάλια μαζί. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να υπάρχουν οι γέφυρες (jumper) στα '3' και '5' οι οποίες συνδέουν τις πηγές τάσης '2' και '6'. Σε περίπτωση που αφαιρεθούν και τροφοδοτηθεί η πηγή τάσης '4', τότε τροφοδοτείται μόνο η πλακέτα με τον μικροελεγκτή και όχι τα κανάλια. Επίσης έχει ένα σταθεροποιητή τάσης, που βρίσκεται στο '1', ο οποίος του επιτρέπει να παίρνει τάση μέχρι και 9 Volt.



Εικόνα 3.5.1 Ο σερβοελεγκτής SSC-32

Η συνδεσμολογία των σερβοκινητήρων με τον SSC-32 γίνεται σύμφωνα με τον Πίνακα 3.5.1, για τις αρθρώσεις q2,q3,q4 του κάθε δαχτύλου και επιπλέον για την q1 του αντίχειρα. Για την τροφοδότηση του σερβοελεγκτή χρησιμοποιούνται τρία τροφοδοτικά (Εικ. 3.5.2). Το ένα τροφοδοτεί τα κανάλια από 0 έως 15 στα οποία συνδέονται οι σερβοκινητήρες του Δείκτη, Μέσου και Παράμεσου. Το άλλο τροφοδοτεί τα κανάλια 16 έως 31 στα οποία συνδέονται οι σερβοκινητήρες του Μικρού και του Αντίχειρα. Το τρίτο τροφοδοτικό έχει συνδεθεί στο σημείο τροφοδοσίας '4' και τροφοδοτεί καθαρά την πλακέτα με τον μικροελεγκτή του SSC-32. Για την παραπάνω τροφοδοσία αφαιρούνται τα jumper '3' και '5' (Εικ. 3.5.1).

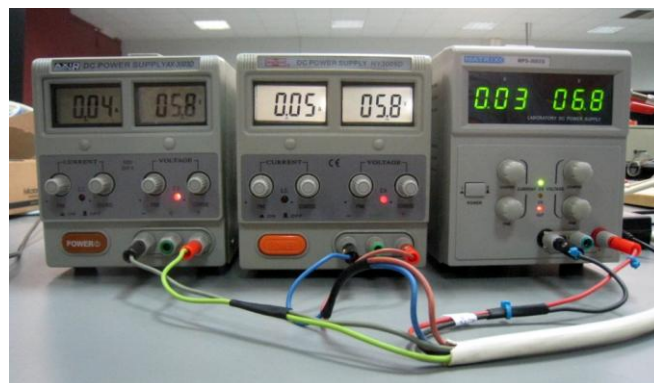
Η συνδεσμολογία όλων των σερβοκινητήρων με τον σερβοελεγκτή SSC-32 φαίνεται στην Εικ. 3.5.2. Επίσης φαίνεται η τάση και το ρεύμα που δίνουμε για την τροφοδότηση των σερβοκινητήρων (5.8V και 0.04-0.05A) και για την πλακέτα του SSC-32 (6.8V και 0.03A). Το ρεύμα μεταβάλλεται όσο το χέρι κινείται.



Εικόνα 3.5.2 Η σύνδεση των σερβοκινητήρων με τον SSC-32.

Δάχτυλο	Δείκτης			Μέσος			Παράμεσος			Μικρός			Αντίχειρας			
Αρθρώσεις	q2	q3	q4	q2	q3	q4	q2	q3	q4	q2	q3	q4	q1	q2	q3	q4
Pin-SSC32	15	14	13	12	11	10	9	8	7	16	17	18	31	30	29	28

Πίνακας 3.5.1 Οι αρθρώσεις κάθε δαχτύλου και το κανάλι που τους αντιστοιχούν στον SSC-32



Εικόνα 3.5.3 Τα τροφοδοτικά που χρησιμοποιήθηκαν στον SSC-32.

Η λειτουργία του SSC-32 βασίζεται σε εντολές οι οποίες αποτελούνται από χαρακτήρες ASCII οι οποίες μπορούν να σταλούν με την βοήθεια του λογισμικού Matlab, μέσω της σειριακής θύρας του υπολογιστή. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούμε να ελέγξουμε την

λειτουργία των σερβοκινητήρων του ρομποτικού χεριού. Ο κώδικας για την σύνδεση του Matlab με την σειριακή θύρα του υπολογιστή παρουσιάζεται παρακάτω:

```
s=serial ('COM4', 'BaudRate', 115200);
fopen(s);
com = instrfind;
disp (com);
```

Με το 's' δηλώνουμε την σειριακή θύρα που είναι συνδεδεμένος ο σερβοελεγκτής, εδώ για παράδειγμα είναι στην COM 4. Επίσης δηλώνεται το BaudRate , δηλαδή η ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων στο οποίο δίνεται η τιμή 115200. Στην συνέχεια γίνεται το άνοιγμα της σειριακής θύρας με την εντολή fopen(s) και με τις εντολές com = instrfind και disp(com), μπορούμε να δούμε και να επαληθεύσουμε ότι σίγουρα έχει γίνει η σύνδεση και είναι ανοιχτή η θύρα COM 4.

Στην συνέχεια, παρατίθεται ένα παράδειγμα σύνταξης μιας εντολής που πρέπει να δοθεί στον μικροελεγκτή για την κίνηση ενός σερβοκινητήρα :

```
#0 P1500 T2000 <cr>
```

Με την παραπάνω εντολή θα κινηθεί ο σερβοκινητήρας που αντιστοιχεί στο κανάλι 0 στην γωνία που αντιστοιχεί το εύρος παλμού των 1500μsec. Ο χρόνος μέχρι να εκτελεστεί αυτή η εντολή, δηλαδή μέχρι να φτάσει ο σερβοκινητήρας στην επιθυμητή γωνία, ανεξάρτητα σε ποια γωνιά βρίσκεται, είναι 2000msec. Η γενική μορφή της παραπάνω εντολής είναι:

```
#(ch) P(pw) T(time) <cr>
```

ενώ οι παράμετροι της εντολής δίνονται στον Πίνακα 3.5.1.

Παράμετρος	Περιγραφή
ch	Αριθμός καναλιού 0 – 31
pw	Εύρος παλμού σε msec (500 – 2500)
time	Χρόνος σε msec ολόκληρης της κίνησης
cr	Χρειάζεται για να σηματοδοτήσει το τέλος της εντολής

3.5.2 Οι παράμετροι των εντολών

Η παραπάνω εντολή πρέπει να τυπωθεί στην σειριακή θύρα του υπολογιστή ώστε να μεταβιβαστεί στον μικροελεγκτή SSC-32. Αυτό μπορεί να γίνει γράφοντας στο MATLAB:

```
fprintf (s, '#0 P500 T2000 <cr>')
```

Κάτι πολύ ξεχωριστό που διαθέτει ο SSC-32, είναι το "Group Move", το οποίο επιτρέπει οποιοδήποτε συνδυασμό κινητήρων, να ξεκινάνε και να σταματάνε οποιαδήποτε στιγμή θέλουμε εμείς, ακόμα και αν οι κινητήρες πρέπει να στραφούν σε διαφορετικές γωνίες. Αυτό κάνει δυνατή την ταυτόχρονη κίνηση των δαχτύλων του ρομποτικού χεριού κατά την διάρκεια πραγματοποίησης των λαβών και των χειρονομιών.

Ένα παράδειγμα για την ομαδική κίνηση (group move) κινητήρων δίνεται παρακάτω:

```
#0 P500 #1 P2500 T2000
```

Με αυτή την εντολή θα κινηθεί ο σερβοκινητήρας που βρίσκεται στο κανάλι 0 στην θέση που αντιστοιχεί το εύρος παλμού των 500μsec και ο σερβοκινητήρας που βρίσκεται στο κανάλι 1 στη θέση που αντιστοιχεί στο εύρος παλμού των 2000μsec. Ο χρόνος μέχρι να εκτελεστεί αυτή η εντολή, δηλαδή μέχρι να φτάσουν και οι δυο σερβοκινητήρες στην επιθυμητή γωνία ανεξάρτητα σε ποια γωνιά βρίσκεται ο καθένας, θα είναι 2000msec. Στο Matlab η εντολή αυτή θα γραφτεί ως εξής :

```
fprintf (s, '#0 P500 #1 P2500 T2000 <cr>')
```

Η εντολή αυτή δηλαδή αφορά τον τρόπο με τον οποίο μεταφέρουμε την πληροφορία από το Matlab στον SSC-32. Κατά αυτόν τον τρόπο μπορούμε να κινήσουμε και τους 16 σερβοκινητήρες που χρησιμοποιούνται για το ρομποτικό χέρι, άρα και όλα τα ρομποτικά δάχτυλα ταυτόχρονα.

Για την σωστή κίνηση των ρομποτικών δαχτύλων απαιτείται το καλιμπράρισμα των σερβοκινητήρων με πειραματικές μετρήσεις. Έστω ότι θέλουμε να καλιμπράρουμε την πρώτη άρθρωση του δείκτη, τότε ενεργούμε ως εξής :

Γυρνάμε την άρθρωση του δείκτη στην γωνία που εμείς επιθυμούμε να ορίσουμε ως θέση αναφοράς 0° και καταγράφουμε το εύρος παλμού που αντιστοιχεί εκεί (π.χ. α=2050μs) και στην συνέχεια κάνουμε το ίδιο για τις 90° (π.χ. β=1050μs). Έτσι, για οποιαδήποτε άλλη επιθυμητή γωνία q_i της άρθρωσης, μπορούμε να ακολουθήσουμε τον παρακάτω μαθηματικό τύπο προκειμένου να βρούμε το κατάλληλο εύρος παλμών PWM που πρέπει να δοθεί στον σερβοκινητήρα της συγκεκριμένης άρθρωσης:

$$PWM_{q_i} = \text{round} \left\{ \alpha - \frac{(\alpha - \beta)}{90^\circ} q_i \right\}$$

όπου α , β , οι τιμές του PWM προκειμένου να βρίσκεται η άρθρωση στις γωνίες 0 και 90 όπως περιγράψαμε παραπάνω. Με τον δείκτη i συμβολίζουμε τον αριθμό της άρθρωσης του ρομποτικού δαχτύλου. Σημαντικό είναι να ειπωθεί ότι η γωνίες των 0° και 90° δεν είναι οι γωνίες των σερβοκινητήρων αλλά οι γωνίες που επιθυμούμε για την άρθρωση. Τα αποτελέσματα του καλιμπράρισματος για όλες τις αρθρώσεις των δαχτύλων βρίσκονται στους παρακάτω πίνακες.

