



Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης  
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών  
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
«Προηγμένα Συστήματα Παραγωγής, Αυτοματισμού και Ρομποτικής»

## ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σχεδίαση, κατασκευή και έλεγχος εξωσκελετικού  
επιπρόσθετου ρομποτικού δαχτύλου

**Μπέκας Βασίλειος**

Επιβλέπων: Δρ. Φασουλάς Ιωάννης

Ηράκλειο Κρήτης, Μάιος 2017



Technological Educational Institute of Crete  
School of Engineering  
Postgraduate Program  
«Advanced Manufacturing Systems, Automation and Robotics»

**MASTER THESIS**

Design, development and control  
of an extra robotic finger

**Bekas Vasileios**

Advisor: Dr. Fasoulas Ioannis (John)

Heraklion Crete, May 2017



Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης  
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών  
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
«Προηγμένα Συστήματα Παραγωγής, Αυτοματισμού και Ρομποτικής»

## ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σχεδίαση, κατασκευή και έλεγχος εξωσκελετικού  
επιπρόσθετου ρομποτικού δαχτύλου

**Μπέκας Βασίλειος**

Επιβλέπων: Δρ. Φασουλάς Ιωάννης

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις .....

Δρ. Φασουλάς Ιωάννης, Επίκουρος Καθηγητής.....  
(Υπογραφή)

Δρ. Σφακιωτάκης Μιχαήλ, Επίκουρος Καθηγητής.....  
(Υπογραφή)

Δρ. Πετούσης Μάρκος, Επίκουρος Καθηγητής.....  
(Υπογραφή)

Ηράκλειο Κρήτης, Μάιος 2017



## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής μου εργασίας θα ήθελα κατ' αρχήν να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Δρ. Φασουλά Ιωάννη, για την ευκαιρία που μου παρείχε να ασχοληθώ με το αντικείμενο αυτό, την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου αλλά και τις γνώσεις που μου μετέδωσε κατά τη διάρκεια της εργασίας και των σπουδών μου.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Δρ. Σφακιωτάκη Μιχαήλ για τη βοήθεια και τις συμβουλές που μου έδωσε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, αλλά και για τις γνώσεις που μου μετέδωσε κατά τη διάρκεια των μαθημάτων.

Για την πολύτιμη βοήθεια, τις συμβουλές και τη συμπαράσταση που παρείχαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου Λουκά Γιώργο, Χανιωτάκη Βαγγέλη, Γκλίβα Ρόζα και Καλαντζή Σπύρο.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για τη συνεχή στήριξη και συμπαράσταση, καθώς και να της αφιερώσω την εργασία αυτή.

## Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια παρουσιάζεται ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον για την ανάπτυξη ρομποτικών διατάξεων, οι οποίες τοποθετούνται απευθείας επάνω στο σώμα του χρήστη και αποσκοπούν στην υποστήριξη της κίνησης του σώματος ατόμων με κινητικές δυσκολίες, καθώς επίσης και για την αποκατάσταση και ενίσχυση των κινητικών λειτουργιών ατόμων με αναπηρίες.

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας ήταν η σχεδίαση, κατασκευή και ο έλεγχος ενός εξωσκελετικού επιπρόσθετου ρομποτικού δαχτύλου, το οποίο θα μπορεί να προσαρμοστεί στον καρπό του ανθρώπινου χεριού. Η διάταξη αυτή, ως ένα έκτο δάκτυλο, αποσκοπεί στην ενίσχυση των ικανοτήτων του χεριού ανθρώπων με κινητικά προβλήματα, λειτουργώντας ως συμπληρωματικό μέλος. Επιπρόσθετα διερευνάται η δυνατότητα αντιστάθμισης της απώλειας κάποιου μέλους του χεριού και πιο συγκεκριμένα του αντίχειρα. Τα χαρακτηριστικά που θα πρέπει να διαθέτει είναι η ελαφριά και στιβαρή κατασκευή, ευκολία φορητότητας και ασφάλεια στη χρήση της.

Παράλληλα, η εργασία αποσκοπεί στην ανάπτυξη κατάλληλου αλγόριθμου για τον λειτουργικό έλεγχο της κίνησης του ρομποτικού δαχτύλου, το οποίο θα υποβοηθά το ανθρώπινο μέλος αντιλαμβανόμενο την κίνηση του χεριού κατά τη λαβή κάποιου αντικειμένου.

Για την καταγραφή της κίνησης του ανθρώπινου χεριού, υλοποιήθηκε γάντι συλλογής δεδομένων το οποίο ενσωματώνει αισθητήρες κάμψης. Σημαντικό στοιχείο αποτελεί η σχεδίαση κατάλληλου ηλεκτρικού κυκλώματος για την αξιόπιστη καταγραφή των δεδομένων, ενώ η κατασκευή των απαραίτητων πλακετών επέκτασης θα πρέπει να εξασφαλίζει τη φορητότητα του συστήματος.

## Summary

In recent years, the research and scientific community has shown considerable interest in the development of robotic devices that are attached directly to the human body. These devices aim to support the movement of people with diminished functionality and to aid with the rehabilitation and enhancement of the mobility of patients with limb impairments.

Primary aim of this thesis is the design, development and control of an extra robotic finger, which will be worn on the wrist of the human hand. The objective of this prototype is the enhancement of the hand motion capabilities and functionality of people with reduced hand mobility, serving as an extra limb. Furthermore, the potential to counterbalance the loss of a limb and in particular the thumb, is investigated. The characteristics that this device should possess include a robust and light weight construction, portability and safety in use.

This work also aims in the development of suitable algorithms to control the motion of the robotic finger. The proposed algorithms will integrate the movement of the robotic device to that of the human hand, to provide support during grasping motions.

A data glove using flex sensors was developed in order to capture the motion of the human hand. Electronic circuits were designed and implemented to ensure reliable data acquisition. Additionally, the system's portability is achieved through custom built printed circuit boards (Arduino Shields).

# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>3</b>
1.1	Ερευνητικό πλαίσιο . . . . .	3
1.2	Βιβλιογραφική ανασκόπηση . . . . .	4
1.2.1	Γάντια συλλογής δεδομένων και οι εφαρμογές τους . . . . .	13
1.3	Συμβολή της παρούσας εργασίας . . . . .	16
1.4	Δομή εργασίας . . . . .	16
<b>2</b>	<b>Το Ανθρώπινο Χέρι και το Επιπρόσθετο Δάκτυλο</b>	<b>18</b>
2.1	Εισαγωγή . . . . .	18
2.2	Το ανθρώπινο χέρι . . . . .	18
2.2.1	Οι αρθρώσεις και οι φάλλαγες του ανθρώπινου χεριού . . . . .	19
2.3	Κινηματική ανάλυση ανθρώπινου χεριού . . . . .	20
2.3.1	Ευθεία κινηματική ανάλυση αντίχειρα . . . . .	21
2.3.2	Ευθεία κινηματική ανάλυση υπόλοιπων δαχτύλων . . . . .	23
2.4	Περιορισμοί κίνησης δαχτύλων . . . . .	25
2.5	Το επιπρόσθετο εξωσκελετικό ρομποτικό δάκτυλο . . . . .	28
2.5.1	Η διάταξη στήριξης του δαχτύλου που αναπτύχθηκε . . . . .	29
2.5.2	Βαθμονόμηση σερβοκινητήρων . . . . .	30
2.5.3	Διασύνδεση ρομποτικού δαχτύλου με το μικροελεγκτή . . . . .	32
2.5.4	Ευθεία κινηματική ανάλυση επιπρόσθετου ρομποτικού δαχτύλου . . . . .	32
2.5.5	Αντίστροφη κινηματική ανάλυση επιπρόσθετου ρομποτικού δαχτύλου . . . . .	34
<b>3</b>	<b>Σχεδίαση και Υλοποίηση Γαντιού Συλλογής Δεδομένων</b>	<b>37</b>
3.1	Εισαγωγή . . . . .	37
3.2	Γενική περιγραφή . . . . .	37
3.3	Υλοποίηση γαντιού συλλογής δεδομένων . . . . .	39
3.3.1	Βαθμονόμηση αισθητήρων κάμψης . . . . .	39
3.3.2	Βασικό κύκλωμα μέτρησης αισθητήρα . . . . .	41
3.3.3	Κύκλωμα ενίσχυσης σήματος αισθητήρα . . . . .	42
3.3.4	Βαθμονόμηση τάσης εισόδου στο μικροελεγκτή . . . . .	47
3.3.5	Βοηθητικές πλακέτες επέκτασης . . . . .	51
3.4	Προσομοίωση γαντιού συλλογής δεδομένων . . . . .	53
<b>4</b>	<b>Έλεγχος Κίνησης Εξωσκελετικού Επιπρόσθετου Ρομποτικού Δακτύλου</b>	<b>58</b>



4.1	Εισαγωγή . . . . .	58
4.2	Ανάλυση Λαβής . . . . .	58
4.3	Μοντέλα Επαφών . . . . .	60
4.4	Κριτήρια αξιολόγησης λαβής . . . . .	63
4.4.1	Κριτήρια με βάση τις αλγεβρικές ιδιότητες του Grasp Matrix . . . . .	63
4.4.2	Κριτήρια με βάση τη διαμόρφωση του χεριού . . . . .	64
4.5	Έλεγχος επιπρόσθετου ρομποτικού δαχτύλου . . . . .	64
4.5.1	Στατική λαβή αντικειμένου . . . . .	68
4.5.2	Αλλαγή προσανατολισμού αντικειμένου . . . . .	69
4.5.3	Αλλαγή θέσης αντικειμένου . . . . .	70
4.6	Πειραματικά αποτελέσματα . . . . .	71
4.6.1	Στατική λαβή . . . . .	71
4.6.2	Αλλαγή προσανατολισμού . . . . .	74
4.6.3	Αλλαγή θέσης . . . . .	75
<b>5</b>	<b>Σχόλια, Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Εξέλιξη</b>	<b>77</b>
5.1	Εισαγωγή . . . . .	77
5.2	Σχόλια και συμπεράσματα . . . . .	77
5.3	Μελλοντική εξέλιξη . . . . .	79
	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>81</b>
	<b>Παράρτημα</b>	<b>85</b>
A	Μηχανολογικό σχέδιο εξωσκελετικού επιπρόσθετου ρομποτικού δαχτύλου . . . . .	86
A.1	Τεχνικά χαρακτηριστικά σερβοκινητήρων . . . . .	88
B	Δεδομένα αισθητήρων κάμψης . . . . .	89
B.1	Μεταβολή αντίστασης . . . . .	89
B.2	Διαιρέτης τάσης . . . . .	91
B.3	Κύκλωμα Ενίσχυσης σήματος αισθητήρα . . . . .	93
B.4	Προσεγγιστικές καμπύλες . . . . .	95
C	Ηλεκτρονικά κυκλώματα . . . . .	97

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Ερευνητικό πλαίσιο

Η ιστορία και οι εξελίξεις στη ρομποτική δείχνουν μία όλο και στενότερη αλληλεπίδραση με τον ανθρώπινο παράγοντα. Ενώ αρχικά τα ρομποτικά συστήματα προορίζονταν για χρήση σε βιομηχανικό περιβάλλον για την αντικατάσταση των ανθρώπων σε κουραστικές και επαναλαμβανόμενες εργασίες, αλλά και όπου απαιτούνταν μεγάλη ακρίβεια, τα τελευταία χρόνια υπάρχει η τάση για αύξηση της αλληλεπίδρασής τους με τον ανθρώπινο χειριστή. Αυτό σημαίνει ότι διευρύνεται από μία απλή ανταλλαγή πληροφοριών σε μία πιο στενή αλληλεπίδραση που περιλαμβάνει σωματική και γνωσιακή λεπτομέρεια.

Σε αυτό το πλαίσιο αναδείχθηκε η έννοια των Wearable Robots (WRs), ρομποτικές συσκευές προσανατολισμένες στον άνθρωπο. Μπορούν να προσδιοριστούν ως συσκευές που "φοριούνται" από τον ανθρώπινο χειριστή είτε για να συμπληρώσουν τη λειτουργία ενός άκρου ή να το αντικαταστήσουν εξολοκλήρου. Το γεγονός ότι μπορούν να "φορεθούν" δεν σημαίνει απαραίτητα ότι η συσκευή είναι φορητή ή αυτόνομη. Σε αυτές τις περιπτώσεις σημαντικός αποτρεπτικός παράγοντας μπορεί να είναι η έλλειψη σημαντικής προόδου όσον αφορά τους επενεργητές και τις πηγές ενέργειας.

Μια πιθανή κατηγοριοποίηση των wearable robots μπορεί να γίνει λαμβάνοντας υπόψη την λειτουργία την οποία εκτελούν σε συνεργασία με τον ανθρώπινο παράγοντα [1]. Οι παρακάτω περιπτώσεις αποτελούν παραδείγματα των wearable robots:

- Εξωσκελετικές ρομποτικές συσκευές. Είναι συσκευές οι οποίες αποσκοπούν στην ενίσχυση της αντοχής και της δύναμης του χρήστη πέρα από την φυσική του ικανότητα, διατηρώντας παράλληλα τον έλεγχο του ρομπότ από τον άνθρωπο.
- Ορθοτικές ρομποτικές συσκευές. Είναι συσκευές που ακολουθούν την ανατομία του ανθρώπινου μέλους για το οποίο κατασκευάζονται και σκοπός τους είναι η αποκατάσταση λειτουργιών που έχουν χαθεί ή έχουν εξασθενήσει λόγω κάποιας ασθένειας, ατυχήματος ή νευρολογικής πάθησης.

- Προσθετικές ρομποτικές συσκευές. Είναι συσκευές που αντικαθιστούν ένα μέλος του ανθρώπινου σώματος μετά από ακρωτηριασμό. Η χρήση σύγχρονων τεχνολογιών, με όρους διεπαφής ανθρώπου ρομπότ μπορεί να καταστήσει δυνατή την αντικατάσταση της χαμένης λειτουργίας του άκρου με έναν τρόπο που είναι πιο κοντά στην φυσική ανθρώπινη λειτουργία.

Η πρόοδος που έχει συντελεστεί τα τελευταία χρόνια στον περιορισμό του μεγέθους και στην αποτελεσματικότητα μηχανικών εξαρτημάτων και αισθητηρίων, έχει επιτρέψει την ανάπτυξη ελαφρύτερων και πιο συμπαγών λύσεων. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η ενίσχυση της ασφάλειας και της άνεσης των χρηστών, ανοίγοντας παράλληλα και νέα πεδία στη χρήση των *wearable robots*. Σκοπός αυτών των νέων συσκευών δεν είναι η ενίσχυση της δύναμης πολύ πάνω από την ανθρώπινη φορώντας μία ογκώδη κατασκευή, αλλά να υποστηρίξει τις δεξιότητες του χρήστη μέσα στο εύρος δυνατοτήτων του, φορώντας μια ελαφριά και συμπαγή κατασκευή [2].

Πρακτικές εφαρμογές θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν την υποστήριξη της κίνησης του σώματος ατόμων με κινητικές δυσκολίες, την αποκατάσταση και διατήρηση των κινητικών λειτουργιών ατόμων με αναπηρίες, ακόμη και την υποστήριξη ανθρώπων κατά τη διάρκεια σύνθετων εργασιών στη βιομηχανία.

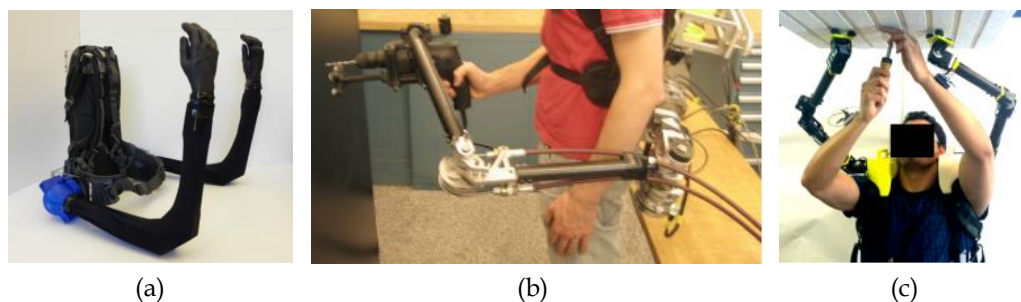
Τα τελευταία χρόνια, για την κάλυψη αναγκών σε κάποιες από τις παραπάνω περιπτώσεις, έχει αρχίσει να ερευνάται και να αναπτύσσεται μια πολλά υποσχόμενη νέα κατηγορία *wearable robots*, τα επιπρόσθετα ρομποτικά μέλη. Πρόκειται για ρομποτικές διατάξεις που τοποθετούνται απευθείας επάνω στο σώμα του χρήστη.

## 1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται μια ανασκόπηση των ρομποτικών πρωτοτύπων που συναντώνται στη βιβλιογραφία, τα οποία και αναπτύχθηκαν για τη διερεύνηση της δυνατότητας υποστήριξης χρηστών σε δύσκολες και σύνθετες εργασίες, αλλά και ανθρώπων με μειωμένη ικανότητα άκρων, ενισχύοντας και αντισταθμίζοντας τη χαμένη λειτουργικότητα.

Ερευνητές του Πανεπιστημίου της Μασαχουσέτης (MIT) εισήγαγαν την έννοια των επιπρόσθετων ρομποτικών μελών (*Supernumerary Robotic Limbs, SRL*) το 2012, όταν και παρουσίασαν το πρώτο πρωτότυπο (Σχήμα 1.1a), μια διάταξη που προσαρμόζεται στη μέση του ανθρώπου παρέχοντας στον χρήστη δύο επιπλέον ρομποτικά χέρια [3]. Τα SRL είναι *wearable robots* και ο χρήστης μπορεί να επωφεληθεί κατά τη διάρκεια σύνθετων εργασιών, να αντισταθμίσει το βάρος του ενώ εργάζεται σε άβολες στάσεις ή και να αυξήσει την ισορροπία του κατά τη διάρκεια του βαδίσματος. Ένα ιδιαίτερα σημαντικό χαρακτηριστικό είναι η ανεξαρτησία τους από τα φυσικά άκρα του χρήστη με αποτέλεσμα να μην περιορίζονται στο να ακολουθούν τις κινήσεις του χρήστη αλλά να κινούνται βάση κατάλληλων νόμων ελέγχου.

Ως υπόδειγμα πεδίου εφαρμογής, επιλέχθηκε η αεροναυπηγική βιομηχανία, όπου ερευνήθηκε περαιτέρω η λειτουργία τους και η αποτελεσματικότητά τους [4–8]. Οι χρήστες που εξοπλί-



Σχήμα 1.1: Τα επιπρόσθετα ρομποτικά μέλη που αναπτύχθηκαν στο MIT (a) Το πρωτότυπο, (b) Τοποθετημένο στη μέση, (c) Τοποθετημένο στους ώμους [4, 6, 9].

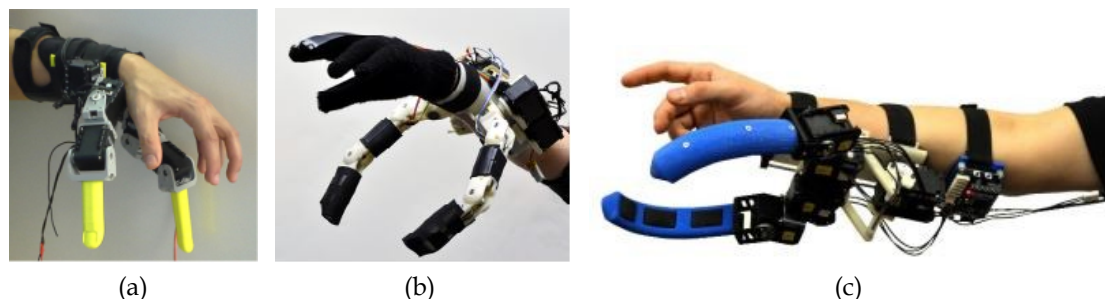
στηκαν με τα ρομποτικά άκρα είχαν τη δυνατότητα να κρατούν επιπλέον εργαλεία κατά τη διάρκεια κατασκευής και συναρμολόγησης ενός αεροσκάφους και να τοποθετούν με μεγαλύτερη ευκολία αντικείμενα στην επιθυμητή θέση (Σχήμα 1.1b). Αποτέλεσμα ήταν η μείωση της συνολικής κόπωσης του χρήστη καθώς το φορτίο απομακρύνεται από τα χέρια και τη σπονδυλική στήλη. Μια διαφορετική προσέγγιση των SRL παρουσιάστηκε στην Εργασία [9], όπου σε αυτή την περίπτωση η κατασκευή προσαρμόζεται στους ώμους του χρήστη, δίνοντας του έτσι τη δυνατότητα να εκτελεί εργασίες στην περιοχή πάνω από το κεφάλι, όπως να σηκώνει και να κρατάει αντικείμενα (Σχήμα 1.1c). Εργασίες εγκατάστασης, συντήρησης ή επιθεώρησης μπορούν να πραγματοποιηθούν με πιο αποτελεσματικό και παραγωγικό τρόπο, μειώνοντας την απαιτούμενη σωματική προσπάθεια του χρήστη.

Βασιζόμενες στην ιδέα των SRL, αλλά επικεντρώνοντας το ενδιαφέρον τους περισσότερο στο ανθρώπινο χέρι, ερευνητικές ομάδες παρουσιάζουν ευρεία δραστηριότητα στη σχεδίαση και κατασκευή επιπρόσθετων ρομποτικών δαχτύλων. Πρόκειται για διατάξεις που αναπτύχθηκαν για την υποβοήθηση ανθρώπων που έχουν υποστεί εγκεφαλικά επεισόδια ή εμφανίζουν μειωμένη ικανότητα στα άκρα. Ειδικά για ημιπληγικούς ασθενείς που έχουν στη διάθεσή τους μόνο ένα λειτουργικό χέρι, η χρήση τέτοιων συσκευών μπορεί να βοηθήσει στην πραγματοποίηση καθημερινών δραστηριοτήτων, που είναι συνήθως δύσκολο να εκτελεστούν μόνο με το ένα χέρι.

Δυνητικά μπορούν να αντισταθμίσουν αναπηρίες ή να ενισχύσουν τις δυνατότητες των υφιστάμενων άκρων. Για παράδειγμα, αν ο ασθενής έχει ένα άκρο με μειωμένη λειτουργικότητα, η τοποθέτηση μίας τέτοιας ρομποτικής συσκευής στο ίδιο το αποδυναμωμένο χέρι μπορεί να βοηθήσει σε απλές εργασίες με τη χρήση και των δύο χεριών. Εναλλακτικά, αν το ένα άκρο είναι μη λειτουργικό, η ρομποτική διάταξη μπορεί να τοποθετηθεί στο υγιές χέρι και ο ασθενής να εκτελέσει εργασίες που υπό κανονικές συνθήκες θα απαιτούνταν και τα δύο χέρια. Οι μέχρι τώρα υλοποιήσεις μπορούν να διακριθούν σε δύο κύριες κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία ακολουθεί την ιδέα των SRL αναφορικά με τον αριθμό των μελών προτείνοντας δύο ρομποτικά δάχτυλα, ενώ η δεύτερη ένα.

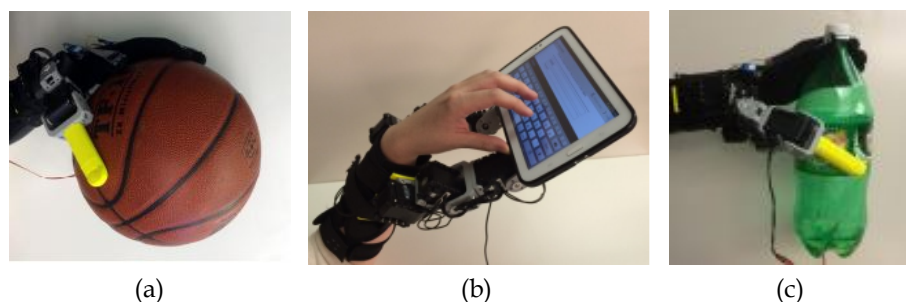
Στην πρώτη κατηγορία, το αρχικό πρωτότυπο αναπτύχθηκε στο MIT [10,11] και αφορά σε επιπρόσθετα ρομποτικά δάκτυλα (Supernumerary Robotic Fingers, SR Fingers). Προσαρμόζονται στον καρπό του χεριού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2a και στόχος είναι η ενίσχυση και διεύ-

ρυνση της λειτουργικότητας και ικανότητας των πέντε ανθρώπινων δαχτύλων, λειτουργώντας ως συμπληρωματικά μέλη. Το διευρυμένο μέγεθος και εύρος λειτουργίας τους συγκριτικά με αυτό των ανθρώπινων δαχτύλων, μπορεί να βοηθήσει στην εκτέλεση σύνθετων εργασιών όπου σε διαφορετική περίπτωση θα απαιτούνταν η χρήση και των δύο χεριών.



Σχήμα 1.2: Πρωτότυπα επιπρόσθετων ρομποτικών δαχτύλων που αναπτύχθηκαν στο MIT [10, 12, 13].

Κάποιες από αυτές τις εργασίες μπορεί να είναι η δυνατότητα συγκράτησης και χειρισμού μεγάλων ή ακανόνιστου σχήματος αντικειμένων (Σχήμα 1.3a), ή το κράτημα ενός αντικειμένου ενώ τα ανθρώπινα δάκτυλα εκτελούν μια επιδέξια εργασία, όπως π.χ. το κράτημα ενός tablet ενώ ο χρήστης πληκτρολογεί (Σχήμα 1.3b), ή το κράτημα ενός μπουκαλιού ενώ ο χρήστης αφαιρεί το καπάκι (Σχήμα 1.3c). Το κάθε ρομποτικό δάχτυλο διαθέτει τρεις βαθμούς ελευθερίας, με ισάριθμους επενεργητές. Ο έλεγχος της κίνησής τους και ο συνδυασμός της με την κίνηση των ανθρώπινων δαχτύλων, με τη μεγαλύτερη δυνατή φυσικότητα, υλοποιήθηκε με την εξαγωγή των μεταξύ τους συνεργειών (Synergies), θεωρώντας ένα χέρι επτά δαχτύλων. Η καταγραφή των κινήσεων του χεριού πραγματοποιήθηκε με τη χρήση γαντιού συλλογής δεδομένων. Όπως αναφέρεται χαρακτηριστικά, **η πρόκληση είναι ότι ο έλεγχος κίνησης θα πρέπει να είναι τέτοιος έτσι ώστε ο άνθρωπος σταδιακά να αρχίσει να αντιλαμβάνεται τα επιπρόσθετα μέλη ως προέκταση του σώματός του.**



Σχήμα 1.3: Παραδείγματα εκτελούμενων εργασιών με τη χρήση των επιπρόσθετων ρομποτικών δαχτύλων [10].

Η ίδια ερευνητική ομάδα στην Εργασία [12] παρουσίασε ένα νέο πρωτότυπο ρομποτικών δαχτύλων, με τη νέα σχεδίαση να προσφέρει καλύτερη εργονομία και δυνατότητες συγκράτησης αντικειμένων (Σχήμα 1.2b). Διαθέτει τέσσερις βαθμούς ελευθερίας με ισάριθμους επενεργητές. Δύο σερβοκινητήρες τοποθετούνται απευθείας επάνω στον αρχικό σύνδεσμο, εκτελώντας την κίνηση της απαγωγής/προσαγωγής. Οι άλλοι δύο κινούν ο καθένας μια τροχαλία για τον έλεγχο της θέσης του μεταλλικού τένοντα που μεταφέρει την κίνηση στους συνδέσμους για την κάμψη των δαχτύλων. Η επαναφορά τους στην αρχική θέση γίνεται με την χρήση ελατηρίων.



Σχήμα 1.4: Πειράματα επιβεβαίωσης των προτεινόμενων πρωτοκόλλων ελέγχου [12].

Εκτός όμως της νέας σχεδίασης παρουσιάστηκε και μία νέα μέθοδος ελέγχου εκμεταλλευόμενη τις κινήσεις του αγκώνα, ενώ μελετήθηκαν και δύο πρωτόκολλα ελέγχου. Το πρώτο επιτρέπει τη διακριτή μετάβαση μεταξύ των διαφορετικών μοτίβων κίνησης, ενώ το δεύτερο συσχετίζει την ανοδική και καθοδική κίνηση του αγκώνα με το άνοιγμα και κλείσιμο των ρομποτικών δαχτύλων αντίστοιχα. Για την επιβεβαίωση της αποτελεσματικότητάς τους εξετάστηκαν τέσσερις διαφορετικές εργασίες όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.4.

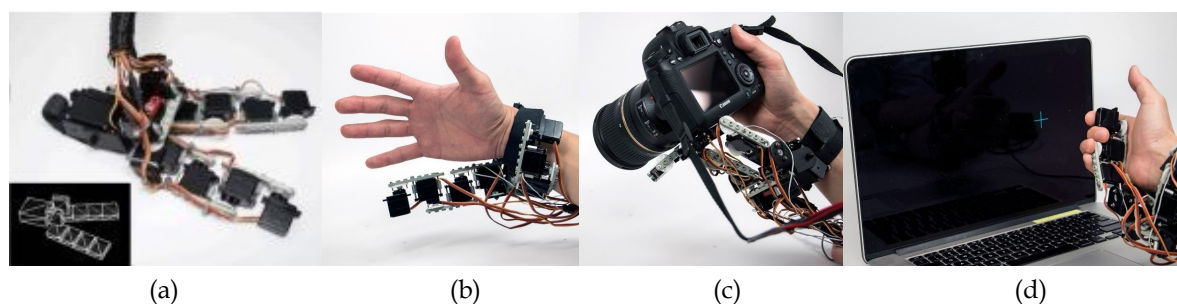
Σε αντίθεση με τις προηγούμενες εφαρμογές το πρωτότυπο που παρουσιάστηκε στην Εργασία [13] (Σχήμα 1.2c), σχεδιάστηκε έτσι ώστε να τοποθετείται στο μη λειτουργικό χέρι ημιπληγικών ασθενών που βρίσκονται σε στάδιο αποθεραπείας, βοηθώντας στην αποκατάστασή του. Ο χρήστης ελέγχει την κίνηση των ρομποτικών δαχτύλων μέσω γαντιού συλλογής δεδομένων που φοράει στο υγιές χέρι, πραγματοποιώντας έτσι χειρισμό αντικειμένων και με τα δύο χέρια. Στόχος είναι οι ασθενείς να έχουν μία αίσθηση σκοπού και ολοκλήρωσης κατά τη διάρκεια της αποθεραπείας, ακόμη και κατά τα αρχικά στάδια της, όταν και οι διάφορες εργασίες μπορούν να ολοκληρωθούν εν μέρει. Στο Σχήμα 1.5 απεικονίζεται η χρήση του πρωτότυπου σε εκτέλεση εργασιών που χρησιμοποιούνται συχνά κατά τη διάρκεια της αποθεραπείας και απαιτείται η χρήση και των δύο χεριών.



Σχήμα 1.5: Η χρήση των επιπρόσθετων ρομποτικών δαχτύλων ως συσκευή θεραπείας σε ημιπληγικούς ασθενείς κατά τη διάρκεια της αποθεραπείας [13].

Κάθε δάχτυλο διαθέτει 2 βαθμούς ελευθερίας, ενώ μία πρισματική άρθρωση ενσωματώνεται στη βάση της διάταξης και επιτρέπει την κίνησή της κατά μήκος του χεριού. Με αυτό τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα προσαρμογής του χώρου εργασίας της με αυτόν του χεριού του ασθενούς κατά την εκτέλεση διαφορετικού τύπου εργασιών. Η έλλειψη αρθρώσεων στα άκρα αντισταθμίζεται με το καμπυλωτό σχήμα, το οποίο επιτρέπει τη λαβή αντικειμένων διαφόρων μεγεθών.

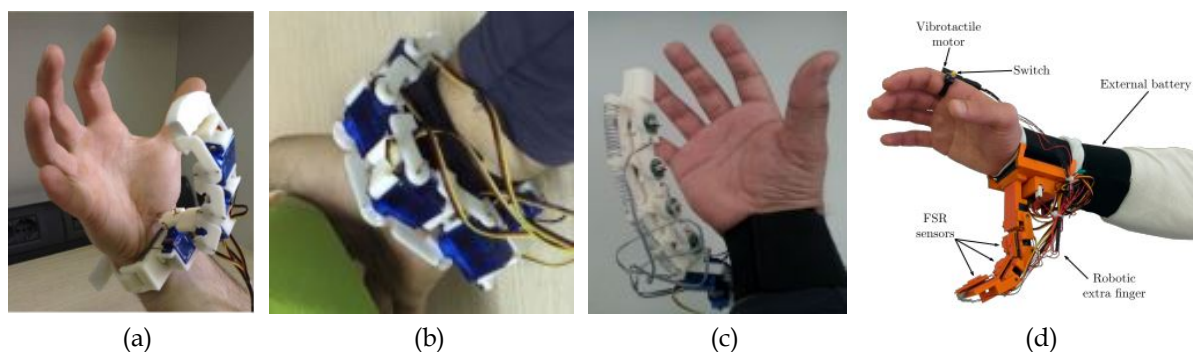
Στην Εργασία [14] παρουσιάστηκε μία ρομποτική διάταξη (Σχήμα 1.6a) που τοποθετείται στον



Σχήμα 1.6: Ρομποτική διάταξη δύο δαχτύλων (a) Το πρωτότυπο, (b) Λειτουργία ως επιπρόσθετος δείκτης, (c) Υποβοήθηση στηρίζοντας μία φωτογραφική μηχανή και (d) Ως μέσο διεπαφής με υπολογιστή [14].

καρπό του χρήστη και αποτελείται συνολικά από έντεκα αρθρώσεις, πέντε για το κάθε δάκτυλο και μια στη βάση της για τον καθορισμό της γωνιακής της θέσης. Μπορεί να συναρμολογηθεί με διαφορετικούς τρόπους, με την κάθε διαμόρφωση να παρέχει ένα διαφορετικό σύνολο λειτουργιών. Οι σύνδεσμοι που ενώνουν τις αρθρώσεις είναι εξαρτήματα Lego. Για τον έλεγχο των κινήσεων χρησιμοποιήθηκαν σήματα από αισθητήρες ηλεκτρομυογραφίας (EMG) μέσω της συσκευής ΜΥΟ [15]. Στόχος της έρευνας ήταν η διερεύνηση πιθανών συνεργικών αλληλεπιδράσεων (synergistic interactions) μεταξύ των χεριών του ανθρώπου και της συσκευής, έτσι ώστε η τελευταία να ενισχύει και να μην αντικαθιστά ή εμποδίζει τις κινητικές τους δεξιότητες. Κάποιες από τις διαφορετικές διαμορφώσεις που εφαρμόστηκαν είναι να λειτουργεί ως ένας επιπρόσθετος αντίχειρας ή μικρό δάκτυλο (Σχήμα 1.6b), να υποβοηθά στηρίζοντας μία φωτογραφική μηχανή (Σχήμα 1.6c), ακόμη και ως ένα μέσο διεπαφής του χρήστη με υπολογιστή λειτουργώντας ως χειριστήριο (Σχήμα 1.6d).

