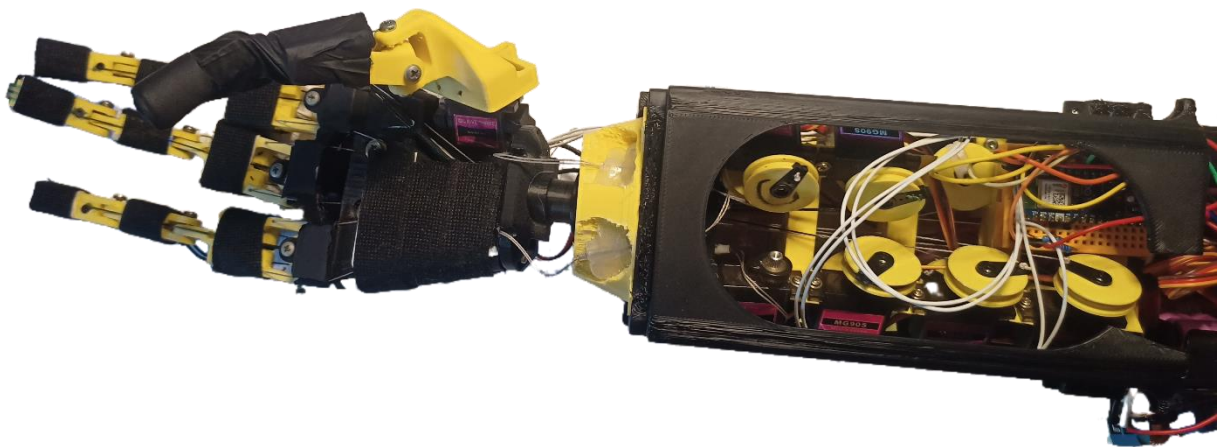




ΔΙΕΘΝΕΣ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
«ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ  
ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΧΕΡΙΟΥ»



Του φοιτητή  
Παπακωνσταντίνου Χρήστος  
Αρ. Μητρώου: 517111

Επιβλέπουσα  
Παπαδοπούλου Μαρία  
Επίκουρη Καθηγήτρια

Ημερομηνία 12/9/2025

Μελέτη, Σχεδίαση Και Ανάπτυξη Ρομποτικού Χεριού

Κωδικός Π.Ε. 24227

Παπακωνσταντίνου Χρήστος

Παπαδοπούλου Μαρία

23/ΣΕΠ/2025

*Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.*

*Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Παπακωνσταντίνου Χρήστου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.*

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.





## Πρόλογος

Η επιλογή του θέματος της παρούσας πτυχιακής δεν ήταν τυχαία, αλλά πηγάζει από μια μακροχρόνια αγάπη μου για τον κόσμο της επιστημονικής φαντασίας και τον θαυμασμό μου για την τεχνολογία των ρομπότ. Η ιδέα ότι οι μηχανές μπορούν να επεκτείνουν τις ανθρώπινες δυνατότητες με ενέπνευσε να ασχοληθώ με τη μελέτη και κατασκευή ενός ρομποτικού χεριού. Παράλληλα, σημαντικό ρόλο έπαιξε η προσωπική μου εμπειρία από την αναπηρία του παππού μου, η οποία μου ανέδειξε τη σημασία των προσθετικών μελών στην αποκατάσταση της ανεξαρτησίας ενός ανθρώπου και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής τους.

Το μεγαλύτερο όφελος για μένα ήταν η εμβάθυνση σε τεχνολογίες αιχμής, με ιδιαίτερο ενδιαφέρον στα συστήματα διεπαφής εγκεφάλου-υπολογιστή (BCI). Πιστεύω ότι η διασύνδεση του ανθρώπινου εγκεφάλου με ρομποτικά συστήματα αποτελεί το μέλλον της βιοϊατρικής μηχανικής. Στο πλαίσιο αυτό, έχω ήδη κατασκευάσει ένα λειτουργικό ηλεκτροεγκεφαλογράφο και εργάζομαι συστηματικά για την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος που θα ελέγχει τον ρομποτικό βραχίονα μέσω εγκεφαλικών σημάτων.

Η πτυχιακή αυτή εργασία αποτέλεσε για μένα ένα βήμα προς την υλοποίηση αυτού του οράματος, προσφέροντάς μου πολύτιμες γνώσεις και εμπειρία στον συνδυασμό μηχανικής, πληροφορικής και βιοϊατρικής τεχνολογίας.

## Περίληψη

Στο πλαίσιο της παρούσας πτυχιακής εργασίας, αναπτύχθηκε ένας ανθρωπόμορφος ρομποτικός βραχίονας, ύστερα από εκτενή μελέτη ρομποτικών συστημάτων και της ανατομίας του ανθρώπινου χεριού. Ο σχεδιασμός επικεντρώθηκε στην επίτευξη υψηλού βαθμού λειτουργικότητας και ελευθερίας στην κίνηση. Το τελικό σύστημα διαθέτει συνολικά 17 βαθμούς ελευθερίας, οι οποίοι υλοποιούνται με τη χρήση 15 κινητήρων, καθιστώντας τον βραχίονα ένα ρομποτικό σύστημα με λιγότερους ενεργοποιητές (underactuated robotic system), γεγονός που προσφέρει καλή ισορροπία μεταξύ πολυπλοκότητας και αποδοτικότητας.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην κινησιολογία του βραχίονα, ώστε να πληροί σημαντικά κριτήρια όπως: Συμμόρφωση, συνδεσιμότητα, δύναμη αρπαγής, γεωμετρικό κλείσιμο, εσωτερικές δυνάμεις, ισοτροπία λαβής, δυνατότητα χειρισμού, σταθερότητα και αντίσταση ολίσθησης. Η σχεδίαση και η υλοποίηση αυτών των χαρακτηριστικών επιτρέπουν στο ρομποτικό σύστημα να προσεγγίζει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση ενός ανθρώπινου άκρου σε ρεαλιστικές συνθήκες χειρισμού.

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση της ικανότητας του βραχίονα να συλλαμβάνει αντικείμενα από λίστα 43 κατηγοριών οικιακών αντικειμένων, η οποία έχει καθοριστεί ως ιδιαίτερα σημαντική για ανάκτηση από ρομποτικά συστήματα, με βάση τις ανάγκες που ανέφεραν ασθενείς με ALS μέσα από συνεντεύξεις και αξιολογήσεις. Η επιτυχής εκτέλεση αυτών των δοκιμών αναδεικνύει τη χρηστικότητα και την εφαρμοσιμότητα της κατασκευής σε ρεαλιστικά περιβάλλοντα.

Τέλος, μια επέκταση του ρομποτικού βραχίονα είναι η δυνατότητα αναπαράστασης του ελληνικού αλφαβήτου της νοηματικής γλώσσας, ανοίγοντας τον δρόμο για εφαρμογές που σχετίζονται με επικοινωνία και υποβοήθηση κωφάλαλων ατόμων.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκε ένας μηχανισμός παθητικής κάμψης της ονυχοφόρου φάλαγγας, ο οποίος βασίζεται σε εκμετάλλευση της ενεργητικής κάμψης της εγγύς φάλαγγας, αξιοποιώντας εσωτερικό ελατήριο και διπλό σύστημα σπάγκων για έλεγχο κίνησης. Μετά από αναζήτηση στη διαθέσιμη βιβλιογραφία και σε βάσεις δεδομένων ευρεσιτεχνιών (Google Patents, Espacenet), δεν εντοπίστηκε ταυτόσημη υλοποίηση, γεγονός που υποδηλώνει την πρωτοτυπία της προτεινόμενης λύσης.

# Research and Development of an Anthropomorphic Robotic Hand

Christos Papakonstantinou

## **Abstract**

In the context of the present thesis, a humanoid robotic arm was developed, following an extensive study of robotic systems and the anatomy of the human hand. The design focused on achieving a high degree of functionality and freedom of movement. The final system incorporates a total of 17 degrees of freedom, implemented through the use of 15 actuators, rendering the arm an underactuated robotic system, which provides a good balance between complexity and efficiency.

Particular emphasis was placed on the arm's kinematics to meet important criteria such as compliance, connectivity, grasping force, geometric closure, internal forces, grasp isotropy, manipulability, stability, and resistance to slippage. The design and implementation of these features enable the robotic system to closely approximate the performance of a human limb under realistic manipulation conditions.

Furthermore, the arm's ability to grasp objects was evaluated using a list of 43 categories of household items, identified as highly relevant for robotic retrieval tasks based on the needs reported by ALS patients through interviews and assessments. The successful execution of these tests highlights the usability and applicability of the system in realistic environments.

Finally, one aspect of the robotic arm is its capability to represent the Greek alphabet in sign language, paving the way for applications related to communication and assistance for hearing-impaired individuals.

As part of this work, a passive flexion mechanism for the distal phalanx was developed, based on exploiting the active flexion of the proximal phalanx, utilizing an internal spring and a dual-cable system for motion control. A search in the available literature and patent databases (Google Patents, Espacenet) revealed no identical implementation, indicating the originality of the proposed solution

# Περιεχόμενα

Πρόλογος .....	v
Περίληψη .....	vi
Abstract.....	vii
Περιεχόμενα.....	viii
Κατάλογος Σχημάτων .....	x
Κατάλογος Πινάκων .....	x
Συνοτομογραφίες.....	xi
Κεφάλαιο 1ο: Τίτλος Κεφαλαίου.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Ρομπότ Βιομηχανικού Χαρακτήρα .....	1
1.2.1 Κατηγορίες Βιομηχανικών Ρομπότ .....	2
1.3 Χειρουργικά Ρομπότ.....	3
1.4 Προσθετικά Μέλη .....	4
1.4.1 Είδη Προσθετικών .....	5
1.5 Ρομποτικοί Βραχίονες Ανθρωπόμορφων Ρομπότ .....	6
1.6 Χαρακτηριστικά Γνωρίσματα .....	7
1.6.1 Μηχανική Δομή .....	7
1.6.2 Σύστημα Ελέγχου .....	9
1.6.3 Αξιολόγηση Ρομποτικών βραχιόνων.....	10
1.7 Μαθηματικό Υπόβαθρο.....	11
1.7.1 Συστήματα Συντεταγμένων και Αναπαράσταση Κίνησης.....	11
1.7.2 Κινηματική.....	13
1.7.3 Αντίστροφη Κινηματική.....	19
1.8 Ιακοβιανοί Πίνακες .....	26
1.9 Στόχοι και Περιορισμοί του Έργου.....	27
1.10 Δομή Πτυχιακής.....	29
Κεφάλαιο 2ο: Μελέτη και Κατασκευή Ρομποτικού Βραχίονα .....	31
2.1 Ανατομία Ανθρώπινου Χεριού.....	31
2.1.1 Ανατομία του Πήχη .....	31

2.1.2	Ανατομία του Καρπού .....	32
2.1.3	Ανατομία της Παλάμης και των Δαχτύλων .....	33
2.2	Βήματα Ανάπτυξης του Ρομποτικού Χεριού .....	34
2.3	Μηχανική Δομή Ρομποτικού Χεριού .....	37
2.3.1	Δάχτυλα .....	38
2.3.2	Αντίχειρας.....	42
2.3.3	Καρπός.....	43
2.3.4	Πήχης.....	43
2.4	Επένδυση Ρομποτικού Βραχίονα.....	43
2.5	Σύστημα Ελέγχου .....	44
2.5.1	Εγκέφαλος και Συστοιχία Κίνησης.....	45
2.5.2	Ηλεκτρονικά Ισχύος και Τροφοδοσία .....	47
2.6	Τελική Μορφή Ρομποτικού Βραχίονα .....	48
Κεφάλαιο 3ο: Λειτουργικότητα.....		51
3.1	Πείραμα Αρπαγής Αντικειμένων .....	51
3.2	Πείραμα Νοηματικής Γλώσσας.....	52
3.3	Κινησιολογία Ρομποτικού Βραχίονα.....	54
3.4	Κώδικας Τηλεχειρισμού.....	55
3.4	Ασύρματη χειρισμός.....	58
Κεφάλαιο 4ο: Συμπεράσματα και Προτάσεις Βελτίωσης.....		59
4.1	Στόχοι.....	59
4.2	Αναβαθμίσεις.....	59
4.3	Περιορισμοί.....	60

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Αναπαράσταση διανύσματος $d$ .....	12
Σχήμα 1.2: Ρομποτικός βραχίονας τριών περιστροφικών αρθρώσεων.....	13
Σχήμα 1.3: Κάτοψη του ρομποτικού βραχίονα.....	15
Σχήμα 1.4: Βραχίονας με τρεις περιστροφικές αρθρώσεις.....	16
Σχήμα 1.5: Ρομποτικός βραχίονας δύο αρθρώσεων.....	20
Σχήμα 16: Εφαρμογή τριγωνομετρίας σε ρομποτικό βραχίονα δύο αρθρώσεων.....	22
Σχήμα 1.7: Διπλή λύση ρομποτικού βραχίονα δύο αρθρώσεων.....	23
Σχήμα 1.8: Ρομποτικός βραχίονας τριών αρθρώσεων.....	24
Σχήμα 1.9: Απεικόνιση άπειρων λύσεων.....	25
Σχήμα 2.1: Εγγύς φάλαγγα, κάτοψη/πλάγια όψη.....	39
Σχήμα 2.2: Εγγύς φάλαγγα, πάνω όψη/πλάγια όψη.....	39
Σχήμα 2.3: Ονχοφόρος φάλαγγα, κάτοψη/πλάγια όψη.....	40
Σχήμα 2.4: Μέση φάλαγγα, κάτοψη/πλάγια όψη.....	40
Σχήμα 2.5: Μέση φάλαγγα, πάνω όψη/πλάγια όψη.....	41
Σχήμα 2.6: Κομμάτια δαχτύλου, πάνω όψη/πλάγια όψη.....	41
Σχήμα 2.7: Μετακάρπιο κομμάτι, πρόσοψη.....	42
Σχήμα 2.8: Σχεδιάγραμμα συνδεσμολογίας.....	48
Σχήμα 3.1: Αναπαράσταση διαγράμματος ροής κύριου κώδικα.....	55
Σχήμα 3.2: Αναπαράσταση διαγράμματος ροής συνάρτησης <code>moveGroup</code> .....	5

## **Κατάλογος Πινάκων**

Πίνακας 1.1: Στοιχεία Παραμέτρων Denavit-Hartenber.....	17
Πίνακας 2.1: Αναλυτική λίστα όλων των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για τη κατασκευή του ρομποτικού βραχίονα .....	49
Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά κινητικής λειτουργίας ρομποτικού βραχίονα.....	54

## Συντομογραφίες

Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία
ΔΙΠΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος Π.Ε. Πτυχιακή Εργασία
ΟΦ	Ονυχοφόρο Φάλαγγα
ΜΦ	Μέση Φάλαγγα
ΕΦ	Εγγύς Φάλαγγα
ΜΚΦ	Μετακαρποφαλαγγική
ΕΦΦ	Εγγύς Φαλαγγοφαλαγγική
ΑΦΦ	Άπω Φαλαγγοφαλαγγική
ΦΦ	Φαλαγγοφαλαγγική

## Κεφάλαιο 1ο: Ανάλυση Ρομποτικών Βραχιόνων και Εφαρμογές Προσθετικών Λύσεων

### 1.1 Εισαγωγή

Προς όλους τους αναγνώστες της παρούσας πτυχιακής εργασίας, ποιο είναι το κύριο εργαλείο που υπό έλεγχο του εγκεφάλου καταφέρατε να ανοίξετε το φορητό ή σταθερό υπολογιστή, ταμπλετ ή κινητό, περιηγηθήκατε στα έγγραφα ή στον διαδικτυο και εν τέλη βρίσκεστε εδώ να διαβάζετε αυτές τις γραμμές κειμένου; Για όσους σκέφτηκαν το χέρι, πολύ σωστά. Παρόλο που πολλά όργανα του ανθρωπίνου σώματος συμβάλουν σε καθημερινές δραστηριότητες, τα ανθρωπινά χέρια φαίνεται να έπαιξαν πολύ σημαντικό ρόλο στην πρόοδο του ανθρωπίνου είδους. Από τη διαχείριση υλικών για τη κατασκευή εργαλείων, ως τη χρήση των εργαλείων αυτών για τη γεωργία, αλιεία, σιδηρομεταλλουργία, κατασκευή οικημάτων και πολλών άλλων επιτευγμάτων στην πορεία της ανθρώπινη ιστορία. Κάπως έτσι λοιπόν, φτάνω στο σημείο να σας αναφέρω ότι εκτός από ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο στην εργαλειοθήκη της ανθρώπινης κατασκευής, το ανθρώπινο χέρι είναι και από τους πιο περίπλοκους μηχανισμούς του ανθρωπίνου σώματος αποτελούμενο από διάφορους ιστούς και δομές. Μέχρι και 26 μυς συμβάλουν στην κίνηση του καρπού και των δαχτύλων, σε συνεργασία με τένοντες προσκολλημένους σε κόκκαλα που καθιστούν αβίαστη την κίνηση των χεριών μας. Σύνδεσμοι προσαρτημένοι στα οστά, τα εμποδίζουν από το να εκτοπιστούν από τη θέση τους όταν κουνάμε τα δάχτυλα μας. Η μηχανική του χεριού είναι αδιαμφισβήτητα ένα αξιοθαύμαστο προϊόν της ανθρωπογένεσης.

Η δημιουργικότητα και η ευφυΐα του ανθρώπου δεν τον κράτησαν για πολύ καιρό αμέτοχο από το να αντιγράψει το ανθρώπινο χέρι και τη λειτουργικότητα του, προσεγγίζοντας το θέμα αυτό με πολλούς τρόπους. Μηχανικά χεριά κατασκευασμένα από ιμάντες και γρανάζια, ελατήρια και νήματα, συναντάμε από τις προ Χριστού εποχές. Παρόλο που αυτές οι προσεγγίσεις ήταν πολύ εντυπωσιακές για τα μέσα της εποχής, σημερινές προσεγγίσεις του θέματος περιλαμβάνουν προηγμένα εργαλεία, όπως είναι διαφόρων ειδών, σχημάτων και μεγεθών ηλεκτρικούς υδραυλικούς ή πνευματικούς κινητήρες και ενσωματωμένα συστήματα, και αισθητήρες για τον έλεγχο των κινήσεων. Η χρήση πολυτελών και εκλεπτυσμένων υλικών προσδίδει ένα πιο ρεαλιστικό ανθρώπινο χαρακτήρα, καθώς και μια πιο στιβαρή κατασκευή, εκεί που οι περιστάσεις το καθιστούν αναγκαίο.

Αναφερόμενος στην παρούσα πτυχιακή εργασία για ρομποτικά χέρια, ή αλλιώς ρομποτικούς βραχίονες, κρίθηκε αναγκαίο να κατηγοριοποιήσω το θέμα αυτό σε τρία επιμέρους σκέλη, τα οποία βρίσκουν εφαρμογή το καθένα σε διαφορετικό τομέα, παρόλα αυτά στον ίδιο ερευνητικό κλάδο. Οι τύποι ρομποτικών βραχιόνων που συναντάμε περισσότερο, περιλαμβάνουν τους βιομηχανικούς βραχίονες, τα χειρουργικά ρομπότ, τα προσθετικά μέλη, και τα μέλη ανθρωποειδών ρομπότ.

### 1.2 Ρομπότ Βιομηχανικού Χαρακτήρα

Η όλο αυξανόμενες ανάγκες του σύγχρονου κόσμου που ήρθε να καλύψει η 3<sup>η</sup> βιομηχανική επανάσταση, περίπου το 1970 [1], εισάγοντας στην παραγωγική διαδικασία τα ρομποτικά μέσα, τους αυτοματισμούς και τη γενικότερη ηλεκτρονική διεκπεραίωση των περισσότερων θεμάτων του σημερινού μας κόσμου, έφερε στην επιφάνεια την ανάγκη για ρομποτικά συστήματα που θα καλύψουν κατά κόρο τις γραμμές παραγωγής σε πολλούς τομείς. Βελτιώνοντας σημαντικά την ασφάλεια στους χώρους εργασίας και περιορίζοντας τα σοβαρά εργατικά ατυχήματα. Παράλληλα όμως, προκάλεσε

διαρθρωτικές απώλειες θέσεων εργασίας, κυρίως στους τομείς της χειρωνακτικής και γραφειοκρατικής απασχόλησης. Κάθε νέο βιομηχανικό ρομπότ ανά 1.000 εργαζόμενους οδήγησε σε μείωση της σχέσης απασχόλησης/πληθυσμού κατά 0,2 ποσοστιαίες μονάδες και απώλεια κατά μέσο όρο 3,3 θέσεων εργασίας στο σύνολο των ΗΠΑ. Επίσης οι μισθοί μειώθηκαν κατά περίπου 0,4 % εξαιτίας της διάδοσης των ρομπότ [2]. Αντίθετα, άλλες ευρωπαϊκές έρευνες δείχνουν ότι η ρομποτοποίηση συνοδεύτηκε από αύξηση της συνολικής απασχόλησης [3]. Ιδιαίτερα σε παραγωγικές μονάδες υψηλής τεχνολογίας, και το εργατικό προσωπικό εξελίχθηκε σαφώς με βάση τις ανάγκες των νέων θέσεων εργασίας ανανεώνοντας τις επαγγελματικών του δεξιότητες. Στην Κίνα η μαζική εγκατάσταση ρομποτικών συστημάτων οδήγησε μεν στην απώλεια θέσεων για εργαζόμενους χαμηλών προσόντων, αλλά συνοδεύτηκε και από προσπάθειες επιμόρφωσης και επανακατάρτισης [4]. Συνοπτικά, η 3<sup>η</sup> Βιομηχανική Επανάσταση έφερε σαφείς βελτιώσεις στην επαγγελματική ασφάλεια, αλλά παράλληλα επανέφερε την ανάγκη για αναβάθμιση δεξιοτήτων, επιμόρφωση και πολιτικές στήριξης, ώστε να αντιμετωπιστούν οι οικονομικές και κοινωνικές συνέπειες των αλλαγών στο εργασιακό περιβάλλον.

Ενδεικτικά μερικές εργασίες που πραγματοποιούνται από ρομπότ στο βιομηχανικό κλάδο είναι το βάψιμο, η συναρμολόγηση, η ηλεκτροσυνγκόλληση, η κατασκευή τυπωμένων κυκλωμάτων, καθώς και διαδικασίες επιλογής, μεταφοράς και τοποθέτησης υλικών και προϊόντων. Οι ρομποτικοί βραχίονες λοιπόν, είναι πλέον αδιαμφισβήτητα ένα αναγκαίο κομμάτι των βιομηχανιών για την πραγματοποίηση των παραπάνω ενεργειών.

### 1.2.1 Κατηγορίες Βιομηχανικών Ρομπότ

Στο βιομηχανικό κλάδο διακρίνουμε τις παρακάτω κατηγορίες ρομποτικών βραχιόνων που διαφοροποιούνται ανάλογα με τη τοπολογία και το είδος των αρθρώσεων που αποτελούνται.

- **Αρθρωτά ρομπότ:**

Πολύ διαδεδομένα στις βιομηχανίες, τυπικά μοιάζουν με ανθρώπινο χέρι, εξ ου και η ονομασία του «ρομποτικό χέρι» ή «ρομποτικός βραχίονας». Συνήθως διαθέτουν αρκετούς βαθμούς ελευθερίας για να καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα κινήσεων.

- **Ρομπότ SCARA:**

Ακρωνύμιο του βραχίονα ρομπότ επιλεκτικής συμμόρφωσης (Selective Compliance Assembly Robot Arm). Τα ρομπότ SCARA αναγνωρίζονται από τις δύο παράλληλες αρθρώσεις τους που παρέχουν κίνηση στο επίπεδο X-Y [5]. Υστερεί όμως του χώρου Z.

- **Ρομπότ Delta:**

Αναφέρονται επίσης ως ρομπότ παράλληλης σύνδεσης [6]. Αποτελούνται από παράλληλους συνδέσμους που συνδέονται με μια κοινή βάση. Τα ρομπότ Delta είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για εργασίες άμεσου ελέγχου και λειτουργίες υψηλών ελιγμών (όπως εργασίες γρήγορης επιλογής και τοποθέτησης). Παρόμοια τοπολογία βλέπουμε και σε ορισμένους 3D εκτυπωτές.

- **Ρομπότ Καρτεσιανών συντεταγμένων:**

Γνωστά και ως γραμμικά ρομπότ, επίσης πολύ διαδεδομένα στις βιομηχανίες, έχουν τρεις πρισματικές αρθρώσεις για την κίνηση του άκρου-εργαλείου και τρεις περιστροφικές αρθρώσεις, συνήθως στο άκρο του ρομπότ, για τον προσανατολισμό του στο χώρο. Η εν λόγω τοπολογία συναντάται ευρέως σε τρισδιάστατους εκτυπωτές.

Κάθε εγκατάσταση ρομποτικού συστήματος για βιομηχανική χρήση πρέπει να ακολουθεί κάποια πρότυπα. Υπάρχουν αρκετά πρότυπα που σχετίζονται με την ασφάλεια των βιομηχανικών ρομπότ. Μερικά από τα πιο σημαντικά είναι:

- **ISO 10218-1 & ISO 10218-2:**

Διεθνή πρότυπα που καλύπτουν τις απαιτήσεις ασφαλείας για τους κατασκευαστές ρομπότ (Μέρος 1) και για την ενσωμάτωσή τους σε εγκαταστάσεις (Μέρος 2) [7].

- **ANSI/RIA R15.06-2012** [8]:

Η αναθεωρημένη έκδοση του ANSI/RIA R15.06-1999, ευθυγραμμισμένη με το ISO 10218.

- **ISO/TS 15066:**

Ειδικό πρότυπο για συνεργατικά ρομπότ, που θέτει όρια δύναμης και ταχύτητας για ασφαλή συνεργασία με ανθρώπους [9].

- **IEC 61508:**

Γενικό πρότυπο για την ασφάλεια λειτουργικών συστημάτων, σχετικό με τον προγραμματισμό και τον έλεγχο των ρομποτικών συστημάτων [10].

- **IEC 62061 & ISO 13849:**

Πρότυπα που καθορίζουν την ασφάλεια των συστημάτων ελέγχου των μηχανημάτων, συμπεριλαμβανομένων των ρομπότ [11]. Ένα από τα πιο σημαντικά είναι το πρότυπο ANSI/RIA R15.06-1999. Ένα βιομηχανικό πρότυπο ασφαλείας για ρομποτικά συστήματα και αυτοματοποιημένες εγκαταστάσεις, που δημιουργήθηκε από την Robotic Industries Association (RIA) σε συνεργασία με το American National Standards Institute (ANSI). Εγκρίθηκε το 1999 και βασίζεται σε διεθνή πρότυπα, όπως το ISO 10218. Ο σκοπός του είναι να εξασφαλίσει την ασφαλή λειτουργία των βιομηχανικών ρομπότ, προστατεύοντας τόσο τους εργαζομένους όσο και τον εξοπλισμό από ατυχήματα. Καθορίζει απαιτήσεις για τον σχεδιασμό, την εγκατάσταση, τη χρήση και τη συντήρηση των ρομποτικών συστημάτων, ενσωματώνοντας μέτρα όπως φυσικά φράγματα, αισθητήρες ασφαλείας, συστήματα διακοπής λειτουργίας έκτακτης ανάγκης και διαδικασίες εκπαίδευσης των χειριστών. Η συμμόρφωση με το πρότυπο είναι κρίσιμη για τη μείωση των κινδύνων σε εργοστάσια και βιομηχανικές εγκαταστάσεις, διασφαλίζοντας ότι οι ρομποτικές εφαρμογές λειτουργούν με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα.

### 1.3 Χειρουργικά Ρομπότ

Ακόμα ένας κλάδος που διαπρέπει η ρομποτική βρίσκεται στον χώρο της ιατρικής. Από τη θεραπεία με ακτινοβολία μέχρι τη χειρουργική των ματιών, από την αποκατάσταση μέχρι τη μεταμόσχευση μαλλιών, και από τους ρομποτικούς θεραπευτές μέχρι τους ρομποτικούς φαρμακοποιούς, ακόμη και φλεβική προσπέλαση με τη χρήση ρομπότ, τα ρομπότ υγειονομικής περίθαλψης μεταμορφώνουν τους τομείς της ιατρικής σε όλον τον κόσμο. Τα ιατρικά ρομπότ αποτελούν μία από τις σημαντικότερες καινοτομίες στον τομέα της υγείας, προσφέροντας σημαντικά οφέλη στην ανθρωπότητα. Χρησιμοποιούνται σε επεμβάσεις υψηλής ακρίβειας, όπως οι ελάχιστες επεμβατικές χειρουργικές επεμβάσεις, μειώνοντας τον χρόνο ανάρρωσης, τον κίνδυνο επιπλοκών και τον πόνο των ασθενών [12]. Πιθανότατα το πιο ευρέως γνωστό ιατρικό ρομπότ είναι το Χειρουργικό Σύστημα da Vinci®, Εικόνα 1.1, που κατασκευάζεται από την Intuitive Surgical και επιτρέπει την εκτέλεση πολύπλοκων επεμβάσεων με μεγαλύτερη σταθερότητα και ακρίβεια από τον άνθρωπο [13].



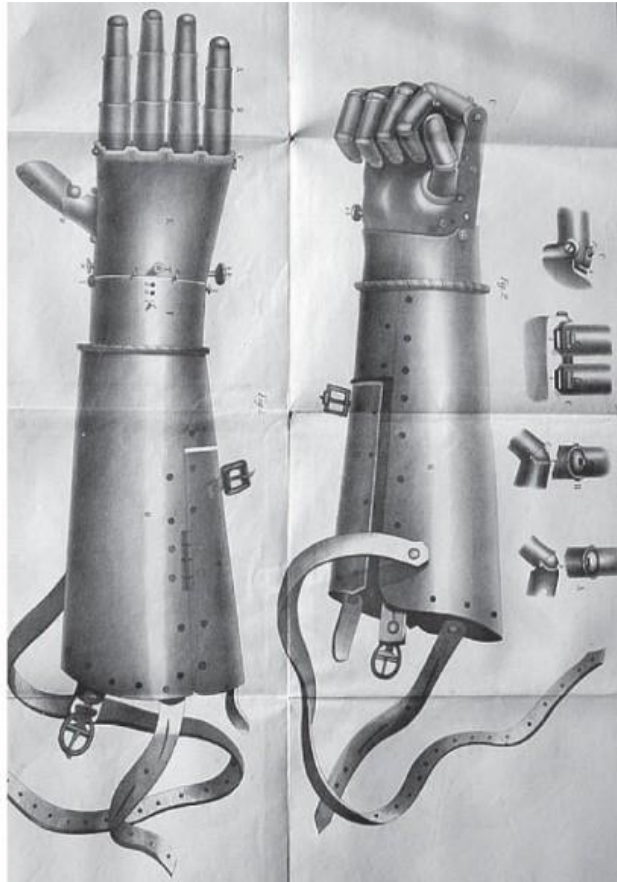
Εικόνα 1.1. Χειρουργικό Σύστημα da Vinci® [14].