Είναι άξιο να σημειωθεί ότι στο κινηματικό μοντέλο του ρομποτικού χεριού, έχουμε q_1, q_2, q_3, q_4 για τις αρθρώσεις κάθε δαχτύλου, όμως η άρθρωση q_4 κινεί τα δάχτυλα πάνω στο μετωπιαίο επίπεδο, κάτι που τα ρομποτικά δάχτυλα για το χέρι που κατασκευάστηκε δεν μπορούν να κάνουν παρά μόνο ο Αντίχειρας.

Αρθρώσεις Δείκτη	q_2		q_3		q_4	
Μοίρες	0°	90°	0°	90°	0°	90°
Εύρος Παλμού για το σήμα εισόδου του κινητήρα	2050	1050	2100	1050	2050	1000

Πίνακας 3.5.3 Το καλιμπράρισμα των τριών σερβοκινητήρων του Δείκτη.

Αρθρώσεις Μέσου	q_2		q_3		q_4	
Μοίρες	0°	90°	0°	90°	0°	90°
Εύρος Παλμού για το σήμα εισόδου του κινητήρα	1800	800	2000	950	2190	1190

Πίνακας 3.5.4 Το καλιμπράρισμα των τριών σερβοκινητήρων του Μέσου.

Αρθρώσεις Παράμεσου	q_2		q_3		q_4	
Μοίρες	0°	90°	0°	90°	0°	90°
Εύρος Παλμού για το σήμα εισόδου του κινητήρα	2000	1030	2080	1030	1990	940

Πίνακας 3.5.5 Το καλιμπράρισμα των τριών σερβοκινητήρων του Παράμεσου.

Αρθρώσεις Μικρού	q_2		q_3		q_4		
	Μοίρες	0°	90°	0°	90°	0°	90°
Εύρος Παλμού για το σήμα εισόδου του κινητήρα	1950	990	2000	950	1970	950	

Πίνακας 3.5.6 Το καλιμπράρισμα των τριών σερβοκινητήρων του Μικρού.

Αρθρώσεις Αντίχειρα	q_1		q_2		q_3		q_4		
	Μοίρες	180°	270°	0°	90°	0°	90°	0°	90°
Εύρος Παλμού για το σήμα εισόδου του κινητήρα	1330	2270	2090	1050	2110	1100	2000	950	

Πίνακας 3.5.7 Το καλιμπράρισμα των τριών σερβοκινητήρων του Αντίχειρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΧΕΙΡΟΝΟΜΙΕΣ ΚΑΙ ΛΑΒΕΣ ΠΟΥ ΕΠΙΤΕΥΧΘΗΚΑΝ ΜΕ ΤΟ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟ ΧΕΡΙ

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν οι δυνατότητες ελέγχου του ρομποτικού χεριού. Παράλληλα θα ειπωθούν τα διάφορα είδη λαβών που μπορεί να κάνει το ανθρώπινο χέρι και έπειτα η παρουσίαση των λαβών αλλά και των χειρονομιών πραγματοποιήθηκαν με το ρομποτικό χέρι που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο Αυτοματικής-Ρομποτικής του ΤΕΙ Κρήτης.

4.2 Χειρονομίες που επιτεύχθηκαν με το ρομποτικό χέρι

Οι χειρονομίες είναι ένα προϊόν της αλληλεπίδρασης μεταξύ των ανθρώπων και αποτελούνται από κινήσεις των χεριών κυρίως, του σώματος αλλά και του προσώπου, οι οποίες αντικαθιστούν ή ενισχύουν την προφορική επικοινωνία. Έτσι επιτρέπουν στα άτομα να επικοινωνούν με μια ποικιλία συναισθημάτων και σκέψεων, από περιφρόνηση και εχθρότητα μέχρι έγκριση και αγάπη.

Το ρομποτικό χέρι με την καθοδήγηση του συστήματος ελέγχου που αναφέραμε στο Κεφάλαιο 2 και με την κινηματική ανάλυση, απέκτησε τη δυνατότητα να πραγματοποιεί διάφορους τύπους χειρονομιών και πρότυπα μοντέλα λαβών. Παρακάτω βλέπουμε μερικές από τις χειρονομίες και τις λαβές έτσι όπως έγιναν με το εικονικό μοντέλο του Matlab αλλά και πως τις πραγματοποιεί το ρομποτικό χέρι.

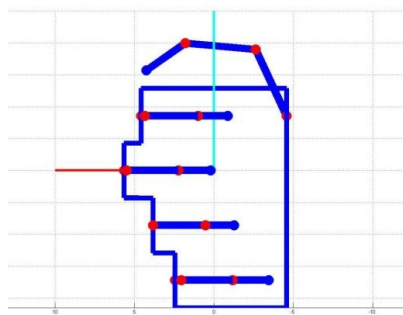
Για να επιτευχθεί μία χειρονομία όπως για παράδειγμα η 'Κλειστή παλάμη-Γροθιά' παρακάτω, απαιτείται στο ρομποτικό χέρι να στείλουμε και τις κατάλληλες γωνίες μέσω

των συναρτήσεων του `EuthiKin()`. Αυτό επιτυγχάνεται με μια επιπλέον συνάρτηση, την `fprint()` η οποία στέλνει τις εντολές του Matlab στον SSC-32.

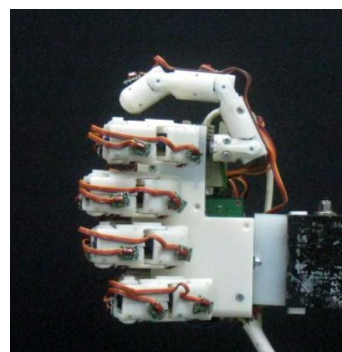
Στην συνέχεια θα γίνει παρουσίαση των παρακάτω χειρονομιών, **Κλειστή παλάμη-Γροθιά**, **Ανοιχτή Παλάμη**, **Point**, **OK**, **Like**, **Άξονες X-Y-Z**, **Έκταση Παράμεσου**, **Έκταση Μικρού**, **Έκταση Δείκτη-Μέσου**, **Επαφή Αντίχειρα-Μέσου**.

Κλειστή παλάμη-Γροθιά: είναι μια χειρονομία στην οποία όλα τα δάχτυλα και ο αντίχειρας βρίσκονται σε πλήρη κάμψη. Για να πραγματοποιηθεί αυτή η χειρονομία από το ρομποτικό χέρι, θα πρέπει να γίνει η χρήση της συνάρτησης του ευθύ κινηματικού (`EuthiKin()`). Με αυτή την συνάρτηση, όπως έχει ειπωθεί στο κεφάλαιο 2, δίνουμε εμείς τις επιθυμητές γωνίες που θέλουμε να κάνει το κάθε δάχτυλο για να εκπληρώσει την επιθυμητή χειρονομία. Το ίδιο γίνεται σε κάθε χειρονομία αλλά και λαβή, που θα δούμε στην επόμενη παράγραφο.

```
Δείκτης:      EuthiKin (1,0,93,105,25);
Μέσος:       EuthiKin (2,0,92,110,15);
Παράμεσος:  EuthiKin (3,0,90,110,25);
Μικρός:     EuthiKin (4,0,95,108,5);
Αντίχειρας:  EuthiKin (5,270,25,60,40);
```



Εικόνα 4.2.1.α Εικονική αναπαράσταση χειρονομίας Κλειστή Παλάμη στο Matlab

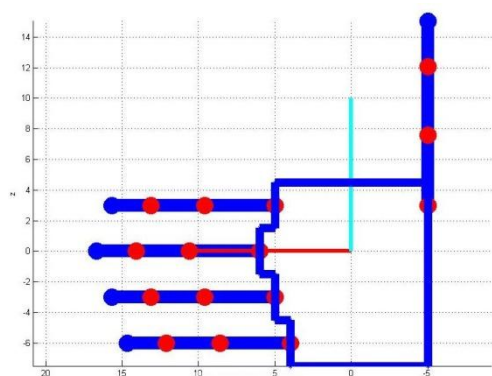


Εικόνα 4.2.1.β Χειρονομία Κλειστή Παλάμη με το ρομποτικό χέρι

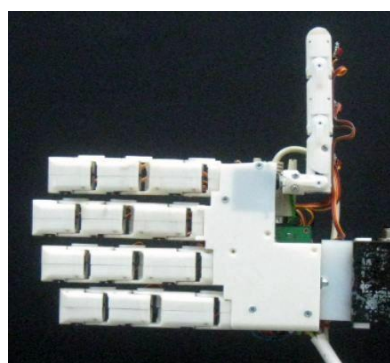
Ανοιχτή Παλάμη: είναι μια χειρονομία στην οποία όλα τα δάχτυλα βρίσκονται σε πλήρη έκταση ως προς το μετωπιαίο επίπεδο.

Δάχτυλο	q₁	q₂	q₃	q₄
Δείκτης	0	0	0	0
Μέσος	0	0	0	0
Παράμεσος	0	0	0	0
Μικρός	0	0	0	0
Αντίχειρας	270	0	0	0

Πίνακας 4.2.1 Γωνίες των αρθρώσεων για την χειρονομία Ανοιχτή Παλάμη



Εικόνα 4.2.2.α Εικονική αναπαράσταση χειρονομίας Ανοιχτή Παλάμη στο Matlab

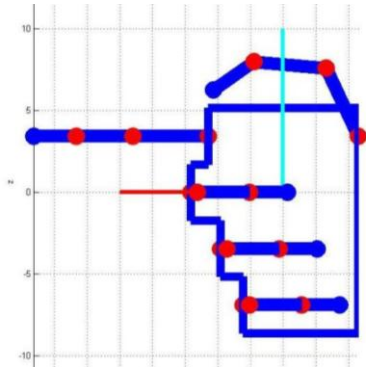


Εικόνα 4.2.2.β Χειρονομία Ανοιχτή Παλάμη με το ρομποτικό χέρι

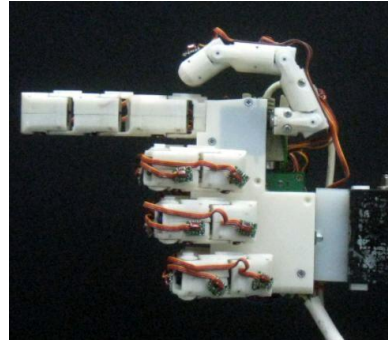
Point: είναι μια χειρονομία στην οποία ο δείκτης βρίσκεται σε πλήρη έκταση ως προς το μετωπιαίο επίπεδο ενώ όλα τα υπόλοιπα δάχτυλα βρίσκονται σε κάμψη ως προς αυτό.