Οι υλοποιήσεις που ανήκουν στη δεύτερη κατηγορία ενσωματώνουν στο ανθρώπινο χέρι ένα επιπλέον ρομποτικό δάκτυλο. Το αρχικό πρωτότυπο με ονομασία "Το έκτο δάκτυλο - The Sixth Finger" που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο της Σιένα [16], είναι αρθρωτής κατασκευής, διαθέτει 4 βαθμούς ελευθερίας και τοποθετείται απέναντι από την παλάμη (Σχήμα 1.7a). Στόχος ήταν να παίξει το ρόλο ενός δεύτερου αντίχειρα, καθώς είναι το δάκτυλο που μας επιτρέπει να χειριζόμαστε αντικείμενα με σύνθετο τρόπο. Όπως επισημαίνεται στην εργασία, αν είχαμε ένα δεύτερο αντίχειρα, ο παράμεσος και το μικρό δάκτυλο θα είχαν τον ίδιο βαθμό επιδεξιότητας με το δείκτη και το μέσο. Η κάμψη και έκταση του δαχτύλου πραγματοποιείται από τρεις σερβοκινητήρες, ενώ ένας εκτελεί την κίνηση της απαγωγής/προσαγωγής. Για τον έλεγχο της διάταξης



Σχήμα 1.7: Πρωτότυπα ρομποτικών δαχτύλων που αναπτύχθηκαν στο Πανεπιστήμιο της Σιένα [16–18].



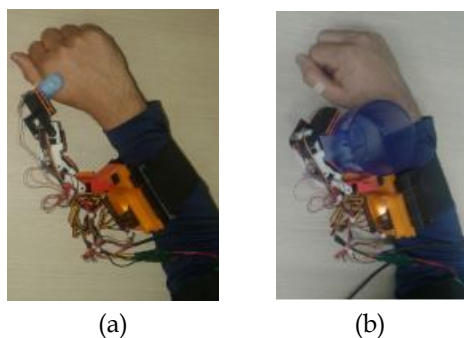
Σχήμα 1.8: Παραδείγματα εκτελούμενων εργασιών με τη χρήση του έκτου δαχτύλου [16, 17].

υλοποιήθηκε κατάλληλος αλγόριθμος που αξιοποιεί την καταγραφή της κίνησης του ανθρώπινου χεριού μέσω γαντιού συλλογής δεδομένων και την αποτυπώνει στο έκτο δάχτυλο [19].

Ακολουθώντας την ίδια σχεδιαστική φιλοσοφία και λαμβάνοντας υπόψη την ευκολία τοποθέτησης και τη φορητότητα, στην Εργασία [17] παρουσιάστηκαν δύο νέα πρωτότυπα, ένα πλήρως επενεργούμενο και ένα υποεπενεργούμενο (Σχήμα 1.7b και 1.7c αντίστοιχα). Προτείνεται επίσης μία δεύτερη θέση τοποθέτησης δίπλα στο μικρό δάκτυλο. Ένα νέο χαρακτηριστικό και των δύο είναι ότι μπορούν να τοποθετηθούν περιμετρικά του καρπού, όταν δεν χρησιμοποιούνται και να επανέρχονται σε "θέση εργασίας" όταν ενεργοποιούνται. Η εναλλαγή μεταξύ των δύο καταστάσεων πραγματοποιείται με τη χρήση μπουτόν. Επιπρόσθετα το πρώτο μπορεί να τοποθετηθεί είτε στο κέντρο απέναντι από την παλάμη, είτε στη νέα θέση δίπλα στο μικρό. Αντίθετα, για το υποεπενεργούμενο αναπτύχθηκε μόνο η δεύτερη θέση τοποθέτησης. Χρησιμοποιεί δύο σερβοκινητήρες, ένα για την απαγωγή/προσαγωγή και ένα για την κάμψη/έκταση, με την μεταφορά της κίνησης στις εξωτερικές φάλαγγες να υλοποιείται μέσω μεταλλικού τένοντα και τροχαλίας. Για την επαναφορά του στην αρχική θέση χρησιμοποιούνται ελατήρια. Λόγω της παθητικά συμμορφούμενης (passive compliant) δομής του μπορεί να προσαρμόζεται στην επιφάνεια του αντικειμένου. Στο Σχήμα 1.8 απεικονίζονται κάποιες από τις εργασίες που εκτελέστηκαν με τη χρήση των παραπάνω διατάξεων.

Στην υλοποίηση του πρωτοτύπου (Σχήμα 1.7d) που προτάθηκε στην Εργασία [18] ακολουθήθηκε μια διαφορετική προσέγγιση. Στόχος ήταν η αντιμετώπιση της έλλειψης αποτελεσματικής απτικής ανάδρασης, η οποία είχε ως επακόλουθο ο χρήστης να μη γνωρίζει την κατάσταση του ρομποτικού δαχτύλου και να αντιλαμβάνεται μόνο τη δύναμη που ασκείται από αυτό μέσω του αντικειμένου που κρατάει. Για το λόγο αυτό ενσωματώθηκε δαχτυλίδι απτικής πληροφορίας, το οποίο τοποθετείται στο δείκτη και διαθέτει κινητήρα δόνησης, ενώ κάθε σύνδεσμος εξοπλίζεται με αισθητήρα δύναμης (FSR) στην εσωτερική του πλευρά για την ανίχνευση επαφών με το αντικείμενο. Ο χρήστης μπορεί να ελέγξει την κάμψη και έκταση του δαχτύλου μέσω μπουτόν που είναι τοποθετημένο επάνω στο δαχτυλίδι. Όταν αυτό ενεργοποιηθεί το δάχτυλο αρχίζει να κάμπτεται, με την ίδια γωνία για κάθε άρθρωση, ενώ ανάλογα με το ποιος σύνδεσμος έρθει πρώτος σε επαφή με το αντικείμενο, ακολουθείται συγκεκριμένη διαδικασία για τους υπόλοιπους δύο. Αυτή η νέα στρατηγική στον έλεγχο επιτρέπει στη διάταξη να προσαρμόζεται στο σχήμα του αντικειμένου. Η εκ νέου ενεργοποίηση του μπουτόν έχει ως αποτέλεσμα την έκταση του δαχτύλου στην αρχική θέση, ακολουθώντας προκαθορισμένη τροχιά. Από τα πειράματα που διεξήχθησαν, η ύπαρξη απτικής ανάδρασης βελτίωσε αισθητά την εκτέλεση των εργασιών

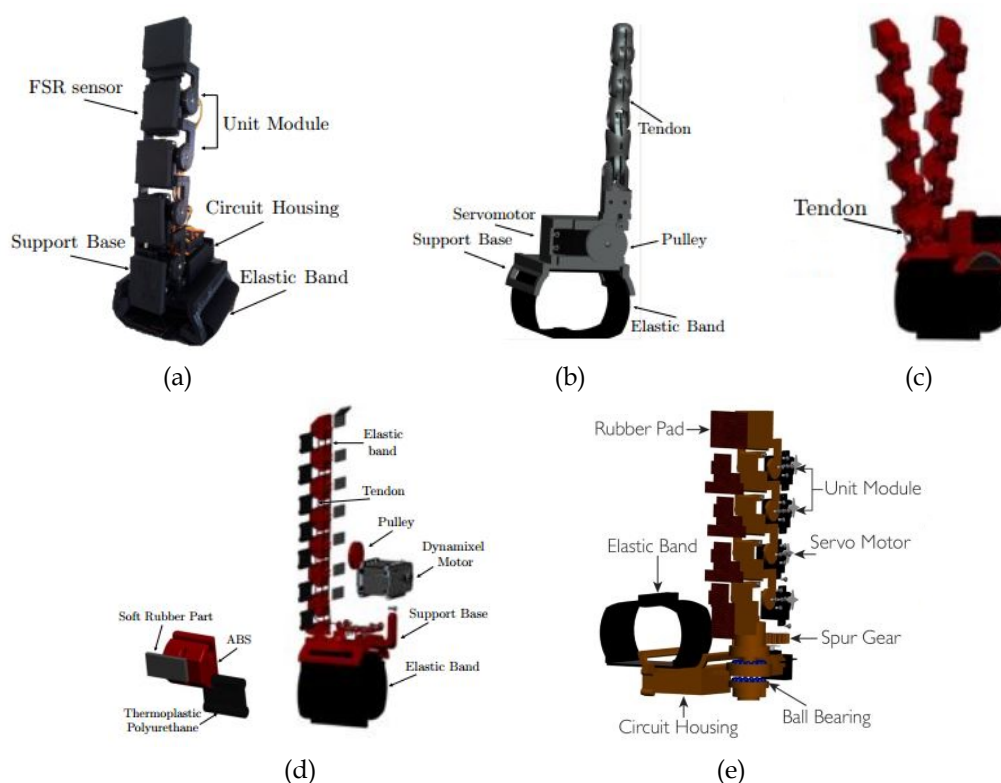




Σχήμα 1.9: (a) Λαβή ακριβείας, (b) Δυναμική λαβή [20].

ως προς το χρόνο ολοκλήρωσης, την ασκούμενη δύναμη και την αίσθηση αποτελεσματικότητας.

Η συγκεκριμένη υλοποίηση, με κάποιες τροποποιήσεις, δοκιμάστηκε σε ασθενή που είχε υποστεί εγκεφαλικό επεισόδιο για την αντιστάθμιση των χαμένων λειτουργιών του ημιπαράλυτου άκρου, με το δαχτυλίδι να τοποθετείται στο δείκτη του υγιούς χεριού. Ο χρήστης είχε τη δυνατότητα να επιλέξει μεταξύ δύο προκαθορισμένων κινήσεων το είδος της λαβής, ακριβείας (precision grasp) ή ισχύος (power grasp), ανάλογα με το πλήθος πιέσεων του μπουτόν. Στην πρώτη περίπτωση το αντικείμενο συγκρατείται μεταξύ του ακροδάχτυλου της ρομποτικής διάταξης και του χεριού (Σχήμα 1.9a), δηλαδή υπάρχει ένα διακεκριμένο σημείο επαφής, ενώ στη δεύτερη χρησιμοποιείται ο καρπός, με το ρομποτικό δάχτυλο να αγκαλιάζει το αντικείμενο, με τα σημεία επαφής να είναι πολλαπλά (Σχήμα 1.9b). Ο ασθενής ήταν σε θέση να βελτιώσει την



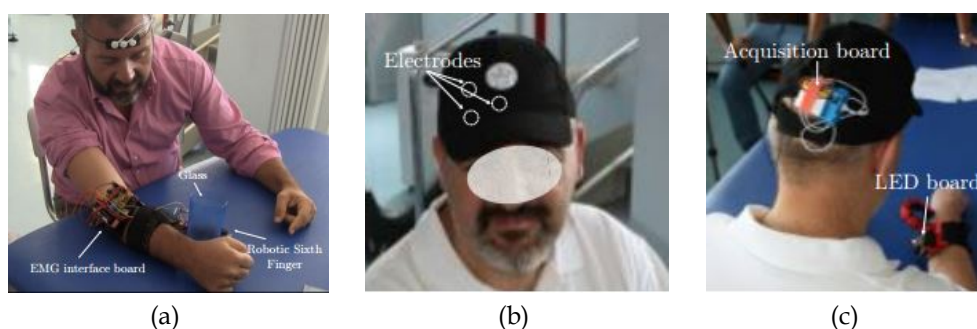
Σχήμα 1.10: Πρωτότυπα ρομποτικών δαχτύλων που αναπτύχθηκαν στο Πανεπιστήμιο της Σιένα [21-23].

απόδοσή του σε ένα μέρος των εργασιών που περιλαμβάνονταν στην ποιοτική αξιολόγηση, χωρίς ιδιαίτερη εκπαίδευση [20].

Σε συνέχεια της συγκεκριμένης διερεύνησης προτάθηκαν δύο σχεδιαστικές επιλογές για την υλοποίηση επιπρόσθετων ρομποτικών δακτύλων και τη χρήση τους σε ασθενείς με μειωμένη κινητικότητα άκρων. Η πρώτη περιλαμβάνει μία πλήρως επενεργούμενη διάταξη (Σχήμα 1.10a), η οποία μπορεί να ρυθμίσει ενεργά τη συμμόρφωση των αρθρώσεων. Η δεύτερη περιλαμβάνει δύο διατάξεις (Σχήμα 1.10b, c) που συνδυάζουν την παθητική συμμόρφωση (passive compliance) των αρθρώσεων με την υποεπενεργούμενη δομή τους. Όλες ενσωματώνουν δαχτυλίδι απτικής ανάδρασης και μπουτόν για τον έλεγχο της κίνησης, όπως και αισθητήρες δύναμης. Η δομή μίας εκ των δύο υποεπενεργούμενων διατάξεων διαφέρει από τα προηγούμενα πρωτότυπα, καθώς διαθέτει δύο δάχτυλα προσφέροντας μεγαλύτερη ευρωστία κατά τη λαβή αντικειμένων. Για την κατασκευή χρησιμοποιήθηκαν σύνδεσμοι από άκαμπο υλικό, διασυνδεδεμένοι μεταξύ τους μέσω ελαστικών αρθρώσεων. Αν και αυτή η υλοποίηση παρείχε αυξημένη σταθερότητα σε συγκεκριμένες εργασίες, το αυξημένο βάρος της μειώνει τη φορητότητα και την ευκολία τοποθέτησης. Στα πιλοτικά πειράματα που διενεργήθηκαν με τη χρήση όλων των διατάξεων, οι ασθενείς μπόρεσαν να ολοκληρώσουν επιτυχώς την πλειοψηφία των εργασιών [21]. Στην Εργασία [24] παρουσιάστηκαν οι δύο τρόποι ελέγχου που προαναφέρθηκαν, δηλαδή με τη χρήση γαντιού συλλογής δεδομένων και μέσω του δαχτυλιδιού, σε ένα νέο πρωτότυπο του έκτου δακτύλου.

Παρότι η ενσωμάτωση του δαχτυλιδιού για τον έλεγχο των ρομποτικών διατάξεων παρουσιάζει πλεονεκτήματα, περιορίζει το λειτουργικό χέρι από το να εκτελεί άλλες εργασίες καθώς είναι επιφορτισμένο με το χειρισμό του μπουτόν. Για το λόγω αυτό χρησιμοποιήθηκαν εναλλακτικά αισθητήρες ηλεκτρομυογραφίας (EMG), οι οποίοι τοποθετούνται στο μέτωπο του ασθενή, με τα σήματά τους να συλλέγονται από ειδική πλακέτα, η οποία τοποθετείται στον πήχυ του χεριού (Σχήμα 1.11a). Ανάλογα με το πλήθος των συσπάσεων των μυών που θα εκτελέσει ο χρήστης, μπορεί να ενεργοποιήσει την εκκίνηση και το σταμάτημα του δακτύλου αλλά και να επιλέξει το είδος της λαβής. Με αυτό τον τρόπο ακολουθείται η λογική χρήσης του μπουτόν διατηρώντας ένα απλό έλεγχο [25].

Η τοποθέτηση όλων των απαραίτητων εξαρτημάτων για τη λειτουργία του ρομποτικού δα-



Σχήμα 1.11: Έλεγχος ρομποτικού δακτύλου με χρήση αισθητήρων ηλεκτρομυογραφίας (a) Τοποθέτηση στο μέτωπο, (b) και (c) Ενσωμάτωση στην εσωτερική πλευρά καπέλου και τοποθέτηση της πλακέτας στην πίσω πλευρά αντίστοιχα [22, 25].

χτύλου, όπως ηλεκτρονικές πλακέτες και μπαταρίες στο ημιπαράλυτο χέρι είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του βάρους και τον περιορισμό της ευκινησίας του. Στη νέα διάταξη που υλοποιήθηκε (Σχήμα 1.10d), με την ονομασία "Soft Sixth Finger", όλα τα παραπάνω έχουν μεταφερθεί σε κουτί που σταθεροποιείται στη ζώνη του ασθενή. Επιπλέον οι αισθητήρες ηλεκτρομυογραφίας ενσωματώθηκαν στην εσωτερική πλευρά καπέλου, ενώ η πλακέτα για τη συλλογή των δεδομένων στο πίσω μέρος (Σχήμα 1.11b, c), με την αποστολή τους στον κεντρικό επεξεργαστή να πραγματοποιείται ασύρματα. Τα πρώτα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι ασθενείς χρειάζονται περίπου μία ώρα εκπαίδευση για τη σωστή χρήση της διάταξης, ενώ αξιολογήθηκε θετικά η ευκολία τοποθέτησης [22].

Σε συνέχεια των προηγούμενων ερευνών στην Εργασία [23], προτάθηκε μια νέα προσέγγιση για τον έλεγχο κίνησης και την ρύθμιση της παθητικής συμμόρφωσης των αρθρώσεων των ρομποτικών διατάξεων, προσπαθώντας να αντιμετωπίσει την έλλειψη επιλογών ως προς τη δύναμη με την οποία θα κρατείται ένα αντικείμενο. Επίσης παρουσιάστηκε μια αναβαθμισμένη εκδοχή του υποεπενεργούμενου ρομποτικού δακτύλου, όπου η κίνηση της απαγωγής προσαγωγής επιτυγχάνεται μέσω μηχανισμού γρاناζιών (Σχήμα 1.10e). Για την υλοποίησή του χρησιμοποιήθηκε η συσκευή MYO για αναγνώριση των χειρονομιών του χεριού και τη συσχέτισή τους με τον έλεγχο της κίνησης της ρομποτικής συσκευής και αισθητήρες ηλεκτρομυογραφίας για τη ρύθμιση της δύναμης με την οποία θα κρατηθεί ένα αντικείμενο. Αμφότερα τοποθετούνται στον πήχυ του χεριού. Το προτεινόμενο σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά τόσο για την αντιστάθμιση των μειωμένων ικανοτήτων του άκρου ημιπαρετικών ασθενών, όσο και για την αύξηση των δυνατοτήτων του χεριού υγιών ανθρώπων. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων έδειξαν ότι η προτεινόμενη διεπαφή ελέγχου είναι φιλική προς το χρήστη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιτυχώς, όχι μόνο για να ελέγξει την κίνηση ενός ρομποτικού δακτύλου, αλλά και για να ρυθμίσει τη συμμόρφωσή του.

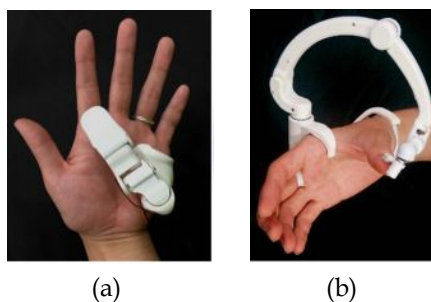
Σε αρχικό στάδιο βρίσκεται έρευνα που απευθύνεται σε χρόνια πάσχοντες από εγκεφαλικό επεισόδιο και τη δυνατότητα αποκατάστασης μέρους της χαμένης λειτουργικότητας του χεριού, έτσι ώστε ο ασθενής να μπορεί να πιάνει και να χειρίζεται αντικείμενα. Η λύση που προτείνεται είναι ο συνδυασμός του Soft Sixth Finger και ενός ρομποτικού βραχίονα, ο ρόλος του οποίου είναι η μερική υποστήριξη του βάρους του ανθρώπινου χεριού [26]. Στο Σχήμα 1.12 απεικονίζονται οι εργασίες που εκτελέστηκαν με τη συνδυασμένη χρήση και των δύο διατάξεων.



Σχήμα 1.12: Εργασίες που εκτελέστηκαν με τη συνδυασμένη χρήση του ρομποτικού δακτύλου και του ρομποτικού βραχίονα [26].

Μία διαφορετική κατασκευή σε σχέση με τις προηγούμενες υλοποιήσεις αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο Nayoga (Ιαπωνία) [27, 28]. Πρόκειται για ένα επιπρόσθετο ρομποτικό αντίχειρα

τριών βαθμών ελευθερίας (Σχήμα 1.13a), με ενσωματωμένο αισθητήρα αφής. Τοποθετείται στην παλάμη του αριστερού χεριού και ελέγχεται από τον αντίχειρα του δεξιού χεριού. Η κίνηση του τελευταίου προκαλείται από συσκευή ηλεκτρικής διέγερσης, ανάλογα με τη μετρούμενη δύναμη. Η καταγραφή της θέσης του πραγματοποιείται μέσω ειδικής διάταξης με τέσσερις περιστροφικούς κωδικοποιητές (Σχήμα 1.13b) και αποστέλλεται στο ρομποτικό αντίχειρα. Η συγκεκριμένη έρευνα αποσκοπεί στην ενσωμάτωση της ρομποτικής διάταξης στο ανθρώπινο χέρι.



Σχήμα 1.13: (a) Ο επιπρόσθετος ρομποτικός αντίχειρας και (b) Η συσκευή καταγραφής [27].

Συνοψίζοντας, οι μέχρι τώρα υλοποιήσεις μπορούν να διακριθούν σε δύο κύριες κατηγορίες αναφορικά με τον αριθμό των δαχτύλων που ενσωματώνει κάθε διάταξη. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει διατάξεις που ενσωματώνουν δύο ρομποτικά δάχτυλα, ενώ η δεύτερη ένα. Τα πρωτότυπα που αναπτύχθηκαν και στις δύο περιπτώσεις είναι είτε πλήρως επενεργούμενα, με τις αρθρώσεις να οδηγούνται από ισάριθμους σερβοκινητήρες, είτε υποεπενεργούμενα με την κίνηση να μεταφέρεται μέσω μεταλλικού τένοντα. Για την κατασκευή τους χρησιμοποιήθηκαν τόσο άκαμπτα όσο και εύκαμπτα υλικά με τη βοήθεια συστήματος τρισδιάστατης εκτύπωσης. Για την εντολοδότηση κίνησης των μηχανισμών έχουν προταθεί διάφορες προσεγγίσεις όπως γάντια συλλογής δεδομένων, μπουτόν και αισθητήρες ηλεκτρομυογραφίας, για την επίτευξη διατήρησης ενός απλού ελέγχου, έτσι ώστε να είναι εύκολα στη χρήση και ο χρήστης να μην χρειάζεται ιδιαίτερη εκπαίδευση. Από τα πειράματα που διεξήχθησαν, η χρήση των διατάξεων από παραπληγικούς ασθενείς και από άτομα με μειωμένη ικανότητα στα άκρα, είχε ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της δυνατότητας λαβής αντικειμένων και της εν μέρει αντιστάθμισης της χαμένης λειτουργικότητας του χεριού.

Από τις εφαρμογές που παρουσιάστηκαν ένας μεγάλος αριθμός χρησιμοποιεί γάντια συλλογής δεδομένων για την καταγραφή της κίνησης του ανθρώπινου χεριού και τον έλεγχο των ρομποτικών μηχανισμών. Στη συνέχεια θα γίνει μία σύντομη ανασκόπηση με αναφορά στο πλήθος των εφαρμογών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και θα παρουσιαστούν κάποιες από τις πιο γνωστές εμπορικές εφαρμογές. Επίσης θα παρουσιαστεί και το πρωτότυπο της αρχικής εφαρμογής γαντιού συλλογής δεδομένων, που υλοποιήθηκε στο ΤΕΙ Κρήτης.

### 1.2.1 Γάντια συλλογής δεδομένων και οι εφαρμογές τους

Η προσπάθεια καταγραφής και "ανάγνωσης" των κινήσεων του ανθρώπινου χεριού από υπολογιστή, χωρίς τη μεσολάβηση κάποια άλλης συσκευής, όπως πληκτρολόγιο ή ποντίκι, είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη των πρώτων γαντιών συλλογής δεδομένων (Data Gloves), ήδη

από τη δεκαετία του 1970. Ένα τέτοιο σύστημα αποτελείται από έναν αριθμό αισθητήρων, οι οποίοι συνήθως ράβονται πάνω σε υφασμάτινο γάντι, ηλεκτρονικά για τη λήψη - επεξεργασία των δεδομένων και την πηγή τροφοδοσίας. Η εμπορική διάθεση κάποιων εκ των αρχικών συστημάτων έδωσε ώθηση στην έρευνα και την ανάπτυξη νέων, με αποτέλεσμα την προσέλκυση ερευνητών από διαφορετικούς τομείς [29,30].

Έκτοτε η πρόοδος που έχει συντελεστεί είναι μεγάλη και πλέον τα συστήματα αυτά βρίσκουν εφαρμογή σε πολλά τεχνολογικά πεδία όπως η εικονική πραγματικότητα [31-33], η ρομποτική με τον τηλεχειρισμό και έλεγχο ρομποτικών συστημάτων [34-37], η αναγνώριση και η μετάφραση της νοηματικής γλώσσας διάφορων χωρών [38-42], ιατρικές εφαρμογές [43,44], ακόμη και η παραγωγή μουσικής [45]. Από τα σχέδια και τις υλοποιήσεις των τελευταίων 40 ετών, μόνο λίγα από αυτά έγιναν εμπορικά διαθέσιμα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποιες από τις πιο γνωστές εμπορικές εφαρμογές γαντιών συλλογής δεδομένων.

Το **DG5 - Vhand Glove 3.0** (Σχήμα 1.14) διαθέτει 5 αισθητήρες κάμψης και ενσωματώνει γυροσκοπιο, επιταχυνσιόμετρο και μαγνητόμετρο για την πλήρη καταγραφή της κίνησης του χεριού στο χώρο. Η διασύνδεσή του ανάλογα με την έκδοση, μπορεί να είναι είτε μέσω USB, είτε ασύρματου δικτύου (Wi-Fi). Στη δεύτερη περίπτωση ενσωματώνει και επαναφορτιζόμενη μπαταρία [46].



Σχήμα 1.14: Το γάντι συλλογής δεδομένων DG5 VHand 3.0.

Το **CyberGlove III** (Σχήμα 1.15) είναι η εξέλιξη μιας σειράς γαντιών (CyberGlove, CyberGloveII) και μία από τις πολλές υλοποιήσεις της εταιρίας CyberGlove Systems Inc [47]. Εξοπλίζεται με 18 ή 22 αισθητήρες κάμψης για την πλήρη καταγραφή της κίνησης των δαχτύλων. Διαθέτει SD κάρτα για αποθήκευση των δεδομένων, η οποία και λειτουργεί ανεξάρτητα από τη USB θύρα και την ασύρματη επικοινωνία (Wi - Fi), με την τελευταία να παρέχει αυξημένο εύρος λειτουργίας πάνω από 30 m. Η διάρκεια της μπαταρίας είναι 2 ώρες.



Σχήμα 1.15: Το γάντι συλλογής δεδομένων Cyberglove III.

Το **5DT Data Glove Ultra** (Σχήμα 1.16) διαθέτει, στην πρώτη εκδοσή του, 5 αισθητήρες για την καταγραφή της κίνησης, έναν σε κάθε δάχτυλο, ενώ στη δεύτερη 14, δύο σε κάθε δάχτυλο και τους υπόλοιπους μεταξύ των δαχτύλων, για την καταγραφή της κίνησης απαγωγής - προσαγωγής. Η διασύνδεση με υπολογιστή γίνεται και στις δύο περιπτώσεις με USB, ενώ μέσω ειδικού kit μπορεί να πραγματοποιηθεί και ασύρματα [48].



Σχήμα 1.16: Το γάντι συλλογής δεδομένων 5DT Data Glove 5 Ultra.

Το **AcceleGlove** (Σχήμα 1.17) εξοπλίζεται με 6 επιταχυνσιόμετρα, ένα για κάθε δάχτυλο και ένα για το επάνω μέρος του χεριού. Η διασύνδεση με υπολογιστή γίνεται μέσω USB. Βρίσκει εφαρμογή σε διάφορους τομείς όπως Ρομποτική, Τηλεϊατρική, Ιατρική αποκατάσταση, βιντεοπαιχνίδια και σε περιβάλλοντα προσομοίωσης και εικονικής πραγματικότητας [49].



Σχήμα 1.17: Το γάντι συλλογής δεδομένων AcceleGlove.

Εκτός όμως από τις εμπορικές εφαρμογές, κατασκευάστηκε στο εργαστήριο Συστημάτων Ελέγχου και Ρομποτική του Τ.Ε.Ι. Κρήτης, γάντι συλλογής δεδομένων (Σχήμα 1.18) στα πλαίσια πτυχιακής εργασίας [50]. Το **Talos Glove** διαθέτει 11 αισθητήρες κάμψης για την καταγραφή των κινήσεων των δαχτύλων του ανθρώπινου χεριού. Στόχος ήταν ο τηλεχειρισμός του ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού Talos Hand [51, 52], όπως επίσης και η απεικόνιση της κίνησης των δαχτύλων σε εικονικό περιβάλλον.



Σχήμα 1.18: Το γάντι συλλογής δεδομένων Talos.

### 1.3 Συμβολή της παρούσας εργασίας

Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η σχεδίαση, κατασκευή και ο έλεγχος ενός εξωσκελετικού επιπρόσθετου ρομποτικού δαχτύλου. Η εν λόγω διάταξη προσαρμόζεται στον καρπό του ανθρώπινου χεριού, ενώ τη χαρακτηρίζουν η ελαφριά και στιβαρή κατασκευή, η ευκολία φορητότητας και η ασφάλεια στη χρήση της. Η διάταξη αυτή, ως ένα έκτο δάκτυλο, αποσκοπεί στην ενίσχυση των ικανοτήτων του χεριού ανθρώπων με κινητικά προβλήματα, λειτουργώντας ως συμπληρωματικό μέλος. Η βελτίωση της δυνατότητας λαβής και χειρισμού αντικειμένων, η διεύρυνση του εύρους κίνησης του χεριού και η βελτίωση του βαθμού επιδεξιότητάς του είναι μερικές από τις αυτές. Επιπρόσθετα διερευνάται η δυνατότητα αντιστάθμισης της απώλειας κάποιου μέλους του χεριού και πιο συγκεκριμένα του αντίχειρα. Επίσης, πέραν της στατικής λαβής εξετάστηκε και ο μικροχειρισμός αντικειμένων, μέσω της μεταβολής του προσανατολισμού τους και της θέσης τους ως προς την παλάμη του χρήστη. Αυτή η επιπλέον δυνατότητα χειρισμού αποτελεί σημείο διαφοράς της παρούσας εργασίας σε σχέση με τα πρωτότυπα που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία και τον τρόπο λειτουργίας τους. Ο λειτουργικός έλεγχος της κίνησης του ρομποτικού δαχτύλου πραγματοποιείται με την ανάπτυξη κατάλληλου αλγόριθμου, ο οποίος με την καταγραφή της κίνησης του ανθρώπινου χεριού υποβοηθά το ανθρώπινο μέλος κατά τη λαβή κάποιου αντικειμένου.

Για την καταγραφή της κίνησης του ανθρώπινου χεριού χρησιμοποιείται γάντι συλλογής δεδομένων. Στόχος ήταν η υλοποίηση ενός γαντιού με βάση την τεχνογνωσία που αποκτήθηκε από αντίστοιχη κατασκευή στα πλαίσια προπτυχιακής εργασίας του Τ.Ε.Ι. Κρήτης [50]. Χρησιμοποιεί τους ίδιους αισθητήρες για την καταγραφή των κινήσεων των αρθρώσεων του χεριού με το αρχικό, με την αναβάθμισή του να αφορά αρχικά την επιλογή ενός λεπτότερου και ελαστικότερου γαντιού, την καλύτερη τοποθέτηση και στερέωση των αισθητήρων και κυρίως τη σχεδίαση νέου ηλεκτρονικού κυκλώματος για την καταγραφή των δεδομένων με μεγαλύτερη ακρίβεια. Ο συνδυασμός των δύο επιμέρους συστημάτων, του επιπρόσθετου ρομποτικού δαχτύλου και του γαντιού συλλογής δεδομένων, αποτελεί την ολοκληρωμένη διάταξη που χρησιμοποιείται για την εκτέλεση των προτεινόμενων εργασιών, όπως αναφέρονται παραπάνω. Στη συνέχεια παρουσιάζεται συνοπτικά η δομή της παρούσας εργασίας.

### 1.4 Δομή εργασίας

Μετά τη βιβλιογραφική ανασκόπηση του παρόντος κεφαλαίου, στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται το ανθρώπινο χέρι και τα μέλη από τα οποία αποτελείται. Παράλληλα πραγματοποιείται η κινηματική του ανάλυση με την επίλυση του ευθύ κινηματικού προβλήματος για τα άκρα των δαχτύλων ως προς τη θέση του καρπού. Γίνεται επίσης αναφορά στους περιορισμούς που διακρίνουν την κίνηση των αρθρώσεων. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το εξωσκελετικό επιπρόσθετο ρομποτικό δάκτυλο και τα επιμέρους εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται, ενώ γίνεται επίλυση τόσο του ευθύ όσο και του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την υλοποίηση του γαντιού συλλογής δεδομένων. Περιγράφεται η μεθοδολογία βαθμονόμησης των αισθητήρων,

το ηλεκτρονικό κύκλωμα που σχεδιάστηκε για την καλύτερη και πιο αξιόπιστη καταγραφή των δεδομένων, όπως επίσης οι βοηθητικές πλακέτες επέκτασης που κατασκευάστηκαν για τη διασύνδεση με την κεντρική μονάδα ελέγχου. Τέλος παρουσιάζεται η προσομοίωση των κινήσεων του χεριού και η αρχιτεκτονική ελέγχου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αρχικά αναλύεται η λαβή ενός αντικειμένου και οι πίνακες με βάση τους οποίους μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα ως προς την ευστάθειά της. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαφορετικά μοντέλα επαφών που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή του σημείου επαφής, όπως και τα κριτήρια βάσει των οποίων μπορεί να ποσοτικοποιηθεί η ποιότητα μιας λαβής. Τέλος περιγράφονται οι στρατηγικές που αναπτύχθηκαν για τον έλεγχο κίνησης του εξωσκελετικού επιπρόσθετου ρομποτικού δαχτύλου μέσω του γαντιού συλλογής δεδομένων, ενώ παρουσιάζονται και τα πειραματικά αποτελέσματα.



## Κεφάλαιο 2

# Το Ανθρώπινο Χέρι και το Επιπρόσθετο Δάκτυλο

### 2.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο, αρχικά περιγράφεται το ανθρώπινο χέρι και το πόσο σημαντικό είναι για τον άνθρωπο στη διεπαφή του με τον υλικό κόσμο και την καθημερινή του επικοινωνία. Περιγράφεται η ανατομία του χεριού και η σχετική ορολογία περιγραφής αυτής. Πραγματοποιείται κινηματική ανάλυση, με την επίλυση του ευθύ κινηματικού προβλήματος. Οι εξισώσεις του ευθύ κινηματικού προβλήματος είναι σημαντικές για τον προσδιορισμό της θέσης και του προσανατολισμού των ακροδαχτύλων, ιδιαίτερα σε εφαρμογές προσομοίωσης εικονικής λαβής αντικειμένων. Παρουσιάζονται επίσης οι περιορισμοί που διακρίνουν την κίνηση των αρθρώσεων του χεριού που προκύπτουν, είτε λόγω της ανατομίας του, είτε κατά την κίνηση των δαχτύλων.