Το τηλεχειριζόμενο ρομποτικό χειρουργικό σύστημα έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε εκατομμύρια ασθενείς, από τότε που εγκρίθηκε από τον Οργανισμό Τροφίμων και Φαρμάκων των ΗΠΑ (FDA) το 2000 [14], για χρήσεις που περιλαμβάνουν ελάχιστα επεμβατικές χειρουργικές επεμβάσεις σε θωρακοσκοπικές, καρδιακές, ουρολογικές και γυναικολογικές διαδικασίες. Παρά το υψηλό κόστος απόκτησης και συντήρησης, που μπορεί να ξεπεράσει τα 1,5 εκατομμύρια δολάρια για ένα σύστημα όπως το Da Vinci, οι αποδόσεις τους σε βάθος χρόνου θεωρούνται σημαντικές, καθώς μειώνουν τα συνολικά έξοδα νοσηλείας και βελτιώνουν την ποιότητα ζωής των ασθενών [15]. Η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας καθιστά τα ιατρικά ρομπότ όλο και πιο προσιτά, ενισχύοντας το ρόλο τους σε ένα σύγχρονο σύστημα υγείας [16].

#### 1.4 Προσθετικά Μέλη

Ο ερευνητικός κλάδος που ανασυγκροτήθηκε τα τελευταία χρόνια με μελέτη τους ρομποτικούς βραχίονες, πέρα από τις μεγάλες ανάγκες της βιομηχανίας και της ιατρικής, ήρθε να καλύψει και τις ανάγκες των ανθρώπων στη προσθετική μελών. Πολύ άνθρωποι υποφέρουν από ακρωτηριασμούς άνω άκρων στο κόσμο, κύρια αίτια μπορεί να είναι τα εργατικά ατυχήματα, αναπηρία πολέμου, ακόμα και αποτέλεσμα κάποιας νόσου όπως ο σακχαρώδης διαβήτης, μπορεί να οδηγήσει σε ακρωτηριασμό κάποιου μέλους. Λύση σε αυτό το πρόβλημα δίνει η προσθετική τεχνιτών μελών. Από τα αρχαία χρόνια συναντάμε προσθέσεις χεριών, ένα παράδειγμα αυτό του Μάρκου Σέργιου, Ρωμαίου στρατηγού, αφότου έχασε ένα χέρι στον 2<sup>ο</sup> Καρχηδονιακό πόλεμο, έλαβε μια πρόσθεση που του επέτρεψε να επιστρέψει στη μάχη [17]. Πολλές προσθέσεις χεριών ακολούθησαν στην πορεία των χρόνων. Ένα γνωστό παράδειγμα είναι αυτό του Γερμανού ιππότη Götz von Berlichingen σμιλεμένο από έναν τεχνίτη

της εποχής, κατασκευασμένο από σίδηρο, με δάχτυλα που μπορούσαν να κάμπτονται και να εκτείνονται παθητικά στο μετακαρποφαλαγγικό [18].



Εικόνα 1.2. Το σιδερένιο χέρι του Götz von Berlichingen [18].

#### 1.4.1 Είδη Προσθετικών

Στον κλάδο της προσθετικής άνω άκρων, διακρίνουμε τρεις κατηγορίες προσθετικών μελών. Κατηγοριοποιούνται με βάση τη λειτουργικότητα τους και τον τρόπο της μετάδοσης των κινήσεων.

- **Καλλωπιστικές προσθέσεις:**

Όπως προδίδει και το όνομα, αυτός ο τύπος προσθετικών είναι για καλλωπιστικούς σκοπούς, δεν εκτελεί καμία λειτουργία και δεν έχουν καμία χρησιμότητα πέρα από τη καλλωπιστική τους υπόσταση. Αποτελούνται από τη θήκη του κολοβώματος (ένα τμήμα του ανθρώπινου άκρου που έχει αφαιρεθεί ή έχει μείνει ατελές), η οποία κατασκευάζεται κατόπιν λήψεως γύψινου προπλάσματος για να εφαρμόζει πλήρως. Είναι χαμηλού κόστους και αποτελούνται από μια ελαφριά κατασκευή στη μορφή του ελλιπούς άκρου.

- **Παθητικές προσθέσεις :**

Οι παθητικές προσθέσεις έχουν τη δυνατότητα να κάμπτονται ως ένα περιορισμένο βαθμό και η μετάδοση κινήσεων γίνεται με τη χρήση ιμάντων προσκολλημένων πάνω στο σώμα. Στα προσθετικά χέρια (πήχης-παλάμη) οι ιμάντες συνήθως δένονται με μία ζώνη στην ωμοπλάτη του εκάστοτε ανθρώπου που κρατάνε το ένα άκρο τους σταθερό ώστε με την κάμψη του μπράτσου, το άλλο άκρο του ιμάντα να κάμπτει τα ανάλογα μέρη, είτε αυτά είναι δάχτυλα, καρπός, δαγκάνα. Τέτοιου είδους προσθέσεις, αναφέρεται από χρήστες, ότι παρόλο της μειωμένης λειτουργικότητας

τους, είναι πιο στιβαροί και επιρρεπείς σε κρούσεις, βρωμιά και υγρασία. Επίσης το κόστος παθητικών προθέσεων είναι σημαντικά μικρότερο από ενεργητικές προσθέσεις.

- **Ενεργητικές προσθέσεις :**

Ενεργητικές προσθέσεις υλοποιούνται με διάφορους τρόπους. Ένας ευρέως διαδεδομένος τρόπος υλοποίησης, όπου από εκεί παίρνει και το όνομα της, είναι η μωηλεκτρική πρόσθεση. Στη μωηλεκτρική πρόσθεση, η θήκη του κολοβάματος κατασκευάζεται από μαλακά υλικά όπως είναι η ακρυλική ρητίνη ή από εύκαμπτο θερμοπλαστικό υλικό. Σε αυτήν εφαρμόζονται τα μωηλεκτρόδια, τα οποία τοποθετούνται ύστερα από δοκιμές στην καταλληλότερη θέση του κολοβάματος, για να δώσουν τη μέγιστη απόδοση. Το κύριο σώμα της πρόσθεσης κατασκευάζεται από συνδυασμό ακρυλικών ρητινών με ανθρακονήματα. Η παλάμη, που φέρει τα δάχτυλα και τα κινητήρια μέσα αυτών, συνδέεται με την κεντρική μονάδα ελέγχου όπου κουμπώνουν με τη σειρά τους τα ηλεκτρόδια και η μπαταρία που βρίσκεται στο εσωτερικό μέρος του αντιβράχιου-πήχη. Στο τελικό στάδιο της πρόσθεσης εφαρμόζεται το καλλωπιστικό γάντι που παίρνει το ρόλο της προστασίας από το νερό και προσθέτει μια τραχιά επιφάνεια για την ενίσχυση του δραγμού. Το πλεονέκτημα των μωηλεκτρικών προθέσεων είναι η παροχή κίνησης στα δάχτυλα, η οποία ελέγχεται από σήματα των μυών. Βασική προϋπόθεση πριν την εφαρμογή μίας μωηλεκτρικής πρόσθεσης είναι ο μωηλεκτρογραφικός (ΗΜΓ) έλεγχος των υπολειπόμενων νεύρων του άκρου, έτσι ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο αυτοί δύνανται να παράγουν την ελάχιστη αναγκαία ηλεκτρομυογραφική ισχύ για να λειτουργήσει το σύστημα. Ο ασθενής, με την απαραίτητη εξάσκηση, μπορεί να ελέγχει τις κινήσεις του σε πολύ καλό επίπεδο. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου περιστροφής του καρπού, πάλι μέσω των ηλεκτροδίων. Πέρα από την πρόσθεση αντιβράχιου, μωηλεκτρικές προσθέσεις συναντάμε και σε περιπτώσεις ακρωτηριασμού δαχτύλων ή μέρος της παλάμης.

### 1.5 Ρομποτικοί Βραχίονες Ανθρωπόμορφων Ρομπότ

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας, έφερε στην επιφάνεια τα πιο τρέλα μας όνειρα. Μόλις 40 χρόνια πριν, εικόνες ανθρωποειδών ρομπότ που προβάλλονταν στη μεγάλη οθόνη έγιναν πραγματικότητα. Μεγάλες χρηματοδοτήσεις από τεχνολογικούς titάνες, παρέχονται για τη δημιουργία ενός οικοσυστήματος με ανθρωποειδές ρομπότ και εγκεφάλους με ενσωματωμένα πακέτα λογισμικού τεχνητής νοημοσύνης για τη γρηγορότερη, εξυπνότερη και πιο ανθρώπινη συμπεριφορά τους [19]. Κάθε ρομπότ χρειάζεται αδιαμφισβήτητητα κάποιο μέσω αρπαγής αντικειμένων. Πολλές μελέτες διεξάγονται για την κατασκευή ρομποτικών βραχιόνων, που ανάλογα με τη χρήση τους εφαρμόζεται και η κατάλληλη τοπολογία βραχίονα. Άλλοτε μοιάζουν με ανθρώπινο χέρι διαθέτοντας 5 δάχτυλα, περιστροφικό καρπό και ευρύ φάσμα κινήσεων ώστε να εκτελούν εργασίες ίδιες με αυτές του ανθρώπου. Τρανταχτό παράδειγμα τα ρομπότ αστροναύτες. Η τεχνολογία που αναπτύχθηκε από τη NASA και GENERAL MOTORS [20], αγγίζοντας κορυφαίες επιδόσεις και δεξιότητες, συνετέλεσε στην κατασκευή ρομποτικών χεριών με σκοπό να χειρίζονται εργαλεία στο διάστημα. Είτε πιο απλές κατασκευές με βραχίονες που αποτελούνται από τρία δάχτυλα και έναν κινητήρα, τα οποία εκτελούν μια κίνηση κάμψης και μια κίνηση έκτασης των δαχτύλων. Κάθε εφαρμογή προσαρμόζεται και στις ανάλογες απαιτήσεις κόστους, ευελιξίας, πολυπλοκότητας και χρησιμότητας.

### 1.6 Χαρακτηριστικά Γνωρίσματα

Οι ρομποτικοί βραχίονες αποτελούνται από τη μηχανική δομή που ορίζει την υπόσταση του βραχίονα, δηλαδή τη δομή του, τα κινητά μέρη και το σύστημά μετάδοσης κίνησης. Επίσης, το σύστημα ελέγχου

όπου βρίσκεται ο “εγκέφαλος” του συστήματος και τα ελεγχόμενα μέσα. Ως σύστημα ελέγχου εννοείται ο υπολογιστής που ελέγχει τη λειτουργία του συστήματος, είτε αυτός είναι μία αναπτυξιακή πλακέτα, ή ένας μικροελεγκτής ή κάποια μονάδα PLC. Επίσης κάτω από την ίδια ομπρέλα εντάσσονται τα παρεμφερή αισθητήρια, οι οδηγοί των κινητήρων, καθώς και οι μονάδες παροχής ενέργειας του συστήματος.

### 1.6.1 Μηχανική Δομή

Η μηχανική δομή αποτελείται από μια αλυσίδα στερεών σωμάτων (των συνδέσμων) οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με αρθρώσεις και συνδυαστικά μας δίνουν διαφορετικές δομές βραχιόνων (SCARA, DELTA, αρθρωτά, καρτεσιανών συντεταγμένων). Για την ευκολότερη κατανόηση επιλέχθηκε να παρουσιαστούν οι ακόλουθοι δύο βασικοί τύποι αρθρώσεων:

- **Περιστροφικές αρθρώσεις:**

Επιτρέπουν την κίνηση των συνδέσμων γύρο από τον άξονα της άρθρωσης και υλοποιούνται συνήθως με ρουλεμάν ή περιστροφικοί κινητήρες που αποτελούν την άρθρωση.

- **Πρισματικές αρθρώσεις:**

Επιτρέπουν την κίνηση των συνδέσμων κατά μήκος του άξονα της άρθρωσης και υλοποιούνται συνήθως με γραμμικούς κινητήρες ή με κάποιο σύστημα με ιμάντες.

Με τον συνδυασμό των δύο αυτών αρθρώσεων επιτυγχάνεται ένα μεγάλο φάσμα αρθρώσεων. Για παράδειγμα σε μερικά βιβλία ρομποτικής αναγράφεται και μια τρίτη κατηγορία άρθρωσης, η επονομαζόμενη σφαιρική άρθρωση, όπου αποτελείται από δύο περιστροφικές αρθρώσεις με ίδιο κέντρο αξόνων. Κάθε άρθρωση, είτε είναι περιστροφική, είτε είναι πρισματική συμβάλει με ένα βαθμό κινητικότητας, ο οποίος μπορεί να αντιπροσωπεύει ένα βαθμό ελευθερίας (Degree Of Freedom, DOF). Για παράδειγμα, η μεγάλη επιδεξιότητα του ανθρώπινου καρπού στην περίπτωση μας επιτυγχάνεται όταν οι άξονες των τριών περιστροφικών αρθρώσεων (x, y, z) τέμνονται σε ένα σημείο, αποδίδοντας στο καρπό 3 βαθμούς ελευθερίας.

Η κατασκευή μιας ρομποτικής άρθρωσης απαιτεί έναν συνδυασμό μηχανικών και ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Αυτά τα εξαρτήματα συνεργάζονται αρμονικά, επιτρέποντας στο ρομπότ να εκτελεί κινήσεις που περιγράφει κάθε τύπος άρθρωσης. Τα μηχανικά εξαρτήματα μιας ρομποτικής άρθρωσης είναι τα φυσικά μέρη που διευκολύνουν την κίνηση. Αυτά περιλαμβάνουν γρανάζια, συνδέσμους και ρουλεμάν. Κάθε ένα από αυτά τα μηχανικά εξαρτήματα παίζει σημαντικό ρόλο στη λειτουργία μιας ρομποτικής άρθρωσης. Ο σχεδιασμός και η υλοποίησή τους μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την απόδοση και τις δυνατότητες του ρομπότ.

- **Γρανάζια:**

Αποτελούν βασικό στοιχείο μιας ρομποτικής άρθρωσης, καθώς είναι οδοντωτοί τροχοί που μεταδίδουν ροπή και επιτρέπουν την περιστροφική κίνηση. Ο τύπος και η διάταξη των γραναζιών επηρεάζουν την ταχύτητα, τη ροπή και την ακρίβεια της άρθρωσης. Για παράδειγμα, τα ευθεία γρανάζια είναι απλά στη σχεδίαση και προσφέρουν υψηλή απόδοση μετάδοσης ισχύος, ενώ τα ελικοειδή γρανάζια λειτουργούν πιο ομαλά και αθόρυβα, αν και έχουν πιο πολύπλοκη κατασκευή.

- **Σύνδεσμοι:**

Είναι άκαμπτα στοιχεία που ενώνονται μέσω των αρθρώσεων, επιτρέποντας την ελεγχόμενη κίνηση. Στις ρομποτικές αρθρώσεις, οι σύνδεσμοι μεταφέρουν την κίνηση από το ένα τμήμα του ρομπότ στο άλλο. Το μήκος και η διαμόρφωσή τους επηρεάζουν το εύρος κίνησης και την πολυπλοκότητα των κινήσεων του ρομπότ.

- **Ρουλεμάν:**

Τα ρουλεμάν έχουν μειωμένη τριβή μεταξύ των κινούμενων εξαρτημάτων και υποστηρίζουν την περιστροφική ή γραμμική κίνηση. Ο τύπος του ρουλεμάν που χρησιμοποιείται εξαρτάται από τις απαιτήσεις της άρθρωσης. Για παράδειγμα, τα σφαιρικά ρουλεμάν είναι κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούν υψηλές ταχύτητες περιστροφής και χαμηλή τριβή, ενώ τα κυλινδρικά ρουλεμάν είναι ιδανικά για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή αντοχή σε φορτία.

Σε κάθε άρθρωση αντιστοιχεί συνήθως ένας κινητήρας (ενεργοποιητής) που προκαλεί την κίνηση των αρθρώσεων. Οι κινητήρες αποτελούν τη βασική κινητήρια δύναμη μιας ρομποτικής άρθρωσης, μετατρέποντας αποτελεσματικά την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική, η οποία εκδηλώνεται είτε ως περιστροφική είτε ως γραμμική κίνηση. Διακρίνουμε τρεις κατηγορίες κινητήρων που χρησιμοποιούνται στη κατασκευή ρομπότ.

- **Πνευματικοί κινητήρες:**

Λειτουργούν με πεπιεσμένο αέρα και χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικά ρομπότ για γρήγορες κινήσεις, όπως πνευματικοί βραχίονες σε γραμμές παραγωγής. Είναι ασφαλείς σε περιβάλλοντα με εκρηκτική ύλη, έχουν χαμηλό κόστος συντήρησης, αλλά προσφέρουν χαμηλή ακρίβεια και απαιτούν αεροσυμπιεστή.

- **Ηλεκτρονικοί κινητήρες:**

Όρος που συνήθως αναφέρεται σε κινητήρες με ηλεκτρονικό έλεγχο, όπως οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψύκτρες (Brushless Direct Current Motor, BLDC). Προσφέρουν υψηλή απόδοση και ακρίβεια, ιδανικοί για ρομποτικά συστήματα ακριβείας. Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής αλλά απαιτούν εξειδικευμένους ελεγκτές.

- **Υδραυλικοί κινητήρες:**

Χρησιμοποιούνται σε ρομπότ που απαιτούν υψηλή ισχύ και ροπή, όπως βαριά ρομποτικά συστήματα ή εξωσκελετούς. Προσφέρουν υψηλή αντοχή σε φορτία, αλλά είναι πολύπλοκοι, απαιτούν τακτική συντήρηση και μπορεί να παρουσιάσουν διαρροές λαδιού, κάτι που μειώνει την αποδοτικότητά τους.

Ο τύπος του κινητήρα που χρησιμοποιείται εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Στρέφοντας το βλέμμα μας στους ηλεκτρονικούς κινητήρες, συγκαταλέγονται οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC motors) όπου επιλέγονται συχνά λόγω της απλότητας και της ευκολίας ελέγχου τους. Ωστόσο, σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ακρίβεια και έλεγχο, προτιμώνται συχνά οι σερβο-κινητήρες ή οι βηματικοί κινητήρες. Οι σερβο-κινητήρες ξεχωρίζουν ιδιαίτερα για την ικανότητά τους να παρέχουν ακριβή έλεγχο της ταχύτητας, της θέσης και της επιτάχυνσης, καθιστώντας τους ιδανικούς για πολύπλοκες εφαρμογές, όπως η κίνηση ρομποτικών βραχιόνων ή ποδιών. Τέλος, είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι για τον έλεγχο των κινητήρων χρειάζονται μετρήσεις της θέσης  $x$ ,  $y$ ,  $z$  για τις πρισματικές αρθρώσεις και γωνία για τις περιστροφικές αντίστοιχος. Σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτούνται και μετρήσεις ταχύτητας για τον καλύτερο έλεγχο του ρομπότ. Τη δουλειά αυτή αναλαμβάνει το σύστημα ελέγχου όπου αναλύεται παρακάτω με τη βοήθεια ηλεκτρονικών αισθητήρων.

### 1.6.2 Σύστημα Ελέγχου

Το σύστημα ελέγχου παίρνει το ρόλο του εγκεφάλου του συστήματος. Ελέγχει τα αισθητήρια και επεξεργάζεται τα σήματα ανατροφοδοτώντας τα κινητήρια μέσα, διασφαλίζοντας έτσι την ομαλή και επιθυμητή λειτουργία του ρομποτικού συστήματος. Επίσης το σύστημα ελέγχου διαχειρίζεται και

ελέγχει την ασφαλή τροφοδοσία του ρομποτικού συστήματος. Το σύστημα ελέγχου αποτελείται από το **υλικό τμήμα** και το **λογισμικό τμήμα** [21].

Το **υλικό τμήμα** του συστήματος ελέγχου περιλαμβάνει έναν υπολογιστή στον οποίο εγκαθίσταται το λογισμικό, αποθηκεύει και επεξεργάζεται δεδομένα για τις αναγκαίες διεργασίες και εκτελεί τις εκάστοτε ενέργειες για τον έλεγχο του ρομποτικού συστήματος. Αναλόγως με το μέγεθος και τον τύπο της εφαρμογής η επιλογή του υπολογιστικού συστήματος ποικίλει. Μικρές σε υπολογιστική δύναμη, εμπορικές αναπτυξιακές πλακέτες συνδράμουν σημαντικά στη έρευνα και ανάπτυξη νέων μοντέλων και τεχνολογιών, λόγω του μικρού κόστους και της εύκολης χρήσης που τους διακατέχει. Αντιθέτως πιο εξειδικευμένοι μικροελεγκτές απαιτούν ειδικευμένη γνώση για τον προγραμματισμό και την ενσωμάτωση τους σε ένα σύστημα. Σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις συνήθως συναντάμε έναν συνδυασμό μικροελεγκτών και plc μονάδων για τη διαχείριση των μεγάλων ρευμάτων που τροφοδοτούν τα ρομπότ. Μέσα στο υλικό τμήμα καταλογίζονται και τα ηλεκτρονικά ελέγχου, όπως είναι οι plc μονάδες και οι οδηγοί για τους κινητήρες. Επίσης διάφορα αισθητήρια τα οποία αποτελούν κομμάτι ενός κλειστού βρόχου ελέγχου για τους κινητήρες κάθε άρθρωσης.

Το **λογισμικό τμήμα**, είναι υπεύθυνο για την κινηματική λογική του ρομπότ. Με γνώση τη θέση των αρθρώσεων, καθορίζει τη θέση του άκρου και αντίστροφα, δηλαδή, με δεδομένη την επιθυμητή θέση του άκρου, υπολογίζει τις αντίστοιχες θέσεις κάθε κινητήρα άρθρωσης και στέλνει το σήμα στους κινητήρες για τη κίνηση τους. Δύο ενέργειες γνωστές ως ευθεία και αντιστροφή κινηματική. Το λογισμικό επίσης χρησιμοποιεί δεδομένα για τις δυναμικές παραμέτρους του βραχίονα και την κατάσταση του σε συνεργασία με τα αισθητήρια που διαθέτει το ρομπότ. Το λογισμικό τμήμα μπορεί να αποτελείται από ένα γραφικό περιβάλλον ανάπτυξης όπως είναι το **Labview** της **National Instruments**© [22], το οποίο προτιμάται για βιομηχανικές εφαρμογές. Παρότι διαφέρει πολύ στον τρόπο λειτουργίας, παρόμοιας φιλοσοφίας είναι και το **MATLAB** της **MathWorks**® [23]. Πρόκειται για δύο πολύ ισχυρά γραφικά περιβάλλοντα προγραμματισμού, τα οποία δίνουν στον χρήστη τη δυνατότητα να ελέγχει τους κινητήρες και ταυτόχρονα να εμφανίζει μετρήσεις αισθητήρων στην οθόνη. Πέρα από τα γραφικά περιβάλλοντα, ανεξάρτητα συστήματα υποστηρίζονται από μικροελεγκτές, οι οποίοι λειτουργούν με αυτοτελείς κώδικες.

Εμβαθύνοντας στον έλεγχο των αρθρώσεων, συναντάμε δύο εκδοχές συστημάτων ελέγχου. Αυτή του ανοιχτού βρόχου και του κλειστού βρόχου [24]. Τα συστήματα ελέγχου ανοιχτού βρόχου είναι σχετικά απλά, καθώς δεν βασίζονται σε ανατροφοδότηση από αισθητήρια για να προσαρμόσουν την κίνηση της άρθρωσης. Αντίθετα, το σήμα ελέγχου, όπως η τάση ή το ρεύμα του κινητήρα, καθορίζεται αποκλειστικά με βάση τη ζητούμενη θέση, ταχύτητα ή επιτάχυνση της άρθρωσης. Σε ένα σύστημα ελέγχου ανοιχτού βρόχου, ο αλγόριθμος υπολογίζει το απαιτούμενο σήμα του κινητήρα με βάση την επιθυμητή κίνηση της άρθρωσης. Στη συνέχεια, αυτό το σήμα διοχετεύεται στον κινητήρα και η άρθρωση κινείται αναλόγως. Ωστόσο, επειδή δεν υπάρχει ανατροφοδότηση από την άρθρωση, το σύστημα ελέγχου δεν μπορεί να διορθώσει τυχόν σφάλματα ή διαταραχές που μπορεί να προκύψουν κατά την κίνηση, όπως η τριβή, το μηχανικό κενό (backlash) ή οι εξωτερικές δυνάμεις, καθώς και αλλαγές του περιβάλλοντος ή της άρθρωσης όπως η φθορά και οι μεταβολές της θερμοκρασίας. Παρά την απλότητά τους, τα συστήματα ελέγχου ανοιχτού βρόχου μπορεί να είναι αποτελεσματικά για ορισμένες εφαρμογές, ιδιαίτερα εκείνες με χαμηλές απαιτήσεις ακρίβειας ή ελάχιστες εξωτερικές διαταραχές. Για παράδειγμα, ο έλεγχος ανοιχτού βρόχου μπορεί να είναι κατάλληλος για ένα σύστημα ρομποτικού βραχίονα που χρησιμοποιείται σε μια μηχανή pick-and-place, όπου η κίνηση των αρθρώσεων είναι σχετικά απλή και το περιβάλλον ελεγχόμενο.

Τα συστήματα ελέγχου κλειστού βρόχου, σε αντίθεση με τα συστήματα ανοιχτού βρόχου, βασίζονται στην ανατροφοδότηση από τα διαθέσιμα αισθητήρια, για να προσαρμόζουν συνεχώς το σήμα ελέγχου. Αυτή η ανατροφοδότηση επιτρέπει στο σύστημα ελέγχου να διορθώνει σφάλματα ή διαταραχές που

μπορεί να προκύψουν κατά την κίνηση, εξασφαλίζοντας έτσι πιο ακριβή και σταθερή λειτουργία της άρθρωσης. Σε ένα σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου, αισθητήρες χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της θέσης, της ταχύτητας και της δύναμης που ασκείται στην εκάστοτε άρθρωση. Αυτές οι μετρήσεις συγκρίνονται με την επιθυμητή κίνηση και ο αλγόριθμος ελέγχου υπολογίζει το απαιτούμενο σήμα του κινητήρα ώστε να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα μεταξύ της πραγματικής και της επιθυμητής κίνησης. Στη συνέχεια, προσαρμόζεται το σήμα ανάλογα, ώστε η άρθρωση να κινηθεί προς την επιθυμητή θέση. Εδώ κάνουν την εμφάνιση τους και οι αλγόριθμοι ελέγχου αναλογικής-ολικής-παραγώγου(PID) που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση του βρόχου ελέγχου όσων αφορά την ευστάθεια του συστήματος και την αποφυγή ταλαντώσεων. Τα συστήματα ελέγχου κλειστού βρόχου προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα συστήματα ανοιχτού βρόχου. Είναι λιγότερο ευαίσθητα σε σφάλματα και μπορούν να προσαρμοστούν σε εξωτερικές διαταραχές, όπως τριβή, μηχανικό κενό (backlash) ή εξωτερικές δυνάμεις, διασφαλίζοντας ότι η άρθρωση διατηρεί την επιθυμητή κίνησή της ακόμα και παρουσία αυτών των διαταραχών. Παρόλα αυτά, τα συστήματα ελέγχου κλειστού βρόχου είναι πιο πολύπλοκα από τα συστήματα ανοιχτού βρόχου, καθώς απαιτούν επιπλέον εξαρτήματα, όπως αισθητήρες καθώς και πιο περίπλοκους αλγόριθμους. Αυτή η πολυπλοκότητα μπορεί να αυξήσει το κόστος και τον χρόνο ανάπτυξης της ρομποτικής εφαρμογής. Επιπλέον, τα συστήματα ελέγχου κλειστού βρόχου μπορεί να είναι ευάλωτα σε προβλήματα όπως ο θόρυβος των αισθητήρων, η καθυστέρηση απόκρισης ή η αστάθεια, τα οποία μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση της άρθρωσης. Παρά τις προκλήσεις αυτές, τα συστήματα ελέγχου κλειστού βρόχου προτιμώνται συχνά για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ακρίβεια και προσαρμοστικότητα, όπως οι ρομποτικοί βραχίονες που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία ή στη χειρουργική.

### 1.6.3 Αξιολόγηση Ρομποτικών Βραχιόνων

Κάθε ρομπότ, και περισσότερο οι ρομποτικοί βραχίονες, αξιολογούνται με βάση τα παρακάτω χαρακτηριστικά [25].

- **Αριθμός αξόνων**

Δύο άξονες απαιτούνται για να φθάσουν σε οποιοδήποτε σημείο σε ένα επίπεδο. Τρεις άξονες απαιτούνται για την πρόσβαση σε κάθε σημείο του τρισδιάστατου χώρου. Για τον πλήρη έλεγχο του προσανατολισμού στην άκρη του βραχίονα (δηλαδή τον καρπό), απαιτούνται τρεις επιπλέον άξονες.

- **Βαθμοί ελευθερίας**

Ο βαθμός ελευθερίας είναι το πλήθος των κινήσεων που χαρακτηρίζει ένα ρομποτικό σύστημα. Είναι συνήθως ο ίδιος με τον αριθμό των αρθρώσεων που διαθέτει ένα ρομποτικό σύστημα.

- **Ενεργός χώρος εργασίας**

Η περιοχή του χώρου που μπορεί να φτάσει ένα ρομπότ.

- **Κινηματική**

Η πραγματική ρύθμιση των άκαμπτων μελών και αρθρώσεων του ρομπότ, που ορίζει τις επιτρεπτές κινήσεις του.

- **Επιτάχυνση**

Πόσο γρήγορα μπορεί να επιταχύνει ένα κινητό μέρος ως προς τον άξονα λειτουργίας.

- **Ακρίβεια**

Πόσο κοντά ένα ρομπότ μπορεί να φτάσει στη ζητούμενη θέση. Συνήθως αναφέρεται για το άκρο κάποιου ρομποτικού βραχίονα.

- **Επαναληψιμότητα**

Πόσο καλά το ρομπότ θα επιστρέψει σε μια προγραμματισμένη θέση. Την επαναληψιμότητα χαρακτηρίζει η επανάληψη μια κίνησης του βραχίονα σε μια συγκεκριμένη θέση X-Y-Z καθώς αυτό γίνεται με απόκλιση όχι μεγαλύτερη του 1 χιλ.

Περαιτέρω για τα άκρα των ρομποτικών βραχιόνων, όπου συνήθως φέρουν το εργαλείο του εκάστοτε σκοπού, στην περίπτωση μας ο βραχίονας που φέρει την παλάμη/αρπάγη, εργαλείο ικανό να πιάνει αντικείμενα, ειδικότερες αξιολογήσεις λαμβάνουν χώρα. Ελέγχοντας ένα ευρύ φάσμα μορφολογιών από διάφορα αντικείμενα που είναι ικανή η αρπάγη να κρατήσει, προσδίδεται και η δεξιότητά του βραχίονα.

## 1.7 Μαθηματικό υπόβαθρο

Η ρομποτική ως διεπιστημονικός κλάδος βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε μια πληθώρα μαθηματικών εργαλείων. Τέτοια εργαλεία και έννοιες προέρχονται από την άλγεβρα, τη γεωμετρία, το λογισμό και τη φυσική και βοηθάνε ένα μηχανικό ρομποτικής να περιγράψει το ρομποτικό βραχίονα ως στέρεο σώμα μέσα σε ένα πλαίσιο, να αναλύσει την κίνηση του και να ελέγξει τη συμπεριφορά μέσα στο πλαίσιο αυτό. Επίσης μεγάλης χρησιμότητας είναι η ικανότητα υπολογισμού διαφόρων δυνάμεων που ασκούνται από και προς το βραχίονα.