Δάχτυλο	q₁	q₂	q₃	q₄
Δείκτης	0	0	0	0
Μέσος	0	95	110	0
Παράμεσος	0	95	110	0
Μικρός	0	95	110	0
Αντίχειρας	270	25	60	40

Πίνακας 4.2.2 Γωνίες των αρθρώσεων για την χειρονομία Point.



Εικόνα 4.2.3.α Εικονική αναπαράσταση χειρονομίας Point στο Matlab

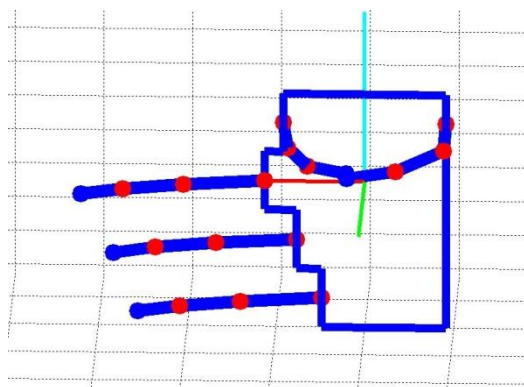


Εικόνα 4.2.3.β Χειρονομία Point με το ρομποτικό χέρι

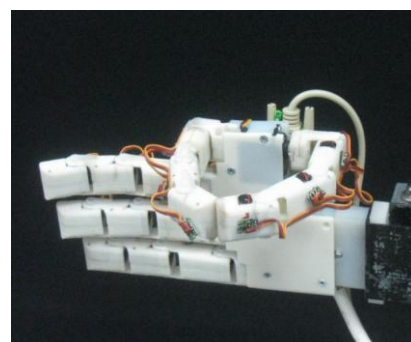
OK : είναι μια χειρονομία στην οποία ο δείκτης και ο αντίχειρας εφάπτονται μεταξύ τους στο οβελιαίο επίπεδο ενώ όλα τα υπόλοιπα δάχτυλα είναι σε πλήρη ή μερική έκταση

Δάχτυλο	q_1	q_2	q_3	q_4
Δείκτης	0	95	15	40
Μέσος	0	10	5	10
Παράμεσος	0	10	5	10
Μικρός	0	10	5	10
Αντίχειρας	179	0	35	30

Πίνακας 4.2.3 Γωνίες των αρθρώσεων για την χειρονομία OK.



Εικόνα 4.2.4.α Εικονική αναπαράσταση χειρονομίας OK στο Matlab

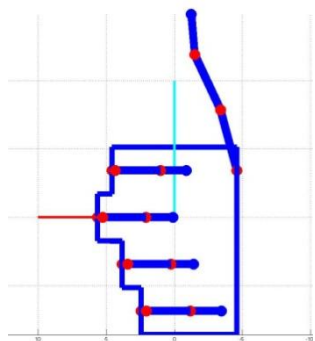


Εικόνα 4.2.4.β Χειρονομία OK με το ρομποτικό χέρι

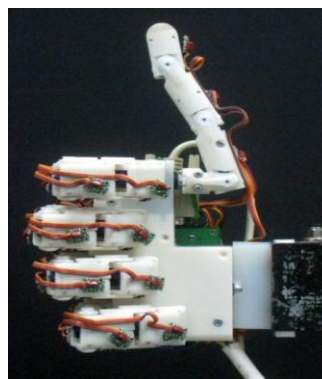
Like: είναι μια χειρονομία στην οποία ο αντίχειρας βρίσκεται σε μερική έκταση ως προς το οβελιαίο επίπεδο, ενώ τα υπόλοιπα δάχτυλα είναι σε πλήρη κάμψη στο μετωπιαίο επίπεδο.

Δάχτυλο	q_1	q_2	q_3	q_4
Δείκτης	0	93	105	25
Μέσος	0	95	110	15
Παράμεσος	0	95	110	25
Μικρός	0	95	108	5
Αντίχειρας	270	15	10	20

Πίνακας 4.2.4 Γωνίες των αρθρώσεων για την χειρονομία Like.



Εικόνα 4.2.5.α Εικονική αναπαράσταση χειρονομίας Like στο Matlab

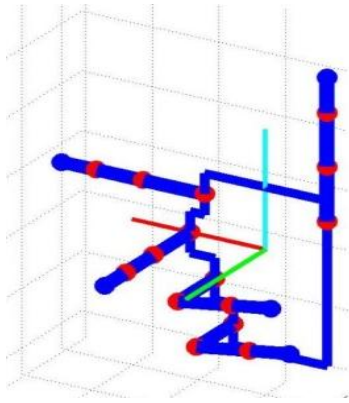


Εικόνα 4.2.5.β Χειρονομία Like με το ρομποτικό χέρι

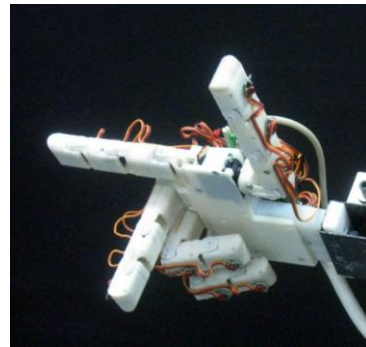
Άξονες X-Y-Z : είναι μια χειρονομία στην οποία ο αντίχειρας είναι σε πλήρη έκταση ως προς το οβελιαίο επίπεδο, ό μέσος είναι σε έκταση ως προς το μετωπιαίο επίπεδο, ο δείκτης είναι σε έκταση κάθετος όμως στο μετωπιαίο επίπεδο και ο παράμεσος και μικρός είναι σε πλήρη κάμψη

Δάχτυλο	q_1	q_2	q_3	q_4
Δείκτης	0	0	0	0
Μέσος	0	90	0	0
Παράμεσος	0	90	110	0
Μικρός	0	90	110	5
Αντίχειρας	270	0	0	0

Πίνακας 4.2.5 Γωνίες των αρθρώσεων για την χειρονομία Άξονες X-Y-Z.



Εικόνα 4.2.6.α Εικονική αναπαράσταση χειρονομίας X-Y-Z στο Matlab

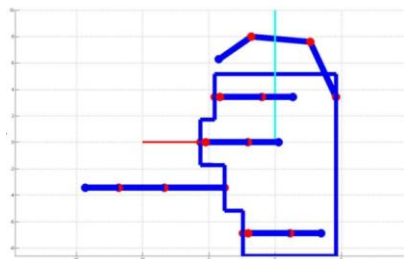


Εικόνα 4.2.6.β Χειρονομία X-Y-Z με το ρομποτικό χέρι

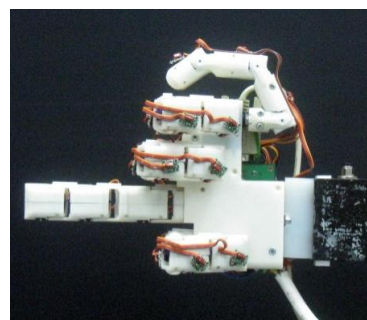
Έκταση Παράμεσου : είναι μια χειρονομία στην οποία ο παράμεσος είναι σε έκταση ενώ όλα τα υπόλοιπα δάχτυλα και ο αντίχειρας είναι σε κάμψη

Δάχτυλο	q_1	q_2	q_3	q_4
Δείκτης	0	95	110	0
Μέσος	0	95	110	0
Παράμεσος	0	0	0	0
Μικρός	0	95	110	0
Αντίχειρας	270	25	60	40

Πίνακας 4.2.6 Γωνίες των αρθρώσεων για την χειρονομία Έκταση Παράμεσου.



Εικόνα 4.2.7.α Εικονική αναπαράσταση χειρονομίας Έκταση παράμεσου στο Matlab

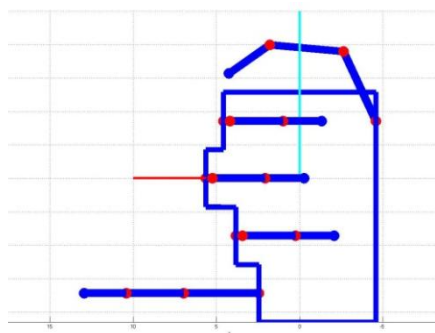


Εικόνα 4.2.7.β Χειρονομία Έκταση Παράμεσου με το ρομποτικό χέρι

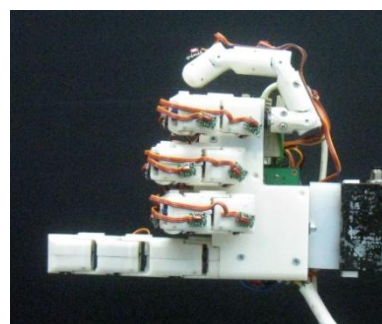
Έκταση Μικρού : είναι μια αυθόρμητη χειρονομία στην οποία ο μικρός είναι σε έκταση ενώ τα υπόλοιπα δάχτυλα και ο αντίχειρας είναι σε κάμψη

Δάχτυλο	q_1	q_2	q_3	q_4
Δείκτης	0	95	110	0
Μέσος	0	95	110	0
Παράμεσος	0	95	110	0
Μικρός	0	0	0	0
Αντίχειρας	270	25	60	40

Πίνακας 4.2.7 Γωνίες των αρθρώσεων για την χειρονομία Έκταση Μικρού.



Εικόνα 4.2.8.α Εικονική αναπαράσταση χειρονομίας Έκταση Μικρού στο Matlab

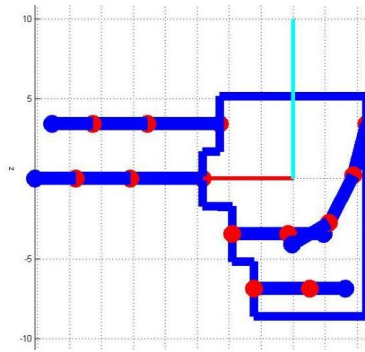


Εικόνα 4.2.8.β Χειρονομία Έκταση Μικρού με το ρομποτικό χέρι

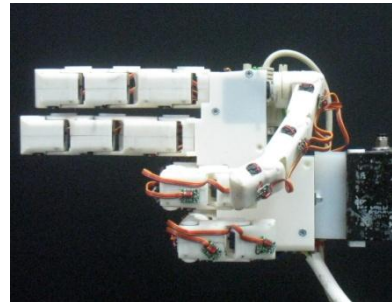
Έκταση Δείκτη-Μέσου : είναι μια χειρονομία στην οποία ο δείκτης και ο μέσος είναι σε έκταση ενώ ο αντίχειρας και τα υπόλοιπα δάχτυλα είναι σε κάμψη

Δάχτυλο	q_1	q_2	q_3	q_4
Δείκτης	0	0	0	0
Μέσος	0	0	0	0
Παράμεσος	0	90	90	30
Μικρός	0	90	90	30
Αντίχειρας	135	10	10	30

Πίνακας 4.2.8 Γωνίες των αρθρώσεων για την χειρονομία Έκταση Μικρού.