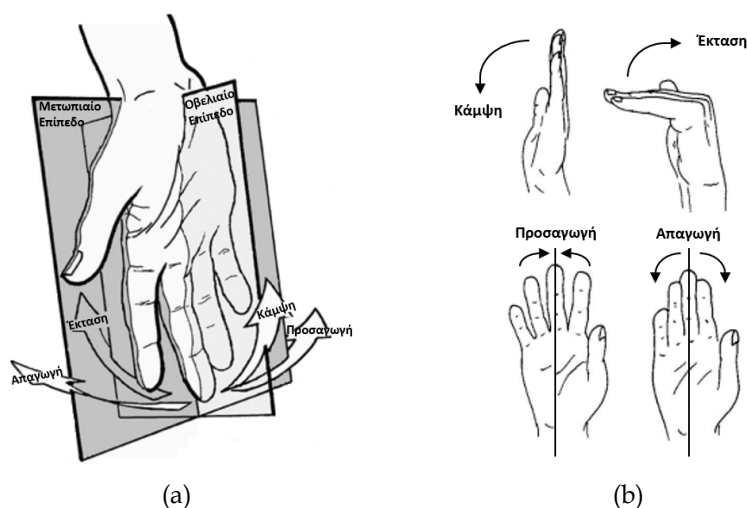
Στη συνέχεια παρουσιάζεται το εξωσκελετικό επιπρόσθετο ρομποτικό δάκτυλο και τα επιμέρους εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται. Αναφέρονται τα υλικά, οι τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή τους και ο τρόπος συναρμολόγησής τους. Αναλύεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη βαθμονόμηση των επενεργητών των αρθρώσεων, όπως επίσης και η διασύνδεσή τους με το μικροελεγκτή για τον έλεγχό τους. Τέλος γίνεται κινηματική ανάλυση επιλύοντας τόσο το ευθύ, όσο και το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα.

### 2.2 Το ανθρώπινο χέρι

Το ανθρώπινο χέρι συνθέτει μια από τις πολυπλοκότερες δομές της ανθρώπινης ανατομίας και αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά όργανα του ανθρώπινου σώματος, καθώς καθορίζει την αλληλεπίδραση με τον υλικό κόσμο. Χρησιμοποιούμε τα χέρια μας για την αναγνώριση αντικειμένων και την εξαγωγή μεγάλου αριθμού πληροφοριών για αυτά, όπως η υφή της επιφάνειάς τους, το βάρος, το σχήμα, το μέγεθος κ.α., ενώ επιδεικνύουμε εξαιρετική επιδεξιότητα κατά την κίνηση λαβής αντικειμένων και ακολούθως στο χειρισμό τους [53].

Το ανθρώπινο χέρι αποτελεί επίσης ένα πολύ σημαντικό μέσο επικοινωνίας και έκφρασης. Οι χειρονομίες της νοηματικής γλώσσας προσφέρουν πολύτιμη βοήθεια σε ανθρώπους κωφούς ή με προβλήματα ακοής. Επιπλέον μέσω της αίσθησης αφής, άνθρωποι με προβλήματα όρασης μπορούν να διαβάσουν κείμενα με τον κώδικα Μπράιγ. Τέλος, το ανθρώπινο χέρι αποτελεί ένα εξαιρετικά δημιουργικό εργαλείο σε πολλές τέχνες όπως η γλυπτική, η αναπαραγωγή μουσικής, και το σχέδιο.

Δεδομένης της ανατομικής πολυπλοκότητας του ανθρώπινου χεριού, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της ορολογίας που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για την περιγραφή των χαρακτηριστικών. Όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 2.1, ως κάμψη (Flexion) μπορεί να περιγραφεί η κίνηση κατά την οποία η γωνία μιας άρθρωσης μικραίνει. Έκταση (Extension) είναι η αντίθετη κίνηση της κάμψης και έχει ως αποτέλεσμα το ίσιωμα των ανατομικών συνδέσμων. Όσον αφορά τα δάχτυλα και την κίνηση της απαγωγής - προσαγωγής (Abduction - Adduction), μπορεί να περιγραφεί αντίστοιχα ως η κίνηση από ή προς τη μεσαία γραμμή του χεριού [54].



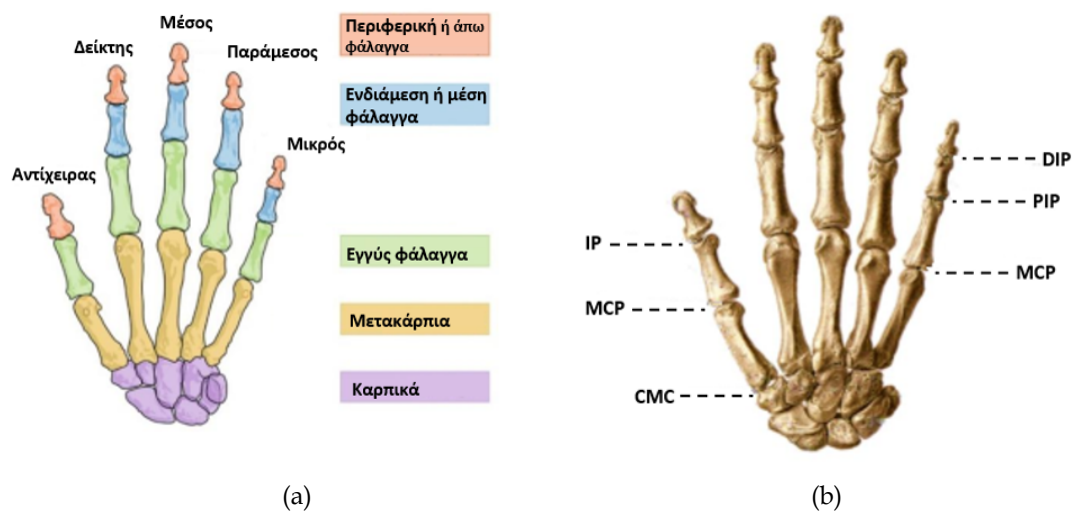
Σχήμα 2.1: Ορολογία επιπέδων, προσανατολισμού και κινήσεων (a) Χεριού, (b) Δαχτύλων

### 2.2.1 Οι αρθρώσεις και οι φάλαγγες του ανθρώπινου χεριού

Το ανθρώπινο χέρι αποτελείται από 5 δάχτυλα, το δείκτη (Index), το μέσο (Middle), τον παράμεσο (Ring), τον μικρό (Pinky) και τον αντίχειρα (Thumb). Συνθέτεται από 27 οστά, 8 καρπικά που σχηματίζουν τον καρπό, 5 μετακάρπια στην περιοχή της παλάμης και 14 που αποτελούν τις φάλαγγες των δαχτύλων. Κάθε ένα από τα 4 πρώτα δάχτυλα περιλαμβάνει 3 από τα 27 οστά, την εγγύς (Proximal phalanx), τη μέση (Middle phalanx) και την περιφερική ή άπω φάλαγγα (Distal phalanx). Ο αντίχειρας αποτελείται από δυο φάλαγγες, την περιφερική και την εγγύς (Σχήμα 2.2a).

Οι φάλαγγες συνδέονται μεταξύ τους μέσω των αρθρώσεων (Σχήμα 2.2b). Για τα τέσσερα πρώτα δάχτυλα ισχύει ότι η εγγύς με τη μέση φάλαγγα συνδέονται με την εγγύς μεσοφαλαγγική άρθρωση (Proximal InterPhalangeal, PIP), η μέση με την περιφερική συνδέονται με την περιφερική μεσοφαλαγγική άρθρωση (Distal InterPhalangeal, DIP), ενώ η σύνδεση της εγγύς φάλαγγας με τα μετακάρπια γίνεται με την μετακαρποφαλαγγική άρθρωση (MetaCarpoPhalangeal,

MCP). Για τον αντίχειρα ισχύει ότι η περιφερική με την εγγύς φάλαγγα συνδέονται με την μεσοφαλαγγική άρθρωση (InterPhalangeal, IP), η εγγύς με το μετακάρπιο με τη μετακαρποφαλαγγική άρθρωση (MetaCarpoPhalangeal, MCP), ενώ η το μετακάρπιο συνδέεται με τα οστά του καρπού με τη καρπομετακάρπια άρθρωση (CarpoMetaCarpal, CMC).



Σχήμα 2.2: Η ανατομία του ανθρώπινου χεριού (a) Οι φάλαγγες και (b) Οι αρθρώσεις

Οι αρθρώσεις προσθέτουν βαθμούς ελευθερίας (β.ε.) στο ανθρώπινο χέρι. Πιο συγκεκριμένα η εγγύς μεσοφαλαγγική (PIP), η περιφερική μεσοφαλαγγική (DIP) και η μεσοφαλαγγική (IP) προσθέτουν από ένα β.ε., ενώ η μετακαρποφαλαγγική (MCP), εκτός της περίπτωσης του αντίχειρα, και η καρπομετακάρπια άρθρωση (CMC) προσθέτουν από δύο β.ε. . Συνεπώς, μόνο από τα δάχτυλα μπορούν να αποδοθούν στο ανθρώπινο χέρι 20 β.ε., ενώ επιπλέον τρεις προστίθενται από τον καρπό για τον προσανατολισμό του στο χώρο.

## 2.3 Κινηματική ανάλυση ανθρώπινου χεριού

Το κινηματικό μοντέλο του χεριού αποτελείται από 19 συνδέσμους και 21 β.ε. που αντιπροσωπεύουν τις φάλαγγες και τις αρθρώσεις αντίστοιχα. Για τη μελέτη του θεωρούνται δύο κινηματικές διαμορφώσεις, η πρώτη για τον αντίχειρα και η δεύτερη για τα υπόλοιπα τέσσερα δάχτυλα. Ο αντίχειρας διαθέτει 4 β.ε. ενώ τα υπόλοιπα δάχτυλά από 4 β.ε. το καθένα. Ο υπολειπόμενος β.ε. αποδίδεται στον καρπό και είναι κοινός και για τις δύο περιπτώσεις.

Η ευθεία κινηματική ανάλυση χρησιμοποιείται για την εύρεση της θέσης και του προσανατολισμού των ακροδαχτύλων συναρτήσει των μεταβλητών των αρθρώσεων ως προς ένα πλαίσιο βάσης. Στην περίπτωση των δαχτύλων του ανθρώπινου χεριού το πλαίσιο βάσης  $\{0\}$  τοποθετείται στον καρπό όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3, ενώ οι μεταβλητές των αρθρώσεων είναι οι γωνίες  $\theta_i$ . Για την τοποθέτηση των πλαισίων χρησιμοποιήθηκε η σύμβαση των Denavit - Hartenberg (DH), τροποποιημένη κατά Craig [55].

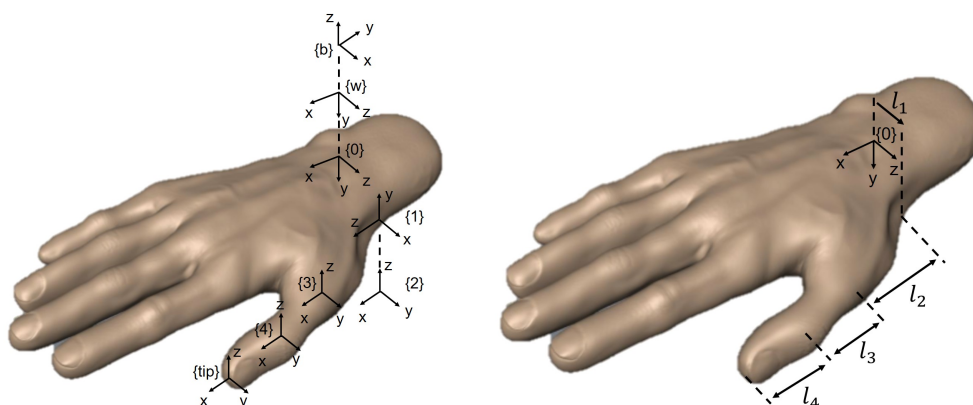
Η σχετική θέση και ο προσανατολισμός κάθε συνδέσμου σε σχέση με το γειτονικό του εκφράζεται από έναν ομογενή μετασχηματισμό, πχ ο  $g_{i-1,i}$  εκφράζει τη θέση και τον προσανατολισμό

του συνδέσμου  $\{i\}$  ως προς το σύνδεσμο  $\{i-1\}$ . Για την πλήρη κινηματική περιγραφή ενός συνδέσμου είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός τεσσάρων παραμέτρων, που είναι γνωστές ως DH παράμετροι και είναι οι παρακάτω:

- γωνία κάμψης  $\alpha_i$  : η γωνία μεταξύ των  $z_{i-1}$  και  $z_i$  μετρούμενη ως προς  $x_{i-1}$
- μήκος συνδέσμου  $a_i$  : η απόσταση μεταξύ των  $z_{i-1}$  και  $z_i$  μετρούμενη κατά μήκος του  $x_{i-1}$
- απομάκρυνση  $d_i$  : η απόσταση μεταξύ των  $x_{i-1}$  και  $x_i$  μετρούμενη κατά μήκος του  $z_i$
- γωνία άρθρωσης  $\theta_i$  : η γωνία μεταξύ των  $x_{i-1}$  και  $x_i$  μετρούμενη ως προς  $z_i$

### 2.3.1 Ευθεία κινηματική ανάλυση αντίχειρα

Η τοποθέτηση των πλαισίων στο δάχτυλο του αντίχειρα απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3. Για τη διευκόλυνση συμπλήρωσης του πίνακα παραμέτρων DH προστέθηκε βοηθητικό πλαίσιο  $\{b\}$  στο ύψος του καρπού, με συγκεκριμένο προσανατολισμό ως προς το πλαίσιο  $\{w\}$ . Τα πλαίσια  $\{1\}$  και  $\{2\}$  αντιστοιχούν στην CMC άρθρωση που προκαλεί την κίνηση της απαγωγής/προσαγωγής και κάμψης/έκτασης αντίστοιχα. Οι DH παράμετροι φαίνονται στον Πίνακα 2.1.



Σχήμα 2.3: Κινηματική διαμόρφωση ανθρώπινου χεριού για το δάχτυλο του αντίχειρα.

$i$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
$0 \rightarrow w$	0	0	0	$\theta_w$
$w \rightarrow b$	+90	0	0	+90
$b \rightarrow 1$	+90	$l_1$	0	$\theta_1$
$1 \rightarrow 2$	-90	0	0	$\theta_2$
$2 \rightarrow 3$	0	$l_2$	0	$\theta_3$
$3 \rightarrow 4$	0	$l_3$	0	$\theta_4$
$4 \rightarrow tip$	0	$l_4$	0	0

Πίνακας 2.1: Πίνακας παραμέτρων Denavit - Hartenberg αντίχειρα.

Οι ομογενείς μετασχηματισμοί που συνδέουν τους συνδέσμους του αντίχειρα περιγράφονται από τους παρακάτω πίνακες:

$$\begin{aligned}
\mathbf{g}_{0w} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_w & -\sin \theta_w & 0 & 0 \\ \sin \theta_w & \cos \theta_w & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & \mathbf{g}_{wb} &= \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & \mathbf{g}_{b1} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
\mathbf{g}_{12} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_2 & -\cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & \mathbf{g}_{23} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & \sin \theta_3 & 0 & l_2 \\ -\sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & \mathbf{g}_{34} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & \sin \theta_4 & 0 & l_3 \\ -\sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
\mathbf{g}_{Atip} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.1}$$

Η θέση και ο προσανατολισμός του ακροδαχτύλου ως προς το πλαίσιο βάσης  $\{0\}$  υπολογίζονται με τη σύνθεση των παραπάνω ομογενών μετασχηματισμών:

$$\mathbf{g}_{0tip} = \mathbf{g}_{0w} \mathbf{g}_{wb} \mathbf{g}_{b1} \mathbf{g}_{12} \mathbf{g}_{23} \mathbf{g}_{34} \mathbf{g}_{Atip} \tag{2.2}$$

όπου ο πίνακας  $\mathbf{g}_{0tip}$  είναι της μορφής:

$$\mathbf{g}_{0tip} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

Η τελευταία στήλη του πίνακα  $\mathbf{g}_{0tip}$  περιέχει τις συντεταγμένες του ακροδαχτύλου, ο υπολογισμός των οποίων γίνεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned}
p_x &= -l_3(c_3(c_w s_2 - c_2 s_1 s_w) + s_3(c_2 c_w + s_2 s_1 s_w)) - l_4(c_4(c_3(c_w s_2 - c_2 s_1 s_w) \\
&\quad + s_3(c_2 c_w + s_2 s_1 s_w)) - s_4(s_3(c_w s_2 - c_2 s_1 s_w) - c_3(c_2 c_w + s_2 s_1 s_w))) \\
&\quad - l_2(c_w s_2 - c_2 s_1 s_w)
\end{aligned} \tag{2.4}$$

$$\begin{aligned}
p_y &= l_2(s_2 s_w + c_2 c_w s_1) - l_3(s_3(c_2 s_w - c_w s_2 s_1) + c_3(s_2 s_w + c_2 c_w s_1)) \\
&\quad - l_4(s_4(c_3(c_2 s_w - c_w s_2 s_1) - s_3(s_2 s_w + c_2 c_w s_1)) \\
&\quad + c_4(s_3(c_2 s_w - c_w s_2 s_1) + c_3(s_2 s_w + c_2 c_w s_1)))
\end{aligned} \tag{2.5}$$

$$\begin{aligned}
p_z &= l_1 + l_3(c_2 c_1 c_3 - c_1 s_2 s_3) - l_4(s_4(c_2 c_1 s_3 + c_1 c_3 s_2) - c_4(c_2 c_1 c_3 - c_1 s_2 s_3)) \\
&\quad + l_2 c_2 c_1
\end{aligned} \tag{2.6}$$

όπου  $\theta_2 = -90 + \theta$ ,  $c = \cos$ ,  $s = \sin$  και  $c_2 = \cos \theta_2$ ,  $s_2 = \sin \theta_2$ .

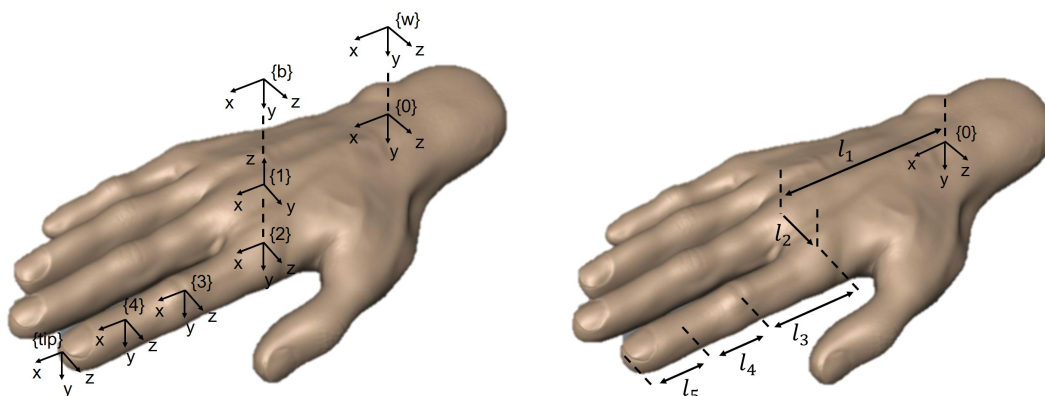
Τα στοιχεία  $p_x, p_y, p_z$  ορίζουν το διάνυσμα θέσης  ${}^tP$  του ακροδαχτύλου του αντίχειρα ως προς το πλαίσιο βάσης  $\{0\}$ :

$${}^tP = [p_x \ p_y \ p_z]^T \quad (2.7)$$

όπου ο πάνω αριστερά δείκτης υποδεικνύει το δάχτυλο του χεριού, με το  $t$  να αντιστοιχεί στον αντίχειρα.

### 2.3.2 Ευθεία κινηματική ανάλυση υπόλοιπων δαχτύλων

Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για την κινηματική διαμόρφωση των υπόλοιπων τεσσάρων δαχτύλων. Στο Σχήμα 2.4 απεικονίζεται η τοποθέτηση των πλαισίων στις αρθρώσεις του δείκτη. Επίσης προστέθηκε βοηθητικό πλαίσιο  $\{b\}$  στην MCP άρθρωση, ίδιου προσανατολισμού με αυτό της βάσης, με αποτέλεσμα η γωνία του  $\theta_b$  να είναι πάντα μηδέν. Τα πλαίσια  $\{1\}$  και  $\{2\}$  αντιστοιχούν στην MCP άρθρωση που προκαλεί την κίνηση της απαγωγής - προσαγωγής και κάμψης - έκτασης αντίστοιχα. Ομοίως με το δείκτη επισυνάπτονται τα πλαίσια και στα υπόλοιπα τρία δάκτυλα, μέσο, παράμεσο και μικρό. Οι DH παράμετροι για το δάκτυλο του δείκτη παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2.



Σχήμα 2.4: Κινηματική διαμόρφωση ανθρώπινου χεριού για το δάκτυλο του δείκτη.

$i$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
$0 \rightarrow w$	0	0	0	$\theta_w$
$w \rightarrow b$	0	$l_1$	$d_1$	0
$b \rightarrow 1$	+90	0	0	$\theta_1$
$1 \rightarrow 2$	-90	0	0	$\theta_2$
$2 \rightarrow 3$	0	$l_2$	0	$\theta_3$
$3 \rightarrow 4$	0	$l_3$	0	$\theta_4$
$4 \rightarrow tip$	0	$l_4$	0	0

Πίνακας 2.2: Πίνακας παραμέτρων Denavit - Hartenberg για το δείκτη.

Οι ομογενείς μετασχηματισμοί που συνδέουν τους συνδέσμους του δείκτη περιγράφονται από τους παρακάτω πίνακες:

$$\begin{aligned}
\mathbf{g}_{0w} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_w & -\sin \theta_w & 0 & 0 \\ \sin \theta_w & \cos \theta_w & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & \mathbf{g}_{wb} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & \mathbf{g}_{b1} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
\mathbf{g}_{12} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & \mathbf{g}_{23} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & l_2 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & \mathbf{g}_{34} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & l_3 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
\mathbf{g}_{4tip} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.8}$$

Η θέση του ακροδαχτύλου ως προς το πλαίσιο βάσης  $\{0\}$  υπολογίζεται με τη σύνθεση των παραπάνω ομογενών μετασχηματισμών:

$$\mathbf{g}_{0tip} = \mathbf{g}_{0w} \mathbf{g}_{wb} \mathbf{g}_{b1} \mathbf{g}_{12} \mathbf{g}_{23} \mathbf{g}_{34} \mathbf{g}_{4tip} \tag{2.9}$$

Οι εξισώσεις με βάση τις οποίες υπολογίζονται οι συντεταγμένες του ακροδαχτύλου είναι οι ακόλουθες:

$$\begin{aligned}
p_x &= l_1 c_w - l_3 (c_3 (s_2 s_w - c_1 c_2 c_w) + s_3 (c_2 s_w + c_1 c_w s_2)) - l_2 (s_2 s_w - c_1 c_2 c_w) \\
&\quad - l_4 (c_4 (c_3 (s_2 s_w - c_1 c_2 c_w) + s_3 (c_2 s_w + c_1 c_w s_2)) + s_4 (c_3 (c_2 s_w + c_1 c_w s_2) \\
&\quad - s_3 (s_2 s_w - c_1 c_2 c_w)))
\end{aligned} \tag{2.10}$$

$$\begin{aligned}
p_y &= l_2 (c_w s_2 + c_1 c_2 s_w) + l_3 (c_3 (c_w s_2 + c_1 c_2 s_w) + s_3 (c_2 c_w - c_1 s_2 s_w)) + l_1 s_w \\
&\quad + l_4 (c_4 (c_3 (c_w s_2 + c_1 c_2 s_w) + s_3 (c_2 c_w - c_1 s_2 s_w)) + s_4 (c_3 (c_2 c_w - c_1 s_2 s_w) \\
&\quad - s_3 (c_w s_2 + c_1 c_2 s_w)))
\end{aligned} \tag{2.11}$$

$$p_z = d_1 + l_3 c_{23} s_1 + l_2 c_2 s_1 + l_4 c_{234} s_1 \tag{2.12}$$

όπου  $c = \cos$ ,  $s = \sin$ ,  $c_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3)$  και  $c_{234} = \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$ .

Το διάνυσμα θέσης  ${}^i P$  του ακροδαχτύλου του δείκτη ως προς το πλαίσιο βάσης  $\{0\}$  ορίζεται ως:

$${}^i P = [p_x \quad p_y \quad p_z]^T \tag{2.13}$$

Αντίστοιχα ορίζονται και τα διανύσματα θέσης του μέσου  ${}^m P$ , παράμεσου  ${}^r P$ , και μικρού  ${}^p P$ , οι συντεταγμένες των οποίων μπορούν να υπολογιστούν από τις Σχέσεις (2.10), (2.11) και (2.12).

Η ευθεία κινηματική ανάλυση δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού της θέσης και του προσανατολισμού των δαχτύλων συναρτήσει των μεταβλητών των αρθρώσεων, δηλαδή των γωνιών  $\theta_i$ , ως προς το πλαίσιο βάσης  $\{0\}$ . Η θεωρητική μελέτη πραγματοποιείται χωρίς να λαμβάνονται υπόψη κάποια όρια για τις τιμές των γωνιών. Στην πραγματικότητα όμως το ανθρώπινο χέρι διακρίνεται από περιορισμούς ως προς το εύρος κίνησης των δαχτύλων, οι οποίοι και παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα.

## 2.4 Περιορισμοί κίνησης δαχτύλων

Το ανθρώπινο χέρι χαρακτηρίζεται από μεγάλη ευελιξία λόγω της αρθρωτής κατασκευής του, ωστόσο υπάρχουν και περιορισμοί, (αλληλο)εξαρτήσεις μεταξύ των δαχτύλων και των αρθρώσεων. Μπορούν να διακριθούν σε στατικούς και δυναμικούς. Οι στατικοί περιορισμοί αναφέρονται στα όρια του εύρους κίνησης των δαχτύλων που προκύπτουν λόγω της ανατομίας του χεριού, ενώ οι δυναμικοί αναφέρονται στα όρια που επιβάλλονται στις αρθρώσεις κατά τη διάρκεια της κίνησης των δαχτύλων [56–58].

Οι **στατικοί περιορισμοί** μπορούν να προσεγγιστούν αν εξεταστεί το εύρος της κίνησης των δαχτύλων χωρίς να εφαρμοστεί κάποια εξωτερική δύναμη, όπως πχ για την υπερέκταση ενός δαχτύλου προς τα πίσω. Οι παρακάτω σχέσεις περιγράφουν τα όρια κάθε άρθρωσης ανάλογα με την κίνηση που πραγματοποιεί, όπου  $f/e$ , κάμψη / έκταση και  $abd/add$ , απαγωγή/προσαγωγή:

$$0^\circ \leq \theta_{MCP(f/e)} \leq 90^\circ \quad (2.14)$$

$$0^\circ \leq \theta_{PIP} \leq 110^\circ \quad (2.15)$$

$$0^\circ \leq \theta_{DIP} \leq 90^\circ \quad (2.16)$$

$$-15^\circ \leq \theta_{MCP(abd/add)} \leq 15^\circ \quad (2.17)$$

Ένας ακόμη ευρέως υιοθετημένος περιορισμός αναφέρει ότι το μεσαίο δάχτυλο κατά την απαγωγή - προσαγωγή παρουσιάζει ελάχιστη κίνηση επομένως μπορεί να γίνει η ακόλουθη προσέγγιση:

$$\theta_{MCP(abd/add)} = 0 \quad (2.18)$$

Οι **δυναμικοί περιορισμοί** μπορούν να διακριθούν επίσης σε δύο κατηγορίες, τους ένδο - δαχτύλιους (Intra finger) και τους έσω - δαχτύλιους (Inter finger). Οι ένδο - δαχτύλιοι περιορισμοί αναφέρονται στους συσχετισμούς που προκύπτουν μεταξύ των αρθρώσεων του ίδιου δαχτύλου, ενώ οι έσω - δαχτύλιοι περιγράφουν τις (αλληλο)εξαρτήσεις μεταξύ των δαχτύλων ενώ αυτά κινούνται.



Οι **ένδο - δαχτύλιοι περιορισμοί** μελετώνται εξετάζοντας δύο ξεχωριστά μοντέλα του χεριού. Το πρώτο αποτελείται από τα δάχτυλα του δείκτη, μέσου, παράμεσου και μικρού και το δεύτερο από τον αντίχειρα. Με βάση την ανατομία του χεριού είναι κοινά αποδεκτό ότι προκειμένου να καμφθεί η DIP άρθρωση πρέπει επίσης να καμφθεί και η PIP άρθρωση για όλα τα δάχτυλα εκτός του αντίχειρα. Η συσχέτιση αυτή περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$\theta_{DIP} \approx \frac{2}{3} \theta_{PIP} \quad (2.19)$$

Επίσης κατά τη λαβή αντικειμένων ισχύει η σχέση:

$$\theta_{PIP} \approx \frac{3}{4} \theta_{MCP(f/e)} \quad (2.20)$$

Οι περιορισμοί που ισχύουν για τον αντίχειρα περιγράφονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\theta_{IP} \approx \frac{1}{2} \theta_{MCP} \quad (2.21)$$

$$\theta_{MCP} \approx \frac{5}{4} \theta_{CMC(f/e)} \quad (2.22)$$

Οι **έσω - δαχτύλιοι περιορισμοί** προέκυψαν από μελέτη συζευγμένων κινήσεων μεταξύ των δαχτύλων του δείκτη, μέσου, παράμεσου και μικρού, όπως επίσης και της σχέσης μεταξύ των γωνιών των προαναφερθέντων δαχτύλων εκτός του δείκτη (Σχήμα 2.5).

Στην περίπτωση που ο δείκτης και το μικρό δάχτυλο δεν κάμπτονται, κάμψη της MCP άρθρωσης του μέσου θα προκαλέσει αντίστοιχη κάμψη και στον παράμεσο (Σχήμα 2.5a):

$$\theta_{MCP(f/e)Middle} \approx \theta_{MCP(f/e)Ring} \quad (2.23)$$

Κάμψη της MCP άρθρωσης μόνο του παράμεσου παράγει ακόμη μία συζευγμένη κίνηση, προκαλώντας την ίση κάμψη μέσου και μικρού δαχτύλου (Σχήμα 2.5b):

$$\theta_{MCP(f/e)Middle} \approx \theta_{MCP(f/e)Pinky} \quad (2.24)$$

Τέλος, στις περισσότερες περιπτώσεις η κίνηση απαγωγής - προσαγωγής μεταξύ παράμεσου και μικρού δαχτύλου (Σχήμα 2.5c) περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$\theta_{MCP(abd/add)Ring} \approx \theta_{MCP(abd/add)Pinky} \quad (2.25)$$

Οι σχέσεις μεταξύ των γωνιών των δαχτύλων συνοψίζονται σε δύο περιπτώσεις. Η πρώτη σχετίζεται με την ύπαρξη κάμψης της MCP άρθρωσης του μικρού δάκτυλου όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5d και περιγράφεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\theta_{MCP(f/e)Ring} \approx \frac{7}{12} \theta_{MCP(f/e)Pinky} \quad (2.26)$$

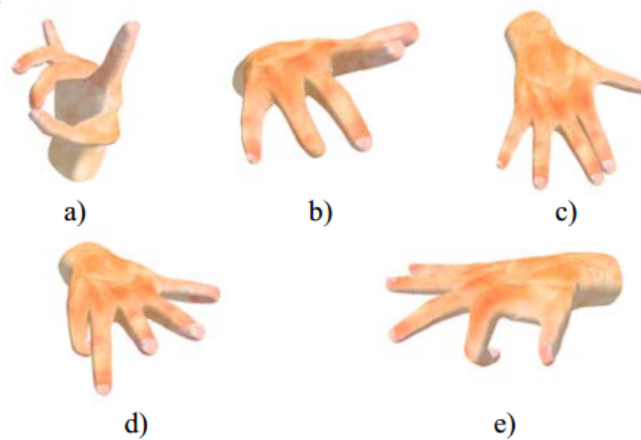
$$\theta_{MCP(f/e)Ring} \approx \frac{2}{3} \theta_{MCP(f/e)Middle} \quad (2.27)$$

$$\theta_{MCP(f/e)Ring} - \theta_{MCP(f/e)Middle} < 60^\circ \quad (2.28)$$

$$\theta_{MCP(f/e)Ring} - \theta_{MCP(f/e)Pinky} < 50^\circ \quad (2.29)$$

Η δεύτερη περίπτωση προκύπτει κατά την κάμψη της MCP άρθρωσης του δείκτη (Σχήμα 2.5e), η οποία και προκαλεί κάμψη του μέσου:

$$\theta_{MCP(f/e)Middle} \approx \frac{1}{5} \theta_{MCP(f/e)Index} \quad (2.30)$$



Σχήμα 2.5: Απεικόνιση έσω - δαχτύλιων περιορισμών, (a) Μέσος και παράμεσος, (b) Μέσος, παράμεσος και μικρό δάκτυλο, (c) Αλαγωγή - Προσαγωγή μεταξύ παράμεσου και μικρού, (d) Παράμεσος και μικρός, (e) Δείκτης και μέσος [56].

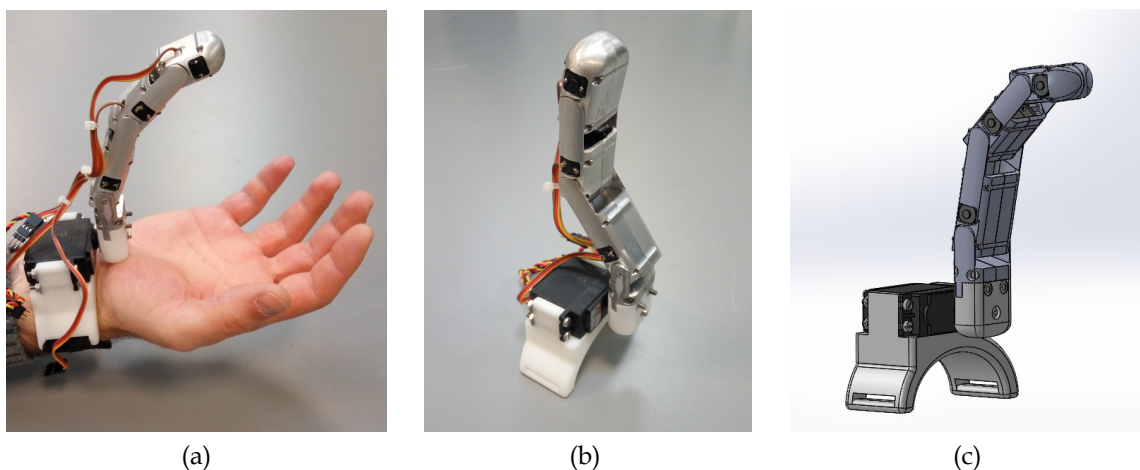
Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι αν και οι περιορισμοί, στατικοί και δυναμικοί, μειώνουν την ευελιξία του χεριού σε συγκεκριμένες κινήσεις, δίνουν ωστόσο τη δυνατότητα υπολογισμού της κάμψης των αρθρώσεων από την καταγραφή μίας και μόνο γωνίας. Επομένως απαιτούνται λιγότεροι αισθητήρες και ηλεκτρονικά ελέγχου.

## 2.5 Το επιπρόσθετο εξωσκελετικό ρομποτικό δάκτυλο

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται το εξωσκελετικό επιπρόσθετο ρομποτικό δάκτυλο. Η σχεδίασή του βασίζεται στην ανατομία των ανθρώπινων δαχτύλων που παρουσιάστηκαν στην υποενότητα 2.2.1 και προσπαθεί να προσομοιώσει τις κινήσεις της κάμψης - έκτασης και απαγωγής - προσαγωγής. Στόχος ήταν η δημιουργία μιας στιβαρής και συγχρόνως ελαφριάς κατασκευής, που να μπορεί να τοποθετηθεί με ευκολία στον καρπό του χεριού και να μην προκαλεί δυσφορία στο χρήστη. Το συνολικό βάρος ανήλθε σε 0.204 kg.