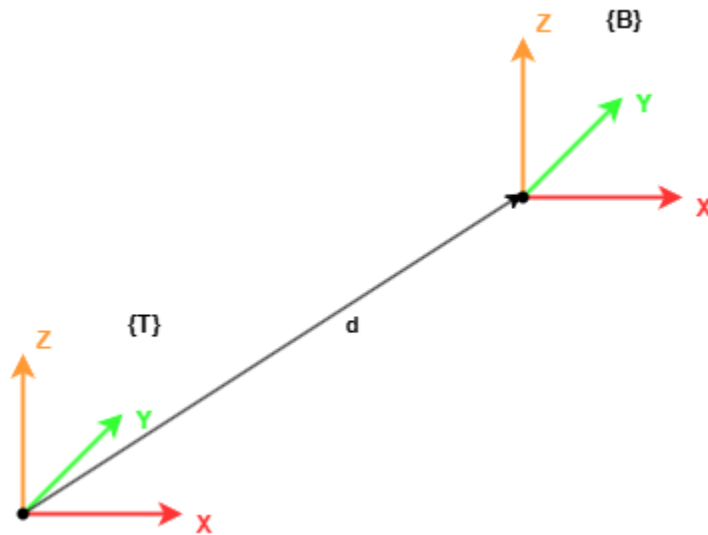
Στην ακόλουθη παράγραφο περιγράφονται όλα τα μαθηματικά εργαλεία που διέπουν τη μηχανική ενός ρομποτικού συστήματος, όπως η κινηματική, οι μετασχηματισμοί συντεταγμένων, οι Ιακωβιανοί πίνακες και η δυναμική.

### 1.7.1 Συστήματα συντεταγμένων και αναπαράσταση κίνησης

Για να περιγράψουμε τη θέση και τον προσανατολισμό του άκρου και των αρθρώσεων ενός ρομποτικού συστήματος στο τρισδιάστατο χώρο χρησιμοποιούμε συστήματα συντεταγμένων.

Είναι σύνηθες στη μελέτη ρομποτικών συστημάτων να καθορίζουμε κάποια πλαίσια (βάσεις) κατά μήκος των αρθρώσεων. Ένα πλαίσιο  $\{T\}$  ορίζεται στη βάση του ρομπότ, ως σταθερό πλαίσιο συντεταγμένων, όπου και χρησιμοποιείται σαν πλαίσιο αναφοράς (σημείο μηδέν). Ένα δεύτερο πλαίσιο  $\{B\}$  μείζονος σημασίας ορίζεται στο άκρο του ρομποτικού βραχίονα, όπου και συνήθως βρίσκεται κάποιο εργαλείο που μας ενδιαφέρει να μελετήσουμε τη θέση του στο χώρο και το προσανατολισμό.

Εκφράζουμε τη θέση του  $\{B\}$  στον χώρο, ως προς το σταθερό πλαίσιο χώρου  $\{T\}$  ορίζοντας ένα σημείο στο σημείο τομής των τριών αξόνων του πλαισίου  $\{B\}$ . Ονομάζουμε  $d$  το διάνυσμα μετατόπισης του πλαισίου  $\{B\}$  με βάση το πλαίσιο  $\{T\}$  και τις συντεταγμένες του σημείου αυτού.

Σχήμα 1.1. Αναπαράσταση διανύσματος  $\mathbf{d}$ .

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Ο προσανατολισμός του πλαισίου  $\{B\}$  σε σχέση με το πλαίσιο  $\{T\}$  εκφράζεται από τον πίνακα περιστροφής  $R$ . Για ένα κανονικοποιημένο σύστημα ο πίνακας περιστροφής σχηματίζεται όπως παρακάτω:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Συλλέγοντας τα δεδομένα αυτά σε έναν πίνακα σχηματίζεται ο ομογενής πίνακας μετασχηματισμού:

$$T = \begin{bmatrix} R & \mathbf{d} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_x \\ 0 & 1 & 0 & a_y \\ 0 & 0 & 1 & a_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Παρατηρούμε μια τέταρτη διάσταση, την τελευταία γραμμή, που αποτελείται από τρία μηδενικά και έναν άσσο, η γραμμή αυτή κάνει τον πίνακα μετασχηματισμού ομογενή και διασφαλίζει την πράξη της μετατόπισης.

Έχοντας τον ομογενή πίνακα μετασχηματισμού  $T$  που εκφράζει τη θέση και την περιστροφή του υπό μελέτη σημείου, μπορούμε να εκφράσουμε τη θέση του άκρου ως προς τη βάση του ρομπότ.

## 1.7.2 Κινηματική

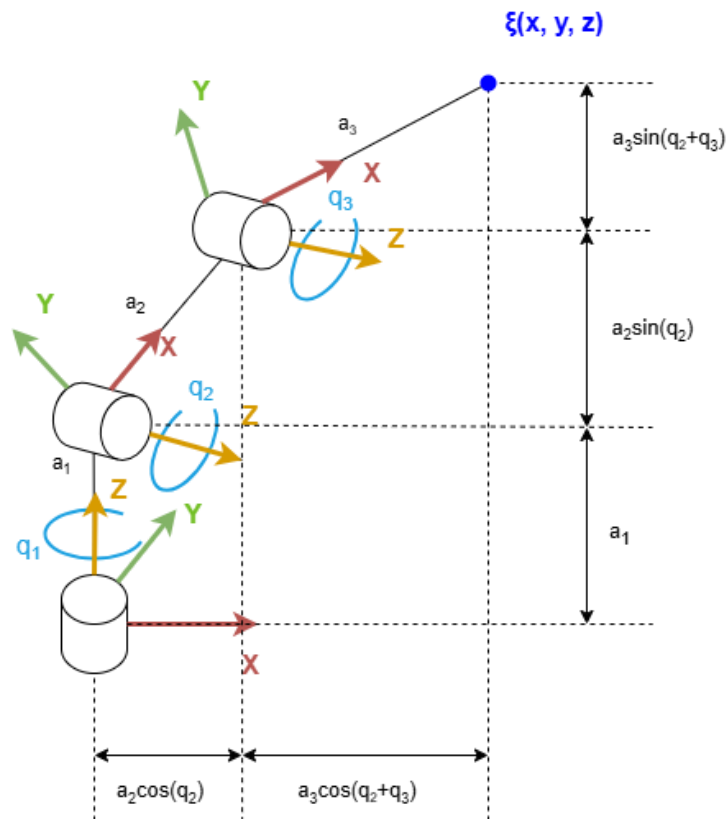
Στο τομέα της ρομποτικής, η μελέτη της κίνησης των ρομποτικών μηχανισμών ονομάζεται κινηματική. Το πρόβλημα της κινηματικής σε ρομποτικές εφαρμογές είναι μείζονος σημασίας διότι βοηθάει στον ακριβή προγραμματισμό της κίνησης τους, καθώς και στη μελέτη και σχεδίαση αυτών. Χρησιμοποιείται σε ρομποτικά χέρια, βιομηχανικούς βραχιόνες, ρομποτικά πόδια, καθώς και σε εξωσκελετούς και αυτόνομα οχήματα. Παράλληλα με το πλήθος των αρθρώσεων αυξάνεται και η πολυπλοκότητα της κινηματικής μελέτης. Υπάρχουν δύο τύποι κινηματική μελέτης. Με την εμπρόσθια ή ευθεία κινηματική επιδιώκουμε να βρούμε τη θέση και προσανατολισμό του υπό μελέτη άκρου, γνωρίζοντας τις γωνίες κλίσης ή το μήκος έκτασης των αρθρώσεων, αναλόγως τον τύπο άρθρωσης που μελετάμε, πρισματική ή περιστροφική.

Η ευθεία κινηματική χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τη θέση και τον προσανατολισμό ενός ρομποτικού μηχανισμού και βοηθάει στη σχεδίαση, προσομοίωση και έλεγχο ρομποτικών συστημάτων.

Αναλόγως με το πλήθος των βαθμών ελευθερίας και των διαστάσεων που κινούνται οι ρομποτικοί βραχιόνες διαφέρει ο τρόπος λύσης του προβλήματος.

Η αναλυτική μέθοδος βασίζεται σε καθαρούς μαθηματικούς υπολογισμούς, κυρίως σε τριγωνομετρία και εφαρμόζεται σε ρομπότ με απλή ή συμμετρική γεωμετρία. Παρέχει απλή και ακριβή λύση, ωστόσο δεν εξυπηρετεί πολύπλοκα συστήματα. Η αναλυτική μέθοδος παρουσιάζεται ακολούθως.

Έστω ότι έχουμε ένα ρομποτικό βραχίονα Σχήμα 1.1, που αποτελείται από τρεις συνδέσμους  $a_1$ ,  $a_2$  και  $a_3$ . Δύο περιστροφικές αρθρώσεις  $q_2$  και  $q_3$  ενώνουν τους τρεις συνδέσμους μεταξύ τους, καθώς και μια τρίτη περιστροφική άρθρωση  $q_1$  ενώνει τον  $a_1$  σε μια σταθερή βάση. Η πρώτη άρθρωση περιστρέφεται γύρω από τον άξονα  $z$  (δεξιά-αριστερά), καθώς η δεύτερη και τρίτη άρθρωση περιστρέφονται γύρω από τον άξονα  $y$  (πάνω-κάτω).



Σχήμα 1.2. Ρομποτικός βραχίονας τριών περιστροφικών αρθρώσεων.

## Κεφάλαιο 1

Στην ευθεία κινηματική ψάχνουμε τη θέση του άκρου του συνδέσμου  $a_3$  που περιγράφεται από ένα σημείο  $\xi$  με συντεταγμένες  $(x, y, z)$ . Οι συντεταγμένες αυτές με αναλυτική μέθοδο υπολογίζονται με τον παρακάτω τρόπο.

Ενεργός χώρος εργασίας:

$$H = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^3 \quad (1.3)$$

Διάνυσμα αρθρώσεων:

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^3 \quad (1.4)$$

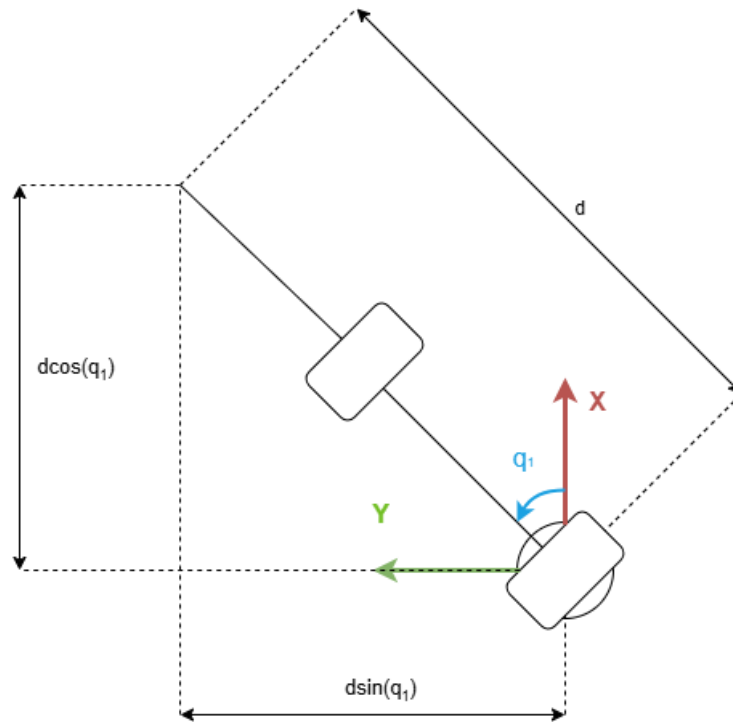
Για το ύψος  $z$  ισχύει:

$$\begin{aligned} z_1 &= a_1 \\ z_2 &= a_2 \cdot \sin(q_2) \\ z_3 &= a_3 \cdot \sin(q_2 + q_3) \\ z &= a_1 + a_2 \cdot \sin(q_2) + a_3 \cdot \sin(q_2 + q_3) \end{aligned} \quad (1.4)$$

Η απόσταση του άκρου από τη βάση του βραχίονα, όταν τον προβάλλουμε στο  $x$ - $y$  επίπεδο, υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} x_1 &= a_2 \cdot \cos(q_2) \\ x_2 &= a_3 \cdot \cos(q_2 + q_3) \\ d = x_1 + x_2 &= a_2 \cdot \cos(q_2) + a_3 \cdot \cos(q_2 + q_3) \end{aligned} \quad (1.5)$$

Προβάλλοντας την κάτοψη του ρομποτικού βραχίονα, Σχήμα 1.2, μπορούμε να υπολογίσουμε τις συντεταγμένες  $x$  και  $y$ .



Σχήμα 1.3. Κάτοψη του ρομποτικού βραχίονα.

Για το x ισχύει:

$$\begin{aligned} x &= d \cdot \cos(q_1) \\ &= a_2 \cdot \cos(q_1) \cdot \cos(q_2) + a_3 \cdot \cos(q_1) \cdot \cos(q_2 + q_3) \end{aligned} \quad (1.6)$$

Για το y ισχύει:

$$\begin{aligned} y &= d \cdot \sin(q_1) \\ &= a_2 \cdot \sin(q_1) \cdot \cos(q_2) + a_3 \cdot \sin(q_1) \cdot \cos(q_2 + q_3) \end{aligned} \quad (1.7)$$

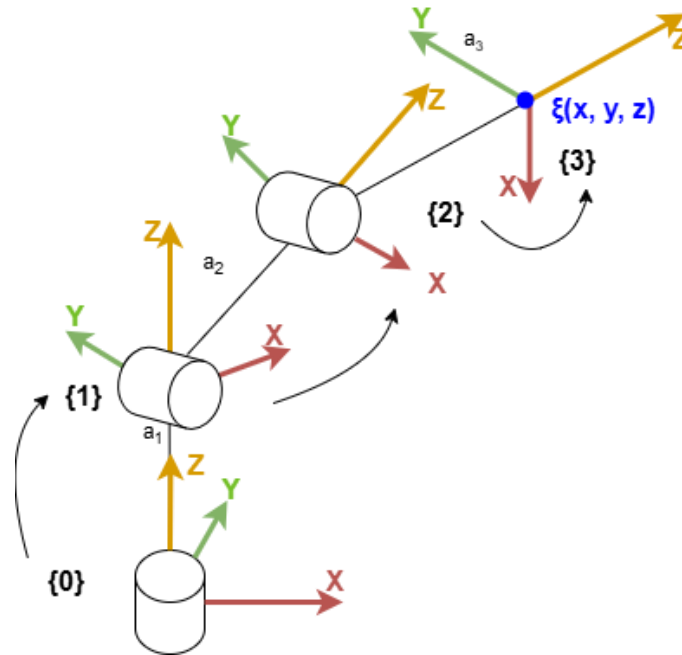
Καταλήγοντας στη λύση της εμπρόσθιας κινηματικής:

$$\begin{aligned} H &= f(Q) \\ \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_2 \cdot \cos(q_1) \cdot \cos(q_2) + a_3 \cdot \cos(q_1) \cdot \cos(q_2 + q_3) \\ a_2 \cdot \sin(q_1) \cdot \cos(q_2) + a_3 \cdot \sin(q_1) \cdot \cos(q_2 + q_3) \\ a_1 + a_2 \cdot \sin(q_2) + a_3 \cdot \sin(q_2 + q_3) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1.8)$$

Η παραπάνω προσέγγιση εξυπηρετεί προβλήματα που αναφέρονται σε απλά ρομποτικά συστήματα και συνήθως σε επίπεδο χώρο. Με τους ρυθμούς ανάπτυξης όμως που επιφέρει το τεχνολογικό κύμα της δεκαετίας μας, θα συναντάμε όλο και περισσότερο πολύπλοκα ρομπότ που εκτυλίσσονται σε

πραγματικό τρισδιάστατο χώρο και θα διαθέτουν πολλούς και διάφορους βαθμούς ελευθερίας. Για την επίλυση του προβλήματος κινηματικής σε ρομπότ με τρισδιάστατο φάκελο εργασίας και πιο σύνθετη δομή, περνάμε το πρόβλημα σε πλήρη κινηματική μελέτη με τη χρήση πινάκων μετασχηματισμού.

Γυρνώντας ξανά στο παραπάνω παράδειγμα, έχουμε ένα ρομποτικό βραχίονα με τρεις περιστροφικές αρθρώσεις, Σχήμα 1.3, με διάνυσμα αρθρώσεων ίδιο με (1.5). Κάθε άρθρωση συμβάλει με έναν πίνακα μετασχηματισμού. Εφόσον δουλεύουμε το πρόβλημα στο Καρτεσιανό χώρο οι πίνακες μετασχηματισμού είναι 4\*4 ομογενοποιημένης μορφής, όμοια με (1.4).



Σχήμα 1.4. Βραχίονας με τρεις περιστροφικές αρθρώσεις.

Ξεκινώντας από τη βάση έχουμε ένα πλαίσιο αναφοράς {0}, το οποίο είναι σταθερό. Η σχέση  $T_{01}$  συνδέει το πλαίσιο {0} με {1} και εκφράζει τη θέση του συνδέσμου 1 ως προς το πλαίσιο αναφοράς, άρα έχουμε περιστροφή ως προς τον z άξονα και μετατόπιση ως προς τον ίδιο άξονα κατά  $a_1$ .

$$T_{01} = T_{Rz}(q_1) = \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 & 0 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & a_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

Η σχέση  $T_{12}$  συνδέει το πλαίσιο {1} με {2} και εκφράζει τη θέση του συνδέσμου 2 ως προς τον σύνδεσμο 1, άρα έχουμε περιστροφή ως προς τον y άξονα και μετατόπιση ως προς τον z άξονα κατά  $a_2$ .

$$T_{12} = T_{Ry}(q_2) = \begin{bmatrix} \cos q_2 & 0 & \sin q_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin q_2 & 0 & \cos q_2 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

Η σχέση  $T_{23}$  συνδέει το πλαίσιο {2} με {3} και εκφράζει τη θέση του συνδέσμου 3 ως προς το σύνδεσμο 2, άρα έχουμε περιστροφή ως προς τον y άξονα και μετατόπιση ως προς τον z άξονα κατά  $a_3$ .

$$T_{23} = T_{Ry}(q_3) = \begin{bmatrix} \cos q_3 & 0 & \sin q_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin q_3 & 0 & \cos q_3 & a_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

Πολλαπλασιάζοντας κάθε σχέση με σειρά από τη πρώτη ως τη τελευταία άρθρωση παίρνουμε τον ολοκληρωμένο ομογενή πίνακα μετασχηματισμού  $T_{03}$  που μας δίνει τη θέση και προσανατολισμό του άκρου.

$$T_{03} = T_{01} \cdot T_{12} \cdot T_{23} \quad (1.12)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos q_1 \cdot \cos(q_2 + q_3) & -\sin q_1 & \cos q_1 \cdot \sin(q_2 + q_3) & \cos q_1 \cdot (a_2 \cdot \sin q_2 + a_3 \cdot \sin(q_2 + q_3)) \\ \sin q_1 \cdot \cos(q_2 + q_3) & \cos q_1 & \sin q_1 \cdot \sin(q_2 + q_3) & \sin q_1 \cdot (a_2 \cdot \sin q_2 + a_3 \cdot \sin(q_2 + q_3)) \\ -\sin(q_2 + q_3) & 0 & \cos(q_2 + q_3) & a_1 + a_2 \cdot \cos q_2 + a_3 \cdot \cos(q_2 + q_3) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Για την επίλυση της ευθείας κινηματικής χρησιμοποιείται και η μέθοδος DH (Denavit-Hartenberg) παραμέτρων. Αυτό βοηθάει στην κατανόηση μιας κοινώς αποδεκτής μεθοδολογίας, για τη μελέτη και σχεδίαση, ανάμεσα στους μηχανικούς ρομποτικής.

Στην ανάλυση DH περιγράφουμε το ρομπότ με δύο βασικά στοιχεία. Τους συνδέσμους, που αριθμούνται από το 0 μέχρι n, και τις αρθρώσεις όπου με τη σειρά τους αριθμούνται από το 1 μέχρι n. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, σε κάθε σύνδεσμο συνάπτουμε ένα πλαίσιο  $x_i$ - $y_i$ - $z_i$ . Στην πραγματικότητα δεν είμαστε αναγκασμένοι να συνάψουμε το πλαίσιο πάνω στο σώμα του συνδέσμου, πάρα μόνο το πλαίσιο αυτό να βρίσκεται πάνω στον άξονα κίνησης. Για τη λύση της εμπρόσθιας κινηματικής με τη μέθοδο DH, μας δίνεται η δυνατότητα λύσης με έναν ελάχιστο αριθμό τεσσάρων παραμέτρων μαζί με 3 βασικές αρχές. Τα στοιχεία παραμέτρων παρουσιάζονται στο Πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1. Στοιχεία παραμέτρων Denavit-Hartenberg

Παράμετρος	Όνομα	Περιγραφή	Μετακίνηση
$\theta_i$	Γωνία άρθρωσης	Περιστροφή γύρω από τον <b>άξονα</b> $z_{i-1}$ (Μεταβλητή σε περιστροφικές αρθρώσεις Σταθερή σε μεταφορικές αρθρώσεις)	Περιστροφή
$d_i$	Μετατόπιση άρθρωσης	Μετατόπιση κατά μήκος του <b>άξονα</b> $z_{i-1}$ (Μεταβλητή σε μεταφορικές αρθρώσεις Σταθερή σε περιστροφικές αρθρώσεις)	Μετάθεση
$a_i$	Μήκος συνδέσμου	Απόσταση κατά μήκος του <b>άξονα</b> $x_i$ (δηλαδή του κοινού κάθετου) από $z_{i-1}$ προς $z_i$	Μετάθεση

Παράμετρος	Όνομα	Περιγραφή	Μετακίνηση
$a_i$	Στροφή συνδέσμου	Πόσο γέρνει ο ένας z-άξονας σε σχέση με τον προηγούμενο.	Περιστροφή

- Μία βασική αρχή στη μέθοδο DH είναι ότι ο  $z$  άξονας του συνδέσμου  $j-1$  ευθυγραμμίζεται με τον άξονα περιστροφής (ή μετάθεσης) της άρθρωσης  $j$ , κρατώντας έτσι τον  $z$  πάντα ως άξονα περιστροφής (ή μετάθεσης).

- Δεύτερη βασική αρχή είναι ότι ο  $x$  άξονας του πλαισίου  $\{i\}$  είναι κάθετος στους  $z$  άξονες των πλαισίων  $\{i-1\}$  και  $\{i\}$ .

- Τρίτη και τελευταία βασική αρχή είναι ότι τα τέσσερα DH παραμετρικά στοιχεία  $(\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i)$  περιγράφουν τη θέση του πλαισίου  $\{i\}$  και  $\{i-1\}$

Ακολουθώντας τις παραπάνω αρχές και με τη χρήση των παραμέτρων, μπορούμε να εφαρμόσουμε 4 μετασχηματισμούς με τη παρακάτω σειρά :

Περιστροφή στον άξονα  $z$  για  $\theta$  μοίρες.

$$T_{Rz}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} R_z(\theta) & 0_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

Μεταφορά κατά μήκος του  $z$  άξονα κατά  $d$ .

$$T_z(\mathbf{d}) = \begin{bmatrix} & 0 \\ I & 0 \\ & d \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

Μεταφορά κατά μήκος του  $x$  άξονα κατά  $a$ .

$$T_x(\mathbf{a}) = \begin{bmatrix} & \mathbf{a} \\ I & 0 \\ & 0 \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

Περιστροφή στον άξονα  $x$  για  $\alpha$  μοίρες.

$$T_{Rx}(\boldsymbol{\alpha}) = \begin{bmatrix} R_x(\alpha) & 0_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

Ο ομογενής μετασχηματισμός μεταξύ της άρθρωσης  $j$  και  $j-1$  είναι:

$$T_{j-1}^j = T_{Rz}(\boldsymbol{\theta}) \cdot T_z(\mathbf{d}) \cdot T_x(\mathbf{a}) \cdot T_{Rx}(\boldsymbol{\alpha}) \quad (1.17)$$

Έτσι ο ομογενής μετασχηματισμός για το πλαίσιο  $n$  του άκρου του ρομποτικού βραχίονα σε σχέση με το πλαίσιο βάσης υπολογίζεται ως εξής:

$$T_0^n = \prod_{j=1}^n T_{j-1}^j \quad (1.18)$$

### 1.7.3 Αντίστροφη κινηματική

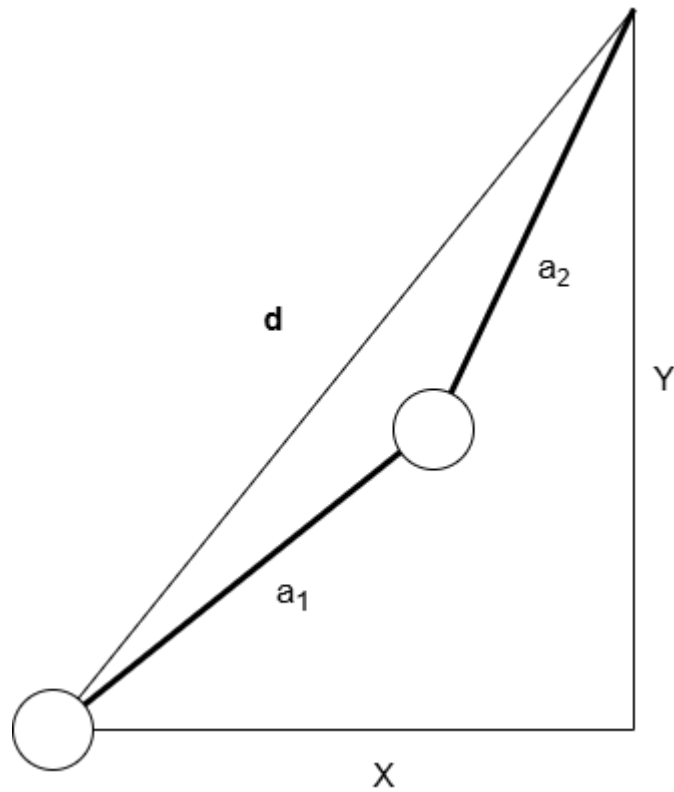
Στη αντιστροφή κινηματική, ο σκοπός μας είναι να βρούμε τις κλίσεις των γωνιών που διαγραφούν οι αρθρώσεις, γνωρίζοντας τη θέση του άκρου. Η αντίστροφη κινηματική είναι θεμελιώδες εργαλείο για την ανάπτυξη ευφών, προσαρμοστικών και ικανών ρομποτικών συστημάτων σε πολλούς τομείς της τεχνολογίας. Παίζει μεγάλο ρόλο στην λεπτομερή λειτουργία χειρουργικών ρομπότ καθώς και σε ανθρωπόμορφα ρομπότ. Είναι απαραίτητη για τον έλεγχο ρομποτικών συστημάτων με πολλαπλές αρθρώσεις, διότι διασφαλίζει ακρίβεια και προσαρμοστικότητα σε πραγματικό χρόνο. Επίσης βοηθά στην αυτοματοποίηση και στη φυσική αλληλεπίδραση ρομπότ με το περιβάλλον. Έχοντας για παράδειγμα τη **εικόνα**, διαδραματίζεται ένας ρομποτικός βραχίονας και στον ίδιο χώρο ένα αντικείμενο που μέλει να αρπάξει το ρομπότ. Τα σύγχρονα και ευφυή ρομποτικά συστήματα μπορούν πλέον να υπολογίζουν τη θέση αντικειμένων στο χώρο, σε σχέση με το άκρο ή τη βάση τους, με τη βοήθεια αισθητήρων και καμερών. Εδώ παίρνει θέση το πρόβλημα της αντίστροφης κινηματικής και τίθεται το εξής ερώτημα ποιες είναι οι γωνίες που πρέπει να χαράξει κάθε κινητήρας ώστε το άκρο του βραχίονα να έρθει σε επαφή έτσι ώστε να αρπάξει το αντικείμενο;

Η επίλυση της αντίστροφης κινηματικής επιτυγχάνεται με δύο βασικούς τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι η λύση κλειστής μορφής που βασίζεται σε τριγωνομετρικά εργαλεία. Ο δεύτερος τρόπος είναι η μαθηματική βελτιστοποίηση όπου μειώνομαι το σφάλμα απόστασης μεταξύ της θεμιτής θέσης και της θέσης του άκρου. Καθένας επιλέγεται με βάση τις παραμέτρους που δίνονται και αφορούν το φάκελο εργασίας, το πλήθος των αρθρώσεων και τη μορφολογία των συνδέσμων.

Συνάρτηση μαθηματικής βελτιστοποίησης:

$$\min_q \|x - f(q)\| \quad (1.19)$$

Παρακάτω μελετάται η φόρμα **αντίστροφης κινηματικής** κλειστής μορφής. Για λόγους ευκολίας το παράδειγμα εφαρμόζεται πάνω σε ένα ρομποτικό βραχίονα που κινείται σε διδιάστατο χώρο και διαθέτει δύο αρθρώσεις, συνεπώς δύο βαθμούς ελευθέριας Σχήμα 1.4.



Σχήμα 1.5. Ρομποτικός βραχίονας δύο αρθρώσεων.

Επομένως για το παρόν πρόβλημα έχουμε φάκελος εργασίας:

$$H = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^2 \quad (1.20)$$

Διάνυσμα αρθρώσεων :

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^2 \quad (1.21)$$

Για μία γνωστή θέση  $\xi$  στο χώρο  $\mathbf{H}$ , που συνήθως αντιπροσωπεύει ένα αντικείμενο, η λύση κλειστής μορφής περιγράφεται από τη παρακάτω σχέση:

$$Q = f^{-1}(\xi) \quad (1.22)$$

Για τη λύση του προβλήματος της αντίστροφης κινηματικής κλειστής μορφής εφαρμόζεται τριγωνομετρία.

Σχήμα 1.5. Εφαρμογή τριγωνομετρίας σε ρομποτικό βραχίονα δύο αρθρώσεων.

Από το θεώρημα του Πυθαγόρα γνωρίζουμε ότι:

$$d^2 = x^2 + y^2 \quad (1.23)$$

Καθώς και από το νόμο του συνημίτονου γνωρίζουμε ότι:

$$d^2 = a_1^2 + a_2^2 - 2 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot \cos(\theta) \quad (1.24)$$

$$\cos(\theta) = \frac{a_1^2 + a_2^2 - d^2}{2 \cdot a_1 \cdot a_2}$$

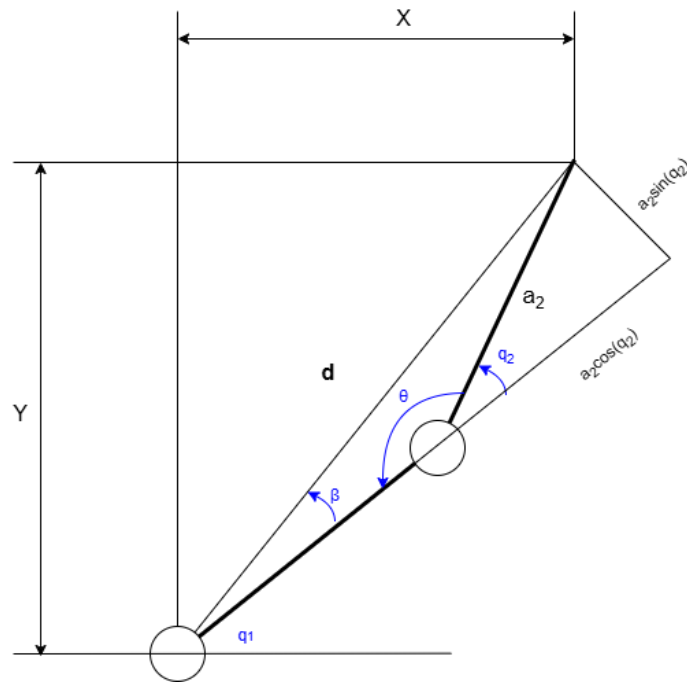
Επίσης ισχύει:

$$\begin{aligned} q_2 &= \pi - \theta \\ \cos(q_2) &= \cos(\pi - \theta) \\ &= \cos(\pi) \cdot \cos(a) + \sin(\pi) \cdot \sin(a) \\ &= -\cos(a) \\ &= \frac{d^2 - a_1^2 - a_2^2}{2 \cdot a_1 \cdot a_2} \end{aligned}$$

Έτσι καταλήγουμε:

$$q_2 = \begin{cases} \pi - \cos^{-1} \left( \frac{a_1^2 + a_2^2 - x^2 - y^2}{2 \cdot a_1 \cdot a_2} \right) \\ \cos^{-1} \left( \frac{x^2 + y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2 \cdot a_1 \cdot a_2} \right) \end{cases} \quad (1.25)$$

Με αυτό τον τρόπο καταλήγουμε σε ένα αποτέλεσμα με δύο λύσεις, καθώς και οι δύο μπορεί να εξυπηρετούν το πρόβλημά μας. Συνεχίζουμε για να βρούμε και τη γωνία  $q_1$  που θα φέρει το άκρο μας στην επιθυμητή θέση.