Εικόνα 4.2.9.α Εικονική αναπαράσταση χειρονομίας Έκταση Δείκτη-Μέσου στο Matlab

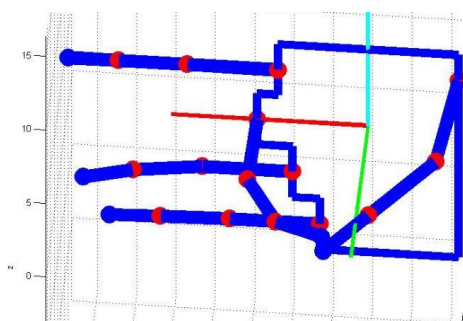


Εικόνα 4.2.9.β Χειρονομία Έκταση Δείκτη-Μέσου με το ρομποτικό χέρι

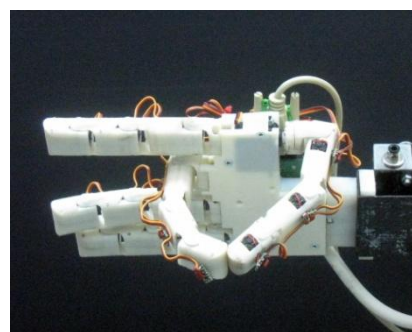
Επαφή Αντίχειρα-Μέσου : είναι μια χειρονομία στην οποία ο αντίχειρας και ο μέσος είναι σε κάμψη και εφάπτονται μεταξύ τους, ενώ τα υπόλοιπα δάχτυλα είναι σε πλήρη ή μερική έκταση

Δάχτυλο	q_1	q_2	q_3	q_4
Δείκτης	0	0	0	0
Μέσος	0	89	30	40
Παράμεσος	0	0	9	8
Μικρός	0	0	0	0
Αντίχειρας	155	10	35	0

Πίνακας 4.2.9 Γωνίες των αρθρώσεων για την χειρονομία Επαφή Αντίχειρα- Μέσου.



Εικόνα 4.2.10.α Εικονική αναπαράσταση χειρονομίας Επαφή Αντίχειρα-Μέσου στο Matlab

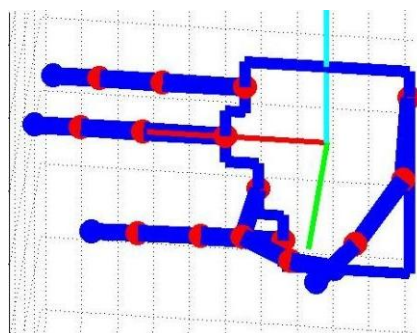


Εικόνα 4.2.10.β Χειρονομία Επαφή Αντίχειρα-Μέσου με το ρομποτικό χέρι

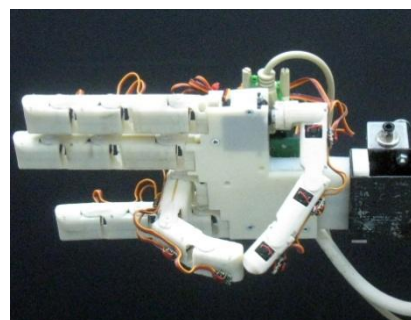
Επαφή Αντίχειρα-Παράμεσου : είναι μια χειρονομία στην οποία ο αντίχειρας και ο παράμεσος είναι σε κάμψη και εφάπτονται μεταξύ τους, ενώ τα υπόλοιπα δάχτυλα είναι σε πλήρη ή μερική έκταση

Δάχτυλο	q_1	q_2	q_3	q_4
Δείκτης	0	0	0	0
Μέσος	0	0	0	0
Παράμεσος	0	85	60	25
Μικρός	0	0	0	0
Αντίχειρας	135	0	32	10

Πίνακας 4.2.10 Γωνίες των αρθρώσεων για την χειρονομία Επαφή Αντίχειρα- Παράμεσου.



Εικόνα 4.2.11.α Εικονική αναπαράσταση χειρονομίας Επαφή Αντίχειρα-Παράμεσου στο Matlab



Εικόνα 4.2.11.β Χειρονομία Επαφή Αντίχειρα-Παράμεσου με το ρομποτικό χέρι

4.3 Λαβές που επιτεύχθηκαν με το ρομποτικό χέρι

Ο άνθρωπος καθημερινά χειρίζεται διάφορα αντικείμενα και εργαλεία για να πραγματοποιήσει διάφορες εργασίες. Τα αντικείμενα αυτά μπορούν να έχουν από πολύ απλό μέχρι πολύ σύνθετο σχήμα. Για να τα χειριστεί σωστά θα πρέπει να κάνει και την ανάλογη λαβή με την βοήθεια των δαχτύλων, του αντίχειρα του αλλά και της παλάμης του. Όταν λυγίζουν όλα τα δάχτυλα και ο αντίχειρας και με την βοήθεια της παλάμης λέμε ότι το

χέρι κάνει μια **περιβάλλουσα λαβή**. Συγκεκριμένα με τον όρο αυτό εννοούμε όταν γίνεται σταθερή συγκρότηση αντικειμένων όταν επιβάλλονται εξωτερικές διαταραχές από το περιβάλλον στο αντικείμενο.

Όταν έχουμε την συντονισμένη κίνηση των δαχτύλων για την λαβή ενός αντικειμένου, τότε λέμε ότι το χέρι κάνει μια **ευσταθής λαβή**. Η λαβή αυτή μπορεί να επιτευχθεί είτε στο αρχικό σημείο επαφής των δύο δαχτύλων, είτε σε γειτονικές και προεπιλεγμένες θέσεις με τα δάχτυλα να κυλούν ή να ολισθαίνουν πάνω στην επιφάνεια επαφής του αντικειμένου.

Το ρομποτικό χέρι έχοντας τέσσερα δάχτυλα, αντίχειρα και παλάμη είναι ικανό να κάνει και περιβάλλουσες αλλά και ευσταθής λαβές. Παρακάτω θα δούμε τις διάφορες αυτές λαβές που έγιναν με την βοήθεια του λογισμικού Matlab χρησιμοποιώντας την συνάρτηση του ευθύ κινηματικού που κάναμε και τις χειρονομίες. Σημαντικό είναι να ειπωθεί ότι επειδή το ρομποτικό χέρι δεν έχει αισθητήρια και δεν μπορεί να εντοπίσει την θέση του αντικειμένου που θέλει να πιάσει, το τοποθετούμε εμείς σε συγκεκριμένο σημείο μπροστά από την παλάμη του.

Οι λαβές που θα παρουσιαστούν είναι: **Ευσταθής λαβή χάρτινου κουτιού, Ευσταθής λαβή κάρτας με δείκτη και αντίχειρα, Περιβάλλουσα λαβή άδειου μπουκαλιού, Ευσταθής λαβή ενός πινέλου, Περιβάλλουσα λαβή πλαστικού ποτηριού με υγρό, Περιβάλλουσα λαβή ενός πιστολιού σιλικόνης, ευσταθής λαβή με σφαίρα από αφρώδες πλαστικό.**

Ευσταθής λαβή χάρτινου κουτιού : η λαβή αυτή επιτυγχάνετε με τον αντίχειρα να αγκαλιάζει το χάρτινο κουτί ενώ τα υπόλοιπα δάχτυλα το πιέζουν προς αυτόν. Η παλάμη δεν συμμετέχει σε αυτή την λαβή.

Δάχτυλο	q_1	q_2	q_3	q_4
Δείκτης	0	10	100	5
Μέσος	0	12	105	35
Παράμεσος	0	12	97	30
Μικρός	0	5	95	8
Αντίχειρας	180	5	5	85

Πίνακας 4.3.1 Γωνίες των αρθρώσεων για την ευσταθή λαβή ενός χάρτινου κουτιού.

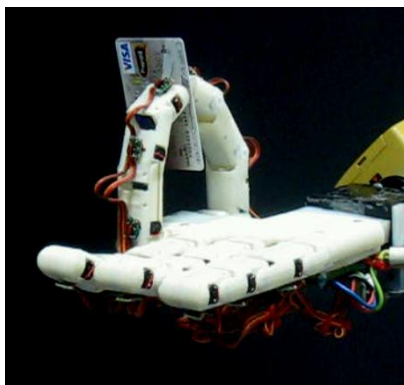


Εικόνα 4.3.1 Ευσταθής λαβή
χάρτινου κουτιού

Ευσταθής λαβή κάρτας με δείκτη και αντίχειρα : η λαβή αυτή επιτυγχάνετε με τον δείκτη και τον αντίχειρα να λυγίζουν προς την κάρτα

Δάχτυλο	q_1	q_2	q_3	q_4
Δείκτης	0	95	15	40
Μέσος	0	10	5	10
Παράμεσος	0	10	5	10
Μικρός	0	10	5	10
Αντίχειρας	179	0	35	30

Πίνακας 4.3.2 Γωνίες των αρθρώσεων για την ευσταθή λαβή μιας κάρτας με τον δείκτη και τον αντίχειρα.



Εικόνα 4.3.2 Ευσταθής λαβή κάρτας

Περιβάλλουσα λαβή άδειου μπουκαλιού : η λαβή αυτή επιτυγχάνετε με όλα τα δάχτυλα, τον αντίχειρα αλλά και την βοήθεια της παλάμης

Δάχτυλο	q_1	q_2	q_3	q_4
Δείκτης	0	63	45	30
Μέσος	0	75	45	15
Παράμεσος	0	75	30	40
Μικρός	0	60	40	40
Αντίχειρας	180	2	3	77

Πίνακας 4.3.3 Γωνίες των αρθρώσεων για την περιβάλλουσα λαβή ενός άδειου μπουκαλιού.