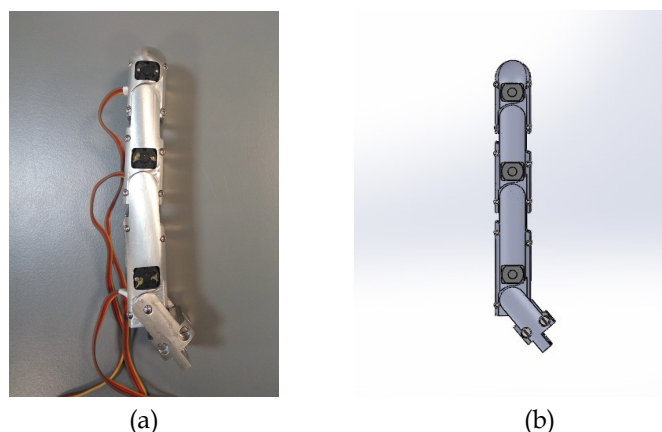
Αρχικά περιγράφονται τα εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται, ο τρόπος κατασκευής και συναρμολόγησή τους. Στη συνέχεια περιγράφονται οι σερβοκινητήρες που χρησιμοποιούνται για την οδήγηση των αρθρώσεων, η διαδικασία βαθμονόμησης και η διασύνδεσή τους με το μικροελεγκτή. Τέλος πραγματοποιείται κινηματική ανάλυση της διάταξης με την επίλυση τόσο του ευθύ, όσο και του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος.

Στο Σχήμα 2.6α απεικονίζεται το επιπρόσθετο ρομποτικό δάκτυλο τοποθετημένο στον καρπό του χρήστη. Η στερέωσή του γίνεται με ελαστικό ιμάντα. Διαθέτει 4 βαθμούς ελευθερίας (β.ε.) με τέσσερις περιστροφικές αρθρώσεις, οι οποίες οδηγούνται από ισάριθμους σερβοκινητήρες. Αποτελείται από δύο βασικά τμήματα, το δάκτυλο και τη διάταξη στήριξης στον καρπό.



Σχήμα 2.6: Το εξωσκελετικό επιπρόσθετο ρομποτικό δάκτυλο (a) Τοποθετημένο στον καρπό, (b) Η πραγματική διάταξη, (c) Το CAD μοντέλο

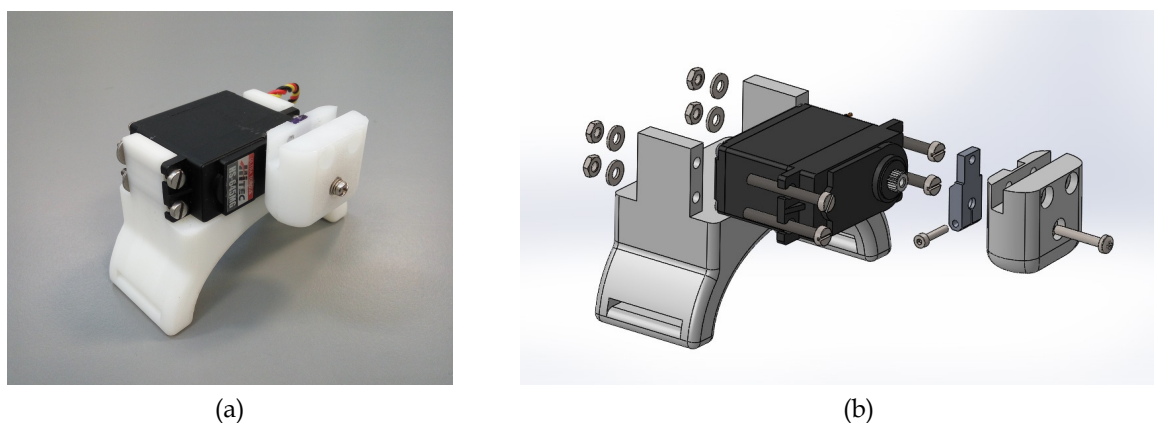
Το δάκτυλο (Σχήμα 2.7) αποτελεί το αρχικό πρωτότυπο για την κατασκευή ενός ανθρωπόμορφου μεταλλικού ρομποτικού χεριού, στα πλαίσια πτυχιακής εργασίας στο ΤΕΙ Κρήτης [59]. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι αλουμίνιο και διαθέτει τρεις περιστροφικές αρθρώσεις οι οποίες οδηγούνται από ισάριθμους σερβοκινητήρες TGY-9018MG (Σχήμα 2.10b). Διαθέτει τέσσερις φάλαγγες, την πρώτη (επικαρπιαία) η οποία είναι και ο σύνδεσμος με τη διάταξη της βάσης, την εγγύς, τη μέση και την άπω, κάθε μία από τις οποίες αποτελείται από 2 τμήματα. Η μεταξύ τους συναρμολόγηση γίνεται για τη μεν πρώτη με δύο βίδες M1.4x0.3, ενώ για τις τρεις τελευταίες με τέσσερις βίδες M2x0.5. Οι τρεις τελευταίες περικλείουν τους σερβοκινητήρες, ο άξονας των οποίων εφαρμόζει απευθείας επάνω στην επιφάνεια της προηγούμενης φάλαγγας για τη μετάδοση της κίνησης. Σε πλήρη έκταση το μήκος του δαχτύλου είναι 130.10 mm.



Σχήμα 2.7: Το δάκτυλο (a) Πραγματικό σύστημα (b) CAD μοντέλο.

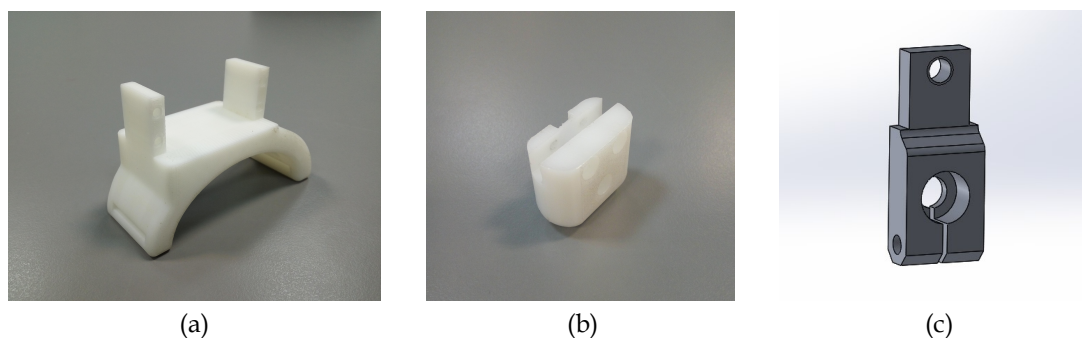
### 2.5.1 Η διάταξη στήριξης του δαχτύλου που αναπτύχθηκε

Η διάταξη στήριξης του δαχτύλου (Σχήμα 2.8a), διαθέτει έναν β.ε. και αποτελείται από τέσσερα εξαρτήματα. Το πρώτο είναι η βάση (Σχήμα 2.9a), η οποία τοποθετείται στον καρπό με τη χρήση ελαστικού ιμάντα. Επάνω της συναρμολογείται με τέσσερις βίδες M4x1 το δεύτερο εξάρτημα, ο σερβοκινητήρας HS-645MG (Σχήμα 2.10b), για την οδήγηση της πρώτης περιστροφικής άρθρωσης. Η σχεδίαση της βάσης έγινε έτσι ώστε ο άξονας του σερβοκινητήρα και κατά συνέπεια και το δάκτυλο, να βρίσκονται στη μεσαία γραμμή του χεριού. Τα δύο τελευταία εξαρτήματα είναι ένας προσαρμογέας από αλουμίνιο (Σχήμα 2.9c) που εφαρμόζει απευθείας στο τελικό γρανάζι του άξονα του σερβοκινητήρα και ο σύνδεσμος (Σχήμα 2.9b), μέσω του οποίου συναρμολογείται το δάκτυλο επάνω στη διάταξη στήριξης. Η σχεδίαση του τελευταίου ακολουθεί τη γεωμετρία της πρώτης άρθρωσης του δαχτύλου. Στο Σχήμα 2.8b φαίνονται τα επιμέρους εξαρτήματα της διάταξης, σε αποσυναρμολογημένη όψη.



Σχήμα 2.8: Η διάταξη στήριξης (a) Το πραγματικό σύστημα (b) Το CAD μοντέλο.

Η βάση και το τελευταίο συνδετικό εξάρτημα σχεδιάστηκαν στο λογισμικό SolidWorks 2015 της Dassault Systems. Το μεν πρώτο κατασκευάστηκε από θερμοπλαστικό υλικό τύπου ABSPlus με τη βοήθεια συστήματος τριδιάστατης εκτύπωσης Dimension Elite της Stratasys, ενώ το δεύτερο κατασκευάστηκε από ερταλόν στο CNC κάθετο κέντρο κατεργασίας τεσσάρων αξόνων Haas Vf-2. Τα αναλυτικά μηχανολογικά σχέδια και των δύο παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.



Σχήμα 2.9: (a) Βάση προσαρμογής στον καρπό (b) Σύνδεσμος τοποθέτησης δαχτύλου (c) Προσαρμογέας σερβοκινητήρα οδήγησης

Όλοι οι σερβοκινητήρες χρησιμοποιούν μεταλλικούς οδοντωτούς τροχούς για τη μετάδοση της κίνησης, κάτι που αυξάνει την ανθεκτικότητα του μηχανικού μέρους τους σε μεγαλύτερες τιμές αποδιδόμενης ροπής σε βάθος χρόνου. Τα αναλυτικά τους χαρακτηριστικά παρατίθενται στο Παράρτημα Α.1.



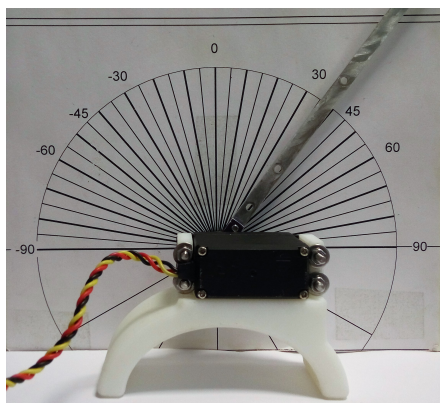
Σχήμα 2.10: Οι σερβοκινητήρες οδήγησης των αρθρώσεων (a) Hitec HS-645MG, (b) Turnigy TGY-9018MG

Με την τοποθέτηση της ρομποτικής διάταξης στον καρπό του χεριού διαπιστώθηκε ότι δεν διαθέτετε την επιθυμητή σταθερότητα. Αυτό οφειλόταν στον ιμάντα, ο οποίος λόγω της ελαστικότητας του, δεν μπορούσε να διατηρήσει την επιθυμητή θέση. Για τη σταθεροποίηση προσαρμόστηκε εξάρτημα σχήματος "ταφ" στη βάση της.

## 2.5.2 Βαθμονόμηση σερβοκινητήρων

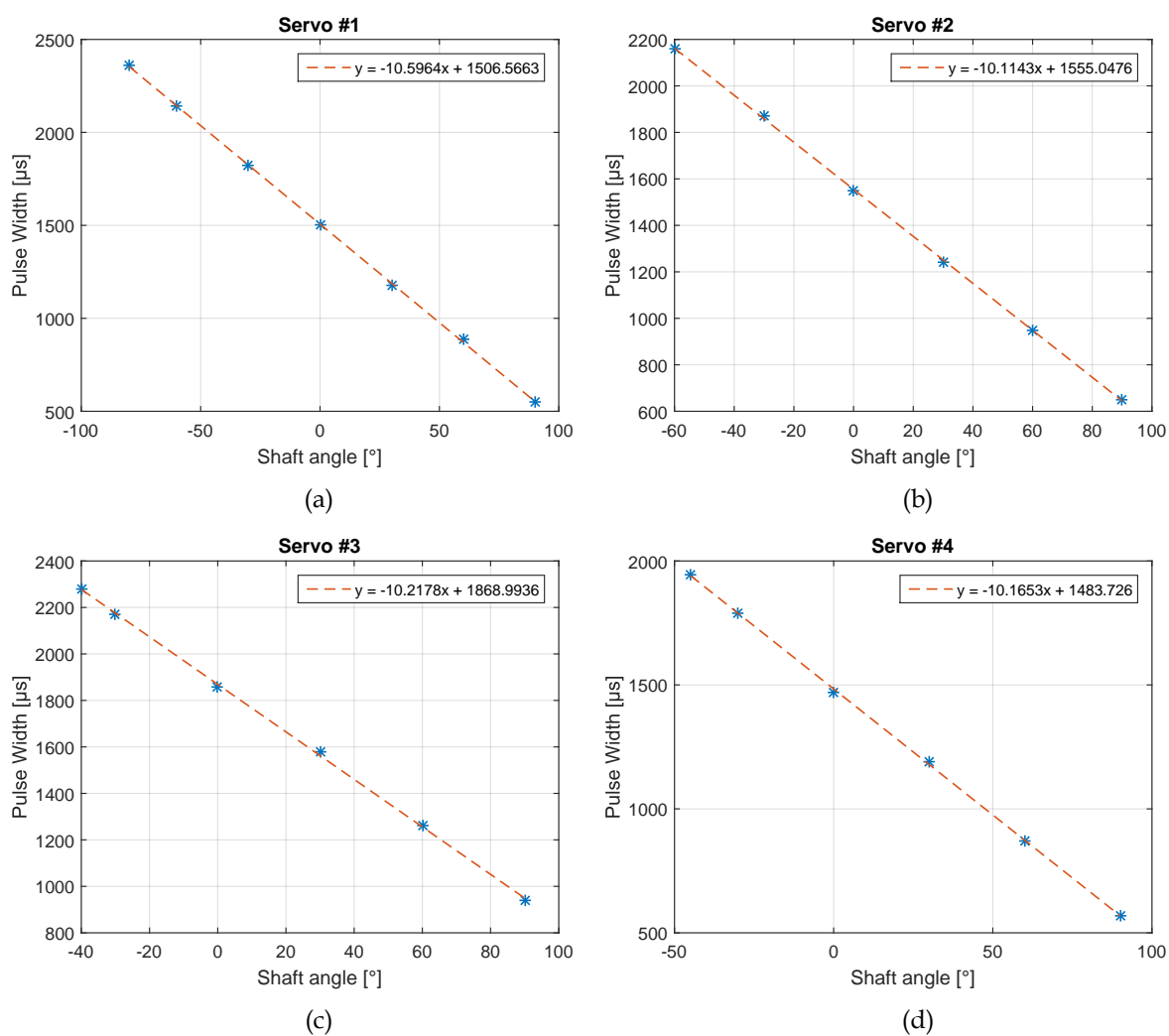
Σκοπός της βαθμονόμησης είναι η αντιστάθμιση τυχόν κατασκευαστικών διαφορών μεταξύ σερβοκινητήρων του ίδιου τύπου, αλλά και διαφορών που προκύπτουν κατά τη συναρμολόγηση τους. Η εξισορρόπηση αυτών των αποκλίσεων γίνεται μέσω της διαδικασίας βαθμονόμησης, από την οποία προκύπτει μια γραμμική σχέση  $y = -\alpha x + \beta$  για το σήμα ελέγχου, όπου  $y$  το πλάτος του παλμού,  $x$  η γωνία περιστροφής του άξονα,  $\alpha$  ο συντελεστής μετατροπής από μοίρες σε στάθμες PWM και  $\beta$  η γωνιακή απόκλιση από τη μηδενική θέση.

Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε τοποθετώντας τον κάθε σερβοκινητήρα σε ειδική διάταξη (Σχήμα 2.11), ενώ προσαρμόστηκε μία ακτίνα στον άξονά του, για την καλύτερη απεικόνιση της γωνιακής του θέσης. Με την υλοποίηση κατάλληλου προγράμματος στον Arduino, η ακτίνα μετακινείται σε συγκεκριμένες θέσεις και γίνεται καταγραφή της τιμής PWM. Στη συνέχεια τα



Σχήμα 2.11: Η διάταξη βαθμονόμησης των σερβοκινητήρων.

δεδομένα επεξεργάστηκαν στο Matlab και προέκυψαν οι συντελεστές  $\alpha$  και  $\beta$  της εξίσωσης. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.12. Η αρίθμηση των κινητήρων



Σχήμα 2.12: Διαγράμματα βαθμονόμησης σερβοκινητήρων.

ακολουθεί τη σειρά με την οποία είναι τοποθετημένοι στη διάταξη, ξεκινώντας από τη βάση έως την τελευταία άρθρωση του δακτύλου.

### 2.5.3 Διασύνδεση ρομποτικού δαχτύλου με το μικροελεγκτή

Ο έλεγχος των επενεργητών των αρθρώσεων γίνεται με τον Arduino Mega 2560, τα χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3, Ενότητα 3.2. Η παραγωγή των σημάτων ελέγχου PWM γίνεται μέσω δύο 16-bit χρονιστών, timer 3 και timer 4, με τη ρύθμισή τους να επιτυγχάνεται επιλέγοντας κατάλληλα τις τιμές των καταχωρητών σύγκρισης (Πίνακας 2.3). Στη συνέχεια οι τιμές τους προωθούνται στους σερβοκινητήρες. Η διασύνδεση τους με το μικροε-

α/α Servo	χρονιστής	καταχωρητής ρύθμισης duty cycle
1	timer 3	OCR3A
2	timer 4	OCR4A
3	timer 4	OCR4B
4	timer 4	OCR4C

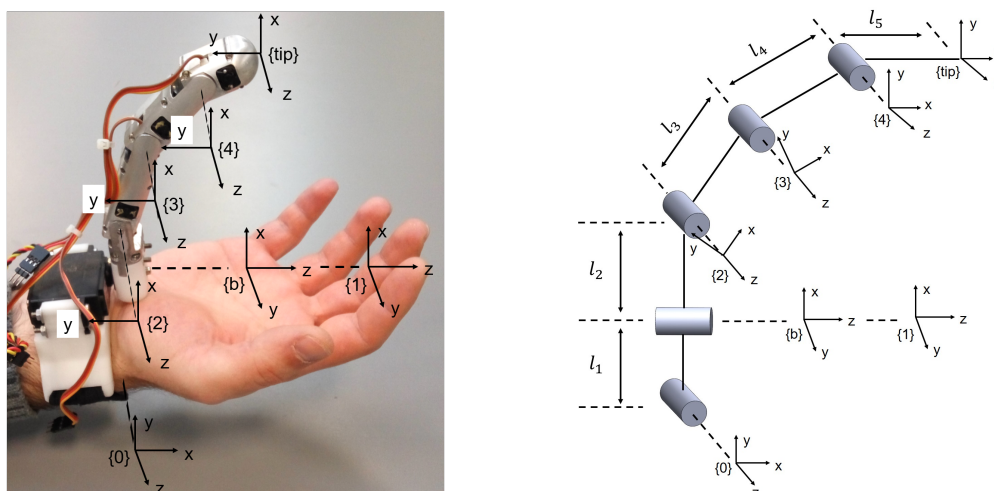
Πίνακας 2.3: Παραγωγή σημάτων ελέγχου επενεργητών ρομποτικού δαχτύλου.

λεγκτή έγινε με την κατασκευή βοηθητικής πλακέτας επέκτασης, η οποία συνδέεται απευθείας μέσω ακιδοσειρών με τους ακροδέκτες του Arduino. Περισσότερες λεπτομέρειες παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3, Ενότητα 3.3.5. Ο έλεγχος της λειτουργίας του εξωσκελετικού επιπρόσθετου ρομποτικού δαχτύλου θα πραγματοποιηθεί με τη χρήση γαντιού συλλογής δεδομένων, η υλοποίηση του οποίου περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3, ενώ οι στρατηγικές ελέγχου που αναπτύχθηκαν παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η κινηματική ανάλυση του ρομποτικού δαχτύλου, όπου γίνεται επίλυση του ευθύ και του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος.

### 2.5.4 Ευθεία κινηματική ανάλυση επιπρόσθετου ρομποτικού δαχτύλου

Στο Σχήμα 2.13 απεικονίζεται η τοποθέτηση των πλαισίων στις αρθρώσεις του επιπρόσθετου δαχτύλου. Τοποθετήθηκε βοηθητικό πλαίσιο βάσης  $\{b\}$  στην πρώτη άρθρωση της διάταξης ίδιου προσανατολισμού με το πλαίσιο  $\{1\}$ .



Σχήμα 2.13: Η τοποθέτηση των πλαισίων στο επιπρόσθετο ρομποτικό δάκτυλο.

Ο ομογενής μετασχηματισμός που συνδέει το πλαίσιο  $\{b\}$  με το πλαίσιο βάσης  $\{0\}$  είναι:

$$\mathbf{g}_{0b} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Στον Πίνακα 2.4 φαίνονται οι DH παράμετροι για το επιπρόσθετο δάκτυλο ως προς το βοηθητικό πλαίσιο βάσης  $\{b\}$ .

$i$	$\alpha_{i-1}$	$\mathbf{a}_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
$b \rightarrow 1$	0	0	0	$\theta_1$
$1 \rightarrow 2$	-90	$l_2$	0	$\theta_2$
$2 \rightarrow 3$	0	$l_3$	0	$\theta_3$
$3 \rightarrow 4$	0	$l_4$	0	$\theta_4$
$4 \rightarrow tip$	0	$l_5$	0	0

Πίνακας 2.4: Πίνακας παραμέτρων Denavit - Hartenberg για το επιπρόσθετο δάκτυλο.

Οι ομογενείς μετασχηματισμοί που συνδέουν τους συνδέσμους του ρομποτικού δαχτύλου δίνονται από τους παρακάτω πίνακες:

$$\mathbf{g}_{b1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{g}_{12} = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & \sin\theta_2 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_2 & -\cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{g}_{23} = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & \sin\theta_3 & 0 & -l_3 \\ -\sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{g}_{34} = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & \sin\theta_4 & 0 & -l_4 \\ -\sin\theta_4 & \cos\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{g}_{4tip} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -l_5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

ενώ η θέση και ο προσανατολισμός του ως προς το πλαίσιο βάσης  $\{0\}$  υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\mathbf{g}_{0tip} = \mathbf{g}_{0b} \mathbf{g}_{btip} = \mathbf{g}_{0b} \mathbf{g}_{b1} \mathbf{g}_{12} \mathbf{g}_{23} \mathbf{g}_{34} \mathbf{g}_{4tip} \quad (2.33)$$

Οι εξισώσεις με βάση τις οποίες υπολογίζονται οι συντεταγμένες του ακροδαχτύλου της ρομποτικής διάταξης είναι οι ακόλουθες:

$$p_x = -l_4 s_{23} - l_3 s_2 - l_5 s_{234} \quad (2.34)$$

$$p_y = l_1 + l_2 c_1 + l_4 c_{23} c_1 + l_3 c_1 c_2 + l_5 c_{234} c_1 \quad (2.35)$$

$$p_z = s_1 (l_2 + l_4 c_{23} + l_3 c_2 + l_5 c_{234}) \quad (2.36)$$



όπου  $c = \cos$ ,  $s = \sin$ ,  $c_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3)$ ,  $s_{23} = \sin(\theta_2 + \theta_3)$ ,  $c_{234} = \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$  και  $s_{234} = \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$ , ενώ το διάνυσμα θέσης  ${}^eP$  ως προς το πλαίσιο βάσης  $\{0\}$  ορίζεται ως:

$${}^eP = [p_x \ p_y \ p_z]^T \quad (2.37)$$

### 2.5.5 Αντίστροφη κινηματική ανάλυση επιπρόσθετου ρομποτικού δαχτύλου

Μέχρι τώρα μελετήθηκε η ευθεία κινηματική ανάλυση τόσο του ανθρώπινου χεριού, όσο και του επιπρόσθετου δαχτύλου και αφορούσε την εύρεση της θέσης και του προσανατολισμού του άκρου ως προς το πλαίσιο βάσης  $\{0\}$  του καρπού, γνωρίζοντας τη θέση κάθε άρθρωσης. Η αντίστροφη κινηματική ανάλυση συνίσταται στην εύρεση της θέσης κάθε άρθρωσης του ρομποτικού δαχτύλου που τοποθετεί το άκρο του σε μία συγκεκριμένη επιθυμητή θέση και προσανατολισμό, σε σχέση με το πλαίσιο αναφοράς  $\{0\}$ . Στην συνέχεια αναλύεται η επίλυση του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος.

Θεωρούμε διάνυσμα  $p_0$  που περιέχει τις συντεταγμένες του επιθυμητού σημείου ως προς το πλαίσιο  $\{0\}$ :

$$p_0 = [x_0, y_0, z_0, 1] \quad (2.38)$$

ενώ ο επιθυμητός προσανατολισμός δίνεται από τη γωνία  $\varphi$  η οποία ισούται με:

$$\varphi = (\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \quad (2.39)$$

Αρχικά γίνεται αναγωγή των συντεταγμένων του επιθυμητού σημείου ως προς το βοηθητικό πλαίσιο βάσης  $\{b\}$ , πολλαπλασιάζοντας το διάνυσμα  $p_0$  με τον αντίστροφο ομογενή μετασχηματισμό του  $g_{0b}$  (Σχέση 2.31). Το νέο διάνυσμα  $p_b$  που προκύπτει ισούται με:

$$p_b = g_{0b}^{-1} p_0 = \begin{bmatrix} y_0 - l_1 \\ z_0 \\ x_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \\ 1 \end{bmatrix}$$

και η γωνία  $\theta_1$  υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\theta_1 = \text{atan}(y_b/x_b) \quad (2.40)$$

Οι συντεταγμένες του σημείου εξαρτώνται από την περιστροφή ή μη της γωνίας  $\theta_1$  και δίνονται από το διάνυσμα  $p_c$  το οποίο ισούται με:

$$p_c = \text{grot}_z(\theta_1) p_b = \begin{bmatrix} x_b \cos \theta_1 - y_b \sin \theta_1 \\ y_b \cos \theta_1 + x_b \sin \theta_1 \\ z_b \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix}$$

όπου  $\text{grot}_z$  ο ομογενής μετασχηματισμός που εκφράζει την περιστροφή γύρω από τον άξονα  $z$  κατά γωνία  $\theta_1$ .

Για τον υπολογισμό των γωνιών  $\theta_2, \theta_3, \theta_4$  επιλύουμε το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα ως προς το πλαίσιο  $\{2\}$  της δεύτερης άρθρωσης, θεωρώντας ότι έχουμε ένα βραχίονα τριών περιστροφικών αρθρώσεων στο επίπεδο. Οι συντεταγμένες του νέου επιθυμητού σημείου θα είναι:

$$x_d = \sqrt{x_c^2 + y_c^2} - l_2$$

$$y_d = z_c$$

$$z_d = 0$$

Ισχύει ότι:

$$x_d = l_3 \cos \theta_2 + l_4 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_5 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \quad (2.41)$$

$$y_d = l_3 \sin \theta_2 + l_4 \sin(\theta_2 + \theta_3) + l_5 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \quad (2.42)$$

Για την απλοποίηση των εξισώσεων χρησιμοποιήθηκαν οι τριγωνομετρικές ταυτότητες:

$$\cos^2 x + \sin^2 y = 1$$

$$\cos(x \pm y) = \cos x \cos y \mp \sin x \sin y$$

$$\sin(x \pm y) = \sin x \cos y \pm \cos x \sin y$$

και οι συντομογραφίες  $c = \cos$  και  $s = \sin$  για το συνημίτονο και ημίτονο αντίστοιχα.

Υψώνοντας στο τετράγωνο και προσθέτοντας τις εξισώσεις (2.41) και (2.42) υπολογίζουμε το συνημίτονο της γωνίας  $\theta_3$  που ισούται με:

$$c_3 = \frac{(x_d - l_5 c_\varphi)^2 + (y_d - l_5 s_\varphi)^2 - l_3^2 - l_4^2}{2 l_3 l_4} \quad (2.43)$$

και αντίστοιχα το ημίτονο:

$$s_3 = \sqrt{1 - c_3^2} \quad (2.44)$$

Η γωνία  $\theta_3$  θα ισούται με:

$$\theta_3 = \text{atan}(s_3, c_3) \quad (2.45)$$

Από τις Σχέσεις (2.41) και (2.42) και με γνωστή τη  $\theta_3$  υπολογίζεται το ημίτονο της γωνίας  $\theta_2$ , που ισούται με:

$$s_2 = \frac{(y_d - l_5 s_\varphi) (l_3 + l_4 c_3) - (x_d - l_5 c_\varphi) l_4 s_3}{l_3^2 + l_4^2 + 2 l_3 l_4 c_3} \quad (2.46)$$

και το συνημίτονο:

$$c_2 = \frac{(x_d - l_5 c_\varphi) (l_3 + l_4 c_3) + (y_d - l_5 s_\varphi) l_4 s_3}{l_3^2 + l_4^2 + 2 l_3 l_4 c_3} \quad (2.47)$$

Έτσι η γωνία  $\theta_2$  θα είναι:

$$\theta_2 = \text{atan}(s_2, c_2) \quad (2.48)$$

Με γνωστές τις γωνίες  $\theta_2, \theta_3$  η γωνία  $\theta_4$  υπολογίζεται από τη Σχέση (2.39), επομένως θα είναι:

$$\theta_4 = (\varphi - \theta_2 - \theta_3) \quad (2.49)$$

Η μελέτη των χαρακτηριστικών του ανθρώπινου χεριού και κυρίως οι περιορισμοί που το διακρίνουν, διευκολύνουν τον υπολογισμό της κίνησης συγκεκριμένων αρθρώσεων, χωρίς να είναι απαραίτητη η χρήση αισθητήρων. Αυτή η δυνατότητα χρησιμοποιήθηκε και κατά την υλοποίηση του γαντιού συλλογής δεδομένων, τα βήματα για την κατασκευή του οποίου παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

## Κεφάλαιο 3

# Σχεδίαση και Υλοποίηση Γαντιού Συλλογής Δεδομένων

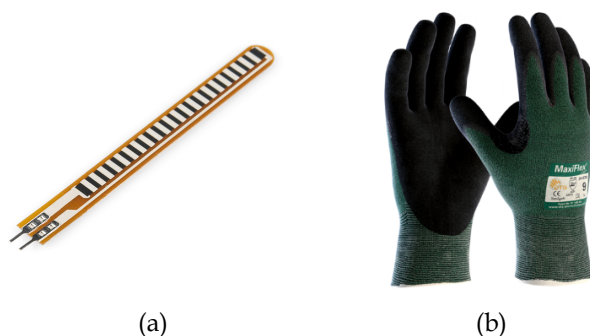
### 3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την υλοποίηση του γαντιού συλλογής δεδομένων, το οποίο χρησιμοποιεί αισθητήρες κάμψης για την καταγραφή της κίνησης των αρθρώσεων του ανθρώπινου χεριού και βασίστηκε στην αποτίμηση λειτουργίας και απόδοσης του προϋπάρχοντος αρχικού πρωτότυπου [50]. Πιο συγκεκριμένα περιγράφεται η μεθοδολογία βαθμονόμησης των αισθητήρων και το ηλεκτρικό κύκλωμα που σχεδιάστηκε για την καλύτερη και πιο αξιόπιστη καταγραφή των δεδομένων. Στη συνέχεια περιγράφονται οι βοηθητικές πλακέτες επέκτασης που κατασκευάστηκαν για τη διασύνδεση με το μικροελεγκτή και τα ηλεκτρονικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν. Τέλος παρουσιάζεται μοντέλο χεριού που δημιουργήθηκε σε περιβάλλον Simscape του Matlab, για την προσομοίωση των κινήσεων από τα δεδομένα που καταγράφονται, όπως επίσης και η αρχιτεκτονική ελέγχου του συστήματος.

### 3.2 Γενική περιγραφή

Όπως αναφέρεται στην Ενότητα 1.3, η υλοποίηση του νέου γαντιού συλλογής δεδομένων χαρακτηρίζεται από μία σειρά αναβαθμίσεων συγκριτικά με το αρχικό πρωτότυπο. Ενσωματώνει τους ίδιους αισθητήρες για την καταγραφή των κινήσεων κάμψης/έκτασης των δαχτύλων του χεριού, με την αναβάθμισή του να αφορά αρχικά στην επιλογή ενός λεπτότερου και ελασικότερου γαντιού, την καλύτερη τοποθέτηση και στερέωση των αισθητήρων και κυρίως τη σχεδίαση νέου ηλεκτρονικού κυκλώματος για την καταγραφή των δεδομένων με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Ειδικότερα, επιλέχθηκε γάντι εργασίας (Σχήμα 3.1b) της εταιρίας ATG [60], λόγω του πολύ μικρού πάχους (0.75 mm), της ελαστικότητας αλλά και της εφαρμογής του στο χέρι. Χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες κάμψης (Σχήμα 3.1a) της εταιρίας Spectra Symbol [61], τα βασικά



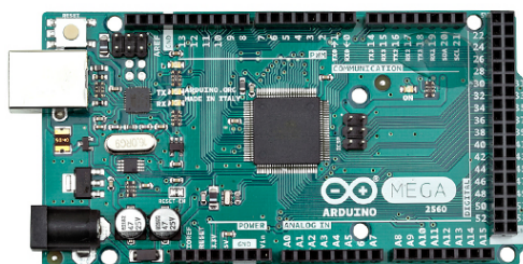
Σχήμα 3.1: (a) Ο αισθητήρας κάμψης, (b) Το γάντι.

χαρακτηριστικά των οποίων είναι τα ακόλουθα σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή:

- Ωμική αντίσταση σε επίπεδη θέση  $10K\Omega \pm 30\%$
- Ονομαστική ισχύς  $0.5W - 1W$
- Θερμοκρασία λειτουργίας  $-35^{\circ}C$  έως  $+80^{\circ}C$
- Κύκλος ζωής 1 εκατομμύριο κάμψεις

Η κεντρική μονάδα ελέγχου του συστήματος βασίζεται στην αναπτυξιακή πλατφόρμα Arduino Mega 2560 (Σχήμα 3.2), μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά της οποίας αναφέρονται στη συνέχεια:

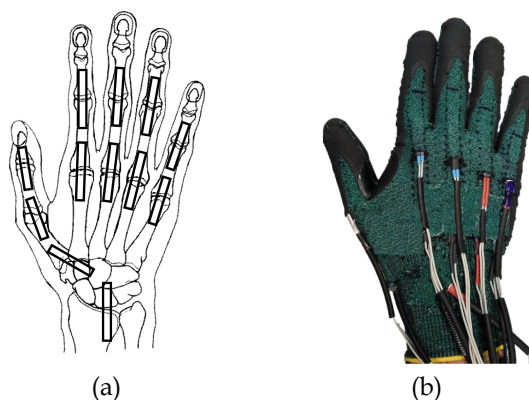
- Μικροελεγκτής ATmega2560, αρχιτεκτονικής AVR
- Συχνότητα χρονισμού λειτουργίας 16MHz
- 248KB μνήμη FLASH για τον κώδικα της εφαρμογής
- 8KB μνήμη SRAM, 4KB μνήμη EEPROM
- 4 χρονιστές 16-bit, 2 χρονιστές 8-bit
- 15 έξοδοι hardware PWM
- 1 μονάδα 10-bit ADC, 16 αναλογικές εισοδοι
- 4 μονάδες σειριακής διασύνδεσης USART
- Υποστήριξη πρωτοκόλλων SPI, I2C



Σχήμα 3.2: Η μικροϋπολογιστική πλατφόρμα Arduino Mega 2560.