Σχήμα 1.6. Εφαρμογή τριγωνομετρίας σε ρομποτικό βραχίονα δύο αρθρώσεων.

Για να βρούμε τη γωνία  $q_1$  ξεκινάμε χρησιμοποιώντας το νόμο της εφαπτομένης:

$$\tan(q_1 + \beta) = \frac{x}{y} \quad (1.26)$$

$$q_1 = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) - \beta$$

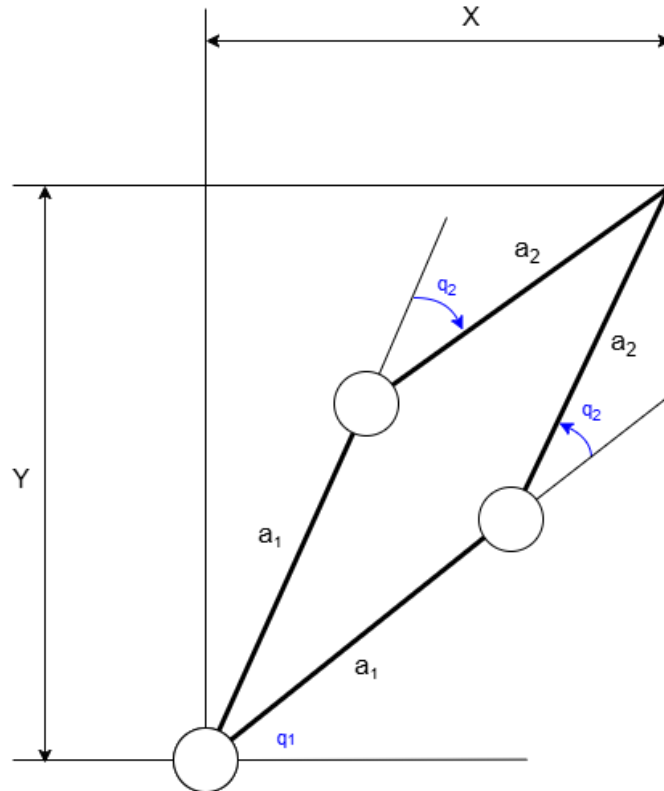
Καθώς και από το νόμο των συνημίτονων ισχύει:

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{a_2 \cdot \sin(q_2)}{a_1 + a_2 \cdot \cos(q_2)}\right) \quad (1.27)$$

Έτσι καταλήγουμε στο εξής αποτέλεσμα για τη γωνία  $q_1$ :

$$q_1 = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{a_2 \cdot \sin(q_2)}{a_1 + a_2 \cdot \cos(q_2)}\right) \quad (1.28)$$

Από τα αποτελέσματα (1.27) και (1.30) καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η λύση είναι διπλή Σχήμα 1.6, δηλαδή για να φτάσουμε στο θεμιτό αποτέλεσμα υπάρχουν δύο διαμορφώσεις των αρθρώσεων  $q \in \mathbb{R}^2$  για τη τελική θέση του άκρου  $x \in \mathbb{R}^2$ .



Σχήμα 1.7. Διπλή λύση ρομποτικού βραχίονα δύο αρθρώσεων.

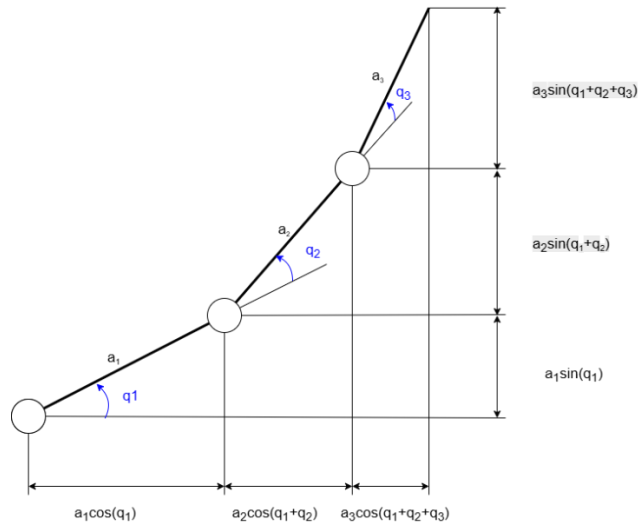
Με τις παραπάνω λύσεις να περιγράφονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$Q = \begin{cases} \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{a_2 \cdot \sin(q_2)}{a_1 + a_2 \cdot \cos(q_2)}\right) \\ \pi - \cos^{-1}\left(\frac{a_1^2 + a_2^2 - x^2 - y^2}{2 \cdot a_1 \cdot a_2}\right) \end{cases} \quad (1.29)$$

Ή

$$Q = \begin{cases} \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{a_2 \cdot \sin(q_2)}{a_1 + a_2 \cdot \cos(q_2)}\right) \\ \cos^{-1}\left(\frac{x^2 + y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2 \cdot a_1 \cdot a_2}\right) \end{cases} \quad (1.30)$$

Για ένα ρομποτικό βραχίονα με τρεις αρθρώσεις Σχήμα 1.7, το σύστημα είναι υποκαθορισμένο (underdefined) διότι το πλήθος των αρθρώσεων είναι μεγαλύτερο από το μέγεθος διάστασης του χώρου. Αυτό σημαίνει ότι το πρόβλημα έχει άπειρες λύσεις.



Σχήμα 1.8. Ρομποτικός βραχίονας τριών αρθρώσεων.

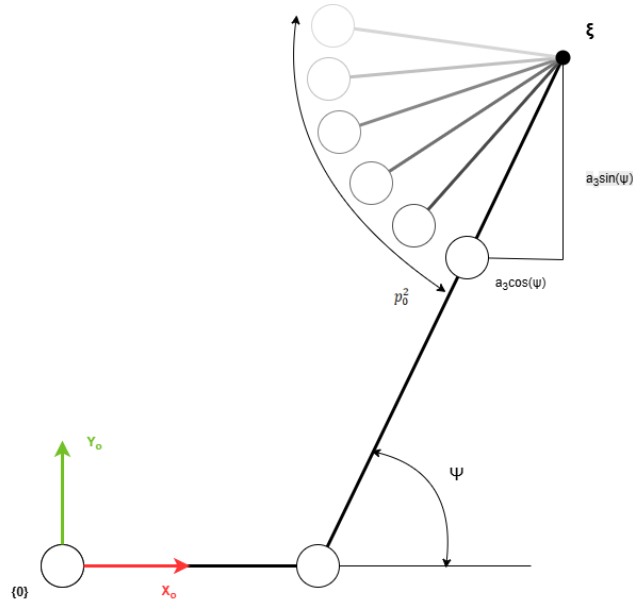
Για το συγκεκριμένο παράδειγμα έχουμε φάκελος εργασίας:

$$H = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^2$$

Διάνυσμα αρθρώσεων :

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^3$$

Το κόλπο στη περίπτωση που το πρόβλημα έχει άπειρες λύσεις, είναι ότι ο προσανατολισμός  $\Psi$  του άκρου μπορεί να καθοριστεί σχεδόν αυθαίρετα.



Σχήμα 1.9. Απεικόνιση άπειρων λύσεων.

Τότε η θέση του πλαισίου του δεύτερου συνδέσμου  $p_0^2$  υπολογίζεται ως εξής:

$$p_0^2 = \begin{bmatrix} x - a_3 \cdot \cos(\Psi) \\ y - a_3 \cdot \sin(\Psi) \end{bmatrix} \quad (1.31)$$

Γνωρίζοντας τη θέση  $p_0^2$  του δεύτερου συνδέσμου, λύνουμε για τις υπολειπόμενες αρθρώσεις με αντίστροφη κινηματική όπως αναλύθηκε στο πρόβλημα αντίστροφης κινηματικής για ρομποτικό βραχίονα δύο αρθρώσεων:

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = f^{-1}(p_0^2) \quad (1.32)$$

Άρα έχουμε:

$$q_2 = \begin{cases} \pi - \cos^{-1} \left( \frac{a_1^2 + a_2^2 - (p_0^2)^T \cdot p_0^2}{2 \cdot a_1 \cdot a_2} \right) \\ \cos^{-1} \left( \frac{(p_0^2)^T \cdot p_0^2 - a_1^2 - a_2^2}{2 \cdot a_1 \cdot a_2} \right) \end{cases}$$

$$q_1 = \tan^{-1} \left( \frac{x_2}{x_1} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{a_2 \cdot \sin(q_2)}{a_1 + a_2 \cdot \cos(q_2)} \right)$$

$$q_3 = \Psi - (q_1 - q_1)$$

## 1.8 Ιακωβιανοί Πίνακες

Οι Ιακωβιανοί πίνακες είναι ένα πολύ βασικό εργαλείο στα μαθηματικά της ρομποτικής, ιδιαίτερα στον τομέα της κινηματικής και της δυναμικής μελέτης των ρομποτικών βραχιόνων. Οι Ιακωβιανοί πίνακες είναι πίνακες παραγωγών οι οποίοι συνδέουν τις ταχύτητες των αρθρώσεων του ρομπότ με την ταχύτητα του άκρου η γενική μορφή ενός Ιακωβιανού πίνακα είναι:

$$\vec{v} = J(\vec{q}) \cdot \dot{\vec{q}} \quad (1.33)$$

- Όπου  $\vec{v}$  είναι το διάνυσμα ταχύτητας του άκρου.
- Το  $\dot{\vec{q}}$  είναι οι ταχύτητες των αρθρώσεων.
- Και  $J(q)$  είναι ο Ιακωβιανός πίνακας, ο οποίος εξαρτάται από τις τρέχουσες γωνίες των αρθρώσεων.

Οι Ιακωβιανοί πίνακες χρησιμοποιούνται σε πολλούς τομείς στη ρομποτική. Για την ανάλυση κινηματικής, με τον Ιακωβιανό μπορείς να βρεις πόσο γρήγορα κινείται το άκρο του ρομπότ με βάση τις ταχύτητες των αρθρώσεων και αντίστροφα μπορείς να βρεις τις απαραίτητες ταχύτητες στις αρθρώσεις για να πετύχεις μια συγκεκριμένη κίνηση του άκρου. Όσον αφορά τον έλεγχο του ρομπότ οι περισσότεροι ελεγκτές ρομπότ χρειάζονται τον Ιακωβιανό πάνω για να μετατρέπουν επιθυμητές κίνησης του άκρου σε εντολές για τους κινητήρες. Επίσης στη δυναμική μελέτη ενός ρομπότ Ιακωβιανός βοηθάει στον υπολογισμό των δυνάμεων και ροπών που αναπτύσσονται στις αρθρώσεις όταν το ρομπότ κινείται ή όταν ασκούνται εξωτερικές δυνάμεις. Τέλος για την ανίχνευση προβλημάτων όταν ο Ιακωβιανός γίνεται μη αναστρέψιμος σημαίνει ότι το ρομπότ είναι σε ιδιομορφία (singularity) και μπορεί να χάσει ελευθερίες κίνησης. Αυτό είναι κρίσιμο για την ασφάλεια και τον σχεδιασμό τροχιών.

Έστω ότι ο ρομποτικός βραχίονας από την **Εικόνα 1.5**. Για την Ιακωβιανή ανάλυση πρέπει να βρούμε πρώτα που βρίσκεται το άκρο του ρομπότ δηλαδή τις συντεταγμένες  $x$ ,  $y$ , όταν γνωρίζουμε τις γωνίες των αρθρώσεων:

$$\begin{aligned} x &= a_1 \cdot \cos(q_1) + a_2 \cdot \cos(q_1 + q_2) \\ y &= a_1 \cdot \sin(q_1) + a_2 \cdot \sin(q_1 + q_2) \end{aligned}$$

Ο Ιακωβιανός είναι ο πίνακας με τις μερικές παραγώγους των  $x$  και  $y$  ως προς τις γωνίες:

$$J(q_1, q_2) = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial q_1} & \frac{\partial x}{\partial q_2} \\ \frac{\partial y}{\partial q_1} & \frac{\partial y}{\partial q_2} \end{bmatrix} \quad (1.34)$$

Υπολογίζουμε τις παραγώγους ως εξής:

$$\frac{\partial x}{\partial q_1} = -a_1 \cdot \sin(q_1) - a_2 \cdot \sin(q_1 + q_2)$$

$$\frac{\partial x}{\partial q_2} = -a_2 \cdot \sin(q_1 + q_2)$$

$$\frac{\partial y}{\partial q_1} = a_1 \cdot \cos(q_1) + a_2 \cdot \cos(q_1 + q_2)$$

$$\frac{\partial y}{\partial q_2} = a_2 \cdot \cos(q_1 + q_2)$$

Άρα ο Ιακωβιανός πίνακας είναι:

$$J(q_1, q_2) = \begin{bmatrix} -a_1 \cdot \sin(q_1) - a_2 \cdot \sin(q_1 + q_2) & -a_2 \cdot \sin(q_1 + q_2) \\ a_1 \cdot \cos(q_1) + a_2 \cdot \cos(q_1 + q_2) & a_2 \cdot \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \quad (1.35)$$

Πολλαπλασιάζοντας το πίνακα (1.35) με το διάνυσμα των γωνιακών ταχυτήτων  $\dot{q}_1, \dot{q}_2$  παίρνουμε τη γραμμική ταχύτητα του άκρου:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = J(q_1, q_2) \cdot \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \quad (1.36)$$

Οι Ιακωβιανοί πίνακες λοιπόν, είναι ο μαθηματικός σύνδεσμος ανάμεσα στον ‘κόσμο των κινητήρων’ και τον ‘κόσμο των κινήσεων’. Είναι απαραίτητοι για έλεγχο, προγραμματισμό τροχιών, ανάλυση κινηματικής και ανίχνευση προβλημάτων κίνησης. Χωρίς τους Ιακωβιανούς πίνακες δεν μπορείς να ελέγξεις ρομπότ με ακρίβεια στο χώρο.

## 1.9 Στόχοι και Περιορισμοί του Έργου

Ο σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η κατασκευή ενός ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού που να προσομοιάζει το ανθρώπινο χέρι. Η μελέτη έχει διεξαχθεί ώστε να καλύψει ένα ευρύ φάσμα εργασιών με απώτερο σκοπό την κατασκευή ενός ευέλικτου και εύχρηστου ρομποτικού βραχίονα που θα είναι ανοιχτός σε μελλοντικές αναβαθμίσεις καθώς και δεκτικός σε εξωτερικά σήματα για τον έλεγχο του από τον υπολογιστή και διάφορα άλλα συστήματα ελέγχου όπως ένα απτικό γάντι. Σε πρώτη φάση ο έλεγχος του θα γίνεται μέσω εντολών που θα εισάγονται στο σύστημα ελέγχου του βραχίονα. Περισσότερες κινήσεις που χαρακτηρίζουν την επιδεξιότητα του χεριού θα γίνουν απευθείας από το λογισμικό του ρομποτικού χεριού, όπως είναι η επίδειξη κάποιων χειρονομιών.

- **Ανάπτυξη ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού**

Η κατασκευή ενός ανθρωπόμορφου ρομποτικού βραχίονα προϋποθέτει την υλοποίηση 5 δαχτύλων ενός εκ του οποίου είναι ο αντίχειρας ,την παλάμη, τον καρπό και τον πήχη. Η αυξημένη πολυπλοκότητα του ανθρώπινου χεριού αντικατοπτρίζεται στην προσπάθεια για την κατασκευή ενός ανθρωπόμορφου ρομποτικού βραχίονα. Το ανθρώπινο χέρι (πήχης ,καρπός ,παλάμη) διαθέτει 24 βαθμούς ελευθερίας, 4 βαθμοί ελευθερίας βρίσκονται σε κάθε δάχτυλο 3 των οποίων αφορούν την έκταση και κάμψη των οστών του δαχτύλου και 1 για την απαγωγή και προσαγωγή. Ο αντίχειρας είναι πιο πολύπλοκος και διαθέτει 5 βαθμούς ελευθερίας. Τέλος ο ανθρώπινος καρπός διαθέτει 2 βαθμούς ελευθερίας, 3 μαζί με τη ελαφριά περιστροφική κίνηση που υποστηρίζεται ότι εκτελείτε στο καρπό και τέλος 1 βαθμό ελευθερίας έχει ο πήχης, δίνοντας μας την ικανότητα της περιστροφής της παλάμης. Ένας ακόμα πολύ σημαντικός παράγοντας είναι το δέρμα του ανθρώπινου χεριού το οποίο παίζει σημαντικό ρόλο στο δραγμό, λόγω της ιδιότητα της τριβής που το διακατέχει. Τέλος, μεγάλο ρόλο στη λειτουργικότητα του ανθρώπινου χεριού παίζει η αίσθηση της αφής και της δύναμης.

### • Περιορισμοί

Για μια κατασκευή που θα αντανάκλα τη φύση του ανθρώπινου χεριού πρέπει να λάβουμε υπόψη μας τα παραπάνω χαρακτηριστικά κάτι που αυξάνει την πολυπλοκότητα κατακόρυφα. Επίσης με την εισαγωγή πολλών αρθρώσεων αυξάνεται και η ανάγκη για τη χρήση πολλών κινητήριων μέσων. Παραταύτα, η κατασκευή πρέπει να μελετηθεί ώστε τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν να έχουν την κατάλληλη επιφάνεια τριβής ώστε να μην γλιστράνε αντικείμενα από την λαβή του ρομποτικού βραχίονα. Επίσης πρέπει να αναλογιστούμε την ανατροφοδότηση από του συστήματος ελέγχου από αισθητήρια πίεσης και θερμοκρασίας για την υλοποίηση ενός κλειστού βρόχου ελέγχου.

### • Εύρωστη κατασκευή

Όπως αναφέρθηκε η κατασκευή ρομποτικών βραχιόνων γίνεται από εκλεπτυσμένα υλικά όπως είναι ανθρακονήματα, καλούπια σιλικόνης και μεταλλικά κομμάτια. Όσον αφορά τα ενεργητικά κομμάτια ενός ρομποτικού βραχίονα συνήθως συναντάμε υδραυλικά συστήματα ή ηλεκτρονικά κινητήρια μέσα, το κόστος των οποίων μπορεί να ξεκινάει από μερικά ευρώ και να φτάνει μέχρι και χιλιάδες ευρώ. Παραταύτα ο υπολογιστής που είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο του ρομποτικού βραχίονα πρέπει να είναι αντάξιος ώστε να ανταπεξέλθει στις ανάγκες του συστήματος. Ξεκινώντας από τις απλές λειτουργίες η απαίτηση αυτών για υπολογιστική δύναμη δεν είναι σημαντικά μεγάλη. Αντιθέτως για ένα σύγχρονο σύστημα, με γνώμονα τις τρέχουσες εξελίξεις, καθώς και για χρήση τεχνίτης νοημοσύνης και νευρωνικών δικτύων απαιτεί μεγάλη υπολογιστική δύναμη καθιστώντας τη χρήση πολυπύρηνων επεξεργαστών αναγκαία. Επιπλέον μεγάλης σημασίας είναι αξιόπιστοι κώδικες για την υλοποίηση κλειστών βροχών. Επιτρέποντας έτσι τον έλεγχο της δύναμης που ασκείται στη παλάμη είτε σε κάθε δάχτυλο ξεχωριστά καθώς και τον έλεγχο θερμοκρασίας διαφόρων αντικειμένων που κρατεί.

### • Περιορισμοί

Η μελέτη για τη μείωση του κόστους παραγωγής συστημάτων και μηχανημάτων παίζει βασικό ρόλο για την ανάπτυξη διαφόρων τύπου εφαρμογών. Η αγορά των προαναφερόμενων υλικών για την κατασκευή αυξάνει κατά πολύ το κόστος. Επιπρόσθετα ή επεξεργασία τέτοιων υλικών φέρνει την ανάγκη για CNC μηχανήματα καθώς και εξειδικευμένες γνώσεις χειρισμού των μηχανημάτων. Η επιλογή φθηνών κινητήριων μέσων ελαττώνει κατά πολύ τη δύναμη αρπαγής του βραχίονα και μας περιορίζει στο κατασκευαστικό κομμάτι όσον αφορά τη διάταξη των κινητήριων. Η επιλογή του υπολογιστή για το δικό μας σύστημα παίζει επίσης κρίσιμο ρόλο. Πρώτα από όλα πρέπει να γίνει μελέτη των αναγκών του συστήματός μας όπως είναι το πλήθος των κινητήριων μέσων που θα ελέγχει ο υπολογιστής, καθώς και το μέγεθος του υπολογιστή αμφότερα με το μέγεθος του βραχίονα

πρέπει να συμβαδίζουν. Επίσης ο υπολογιστής πρέπει να καλύπτει την επεξεργαστική δύναμη που κρίνεται αναγκαία από το λογισμικό του συστήματος. Επιπλέον, ένας παράγοντας στην επιλογή της υπολογιστικής μονάδας είναι η υποστήριξη ασύρματων μέσων επικοινωνίας. Η ενσωμάτωση κλειστών βρόχων ελέγχου χρήζει αναγκαία τη παρουσία αισθητήρων, εισάγοντας χωροταξικά προβλήματα, αυξάνοντας τις απαιτήσεις σε ενέργεια και υπολογιστική ισχύς.

## 1.10 Δομή Πτυχιακής

Η εκπόνηση πτυχιακής εργασίας αποτελεί μια πολυδιάστατη διαδικασία που απαιτεί συστηματική προσέγγιση και οργάνωση. Από την αρχική σύλληψη της ιδέας έως την τελική παρουσίαση των αποτελεσμάτων, κάθε στάδιο συμβάλλει καθοριστικά στην επιτυχία του εγχειρήματος. Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζεται η δομή της παρούσας πτυχιακής εργασίας, αναδεικνύοντας τα επιμέρους βήματα και τις μεθοδολογικές επιλογές που καθόρισαν την πορεία της.

**Στο 1ο κεφάλαιο** παρουσιάστηκαν τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες ρομποτικών βραχιόνων. Τόσο η δομή τους, όσο και η χρησιμότητάς τους διαφέρουν ριζικά, παρόλα αυτά συνεχίζουν να φέρουν την ίδια ονομασία, διότι η οι ενέργειες τους είναι μέσα σε εισαγωγικά ίδιες. Η μεταφορά του άκρου του ρομποτικού βραχίονα μέσα στο χώρο, όπου συνήθως φέρει κάποιο εργαλείο ή αρπάγη. Εφόσον η παρούσα πτυχιακή αφορά τα ανθρωπόμορφα ρομποτικά χέρια, ακολούθησε μια ανάλυση για τέτοιο είδους χέρια που συναντάμε σε ανθρωποειδές ρομπότ και σε προσθετικά χέρια. Εν συνεχεία, ειδικεύοντας το λόγο προς τα ρομποτικά συστήματα παρουσιάστηκαν δύο γνωρίσματα που βοηθάνε στη δόμηση ενός ρομποτικού συστήματος. Η μηχανική δομή και το σύστημα ελέγχου. Γνωρίζοντας τα παραπάνω, έμελλε να γίνει μια παρουσίαση του μαθηματικού υποβάθρου που περιτριγυρίζουν τη μελέτη ρομποτικών συστημάτων. Εργαλεία όπως η Κινηματική μελέτη και οι Ιακωβιανοί πίνακες βοηθάνε ένα μηχανικό ρομποτικής να λύσει σύνθετα προβλήματα. Κλείνοντας το 1ο κεφάλαιο, τελειώνει και η εισαγωγή της πτυχιακής εργασίας, μαζί με όλες τις γενικές γνώσεις για ρομποτικούς βραχίονες.

**Το 2ο κεφάλαιο** ανοίγει με την ανατομία του ανθρώπινου χεριού. Χτίζοντας τις βάσεις για τη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας ενός χεριού, ώστε να προχωρήσουμε στην “ανατομία” του ρομποτικού χεριού. Ακολουθεί λεπτομερής περιγραφή κάθε κομματιού που σχεδιάστηκε για το ρομποτικό βραχίονα. Στη συνέχεια περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας κάμψης και έκτασης των δαχτύλων, του καρπού και της συστοιχίας ελέγχου και κίνησης, αναλύοντας κάθε μονάδα ξεχωριστά. Το 2ο κεφάλαιο κλείνει με μια ανασκόπηση του ρομποτικού βραχίονα και απαντά σε ερωτήματα όπως: τι κατάλυση έχει το σύστημα που υλοποιήθηκε, πόσους βαθμούς ελευθερίας έχει το ρομποτικό χέρι και πως δουλεύει ο μηχανισμός κάμψης.

**Το 3ο κεφάλαιο** αναδεικνύει τη λειτουργικότητα του βραχίονα, μέσα από δύο πειράματα που πραγματοποιήθηκαν. Το πρώτο πείραμα αφορά μία καθολική δοκιμασία που ελέγχεται η ικανότητα του βραχίονα να εκτελεί λειτουργίες αρπαγής αντικειμένων, με αντικείμενα που κρίνονται αναγκαία από μία λίστα 43 κατηγοριών οικιακών αντικειμένων. Στο δεύτερο πείραμα που ακολουθεί αναδεικνύεται η ευελιξία του βραχίονα να εκτελεί τη νοηματική γλώσσα. Παρόλο που λείπει ένα δάχτυλο, διαγράφεται ξεκάθαρα το κάθε γράμμα του ελληνικού αλφάβητου. Τέλος παρουσιάζεται και αναλύεται ο κώδικα τηλεχειρισμού.

Κλείνοντας με το **4ο κεφάλαιο** παρουσιάζονται οι στόχοι που τέθηκαν, οι περιορισμοί του έργου και επερχόμενες αναβαθμίσεις.



## Κεφάλαιο 2ο: Μελέτη και Κατασκευή Ρομποτικού Βραχίονα

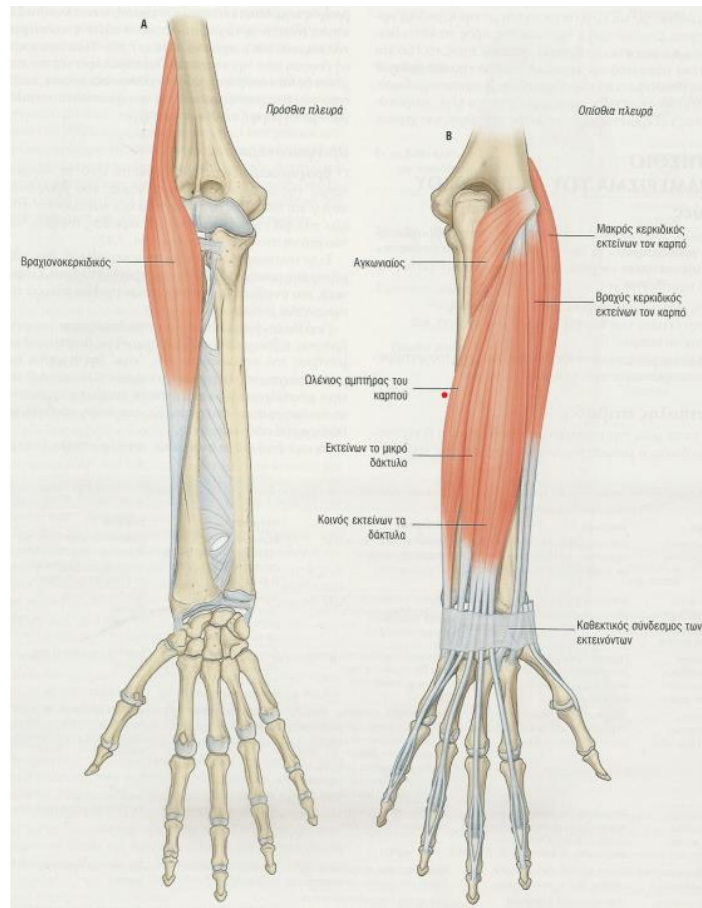
### 2.1 Ανατομία Ανθρώπινου Χεριού

Η απόκτηση των δεξιοτήτων χειρισμού εργαλείων υποστηρίζεται απρόταχτα ότι είναι η κύρια δύναμη πίσω από την εξέλιξη του χεριού. Η αρχέγονη «λαβή ρίψης» και η «λαβή ροπάλου», ανάλογη με την «σύλληψη ακριβείας» και τον «ισχυρό δραγμό», ήταν αναπαραγωγικά πλεονεκτήματα (όσο ισχυρότερη η λαβή, τόσο καλύτερος ο κυνηγός και καλύτερες οι πιθανότητες επιβίωσης). Τα ανατομικά χαρακτηριστικά, που κάνουν δυνατό το βελτιωμένο δραγμό, αναπτύχθηκαν σε εκατομμύρια χρόνια και κατέληξαν στην εκπληκτική λειτουργική ικανότητα του ανθρώπινου χεριού.

Μια δυσανάλογη περιοχή του εγκεφαλικού φλοιού είναι αφοσιωμένη στον έλεγχο των 40 περίπου μυών που είναι απαραίτητοι για να θέσουν σε λειτουργία το χέρι. Πιστεύεται σήμερα ότι η πολυπλοκότητα του ελέγχου στο επίπεδο του πρωτογενούς κινητικού φλοιού, ελαττώνεται σε ένα σύνολο νευρώνων με επιθυμητές κατευθύνσεις, οι οποίες απλώς καθορίζουν την κατεύθυνση της κίνησης του χεριού. Ο έλεγχος του δραγμού και άλλες στερεοτυπικές κινήσεις βασίζονται σε διακλαδούμενες κατερχόμενες προβολές και σπονδυλικά κυκλώματα που ορίζουν μια υποκείμενη βασική ομάδα μυϊκών συνεργειών. Αυτές οι συνέργειες μπορεί να συνδυαστούν και δυνητικά να απλοποιήσουν τον έλεγχο ενός εύρους πολύπλοκων κινήσεων. Ο αντίχειρας συνεισφέρει στο 40% περίπου της λειτουργικότητας του χεριού και είναι απαραίτητος για τον ακριβή και ισχυρό δραγμό. Είναι επίσης προικισμένος με τη μοναδική δυνατότητα για περιαγωγή και αντίθεση, μέσω της κίνησής του έξω από το επίπεδο του χεριού [26].