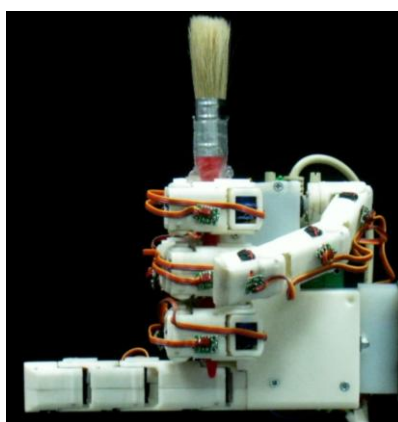


Εικόνα 4.3.3 Περιβάλλουσα λαβή μπουκαλιού

Ευσταθής λαβή ενός πινέλου: η λαβή αυτή επιτυγχάνεται με την βοήθεια του δείκτη, μέσου και παράμεσου ενώ ο αντίχειρας έρχεται βοηθητικά από πάνω τους.

Δάχτυλο	q_1	q_2	q_3	q_4
Δείκτης	0	80	108	98
Μέσος	0	95	95	90
Παράμεσος	0	86	98	100
Μικρός	0	80	90	95
Αντίχειρας	150	20	30	15

Πίνακας 4.3.4 Γωνίες των αρθρώσεων για την ευσταθή λαβή ενός πινέλου.

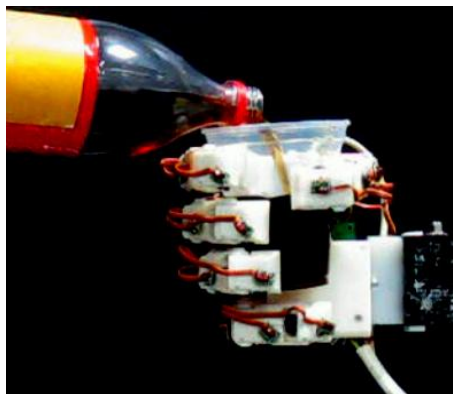


Εικόνα 4.3.4 Ευσταθής λαβή με πινέλο

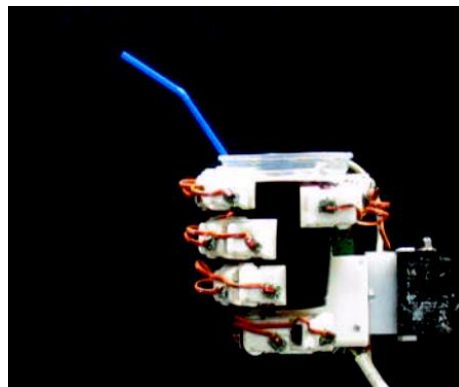
Περιβάλλουσα λαβή πλαστικού ποτηριού με υγρό : η λαβή αυτή επιτυγχάνεται με τον δείκτη, μέσο, παράμεσο και τον αντίχειρα να “αγκαλιάζουν” το ποτήρι. Αυτό επιτυγχάνεται όμως και με την βοήθεια της παλάμης.

Δάχτυλο	q_1	q_2	q_3	q_4
Δείκτης	0	63	45	45
Μέσος	0	83	47	35
Παράμεσος	0	85	35	68
Μικρός	0	90	90	40
Αντίχειρας	170	15	3	70

Πίνακας 4.3.5 Γωνίες των αρθρώσεων για την περιβάλλουσα λαβή ενός πλαστικού ποτηριού με υγρό.



Εικόνα 4.3.5.α Περιβάλλουσα λαβή ποτηριού το οποίο γεμίζεται με υγρό.

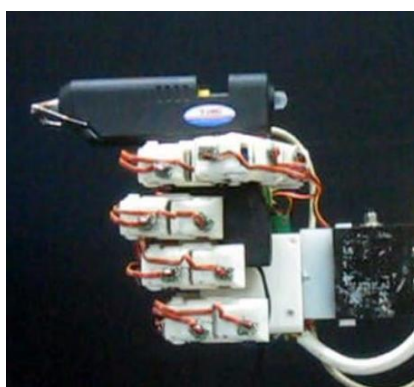


Εικόνα 4.3.5.β Περιβάλλουσα λαβή ποτηριού γεμάτο με υγρό.

Περιβάλλουσα λαβή ενός πιστολιού σιλικόνης : στην λαβή αυτή συνεισφέρουν ο δείκτης, ο μέσος , ο παράμεσος και ο αντίχειρας που περιβάλλουν την λαβή του πιστολιού σιλικόνης. Η παλάμη επίσης βοηθάει στην λαβή αυτή καθώς το πιστόλι αγγίζει πάνω της.

Δάχτυλο	q_1	q_2	q_3	q_4
Δείκτης	0	90	80	20
Μέσος	0	90	90	0
Παράμεσος	0	10	5	10
Μικρός	0	95	82	0
Αντίχειρας	270	-15	0	0

Πίνακας 4.3.6 Γωνίες των αρθρώσεων για την περιβάλλουσα λαβή ενός πιστολιού σιλικόνης.

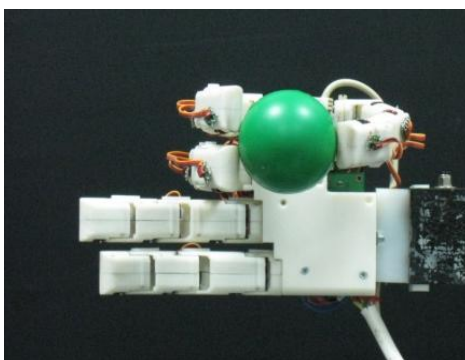


Εικόνα 4.3.6 Περιβάλλουσα λαβή με πιστόλι σιλικόνης

Ευσταθής λαβή με σφαίρα από αφρώδες πλαστικό : στην λαβή αυτή συνεισφέρουν ο αντίχειρας, ο δείκτης και ο μέσος. Και τα τρία δάχτυλα έχουν την δυνατότητα να ολισθαίνουν και να κυλινδρουν πάνω στην επιφάνεια της σφαίρας.

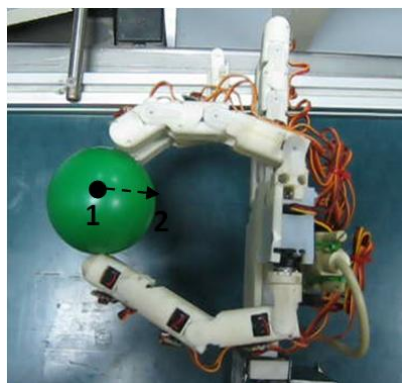
Δάχτυλο	q_1	q_2	q_3	q_4
Δείκτης	0	75	15	40
Μέσος	0	80	25	30
Παράμεσος	0	10	5	10
Μικρός	0	10	5	10
Αντίχειρας	167	-10	35	30

Πίνακας 4.3.7 Γωνίες των αρθρώσεων για την ευσταθή λαβή μιας σφαίρας από αφρώδες πλαστικό.

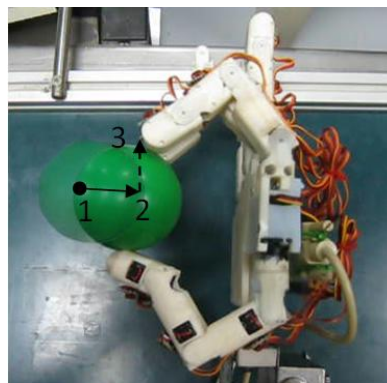


Εικόνα 4.3.7 Ευσταθής λαβή με σφαίρα

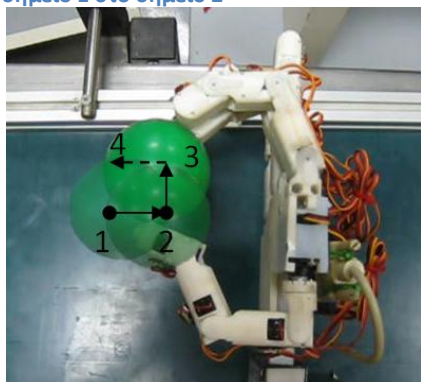
Για την λαβή αυτή επίσης χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση του αντίστροφου κινηματικού $AntiKin(j, x, y, z, f_1)$ που είδαμε και στο κεφάλαιο 2. Στόχος μας είναι, το ρομποτικό χέρι καθώς κρατάει με τον δείκτη, μέσο και τον αντίχειρα ένα μπαλάκι, να καταφέρει να το μετακινήσει σε μία τροχιά που αντιστοιχεί σε ένα τετράγωνο (Εικ. 4.3.8.α-β-γ-δ). Εφόσον θέλουμε το μπαλάκι να κινηθεί σε ένα τετράγωνο, αυτό σημαίνει ότι το ίδιο κάνει και το κάθε δάχτυλο που το κρατάει.



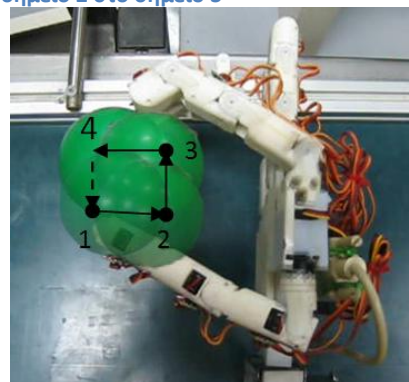
Εικόνα 4.3.8.α μετακίνηση της σφαίρας από το σημείο 1 στο σημείο 2



Εικόνα 4.3.8.β μετακίνηση της σφαίρας από το σημείο 2 στο σημείο 3



Εικόνα 4.3.8.γ μετακίνηση της σφαίρας από το σημείο 3 στο σημείο 4



Εικόνα 4.3.8.δ μετακίνηση της σφαίρας από το σημείο 4 στο αρχικό σημείο 1

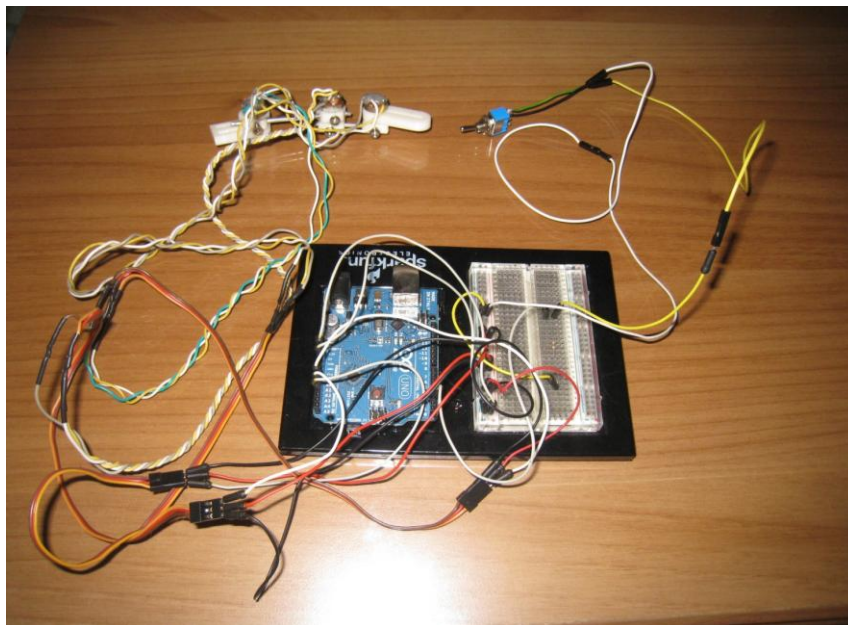
Αφού τα δάχτυλα πιάσουν την σφαίρα στο σημείο 1, θέλουμε να διανύσουν την απόσταση 1-2 (Εικ.4.3.8.α). Η απόσταση αυτή έχει χωριστεί σε υποτμήματα που το καθένα είναι 0.2cm. Για κάθε ένα από αυτά τα υποτμήματα, λύνεται το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα και βλέπουμε που βρίσκονται οι αρθρώσεις σε κάθε σημείο της τροχιάς που διανύουν. Το ίδιο ακριβώς γίνεται και για τις αποστάσεις 2-3, 3-4 και 4-1.