- Τάση λειτουργίας 5V, εύρος τροφοδοσίας 5 – 12 V
- Προγραμματισμός μέσω USB/bootloader

Οι αισθητήρες κάμψης ράφτηκαν στην επάνω επιφάνεια του γαντιού (Σχήμα 3.3b) με τρόπο που επιτρέπει την ελεύθερη κίνησή τους, κατά την κάμψη και έκταση των δαχτύλων, και καταγράφουν τις γωνίες των αρθρώσεων όπως αυτές απεικονίζονται στο Σχήμα 3.3a. Για την αντιστοίχιση της αντίστασης τους σε γωνίες κάμψης των αρθρώσεων απαιτείται η βαθμονόμησή τους. Η συλλογή των σημάτων πραγματοποιείται από τον Arduino Mega 2560, μέσω ειδικά κατασκευασμένων πλακετών επέκτασης.



Σχήμα 3.3: Τοποθέτηση αισθητήρων κάμψης.

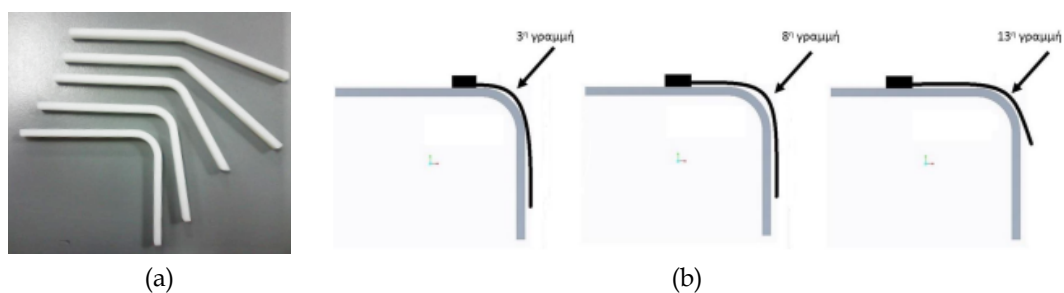
### 3.3 Υλοποίηση γαντιού συλλογής δεδομένων

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται αναλυτικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν για τη βαθμονόμηση των αισθητήρων και το κύκλωμα που υλοποιήθηκε για την καταγραφή των δεδομένων, με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια από το μικροελεγκτή. Η επεξεργασία των μετρήσεων, η εξαγωγή των αποτελεσμάτων και των αντίστοιχων διαγραμμάτων έγιναν με την υλοποίηση κατάλληλων προγραμμάτων στο λογισμικό Matlab της MathWorks.

#### 3.3.1 Βαθμονόμηση αισθητήρων κάμψης

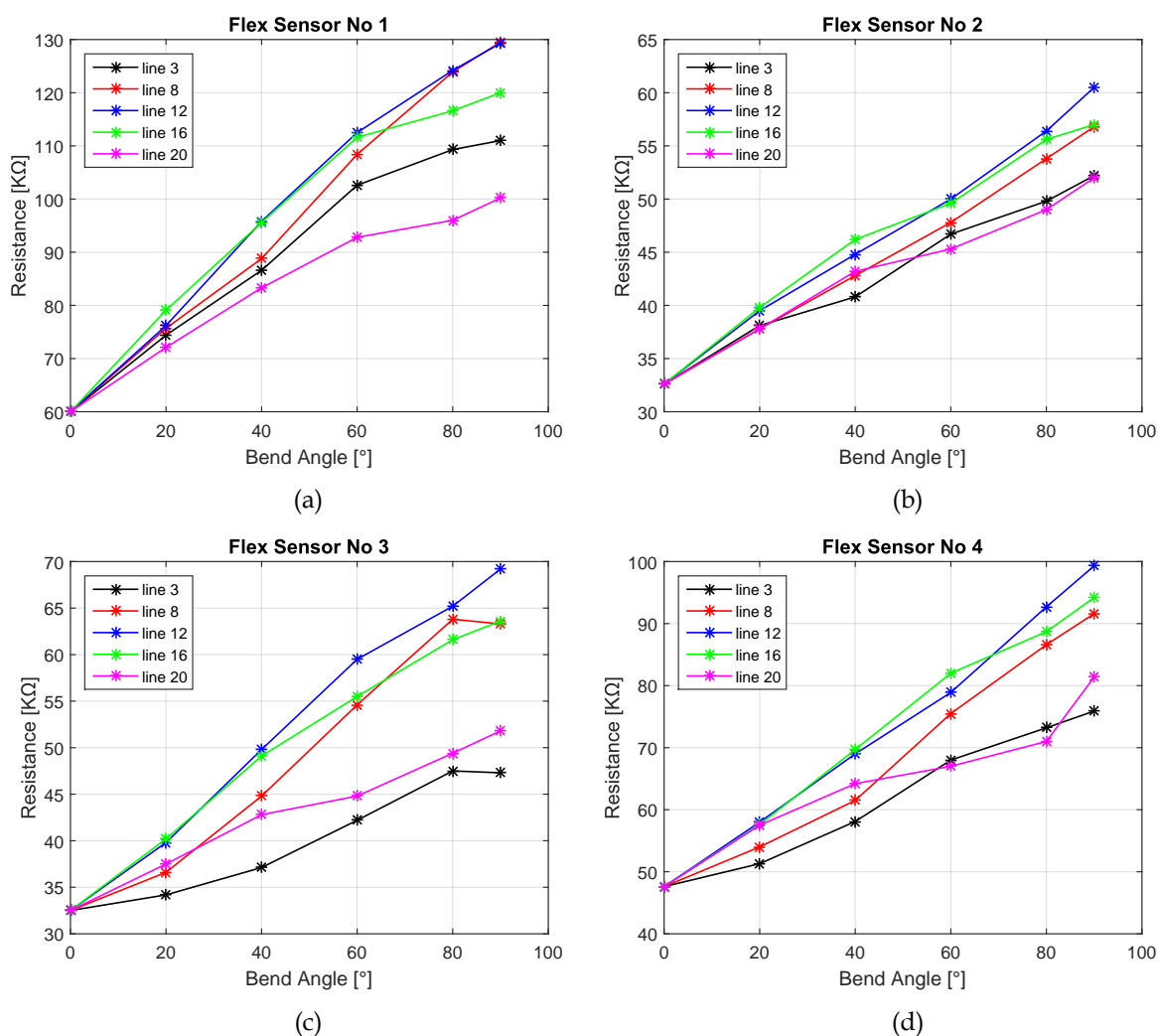
Οι αισθητήρες στην επάνω επιφάνειά τους διαθέτουν 22 χαρακτηριστικές γραμμές, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1a με βάση τις οποίες μπορεί να οριστεί και το σημείο τοποθέτησής τους. Η ωμική αντίστασή τους αυξάνεται καθώς κάμπτονται, ενώ ανάλογα με τη γραμμή στην οποία πραγματοποιείται η κάμψη η μεταβολή είναι διαφορετική. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η μέτρησή τους σε διαφορετικά σημεία τοποθέτησης (Σχήμα 3.4b), για διαφορετικές γωνίες, όπως επίσης και σε επίπεδη θέση. Η διαδικασία αυτή έγινε με τη χρήση πολυμέτρου και των ήδη κατασκευασμένων δοκιμίων (Σχήμα 3.4a), αφού πρώτα έγινε αρίθμηση των αισθητήρων. Οι γωνίες των δοκιμίων είναι  $20^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $80^\circ$  και  $90^\circ$ .

Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας για τους 4 πρώτους αισθητήρες στο Σχήμα 3.5, ενώ παρατίθενται και για τους υπόλοιπους στο Παράρτημα Β.1.



Σχήμα 3.4: (α) Δοκίμια βαθμονόμησης αισθητήρων κάμψης και (β) Διαφορετικές θέσεις τοποθέτησης.

Παρατηρώντας τα διαγράμματα μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η μεταβολή της αντίστασης, συναρτήσει της γωνίας  $\theta$ , είναι κατά προσέγγιση γραμμική όταν η κάμψη πραγματοποιείται περίπου στη μέση και πιο συγκεκριμένα στη γραμμή 12. Αν και μεμονωμένα κάποιοι αισθητήρες παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά και σε άλλες γραμμές, όπως π.χ. την 8, τελικά επιλέγεται η 12, καθώς η μεταβολή σε αυτό το σημείο είναι γραμμική για το σύνολο των αισθητήρων. Επιπρόσθετα, την ίδια συμπεριφορά παρουσιάζουν όλοι οι αισθητήρες και για τις



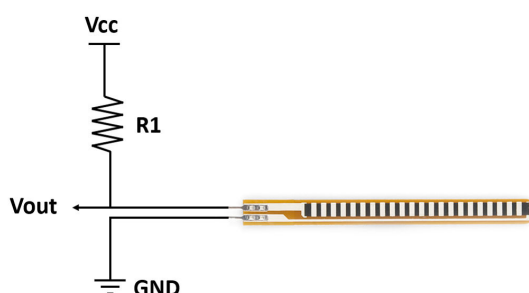
Σχήμα 3.5: Ενδεικτικά διαγράμματα μεταβολής της αντίστασης των αισθητήρων κάμψης 1 - 4 συναρτήσει της γωνίας κάμψης  $\theta$  και της γραμμής στην οποία πραγματοποιείται.

θέσεις 11 και 13, όπου οι τιμές των αντιστάσεων έχουν μικρή απόκλιση συγκριτικά με τη θέση 12.

Με αυτά τα δεδομένα, με κατάλληλη τοποθέτηση των αισθητήρων στο γάντι έτσι ώστε το μεσαίο τμήμα τους να βρίσκεται πάνω από τις αρθρώσεις του κάθε δαχτύλου, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια στην καταγραφή των κινήσεων. Επιπλέον, τυχόν μικρή μετακίνησή τους στο γάντι, ή ακόμα και χρησιμοποίηση του γαντιού από άλλο χρήστη με παρόμοια ανατομία χεριού δεν θα επηρεάσει σημαντικά τις μετρήσεις. Τέλος παρατηρείται μεγάλη απόκλιση της ωμικής αντίστασης των αισθητήρων, όταν αυτοί βρίσκονται σε επίπεδη θέση συγκριτικά με την τιμή που ορίζει ο κατασκευαστής και σε πολλές περιπτώσεις αστάθεια σε επαναλαμβανόμενες μετρήσεις.

### 3.3.2 Βασικό κύκλωμα μέτρησης αισθητήρα

Όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα, η μεταβολή της αντίστασης των αισθητήρων είναι συνάρτηση της γωνίας  $\theta$  που κάμπτονται. Για την καταγραφή αυτής της κίνησης θα πρέπει να μετρηθεί τάση, καθώς ο μικροελεγκτής (ATmega2560) του Arduino διαθέτει ένα 10bit AD μετατροπέα που, από προεπιλογή, μπορεί να μετρήσει εύρος τάσης 0 – 5 V (0 - 1023 στάθμες). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την υλοποίηση ενός κυκλώματος διαιρέτη τάσης (Σχήμα 3.6), του οποίου και έγινε η θεωρητική μελέτη για την εκτίμηση του εύρους τάσης εξόδου των αισθητήρων.



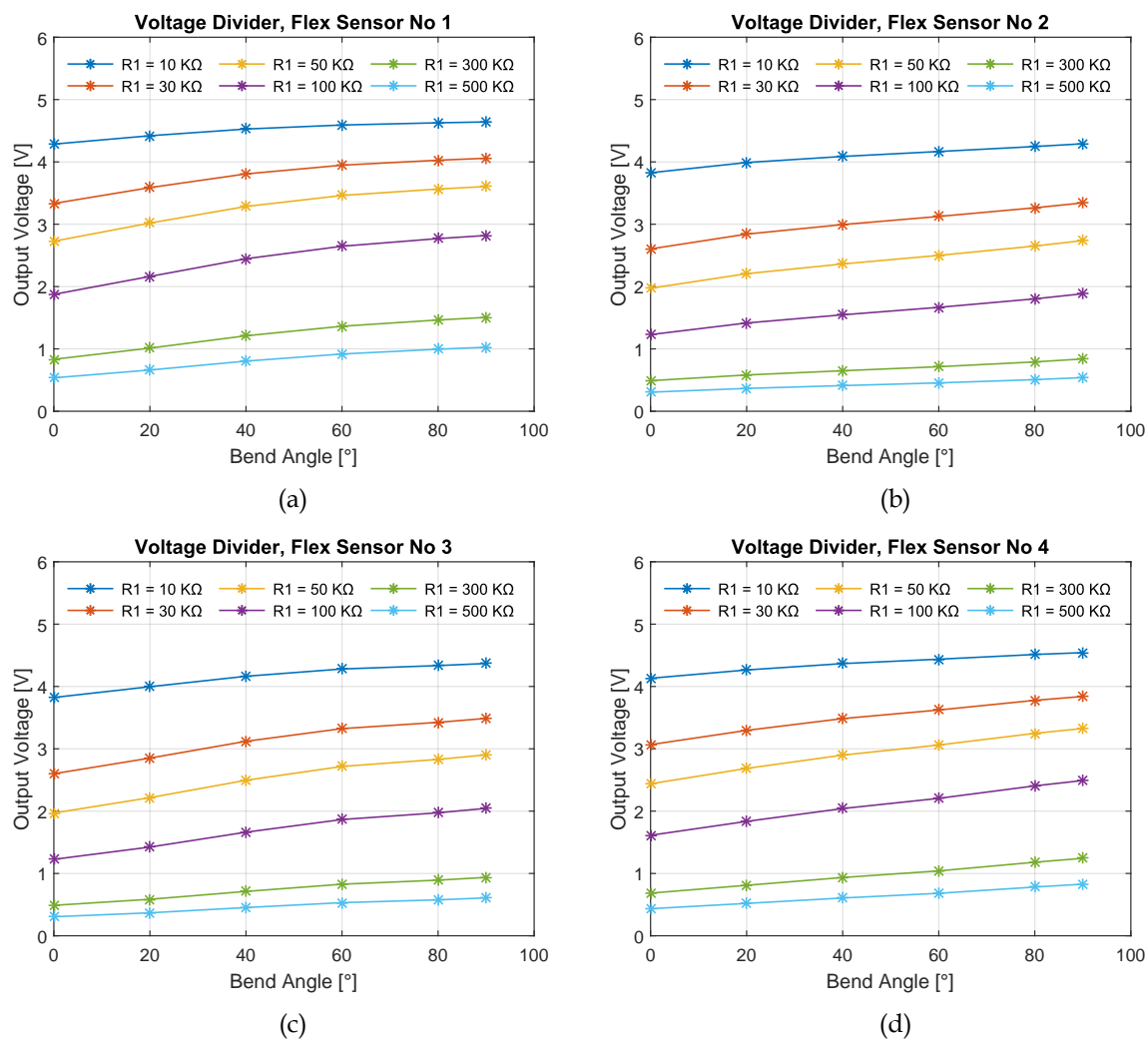
Σχήμα 3.6: Υλοποίηση κυκλώματος διαιρέτη τάσης

Η τάση εξόδου  $V_{out}$  δίνεται από τη σχέση:

$$V_{out} = \frac{R_{flex}}{R_1 + R_{flex}} V_{cc} \quad (3.1)$$

όπου  $V_{cc} = +5\text{ V}$  η τάση τροφοδοσίας και  $R_{flex}$  η μεταβλητή ωμική αντίσταση του αισθητήρα. Θεωρούμε ότι το σημείο κάμψης είναι στη γραμμή 12. Η αντίσταση  $R_1$  λαμβάνει τιμές από (10 – 500 K $\Omega$ ), ενώ η  $R_{flex}$  ανάλογα με τον αισθητήρα κυμαίνεται από 24 – 180 K $\Omega$ . Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα μεταβολής της τάσης εξόδου του κυκλώματος, συναρτήσει της γωνίας κάμψης για τους αισθητήρες 1 - 4, ενώ για τους υπόλοιπους παρατίθενται στο Παράρτημα Β.2.



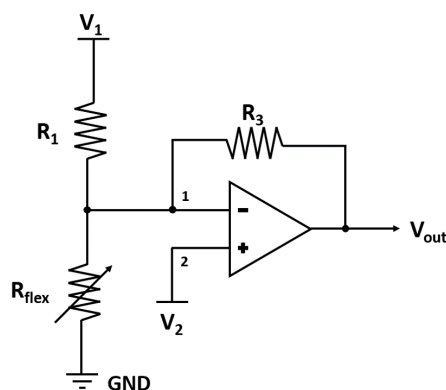


Σχήμα 3.7: Ενδεικτικά διαγράμματα μεταβολής της τάσης εξόδου κυκλώματος διαιρέτη τάσης για τους αισθητήρες κάμψης 1 - 4.

Αυτό που προκύπτει από τα διαγράμματα, είναι ότι το εύρος μεταβολής της τάσης εξόδου του κυκλώματος όταν ο αισθητήρας βρίσκεται σε επίπεδη θέση και όταν κάμπτεται στις 90°, είναι πάρα πολύ μικρό και ανάλογο με τον αισθητήρα κυμαίνεται, περίπου, από 0.65 V έως 1.18 V. Η μέτρηση των συγκεκριμένων τάσεων από τον ADC θα είναι με μειωμένη ακρίβεια, καθώς το εύρος του όπως προαναφέρθηκε, είναι 0 – 5 V. Για το λόγο αυτό, θα πρέπει να γίνει ενίσχυση του σήματος πριν αυτό οδηγηθεί στις αναλογικές εισόδους του μικροελεγκτή και αυτό μπορεί να γίνει με χρήση τελεστικού ενισχυτή και την υλοποίηση κυκλώματος ενίσχυσης.

### 3.3.3 Κύκλωμα ενίσχυσης σήματος αισθητήρα

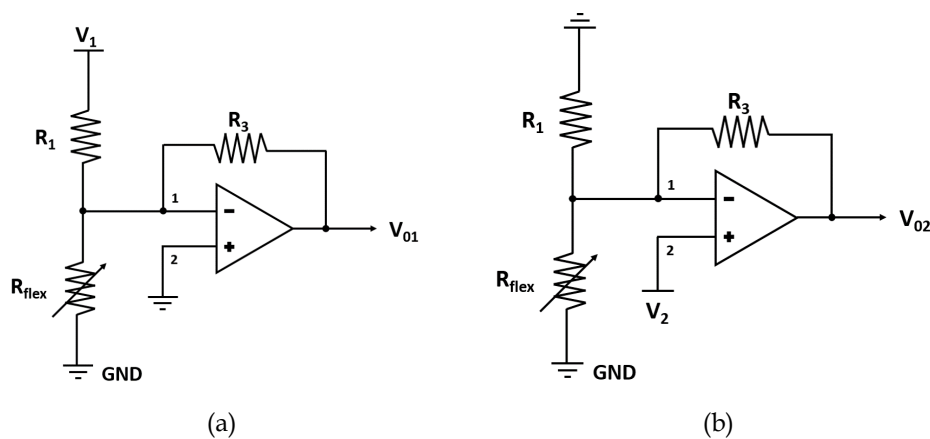
Για την ενίσχυση του σήματος εξόδου των αισθητήρων σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε κύκλωμα διαφορικού ενισχυτή (Σχήμα 3.8), στο οποίο με κατάλληλη επιλογή των αντιστάσεων  $R_1$  και  $R_3$ , η τάση εξόδου του κυκλώματος μπορεί να προσαρμοστεί στα όρια του ADC (0 – 5 V). Η λειτουργία του είναι η ενίσχυση της διαφοράς των δύο σημάτων εισόδου, απορρίπτοντας ταυτόχρονα οποιαδήποτε κοινά σήματα. Είσοδοι του τελεστικού ενισχυτή (TE) είναι ο αναστρέφων



Σχήμα 3.8: Κύκλωμα ενίσχυσης σήματος αισθητήρα.

ακροδέκτης (-) και ο μη αναστρέφων ακροδέκτης (+). Ο ΤΕ θεωρείται ιδανικός, δηλ. η σύνθετη αντίσταση εισόδου είναι άπειρη, έχει μηδενική αντίσταση εξόδου και άπειρο κέρδος ανοιχτού βρόχου. Με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά, προκύπτει ότι το ρεύμα που εισέρχεται στους ακροδέκτες 1 και 2 είναι μηδέν και η διαφορική τάση είναι μηδέν,  $V_d = V_p - V_n = 0 \Rightarrow V_p = V_n$ , όπου  $V_p$  και  $V_n$ , οι τάσεις στο θετικό και αρνητικό ακροδέκτη του ΤΕ αντίστοιχα.

Πιο συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε τάση  $V_1 = 5\text{ V}$  και τάση  $V_2 = 2.5\text{ V}$ . Για τον υπολογισμό της τάσης εξόδου  $V_{out}$  εφαρμόστηκε η αρχή της υπέρθεσης, επομένως έπρεπε να αντιμετωπιστούν δύο διαφορετικά κυκλώματα. Στην πρώτη περίπτωση μηδενίζεται η τάση  $V_2$  (Σχήμα 3.9a), ενώ στη δεύτερη περίπτωση μηδενίζεται η τάση  $V_1$  (Σχήμα 3.9b).



Σχήμα 3.9: (a) Αναστρέφων ενισχυτής και (b) Μη αναστρέφων ενισχυτής.

Στην αναστρέφουσα συνδεσμολογία η τάση εξόδου  $V_{01}$  δίνεται από τη σχέση:

$$V_{01} = -\frac{R_3}{R_1} V_1 \quad (3.2)$$

με το κέρδος να είναι  $-R_3/R_1$ . Στη μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία οι αντιστάσεις  $R_1$ ,  $R_{flex}$

είναι συνδεδεμένες παράλληλα με την τάση εξόδου  $V_{02}$  να δίνεται από τη σχέση:

$$V_{02} = \left( 1 + \frac{R_3(R_1 + R_{flex})}{R_1 R_{flex}} \right) V_2 \quad (3.3)$$

με κέρδος  $1 + R_3(R_1 + R_{flex})/R_1 R_{flex}$ . Συνεπώς η τάση εξόδου  $V_{out}$  μπορεί να γραφεί σαν άθροισμα των δύο εξόδων που προκαλούνται από τις δύο πηγές:

$$V_{out} = V_{01} + V_{02} = V_2 \left( \frac{R_3}{R_{flex}} + \frac{R_3}{R_1} + 1 \right) - \frac{R_3}{R_1} V_1 \quad (3.4)$$

Η μέγιστη τιμή τάσης θα εμφανίζεται όταν ο αισθητήρας βρίσκεται σε επίπεδη θέση, ενώ η ελάχιστη όταν κάμπτεται σε γωνία  $90^\circ$ , με τιμές αντίστασης  $R_{flex\_min}$  και  $R_{flex\_max}$  αντίστοιχα. Οι τάσεις τροφοδοσίας ορίστηκαν  $V_1 = +5\text{ V}$  και  $V_2 = +2.5\text{ V}$ .

Με αυτά τα δεδομένα, αντικαθιστώντας στην Σχέση (3.4), υπολογίστηκαν οι τιμές των αντιστάσεων  $R_1$  και  $R_3$ :

$$0 = V_2 \left( \frac{R_3}{R_{flex\_max}} + \frac{R_3}{R_1} + 1 \right) - \frac{R_3}{R_1} V_1 \quad (3.5)$$

$$5 = V_2 \left( \frac{R_3}{R_{flex\_min}} + \frac{R_3}{R_1} + 1 \right) - \frac{R_3}{R_1} V_1 \quad (3.6)$$

Αφαιρώντας τη Σχέση (3.5) από την (3.6) προκύπτει η τιμή της αντίστασης  $R_3$ :

$$R_3 = 2 \frac{R_{flex\_max} R_{flex\_min}}{R_{flex\_max} - R_{flex\_min}} \quad (3.7)$$

Η αντίσταση  $R_1$  υπολογίζεται αντικαθιστώντας την τιμή της  $R_3$  στην Σχέση 3.5:

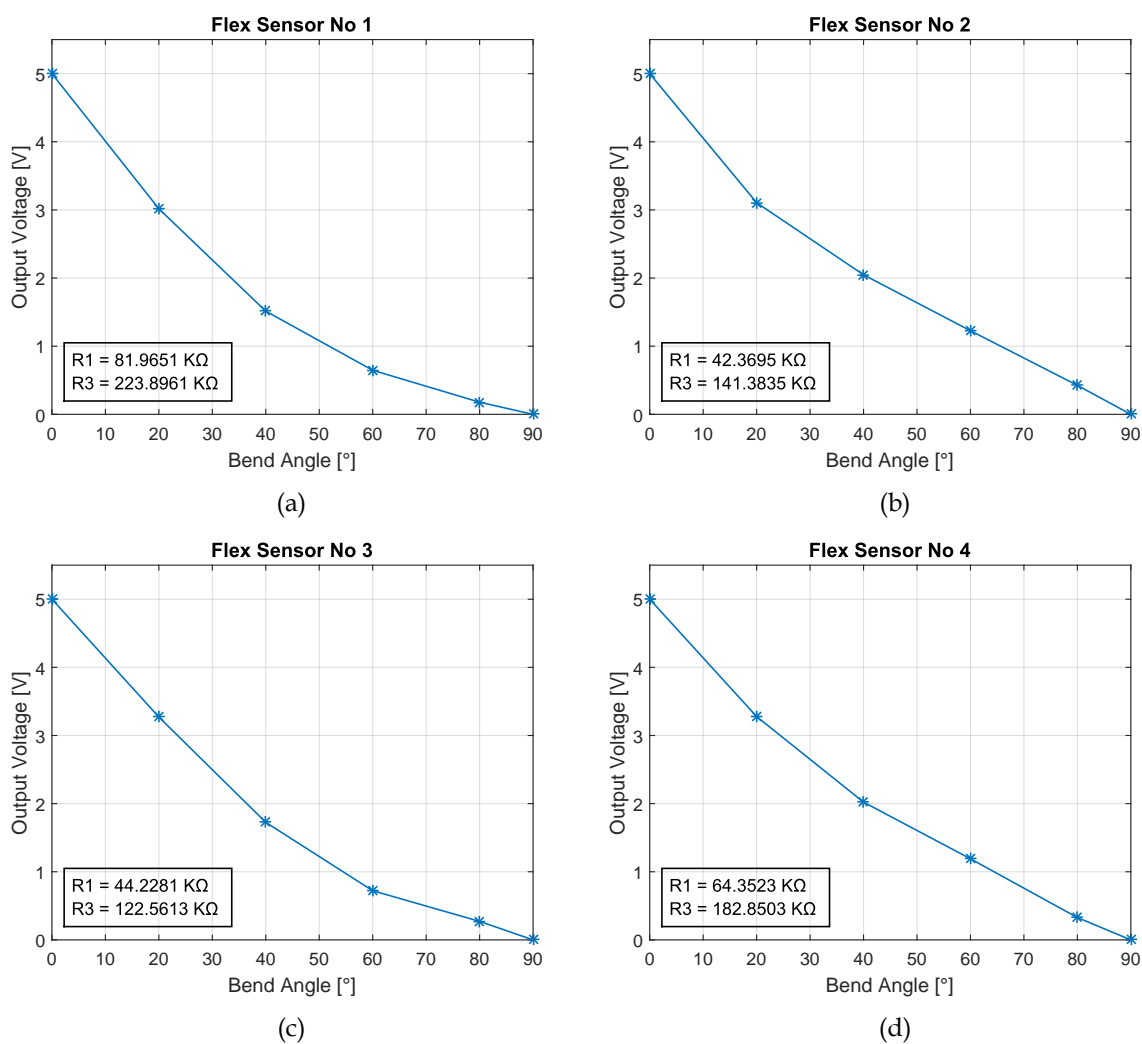
$$R_1 = \frac{R_3 R_{flex\_max}}{R_3 + R_{flex\_max}} \quad (3.8)$$

Οι παραπάνω σχέσεις εφαρμόστηκαν για το σύνολο των αισθητήρων και την εύρεση των  $R_1$  και  $R_3$ , που αντιστοιχούν σε κάθε περίπτωση. Οι τιμές τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1, όπως και το εύρος αντίστασης των αισθητήρων. Στη συνέχεια και με γνωστά όλα τα στοιχεία του κυκλώματος από τη Σχέση (3.4), υπολογίζεται η μεταβολή της τάσης εξόδου κάθε αισθητήρα. Στο Σχήμα 3.10 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα για τους 4 πρώτους, ενώ για τους υπόλοιπους παρατίθενται στο Παράρτημα Β.3. Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα, η μεταβολή της τάσης κυμαίνεται μεταξύ 0 και 5V, ανάλογα με την γωνία κάμψης.

**Συμπερασματικά, με βάση το κύκλωμα του Σχήματος 3.9 και τις Σχέσεις (3.7), (3.8) είναι εφικτή η προσαρμογή του σήματος οποιουδήποτε αισθητήρα κάμψης, λαμβάνοντας υπόψη το εύρος μεταβολής της αντίστασής του, στο εύρος του ADC.**

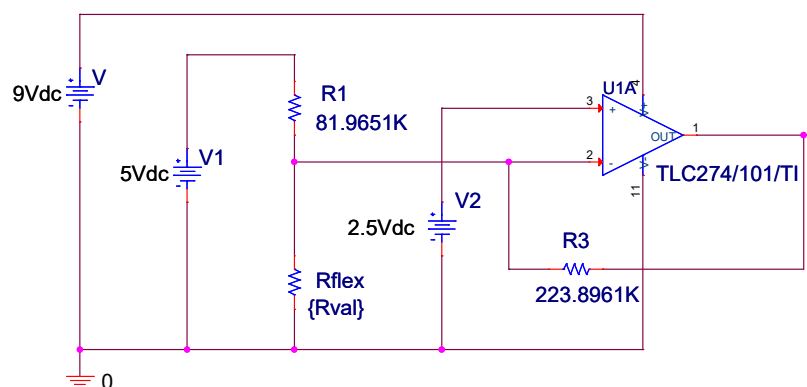
Flex sensor No	$R_{flex}$ (ΚΩ)	$R_1$ (ΚΩ)	$R_3$ (ΚΩ)
1	60.0 – 129.3	81.9651	223.8961
2	32.6 – 60.5	42.3695	141.3835
3	32.5 – 69.2	44.2281	122.5613
4	47.6 – 99.3	64.3523	182.8503
5	41.0 – 105.0	58.9726	134.5313
6	48.2 – 89.2	62.5828	209.7288
7	70.0 – 120.8	88.6373	332.9134
8	35.3 – 59.3	44.2556	174.4408
9	55.5 – 102.5	72.0095	242.0745
10	56.2 – 116.5	75.8228	217.1575
11	24.5 – 44.4	31.5762	109.3266
12	35.5 – 72.0	47.5535	140.0548
13	26.0 – 62.0	36.6364	89.5556
14	71.0 – 184.8	102.5864	230.594
15	57.7 – 106.6	74.873	251.5673
16	24.4 – 42.8	31.081	113.513

Πίνακας 3.1: Θεωρητικές τιμές αντιστάσεων  $R_1$ ,  $R_3$  για την προσαρμογή της τάσης εξόδου από 0 – 5 V.

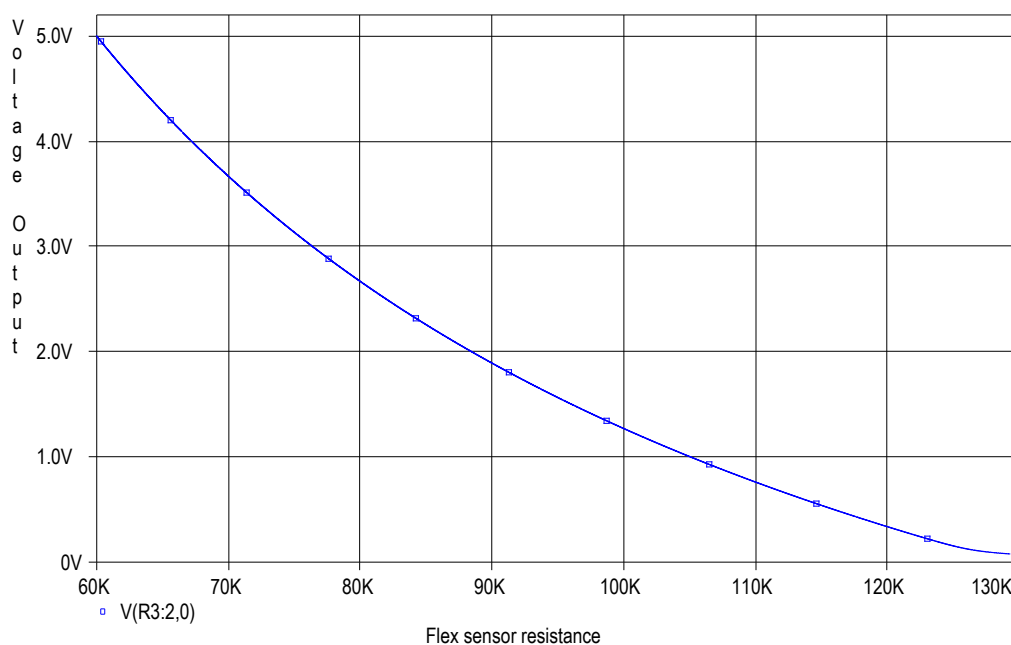


Σχήμα 3.10: Ενδεικτικά διαγράμματα μεταβολής της τάσης εξόδου των αισθητήρων κάμψης 1 - 4, μετά από την ενίσχυση του σήματος.

Για την επαλήθευση της ορθότητας των παραπάνω υπολογισμών, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό OrCAD Capture για τη σχεδίαση και το OrCAD PSpice για την προσομοίωση του κυκλώματος ενίσχυσης. Στο Σχήμα 3.11 παρουσιάζεται ενδεικτικά το σχηματικό διάγραμμα για τον αισθητήρα κάμψης No1, με τα επιμέρους στοιχεία του κυκλώματος να λαμβάνουν τις τιμές που υπολογίστηκαν θεωρητικά. Στη μεταβλητή  $R_{val}$  καταχωρείται το εύρος μεταβολής της αντίστασης, που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι 60.0 – 129.3 KΩ. Ο ΤΕ που επιλέχθηκε είναι ο TLC274CN, με την τάση λειτουργίας του  $V = +9\text{ V}$ , έτσι ώστε να μπορεί να αποδώσει στην έξοδο τη μέγιστη επιθυμητή τιμή (5 V), αλλά και να αποφευχθεί τυχόν πώση τάσης κατά τη λειτουργία και των υπόλοιπων αισθητήρων. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης (Σχήμα 3.12) απεικονίζει την τάση εξόδου, συναρτήσει της μεταβολής της αντίστασης του αισθητήρα.



Σχήμα 3.11: Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος στο OrCad Capture.