#### 2.1.1 Ανατομία του Πήχη

Ξεκινώντας από το πήχη, δυο οστά, η κερκίδα και η ωλένη αποτελούν το βασικό κορμό. Όσον αφορά τους μυς που συμβάλουν στην κίνηση του χεριού διακρίνουμε δυο κατηγορίες: τους λεγόμενους εξωγενείς μυς οι οποίοι βρίσκονται έξω από τη παλάμη, στο πήχη και κινούν τα δάχτυλα και τους εγγενείς μυς οι οποίοι βρίσκονται μέσα στη παλάμη και ρυθμίζουν την ακριβή κίνηση των δαχτύλων. Στον πήχη διακρίνουμε 20 μυς συνολικά, κατανεμημένους στο οπίσθιο και πρόσθιο διαμερίσμα, 15 από τους οποίους συμμετέχουν στη κίνηση των δαχτύλων και του καρπού. Επιπλέον τρία νευρά είναι υπεύθυνα για τον έλεγχο του συνόλου των μυών του βραχίονα, το διάμεσο και ωλένιο νεύρο που νευρώνουν τους μυς του προσθίου διαμερίσματος και το ακτινικό νεύρο το οποίο εκτείνεται στην πίσω επιφάνεια του πήχη και τροφοδοτεί τους μυς του οπίσθιου διαμερίσματος, προκαλώντας τους διαστολή και συστολή.



Εικόνα 2.1. Αναλυτική εικόνα ανατομίας ανθρώπινου άνω άκρου [62].

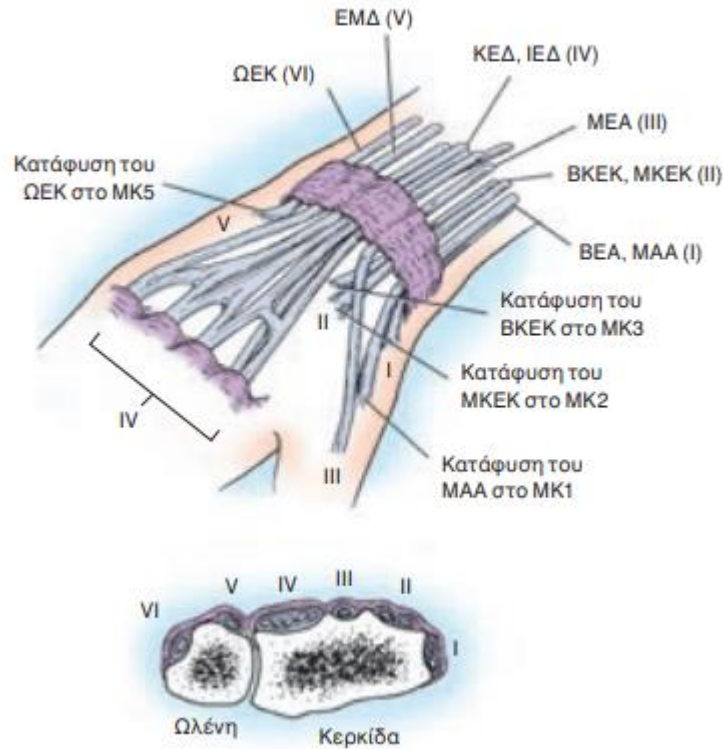
### 2.1.2 Ανατομία του Καρπού

Ο καρπός αποτελείται από το κεντρικό στίχο (σκαφοειδές, μηνοειδές, πυραμοειδές) και τον περιφερειακό στίχο (μείζων και ελάσσων πολύγωνο, κεφαλωτό, αγκιστρωτό). Η μεσοκάρπια άρθρωση σχηματίζεται από τη διάρθρωση μεταξύ των δύο στίχων, οι οποίοι είναι επίσης μέρος του συμπλέγματος του καρπού. Ο περιφερειακός στίχος είναι σταθερά συνδεδεμένος με τις βάσεις των μετακαρπίων, με τρόπο ώστε ο κινητός κεντρικός στίχος να έχει την ιδιότητα μιας παρεμβαλλόμενης μονάδας κίνησης στον καρπό. Το σκαφοειδές αποτελεί το συνδετικό κρίκο μεταξύ των δύο στίχων.



Εικόνα 2.2. Οστική ανατομία του χεριού [62].

Επίσης οι τένοντες των εκτεινόντων μυών σχηματίζουν έξι διαφορετικά διαμερίσματα στο επίπεδο του καρπού, καθώς περνάνε κάτω από τον καθεκτικό σύνδεσμο των εκτεινόντων. Αυτά τα διαμερίσματα αποτρέπουν το φαινόμενο χορδής τόξου (bowstringing) που θα συνέβαινε αλλιώς στην άρθρωση κατά την έκταση.



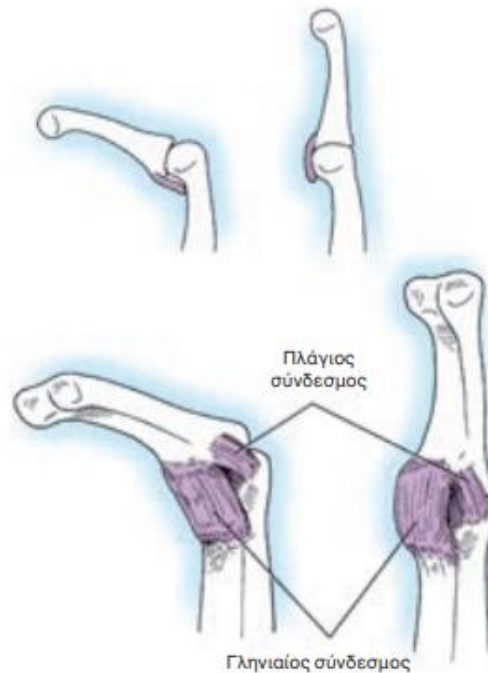
Εικόνα 2.3. Παρουσιάζονται τα έξι ραχιαία διαμερίσματα των εκτεινόντων τενόντων [63].

### 2.1.3 Ανατομία της Παλάμης και των δακτύλων

Οι καρπομετακαρπικές αρθρώσεις του δείκτη και του μέσου δακτύλου έχουν ελάχιστη κίνηση και σχηματίζουν τη σταθερή κεντρική ακτίνα του χεριού, ενώ τα κινητά μετακάρπια του παράμεσου και του μικρού δακτύλου μπορούν να καμφθούν και να περιστραφούν προς τη μέση γραμμή της παλάμης ώστε να ενισχυθεί ο δραγμός. Το μετακάρπιο του αντίχειρα αρθρώνεται στην πολυγωνομετακάρπια άρθρωση με το μείζον πολύγωνο. Αυτή η κοινή άρθρωση παρέχει στον αντίχειρα ένα ιδιαίτερο ευρύ τόξο κίνησης, που περιλαμβάνει την περιστροφή και την περιαγωγή και παράγει το μεγαλύτερο τμήμα του εύρους της κίνησης. Αρκετοί σύνδεσμοι είναι υπεύθυνοι για τη σταθεροποίηση της άρθρωσης.

Κάθε δάχτυλο έχει 3 αρθρώσεις την μετακαρποφαλαγγική ΜΚΦ, την εγγύς φαλαγγοφαλαγγική ΕΦΦ και την άπω φαλαγγοφαλαγγική ΑΦΦ. Οι ΜΚΦ αρθρώσεις των δακτύλων είναι τοποθετημένες αρκετά κοντά στο επίπεδο της περιφερικής παλαμιαίας πτυχής. Ο αντίχειρας έχει μια ΜΚΦ και μόνο μια ΦΦ άρθρωση. Τα δάκτυλα αποτελούνται από την εγγύς (ή κεντρική) φάλαγγα ΦΦ, μέση φάλαγγα ΜΦ και ονυχοφόρο (ή άπω) φάλαγγα ΟΦ, ενώ ο αντίχειρας αποτελείται μόνο από την εγγύς (ή κεντρική) και

ονυχοφόρο (ή άπω) φάλαγγα. Οι πλάγιοι σύνδεσμοι των ΜΚΦ αρθρώσεων παρέχουν πλάγια σταθερότητα, ενώ παράλληλα ο γληνιαίος σύνδεσμος εμποδίζει την υπερέκταση. Επειδή η κεφαλή των μετακαρπίων έχει έκκεντρο σχήμα βλέποντας την από το οβελιαίο επίπεδο (κατακόρυφο επίπεδο που χωρίζει το σώμα σε δεξί και αριστερό), οι πλάγιοι σύνδεσμοι είναι χαλαροί σε έκταση. Για αυτό τον λόγο, η απαγωγή και η προσαγωγή είναι εφικτές με τα δάκτυλα σε έκταση και περιορίζονται όταν οι ΜΚΦ αρθρώσεις είναι σε κάμψη. Η εγγύς και η άπω φαλαγγοφαλαγγική (ΦΦ) άρθρωση είναι μονοαξονικές και επιτρέπουν μόνο την κάμψη και την έκταση. Οι αρθρώσεις υποστηρίζονται από πλάγιους και βοηθητικούς πλάγιους συνδέσμους και έναν γληνιαίο σύνδεσμο Εικόνα 2.4.



Εικόνα 2.4. Η ανατομία του γληνιαίου συνδέσμου της εγγύς φαλαγγοφαλαγγικής άρθρωσης [63].

## 2.2 Βήματα Ανάπτυξης του Ρομποτικού Χεριού

Με την επιλογή του θέματος της παρούσας πτυχιακής, έμελλε να γίνει μια εκτενής έρευνα πάνω σε ρομποτικούς βραχίονες διάφορων τύπων. Πολλές πατέντες και διαφορετικές υλοποιήσεις, που αφορούν μηχανισμούς κάμψης μελετήθηκαν. Η σχεδίαση και κατασκευή ενός ανθρωπόμορφου ρομποτικού βραχίονα έχρηζε πληθώρα ιδεών και εργαλείων.

Η κατασκευής ενός ρομποτικού βραχίονα έφερε στην επιφάνεια την ανάγκη εκμάθησης ενός εργαλείου σχεδίασης CAD (Computer-Aided Design). Το έργο ξεκίνησε με την εκμάθηση του προγράμματος SolidWorks της **Dassault Systèmes**<sup>2025</sup> [27]. Επιλέχθηκε το συγκεκριμένο πρόγραμμα γιατί αποτελεί ένα από τα πιο δημοφιλή εργαλεία στον χώρο της μηχανολογίας, της βιομηχανικής παραγωγής και της σχεδίασης προϊόντων.

Το SolidWorks προσφέρει:

- 3D σχεδίαση εξαρτημάτων και συναρμολογήσεων (assemblies), που επιτρέπει τη δημιουργία μοντέλων με ακρίβεια, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παραγωγή, προτυποποίηση (3D printing), ή ανάλυση.

- 2D τεχνικά σχέδια (drafting), αυτόματη δημιουργία 2D σχεδίων από τα 3D μοντέλα, με διαστάσεις, τομές και σημειώσεις.
- Προσομοιώσεις & αναλύσεις (CAE). Περιλαμβάνει εργαλεία για στατική ανάλυση, θερμική ανάλυση, ανάλυση καταπόνησης (stress analysis), δυναμική κ.λπ.
- Sheet metal & weldments. Εξειδικευμένες δυνατότητες για σχεδίαση λαμαρινών και συγκολλήσεων.
- Σχεδίαση σωληνώσεων, και ηλεκτρικών καλωδιώσεων (routing). Εργαλεία για βιομηχανικές εγκαταστάσεις.
- Rendering & animation. Δημιουργία ρεαλιστικών εικόνων και βίντεο παρουσίασης των μοντέλων σου.
- Διαχείριση εκδόσεων & συνεργασία (PDM). Δυνατότητα ενσωμάτωσης με συστήματα διαχείρισης δεδομένων προϊόντων (Product Data Management).

Αφότου σχεδιάστηκαν τα κομμάτια στο SolidWorks, αποθηκεύτηκαν σε μορφή STL και εισήχθησαν σε πρόγραμμα slicer για περαιτέρω επεξεργασία. Τα προγράμματα slicer είναι εξειδικευμένα λογισμικά που χρησιμοποιούνται στον χώρο της τρισδιάστατης εκτύπωσης (3D printing). Ο βασικός τους ρόλος είναι να «μεταφράζουν» ένα τρισδιάστατο μοντέλο (συνήθως σε μορφή αρχείου STL, OBJ ή 3MF) σε οδηγίες που μπορεί να καταλάβει ο εκτυπωτής 3D. Αυτές οι οδηγίες είναι γραμμένες σε G-code, που είναι μια γλώσσα εντολών για CNC και 3D εκτυπωτές. Προγράμματα slicer χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές εφαρμογές, για τη κατασκευή πρωτότυπων, τη κατασκευή εξαρτημάτων, ιατρικών βοηθημάτων κ.λπ. Επίσης πολύ χρήσιμα είναι για εκπαιδευτικά και χομπίστικα έργα, όπου σχεδιάζουμε και εκτυπώνουμε αντικείμενα.

Ένα πρόγραμμα slicer:

- Κόβει (slice) το μοντέλο σε στρώσεις (layers), δηλαδή, χωρίζει το αντικείμενο σε πολύ λεπτές οριζόντιες φέτες που αντιστοιχούν στις διαδοχικές στρώσεις πλαστικού που θα κατασκευάσει ο εκτυπωτής.
- Καθορίζει τις παραμέτρους εκτύπωσης, όπως το πάχος στρώσης, η πυκνότητα και το μοτίβο πλήρωσης (infill), η ταχύτητα εκτύπωσης, η θερμοκρασία ακροφύσιου και πλάκας, και τα υποστηρίγματα (supports) για προεξοχές.
- Δημιουργεί τον G-code που καθοδηγεί το μηχάνημα πού να κινηθεί, πόσο πλαστικό να εναποθέσει, πότε και πόσο να ζεστάνει το ακροφύσιο και ελέγχει όλες τις λειτουργίες του εκτυπωτή κατά τη εκτύπωση.

Ακολούθως η κατασκευή του σώματος του ρομποτικού βραχίονα έγινε με τρισδιάστατη εκτύπωση πλαστικού. Έγινε χρήση δύο ειδών πλαστικού. Για την εκτύπωση δοκιμαστικών κομματιών χρησιμοποιήθηκε υλικό PLA καθώς προσφέρει οικονομική λύση και ευκολία χειρισμού. Τα τελικά σχέδια εκτυπώθηκαν από εκτυπωτή Bambu lab x1 [28], χάρη στην ταχύτητα και την υψηλή ακρίβεια που προσφέρει. Επίσης τη τελική κατασκευή επιλέχθηκε το υλικό **ApolloX**. Το υλικό ApolloX της FormFutura είναι ένα βιομηχανικής ποιότητας ASA filament, σχεδιασμένο για αντοχή σε υπεριώδη ακτινοβολία και περιβαλλοντικές συνθήκες, με εξαιρετική στατική ακρίβεια και χαμηλή θερμική παραμόρφωση [29].

## Κεφάλαιο 2

Η ροή του έργου απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα (...). Η διαδικασία ανάπτυξης ακολούθησε έναν ατέρμονο κύκλο που περιλάμβανε την επιλογή της δομής κατασκευής, τη σχεδίαση του μηχανισμού, την υλοποίηση μέσω εκτύπωσης των απαραίτητων εξαρτημάτων και τη δοκιμή της λειτουργικότητας. Η διαδικασία αυτή κατέλαβε το μεγαλύτερο κομμάτι στο χρόνο εκπόνησης της παρούσας πτυχιακής. Καθώς και με τη κατάληξη στο τελικό σχέδιο ή ροή αυτή βοήθησε στη βελτίωση του.

Η πρώτη προσέγγιση του έργου ήταν μια κατασκευή με τους κινητήρες χωνεμένους μέσα στη παλάμη του χεριού Εικόνα 2.5.



Εικόνα 2.5. Πρώτη προσέγγιση Ρομποτικού χεριού.

Παρότι η προσέγγιση αυτή υπήρξε ενθαρρυντική στην αρχή διότι απέτρεπε τη σχεδίαση περίπλοκων μηχανισμών για τη κάμψη των δαχτύλων, τελμάτωσε λόγω του όγκου που δημιουργούσαν οι κινητήρες σε συνδυασμό με τη δυσκολία διαχείρισης των καλωδίων αυτών και της περιπλοκότητας που εισάγει ο αντίχειρας. Ακόμα ένα πρόβλημα μείζονος σημασίας, ήταν το πρόβλημα του καρπού. Η ελευθερία κινήσεων του καρπού μελετήθηκε ξεχωριστά και έκρινε τη τελική μηχανολογική μορφή του βραχίονα. Το πρόβλημα του καρπού λύθηκε με τη χρήση ενός ακτινωτού σφαιρικού σαφές ρουλεμάν, με κωδικό προϊόντος GE-20-2RS Εικόνα 2.6.



Εικόνα 2.6. Ακτινωτό σφαιρικό ρουλεμάν.

Ακολουθώντας την ίδια ροή έργου όπως προαναφέρθηκε, σχεδιάστηκε νέος μηχανισμός κάμψης δαχτύλων ο οποίος υλοποιήθηκε και τέθηκε προς δοκιμές.

### 2.3 Μηχανική Δομή Ρομποτικού Χεριού

Κάθε πτυχή του ανθρώπινου χεριού που παρουσιάστηκε παραπάνω παίζει ένα σημαντικό σημαντικό ρόλο για τη λειτουργία του. Κατά την προσπάθεια του σχεδιασμού ενός ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού ήταν αναπόφευκτη η αντιγραφή μηχανισμών που διαθέτει το ανθρώπινο χέρι, καθώς επίσης διεξάχθηκε μελέτη αρκετών εγγράφων που αφορούν την κατασκευή ρομποτικών βραχιόνων. Πολλές και διαφορετικές προσεγγίσεις μελετήθηκαν για την κατασκευή ανθρωπόμορφων ρομποτικών χεριών για ερευνητικό σκοπό, προάγοντας νέους τρόπους για τη σχεδίαση ανθρωπόμορφων ρομποτικών βραχιόνων με τη μέθοδο της τρισδιάστατης σάρωσης και επεξεργασίας των αρχείων με **AutoCAD** λογισμικά [30]. Αξιοσημείωτος είναι επίσης ο πολυμήχανος τρόπος μετάδοσης κίνησης που αναπτύχθηκε από τη NASA σε συνεργασία με General Motors. Πάρα τα αυτά, ακολούθησαν ρομποτικοί βραχίονες με διαφόρων ειδών υλοποιήσεις επί του θέματος της κάμψης των δαχτύλων [31, [32, [33]. Η μελέτη συνεχίστηκε εμβαθύνοντας στον τρόπο κατασκευής και λειτουργίας των δαχτύλων [34]. Έχοντας μελετήσει ένα ευρύ φάσμα υλοποιήσεων και προσεγγίσεων του θέματος, σε συνδυασμό με προϊόντα αναρτημένα στο διαδίκτυο ξεκίνησε η κατασκευή του ρομποτικού βραχίονα σύμφωνα με τη δομή που παρουσιάζεται παρακάτω. Το τελικό αποτέλεσμα, είναι αντικείμενο πολλών ωρών σχεδιασμού και παραμετροποιήσεων. Η αρπάγη του ρομποτικού βραχίονα αποτελείται από τον αντίχειρα και τρία δάχτυλα τα οποία ακολουθούν το ίδιο μοτίβο κατασκευής και λειτουργίας. Με τη σειρά τους ακολουθούν η παλάμη όπου μέσω αυτής έγιναν οι οδεύσεις για τα νήματα που θα προσκολληθούν στους συνδέσμους των δαχτύλων και του καρπού. Μέσα στο πήχη θα στεγάζονται όλα τα ηλεκτρονικά κομμάτια του βραχίονα όπως είναι τα κινητήρια μέσα του βραχίονα, ο υπολογιστής, κάποια αισθητήρια, τα ηλεκτρονικά ισχύος και οι μπαταρίες.

Παρακάτω παρατίθενται τα μηχανολογικά σχέδια. Τα επιμέρους κομμάτια πάρθηκαν από το πρόγραμμα SolidWorks, όπου και σχεδιάστηκαν, σε μορφή .DWG και ακολούθησε περαιτέρω επεξεργασία με το λογισμικό **LibraCad** [35]. Το LibraCAD είναι ένα δωρεάν και ανοιχτού κώδικα λογισμικό σχεδίασης 2D CAD (Computer-Aided Design). Είναι γραμμένο σε C++ και βασίζεται στη βιβλιοθήκη Qt [64], επιτρέποντας γρήγορη απόκριση και σταθερότητα. Ο ανοιχτός κώδικάς του διατίθεται μέσω του GitHub, δίνοντας τη δυνατότητα σε χρήστες και προγραμματιστές να συνεισφέρουν ενεργά στην ανάπτυξή του.

Το LibreCad προσφέρει:

- **Υποστήριξη αρχείων DXF & συμβατότητα:** Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί κατά κύριο λόγο το πρότυπο αρχείων DXF (Drawing Exchange Format), που είναι συμβατό με άλλα δημοφιλή CAD λογισμικά όπως το AutoCAD και το SolidWorks, διευκολύνοντας την ανταλλαγή σχεδίων μεταξύ διαφορετικών συστημάτων.
- **Πλήρες σετ εργαλείων 2D σχεδίασης:** Περιλαμβάνει εργαλεία για γραμμές, τόξα, καμπύλες, κύκλους, ορθογώνια, πολυγωνικά σχήματα, κλίμακες, περιστροφές, συμμετρίες και διαστάσεις, καλύπτοντας πλήρως τις ανάγκες μιας τεχνικής ή μηχανολογικής σχεδίασης.
- **Διαχείριση επιπέδων (layers) & blocks:** Το LibreCAD υποστηρίζει τη δημιουργία και διαχείριση επιπέδων (layers) για καλύτερη οργάνωση των στοιχείων του σχεδίου, καθώς και τη χρήση blocks (ομάδες αντικειμένων) για επαναλαμβανόμενα στοιχεία, βελτιώνοντας την απόδοση και την ευχρηστία.
- **Πολυγλωσσική υποστήριξη & ενεργή κοινότητα:** Υποστηρίζει περισσότερες από 30 γλώσσες, ανάμεσά τους και τα ελληνικά, ενώ διαθέτει ισχυρή και ενεργή κοινότητα που παρέχει τεκμηρίωση, tutorials και forum υποστήριξης για την επίλυση προβλημάτων και την ανταλλαγή γνώσεων.
- Υποστηρίζει λειτουργικά συστήματα όπως **Windows, Linux** και **macOS**, προσφέροντας ευελιξία στην εγκατάσταση.
- Διαθέτει **διεπαφή χρήστη (UI)** απλή και προσαρμόσιμη, επιτρέποντας γρήγορη εκμάθηση ακόμα και από αρχάριους.
- Είναι ιδανικό για **μηχανικούς, αρχιτέκτονες, σχεδιαστές** και φοιτητές που χρειάζονται αξιόπιστο εργαλείο 2D σχεδίασης χωρίς κόστος.

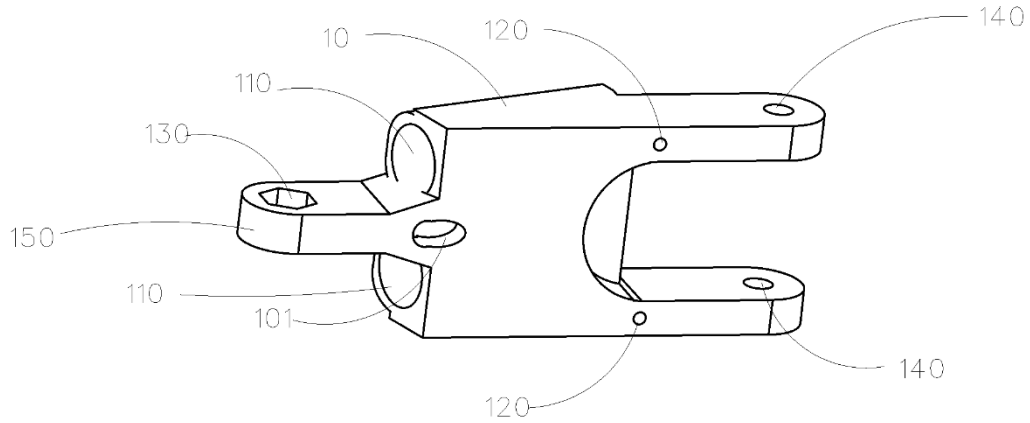
### 2.3.1 Δάχτυλα

Επιλέχθηκε ο αριθμός των τριών δαχτύλων, καθώς κρίθηκε απαραίτητο να μειωθεί το πλήθος των κινητήρων, μειώνοντας αμφότερα το κόστος και την πολυπλοκότητα της κατασκευής. Παρόλο της έλλειψης ενός δαχτύλου δεν επηρεάζεται η ικανότητα αρπαγής αντικειμένων, καθώς αυτή καθορίζεται από τη δομή των δαχτύλων, τους βαθμούς ελευθερίας, την επένδυση της αρπάγης και από το λογισμικό έλεγχο. Για τη δομή των δαχτύλων συνέβαλε σημαντικά η υλοποίηση των **Zhe Xu, Vikash Kumar** και **Emanuel Todorov** [36]. Η κατασκευή και λειτουργικότητα των δαχτύλων ακολουθεί την εξής δομή. Παρακάτω περιγράφεται ένα δάχτυλο το οποίο αντιστοιχεί και στα άλλα δύο.

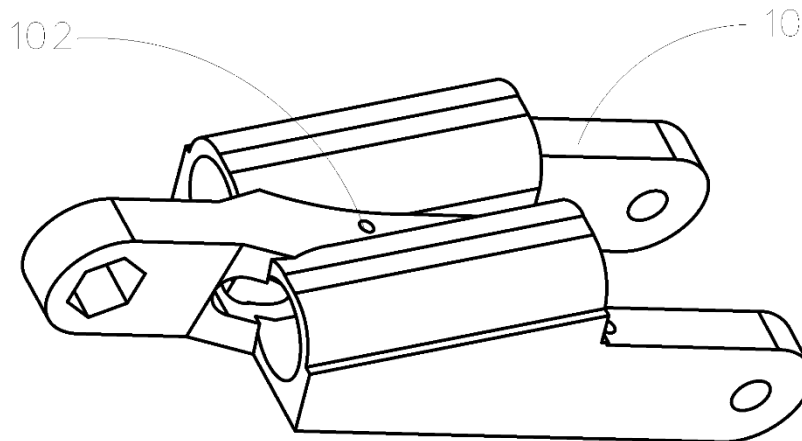
Ένα ανθρώπινο δάχτυλο χαρακτηρίζεται από **τρία κόκαλα**, την **εγγύς φάλαγγα ΕΦ** Σχήμα 2.1, η οποία βρίσκεται πάνω από το μετακάρπιο, τη **μέση φάλαγγα ΜΦ** Σχήμα 2.3 και την **ονυχοφόρο φάλαγγα ΟΦ** Σχήμα 2.2, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. **Τρεις κινητήρες** είναι υπεύθυνοι για τον έλεγχο κάθε δακτύλου.

**Δύο κινητήρες** αναλαμβάνουν την κίνηση της εγγύς φάλαγγας (10) ελέγχοντας έτσι την **κάμψη** της, καθώς και την κίνηση της **απαγωγής** και **προσαγωγής** ενεργητικά. Οι κινήσεις αυτές επιτυγχάνονται με τη σύναψη δύο νημάτων (120), ένα για κάθε κινητήρα αντίστοιχα. Την **έκτασή** της αναλαμβάνουν **δυο ελατήρια** τοποθετημένα στη ΕΦ κοντά στη ΜΚΦ άρθρωση μέσα στους κυλίνδρους (110). Δυο κομμάτια σπάγκου, με σταθερή τη μία άκρη τους στο ΜΚΦ εκτείνονται μέσα από τα ελατήρια, ξεκινώντας από μια εγκοπή στη πίσω μεριά των κυλίνδρων και δένονται στην άκρη των ελατηρίων με

μια σφήνα. Με τη δομή αυτή επιτυγχάνεται η έκταση της εγγύς φάλαγγας καθώς οι κινητήρες περιστρέφονται απελευθερώνοντας το νήμα κάμψης.

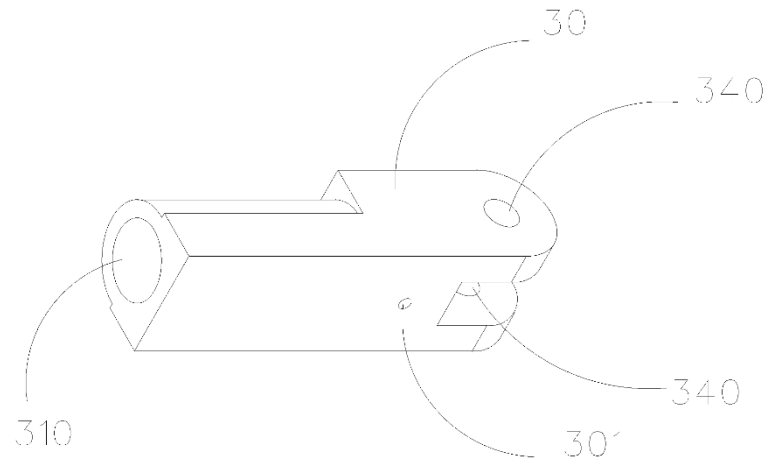


Σχήμα 2.1. Εγγύς φάλαγγα, κάτω/πλάγια όψη.



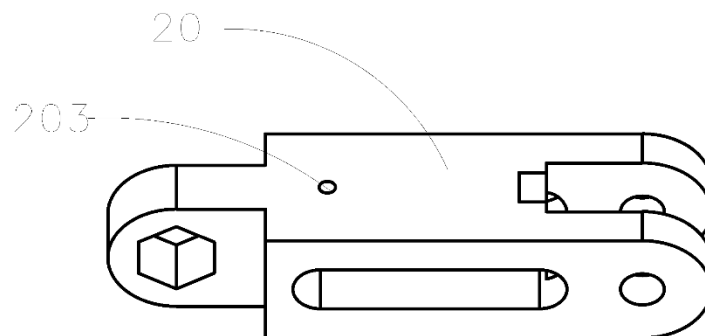
Σχήμα 2.2. Εγγύς φάλαγγα, πάνω όψη/πλάγια όψη.

Ένας κινητήρας είναι υπεύθυνος για την κίνηση της ΜΦ (20) και ΟΦ (30) ελέγχοντας την κάμψη των 2 φαλαγγικών συνδέσμων. Σε συνεργασία με ένα ελατήριο τοποθετημένο στην ΟΦ στο κύλινδρο (310) το οποίο είναι υπεύθυνο για την έκταση των 2 οστών.

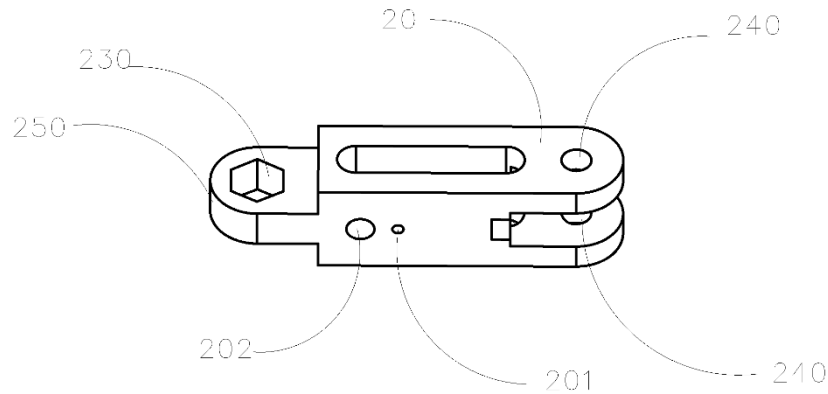


Σχήμα 2.3. Ουυχοφόρος φάλαγγα, κάτοψη/πλάγια όψη.