Έτσι λοιπόν με την βοήθεια των συναρτήσεων για το ευθύ αλλά και το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα έγιναν με επιτυχία διάφορες λαβές με το ρομποτικό χέρι.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΔΑΧΤΥΛΑ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ARDUINO

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα δούμε τον τρόπο με τον οποίο έγινε η συλλογή δεδομένων από πραγματικά δάχτυλα με το Arduino, μια κατασκευή με ποτενσιόμετρα (Εικ. 5.1.1) και την βοήθεια των προγραμμάτων του Arduino και του Matlab.



Εικόνα 5.1.1 Η κατασκευή με τα ποτενσιόμετρα συνδεδεμένη με το Arduino

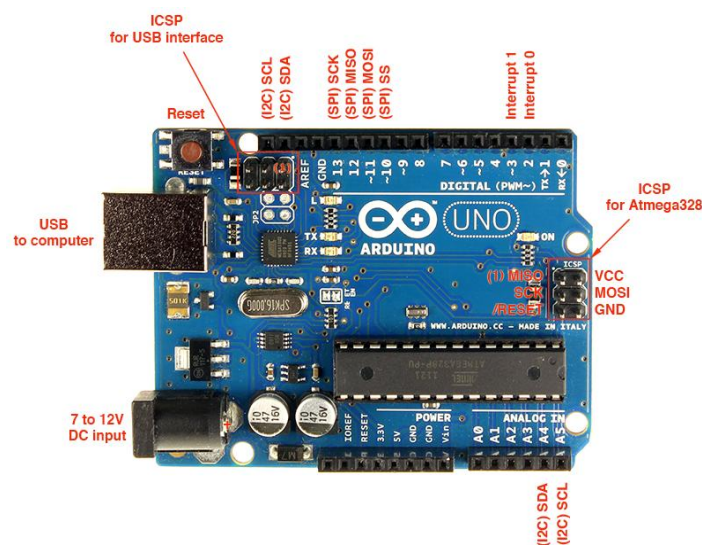
5.2 Ο μικροεπεξεργαστής Arduino

Το Arduino [10] είναι μια υπολογιστική πλατφόρμα βασισμένη σε μια απλή μητρική πλακέτα με ενσωματωμένο μικροελεγκτή και εισόδους/εξόδους, η οποία μπορεί να προγραμματιστεί με τη γλώσσα Wiring (ουσιαστικά πρόκειται για τη C++ με κάποιες μετατροπές). Τα Arduino που κυκλοφορούν σήμερα στην αγορά, προγραμματίζονται μέσω USB, εφαρμόζοντας ένα τσιπ προσαρμογέα USB-to-serial.

Η πλακέτα του Arduino έχει εκτεθειμένες τις περισσότερες επαφές εισόδου/εξόδου για χρήση με άλλα κυκλώματα. Επίσης αποτελείται από έναν μικροεπεξεργαστή ανοικτού κώδικα στον οποίο μπορεί κανείς να προγραμματίσει ακόμη κι αν είναι αρχάριος μέσω του δικού του δωρεάν λογισμικού προγράμματος .

Συγκεκριμένα το Arduino Uno που χρησιμοποιείται σε αυτή την εργασία παρέχει 6 αναλογικές εισόδους, 14 ψηφιακές επαφές εισόδου/εξόδου, από τις οποίες οι 6 μπορούν να παράγουν σήματα PWM. Αυτές οι επαφές είναι διαθέσιμες στο πάνω μέρος της πλακέτας όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.2.1.

Συνδέοντας το Arduino μέσω σειριακής θύρας με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή, μπορούμε να επικοινωνήσουμε μαζί του μέσω του λογισμικού του με εντολές. Ανοίγοντας το πρόγραμμα, πρέπει να γίνουν κάποιες ρυθμίσεις πρώτα για την επικοινωνία μεταξύ τους. Πηγαίνουμε στο Tools και από εκεί στο 'Board' όπου ανοίγει μια κατηγορία με όλα τα Arduino της αγοράς και επιλέγουμε αυτό που χρησιμοποιούμε, το Arduino UNO. Στην συνέχεια πηγαίνοντας στο 'Serial Port' και επιλέγουμε την σειριακή θύρα που έχει συνδεθεί το Arduino με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή.



Εικόνα 5.2.1 Το Arduino Uno που χρησιμοποιήθηκε.

5.3 Η κατασκευή

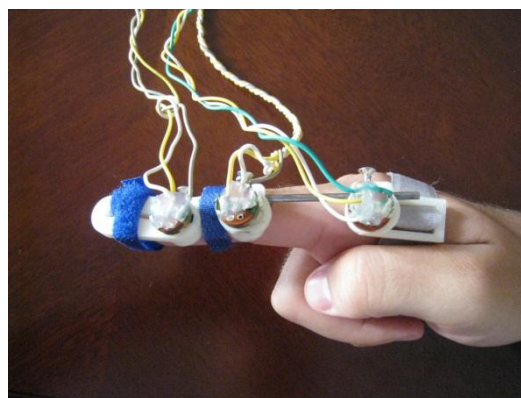
Τα κομμάτια της κατασκευής πάνω στα οποία τοποθετήθηκαν τα ποτενσιόμετρα σχεδιάστηκαν στο πρόγραμμα Creo Elements/Pro και στην συνέχεια κατασκευάστηκαν σε μηχανή ταχείας μοντελοποίησης (3D printer). Η σύνδεση μεταξύ των κομματιών έγινε με δύο μεταλλικούς άξονες διαμέτρου 2.5mm, οι οποίοι μας δίνουν την δυνατότητα να αλλάξουμε το μέγεθος του συνδέσμου ανάλογα με το μέγεθος του δείκτη. Για να σταματήσει σε επιθυμητό σημείο ο κάθε μεταλλικός άξονας, χρησιμοποιήθηκαν κάποιες βίδες οι οποίες τον μαγκώνουν μέσα στο κομμάτι από το οποίο περνάει (Εικ. 5.3.1).

Τα ποτενσιόμετρα είναι τοποθετημένα πάνω στα κομμάτια τα οποία προσαρμόζονται σε κάθε μία από τις τρεις αρθρώσεις του δείκτη (Εικ. 5.3.2). Σε κάθε ένα από τα ποτενσιόμετρα έχουν συγκολληθεί, τρία καλώδια ένα σε κάθε “ποδαράκι” του. Τα τρία αυτά καλώδια από το ποτενσιόμετρο οδηγούν στο επιθυμητό (analog input), στην γείωση (Gnd) και στο power (5V) του Arduino (Εικ. 5.3.3)

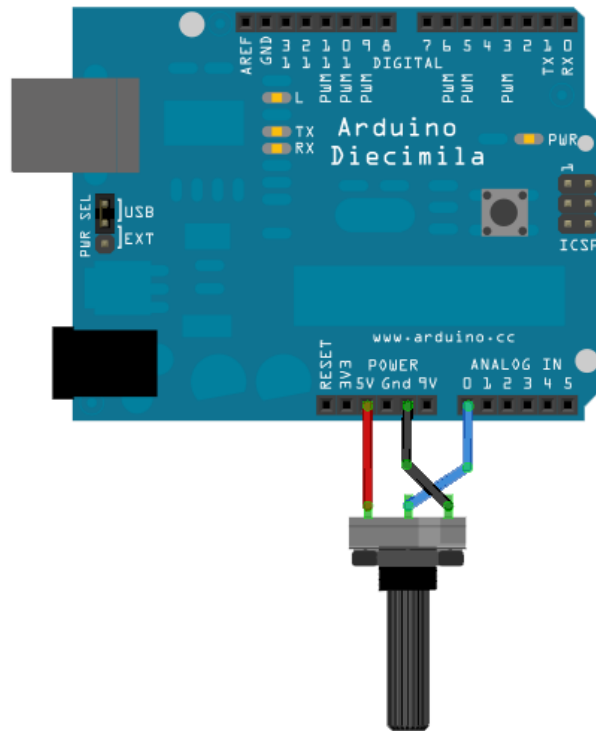
Στην κατασκευή όμως χρησιμοποιείται και ένας διακόπτης έτσι ώστε να παίρνουμε τιμές για όσο θέλουμε εμείς, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με μια αντίσταση των 10 KΩ, για τον έλεγχο της ροής του ρεύματος. Η συνδεσμολογία του διακόπτη με το Arduino γίνεται όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.3.4 .