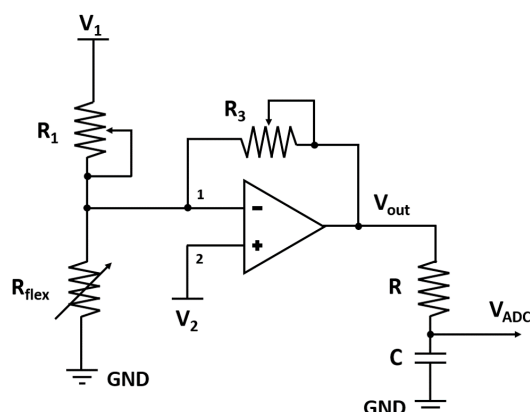
Σχήμα 3.12: Αποτέλεσμα προσομοίωσης στο OrCad PSpice.

Από το διάγραμμα (Σχήμα 3.12) προκύπτει ότι η τάση εξόδου του κυκλώματος λαμβάνει τις επιθυμητές τιμές και κυμαίνεται μεταξύ 0.1 – 5 V. Η διαφορά των 100 mV είναι πολύ μικρή για να θεωρηθεί ότι αποκλίνει των θεωρητικών τιμών. Επιπρόσθετα παρατηρείται ποιοτική και

ποσοτική προσέγγιση της καμπύλης της προσομοίωσης με το διάγραμμα του Σχήματος 3.10a, επομένως επιβεβαιώνονται οι θεωρητικοί υπολογισμοί και η λειτουργικότητα του κυκλώματος. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τους υπόλοιπους αισθητήρες με ανάλογα αποτελέσματα.

### 3.3.4 Βαθμονόμηση τάσης εισόδου στο μικροελεγκτή

Για τη διευκόλυνση της διασύνδεσης των σημάτων των αισθητήρων με τις αναλογικές εισόδους του μικροελεγκτή κατασκευάστηκαν βοηθητικές πλακέτες επέκτασης, οι οποίες περιγράφονται στην υποενότητα 3.3.5. Λόγω του ότι δεν υπάρχει κάποιο ηλεκτρονικό στοιχείο που μπορεί να δώσει με ακρίβεια τις τιμές των αντιστάσεων που υπολογίστηκαν θεωρητικά, έγινε στρωγγυλοποίηση και χρησιμοποιήθηκαν πολύστροφα ποτενσιόμετρα σε σύνδεση ροοστάτη, δηλαδή η μεσαία λήψη γεφυρωμένη με έναν από τους άλλους δύο ακροδέκτες. Η επιλογή ποτενσιόμετρων παρέχει ευελιξία για μικρορυθμίσεις κατά την τοποθέτησή των αισθητήρων στο γάντι, αλλά και σε περίπτωση αλλαγής της συμπεριφοράς τους, λόγω χρήσης. Το μειονέκτημα τους είναι η εισαγωγή θορύβου στο σύστημα, για την αντιμετώπιση του οποίου σχεδιάστηκε χαμηλοπερατό φίλτρο RC. Το τελικό σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.13: Τελικό κύκλωμα ενίσχυσης σήματος αισθητήρα.

Για τον υπολογισμό της συχνότητας του φίλτρου αρχικά εξάγεται η συνάρτηση μεταφοράς η οποία είναι:

$$G(s) = \frac{V_{ADC}}{V_{out}} = \frac{1}{RCs + 1} \quad (3.9)$$

με τη σταθερά χρόνου του φίλτρου, να ισούται με  $\tau = RC$ , επομένως η συχνότητα καμψής θα ισούται με:

$$\omega_{cf} = \frac{1}{\tau} \quad (3.10)$$

ενώ για τη μετατροπή της από rad/sec σε Hz ισχύει:

$$f_c = \frac{\omega_c f}{2\pi} \quad (3.11)$$

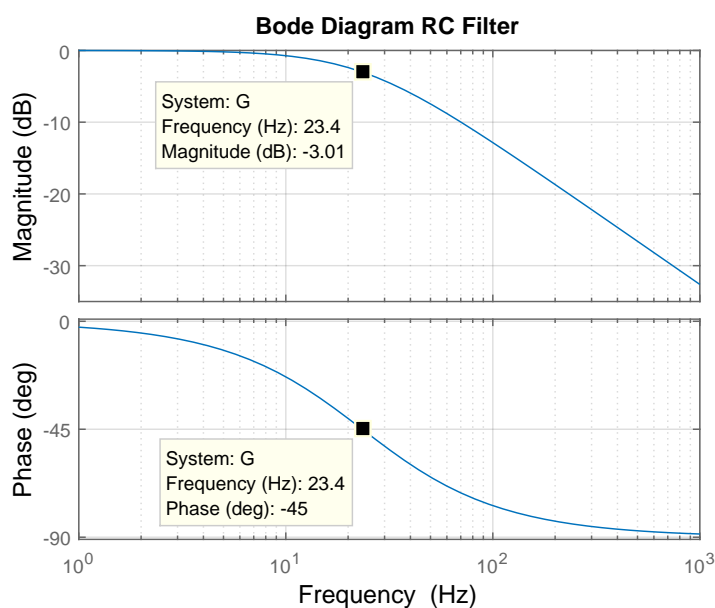
Αντικαθιστώντας τη Σχέση (3.10), στη (3.11) υπολογίζεται η συχνότητα του φίλτρου η οποία θα ισούται με:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.12)$$

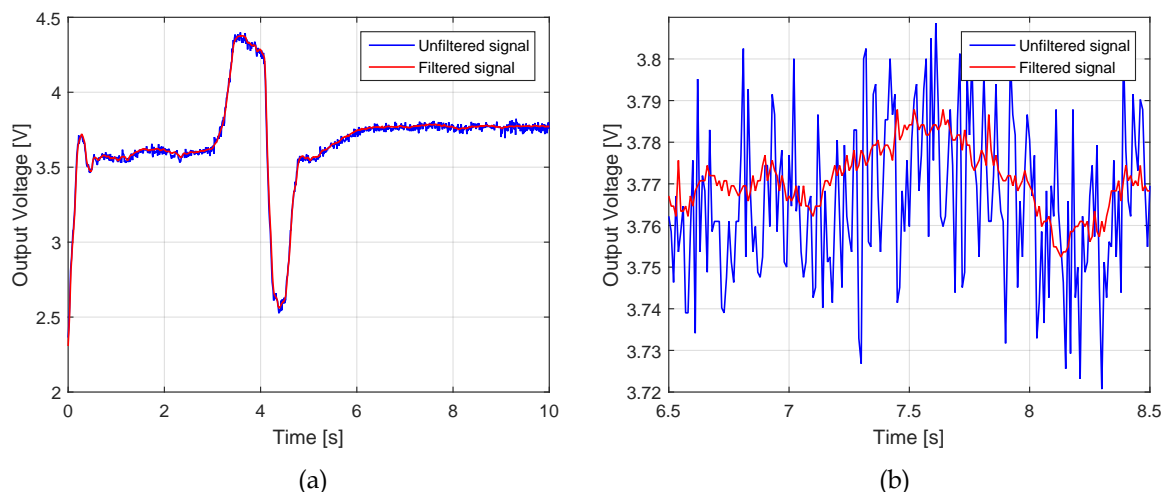
Με δεδομένο το ρυθμό δειγματοληψίας του συστήματος  $T = 10$  ms, υλοποιήθηκε κατάλληλο αναλογικό χαμηλοπερατό φίλτρο  $RC$  με σκοπό την αποκοπή συγκεκριμένων συχνοτήτων. Σύμφωνα με τον ακόλουθο προσεγγιστικό κανόνα, για την σταθερά χρόνου  $\tau$  του φίλτρου ισχύει:

$$T \leq \frac{\tau}{4} \quad (3.13)$$

το οποίο υποδηλώνει ότι η συχνότητα του φίλτρου θα πρέπει να είναι τουλάχιστον τέσσερις φορές μικρότερη της συχνότητας δειγματοληψίας του συστήματος. Με βάση αυτή την προσέγγιση, επιλέχθηκαν κατάλληλες τιμές αντίστασης,  $R = 68$  K $\Omega$  και πυκνωτή,  $C = 100$  nF, με επιθυμητή συχνότητα αποκοπής ίση με  $f_c = 23.4$  Hz και συνεπώς η σταθερά χρόνου του φίλτρου να ισούται με  $\tau = 6.8$  ms. Από το διάγραμμα Bode (Σχήμα 3.14), παρατηρείται ότι για  $f_c < 23.4$  Hz, το πλάτος του σήματος παραμένει αμετάβλητο, ενώ για  $f_c > 23.4$  Hz εξασθενείται με ρυθμό 10 dB ανά δεκαπλασιασμό της συχνότητας. Επιπρόσθετα η μέγιστη καθυστέρηση που



Σχήμα 3.14: Διάγραμμα Bode του RC φίλτρου.



Σχήμα 3.15: Συγκριτικά αποτελέσματα σήματος αισθητήρα κάμψης, πριν και μετά την εφαρμογή χαμηλοπερατού φίλτρου (a) Για χρονικό διάστημα 10 s και (b) Μεγεθυμένη όψη για το χρονικό διάστημα από 6.5 – 8.5 s.

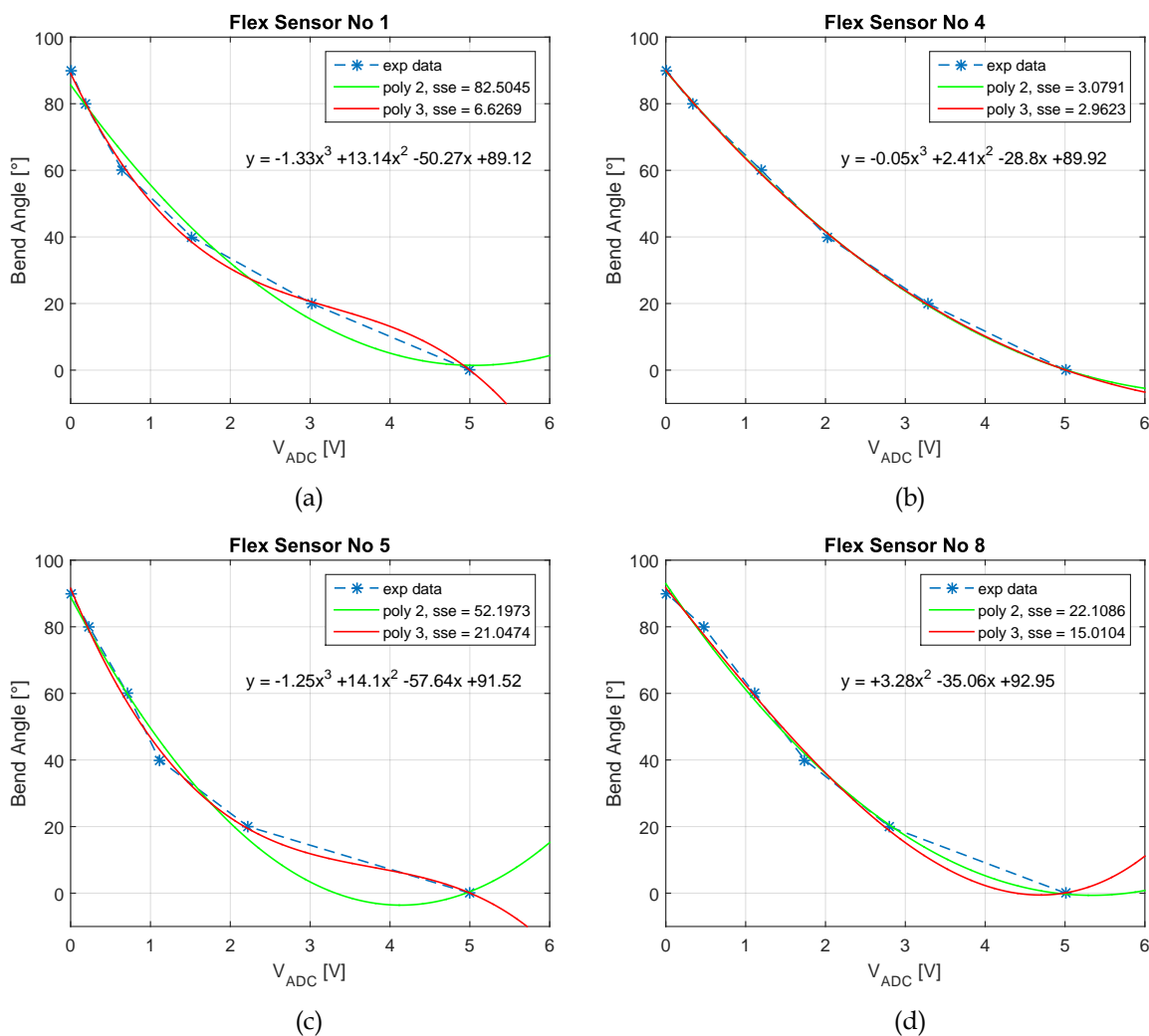
εισάγει το φίλτρο στο σήμα, τείνει ασυμπτωτικά στις  $90^\circ$  (για πολύ μεγάλες συχνότητες), χαρακτηριστικό που δεν επηρεάζει την απόκριση του συστήματος. Στο Σχήμα 3.15a παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα του σήματος πριν και μετά την εφαρμογή του χαμηλοπερατού φίλτρου.

Μέχρι τώρα έχει υπολογιστεί μια σχέση που συνδέει την τάση εξόδου του κυκλώματος ενίσχυσης με τη γωνία κάμψης  $\theta$  των αισθητήρων, η οποία όπως προέκυψε από τους παραπάνω υπολογισμούς δεν είναι γραμμική. Η τάση αυτή οδηγείται στις αναλογικές εισόδους του μικροελεγκτή, επομένως για την καταγραφή των γωνιών των αρθρώσεων με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια θα πρέπει να εξαχθεί μία εξίσωση που να συνδέει αυτά τα δύο μεγέθη. Έτσι δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα που απεικονίζουν την τάση εισόδου με τη γωνία κάμψης  $\theta$ . Προστέθηκαν επίσης οι καμπύλες, πράσινη και κόκκινη γραμμή, που περιγράφονται από πολυώνυμα 2ου και 3ου βαθμού αντίστοιχα ώστε να διαπιστωθεί ποιο από τα δύο προσεγγίζει καλύτερα τα πειραματικά δεδομένα, όπως αυτά καταγράφηκαν κατά τη βαθμονόμηση και ενίσχυση του σήματος των αισθητήρων, με βασικό κριτήριο το σφάλμα ελαχίστων τετραγώνων. Στο Σχήμα 3.16 παρουσιάζονται τέσσερις ενδεικτικές περιπτώσεις αισθητήρων, ενώ για τους υπόλοιπους παρατίθενται στο Παράρτημα Β.4.

Σε όλες τις περιπτώσεις το σφάλμα ελαχίστων τετραγώνων είναι μικρότερο για το πολυώνυμο 3ου βαθμού, κάτι που ήταν και αναμενόμενο. Για τους αισθητήρες 1 και 5 (Σχήμα 3.16a, c) διακρίνονται οι διαφορές μεταξύ των δύο προσεγγίσεων, με χαρακτηριστική περίπτωση αυτή του δεύτερου αισθητήρα όπου η καμπύλη του πολυώνυμου 2ου βαθμού περνάει σε αρνητικό πρόσημο στον κάθετο άξονα για τιμές τάσης μεγαλύτερες από 3.3 V. Τα δεδομένα για τον αισθητήρα κάμψης Νο4 (Σχήμα 3.16b) προσεγγίζονται εξίσου καλά και από τα δύο πολυώνυμα, κάτι που φαίνεται και οπτικά, με το σφάλμα ελαχίστων τετραγώνων να διαφέρει ελάχιστα.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση του αισθητήρα κάμψης Νο8 (Σχήμα 3.16d). Επιλέγεται

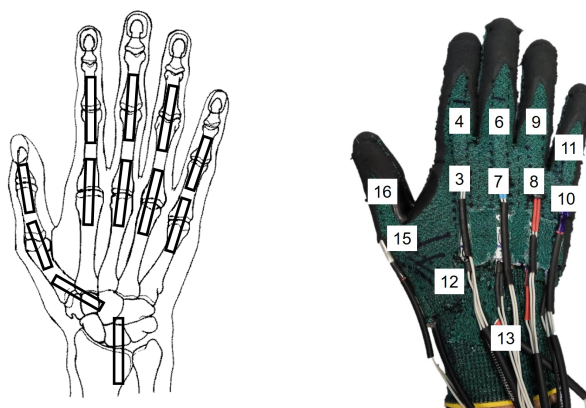




Σχήμα 3.16: Προσεγγιστικές καμπύλες αισθητήρων κάμψης 1, 4, 5, 8.

η προσέγγιση με το πολυώνυμο 2ου βαθμού, αν και το σφάλμα ελαχίστων τετραγώνων είναι μεγαλύτερο. Το γεγονός ότι η καμπύλη 3ου βαθμού μεταβαίνει σε αρνητικό πρόσημο στον κάθετο άξονα για τιμές τάσης από περίπου 4.4 έως 4.8 V, θα οδηγούσε σε λάθος καταγραφή των γωνιών.

Από τους 16 διαθέσιμους αισθητήρες κάμψης χρησιμοποιήθηκαν 12. Τοποθετήθηκαν από δύο στο δείκτη (No 3, 4), το μέσο (No 7, 6), τον παράμεσο (No 8, 9) και το μικρό (No 10, 11), τρεις στον αντίχειρα (No 12, 15, 16) και ένας αισθητήρας στον καρπό (No 13), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.17. Για τα τέσσερα πρώτα δάχτυλα καταγράφεται η κίνηση της MCP και PIP άρθρωσης, ενώ στον αντίχειρα καταγράφεται η κίνηση των αρθρώσεων MCP, IP και CMC που εκτελεί την κίνηση της απαγωγής/προσαγωγής, με την τελευταία να παρουσιάζει δυσκολίες ως προς τη σωστή καταγραφή των γωνιών, λόγω των περιορισμένων επιλογών ως προς την τοποθέτηση του αισθητήρα. Η γωνία της DIP άρθρωσης για τα τέσσερα πρώτα δάχτυλα και η CMC για την κάμψη/έκταση του αντίχειρα υπολογίζονται με βάση τις Σχέσεις (2.19) και (2.22) αντίστοιχα, που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 2.4 για τους περιορισμούς των αρθρώσεων.



Σχήμα 3.17: Τελική τοποθέτηση αισθητήρων κάμψης.

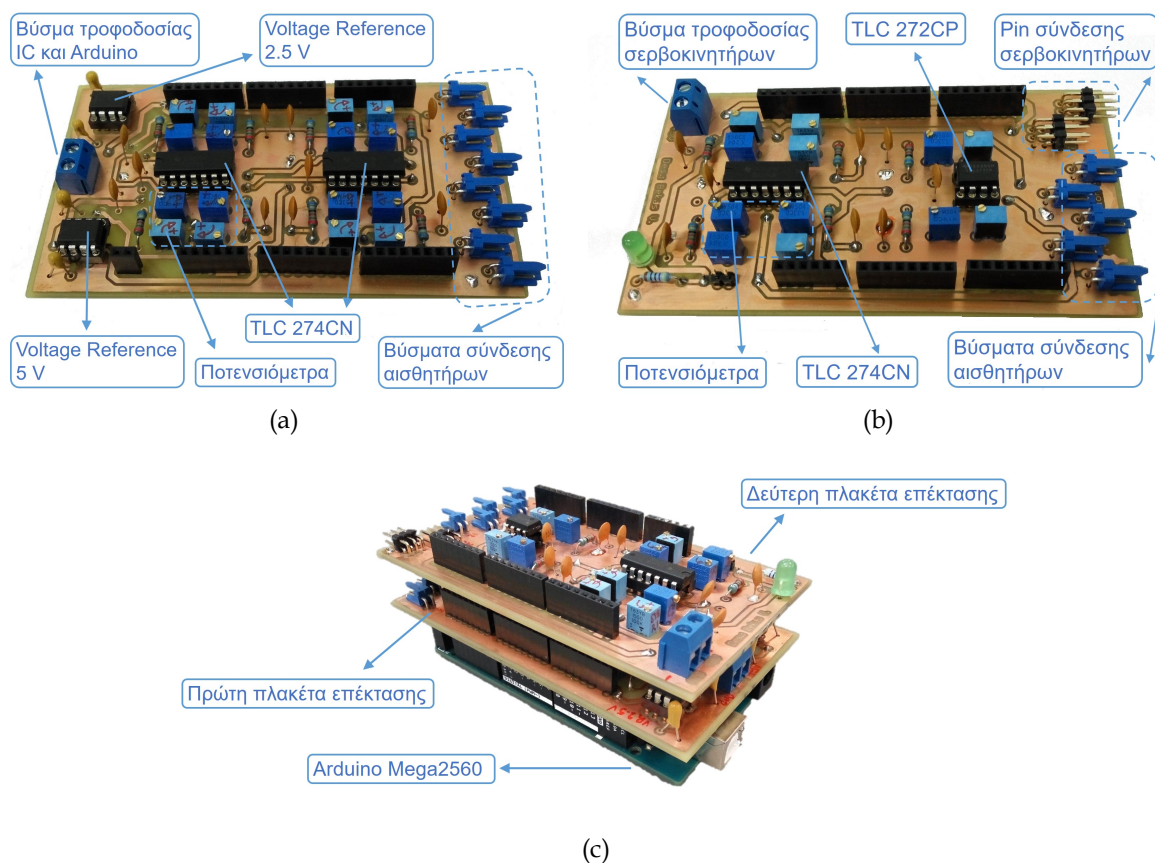
### 3.3.5 Βοηθητικές πλακέτες επέκτασης

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται οι βοηθητικές πλακέτες επέκτασης που κατασκευάστηκαν για την υλοποίηση του κυκλώματος ενίσχυσης του σήματος των αισθητήρων κάμψης και την οδήγηση των σερβοκινητήρων του εξωσκελετικού επιπρόσθετου ρομποτικού δαχτύλου. Στόχος της σχεδίασης, η οποία έγινε στο λογισμικό Eagle, ήταν οι πλακέτες να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες, έτσι ώστε το σύστημα να είναι φορητό και να μπορεί να τοποθετηθεί με ευκολία στο χέρι του χρήστη. Συνολικά κατασκευάστηκαν δύο πλακέτες επέκτασης οι οποίες συνδέονται απευθείας μέσω ακιδοσειρών στους ακροδέκτες του Arduino Mega2560 (Σχήμα 3.18c). Τα αναλυτικά σχέδια παρουσιάζονται στο Παράρτημα C.

Η λειτουργία της πρώτης πλακέτας επέκτασης (Σχήμα 3.18a) είναι η ενίσχυση σήματος των 8 από τους 13 αισθητήρες κάμψης και τροφοδοτείται από εξωτερική πηγή με 9 V *dc*. Η υλοποίηση γίνεται με τη χρήση δύο ολοκληρωμένων κυκλωμάτων TLC274CN (Σχήμα 3.19b), που ενσωματώνουν τέσσερις τελεστικούς ενισχυτές το καθένα, με τάση λειτουργίας 9 V που παρέχεται από την κεντρική γραμμή. Για την αντιμετώπιση πτώσεων τάσης συνδέθηκε στο κάθε ολοκληρωμένο μεταξύ των ακροδεκτών  $V_{DD}$  και GND κεραμικός πυκνωτής 100 nF. Οι αισθητήρες συνδέονται μέσω των μπλε βυσμάτων στη δεξιά πλευρά της πλακέτας. Η επιλογή των ποτενσιομέτρων έγινε ανάλογα με την τιμή της αντίστασης που έπρεπε να ρυθμιστεί για κάθε αισθητήρα. Έτσι χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικοί τύποι, εύρους αντίστασης 100, 200 και 500 KΩ.

Για την παροχή των τάσεων ( $V_1 = 5\text{ V}$ ,  $V_2 = 2.5\text{ V}$ ) του κυκλώματος ενίσχυσης χρησιμοποιήθηκαν οι πηγές τάσης αναφοράς (Voltage Reference) MAX6350 και MAX6325 αντίστοιχα (Σχήμα 3.19a). Παράγουν σταθεροποιημένη τάση εξόδου με μειωμένο θόρυβο και τροφοδοτούνται επίσης από την κεντρική γραμμή με 9 V. Μεταξύ των ακροδεκτών εισόδου - γείωσης και εξόδου - γείωσης συνδέθηκαν πυκνωτές τανταλίου 2.2  $\mu\text{F}$ , με βάση και το τεχνικό εγχειρίδιο του κατασκευαστή.

Επιπλέον από την κεντρική τάση της πλακέτας και μέσω του ακροδέκτη  $V_{in}$  τροφοδοτείται και ο Arduino Mega2560. Μία από τις επιλογές που δίνει ο μικροελεγκτής, είναι ως προς την τάση

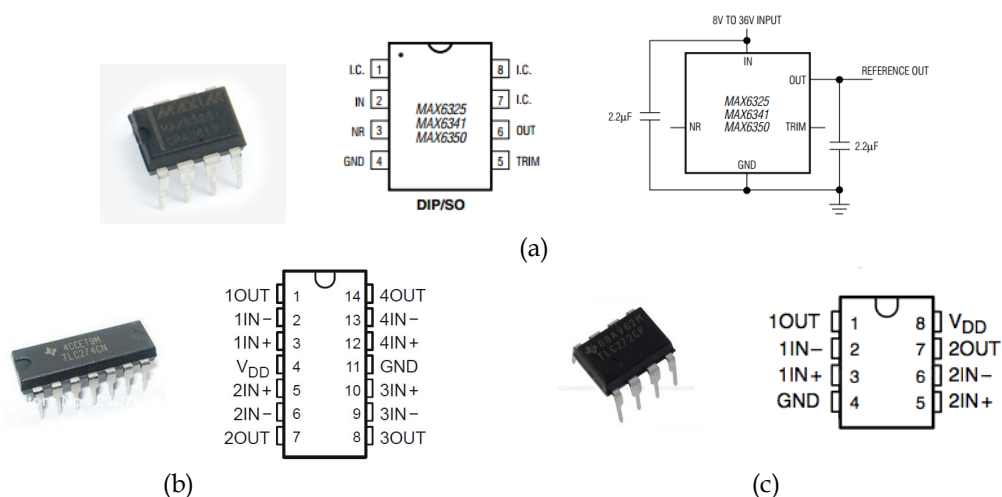


Σχήμα 3.18: Βοηθητικές πλακέτες επέκτασης (α) Πρώτη πλακέτα επέκτασης, (β) Δεύτερη πλακέτα επέκτασης, (c) Οι πλακέτες επέκτασης προσαρμοσμένες στον Arduino Mega 2560.

αναφοράς που χρησιμοποιεί ο ADC και την προέλευσή της. Επιλέχθηκε να δίνεται εξωτερικά από την σταθεροποιημένη τάση,  $V_1 = 5\text{ V}$ , που παράγει το ολοκληρωμένο MAX6350 μέσω του ακροδέκτη *AREF*, λόγω της μεγαλύτερης ακρίβειας συγκριτικά με την τάση των 5 V που παρέχει το κύκλωμα του Arduino Mega 2560. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι θα πρέπει να δηλωθεί αντίστοιχα και στο πρόγραμμα ελέγχου πριν την ανάγνωση των αναλογικών καναλιών, με την εντολή `analogReference(EXTERNAL)`, σε διαφορετική περίπτωση υπάρχει κίνδυνος καταστροφής του μικροελεγκτή.

Η δεύτερη πλακέτα επέκτασης (Σχήμα 3.18b) πραγματοποιεί την ενίσχυση σήματος των υπόλοιπων 5 αισθητήρων, ενώ συνδέονται και οι τέσσερις σερβοκινητήρες μέσω ακιδοσειρών με τους αντίστοιχους ακροδέκτες του μικροελεγκτή για την αποστολή των σημάτων PWM. Τα ολοκληρωμένα που χρησιμοποιούνται είναι το TLC274CN και το TLC272CP (Σχήμα 3.18c). Οι απαιτούμενες τάσεις (9, 5 και 2.5 V) μεταφέρονται μέσω των ακροδεκτών της πρώτης πλακέτας. Η τροφοδοσία των σερβοκινητήρων πραγματοποιείται από εξωτερική πηγή με 5 V και είναι ανεξάρτητη από τα υπόλοιπα στοιχεία του κυκλώματος.

Μεγάλο πλεονέκτημα στη σχεδίαση και υλοποίηση του συγκεκριμένου κυκλώματος, είναι η δυνατότητα μέτρησης της αντίστασης των ποτενσιομέτρων χωρίς να χρειάζεται να αφαιρεθούν από την πλακέτα, με την προϋπόθεση ότι το κύκλωμα δεν βρίσκεται υπό τάση και έχουν αποσυνδεθεί οι αισθητήρες κάμψης. Έτσι είναι δυνατή η πραγματοποίηση μικρορυθμίσεων όπου



Σχήμα 3.19: Ολοκληρωμένα κυκλώματα (a)MAX6325/MAX6350, (b)TLC274CN και (c)TLC272CP.

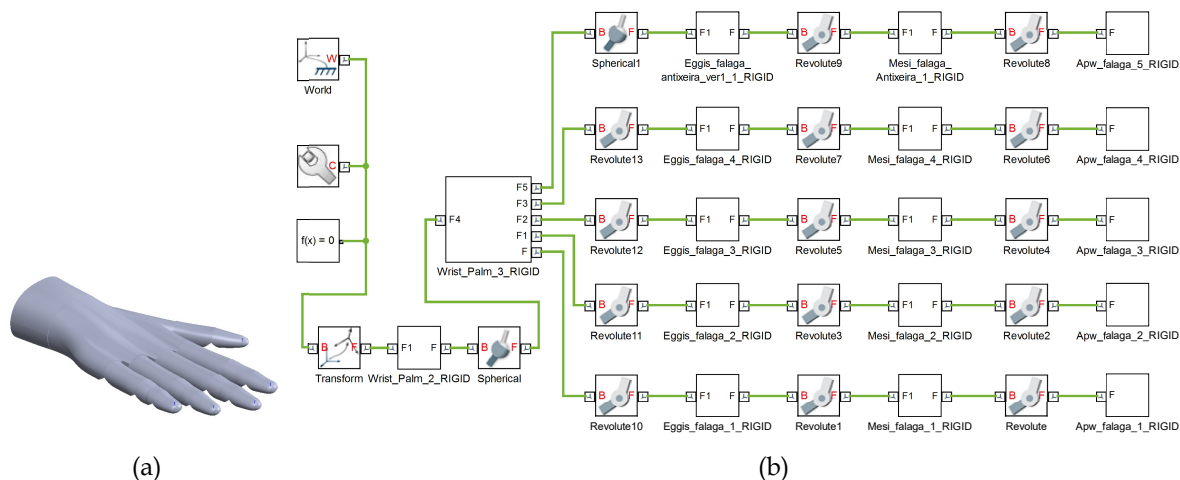
είναι απαραίτητο ή ακόμα και νέα ρύθμιση στην περίπτωση αλλαγής αισθητήρα.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η υλοποίηση για την εικονική αναπαράσταση της κίνησης του χεριού, με βάση τα δεδομένα που καταγράφονται από το γάντι συλλογής δεδομένων.

### 3.4 Προσομοίωση γαντιού συλλογής δεδομένων

Για την απόδοση της κίνησης του χεριού αλλά και την αξιολόγηση της λειτουργικότητας του γαντιού συλλογής δεδομένων, χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον Simscape Multibody του Matlab. Πρόκειται για ένα περιβάλλον προσομοίωσης μηχανικών συστημάτων, όπως ρομποτικοί μηχανισμοί, η μοντελοποίηση των οποίων μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση μπλοκ που αντιπροσωπεύουν το σώμα, τις αρθρώσεις, τους περιορισμούς μεταξύ των διαφορετικών εξαρτημάτων και τους αισθητήρες ενός συστήματος, ενώ οι εξισώσεις κίνησης διαμορφώνονται και λύνονται αυτόματα. Επιπλέον δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής ενός πλήρους συναρμοσμένου από λογισμικό CAD με όλες του τις ιδιότητες.

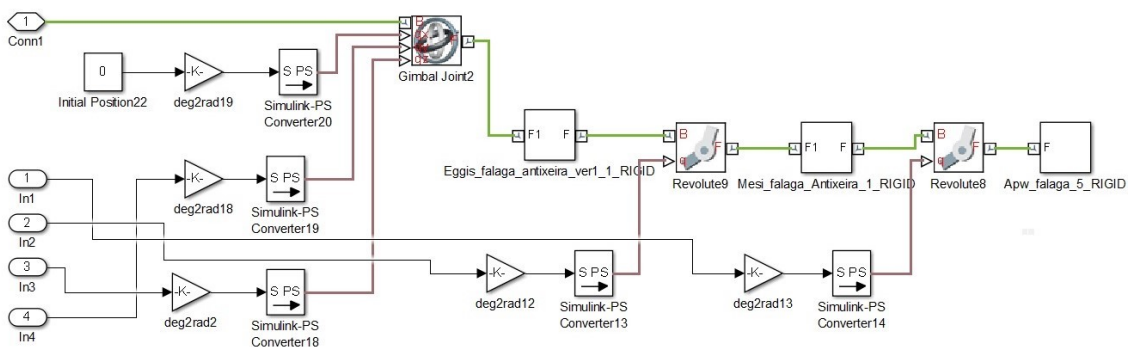
Στην εφαρμογή που υλοποιήθηκε, σχεδιάστηκε το μοντέλο ενός ανθρώπινου χεριού, με τους επιθυμητούς βαθμούς ελευθερίας, στο λογισμικό SolidWorks 2015 και στη συνέχεια έγινε εισαγωγή του στο Simscape Multibody/Second Generation. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την πραγματοποίηση αυτής της διαδικασίας αναφέρονται στην ιστοσελίδα της MathWorks [62], καθώς απαιτείται η διασύνδεση των δύο προγραμμάτων. Στο Σχήμα 3.20a απεικονίζεται το CAD μοντέλο του ανθρώπινου χεριού, ενώ στο Σχήμα 3.20b το ίδιο μοντέλο σε περιβάλλον Simscape Multibody, όπου πλέον όλα τα επιμέρους τμήματα έχουν αντικατασταθεί από τα αντίστοιχα μπλοκ. Έτσι το τμήμα πίσω από τον καρπό, η παλάμη και οι σύνδεσμοι των δαχτύλων εκφράζονται από Rigid μπλοκ, κάθε ένα από τα οποία διαθέτει πλαίσιο αναφοράς με βάση το οποίο ορίζεται η μεταξύ τους θέση και σύνδεση. Όλα τα επιμέρους πλαίσια εκφράζονται ως προς το αδρανειακό, το οποίο υποδηλώνεται με το μπλοκ World. Αντίστοιχα οι περιστροφικές αρθρώσεις δηλώνονται από το μπλοκ Revolute, ενώ ο καρπός από το μπλοκ Spherical, καθώς κατά τη σχεδίαση του χεριού του αποδόθηκαν τρεις βαθμοί ελευθερίας.



Σχήμα 3.20: (a) Μοντέλο CAD ανθρώπινου χεριού (b) Μοντέλο σε περιβάλλον Simscape Multibody.