Για τη κάμψη της ΟΦ και της ΜΦ με ένα κινητήρα αναπτύχθηκε ένας μηχανισμός παθητικής κάμψης της ΟΦ εκμεταλλευόμενος της ενεργητικής κάμψης της ΜΦ. Ο τρόπος που επιτυγχάνεται η κίνηση αυτή περιγράφεται παρακάτω. Η κάμψη της μέσης φάλαγγας επιτυγχάνεται μέσω ενός ενεργοποιητή, ο οποίος έλκει ελκτικό μέσο (νήμα ή σπάγκο) με την άκρη του προσαρτημένη στη μέση και κάτω μεριά της ΜΦ (201), προς τη βάση του δακτύλου. Επιπλέον, ένα δεύτερο ελκτικό μέσο είναι προσαρτημένο αφενός στην τερματική φάλαγγα, στη μέση και κάτω μεριά της ΟΦ (301) και αφετέρου στην εγγύς φάλαγγα, στο πάνω μέρος και ανάμεσα από τους κυλίνδρους (110) στο σημείο (102). Λόγω της μερικής επαπτόμενης περιέλιξης του νήματος στην ημικυλινδρική επιφάνεια στο άνω άκρο της εγγύς φάλαγγας (150), αναπτύσσεται ελκτική δύναμη επί της τερματικής φάλαγγας, η οποία προκαλεί την κάμψη της. Για την αντίθετη κίνηση της έκτασης, αξιοποιείται η εκτατική δύναμη του ελατηρίου (55) στο κύλινδρο της ΟΦ (310), το οποίο είχε υποβληθεί σε συμπίεση κατά τη κάμψη της τερματικής φάλαγγας από ένα νήμα με σταθερή άκρη στη σφήνα (45). Η συμπίεση του ελατηρίου οφείλεται στη ελκτική δύναμη που αναπτύσσεται λόγω της περιέλιξης του νήματος στην ημικυλινδρική επιφάνεια στο άνω άκρο της μέσης φάλαγγας (250) κατά τη κάμψη της ΟΦ. Κατόπιν της ενεργοποίησης, επιτυγχάνεται η αντίθετη κατεύθυνση κάμψης, η έκταση, με ταυτόχρονη αποέλιξη του νήματος από την ημικυλινδρική επιφάνεια (150) και (250), οδηγώντας σε πλήρη έκταση των δύο φάλαγγων.



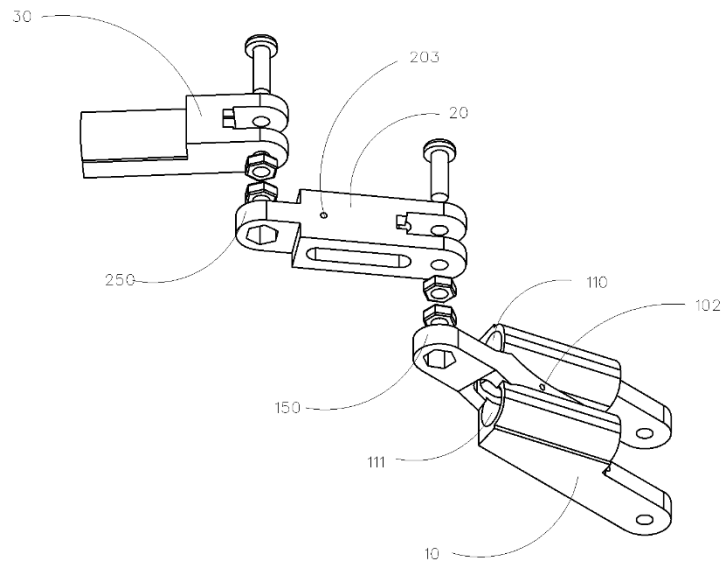
Σχήμα 2.4. Μέση φάλαγγα, κάτοψη/πλάγια όψη.



Σχήμα 2.5. Μέση φάλαγγα, πάνω όψη/πλάγια όψη.

Η μετάδοση της κίνησης επιτυγχάνεται με τη χρήση αλιευτικού νήματος 0.5mm που αντικαθιστά τους τένοντες. Ο κινητήρας ελέγχει τη κίνηση της ΜΦ και ΟΦ με ένα νήμα με σταθερή άκρη στη ΜΦ στο σημείο M1.

Οι αρθρώσεις ΑΦΦ και ΕΦΦ επιλέχθηκε να υλοποιηθούν με τη χρήση δυο παξιμαδιών και μίας βίδας τύπου DIN 7985 με διάμετρο 3mm και μήκος 10mm. Υποκαθιστώντας έτσι τα ρουλεμάν Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6. Κομμάτια Δαχτύλου, πάνω όψη/πλάγια όψη.

Για την ΜΚΦ άρθρωση η καινοτομία των **Zhe Xu, Vikash Kumar και Emanuel Todorov** [36] υλοποιήθηκε απονέμοντας πιο φυσική κίνηση στα δάχτυλα και δίνοντας 2 βαθμούς ελευθερίας με το ίδιο κέντρο αξόνων πετυχαίνοντας περιστροφική κίνηση.

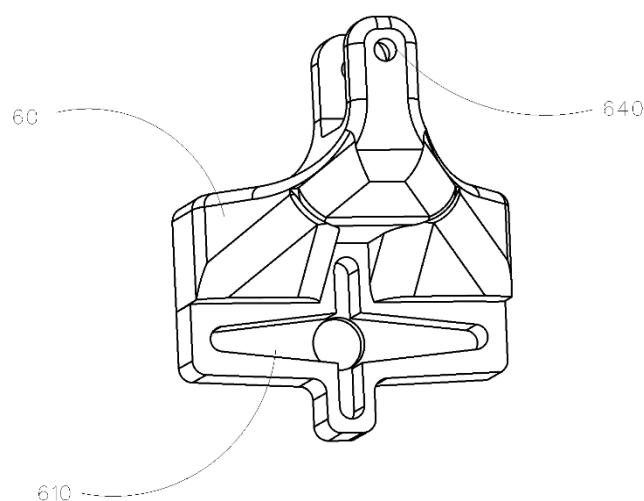
Με βάση τον έλεγχο σε βάσεις ευρεσιτεχνιών, ο μηχανισμός που σχεδιάστηκε δεν αντιστοιχεί σε γνωστή υλοποίηση, γεγονός που **υποδεικνύει πιθανή καινοτομία** ως προς τον σχεδιασμό και την αρχή λειτουργίας.

### 2.3.2 Αντίχειρα

Ο αντίχειρας είναι το πιο σημαντικό μέρος του ανθρώπινου χεριού και παίζει κρίσιμο ρόλο στη λειτουργικότητα του. Είναι μοναδικός στην ανθρώπινη ανατομία διότι μπορεί να κινηθεί ανεξάρτητα από τα άλλα δάχτυλα και να συνεργάζεται μαζί τους για την εκτέλεση περίπλοκων κινήσεων. Επιτρέπει την εκτέλεση της **λαβής ακριβείας** και **λαβή ροπάλου**, απαραίτητες για το γράψιμο, τη χρήση εργαλείων και ηλεκτρονικών συσκευών. Επίσης η μεγάλη ευκαμψία και το εύρος κίνησης του, καθώς και η ελαφριά περιστροφική ιδιότητα του αντίχειρα δίνει τη δυνατότητα να έρχεται σε επαφή με κάθε δάχτυλο, εξαιρετικά σημαντικό για την αλληλεπίδραση με διάφορα αντικείμενα.

Για τη κατασκευή του αντίχειρα σχεδιάστηκαν δύο φάλαγγες που τον χαρακτηρίζουν. Η εγγύς φάλαγγα και η τερματική φάλαγγα (ΟΦ). Ακολουθώντας την ίδια δομή με τα λοιπά δάχτυλα, ο μηχανισμός παθητικής κάμψης της τερματικής φάλαγγας προσαρμόστηκε για τον αντίχειρα. Η κάμψη της εγγύς φάλαγγας ΕΦ επιτυγχάνεται μέσω ενός ενεργοποιητή, ο οποίος έλκει δύο ελκτικό μέσα (νήμα ή σπάγκο) με τις άκρες τους προσαρτημένες στην ΕΦ στα σημεία (120), προς τη βάση του δακτύλου. Επιπλέον, ένα δεύτερο ελκτικό μέσο είναι προσαρτημένο αφενός στην τερματική φάλαγγα, στη μέση και κάτω μεριά της ΟΦ (301) και αφετέρου στο μετακάρπιο κομμάτι, στο πάνω μέρος (640) όπου και μία βίδα το κρατάει σταθερό. Λόγω της μερικής επαπτόμενης περιέλιξης του νήματος στην ημικυλινδρική επιφάνεια στο άνω άκρο του μετακάρπιου (60), αναπτύσσεται ελκτική δύναμη επί της τερματικής φάλαγγας, η οποία προκαλεί την κάμψη της. Για την αντίθετη κίνηση της έκτασης, αξιοποιείται η εκτατική δύναμη του ελατηρίου (55) στο κύλινδρο της ΟΦ (310), το οποίο είχε υποβληθεί σε συμπίεση κατά τη κάμψη της τερματικής φάλαγγας από ένα νήμα με σταθερή άκρη στη σφήνα (45). Η συμπίεση του ελατηρίου οφείλεται στη ελκτική δύναμη που αναπτύσσεται λόγω της περιέλιξης του νήματος στην ημικυλινδρική επιφάνεια στο άνω άκρο της εγγύς φάλαγγας (250) κατά τη κάμψη της ΟΦ. Κατόπιν της ενεργοποίησης, επιτυγχάνεται η αντίθετη κατεύθυνση κάμψης, η έκταση, με ταυτόχρονη αποέλιξη του νήματος από την ημικυλινδρική επιφάνεια (150), οδηγώντας σε πλήρη έκταση των δύο φάλαγγων.

Τέλος στη προσπάθεια να υλοποιηθεί η περιστροφική κίνηση του αντίχειρα που πετυχαίνει το μετακάρπιο κόκκαλο που αρθρώνεται στην πολυγωνομετακάρπια άρθρωση με το μείζον πολύγωνο, σχεδιάστηκε το μετακάρπιο Σχήμα 2.6, με όδευση για το σερβο κινητήρα (610) για να εκπροσωπήσει το μετακάρπιο κόκκαλο που θα κουμπώσει η ΜΚΦ άρθρωση. Το μετακάρπιο κομμάτι περιστρέφεται με ένα βαθμός ελευθερίας γύρω από τον άξονα του σέρβο κινητήρα που ενώνει τον αντίχειρα με τη παλάμη.



Σχήμα 2.7. Μετακάρπιο κομμάτι, πρόσοψη.

### 2.3.3 Καρπός

Ο ανθρώπινος καρπός αποτελεί έναν πολύπλοκο ανατομικό σύνδεσμο που συνδέει το αντιβράχιο με την παλάμη. Διαθέτει 2 βαθμούς ελευθερίας, επιτρέποντας κάμψη/έκταση, απαγωγή/προσαγωγή. Οι κινήσεις αυτές καθιστούν τον καρπό ζωτικής σημασίας για τη λεπτή κινητικότητα και τη λειτουργικότητα του ανθρώπινου χεριού. Η περιστροφή του χεριού (υπτιασμός και πρηνισμός) γίνεται στο πήχη, συγκεκριμένα στις αρθρώσεις μεταξύ της κερκίδας και της ωλένης (εγγύς και άπω κερκιδωλενική άρθρωση). Ο καρπός δεν περιστρέφεται από μόνος του, αλλά συμμετέχει έμμεσα στην κίνηση λόγω της σύνδεσής του με το πήχη.

Το ίδιο και στο ρομποτικό βραχίονα, ο καρπός έχει 2 βαθμούς ελευθερίας. Αυτό επιτεύχθηκε με τη χρήση τεσσάρων σέρβο κινητήρων και του ακτινωτού σφαιρικού σαφές ρουλεμάν. Στο κέντρο το ρουλεμάν ενώνει το πήχη με τη παλάμη. Τα 4 σέρβο κινητήρων ελέγχουν τη κίνηση της παλάμης τραβώντας νήματα τοποθετημένα σε τέσσερα σημεία πάνω στη παλάμη. Δύο στην εξωτερική μεριά της παλάμης και δύο στην εσωτερική μεριά. Λόγο της μορφολογίας του ρουλεμάν, επιτρέπεται η διέλευση των νημάτων που ελέγχουν τα δάχτυλα μέσω αυτού και προς τα δάχτυλα, χωρίς να είναι εμφανής.

### 2.3.4 Πήχης

Ο ανθρώπινος πήχης είναι το τμήμα του άνω άκρου μεταξύ αγκώνα και καρπού. Περιλαμβάνει δύο οστά, την κερκίδα και την ωλένη όπως αναφέρθηκε παραπάνω και ελέγχει την πρηνισμό, τον υπτιασμό και άλλες κινήσεις του χεριού. Φέρει συνολικά 20 μύες, που διαχωρίζονται σε πρόσθια και οπίσθια ομάδα, εξυπηρετώντας λεπτές και ισχυρές κινήσεις.

Αντικατοπτρίζοντας το ρόλο του πήχη ως η “βάση” και η κινητήριος δύναμη της παλάμης, έτσι και στη κατασκευή αυτή, ο πήχης φιλοξενεί όλα τα κινητήρια μέσα, τον υπολογιστή ελέγχου, τα ηλεκτρονικά ισχύος και τις μπαταρίες του συστήματος. Για το λόγο αυτό ο πήχης σχεδιάστηκε με δύο διαμερίσματα. Το πρώτο που φέρει τους 14 σέρβο κινητήρες είναι ένα ορθογώνιο κομμάτι μήκους 17cm, ύψους 10 cm και πλάτους 8 cm. Επιπλέον 5 βάσεις, ειδικά διαμορφωμένες για τη διέλευση των νημάτων μέσα από αυτές, βιδώνουν στη μέσα μεριά του πήχη. Στη συνέχεια οι κινητήρες βιδώνουν πάνω στις βάσεις. Τέλος ένα καπάκι σε σχήμα δίσκου, σχεδιάστηκε και τοποθετήθηκε πάνω στους κινητήρες για το ομαλό τύλιγμα και ξετύλιγμα του νήματος. Το πρώτο διαμέρισμα κλείνει με ένα καπάκι ορθογώνιο διαστάσεων ίδιων διαστάσεων.

Το δεύτερο διαμέρισμα του πήχη, διαστάσεων μήκους 17cm, ύψους 10 cm και πλάτους 8 cm, φιλοξενεί τα ηλεκτρονικά ισχύος και ελέγχου, τον υπολογιστή του συστήματος και τις μπαταρίες. Το δεύτερο διαμέρισμα κλείνει με ένα καπάκι διαστάσεων ίδιων διαστάσεων.

## 2.4 Επένδυση Ρομποτικού Βραχίονα

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε επένδυση του ρομποτικού βραχίονα με υλικό που προσομοιάζει το δέρμα. Η αναβάθμιση αυτή αύξησε σημαντικά την αντίσταση στην ολίσθηση. Η επένδυση επιτεύχθηκε με τη χρήση κολλητικής ταινίας διπλής όψης πάχους 2 χιλιοστών, η οποία επιλέχθηκε ώστε να προσδίδει μαλακή αίσθηση αφής. Τέλος, ένα γάντι μιας χρήσης κόπηκε και προσαρμόστηκε κατάλληλα ώστε να καλύψει τις κρίσιμες επιφάνειες επαφής του χεριού. Στην Εικόνα 2.8 απεικονίζεται ο βραχίονας πριν και μετά την επένδυση και ο αντιχειρας μόνο με τη κολυτική ταινία.



Εικόνα 2.8. Αρπάγη ρομποτικού βραχίονα αριστερά χωρίς επένδυση, δεξιά με επένδυση.

## 2.5 Σύστημα Ελέγχου

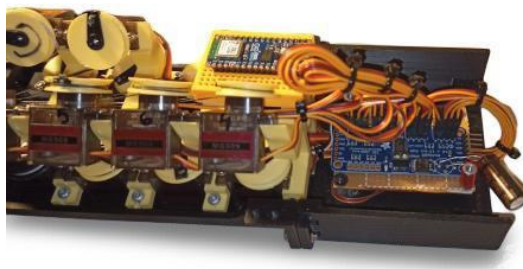
Το σύστημα ελέγχου ενός ρομποτικού βραχίονα αποτελεί το κεντρικό τμήμα που διαχειρίζεται τη λειτουργία και την ακρίβεια των κινήσεών του. Περιλαμβάνει τη μονάδα επεξεργασίας (π.χ. μικροελεγκτή ή PLC), αισθητήρες για ανίχνευση θέσης, δύναμης και ροπής, καθώς και τα κινητήρια μέσα (π.χ. σερβο κινητήρες). Μέσω κατάλληλων αλγορίθμων, το σύστημα ελέγχου ερμηνεύει τα σήματα από τους αισθητήρες και προσαρμόζει την απόκριση των κινητήρων μέσω, με σκοπό την εκτέλεση της επιθυμητής λειτουργίας του ρομπότ. Επιπλέον, ενσωματωμένα μοντέλα ανάδρασης δρουν για τη βελτίωση της ακρίβειας και την αποφυγή σφαλμάτων. Το σύστημα ελέγχου αμφότερα με τα αισθητήρια, διαχειρίζεται την τροφοδοσία των κινητήρων και γενικότερα του όλου συστήματος. Ένα σωστά δομημένο σύστημα ελέγχου πρέπει να επιτυγχάνει ακριβής, αξιόπιστη και αρμονική λειτουργία του βραχίονα.

Κατά τη σχεδίαση ενός ρομποτικού βραχίονα, η έρευνα υλικών που θα πραγματώσουν ένα αξιόπιστο σύστημα ελέγχου είναι αναγκαία. Μείζονος σημασίας είναι ο εγκέφαλος του συστήματος, δηλαδή η αναπτυξιακή πλακέτα στη περίπτωση αυτή που ελέγχει στο μεγαλύτερο φάσμα το ρομποτικό χέρι. Για το ρόλο του εγκέφαλου έπρεπε να αναλογιστούμε τη συνδεσιμότητα με τα λοιπά υλικά, τη γλώσσα προγραμματισμού που βολεύει για το σύστημα, την ευελιξία του σε αναβαθμίσεις καθώς και τη ευκολία επικοινωνίας με άλλα συστήματα, για παράδειγμα ένα γάντι ελέγχου.

Η παρουσία πολλαπλών δαχτύλων και εν γνώση μας ότι κάθε δάχτυλο απασχολεί τρεις σέρβο κινητήρες εισάγει την ανάγκη για έναν οδηγό μεγάλου πλήθους σέρβο κινητήρων. Συγκεκριμένα 15 κινητήρες στελεχώνουν το ρομποτικό βραχίονα, δια τούτο η χρήση ενός 16 σέρβο οδηγού είναι μονόδρομος. Πιο συγκεκριμένα το ολοκληρωμένο PCA9685 επιλέχθηκε για την δουλειά αυτή. Στην αγορά διατίθεται σε έτοιμη για χρήση πλακέτα με εισόδους για τροφοδοσία και το δίαυλο επικοινωνίας, καθώς και εξόδους για τον έλεγχο των κινητήρων. Πιο συγκεκριμένα το PCA9685 είναι ένας προηγμένος ελεγκτής PWM (Pulse Width Modulation) που επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο έως και 16 καναλιών μέσω του πρωτοκόλλου επικοινωνίας I2C. Διαθέτει 12-bit ανάλυση PWM (4096 επίπεδα ανάλυσης), υποστηρίζει συχνότητες από 24Hz έως 1526Hz και περιλαμβάνει ενσωματωμένο ταλαντωτή 25MHz, εξαλείφοντας την ανάγκη εξωτερικού ρολογιού. Λειτουργεί με τάση λογικής 3.3V ή 5V, καθιστώντας τον συμβατό με δημοφιλείς αναπτυξιακές πλακέτες από εταιρίες όπως η Arduino και η Raspberry Pi, ενώ υποστηρίζει τάση τροφοδοσίας φορτίου έως 6V, ιδανική για σέρβο κινητήρες. Η χρήση του είναι ευρέως διαδεδομένη σε εφαρμογές ρομποτικής, όπως ο έλεγχος πολλαπλών σέρβο κινητήρων και η διαμόρφωση φωτισμού LED. Χάρη στην I2C διεπαφή του, επιτρέπει την απελευθέρωση των PWM εξόδων της αναπτυξιακής πλακέτας και τη διαχείριση πολλών συσκευών μέσω ενός μόνο διαύλου επικοινωνίας, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα και μειώνοντας την πολυπλοκότητα των κυκλωμάτων.

### 2.5.1 Εγκέφαλος και Συστοιχία Κίνησης

Το σύστημα ελέγχου του ρομποτικού βραχίονα βασίζεται στην αναπτυξιακή πλακέτα **Arduino esp 32nano** [37 της **Arduino®** [38, καθώς και σε ένα servo driver της εταιρίας **adafruit®** [39]. Τα δύο αυτά συστήματα συνεργάζονται για τη διαχείριση των 15 σέρβο κινητήρων.

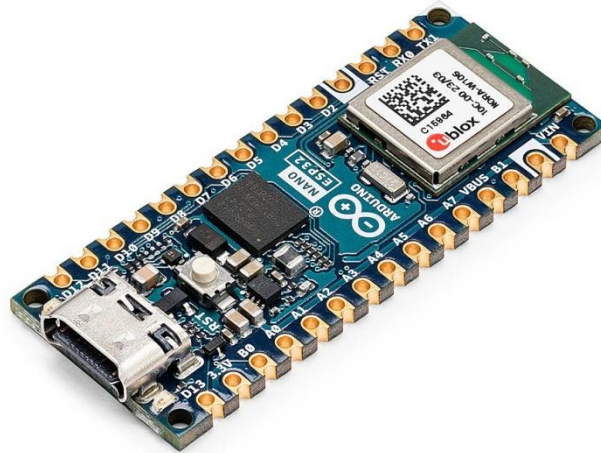


Εικόνα 2.9. Εγκέφαλος και συστοιχία κίνησης.

Η αναπτυξιακή πλακέτα της Arduino αποτελεί μια εξαιρετικά ευέλικτη και ισχυρή λύση που συνδυάζει την ευελιξία του Arduino με τις προχωρημένες δυνατότητες του ESP32. Με διπύρρηνο επεξεργαστή Harvard αρχιτεκτονικής Tensilica Xtensa LX7 [60] που λειτουργεί έως 240 MHz, ενσωματωμένο Wi-Fi και Bluetooth 4.2, προσφέρει εξαιρετική συνδεσιμότητα. Η πλακέτα διαθέτει 520 KB SRAM και συνήθως 4 MB flash μνήμη, ενώ παρέχει πλούσιες δυνατότητες I/O με έως 18 αναλογικά κανάλια ADC 12-bit, PWM, SPI, I2C, UART, έως 10 capacitive touch pins και 2 DAC εξόδους 8-bit. Τροφοδοτείται μέσω USB-C ή microUSB με 5V και λειτουργεί εσωτερικά στα 3.3V, ενώ υποστηρίζει λειτουργία Deep Sleep για χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Το μικρό μέγεθος που είναι συμβατό με breadboards, η

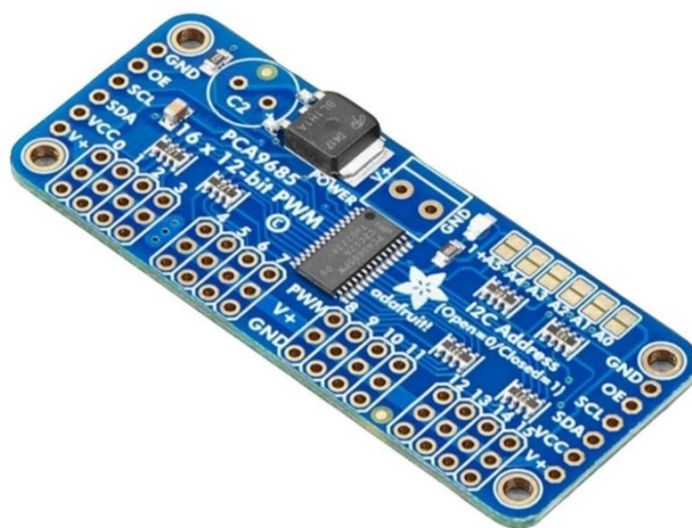
οικονομική τιμή και η συμβατότητα με Arduino IDE, PlatformIO και ESP-IDF το καθιστούν ιδανική επιλογή για DIY αυτοματισμούς, wearable συσκευές και φορητές IoT εφαρμογές.

Η αναπτυξιακή πλακέτα αναλαμβάνει τον προγραμματισμό και την αποστολή σημάτων PWM (Pulse Width Modulation) σε μια μονάδα οδήγησης για 16 σέρβο με τη βοήθεια της βιβλιοθήκης που αναπτύχθηκε από την **adafruit**®. Η μονάδα οδηγού των κινητήρων με τη σειρά του διαχειρίζεται τη λειτουργία των κινητήρων γυρνώντας τους κινητήρες στην επιθυμητή γωνία.



Εικόνα 2.10. Αναπτυξιακή πλακέτα Arduino esp 32nano [36].

Η μονάδα για τη οδήγηση των κινητήρων επιλέχθηκε είναι ικανή να ελέγχει μέχρι και 16 σέρβο κινητήρες ταυτόχρονα μέσω I2C επικοινωνίας με την αναπτυξιακή πλακέτα.



Εικόνα 2.11. Μονάδα οδήγησης 16 σέρβο κινητήρων.

Η πλακέτα αυτή βασίζεται στο ολοκληρωμένο **PCA9685**. Ο οδηγός διαθέτει 16 PWM ανεξάρτητα κανάλια ανάλυσης 12 bit (4096 επίπεδα) [61], επιτρέποντας την λεπτομερή κίνηση των κινητήρων. Επίσης διαθέτει ρυθμιζόμενη συχνότητα PWM και ενσωματωμένο ρολόι, απελευθερώνοντας την ανάγκη για άντληση πόρων από την αναπτυξιακή πλακέτα. Η πλακέτα έχει τη δυνατότητα λειτουργίας με τάση τροφοδοσίας από την αναπτυξιακή πλακέτα είτε εξωτερική πηγή. Η τάσεις των σημάτων ελέγχου κυμαίνονται μεταξύ 3.3 V και 5 V, κάτι πολύ χρήσιμο λόγω της ιδιαιτερότητας της αναπτυξιακής πλακέτας να έχει τάσεις εξόδου λογικών σημάτων στα 3.3 V [37]. Τέλος η εταιρία μας δίνει τη δυνατότητα αλυσιδωτής σύνδεσης της πλακέτας μέχρι και 62 πλακέτες στην ίδια γραμμή I2C.

Οι κινητήρες που επιλέχθηκαν είναι 15 σέρβο mg90s Εικόνα 2.9. Ευρέως διαδεδομένος μεταξύ ρομποτικών κατασκευών για την ακρίβεια και την αξιοπιστία του. Οι λόγοι που είναι τόσο διαδεδομένοι κρύβονται στα τεχνικά χαρακτηριστικά τους. Ένας mg90s κινητήρας είναι τύπος μικροσέρβο κινητήρα με βάρος μόλις περίπου 13.4 γραμμάρια. Διαθέτει ροπή 1.8 κιλά με τροφοδοσία 4.8 V και 2.2 κιλά με



Εικόνα 2.12. Σέρβο κινητήρας MG90s

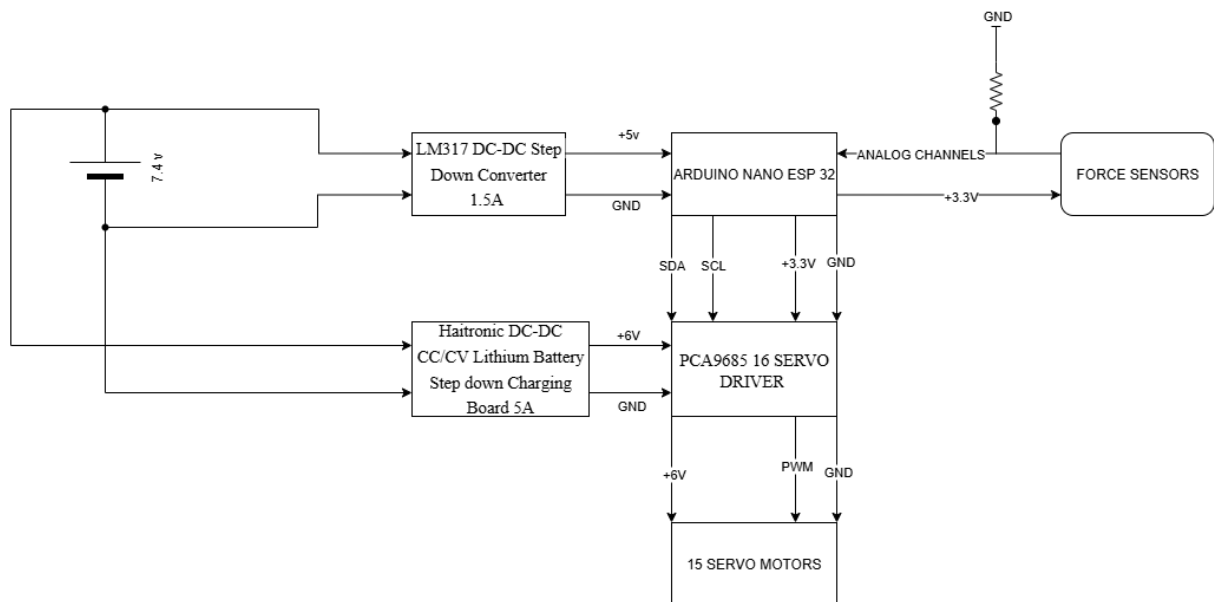
τροφοδοσία 6 V όπου και αυτά είναι τα επιτρεπτά όρια τροφοδοσίας που μπορεί να λειτουργήσει σύμφωνα με το κατασκευαστή. Επίσης τα μεταλλικά γρανάζια το καθιστούν ισχυρότερο από τους υπολοίπους μικροσέρβο κινητήρες της ίδιας κατηγορίας. Οι 15 σερβο κινητήρες είναι υπεύθυνοι για τη μετάδοση των κινήσεων του βραχίονα. Η κίνηση μεταδίδεται από τους κινητήρες στα δάχτυλα μέσω νημάτων ψαρέματος, τα οποία προσομοιώνουν τη λειτουργία των τενόντων στο ανθρώπινο χέρι. Αυτή η σχεδίαση εξασφαλίζει ελαφριά κατασκευή και χαμηλό κόστος, εν αντίθεση μειώνοντας την ισχύ και στιβαρότητα του δραγμού.

### 2.5.2 Ηλεκτρονικά Ισχύος και Τροφοδοσία

Με στόχο την υλοποίηση ενός αυτοτελούς ρομποτικού βραχίονα, η χρήση μπαταριών για τη τροφοδοσία του συστήματος κρίθηκε αναγκαία. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκαν τέσσερις μπαταρίες. Δύο

σε σειρά παράλληλα με άλλες δύο σε σειρά, τύπου INR18650 ικανές να παρέχουν αρκετό ρεύμα για τη λειτουργία και των 15 κινητήρων, της αναπτυξιακής πλακέτας και του servo driver. Παρόλο που η ανάγκη ρεύματος για 15 σέρβο κινητήρες, στη χειρότερη των περιπτώσεων, ανέρχεται στα 9-12 A., για μέση λειτουργία κάθε κινητήρα δουλεύει με 100-250 mA, για το σύνολο των 15 κινητήρων η κατανάλωση αναλογεί σε 1A με 3.75 A. Στους κινητήρες τροφοδοτείται ρεύμα μέχρι 5 Amp ρεύματος μέσω μιας πλακέτας τροφοδοσίας buck converter. Επιλέχθηκε η συγκεκριμένη διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος για τη μετατροπή της ονομαστικής τάσης των 7.4 V που παρέχουν οι μπαταρίες, σε μια σταθερή τιμή των 6V. Η αναπτυξιακή πλακέτα και η μονάδα οδηγού των κινητήρων τροφοδοτούνται από διαφορετική πλακέτα τροφοδοσίας (buck converter) με μέγιστη έξοδο 1.5 A, κάτι που καλύπτει τις ανάγκες σε ισχύ για την αναπτυξιακή πλακέτα arduino esp 32 nano, καθώς η μέγιστη κατανάλωση ρεύματος ανέρχεται στα 500mA για την ενσωματωμένη μονάδα επεξεργασίας [40]. Πιο συγκεκριμένα η μονάδα επεξεργασίας της αναπτυξιακής πλακέτας (NORA-W10 106 [41]) καταναλώνει 66.2 mA σε κατάσταση modem – sleep [42] με τον επεξεργαστή να δουλεύει στα 240 MHz. Με ενεργοποιημένο το Wi-Fi η κατανάλωση ανέρχεται έως και 340 mA. Με ενεργοποιημένο το Bluetooth η κατανάλωση ανέρχεται στα 220mA. Αφετέρου η μονάδα οδηγού για τους σέρβο κινητήρες καταναλώνει 35-40mA [43] στην ενεργό λειτουργία. Δεν λαμβάνουμε υπόψη τη κατανάλωση των κινητήρων διότι προσάπτονται σε διαφορετική πλακέτα τροφοδοσίας.