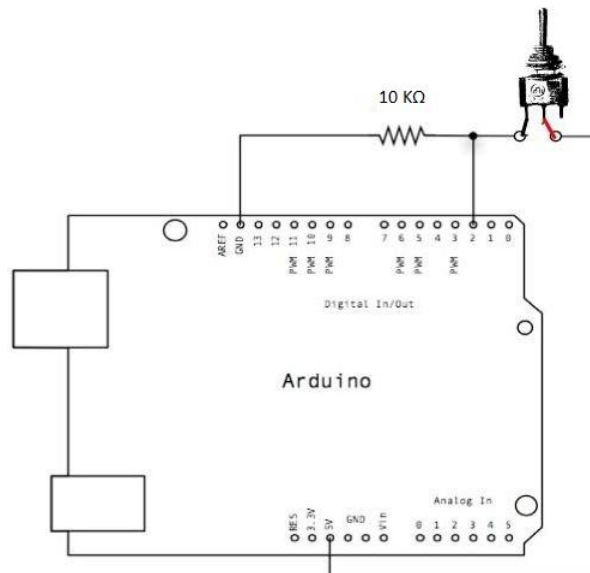
Εικόνα 5.3.1 Τα μέρη που αποτελούν την κατασκευή



Εικόνα 5.3.2 Η κατασκευή τοποθετημένη πάνω στον δείκτη



Εικόνα 5.3.3 Η σύνδεση ενός ποτενσιόμετρου με το Arduino



Εικόνα 5.3.4 Η σύνδεση του διακόπτη με το Arduino

5.4 Το πρόγραμμα και η συλλογή δεδομένων

Η βασική δομή για ένα πρόγραμμα στο Arduino είναι σχετικά απλή και έχει ως εξής:

```
<δήλωση μεταβλητών>
void setup()
{
  <δήλωση λειτουργιών που ισχύουν για όλο το πρόγραμμα>
}
void loop()
{
  <δήλωση λειτουργιών που επαναλαμβάνονται κατά τη λειτουργία
του προγράμματος>
}
```

Σύμφωνα με αυτή την δομή γίνεται και το δικό μας πρόγραμμα για την καταγραφή των τιμών από πραγματικά δάχτυλα. Στην αρχή του προγράμματος ορίζονται οι μεταβλητές, έτσι το κάθε ποτενσιόμετρο δηλώνεται με τις ονομασίες pot1, pot2, pot3 που αντιστοιχούν σε κάθε ένα από τα ποτενσιόμετρα αντίστοιχα για την κάθε άρθρωση ξεκινώντας από την μετακαρποφαλαγγική άρθρωση, δηλαδή την άρθρωση που είναι πιο κοντά στην παλάμη. Αυτό γίνεται με την εντολή δήλωσης μεταβλητής "int" ως εξής :

```
int pot1 = 0;
int pot2 = 0;
int pot3 = 0;
```

Με τον ίδιο τρόπο δηλώνεται και ο διακόπτης που συνδέεται σε ψηφιακή είσοδο. Έστω ότι θέλουμε να τον συνδέσουμε στην ψηφιακή είσοδο 2, τότε έχουμε

```
int diakopths = 2;
```

Η συνάρτηση void setup() τρέχει μία φορά, κάθε φορά που τρέχει το πρόγραμμα και σε αυτήν δηλώνονται οι λειτουργίες που ισχύουν για το πρόγραμμα. Εδώ λοιπόν δηλώνετε το BaudRate για την σειριακή επικοινωνία το οποίο μας ενδιαφέρει ώστε να μπορούμε να συνδεθούμε με το Arduino. Έχουμε λοιπόν :

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

Στην συνέχεια ακολουθεί η συνάρτηση `void loop()` η οποία θα τρέχει όσο το πρόγραμμα είναι σε λειτουργία και έτσι έχει την δυνατότητα να αλλάζει και να ανταποκρίνεται συγχρόνως. Ουσιαστικά ο κώδικας μέσα σε αυτή την συνάρτηση, χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της πλακέτας του Arduino. Εδώ διαβάζεται η τάση του διακόπτη που έχει συνδεθεί ως `input (pinMode (diakopths, INPUT);` και αυτό γίνεται με την εντολή `digitalRead`. Συγκεκριμένα έχουμε `val = digitalRead (diakopths)` που μας επιτρέπει να βλέπουμε πότε είναι ανοιχτός ή κλειστός.

Επίσης σε αυτή την συνάρτηση με την εντολή (`analogRead ()`) διαβάζονται οι τιμές (`input`) των ποτενσιομέτρων που είναι συνδεδεμένα σε αναλογικά `pin`. Τα αναλογικά `pin` παίρνουν τιμές 8bit (1024 βαθμίδες), δηλαδή από 0-1023 που αντιστοιχούν σε τάση, όπου 0 αντιστοιχεί σε 0V και 1023 σε 5V. Συγκεκριμένα όταν γυρίσουμε το ποτενσιόμετρο από την μία μεριά περνάνε 0V και τότε καταγράφεται στο πρόγραμμα η τιμή μηδέν και όταν το γυρίσουμε από την άλλη μεριά περνάνε 5V και δίνεται η τιμή 1023. Οι τιμές αυτές καταγράφονται στο Serial Monitor με την εντολή `Serial.println()`. Επιπλέον μπορεί να καθοριστεί ο χρόνος με τον οποίο παίρνουμε όλα τα αποτελέσματα με το `delay()` σε ms. Έχουμε λοιπόν

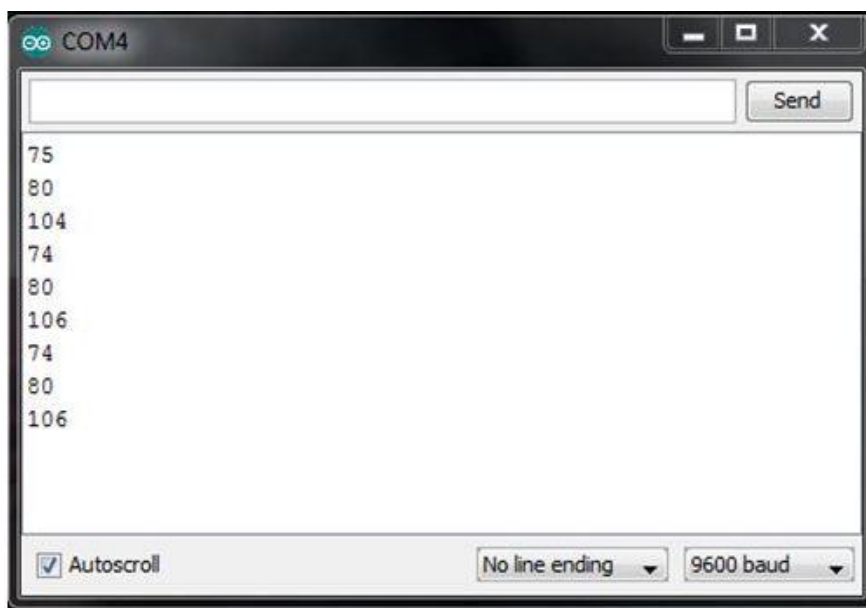
```
void loop ()
{
  val = digitalRead (diakopths);
  pinMode (diakopths, INPUT);
  if (val == HIGH)
  {

    pot1 = analogRead (A0);
    pot2 = analogRead (A1);
    pot3 = analogRead (A2);

    Serial.println (pot1);
    Serial.println (pot2);
    Serial.println (pot3);

    delay (1500);
  }
  pot3 = analogRead (A2);
```

Μερικές τυχαίες τιμές που λήφθηκαν με την κατασκευή που εφαρμόζεται πάνω στο δάχτυλο, φαίνονται παρακάτω, όπως αυτές εμφανίστηκαν στο Serial Monitor του προγράμματος του (Εικ. 5.4.1). Οι τρεις πρώτες τιμές αντιστοιχούν σε κάθε μία από τις τρεις αρθρώσεις της κατασκευής και έπειτα κάθε 1.5sec παίρνουμε νέες τιμές που γράφονται από κάτω.



Εικόνα 5.4.1 Καταγραφή τιμών των ποτενσιομέτρων στο Serial Monitor

5.5 Η σύνδεση του Arduino με το λογισμικό Matlab

Στην συνέχεια θα δείξουμε πως μπορεί να γίνει η σύνδεση μεταξύ του Arduino και του λογισμικού του Matlab. Αυτό γίνεται μέσω του παρακάτω κώδικα του Matlab που θα το συνδέσει με την σειριακή θύρα του υπολογιστή που είναι συνδεδεμένο το Arduino. Έστω ότι η σειριακή αυτή θύρα είναι η COM4 έχουμε

```
s1 = serial ('COM4');  
s1.BaudRate = 9600;  
fopen(s)
```

Με το 's1' δηλώνουμε την σειριακή θύρα που είναι συνδεδεμένο το Arduino, εδώ είναι η COM 4. Επίσης δηλώνεται το BaudRate, δηλαδή η ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων, στο

οποίο δίνεται η τιμή 9600 και θα πρέπει να είναι η ίδια με αυτή που έχουμε δώσει στο Arduino. Έπειτα γίνεται το άνοιγμα της σειριακής θύρας με την εντολή `fopen(s1)`.

Αφού γίνει η σύνδεση μεταξύ Arduino και Matlab, θέλουμε τις αναλογικές τιμές που διαβάζει το Arduino να τις διαβάσει και το Matlab. Αυτό επιτυγχάνετε με την εντολή `fscanf()` η οποία διαβάζει τις πληροφορίες από την συσκευή που είναι συνδεδεμένη στην σειριακή θύρα και επιστρέφει την τιμή στην οθόνη του προγράμματος σε ακέραη μορφή (%d). Έτσι συγκεκριμένα για τα τρία ποτενσιόμετρα έχουμε :

```
pot1 = fscanf (s1, '%d');
pot2 = fscanf (s1, '%d');
pot3 = fscanf (s1, '%d');
```

Για να πάρουμε όμως τις κανονικές τιμές σε μοίρες πρέπει να γίνουν πρώτα κάποιες πράξεις με το καλιμπράρισμα των ποτενσιόμετρων με πειραματικό τρόπο. Αυτό γίνεται ως εξής :

Με την συσκευή τοποθετημένη πάνω στον δείκτη μας, λυγίζοντας την πρώτη άρθρωση στις 0° , καταγράφουμε τις βαθμίδες που αντιστοιχούν εκεί (π.χ. $\alpha=130$) και στην συνέχεια κάνουμε το ίδιο για τις 180° (π.χ. $\beta=950$). Έτσι για οποιαδήποτε γωνία q_i επιθυμούμε μπορούμε να ακολουθήσουμε τον παρακάτω μαθηματικό τύπο για να βρούμε το κατάλληλο μέγεθος βαθμίδας ώστε να δοθεί η αντίστοιχη τάση στο ποτενσιόμετρο της συγκεκριμένης άρθρωσης.

$$A_i = (pot_i - a) \frac{180^\circ}{(\beta - \alpha)}$$

Όπου α , β είναι οι τιμές των βαθμίδων προκειμένου να βρίσκεται στις 0° και 180° όπως ειπώθηκε παραπάνω. Ο δείκτης i συμβολίζει τον αριθμό της άρθρωσης του Δείκτη που έχει τοποθετηθεί η κατασκευή.