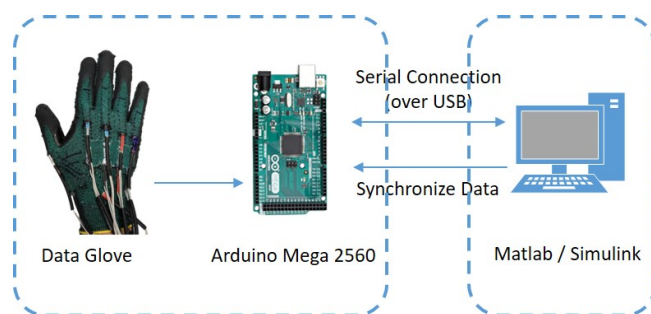
Για την υλοποίηση της προσομοίωσης πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητες προσθήκες και τροποποιήσεις. Αρχικά στα μπλοκ Revolute επιλέχθηκε το σήμα για την κίνηση των αρθρώσεων να δίνεται από εξωτερική είσοδο και η ροπή να υπολογίζεται αυτόματα. Το σήμα που λαμβάνεται αντιστοιχεί στις γωνίες που καταγράφονται από τον μικροελεγκτή, οι οποίες με την προσθήκη κατάλληλου μπλοκ μετασχηματίζονται από μοίρες σε ακτίνια, ενώ με την επιλογή του προσημού επιτυγχάνεται η κίνηση προς την επιθυμητή κατεύθυνση. Απαραίτητη είναι η προσθήκη του Simulink-Ps Converter (S-PS) μπλοκ, για τη μετατροπή του παραπάνω σήματος σε φυσική ποσότητα.

Στη συνέχεια ορίστηκαν αρχικές γωνίες (offset) για κάποιες από τις αρθρώσεις, έτσι ώστε να αντισταθμιστεί η αρχική τους θέση. Επιπλέον τα δύο Spherical μπλοκ, καρπού και αντίχειρα, αντικαταστάθηκαν από τα Gimbal, καθώς δεν έδιναν τη δυνατότητα επιλογής εισόδου για την κίνηση, αλλά μόνο ροπής. Στην πρώτη περίπτωση, του καρπού, εξωτερικό σήμα λαμβάνει μία εκ των τριών αρθρώσεων, ενώ στη δεύτερη δύο από τις τρεις. Στις υπόλοιπες αρθρώσεις ορίζονται μηδενικές τιμές και για τις δύο περιπτώσεις. Στο Σχήμα 3.21 απεικονίζεται το δάχτυλο του αντίχειρα, όπως έχει διαμορφωθεί μετά τις τροποποιήσεις και προσθήκες των απαραίτητων μπλοκ.



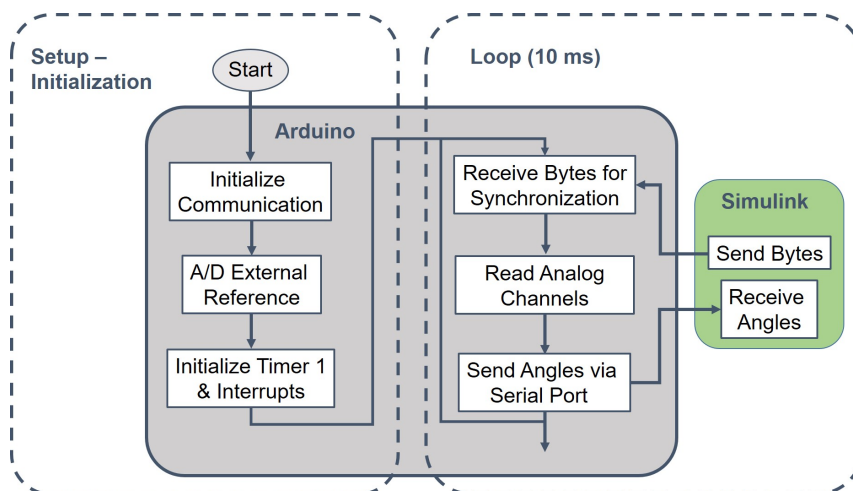
Σχήμα 3.21: Το δάχτυλο του αντίχειρα όπως διαμορφώθηκε μετά τις προσθήκες και τροποποιήσεις των απαραίτητων μπλοκ.

Στο Σχήμα 3.22 απεικονίζεται το συνολικό διάγραμμα αρχιτεκτονικής για την προσομοίωση του γαντιού συλλογής δεδομένων και μπορεί να χωριστεί σε δύο επίπεδα. Το πρώτο υλοποιείται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή σε περιβάλλον Simulink, όπου μέσω της βιβλιοθήκης Real Time Windows Target (RTWT) γίνεται λήψη και αποστολή δεδομένων, ενώ η γραφική απεικόνιση της κίνησης γίνεται με χρήση του πακέτου Simscape Multibody. Το δεύτερο επίπεδο πραγματοποιείται στο μικροελεγκτή, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την καταγραφή των γωνιών και αποστολή τους στο ανώτερο επίπεδο. Η αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ των δύο επιπέδων υλοποιείται μέσω σειριακού πρωτοκόλλου, από τη θύρα USB.



Σχήμα 3.22: Συνολικό διάγραμμα αρχιτεκτονικής για την προσομοίωση του γαντιού συλλογής δεδομένων.

Στο Σχήμα 3.23 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής που περιγράφει τις λειτουργίες που εκτελούνται στο μικροελεγκτή για την καταγραφή και αποστολή των γωνιών στο Simulink. Στο αριστερό μέρος του διαγράμματος φαίνονται μια σειρά από αρχικοποιήσεις και άλλες ρυθμίσεις που εκτελούνται πριν ξεκινήσει το κυρίως μέρος του προγράμματος που εκτελείται εντός του ατέρμονα βρόχου (loop) του κώδικα. Αρχικά, ενεργοποιείται η σειριακή θύρα που χρησιμοποιείται για την επικοινωνία με τον εξωτερικό Η/Υ, με baud rate 115200 bps. Στη συνέχεια δηλώνεται ότι η τάση αναφοράς που χρησιμοποιείται από τον ADC παρέχεται από εξωτερική πηγή. Τέλος αρχικοποιείται και ο χρονιστής Timer1, που χρησιμοποιείται για το χρονισμό του βρόχου ελέγχου. Μετά το τέλος της ρουτίνας των αρχικών ρυθμίσεων, ο μικροελεγκτής μεταβαίνει στο κυρίως τμήμα του προγράμματος, όπου εισέρχεται σε ατέρμονα βρόχο επανάληψης,



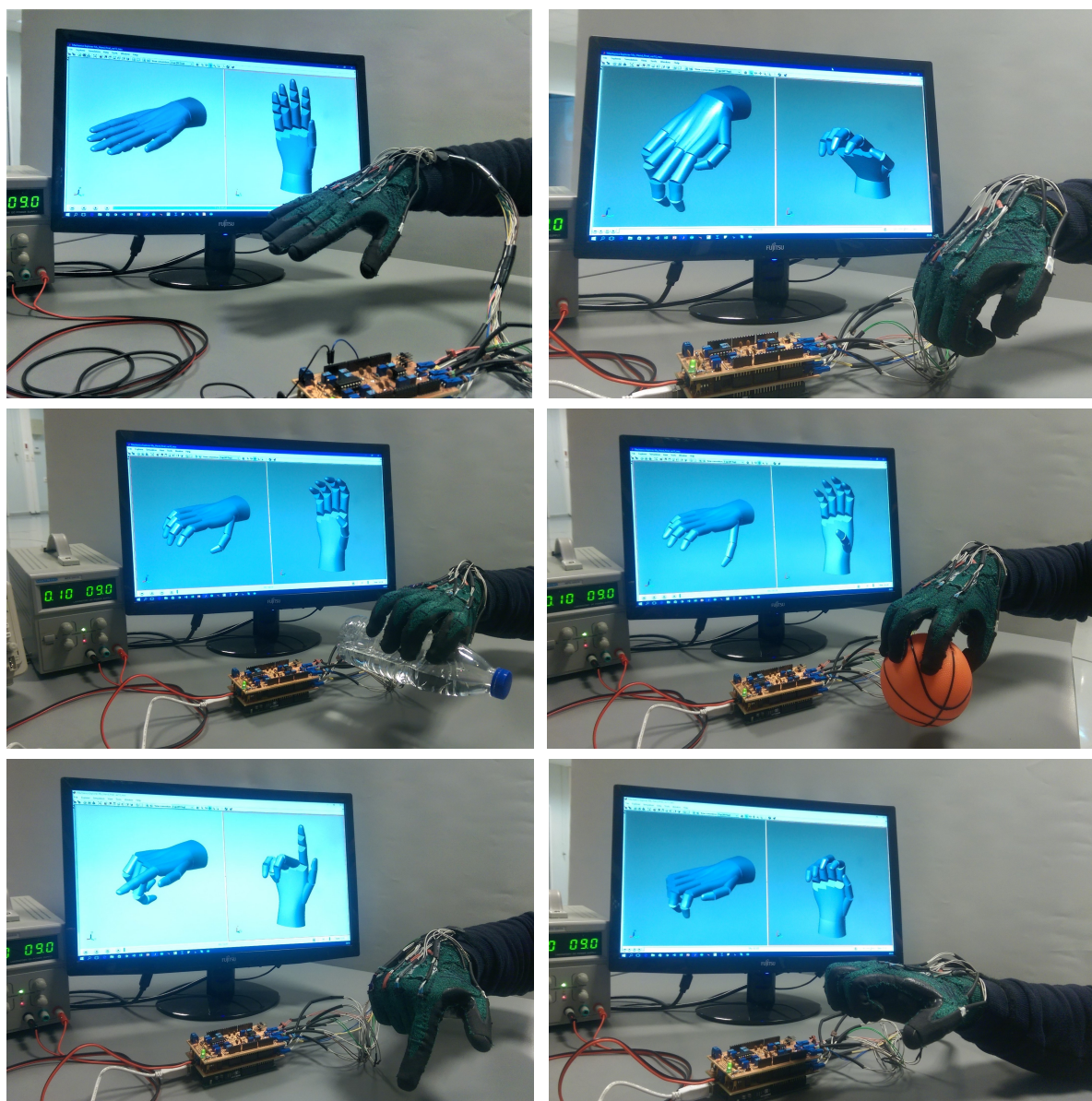
Σχήμα 3.23: Διάγραμμα ροής υλοποίησης στο λογισμικό ελέγχου του μικροελεγκτή για την καταγραφή και αποστολή των γωνιών στο Simulink.

μέσα στον οποίο αρχικά γίνεται ο συγχρονισμός με το Simulink.

Εκεί περιμένει μέχρι να διαβάσει δύο συνεχόμενα bytes, με τιμές 255 και 17. Για την αποστολή των δεδομένων από το Matlab, μέσω σειριακού διαύλου USB στον μικροελεγκτή, χρησιμοποιείται το μπλοκ Packet Output της βιβλιοθήκης του RTWT. Η αποστολή γίνεται με ρυθμό 100 Hz στα 115200 bps και το μέγεθος του πακέτου που αποστέλλεται σε κάθε κύκλο ελέγχου είναι 2 bytes. Στη συνέχεια και αφού έχουν αναγνωριστεί τα δύο bytes συγχρονισμού, ο μικροελεγκτής συνεχίζει την εκτέλεση του προγράμματος, όπου και «διαβάζει» τις τιμές των αναλογικών καναλιών που αντιστοιχούν σε κάθε αισθητήρα. Η σειρά με την οποία γίνεται είναι συγκεκριμένη, έτσι πρώτα καταγράφονται η γωνία της κάμψης του καρπού, οι γωνίες του δείκτη, στη συνέχεια του μέσου κ.ο.κ. με τελευταίες τις γωνίες του αντίχειρα. Οι μετρήσεις καταχωρούνται στους αντίστοιχους πίνακες και αποστέλλονται μέσω του σειριακού διαύλου USB στο Simulink. Για τη λήψη τους χρησιμοποιείται το μπλοκ Packet Input της βιβλιοθήκης του RTWT. Συνολικά λαμβάνονται έξι πακέτα, με το μέγεθός τους να είναι 1 byte για το πρώτο, 2 byte για το κάθε ένα από τα επόμενα τέσσερα και 4 byte για το τελευταίο. Αυτά τα πακέτα δεδομένων αντιστοιχούν στις γωνίες που καταγράφονται με τη σειρά που αναφέρθηκε προηγουμένως. Ο υπολογισμός των γωνιών των υπόλοιπων αρθρώσεων γίνεται στο Simulink με βάση τα παραπάνω δεδομένα.

Στο Σχήμα 3.24 παρουσιάζονται κάποιες ενδεικτικές εικόνες κατά την προσομοίωση και γραφική απεικόνιση του χεριού στο Simulink. Στις περισσότερες περιπτώσεις η αναπαράσταση της κίνησης του χεριού γίνεται με μεγάλη ακρίβεια, ακόμα και κατά την λαβή των αντικειμένων. Μικρές αποκλίσεις εμφανίζονται στο δάχτυλο του αντίχειρα, καθώς είναι δύσκολη η σωστή καταγραφή της κίνησης απαγωγής - προσαγωγής, λόγω των περιορισμένων επιλογών ως προς την τοποθέτηση του αισθητήρα, όπως επίσης και της κάμψης - έκτασης της CMC άρθρωσης, η γωνία της οποίας προκύπτει υπολογιστικά. Γενικότερα, το σύστημα λειτουργεί γρήγορα (με συνολικό χρόνο κάθε κύκλου ελέγχου στα 10 ms) και παρέχει μια αρκετά καλή αίσθηση στο χρήστη. Επιπλέον η υλοποίηση του μοντέλου του χεριού σε περιβάλλον Simscape, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση και άλλων εφαρμογών που καταγράφουν την κίνηση ενός χεριού.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι πίνακες με βάση τους οποίους μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα ως προς την ευστάθειά μιας λαβής και τα κριτήρια με βάση τα οποία μπορεί να αξιολογηθεί η ποιότητάς της. Τέλος περιγράφονται οι στρατηγικές που ακολουθήθηκαν για τον έλεγχο κίνησης του εξωσκελετικού επιπρόσθετου ρομποτικού δαχτύλου και τα πειραματικά αποτελέσματα.



Σχήμα 3.24: Ενδεικτικές εικόνες κατά την προσομοίωση και γραφική απεικόνιση του χεριού στο Simulink.



## Κεφάλαιο 4

# Έλεγχος Κίνησης Εξωσκελετικού Επιπρόσθετου Ρομποτικού Δακτύλου

### 4.1 Εισαγωγή

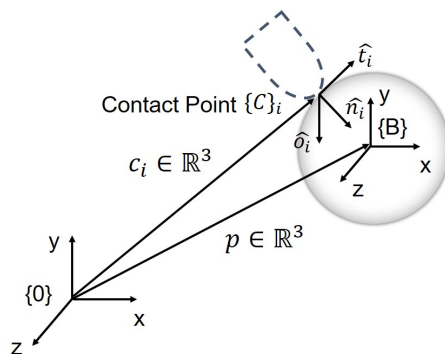
Σε αυτό το κεφάλαιο αρχικά αναλύεται η λαβή ενός αντικειμένου και οι πίνακες με βάση τους οποίους μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα ως προς την ευστάθειά της. Παρουσιάζονται τα διαφορετικά μοντέλα επαφών που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή του σημείου επαφής, όπως επίσης και τα κριτήρια με βάση τα οποία μπορεί να ποσοτικοποιηθεί η ποιότητας μιας λαβής, σύμφωνα με το κύριο χαρακτηριστικό το οποίο αξιολογούν, τη θέση των σημείων επαφής ή τη διαμόρφωση του χεριού κατά τη λαβή.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι στρατηγικές που αναπτύχθηκαν για τον έλεγχο κίνησης του επιπρόσθετου ρομποτικού δακτύλου, για την υλοποίηση των οποίων προστέθηκαν επιπλέον αισθητήρια, τόσο στο γάντι συλλογής δεδομένων όσο και στη ρομποτική διάταξη. Τέλος παρουσιάζονται τα κύρια αποτελέσματα της πειραματική διαδικασία, μέσω της οποίας διερευνάται η δυνατότητα του ρομποτικού δακτύλου αφενός να αντισταθμίσει την απώλεια κάποιου μέλους του χεριού και αφετέρου να εκτελέσει μικροχειρισμό αντικειμένου.

### 4.2 Ανάλυση Λαβής

Έστω ρομποτικός χειριστής ο οποίος είναι σε επαφή με ένα άκαμπτο σώμα, του οποίου η θέση και ο προσανατολισμός ορίζεται από πλαίσιο αναφοράς  $\{B\}$ , που επισυνάπτεται στο κέντρο μάζας του, ως προς το αδρανειακό πλαίσιο  $\{0\}$ . Η θέση του αντικειμένου και του σημείου επαφής εκφράζονται από τα διανύσματα  $p \in \mathbb{R}^3$  και  $c_i \in \mathbb{R}^3$  αντίστοιχα. Στο σημείο επαφής ορίζεται πλαίσιο  $\{C\}_i$  με άξονες  $\{\hat{n}_i, \hat{t}_i, \hat{o}_i\}$ , όπου  $\hat{n}_i$  μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στην εφαιπτομένη στο σημείο επαφής με κατεύθυνση προς το αντικείμενο και  $\hat{t}_i, \hat{o}_i$  τα άλλα δύο μοναδιαία διανύσματα κάθετα στο αρχικό (Σχήμα 4.1).

Η λαβή ορίζεται συνήθως ως ένα σύνολο επαφών στην επιφάνεια ενός αντικειμένου, σκοπός



Σχήμα 4.1: Απεικόνιση ρομποτικού χειριστή σε επαφή με άκαμπτο σώμα.

της οποίας είναι να περιορίσει τις πιθανές κινήσεις του αντικειμένου σε περιπτώσεις εξωτερικών διαταραχών. Ως επαφή μπορούν να θεωρηθούν δύο σημεία που συμπίπτουν, ένα στο ακροδάχτυλο του χεριού και ένα στην επιφάνεια του αντικειμένου. Για την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την ευστάθεια μιας λαβής οι δύο πίνακες που είναι ευρέως αποδεκτοί και χρησιμοποιούνται, είναι ο πίνακας λαβής (Grasp Matrix) και η Ιακωβιανή του χεριού (Hand Jacobian).

Ο πίνακας μετασχηματισμού **Grasp Matrix** συσχετίζει τις ταχύτητες των ακροδαχτύλων στα σημεία επαφής με την ταχύτητα του κέντρου μάζας του αντικειμένου. Για ένα σημείο μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$\tilde{G}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_i & 0 \\ \mathbf{S}(\mathbf{c}_i - \mathbf{p})\mathbf{R}_i & \mathbf{R}_i \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 6} \quad (4.1)$$

όπου  $\mathbf{R}_i \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  ο πίνακας στροφής του πλαισίου  $\{C\}_i$  ως προς το πλαίσιο βάσης  $\{0\}$ ,  $\mathbf{c}_i$  και  $\mathbf{p}$  τα διανύσματα του σημείου επαφής και κέντρου μάζας του αντικειμένου αντίστοιχα, ως προς το  $\{0\}$  και  $\mathbf{S}(\mathbf{c}_i - \mathbf{p})$  ο αντισυμμετρικός πίνακας. Για ένα διάνυσμα  $\mathbf{r} = [r_x, r_y, r_z]^T$ , ο  $\mathbf{S}(\mathbf{r})$  ορίζεται ως:

$$\mathbf{S}(\mathbf{r}) = \begin{bmatrix} 0 & -r_z & r_y \\ r_z & 0 & -r_x \\ -r_y & r_x & 0 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Ο συνολικός πίνακας Grasp Matrix  $\tilde{\mathbf{G}} \in \mathbb{R}^{6 \times 6n_c}$  είναι ο συνδυασμός των επιμέρους πινάκων λαβής για κάθε ένα από τα σημεία επαφής  $n_c$ , όπου  $n_c$  το πλήθος των σημείων επαφής. Επομένως θα είναι:

$$\tilde{\mathbf{G}} = [\tilde{\mathbf{G}}_1, \dots, \tilde{\mathbf{G}}_{n_c}] \quad (4.3)$$

Ο πίνακας μετασχηματισμού **Hand Jacobian** συσχετίζει τις ταχύτητες των αρθρώσεων των δαχτύλων  $\dot{\mathbf{q}}$  με τις ταχύτητες  $\mathbf{V}_{i,hand}$ , οι οποίες αντιστοιχούν στις ταχύτητες των σημείων επαφής

$c_i$  εκφρασμένες ως προς το πλαίσιο  $\{C\}_i$

$$\mathbf{V}_{i,hand} = \tilde{\mathbf{J}}_i \dot{\mathbf{q}} \quad (4.4)$$

όπου  $\mathbf{q} = [q_1, \dots, q_{n_q}]^T$  διάνυσμα που περιέχει τις γωνίες των αρθρώσεων και  $n_q$  ο συνολικός τους αριθμός. Η Ιακωβιανή  $\tilde{\mathbf{J}}_i$  για το κάθε δάκτυλο υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\tilde{\mathbf{J}}_i = \bar{\mathbf{R}}_i^T \mathbf{Z}_i \quad (4.5)$$

Ο  $\bar{\mathbf{R}}_i$  είναι διαγώνιος πίνακας που εκφράζει τον προσανατολισμό του πλαισίου επαφής  $c_i$  ως προς το αδρανειακό πλαίσιο  $\{0\}$ .

$$\bar{\mathbf{R}}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_i & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_i \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 6} \quad (4.6)$$

και  $\mathbf{Z}_i$  ορίζεται ως:

$$\mathbf{Z}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{S}(c_i - \zeta_j)^T \hat{z}_j & \dots & \mathbf{S}(c_i - \zeta_{n_q})^T \hat{z}_{n_q} \\ \hat{z}_j & \dots & \hat{z}_{n_q} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

όπου  $\zeta_j$  το διάνυσμα θέσης του πλαισίου της κάθε άρθρωσης και  $\hat{z}_j$  το μοναδιαίο διάνυσμα στην κατεύθυνση του z άξονα που αντιστοιχεί στο κάθε πλαίσιο.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα δάκτυλα του χεριού υπολογίζεται η συνολική **Ιακωβιανή**  $\tilde{\mathbf{J}}$ , η οποία θα ισούται με:

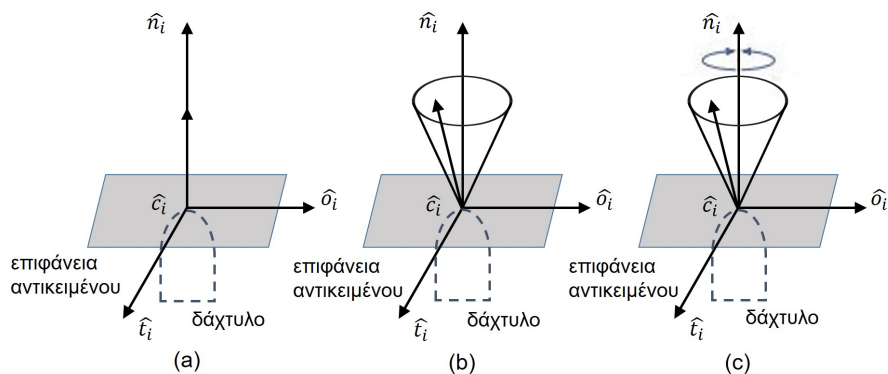
$$\tilde{\mathbf{J}} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{J}}_1 \\ \vdots \\ \tilde{\mathbf{J}}_{n_c} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6n_c \times n_q} \quad (4.8)$$

### 4.3 Μοντέλα Επαφών

Γενικά στην επιφάνεια ενός αντικειμένου μπορεί να θεωρηθεί μία γενικευμένη δύναμη, η οποία περιέχει στοιχεία δύναμης και ροπής και περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\mathbf{F} = [f_x \ f_y \ f_z \ \tau_x \ \tau_y \ \tau_z]^T \quad (4.9)$$

Ένα μοντέλο επαφής περιγράφει ποια από αυτά τα στοιχεία μπορούν να μεταφερθούν μέσω της επαφής στο αντικείμενο. Στην βιβλιογραφία έχουν προταθεί αρκετά μοντέλα επαφών αλλά



Σχήμα 4.2: Μοντέλα επαφής δακτύλου στην επιφάνεια αντικειμένου (a) Χωρίς τριβή, (b) Με τριβή, (c) "Παραμορφώσιμη" με τριβή.

αυτά που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι τα εξής τρία: Σημειακή επαφή χωρίς τριβή (*Point Contact Without Friction, PCWF*), Σημειακή επαφή με τριβή (*Hard Finger, HF*) και "Παραμορφώσιμη" επαφή με τριβή (*Soft Finger, SF*).

Το μοντέλο της σημειακής επαφής χωρίς τριβή, συνήθως χρησιμοποιείται όταν το σημείο επαφής είναι πολύ μικρό και οι επιφάνειες του χεριού και του αντικειμένου είναι ολισθηρές. Σε αυτή την περίπτωση λαμβάνεται υπόψη μόνο η κάθετη μεταφορική ταχύτητα που μπορεί να μεταδοθεί μεταξύ του χεριού και του αντικειμένου. Αντίστοιχα το μοντέλο λαμβάνει υπόψη μόνο την κάθετη δύναμη στην επιφάνεια του αντικειμένου (Σχήμα 4.2a). Επομένως η γενικευμένη δύναμη  $F$  με βάση τη Σχέση (4.9) θα ισούται με:

$$\mathbf{F} = [f_x] \quad (4.10)$$

Το μοντέλο της σημειακής επαφής με τριβή, χρησιμοποιείται όταν υπάρχει σημαντική τριβή μεταξύ των δακτύλων και της επιφάνειας του αντικειμένου. Μπορούν να μεταφερθούν τρεις μεταφορικές ταχύτητες και τρεις δυνάμεις, κατά την κάθετη και τις δύο εφαπτόμενες διευθύνσεις, μέσω των σημείων επαφής (Σχήμα 4.2b), επομένως τα αντίστοιχα στοιχεία της γενικευμένης δύναμης  $F$  θα είναι:

$$\mathbf{F} = [f_x \ f_y \ f_z]^T \quad (4.11)$$

Το μοντέλο της επαφής με τριβή, χρησιμοποιείται όταν η τριβή της επιφάνειας και το σημείο της επαφής είναι αρκετά μεγάλα έτσι ώστε να παράγουν σημαντικές δυνάμεις και ροπή γύρω από το κάθετο διάνυσμα. Σε αυτή την περίπτωση μεταφέρονται τρεις μεταφορικές και μία περιστροφική ταχύτητα όπως και τρεις δυνάμεις και μία ροπή μέσω του σημείου επαφής (Σχήμα 4.2c). Επομένως για τη δύναμη  $F$  θα ισχύει:

$$\mathbf{F} = [f_x \ f_y \ f_z \ \tau_x]^T \quad (4.12)$$

Κάθε μοντέλο επαφής ορίζεται μέσω του πίνακα  $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{l_i \times 6}$ , ο οποίος λειτουργεί ως φίλτρο,

επιλέγοντας τα αντίστοιχα στοιχεία του πίνακα  $\mathbf{F}$  της Σχέσης (4.9) και ισούται με:

$$\mathbf{H}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{iF} & 0 \\ 0 & \mathbf{H}_{iM} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Η διαμόρφωση των στοιχείων του,  $\mathbf{H}_{iF}$  και  $\mathbf{H}_{iM}$ , φαίνεται στον Πίνακα 4.1 ανάλογα με το μοντέλο της επαφής, όπου  $l_i$  το πλήθος των στοιχείων του πίνακα  $\mathbf{F}$  (Σχέση (4.9)) που μεταφέρονται στο αντικείμενο, ενώ στον πίνακα  $\mathbf{H}_{iM}$  δεν εμπεριέχονται στοιχεία για τα δύο πρώτα μοντέλα επαφών.

<i>Model</i>	$l_i$	$\mathbf{H}_{iF}$	$\mathbf{H}_{iM}$
PCWF	1	(1 0 0)	-
HF	3	$\mathbf{I}_{3 \times 3}$	-
SF	4	$\mathbf{I}_{3 \times 3}$	(1 0 0)

Πίνακας 4.1: Διαμόρφωση πίνακα  $\mathbf{H}$  για τα τρία μοντέλα επαφής [63].

Επιλέγοντας ένα συγκεκριμένο μοντέλο για κάθε σημείο επαφής, ο συνολικός πίνακας  $\mathbf{H}$  για όλα τα σημεία επαφής  $n_c$  μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$\mathbf{H} = \text{Blockdiag}(\mathbf{H}_1, \dots, \mathbf{H}_{n_c}) \in \mathbb{R}^{l_i \times 6n_c} \quad (4.14)$$

Επομένως, πολλαπλασιάζοντας τις Σχέσεις (4.3) και (4.8) με τον πίνακα  $\mathbf{H}$ , οι πίνακες  $\tilde{\mathbf{G}}$  και  $\tilde{\mathbf{J}}$  μπορούν να διαμορφωθούν αντίστοιχα, περιέχοντας μόνο τα απαραίτητα στοιχεία για την κατά περίπτωση ανάλυση:

$$\mathbf{G} = \mathbf{H} \tilde{\mathbf{G}} \in \mathbb{R}^{l \times 6} \quad (4.15)$$

$$\mathbf{J} = \mathbf{H} \tilde{\mathbf{J}} \in \mathbb{R}^{l \times n_q} \quad (4.16)$$

Ανάλογα με την εργασία, οι απαιτήσεις για μεταφορά δύναμης και ταχύτητας στο αντικείμενο μπορεί να διαφέρει. Η σχέση που συνδέει τις περιστροφικές ταχύτητες των αρθρώσεων με τη γενικευμένη ταχύτητα του κέντρου μάζας του αντικειμένου είναι η ακόλουθη:

$$\boldsymbol{\nu} = (\mathbf{G}^+)^T \mathbf{J} \dot{\mathbf{q}} \quad (4.17)$$

όπου  $\boldsymbol{\nu}$  η γενικευμένη ταχύτητα του κέντρου μάζας του αντικειμένου,  $\dot{\mathbf{q}}$  οι ταχύτητες των αρθρώσεων και  $\mathbf{G}^+$  ο ψευδο-αντίστροφος του πίνακα  $\mathbf{G}$  που υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\mathbf{G}^+ = \mathbf{G}^T (\mathbf{G} \mathbf{G}^T)^{-1} \quad (4.18)$$

Από τις Σχέσεις (4.17), (4.18) ορίζεται ο πίνακας Hand Object Jacobian  $\mathbf{H}_{OJ}$ :

$$\mathbf{H}_{OJ} = (\mathbf{G}^+)^T \mathbf{J} \quad (4.19)$$

## 4.4 Κριτήρια αξιολόγησης λαβής

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται κάποια από τα κριτήρια που προτείνονται στη βιβλιογραφία για την ποσοτικοποίηση της ποιότητας λαβής ενός αντικειμένου. Μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες σύμφωνα με το κύριο χαρακτηριστικό το οποίο αξιολογούν, τη θέση των σημείων επαφής ή τη διαμόρφωση του χεριού κατά τη λαβή [64]. Τα συγκεκριμένα κριτήρια θα αξιοποιηθούν στη συνέχεια (Ενότητα 4.5.1) για να διαπιστωθεί αν η χρήση του επιπρόσθετου ρομποτικού δαχτύλου μπορεί να αντισταθμίσει την απώλεια κάποιου μέλους του ανθρώπινου χεριού.

### 4.4.1 Κριτήρια με βάση τις αλγεβρικές ιδιότητες του Grasp Matrix

Στην πρώτη κατηγορία, μία σειρά κριτηρίων λαμβάνει υπόψη μόνο τον πίνακα  $G$ , ενώ δεν εξετάζονται περιορισμοί στις δυνάμεις που ασκούνται στα σημεία επαφής.

Το πρώτο κριτήριο (**Minimum Singular Value of G**) εξετάζει την ελάχιστη από τις ιδιάζουσες τιμές του πίνακα  $G$ , η υποδηλώνει πόσο κοντά σε ιδιάζουσα θέση (singular configuration) βρίσκεται η λαβή του αντικειμένου. Στην θέση αυτή χάνεται τουλάχιστον ένας βαθμός ελευθερίας πράγμα το οποίο σημαίνει ότι δεν μπορούν να αντισταθμιστούν εξωτερικές διαταραχές.

$$Q_{MSV} = \sigma_{min}(G) \quad (4.20)$$

Η μεγιστοποίηση του συγκεκριμένου δείκτη συνεπάγεται και καλύτερη λαβή, μεγιστοποιώντας την επίδραση των δυνάμεων επαφής στο κέντρο μάζας. Ωστόσο δεν είναι αμετάβλητος σε αλλαγή του συστήματος αναφοράς του κέντρου μάζας του αντικειμένου.

Το δεύτερο κριτήριο (**Volume of the Ellipsoid in the Wrench space**) σε αντίθεση με τον προηγούμενο εξετάζει όλες τις ιδιάζουσες τιμές με την ίδια βαρύτητα. Όσο μεγαλύτερη η τιμή του τόσο καλύτερη και η λαβή. Ορίζεται ως:

$$Q_{VEW} = \sqrt{\det(GG^T)} = \sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_d \quad (4.21)$$

όπου  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_d$  οι ιδιάζουσες τιμές του πίνακα  $G$ . Ο συγκεκριμένος δείκτης είναι αμετάβλητος σε πιθανές αλλαγές του συστήματος αναφοράς του κέντρου μάζας του αντικειμένου, αλλά δεν παρέχει πληροφορίες σχετικά με το αν κάποια δάχτυλα συμβάλλουν περισσότερο από άλλα στη λαβή.

Το τρίτο κριτήριο (**Grasp Isotropy Index**) συσχετίζει την ύπαρξη ομοιόμορφης συνεισφοράς των γενικευμένων δυνάμεων από τα σημεία επαφής στο κέντρο μάζας του αντικειμένου. Ορίζεται ως:

$$Q_{GII} = \frac{\sigma_{min}(G)}{\sigma_{max}(G)} \quad (4.22)$$

όπου  $\sigma_{min}(G)$  και  $\sigma_{max}(G)$  η ελάχιστη και μέγιστη ιδιάζουσα τιμή του πίνακα  $G$  αντίστοιχα. Στην περίπτωση που η τιμή του δείκτη είναι κοντά στη μονάδα (1) η λαβή είναι ισοτροπική, που είναι και η βέλτιστη περίπτωση, ενώ όταν πλησιάζει το μηδέν η λαβή μεταβαίνει σε ιδιάζουσα θέση.

#### 4.4.2 Κριτήρια με βάση τη διαμόρφωση του χεριού

Στη δεύτερη κατηγορία, όπως προαναφέρθηκε αξιολογείται η διαμόρφωση του χεριού κατά τη λαβή ενός αντικειμένου. Η βασική ιδέα των κριτηρίων όπως παρουσιάστηκαν προηγουμένως ισχύει και σε αυτά που θα αναφερθούν στη συνέχεια ενώ σε αυτή την περίπτωση λαμβάνεται υπόψη ο πίνακας  $H_{OJ}$ .