Ο λόγος που διαχωρίστηκε η τροφοδοσία των κινητήρων και η τροφοδοσία της αναπτυξιακής πλακέτας μαζί με τη τροφοδοσία της μονάδας οδηγού των σέρβο κινητήρων, είναι διότι κατά την έντονη λειτουργία των κινητήρων οι απαιτήσεις τους για ρεύμα αυξάνονται κατακόρυφα και παράλληλα παρατηρείτε εμφανείς πτώση τάσης στην έξοδο του τροφοδοτικού, μαζί με έντονες κυματώσεις της τάσης, φαινόμενο που παρεμβάλλει στην ομαλή λειτουργία της αναπτυξιακής πλακέτας και της μονάδας οδηγού των κινητήρων αλλοιώνοντας το PWM σήμα που παράγει η αναπτυξιακή πλακέτα [44].



Σχήμα 2.8. Σχεδιάγραμμα συνδεσμολογίας.

## 2.6 Τελική Μορφή Ρομποτικού Βραχίονα

Όπως παρουσιάστηκε, ο ρομποτικός βραχίονας αποτελείται από δύο βασικά μέρη, το πήχη που φέρει τα ηλεκτρονικά ισχύος και τις μπαταρίες, καθώς και τη συστοιχία κίνησης και την αναπτυξιακή

πλακέτα. Ο κορμός του πήχη συναρμολογείτε με **5 κομμάτια** εξωτερικού κορμού όπου φέρουν **6 βίδες** και **6 παξιμάδια** που συγκρατούνε τη βάση του καρπού και δένουν μεταξύ τους. Για τους κινητήρες σχεδιάστηκαν **5 βάσεις** που εφαρμόζουν μέσα στο κορμό του πήχη και βιδώνονται επάνω του με **10 βίδες**. Ο αριθμός των κινητήρων που φιλοξενεί ο πήχης ανέρχεται στους **14** οι οποίοι με τη σειρά τους βιδώνονται πάνω στις βάσεις με δύο βίδες ο κάθε κινητήρας, σύνολο **28 βίδες**. Μέσα στο πήχη επίσης φυλάσσεται η **αναπτυξιακή πλακέτα** όπου για λόγους ευελιξίας χρησιμοποιείτε **1 πλακέτα διασύνδεσης** για τη λειτουργία της και τη σύνδεση με τις υπόλοιπες μονάδες. Επιπρόσθετα η **μονάδα οδήγησης** των κινητήρων βιδώνει πάνω στο κορμό του πήχη με **2 βίδες**, τα **2 τροφοδοτικά buck converter** φωλιάζουν ανάμεσα από τις **4 μπαταρίες** που κάθονται σε **2 θήκες** κολλημένες με ταινία διπλής όψης στα τοιχώματα του πήχη. Τέλος προστέθηκε **1 μετρητής ρεύματος και τάσης** για τον έλεγχο της τάσης των μπαταριών. Το δεύτερο μέρος του ρομποτικού βραχίονα είναι η αρπάγη, η οποία αποτελεί το κέντρο ενδιαφέροντος της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Με μορφή ανθρωπόμορφου χεριού, η αρπάγη μαζί με το καρπό, αποτελείται από **16 κομμάτια** κορμού που συντάσσουν τη παλάμη και τα δάχτυλα, **1 κινητήρα** που περιστρέφει τη βάση του αντίχειρα, **23 βίδες και 30 παξιμάδια** που διαμορφώνουν τις αρθρώσεις των δακτύλων και **12 ελατήρια** όπου σε συνδυασμό με **19 κομμάτια νημάτων** συμβάλουν στην έκταση και κάμψη των δακτύλων. **Τέσσερις ακόμα βίδες και δύο αποστάτες** δένουν τα δύο κομμάτια της παλάμης μεταξύ τους. Τα δύο κομμάτια της παλάμης κουμπώνουν σε ένα τρίτο κομμάτι και **δύο βίδες** δένουν τα τρία κομμάτια της παλάμης μεταξύ τους. Η παλάμη κουμπώνει με το κομμάτι του καρπού και **δύο βίδες** δένουν τα κομμάτια μεταξύ τους. Το κομμάτι του καρπού μπαίνει μέσα **στο περιστροφικό ρουλεμάν**, το οποίο μπαίνει μέσα στη **βάση του καρπού** και συγκρατείται με **μια λάμα**. Περαιτέρω η βάση καρπού κουμπώνει με 4 βίδες στο κορμό του πήχη. Προσμετρώντας τα παραπάνω κομμάτια και τα ελατήρια που συμβάλουν στην έκταση των δακτύλων, ο βραχίονας αποτελείται από 244 διακριτά κομμάτια **πίνακας**. Περαιτέρω σκοπεύοντας στη ανάδειξη της πολυπλοκότητας και μεγάλης δεξιότητας που μπορεί να χαρακτηρίσει την αρπάγη του βραχίονα, επιτεύχθηκαν **17 βαθμοί ελευθερίας**. Ο ρομποτικούς βραχίονας χαρακτηρίζεται ως **υποενεργοποιημένος** (underactuated) διότι οι βαθμοί ελευθερίας είναι περισσότεροι από τους κινητήρες. Γεγονός που προσφέρει καλή ισορροπία μεταξύ πολυπλοκότητας και αποδοτικότητας.

Πίνακας 2.1. Αναλυτική λίστα όλων των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για τη κατασκευή του ρομποτικού βραχίονα

Ποσότητα	Τύπος	Κωδικός
5	Κομμάτια σώματος	APOLOX
5	Βάσεις κινητήρων	PLA
15	Κομμάτια δακτύλων	PLA
1	Βάση αντίχειρα	PLA
3	Κομμάτια παλάμης	APOLOX
2	Κομμάτια καρπού	APOLOX
1	Ρουλεμάν καρπού	GE-20-2RS
1	Λάμα ρουλεμάν	GE-20-2RS
7	Σωληνάκια σιλικόνης	
15	Κινητήρες	MG 90 S
15	Περιστροφικές βάσεις	PLA
1	Αναπτυξιακή πλακέτα	ARDUINO ESP 32
1	Μονάδα οδηγού κινητήρων	PCA9685 16 SERVO DRIVER
1	Μετρητής τάσης-ρεύματος	
1	Τροφοδοτικό	LM317 DC-DC Step Down Converter 1.5A

1	Τροφοδοτικό	Haitronic DC-DC CC/CV Lithium Battery Step down Charging Board 5A (OEM1739)
4	Μπαταρίες	SAMSUNG INR18650
2	Βάση για Μπαταρίες	BH18650-2001
1	Πλακέτα διασύνδεσης	Raster Mini
72	Βίδες	DIN 7985 M3 3mm*10mm
33	Παξιμάδια	934 M3
2	Αποστάτες	
12	Ελατήρια πίεσεως	
19	Πετονιά	
2	Κλέμα Ταχείας Σύνδεσης	147-11066
1	Κολλητική ταινία διπλής όψης	
5	Δεματικά	FIX-S-2.5X100/BK
	Καλώδια-βραχυκυκλωτήρες	

Στην Εικόνα 2.12 παρουσιάζεται ο ρομποτικός βραχίονας και η εσωτερική του δομή, όπου διακρίνεται η μηχανική δομή, τα κινητά μέρη, η αναπτυξιακή πλακέτα, τα τροφοδοτικά και οι μπαταρίες



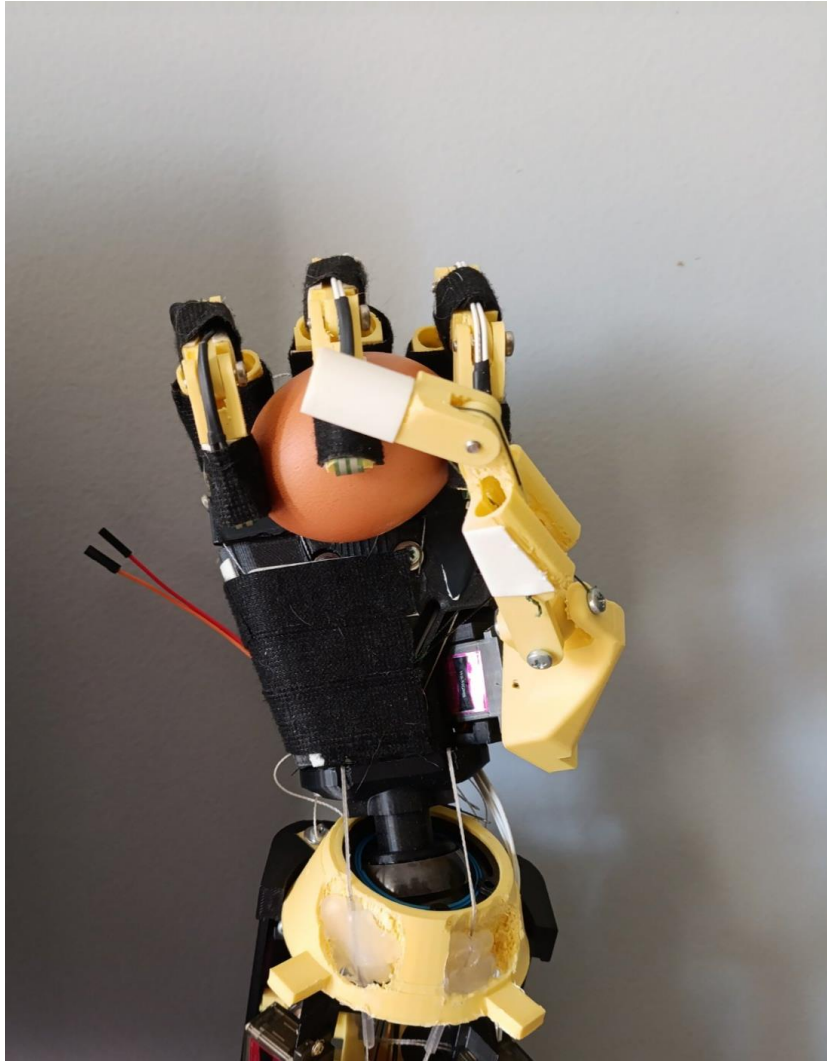
Εικόνα 2.13. Μηχανική δομή ρομποτικού βραχίονα.

## Κεφάλαιο 3ο: Λειτουργικότητα

### 3.1 Πείραμα Αρπαγής Αντικειμένων

Φέρνοντας εις πέρας την κατασκευή του ρομποτικού βραχίονα έμελλε να δοκιμαστεί η λειτουργικότητα του. Ακολούθησε ένα πείραμα που βαθμολογεί τη δεξιότητα ενός ρομποτικού βραχίονα σε σχέση με τις ικανότητες του να κρατάει κάποια αντικείμενα. Πραγματοποιήθηκε ένα πείραμα αρπαγής αντικειμένων από τη λίστα 43 κατηγοριών οικιακών αντικειμένων που παρουσιάζεται από τους Y. S. Choi, T. Deyle, T. Chen, J. Glass και C. Kemp (ICORR 2009) [45] και αξιολογήθηκαν ως πιο σημαντικές για ανάκτηση από ρομποτικά συστήματα, όπως καθορίστηκαν από ασθενείς με ALS μέσω συνεντεύξεων και αξιολογήσεων. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, ένας ανθρώπινος χειριστής παραδίδει διάφορα αντικείμενα στο ρομποτικό χέρι με το δεξί του χέρι, ενώ ταυτόχρονα χρησιμοποιεί το αριστερό του χέρι για να χειρίζεται τα δάχτυλα του ρομποτικού χεριού ώστε να αρπάξει/χειριστεί το αντικείμενο μέσω του κώδικα που αναπτύχθηκε. Η μέθοδος αυτή αναφέρεται ως τηλεχειρισμός, κατά την οποία η κίνηση του ρομποτικού βραχίονα ελέγχεται με οπτική ανατροφοδότηση και καθοδήγηση από τον χειριστή. Αυτό το πείραμα μπορεί να θεωρηθεί ως μια σειρά συνεργατικών εργασιών σύλληψης μεταξύ του ανθρώπου χειριστή και του ρομποτικού χεριού, στις οποίες ο πρώτος μπορούσε να παρακολουθεί ξεκάθαρα την κατάσταση του αντικειμένου που είχε συλληφθεί, χωρίς το πρόβλημα απόκρυψης στο σημείο σύλληψης. Κατά τη διάρκεια του πειράματος σύλληψης αντικειμένων, παρατηρήθηκε ότι διαφορετικές στάσεις σύλληψης μπορούν να μεταφερθούν με φυσικό τρόπο από τον ανθρώπινο χειριστή στο ρομποτικό βραχίονα, ιδιαίτερα μέσω της κίνησης του αντίχειρα. Αυτό συμβαίνει επειδή ο ρομποτικός βραχίονας διατηρεί επιτυχώς τη σημαντική βιομηχανική υπόσταση του ανθρώπινου χεριού, η οποία ουσιαστικά καθορίζει την κινηματική του χεριού. Με το πέρας του πειράματος, ο ρομποτικός βραχίονας κατάφερε να κρατήσει με επιτυχία ογκώδη αντικείμενα. Ωστόσο απέτυχε να κρατήσει αντικείμενα μικρότερα από ένα τηλεκοντρόλ τηλεόρασης.

Η επένδυση της αρπάγης κρίνεται πολύ σημαντική σε πειράματα αρπαγής αντικειμένων καθώς εισάγει τριβή στο δραγμό και μεγαλύτερο έλεγχο στο να κρατήσει μικρά αντικείμενα. Παρόλο της επένδυσης του βραχίονα με το τρόπο που αναφέρθηκε, κατά την εκτέλεση των πειραμάτων ο ρομποτικός βραχίονας δε κατάφερε να κρατήσει αρκετά αντικείμενα από τη λίστα [45], με εμφανή την αδυναμία της επένδυσης να δράσει αναλόγως.



Εικόνα 3.1.Αρπαγή αυγού.

### 3.2 Πείραμα Νοηματικής Γλώσσας

Παρ' όλα αυτά, η μηχανική επιδεξιότητα του βραχίονα που επιτεύχθηκε αντικατοπτρίζει πλήρως την ευκινησία και τη δεξιότητα του ανθρώπινου χεριού. Για την περαιτέρω ανάδειξη του βραχίονα, πραγματοποιήθηκε ένα ακόμη πείραμα. Μια επιπλέον λειτουργία του ανθρώπινου χεριού, την οποία πολλοί παραβλέπουν στην καθημερινότητά τους, είναι ο ρόλος του ως μέσο επικοινωνίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι κωφοί και βαρήκοοι άνθρωποι, για τους οποίους η νοηματική γλώσσα αποτελεί ζωτικό εργαλείο επικοινωνίας και κοινωνικής ένταξης [58], [59]. Μέσω των κινήσεων των χεριών και της έκφρασης του σώματος, η νοηματική γλώσσα επιτρέπει την έκφραση συναισθημάτων, ιδεών και επιθυμιών, αποδεικνύοντας πόσο σημαντική για την ανθρώπινη αξιοπρέπεια και αλληλεπίδραση είναι η δυνατότητα επικοινωνίας. Επομένως, η αναπαραγωγή τέτοιων λειτουργιών από έναν τεχνητό βραχίονα δεν ενισχύει απλώς τις πρακτικές του ικανότητες, αλλά και την ανθρώπινη διάσταση της επικοινωνίας, που πολλές φορές θεωρείται δεδομένη. Η νοηματική γλώσσα αποτελείται από 24 χειρονομίες που αντιστοιχούν στα γράμματα του ελληνικού αλφάβητου, Εικόνα 3.1.



Εικόνα 3.2. Ελληνικό αλφάβητο νοηματικής γλώσσας [64].

Για την εκτέλεση του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος κώδικας με το προηγούμενο πείραμα. Καθώς με τη μέθοδο του τηλεχειρισμού επιτεύχθηκε η αποτύπωση και των είκοσι τεσσάρων γραμμάτων του ελληνικού αλφάβητου από το ρομποτικό βραχίονα, Εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.3. Αναπαράσταση ελληνικού αλφάβητου από το ρομποτικό βραχίονα

### 3.3 Κινησιολογία Ρομποτικού Βραχίονα

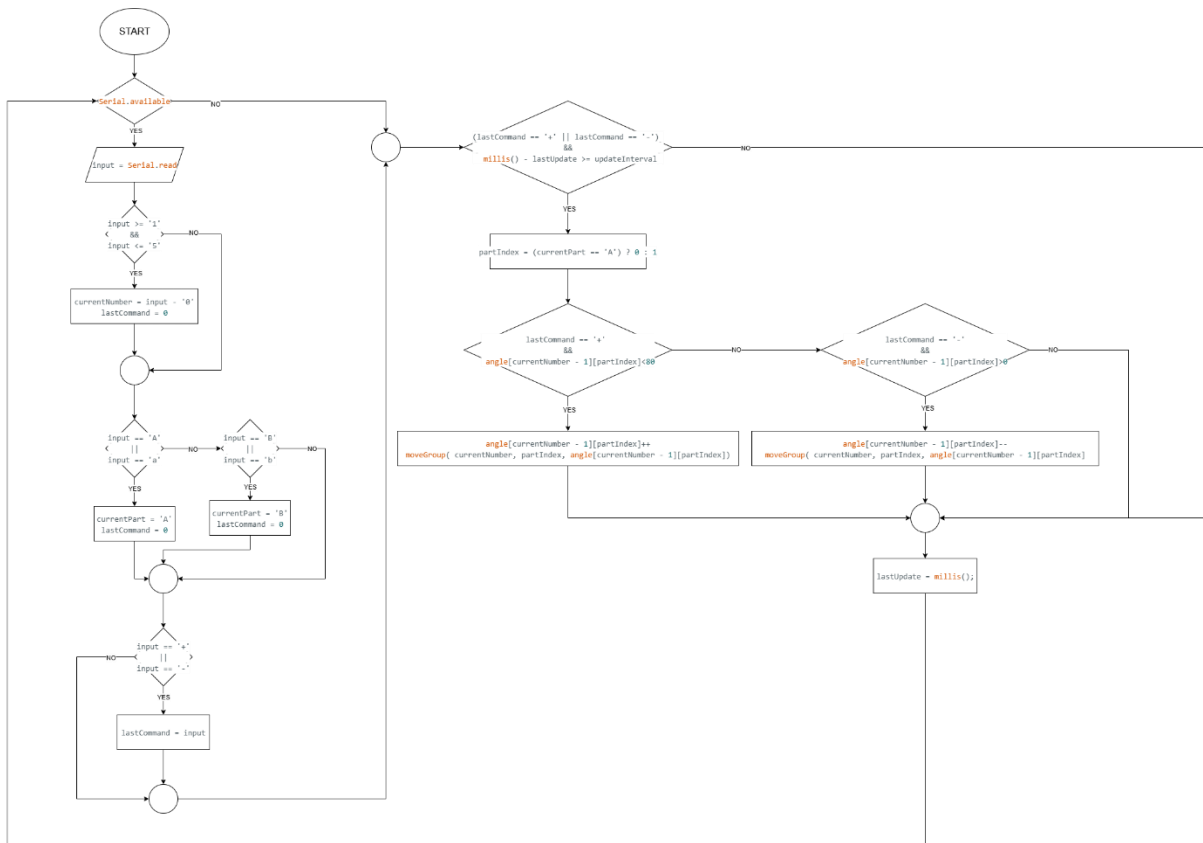
Τα παραγόμενα πιασίματα από το πρώτο πείραμα, καλύπτουν τους περισσότερους τύπους συλλαβών που ορίζονται από την ταξινόμια του ανθρώπινου χεριού [46]. Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζεται ένα πλήθος χαρακτηριστικών που περιγράφουν την κινητική λειτουργία του ρομποτικού βραχίονα [46].

Πίνακας 3.1. Χαρακτηριστικά κινητικής λειτουργίας ρομποτικού βραχίονα.

Κριτήριο	Ορισμός / Περιγραφή
<b>Συμμόρφωση</b>	Το αντίστροφο της ακαμψίας – Πόσο "ευέλικτο" είναι το αντικείμενο σε σχέση με το χέρι. Εξαρτάται από διαμόρφωση λαβής, ρύθμιση αρθρώσεων και υλικά (φάλαγγες, άκρα) [47].
<b>Συνδεσιμότητα</b>	Αριθμός βαθμών ελευθερίας ανάμεσα στο αντικείμενο και την παλάμη. Καθορίζει πόσες παράμετροι απαιτούνται για να οριστεί πλήρως η θέση/προσανατολισμός του αντικειμένου [48].
<b>Δύναμη Αρπάγης</b>	Το αντικείμενο δεν μπορεί να κινηθεί χωρίς να γλιστρήσει, αν οι αρθρώσεις είναι κλειδωμένες. Προϋπόθεση: Το σύνολο των σημείων επαφής να έχει <b>βαθμό 6</b> [48], [49].
<b>Γεωμετρικό Κλείσιμο</b>	Πλήρης κινηματικός περιορισμός. Το αντικείμενο δεν μετακινείται υπό καμία εξωτερική δύναμη. Απαιτεί 7 σημεία επαφής σε γενικές περιπτώσεις [50], [48].
<b>Ισοτροπία Λαβής</b>	Ικανότητα του χεριού να εφαρμόζει δυνάμεις και ροπές σε όλες τις κατευθύνσεις. Συσχετίζεται με την κατάσταση (condition number) του grasp Jacobian [51], [52], [53].
<b>Εσωτερικές Δυνάμεις</b>	Δυνάμεις που εφαρμόζονται στο αντικείμενο χωρίς να διαταράσσουν την ισορροπία της λαβής. Είναι λύσεις του ομογενούς συστήματος ισορροπίας [51], [52].
<b>Δυνατότητα Χειρισμού</b>	Ικανότητα εφαρμογής αυθαίρετων κινήσεων στο αντικείμενο. Απαιτεί δύναμη δρασμού, 6 βαθμούς ελευθερίας και κατάλληλη κινηματική κάλυψη από τις αρθρώσεις [51].
<b>Αντίσταση Ολίσθησης</b>	Μέγιστες δυνάμεις/ροπές πριν ξεκινήσει η ολίσθηση. Εξαρτάται από την τριβή και τη γεωμετρία των επαφών [54], [55], [51].
<b>Σταθερότητα</b>	Ικανότητα επιστροφής της λαβής στην αρχική θέση μετά από διαταραχή. Σε στατικές περιπτώσεις απαιτεί θετικά ορισμένο πίνακα ακαμψίας [47], [56]. Δυναμικά απαιτεί και ανάλυση ευστάθειας [57].

### 3.4 Κώδικας Τηλεχειρισμού

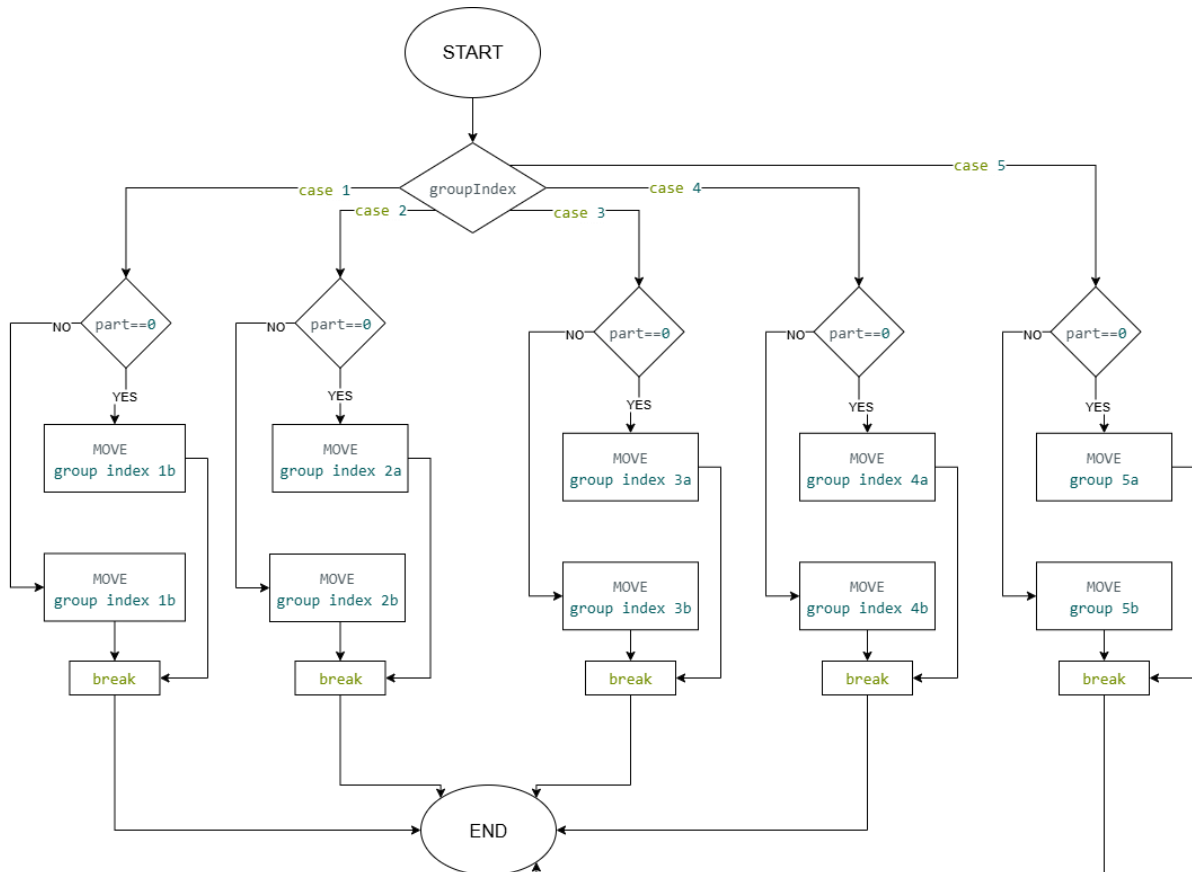
Για την περάτωση των πειραμάτων που παρουσιάστηκαν, χρειάστηκε να αναπτυχθεί ένας κώδικας που θα συνδυάζει την κίνηση κάθε δακτύλου και του καρπού ανεξάρτητα με τη μέθοδο του τηλεχειρισμού. Ο έλεγχος επιτεύχθηκε στέλνοντας εντολές μέσω του υπολογιστή με τη χρήση της σειριακής επικοινωνίας στην αναπτυξιακή πλακέτα και την οπτική ανατροφοδότηση από το χειριστή. Ο κώδικας όπως παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα ροής, Σχήμα 3.1, και δουλεύει ως εξής.



Σχήμα 3.1. Αναπαράσταση διαγράμματος ροής κύριου κώδικα.

Στην αρχή κάθε κύκλου λειτουργίας γίνεται έλεγχος εάν υπάρχει είσοδος στη σειριακή πόρτα. Εφόσον η απάντηση είναι θετική ελέγχουμε την είσοδο. Οι δεκτές πληροφορίες εισόδου είναι ο αριθμός δακτύλου ή καρπού, η ομάδα που επιλέχθηκε να κινηθεί και η εντολές κάμψης και έκτασης. Στέλνοντας τους αριθμούς από 1 έως 4 επιλέγεται το εκάστοτε δάχτυλο. Με τον αριθμό 1 να αντιστοιχεί στο μικρό δάχτυλο, τον αριθμό 2 να αντιστοιχεί το μεσαίο δάχτυλο, τον αριθμό 3 να αντιστοιχεί το δείκτη και τον αριθμό 4 να αντιστοιχεί τον αντίχειρα. Ο αριθμός 5 αντιστοιχεί το καρπό. Στη συνέχεια το γράμμα ‘Α’ αναφέρεται στην ΕΦ του εκάστοτε δακτύλου και το γράμμα ‘Β’ στην ΟΦ και ΜΦ. Για τον αντίχειρα το γράμμα ‘Α’ αναφέρεται στην ΕΦ και ΟΦ και το γράμμα ‘Β’ στην βάση του αντίχειρα. Για τον καρπό το γράμμα ‘Α’ αναφέρεται στην κάμψη και έκταση και το γράμμα ‘Β’ στην απαγωγή και προσαγωγή του καρπού. Τέλος με τις εντολές ‘+’ και ‘-’ ελέγχουμε την κίνηση των κινητήρων. Με την είσοδο κάθε εντολής, ανεξάρτητα, ελέγχεται και καταχωρείται στην κατάλληλη μεταβλητή ώστε να προωθηθεί στη συνάρτηση `void moveGroup(int groupIndex,`

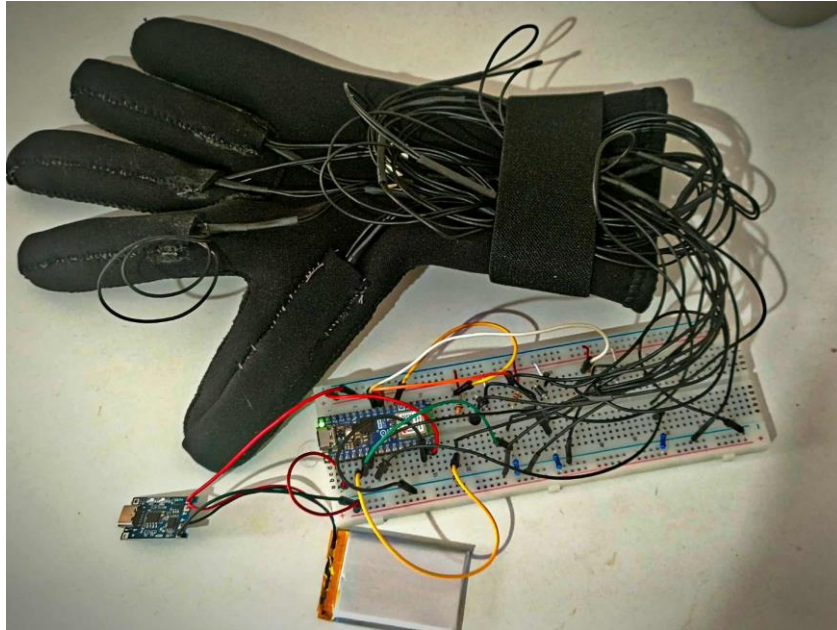
`int part, int pos`), Σχήμα 3.2. Η συνάρτηση τίθεται προς λειτουργία εφόσον η τελευταία εντολή ήταν εντολή ελέγχου κινητήρα '+' ή '-' και έχει περάσει ένα χρονικό διάστημα από τη προηγούμενη εκτέλεση της συνάρτησης. Με αυτόν τον τρόπο ελέγχεται η ταχύτητα περιστροφής των κινητήρων και αμφότερα η ταχύτητα κίνησης των δακτύλων και του καρπού. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει είσοδος στη σειριακή πόρτα η λειτουργία συνεχίζεται καλώντας τη συνάρτηση με τις προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω.