Αρθρώσεις	q_1		q_2		q_3	
	0°	180°	0°	180°	0°	180°
Μοίρες						
Βαθμίδες	130	950	141	912	131	915

Πίνακας 5.5.1 Οι τιμές για το καλιμπράρισμα των ποτενσιόμετρων στον Δείκτη.

Το πρόγραμμα διαβάζει τις τιμές από το Arduino και στην συνέχεια κάνει τις πράξεις για να αντιστοιχίσει τις τιμές αυτές με τις γωνίες των αρθρώσεων. Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.4.1 οι κάθε μία από τις τρεις αρθρώσεις είναι :

$$A_1 = (pot_1 - 130) \left(\frac{180^\circ}{950 - 130} \right)$$

$$A_2 = (pot_2 - 141) \left(\frac{180^\circ}{912 - 141} \right)$$

$$A_3 = (pot_3 - 131) \left(\frac{180^\circ}{915 - 131} \right)$$

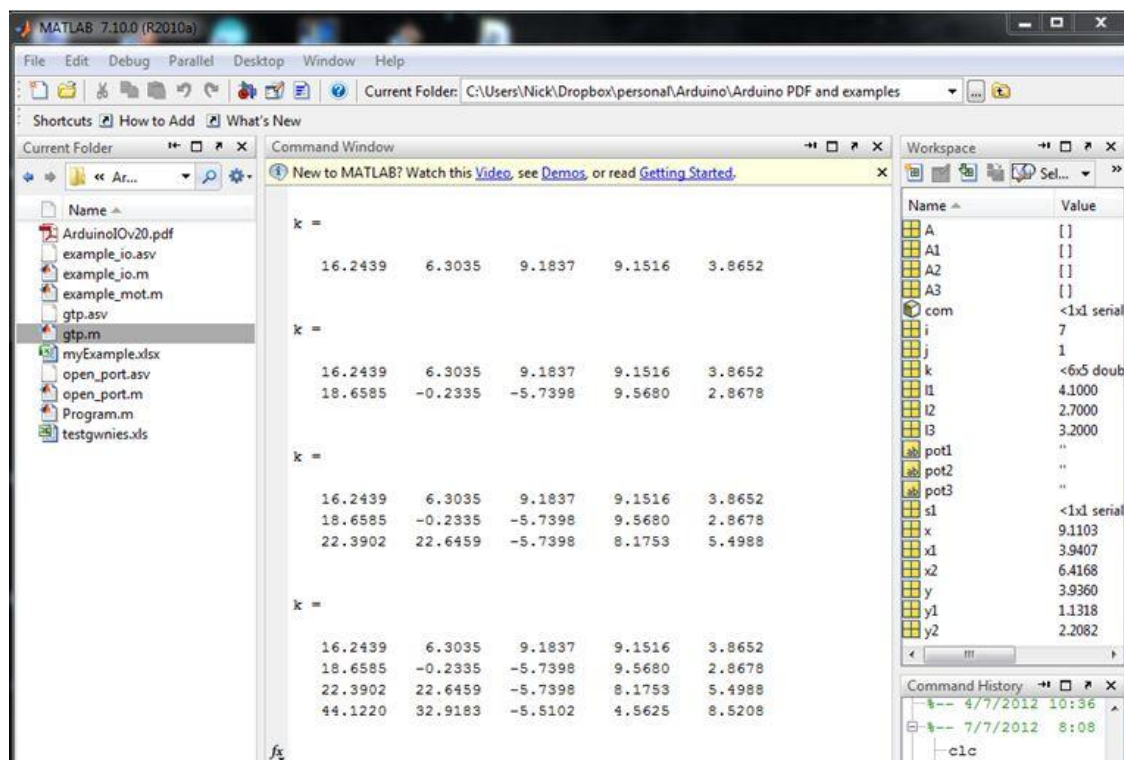
Τα A_1, A_2, A_3 είναι λοιπόν οι τιμές που αντιστοιχούν στις γωνίες της μετακαρποφαλαγγικής, της εγγύς μεσοκαρποφαλαγγικής και της άπω μεσοκαρποφαλαγγικής άρθρωσης του δείκτη. Μπορούμε δηλαδή να χρησιμοποιήσουμε και εδώ τις εξισώσεις για το ευθύ κινηματικό πρόβλημα που είδαμε στο κεφάλαιο 2, για να βρούμε την θέση (x, y) του δείκτη στο επίπεδο. Συγκεκριμένα έχουμε :

$$x = l_1 \cos(A_1) + l_2 \cos(A_1 + A_2) + l_3 \cos(A_1 + A_2 + A_3)$$

$$y = l_1 \sin(A_1) + l_2 \sin(A_1 + A_2) + l_3 \sin(A_1 + A_2 + A_3)$$

όπου l_1, l_2, l_3 είναι τα μήκη των συνδέσμων του Δείκτη που χρησιμοποιούμε.

Οι τιμές έτσι όπως εμφανίζονται στο Matlab είναι όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.2.4 .



Εικόνα 5.5.1 Καταγραφή των τιμών των ποτενσιομέτρων σε μοίρες στο Matlab.

Έτσι λοιπόν με την χρήση της κατασκευής με τα ποτενσιόμετρα, του Arduino και την βοήθεια των λογισμικών του Matlab και του Arduino, καταφέραμε να πάρουμε τιμές από τον δείκτη καθώς τον λυγίζουμε. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν (πειραματικά) με τις κανονικές γωνίες των αρθρώσεων του.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία μελετήσαμε την κινηματική ανάλυση και τον τρόπο ελέγχου ενός ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο Αυτοματικής – Ρομποτικής του ΤΕΙ Κρήτης. Τα συμπεράσματα από την παρούσα εργασία συνοψίζονται ως εξής :

- Αρχικά αναπτύχθηκαν κάποια κινηματικά μοντέλα που αφορούν το ανθρώπινο χέρι. Με μικρές μετατροπές που έγιναν σε αυτά, μπόρεσαν να χρησιμοποιηθούν με επιτυχία στο ρομποτικό χέρι.
- Για την πραγματοποίηση των διαφόρων λαβών αντικειμένων που έγιναν, το ρομποτικό χέρι δεν έχει την δυνατότητα από μόνο του να εντοπίζει το αντικείμενο και να το πιάνει. Θα πρέπει το αντικείμενο να έχει τοποθετηθεί σταθερά σε σημείο μπροστά από την παλάμη του χεριού.
- Για να πραγματοποιηθεί λαβή ενός αντικειμένου ακανόνιστου γεωμετρικού σχήματος, με το πρόγραμμα του αντίστροφου κινηματικού, είναι πολύ δύσκολο γιατί θα πρέπει να υπολογιστούν οι συντεταγμένες των σημείων επαφής του αντικειμένου για το κάθε δάχτυλο.
- Το αντίστροφο κινηματικό μοντέλο που έχει γίνει, υστερεί στο ότι, για την λαβή κάποιου αντικειμένου υπολογίζονται μόνο οι συντεταγμένες της άκρης κάθε δαχτύλου για να το πιάσουν. Δεν υπολογίζεται το σημείο επαφής κάθε συνδέσμου ο οποίος έρχεται εφάπτομενικά πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου.
- Οι σερβοκινητήρες που χρησιμοποιήθηκαν για το ρομποτικό χέρι είναι φτηνοί σερβοκινητήρες, με αποτέλεσμα έπειτα από πολλές χρήσεις του ρομποτικού χεριού να υπολειτουργούν και να παρουσιάζουν προβλήματα.

Στο μέλλον το ρομποτικό χέρι μπορεί να επεκταθεί με διάφορους τρόπους. Μερικές ιδέες για την βελτίωση του είναι οι παρακάτω:

- Χρησιμοποίηση αισθητήριων στα ακροδάχτυλα και στην παλάμη. Μερικά τέτοια αισθητήρια είναι, τα αισθητήρια αφής που χρησιμοποιούνται για την απόκτηση πληροφοριών σχετικά με την επαφή ανάμεσα στο ρομποτικό χέρι και αντικείμενο. Τα αισθητήρια προσέγγισης ή ακτίνας, τα οποία παρέχουν την πραγματική απόσταση μεταξύ ενός αντικειμένου και του αισθητηρίου.

- Δυνατότητα χειρισμού με τηλεχειριστήριο, όπως κινούνται διάφοροι ρομποτικοί βραχίονες.
- Δυνατότητα προσαρμογής του σε ρομποτικό βραχίονα έτσι ώστε να αποτελέσει ένα ολοκληρωμένο ανθρωπόμορφο βραχίονα, αλλά και για καλύτερη και πιο ευέλικτη εργασία το ρομποτικού βραχίονα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1] **Εμίρης Δημήτριος Μ.** Ρομποτική [Βιβλίο] - Αθήνα , 1999.
- 2] **Craig John J.** Εισαγωγή στην Ρομποτική-Εισαγωγή και Αυτόματος Έλεγχος [Βιβλίο] : Εκδόσεις Τζιόλα, 2009.
- 3] **Φασουλάς Ιωάννης** Ευσταθής λαβή και χειρισμός αντικειμένου από ρομποτικά δάκτυλα με παραμορφώσιμα άκρα και δυνατότητα κύλισης στον δισδιάστατο χώρο. [PHD], 2004.
- 4] **Γίαννης Κωνσταντουδάκης** Σχεδίαση και κατασκευή ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού [Εργασία] - Ηράκλειο Κρήτης , 2012.
- 5] **Μ. Τσαντάκης, Πτυχιακή Robopona**, Τ.Ε.Ι. Κρητης Τμημα μηχανολογιας, 2012.
- 6] **Φασουλάς Ιωάννης** Σημειώσεις Ρομποτικής ΤΕΙ Κρήτης . Ηράκλειο 2010.
- 7] " **Bundoo Vishalini** Design of evaluation of a shape memory alloy-based tendon-driven actuation system for biomemetic artificial fingers [Report]. - Voctoria 2009.
- 8] <http://www.rcmodelreviews.com/howservoswork.shtml> [Online] // <http://www.rcmodelreviews.com>.
- 9] <http://mindtrans.narod.ru/hands/hands.htm> [Online]. - April 2012.
- 10] http://www.grobot.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=197:-arduino&catid=40:2008-04-19-12-23-10&Itemid=80 [Online] // <http://www.grobot.gr>. - 2011. - 2012.