Σχήμα 3.2. Αναπαράσταση διαγράμματος ροής Συνάρτησης `moveGroup`

### 3.5 Ασύρματος χειρισμός

Στα πλαίσια της ανάπτυξης ενός ολοκληρωμένου συστήματος τηλεχειρισμού κατασκευάστηκε από τον φοιτητή του ΔΠΙΑΕ Γιαννακό Κ. [66]. ένα απτικό γάντι που επιτρέπει τον ασύρματο έλεγχο του ρομποτικού βραχίονα. Το απτικό γάντι αποτελείται από ένα γάντι κατάδυσης (Neopren) και τέσσερα αισθητήρια κάμψης για τον έλεγχο κάθε δακτύλου ξεχωριστά. Επίσης το απτικό γάντι διαθέτει δονητικούς κινητήρες στα ακροδάχτυλα για την ενεργοποίηση ανάδρασης απτικής αίσθησης, σε συνεργασία με τα αισθητήρια πίεσης που ενσωματώθηκαν στο ρομποτικό βραχίονα. Το απτικό γάντι υποστηρίζεται από την αναπτυξιακή πλακέτα Arduino nano esp32, επιτρέποντας την ασύρματη επικοινωνία με τη χρήση του του πρωτοκόλλου ESP NOW.



Εικόνα 3.4. Απτικό Γάντι [66].



## Κεφάλαιο 4ο: Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης

### 4.1 Στόχοι

Κατά την έρευνα για την ανάπτυξη του ρομποτικού βραχίονα εξετάστηκαν ποικίλες προσεγγίσεις υλοποίησης, τόσο από ακαδημαϊκές μελέτες όσο και από ερασιτεχνικές εφαρμογές. Κάθε προσέγγιση συνέβαλε με τη δική της ιδιαίτερη οπτική, αναδεικνύοντας αφενός τα πλεονεκτήματα που οφείλει να ενσωματώνει ένα τέτοιο σύστημα και αφετέρου τους περιορισμούς που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Στο πλαίσιο του παρόντος έργου τέθηκαν συγκεκριμένοι στόχοι που σχετίζονται με τα πλεονεκτήματα του συστήματος. Ένας από αυτούς ήταν ο καθορισμός των βαθμών ελευθερίας σε συνάρτηση με τον αριθμό των ενεργοποιητών, με στόχο την ανάπτυξη ενός υπο-ενεργοποιημένου συστήματος. Επιπλέον, επιδιώχθηκε η υλοποίηση ενός αυτόνομου συστήματος, η οποία επιτεύχθηκε μέσω της χρήσης μπαταριών για την τροφοδοσία και μιας αναπτυξιακής πλακέτας για τον έλεγχο.

Ιδιαίτερης σημασίας πλεονέκτημα αποτελεί και η ευκολία συνδεσιμότητας του συστήματος, η οποία υποστηρίζεται μέσω Bluetooth, Wi-Fi και σειριακής επικοινωνίας. Η σειριακή επικοινωνία χρησιμοποιήθηκε κατά τα πειράματα που παρουσιάζονται, ενώ η ασύρματη επικοινωνία θα αξιοποιηθεί σε μεταγενέστερο στάδιο, με την ανάπτυξη ενός απτικού γαντιού. Το γάντι αυτό επιτρέπει τον ανεξάρτητο έλεγχο κάθε δακτύλου με τη χρήση εύκαμπτων αντιστάσεων, ενώ παρέχει απτική ανατροφοδότηση μέσω δονητικών κινητήρων που ενεργοποιούνται σε κάθε δάχτυλο.

Τα σήματα αφής στο ρομποτικό βραχίονα υλοποιήθηκαν με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι με χρήση αισθητήρων πίεσης στην άπω φάλαγγα (ΟΦ) και ο δεύτερος τρόπος με αντικατάσταση του κινητήρα υπεύθυνου για την κάμψη της μέσης (ΜΦ) και άπω φάλαγγας (ΟΦ) από έναν σερβο-κινητήρα, ο οποίος παρέχει σήμα θέσης στην αναπτυξιακή πλακέτα. Με τον τρόπο αυτό, όταν η φάλαγγα συναντήσει εμπόδιο κατά την κάμψη, η πραγματική θέση διαφέρει από την επιθυμητή, γεγονός που αποκαλύπτει την ύπαρξη αντικειμένου ή εμποδίου.

### 4.2 Αναβαθμίσεις

Μελλοντική συνδεσιμότητα με ένα σύστημα ΗΕΓ προβλέπεται για τον έλεγχο του ρομποτικού βραχίονα μέσω ηλεκτρικών σημάτων που προέρχονται από τον ανθρώπινο εγκέφαλο. Η υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος προϋποθέτει την εξαγωγή δεδομένων μέσω του συστήματος ΗΕΓ που έχει ήδη αναπτυχθεί. Η επεξεργασία των δεδομένων αποτελεί ένα επιπλέον στάδιο του έργου, το οποίο βρίσκεται σε εξέλιξη. Στη φάση της επεξεργασίας αφαιρούνται ανεπιθύμητα σήματα (π.χ. μυϊκά και οφθαλμικά artifacts) και ακολουθεί η κανονικοποίηση, ο διαχωρισμός και η κατηγοριοποίηση των εγκεφαλικών σημάτων. Ο διαχωρισμός και η κατηγοριοποίηση πραγματοποιούνται συνήθως παράλληλα με τη διαδικασία εξαγωγής των σημάτων κατά τη διάρκεια πειραματικών δοκιμών.

Στη συνέχεια, τα επεξεργασμένα σήματα χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση μοντέλων μηχανικής μάθησης, όπως νευρωνικά δίκτυα ή μηχανές υποστήριξης διανυσμάτων (SVM), με στόχο την αναγνώριση συγκεκριμένων προτύπων εγκεφαλικής δραστηριότητας που σχετίζονται με κινήσεις του χεριού. Η διαδικασία εκπαίδευσης περιλαμβάνει τη συλλογή επαναλαμβανόμενων πειραματικών δεδομένων, τη δημιουργία συνόλου εκπαίδευσης και δοκιμής, καθώς και τη συνεχή βελτιστοποίηση των παραμέτρων του μοντέλου ώστε να επιτευχθεί υψηλή ακρίβεια στην ταξινόμηση. Με αυτόν τον τρόπο, το BCI σύστημα μπορεί να μεταφράσει τα σήματα του εγκεφάλου σε πραγματικές εντολές για τον έλεγχο του ρομποτικού βραχίονα.

Μελλοντική αναβάθμιση των αρθρώσεων προβλέπεται με την αντικατάσταση των υφιστάμενων από αρθρώσεις κυλιόμενης επαφής, οι οποίες βασίζονται στη γεωμετρία επαφής των δύο συνδέσμων. Οι σύνδεσμοι αυτοί ενώνονται μεταξύ τους με τη χρήση σπάγκου, ώστε να δημιουργείται η απαραίτητη τριβή. Η αναβάθμιση αυτή αναμένεται να προσδώσει πιο φυσική κίνηση στις αρθρώσεις, ενώ παράλληλα μειώνει περαιτέρω το κόστος κατασκευής, καθώς για την υλοποίησή τους απαιτείται μόνο η διαμόρφωση των συνδέσμων και η χρήση ενός σπάγκου.

### 4.3 Περιορισμοί

Τέλος, παρά τα παραπάνω πλεονεκτήματα, το σύστημα παρουσιάζει και ορισμένους περιορισμούς, οι οποίοι αναλύονται στη συνέχεια. Πρώτος και βασικότερος περιορισμός, που συνοδεύει κάθε ανάπτυξη νέας εφαρμογής, είναι η ανάλυση κόστους. Για το σύστημα που αναπτύχθηκε, το χαμηλό κόστος αποτελούσε αναγκαία προϋπόθεση. Η κατασκευή υλοποιήθηκε με πλαστικό και τη χρήση τριδιάστατου εκτυπωτή, γεγονός που επέτρεψε την παραγωγή πρωτοτύπων σε χαμηλή τιμή και χωρίς τη διαμεσολάβηση τρίτων. Επιπλέον, η επιλογή σερβο-κινητήρων χαμηλού κόστους και η αποφυγή χρήσης ρουλεμάν στις αρθρώσεις συνέβαλαν στη διατήρηση του κόστους σε χαμηλά επίπεδα.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Y. S. Choi, T. Deyle, T. Chen, J. Glass, and C. Kemp, "A list of household objects for robotic retrieval prioritized by people with ALS," in *Rehabilitation Robotics, 2009. ICORR 2009. IEEE International Conference on*, June 2009, pp. 510–517.
- [2] D. Acemoglu και P. Restrepo, "Robots and Jobs: Evidence from U.S. Labor Markets," *Journal of Political Economy*, vol. 128, no. 6, pp. 2188–2244, June 2020. [Online]. Available: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/705716>. [Accessed: 3-Aug-2025].
- [3] D. Klenert, E. Fernández-Macías, και J.-I. Antón, "Do robots really destroy jobs? Evidence from Europe," *JRC Working Papers Series on Labour, Education and Technology*, No. 2020/01, Joint Research Centre, European Commission, Seville, June 2020. [Online]. Available: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/231333/1/jrc-wplet202001.pdf>. [Accessed: 3-Aug-2025].
- [4] Financial Times, "Robot revolution forces China's human workforce to adapt," *Financial Times*, 13 Nov. 2024. [Online]. Available: <https://www.ft.com/content/dc7e1117-11d1-4da4-8af0-931fe967f548>. [Accessed: 3-Aug-2025].
- [5] U.S. Department of Labor, Occupational Safety and Health Administration (OSHA), "OSHA Technical Manual (OTM) | Section IV: Chapter 4 - Industrial Robots and Robot System Safety," OSHA, 15 Nov. 2020. [Online]. Available: <https://www.osha.gov/otm/section-4-safety-hazards/chapter-4>. [Accessed: 3-Aug-2025].
- [6] Guarana-DIY, "The Top Six Types of Industrial Robots in 2020," *DIY-Robotics*, 30 June 2020. [Online]. Available: <https://diy-robotics.com/blog/the-top-six-types-of-industrial-robots-in-2020/>. [Accessed: 3-Aug-2025].
- [7] ISO 10218-1:2025, "Robotics — Safety requirements — Part 1: Industrial robots," International Organization for Standardization, Feb. 2025. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/73933.html>. [Accessed: 3-Aug-2025].
- [8] Robotic Industries Association (RIA), "ANSI/RIA R15.06-2012 - Industrial Robots and Robot Systems - Safety Requirements," RIA, 2012. [Online]. Available: <https://webstore.ansi.org/standards/ria/ansiriar15062012>. [Accessed: 3-Aug-2025].
- [9] ISO/TS 15066:2016, "Robots and robotic devices — Collaborative robots," International Organization for Standardization, Feb. 2016. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/62996.html>. [Accessed: 3-Aug-2025].
- [10] International Electrotechnical Commission (IEC), "IEC 61508 & Functional Safety – 2022," IEC, 2022. [Online]. Available: <https://assets.iec.ch/public/acos/IEC%2061508%20%26%20Functional%20Safety-2022.pdf?2023040501>. [Accessed: 3-Aug-2025].
- [11] CAPIEL Project Group No. 5, "Low voltage switchgear and controlgear – safety aspects" (CAPIEL White Paper, Edition 2, 4 Jan. 2017), CAPIEL, 2017. [Online]. Available: <https://www.capiel.eu/img/Final-CAPIEL-white-paper-rev-2017-02-10.pdf>. [Accessed: 2-Aug-2025].
- [12] G.-Z. Yang, J. Cambias, K. Cleary, E. Daimler, J. Drake, P. E. Dupont, N. Hata, P. Kazanzides, S. Martel, R. V. Patel, V. J. Santos, και R. H. Taylor, "Medical robotics — Regulatory, ethical, and legal considerations for increasing levels of autonomy," *Science Robotics*, vol. 2, no. 4, article eaam8638, 15 Mar. 2017. doi: 10.1126/scirobotics.aam8638. [Online]. Available: <https://robotics.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/scirobotics.aam8638>. [Accessed: 3-Aug-2025].

- [13] Intuitive Surgical, “*Da Vinci Surgical System: Product Overview*,” [Online]. Available: <https://www.intuitive.com/en-us/products-and-services/da-vinci>. [Accessed: 3-Aug-2025].
- [14] Intuitive Surgical, “*Intuitive announces FDA clearance of fifth-generation robotic system, da Vinci 5*,” *Press Release*, Mar. 14, 2024. [Online]. Available: <https://isrg.intuitive.com/news-releases/news-release-details/intuitive-announces-fda-clearance-fifth-generation-robotic>. [Accessed: 2-Aug-2025].
- [15] G. I. Barbash and S. A. Glied, “*New technology and health care costs — The case of robot-assisted surgery*,” *New England Journal of Medicine*, vol. 363, no. 8, pp. 701–704, 19 Aug. 2010. doi: 10.1056/NEJMp1006602. [Online]. Available: <https://www.nejm.org/doi/10.1056/NEJMp1006602>. [Accessed: 3-Aug-2025].
- [16] M. Tavakoli, R. V. Patel, και M. Moallem, “*Haptic interaction in robot-assisted endoscopic surgery: a review of technical issues and solutions*,” *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, vol. 2, no. 2, pp. 53–63, Apr. 2006. doi: 10.1002/res.16. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/res.16>. [Accessed: 3-Aug-2025].
- [17] K. J. Zuo και J. L. Olson, “*The evolution of functional hand replacement: From iron prostheses to hand transplantation*,” *Plastic Surgery (Oakv)*, vol. 22, no. 1, pp. 44–51, Spring 2014. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4128433/>. [Accessed: 26-Sep-2024].
- [18] V. Putti, “*Historical prostheses*,” *Scritti Medici*, vol. IX, no. 4–5, 1925. [Online]. Available: Google Scholar. [Accessed: 26-Sep-2024].
- [19] Kathimerini, “*H NVidia σχεδιάζει ανθρωποειδή ρομπότ με AI εγκέφαλο*,” *Καθημερινή*, 19 Mar. 2024. [Online]. Available: <https://www.kathimerini.gr/world/562939243/i-nvidia-schediazai-anthropoeidi-rompot-me-ai-egkefalo>. [Accessed: 26-Sep-2024].
- [20] L. B. Bridgwater\*, C. A. Ihrke\*\*, M. A. Diftler\*, M. E. Abdallah\*\*, N. A. Radford\*, J. M. Rogers\*, S. Yayathi\*, R. s. Askew\*, D. M. Linn \*\*, “*The Robonant 2 Hand - Designed To Do Work With Tools*,” 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 14-18, 2012, RiverCentre, Saint Paul, Minnesota, USA.
- [21] Z. Δουλγέρη, *Ρομποτική – Κινηματική, Δυναμική και Έλεγχος Αρθρωτών Βραχιόνων*, Αθήνα, Ελλάδα: Κριτική, 2007, ISBN: 978-960-218-502-5.
- [22] National Instruments, “*Labview*,” [Online]. Available: <https://www.ni.com/en.html> [Accessed: 3-Aug-2025].
- [23] MathWorks, “*MATLAB*,” [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>. [Accessed: 3-Aug-2025].
- [24] AZoRobotics, *The Development of a Revolutionary Robotics Control System*. [Online]. Available: <https://www.azorobotics.com/Article.aspx?ArticleID=237>. Groover, Mikell P., “*Automation*,” *Encyclopedia Britannica*, Oct. 4, 2024, <https://www.britannica.com/technology/automation>.
- [25] “*Βιομηχανικά ρομπότ*,” Retrieved Sep. 26, 2024. Available: [https://el.wikipedia.org/wiki/Βιομηχανικά\\_ρομπότ](https://el.wikipedia.org/wiki/Βιομηχανικά_ρομπότ).
- [26] Shai Luria, MD, Jay T. Bridgeman, MD, DDS, και Thomas E. Trumble, MD, “*Ανατομία και Εξέταση του Χεριού, του Καρπού, του Αντιβραχίου και του Αγκώνα*,” 2024. Available: [https://sportbook.gr/wp-content/uploads/2018/04/arhes-heirourgikis-heriou\\_deigma.pdf?srsItd=AfmBOor4dKe6vWLHIka8AAadusUVYOtR4FgqR7uizqC4UCC4T8nodGTYC](https://sportbook.gr/wp-content/uploads/2018/04/arhes-heirourgikis-heriou_deigma.pdf?srsItd=AfmBOor4dKe6vWLHIka8AAadusUVYOtR4FgqR7uizqC4UCC4T8nodGTYC)

- [27] Dassault Systèmes, "SOLIDWORKS," [Online]. Available: <https://www.solidworks.com>. [Accessed: 3-Aug-2025].
- [28] Bambu Lab, "Bambu Lab X1 Series 3D Printer," [Online]. Available: <https://www.bambulab.com/en/x1>. [Accessed: 3-Aug-2025].
- [29] FormFutura B.V., "ApolloX ASA-based 3D printer filament," [Online]. Available: <https://www.formfutura.com/shop/apollox-89>. [Accessed: 3-Aug-2025].
- [30] L. Tian, N. Magnenat-Thalmann, D. Thalmann, and J. Zheng, "A Methodology to Model and Simulate Customized Realistic Anthropomorphic Robotic Hands," in *Proceedings of Computer Graphics International 2018*, Jun. 2018, pp. 153–162, ACM. doi: 10.1145/3208159.3208182. [Online]. Available: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3208159.3208182>. [Accessed: 3-Aug-2025].
- [31] L. Wang, J. DelPreto, S. Bhattacharyya, J. Weisz, and P. K. Allen, "A highly-underactuated robotic hand with force and joint angle sensors," in *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'11)*, San Francisco, CA, USA, Sep. 2011, pp. 1380–1385. doi: 10.1109/IROS.2011.6048748. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IROS.2011.6048748>. [Accessed: 3-Aug-2025].
- [32] X. Li, Q. Huang, X. Chen, Z. Yu, J. Zhu, and J. Han, "A novel under-actuated hand with adaptive robotic fingers," *Physiological Measurement*, vol. 38, no. 11, Nov. 2017. doi: 10.1177/1687814016688859. [Online]. Available: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1687814016688859>. [Accessed: 3-Aug-2025].
- [33] R. Cabás and C. Balaguer, "Design and development of a light weight embodied robotic hand activated with only one actuator," in *Proceedings of...* (conference name), Sep. 2005. [Online]. Available: IEEE Xplore. doi: ... [Accessed: 3-Aug-2025].
- [34] X. Yang, Y. Yang, W. Zhang, X. Xu, H. Hu and J. Hu, "Indirectly self-adaptive underactuated robot hand with block-linkage mechanisms," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 15, pp. 1553–1562, Aug. 2014. doi: 10.1007/s12541-014-0504-9. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12541-014-0504-9>. [Accessed: 3-Aug-2025].
- [35] LibreCAD Community, "LibreCAD: free and open source 2D-CAD application," [Online]. Available: <https://librecad.org>. [Accessed: 3-Aug-2025].
- [36] Z. Xu, V. Kumar, E. Todorov, "Low-cost and Modular, 20-DOF Anthropomorphic Robotic Hand: Design, Actuation and Modeling," *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 2013. [Online]. Available: <https://vikashplus.github.io/Projects/Finger/AnthromorphicRoboticHand%28humanoids13%29.pdf>. [Accessed: 3-Aug-2025].
- [37] Arduino® Nano ESP32, "Arduino® Nano ESP32," Arduino, 2025. [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/products/nano-esp32>. [Accessed: 3-Aug-2025].
- [38] Arduino, "Arduino Official Website," [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/>. [Accessed: 3-Aug-2025].
- [39] Adafruit Industries, "Adafruit Official Website," [Online]. Available: <https://www.adafruit.com/>. [Accessed: 3-Aug-2025].
- [40] u-blox, "NORA-W10 series - Data sheet," u-blox, 9 May. 2023. [Online]. Available: [https://content.u-blox.com/sites/default/files/documents/NORA-W10\\_DataSheet\\_UBX-21036702.pdf](https://content.u-blox.com/sites/default/files/documents/NORA-W10_DataSheet_UBX-21036702.pdf). [Accessed: 3-Aug-2025].

- [41] u-blox, "u-blox Official Website," u-blox, [Online]. Available: <https://www.u-blox.com/en>. [Accessed: 3-Aug-2025].
- [42] Espressif Systems, "ESP32-S3 Series Datasheet, Version 3.6," Espressif Systems, 9 Ιουλ. 2021. [Online]. Available: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3_datasheet_en.pdf). [Accessed: 3-Aug-2025].
- [43] NXP Semiconductors, "PCA9685 16-channel, 12-bit PWM Fm+ I<sup>2</sup>C-bus LED controller," NXP Semiconductors, 16 Απρ. 2015. [Online]. Available: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/PCA9685.pdf>. [Accessed: 3-Aug-2025].
- [44] A. Villoslada, "Design and implementation of a myoelectric control system for a printable robotic hand," M.S. thesis, Advisor: Dr. M. A. Fichouche, Jan. 2012. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/259639884\\_Design\\_and\\_implementation\\_of\\_a\\_myoelectric\\_control\\_system\\_for\\_a\\_printable\\_robotic\\_hand](https://www.researchgate.net/publication/259639884_Design_and_implementation_of_a_myoelectric_control_system_for_a_printable_robotic_hand). [Accessed: 3-Aug-2025].
- [45] Y. S. Choi, T. Deyle, T. Chen, J. Glass, and C. Kemp, "A list of household objects for robotic retrieval prioritized by people with ALS," in \*Rehabilitation Robotics, 2009. ICORR 2009. IEEE International Conference on\*, June 2009, pp. 510–517.
- [46] M. R. Cutkosky, "On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 5, no. 3, pp. 269–279, 1989.
- [47] M. R. Cutkosky and I. Kao, "Computing and controlling the compliance of a robotic grasp," *IEEE Trans. Robotics Automat.\**, vol. 5, no. 2, pp. 151–165, Apr. 1989.
- [48] M. T. Mason and J. K. Salisbury, \*Robot Hands and the Mechanics of Manipulation\*. Cambridge, MA: MIT Press, 1985.
- [49] M. S. Ohwovoriole and B. Roth, "An extension of screw theory," *J. Mech. Des.\**, vol. 103, pp. 725–735, 1981.
- [50] K. Lakshminarayana, "Mechanics of form closure" ASME Tech. Paper 78-DET-32, 1978.
- [51] J. Kerr and B. Roth, "Analysis of multifingered hands" *Int. J. Robotics Res.\**, vol. 4, no. 4, pp. 3–17, 1986.
- [52] M. T. Mason and J. K. Salisbury, \*Robot Hands and the Mechanics of Manipulation\*. Cambridge, MA: MIT Press, 1985.
- [53] Z. Li and S. Sastry, "Task oriented optimal grasping by robotic hands" in \*Proc. 1987 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation\*, Raleigh, NC, Mar. 1987, pp. 389–394.
- [54] -, "Friction, stability and the design of robotic fingers" *Int. J. Robotics Res.\**, vol. 5, no. 4, pp. 20–37, 1987.
- [55] J. Jameson and L. J. Leifer, "Automatic grasping: An optimization approach" *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.\**, vol. SMC-17, no. 5, pp. 806–813, Sept. 1987.
- [56] V.-D. Nguyen, "Achieving stable grasps in 3D" in \*Proc. 1987 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation\*, Raleigh, NC, Mar. 1987, pp. 240–245.
- [57] Y. Nakamura, K. Nagai, and T. Yoshikawa, "Mechanics of coordinate manipulation by multiple robotic mechanisms" in \*Proc. 1987 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation\*, Raleigh, NC, Mar. 1987, pp. 991–998.

- [58] E. S. Klima and U. Bellugi, *\*The Signs of Language\**. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1979.
- [59] R. Sutton-Spence and B. Woll, *\*The Linguistics of British Sign Language: An Introduction\**. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [60] Cadence Design Systems, “*Tensilica Xtensa LX7 Processor Datasheet*,” Cadence Design Systems, 2016. [Online]. Available: [https://www.cadence.com/en\\_US/home/resources/datasheets/xtensa-lx7-processor-ds.html](https://www.cadence.com/en_US/home/resources/datasheets/xtensa-lx7-processor-ds.html). [Accessed: 04-Aug-2025].
- [61] NXP Semiconductors, “*PCA9685 16-channel, 12-bit PWM Fm+ I<sup>2</sup>C-bus LED controller*,” Product data sheet rev. 4, NXP Semiconductors, 16 Apr. 2015. [Online]. Available: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/PCA9685.pdf>. [Accessed: 04-Aug-2025].
- [62] “*eClass - Ηλεκτρονική τάξη ΕΚΠΑ*”, [Online]. Available: <https://www.eclass.uoa.gr/>. [Accessed: 04-Aug-2025].
- [63] SportBook.gr, “*Άρθρες Χειρουργικής Χεριού – Δείγμα (PDF)*”, [Online]. Available: [https://sportbook.gr/wp-content/uploads/2018/04/arhes-heirourgikis-heriou\\_deigma.pdf](https://sportbook.gr/wp-content/uploads/2018/04/arhes-heirourgikis-heriou_deigma.pdf). [Accessed: 04-Aug-2025].
- [64] Qt Company, “Qt Documentation,” [Online]. Available: <https://www.qt.io/>. [Accessed: 04-Aug-2025].
- [65] Δραστηριότητα Αποκωδικοποίησης με το Ελληνικό Δακτυλικό Αλφάβητο για βασικές έννοιες πληροφορικής – Β΄ Τάξη, 103ο Δημοτικό Σχολείο Αθηνών, *Codeweek.eu*, 14–25 Oct. 2024. [Online]. Available: <https://codeweek.eu/view/617428/drastiriotita-apokodikopiisis-me-to-elliniko-daktiliko-alfavito-ghia-vasikes-ennoies-pliροφοrikis-b-taksi-103o-ds-athinwn>. [Accessed: 6-Aug-2025].
- [66] Κατασκευή απτικού γαντιού για τηλεχειρισμό ρομποτικού βραχίονα. Γιαννακός Κωνσταντίνος, 1/10/2025. ΔΠΠΑΕ

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΚΥΡΙΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_PWMServoDriver.h>

// Create the PWM servo driver object
Adafruit_PWMServoDriver pwm = Adafruit_PWMServoDriver(0x40);

// Define the servo pulse range (in microseconds)
#define SERVOMIN 100 // Minimum pulse length count (approx. 500us)
#define SERVOMAX 500 // Maximum pulse length count (approx. 2500us)

int angle[4][2] = { {0, 0}, {0, 0}, {0, 0}, {0, 0} }; // [αριθμός-1][0 για A,
1 για B]
int currentNumber = 1;
char currentPart = 'A';

char lastCommand = 0; // αποθηκεύει '+' ή '-'
unsigned long lastUpdate = 0; // για χρονικό έλεγχο
const int updateInterval = 20; // 15 ms

// Servo numbers on the shield
int servo[16] = { 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 }; //
Servo0-1-2 mikro Servo3-4-5 diktis Servo6-7-8 meseo Servo on channel 9 10
thumb e3w karpos 11 12 mesa karpos 14 15

int servo1 = 0; // Servo on channel 0
int servo2 = 1; // Servo on channel 1 0-1-2 mikro
int servo3 = 2; // Servo on channel 2

int servo4 = 3; // Servo on channel 3
int servo5 = 4; // Servo on channel 4 3-4-5 diktis
int servo6 = 5; // Servo on channel 5

int servo7 = 6; // Servo on channel 6
int servo8 = 7; // Servo on channel 7 6-7-8 meseo
int servo9 = 8; // Servo on channel 8

int thumb = 9;
int pthumb = 10;

int servo12 = 11;

int servo13 = 12; //e3w
int servo14 = 13; //karpos

int servo15 = 14; //mesa
int servo16 = 15; //karpos
```

```

uint16_t convertDegreeToPulse(int degree) {
    int pulseLength = map(degree, 0, 180, SERVOMIN, SERVOMAX);
    return pulseLength;
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    pwm.begin(); // Initialize the PWM driver with the default address
    pwm.setPWMFreq(50); // Set frequency to 50 Hz, typical for servos
    delay(10);

    Serial.println("Δώσε αριθμό (1-4) και μέρος (A/B):");
}

void loop() {
    if (Serial.available()) { // Αν υπάρχει νέα είσοδος
        char input = Serial.read();

        if (input >= '1' && input <= '4') { // Αλλαγή αριθμού
            currentNumber = input - '0';
            lastCommand = 0; // σταματάμε την αυτόματη αλλαγή
        }

        // Αλλαγή μέρους
        if (input == 'A' || input == 'a') {
            currentPart = 'A';
            lastCommand = 0;
        } else if (input == 'B' || input == 'b') {
            currentPart = 'B';
            lastCommand = 0;
        }

        // Αν είναι + ή -, αποθηκεύουμε την εντολή
        if (input == '+' || input == '-') {
            lastCommand = input;
        }
    }

    // Αν έχει δοθεί τελευταία εντολή + ή - και πέρασαν 15ms
    if ((lastCommand == '+' || lastCommand == '-') && millis() - lastUpdate >=
updateInterval) {
        int partIndex = (currentPart == 'A') ? 0 : 1;

        if (lastCommand == '+' && angle[currentNumber - 1][partIndex] < 80){
            angle[currentNumber - 1][partIndex]++;
            moveGroup( currentNumber, partIndex, angle[currentNumber -
1][partIndex]);
        } else if (lastCommand == '-' && angle[currentNumber - 1][partIndex] > 0){
            angle[currentNumber - 1][partIndex]--;

```

```

        moveGroup( currentNumber, partIndex, angle[currentNumber -
1][partIndex]);
    }

    Serial.println(angle[currentNumber - 1][partIndex]);

    lastUpdate = millis(); // ανανέωση χρόνου

}

}

```

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : ΚΩΔΙΚΑΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ

```

void moveGroup(int groupIndex, int part, int pos) {
    switch (groupIndex) {
        case 1:
            if(part==0){
                Serial.println("group index 1a");
                pwm.setPWM(0, 0, convertDegreeToPulse(pos+100));
            }
            else{
                Serial.println("group index 1b");
                pwm.setPWM(1, 0, convertDegreeToPulse(pos+100));
                pwm.setPWM(2, 0, convertDegreeToPulse(pos+100));
            }
            break;

        case 2:
            if(part==0){
                Serial.println("group index 2a");
                pwm.setPWM(4, 0, convertDegreeToPulse(pos+100));
            }
            else{
                Serial.println("group index 2b");
                pwm.setPWM(3, 0, convertDegreeToPulse(pos+100));
                pwm.setPWM(5, 0, convertDegreeToPulse(pos+100));
            }
            break;

        case 3:
            if(part==0){
                Serial.println("group index 3a");
                pwm.setPWM(6, 0, convertDegreeToPulse(pos));
            }
            else{

```

```

        Serial.println("group index 3b");
        pwm.setPWM(7, 0, convertDegreeToPulse(pos));
        pwm.setPWM(8, 0, convertDegreeToPulse(pos));
    }
    break;

case 4:
    if(part==0){
        Serial.println("group index 4a");
        pwm.setPWM(9, 0, convertDegreeToPulse(pos+70));
    }
    else{
        Serial.println("group index 4b");
        pwm.setPWM(10, 0, convertDegreeToPulse(pos+100));
    }
    break;

default:
    Serial.println("Invalid group index");
    break;
}
}

```