Το πρώτο κριτήριο (**Distance to Singular Configurations**) εξετάζει και αυτό την ελάχιστη από τις ιδιάζουσες τιμές του πίνακα  $H_{OJ}$ . Όσο αυξάνεται τόσο απομακρύνεται η περίπτωση η λαβή να μεταβεί σε ιδιάζουσα θέση.

$$Q_{DSC} = \sigma_{min}(H_{OJ}) \quad (4.23)$$

Το δεύτερο κριτήριο (**Volume of the Manipulability Ellipsoid**) είναι και αυτό όμοιο με το δείκτη  $Q_{VEW}$  (Σχέση 4.21) και εξετάζει όλες τις ιδιάζουσες τιμές του πίνακα  $H_{OJ}$ .

$$Q_{VME} = \sqrt{\det(H_{OJ}H_{OJ}^T)} = \sigma_1\sigma_2 \dots \sigma_d \quad (4.24)$$

Το τρίτο κριτήριο (**Uniformity of Transformation**) εξετάζει αν η συνεισφορά της ταχύτητας κάθε άρθρωσης στην ταχύτητα του αντικειμένου είναι ομοιόμορφη. Όταν συμβαίνει αυτό το αντικείμενο μπορεί να μετακινηθεί προς οποιαδήποτε κατεύθυνση με το ίδιο κέρδος, υποδηλώνοντας έτσι καλή δυνατότητα χειρισμού. Ορίζεται ως:

$$Q_{UOT} = \frac{\sigma_{max}(H_{OJ})}{\sigma_{min}(H_{OJ})} \quad (4.25)$$

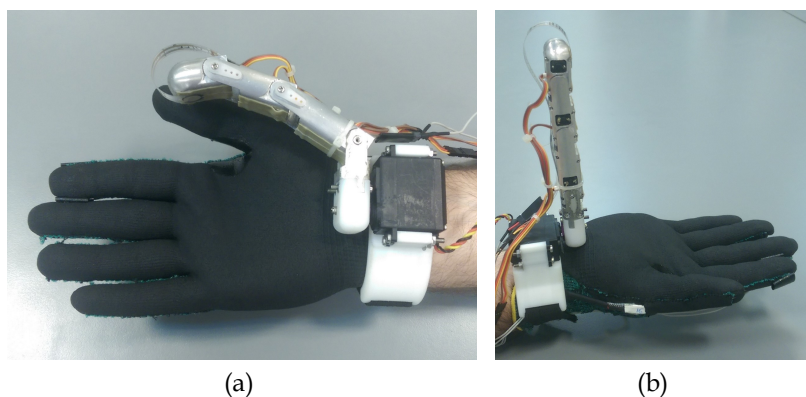
όπου  $\sigma_{min}(H_{OJ})$  και  $\sigma_{max}(H_{OJ})$  η ελάχιστη και μέγιστη ιδιάζουσα τιμή του πίνακα  $H_{OJ}$  αντίστοιχα. Η ποιότητα της λαβής είναι καλύτερη όταν ο δείκτης είναι κοντά στη μονάδα.

### 4.5 Έλεγχος επιπρόσθετου ρομποτικού δαχτύλου

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται οι στρατηγικές που αναπτύχθηκαν για τον έλεγχο κίνησης του επιπρόσθετου ρομποτικού δαχτύλου, όπως επίσης και τα αισθητήρια που προστέθηκαν για την υλοποίησή τους, τόσο στο γάντι συλλογής δεδομένων όσο και στη ρομποτική διάταξη. Παρουσιάζονται επίσης τα κύρια αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας, μέσω της οποίας διερευνάται η δυνατότητα του ρομποτικού δαχτύλου αφενός να αντισταθμίσει την

απώλεια κάποιου μέλους του χεριού και αφετέρου να εκτελέσει μικροχειρισμό αντικειμένων.

Αρχικά διαμορφώθηκαν δύο διαφορετικές αρχικές θέσεις για την τοποθέτηση του ρομποτικού δαχτύλου. Η πρώτη, θέση ηρεμίας, είναι αντίστοιχη του αντίχειρα όταν το χέρι δεν εκτελεί κάποια κίνηση ή λαβή (Σχήμα 4.3a), ενώ η δεύτερη, θέση εργασίας, είναι απέναντι από την παλάμη κάθετη στο μετωπιαίο επίπεδο του χεριού (Σχήμα 4.3b) και πραγματοποιείται με την επιλογή κάποιας εκ των καταστάσεων λειτουργίας.



Σχήμα 4.3: Αρχικές θέσεις ρομποτικού δαχτύλου (a) Ηρεμίας, (b) Εργασίας.

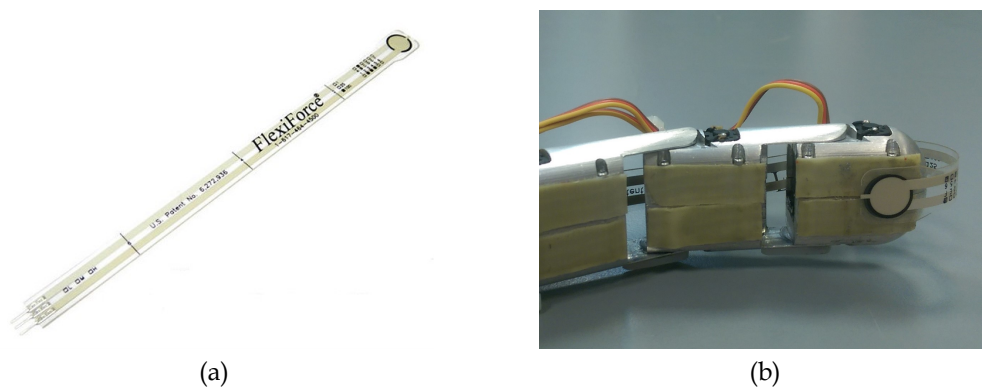
Συνολικά υλοποιήθηκαν τρεις καταστάσεις λειτουργίας. Βασικό κριτήριο ήταν η ευκολία στο χειρισμό της διάταξης, ούτως ώστε να μην απαιτείται ιδιαίτερη εκπαίδευση του χρήστη. Οι προτεινόμενες λειτουργίες μπορούν να διακριθούν σε δύο βασικές κατηγορίες, τη λαβή, και το μικροχειρισμό αντικειμένων (Grasping Modes). Στην πρώτη κατηγορία παρέχεται η δυνατότητα της στατικής λαβής του αντικειμένου (Grasping Mode 1: GM1). Στη δεύτερη κατηγορία γίνεται μικροχειρισμός του αντικειμένου με διαθέσιμες δύο καταστάσεις λειτουργίας, α) την αλλαγή του προσανατολισμού του ως προς την παλάμη (Grasping Mode 2: GM2) και β) την αλλαγή της θέσης του ως προς την παλάμη (Grasping Mode 3: GM3). Όλες οι λειτουργίες είναι διαθέσιμες στο λογισμικό που τρέχει στο μικροελεγκτή και παρέχονται ως υπορουτίνες ενός ενιαίου κώδικα. Για την υλοποίηση των παραπάνω περιπτώσεων προστέθηκαν επιπλέον αισθητήρια, τόσο στη ρομποτική διάταξη όσο και στο γάντι συλλογής δεδομένων.

Για την ανίχνευση επαφών του ρομποτικού δαχτύλου με τα αντικείμενα, τοποθετήθηκε αισθητήρας δύναμης (FSR) της εταιρίας Tekscan, στην εσωτερική πλευρά του τελευταίου συνδέσμου όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4b. Τα βασικά του χαρακτηριστικά είναι τα ακόλουθα σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή:

- Εύρος μέτρησης δύναμης  $0 - 0.45 \text{ kg}$  ( $4.4 \text{ N}$ )
- Αντίσταση χωρίς φορτίο  $\approx 20 \text{ M}\Omega$
- Θερμοκρασία λειτουργίας  $-9^\circ \text{C}$  έως  $+80^\circ \text{C}$

Για την ανάγνωση της κατάστασης του αισθητήρα υλοποιήθηκε κύκλωμα διαρέτη τάσης, με τάση τροφοδοσίας  $V = 5 \text{ V}$  και τιμή ωμικής αντίστασης  $R = 10 \text{ K}\Omega$ . Η τάση εξόδου οδηγείται σε μία αναλογική θύρα του μικροελεγκτή. Με την επιλογή κατάλληλης τάσης κατώφλιου καθορίζεται αν το δάχτυλο έχει έρθει σε επαφή με το αντικείμενο ή όχι. Επιπρόσθετα η έλλειψη τριβής

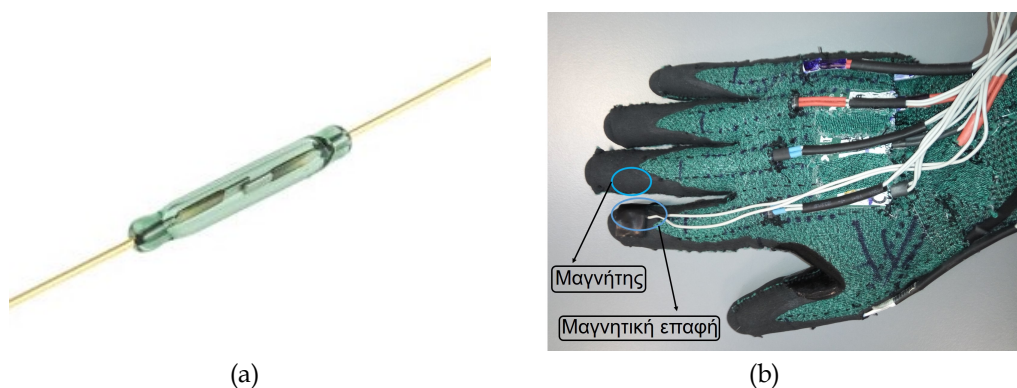




Σχήμα 4.4: (a) Ο αισθητήρας δύναμης της εταιρίας Tekscan, (b) Τοποθετημένος στο ρομποτικό δάχτυλο.

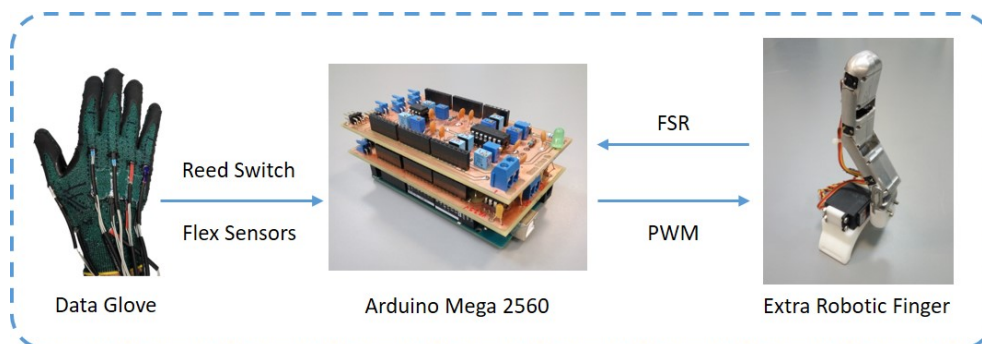
μεταξύ των αντικειμένων και του ρομποτικού δαχτύλου λόγω της μεταλλικής κατασκευής του τελευταίου αντισταθμίστηκε με την τοποθέτηση ελαστικής μεμβράνης στην εσωτερική επιφάνεια όλων των συνδέσμων (Σχήμα 4.4b).

Για την επιλογή της επιθυμητής κατάστασης λειτουργίας ενσωματώθηκε στο γάντι συλλογής δεδομένων μαγνητική επαφή (Reed Switch) (Σχήμα 4.5a), στο δάχτυλο του δείκτη, με το μαγνήτη να τοποθετείται στο μέσο (Σχήμα 4.5b). Για την εκκίνηση της διαδικασίας επιλογής λαβής ο χρήστης θα πρέπει να φέρει τα δάχτυλα του σε πλήρη έκταση, η οποία είναι και η αρχική θέση (Σχήμα 4.3a). Στη συνέχεια και ανάλογα με το πλήθος των κινήσεων απαγωγής/προσαγωγής που θα εκτελέσει το δάχτυλο του δείκτη από και προς την κατεύθυνση του μέσου, ενεργοποιεί και την αντίστοιχη λαβή. Για τη μετάβαση σε διαφορετική λειτουργία αρκεί να φέρει το χέρι και πάλι στην αρχική θέση και να ακολουθήσει την ίδια διαδικασία.



Σχήμα 4.5: (a) Η μαγνητική επαφή, (b) Τοποθετημένη στο γάντι συλλογής δεδομένων.

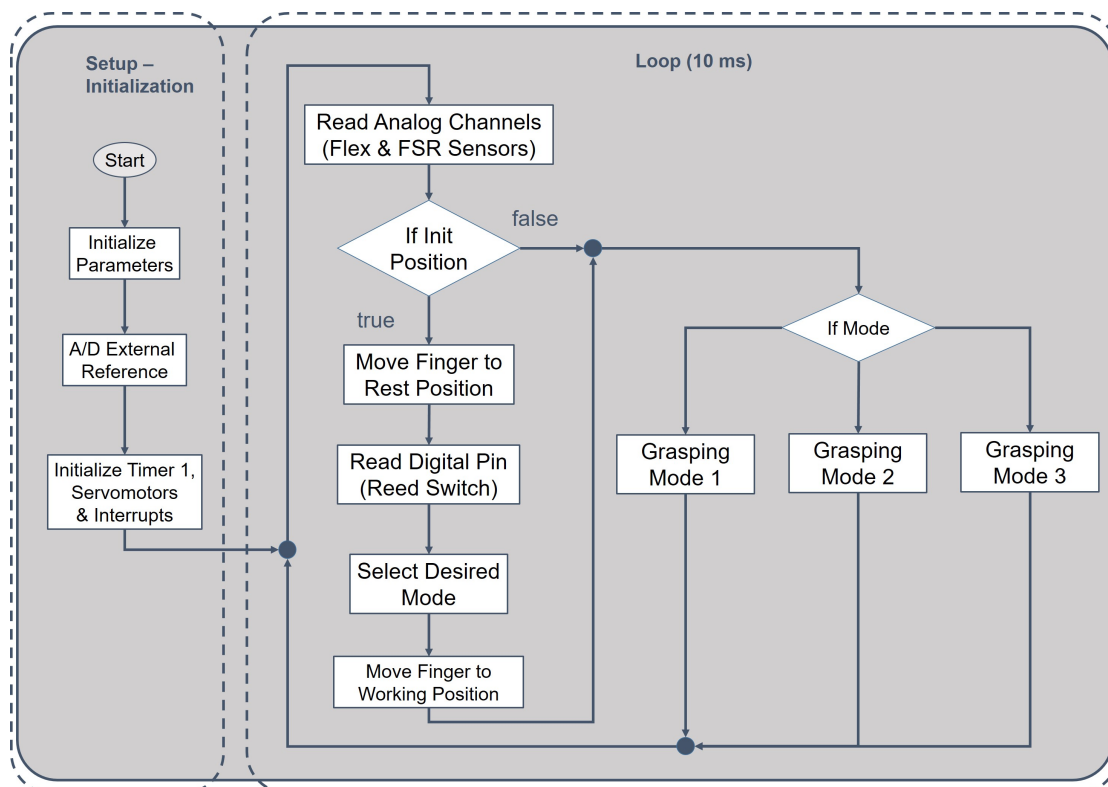
Στο Σχήμα 4.6 απεικονίζεται το συνολικό διάγραμμα αρχιτεκτονικής για την εκτέλεση των προτεινόμενων καταστάσεων λειτουργίας. Ο μικροελεγκτής λαμβάνει και επεξεργάζεται τα αναλογικά σήματα από το γάντι συλλογής δεδομένων, αισθητήρες κάμψης και μαγνητική επαφή, στη συνέχεια αποστέλλει τα σήματα ελέγχου στους σερβοκινητήρες, ενώ υπάρχει ανάδραση από τον αισθητήρα δύναμης. Στο Σχήμα 4.7 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής που περιγράφει τις λειτουργίες που εκτελούνται στο μικροελεγκτή πριν και μετά την επιλογή της κατάστασης λειτουργίας (Grasping Modes). Στο αριστερό μέρος του διαγράμματος φαίνονται μια σειρά από αρχικοποιήσεις και άλλες ρυθμίσεις που εκτελούνται πριν ξεκινήσει το κυρίως μέ-



Σχήμα 4.6: Συνολικό διάγραμμα αρχιτεκτονικής για την εκτέλεση των προτεινόμενων καταστάσεων λειτουργίας.

ρος του προγράμματος που εκτελείται εντός του ατέρμονα βρόγχου (loop) του κώδικα ο οποίος έχει σταθερό χρονισμό στα 10 ms.

Αρχικά δηλώνεται ότι η τάση αναφοράς που χρησιμοποιείται από τον ADC παρέχεται από εξωτερική πηγή και ο ψηφιακός ακροδέκτης που συνδέεται η μαγνητική επαφή ως είσοδος. Στη συνέχεια αρχικοποιούνται οι χρονιστές Timer1, Timer3 και Timer4, με τον πρώτο να χρησιμοποιείται για το χρονισμό του βρόχου ελέγχου και τους δύο επόμενους για την παραγωγή των σημάτων ελέγχου PWM για τον έλεγχο των σερβοκινητήρων. Τέλος ενεργοποιούνται και οι μηχανισμοί διακοπών (interrupts). Μετά το τέλος της ρουτίνας των αρχικών ρυθμίσεων ο μικροελεγκτής μεταβαίνει στο κυρίως τμήμα του προγράμματος όπου αρχικά «διαβάζει» τα



Σχήμα 4.7: Διάγραμμα ροής υλοποίησης στο λογισμικό έλεγχου του μικροελεγκτή των τριών διαφορετικών λειτουργιών.

αναλογικά κανάλια που αντιστοιχούν στους αισθητήρες κάμψης και δύναμης, για την καταγραφή των γωνιών των αρθρώσεων και ελέγχει αν το ρομποτικό δάχτυλο είναι σε επαφή με κάποιο αντικείμενο.

Στη συνέχεια γίνεται έλεγχος αν το χέρι βρίσκεται στην αρχική θέση (πλήρης έκταση όλων των δαχτύλων) ή όχι. Αν η συνθήκη είναι αληθής αρχικά αποστέλλεται σήμα στους σερβοκινητήρες για την οδήγηση του ρομποτικού δαχτύλου στη θέση ηρεμίας (Σχήμα 4.3a), ενώ ακολούθως καταγράφεται το πλήθος των ενεργοποιήσεων της μαγνητικής επαφής. Για να εξασφαλιστεί η απομονωμένη μέτρηση καθώς και η αποφυγή των τυχών μηχανικών αναπηδήσεων, υλοποιήθηκε σχετικός κώδικας έτσι ώστε να αντιλαμβάνεται διακριτές ενεργοποιήσεις. Στη συνέχεια αποστέλλεται εκ νέου σήμα στους σερβοκινητήρες για τη μετακίνηση του δαχτύλου στη θέση εργασίας (Σχήμα 4.3a), ενώ ακολουθεί ο έλεγχος για τον τύπο της λαβής που έχει επιλέξει ο χρήστης. Αν η αρχική συνθήκη δεν είναι αληθής τότε ο αλγόριθμος μεταβαίνει στο προ τελευταίο βήμα, δηλαδή στην αποστολή σήματος στους επενεργητές και εν συνεχεία στον έλεγχο της λειτουργίας που έχει επιλεγεί. Στη συνέχεια περιγράφονται οι επιμέρους καταστάσεις λειτουργίας.

#### 4.5.1 Στατική λαβή αντικειμένου

Σε περίπτωση επιλογής της πρώτης κατάστασης λειτουργίας, στατική λαβή αντικειμένου (GM1), αν ο αισθητήρας δύναμης δεν είναι ενεργοποιημένος, η κάμψη των δαχτύλων του χρήστη προκαλεί αντίστοιχη κίνηση του ρομποτικού δαχτύλου. Πιο συγκεκριμένα η κίνηση του τελευταίου είναι συζευγμένη με την αυτής του μέσου. Η γωνία της πρώτης άρθρωσης της διάταξης ισούται με μηδέν, καθώς με βάση τους περιορισμούς των δαχτύλων και τη Σχέση (2.18) ακολουθείται η προσέγγιση ότι  ${}^m\theta_1 = 0$ , όπου ο πάνω αριστερά δείκτης υποδεικνύει το δάχτυλο που χρησιμοποιείται κάθε φορά, έτσι  $e, m$  είναι το επιπρόσθετο ρομποτικό δάχτυλο και ο μέσος αντίστοιχα. Επομένως ισχύει:

$${}^e\theta_1 = {}^m\theta_1 = 0 \quad (4.26)$$

Για οποιαδήποτε μεταβολή των γωνιών  ${}^m\theta_i$  του μέσου, έχει οριστεί ότι οι γωνίες των αρθρώσεων του ρομποτικού δαχτύλου δίνονται από την παρακάτω σχέση:

$${}^e\theta_i = -{}^m\theta_i, \quad i = 2, \dots, 4 \quad (4.27)$$

Όταν το ρομποτικό δάχτυλο έρθει σε επαφή με το αντικείμενο, έστω τη χρονική στιγμή  $t_0$ , και ενεργοποιηθεί ο αισθητήρας (FSR), δηλαδή έχει πραγματοποιηθεί η λαβή, για τις τρεις πρώτες αρθρώσεις θα ισχύει:

$${}^e\theta_i(t_0 + n\delta t) = -({}^m\theta_i(t_0 + n\delta t)), \quad i = 1, \dots, 3 \quad (4.28)$$

ενώ η τέταρτη  ${}^e\theta_4$ , περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$${}^e\theta_4(t_0 + n\delta t) = -({}^m\theta_4(t_0 + n\delta t) + k) \quad (4.29)$$

όπου  $\delta t = 10 \text{ ms}$  ο χρόνος εκτέλεσης του βρόγχου ελέγχου,  $n$  το πλήθος των χρονικών δειγμάτων από τη στιγμή που θα ενεργοποιηθεί ο αισθητήρας δύναμης και  $k$  μία σταθερά, η τιμή της οποίας προσεγγίστηκε πειραματικά. Η σταθερά αυτή αυξάνει την τιμή της τελευταίας άρθρωσης με αποτέλεσμα η τελευταία φάλαγγα να πιέζει το αντικείμενο περισσότερο. Η επιλογή της είναι τέτοια ώστε να εξασφαλίζει μια σταθερή λαβή, με το χρήστη να αποκτά την αίσθηση ότι το αντικείμενο δεν θα ολισθήσει και θα μπορέσει να το μετακινήσει με ασφάλεια. Για πολύ μικρές τιμές η λαβή αντικειμένων μεγαλύτερου βάρους εξαρτάται αποκλειστικά από την δύναμη επιβολής του ανθρώπινου δαχτύλου και τις συνθήκες τριβής της επαφής. Σε αντίθεση μεγάλες τιμές θα έχουν ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση εύπλαστων αντικειμένων και την αδυναμία της άρθρωσης να μεταβεί στην επιθυμητή θέση όσον αφορά την περίπτωση λαβής άκαμπτων αντικειμένων. Όσο το χέρι δεν επανέρχεται στην αρχική θέση (πλήρης έκταση των δαχτύλων), ο αλγόριθμος παραμένει στην ίδια κατάσταση λειτουργίας (GM1).

#### 4.5.2 Αλλαγή προσανατολισμού αντικειμένου

Σε περίπτωση επιλογής της δεύτερης κατάστασης λειτουργίας, αλλαγή του προσανατολισμού ενός αντικειμένου ως προς την παλάμη (GM2), ο αλγόριθμος ακολουθεί την ίδια φιλοσοφία ως προς τον αρχικό έλεγχο κίνησης της διάταξης. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα αντικείμενα πρέπει να έχουν σχετικά μικρό βάρος ή να είναι τοποθετημένα πάνω σε μία επίπεδη επιφάνεια. Αν ο αισθητήρας δύναμης δεν είναι ενεργοποιημένος, η κάμψη των δαχτύλων του χρήστη προκαλεί αντίστοιχη κίνηση του ρομποτικού δαχτύλου με βάση τις Σχέσεις (4.26), (4.27).

Όταν το τελευταίο έρθει σε επαφή με το αντικείμενο και ενεργοποιηθεί ο αισθητήρας, έστω τη χρονική στιγμή  $t_0$ , τότε ο αλγόριθμος εισέρχεται σε κατάσταση μικροχειρισμού. Σε αυτή την λειτουργία οι τρεις πρώτες αρθρώσεις της διάταξης διατηρούν τις ίδιες γωνίες που είχαν τη χρονική στιγμή  $t_0$ , επομένως θα ισχύει:

$${}^e\theta_i(t_0 + n\delta t) = -{}^m\theta_i(t_0), \quad i = 1, \dots, 3 \quad (4.30)$$

Η γωνία της τέταρτης άρθρωσης υπολογίζεται με βάση την ακόλουθη σχέση:

$${}^e\theta_4(t_0 + n\delta t) = -[2 \quad {}^m\theta_4(t_0) - {}^m\theta_4(t_0 + n\delta t)] \quad (4.31)$$

Εφόσον το δάχτυλο του μέσου δεν κινείται, τότε αντίστοιχα και η θέση του ρομποτικού δαχτύλου παραμένει η ίδια, ενώ η ευστάθεια της λαβής καθορίζεται αποκλειστικά από τη δύναμη επιβολής του ανθρώπινου δαχτύλου. Σε αντίθετη περίπτωση, η φορά περιστροφής μεταξύ των δύο τελευταίων αρθρώσεων,  ${}^e\theta_4$  και  ${}^m\theta_4$  είναι αντίθετη, προκαλώντας την κύλιση του αντικειμένου ανάμεσα στα δύο ακροδάχτυλα και κατά συνέπεια την αλλαγή του προσανατολισμού του ως προς την παλάμη [65, 66]. Όσο το πλάτος του αντικειμένου μικραίνει τόσο μεγαλύτερη είναι και η αλλαγή που προκαλείται στον προσανατολισμό του κατά την κύλιση των δαχτύλων.

Από τη στιγμή που τα δάχτυλα θα έρθουν σε επαφή με το αντικείμενο και ο αλγόριθμος εισέλθει

σε λειτουργία μικροχειρισμού, η μεταβολή του προσανατολισμού του ακροδαχτύλου του μέσου  ${}^m\Delta\Phi$  μεταξύ των χρονικών στιγμών  $t_0$  και  $t_0 + n\delta t$ , θα πρέπει να ακολουθεί τον παρακάτω περιορισμό:

$$|{}^m\Delta\Phi| \leq \theta_{thresh} \quad (4.32)$$

όπου

$${}^m\Delta\Phi = {}^m\Phi(t_0 + n\delta t) - {}^m\Phi(t_0) \quad (4.33)$$

και  $\theta_{thresh}$  σταθερά, η τιμή της οποίας προσεγγίστηκε πειραματικά. Ο προσανατολισμός του ακροδαχτύλου του μέσου  $\Phi(t)$  ως προς το επίπεδο της παλάμης κατά τις χρονικές στιγμές  $t_0$  και  $t_0 + n\delta t$ , υπολογίζεται από το άθροισμα των γωνιών των τριών τελευταίων αρθρώσεων:

$${}^m\Phi(t) = \sum_{i=2}^4 {}^m\theta_i(t) \quad (4.34)$$

Η Σχέση (4.32) υποδηλώνει ότι τα ακροδάχτυλα δεν απομακρύνονται πολύ από τα αρχικά σημεία επαφής τους. Με αυτό τον τρόπο ο χρήστης εξαναγκάζεται να περιορίσει το εύρος της κύλισης κοντά στα αρχικά σημεία επαφής, ελαχιστοποιώντας έτσι τις απαιτούμενες εφαπτομενικές δυνάμεις για την εξασφάλιση μίας ευσταθούς λαβής. Επιπρόσθετα, μέσα από αυτή τη συνθήκη, η εκούσια μεγάλη μεταβολή των γωνιών μπορεί να αντιστοιχηθεί σε μία επιθυμητή απομάκρυνση των δαχτύλων από το αντικείμενο και κατά συνέπεια την αποδέσμευση του αντικειμένου από τα δάχτυλα.

Όταν συμβεί το τελευταίο, ο αλγόριθμος θα εξέλθει της λειτουργίας μικροχειρισμού αλλά θα παραμείνει στην επιλεγμένη κατάσταση λειτουργίας (GM2). Για να εισέλθει εκ νέου σε μικροχειρισμό, αρκεί ο χρήστης να ξαναπιάσει το αντικείμενο και να ενεργοποιηθεί ο αισθητήρας δύναμης. Η μετάβαση σε διαφορετική κατάσταση λειτουργίας πραγματοποιείται με την επαναφορά του χεριού στην αρχική θέση (Σχήμα 4.3a) και εκτέλεση του ανάλογου πλήθους κινήσεων του δείκτη.

### 4.5.3 Αλλαγή θέσης αντικειμένου

Σε περίπτωση επιλογής της τρίτης κατάστασης λειτουργίας (GM3), αλλαγή θέσης ενός αντικειμένου ως προς την παλάμη, ακολουθείται η ίδια λογική ως προς τον αρχικό έλεγχο κίνησης της διάταξης, όπως και στις δύο προηγούμενες λειτουργίες, επομένως ισχύουν οι Σχέσεις (4.26), (4.27).

Επιπρόσθετα, σε κάθε κύκλο ελέγχου υπολογίζεται η θέση των ακροδαχτύλων του μέσου και του επιπρόσθετου δαχτύλου από τα διανύσματα θέσης  ${}^mP$  και  ${}^eP$  αντίστοιχα, όπως αυτά ορίστηκαν από την ευθεία κινηματική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στις Ενότητες 2.3.2 και 2.5.4. Ακολουθώς υπολογίζεται το διάνυσμα που εκφράζει τη θέση του επιπρόσθετου δαχτύλου

ως προς το μέσο:

$$d = {}^e P - {}^m P \quad (4.35)$$

Όταν το ρομποτικό δάχτυλο έρθει σε επαφή με αντικείμενο και ενεργοποιηθεί ο αισθητήρας δύναμης, έστω τη χρονική στιγμή  $t_0$ , ο αλγόριθμος εισέρχεται σε λειτουργία μικροχειρισμού. Για να επιτευχθεί η μετακίνηση του αντικειμένου στο επίπεδο κίνησης των δαχτύλων του μέσου και του επιπρόσθετου ρομποτικού μέλους, θα πρέπει η κίνησή τους να είναι συζευγμένη κατάλληλα. Με βάση αυτή την προσέγγιση, υπολογίζεται εκ νέου το διάνυσμα θέσης του μέσου και με δεδομένο το διάνυσμα από τη Σχέση (4.35), προκύπτει η επιθυμητή θέση στην οποία θα πρέπει να μετακινηθεί το επιπρόσθετο δάχτυλο:

$${}^e P(t_0 + n\delta t) = {}^m P(t_0 + n\delta t) + d(t_0) \quad (4.36)$$

Ο επιθυμητός προσανατολισμός υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$${}^e \Phi(t_0 + n\delta t) = \sum_{i=2}^4 {}^m \theta_i(t_0 + n\delta t) \quad (4.37)$$

Στη συνέχεια με βάση την αντίστροφη κινηματική ανάλυση που υλοποιήθηκε στην Ενότητα 2.5.5 υπολογίζονται οι γωνίες της κάθε άρθρωσης και αποστέλλονται στους σερβοκινητήρες.

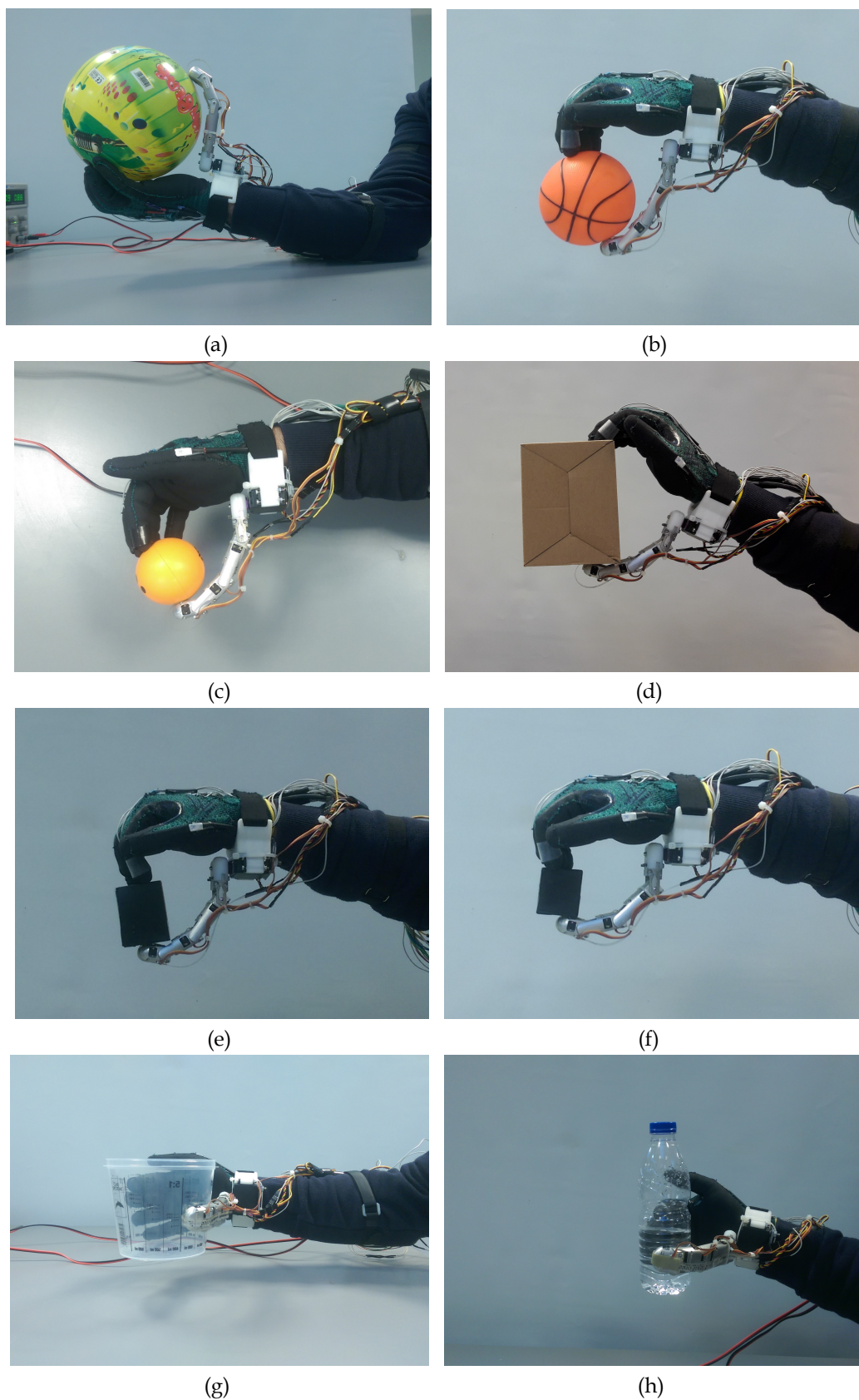
Όπως και στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις, η μετάβαση σε διαφορετική κατάσταση λειτουργίας πραγματοποιείται με την επαναφορά του χεριού στην αρχική θέση (Σχήμα 4.3a) και εκτέλεση του ανάλογου πλήθους κινήσεων του δείκτη.

## 4.6 Πειραματικά αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν με τις τρεις καταστάσεις λειτουργίας που υλοποιήθηκαν και παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

### 4.6.1 Στατική λαβή

Στην πρώτη κατάσταση λειτουργίας, εκτελέστηκαν πειράματα με αντικείμενα διαφορετικών μεγεθών και σχημάτων. Στο Σχήμα 4.8 απεικονίζονται ενδεικτικά κάποιες από τις λαβές που πραγματοποιήθηκαν, με τρεις μπάλες διαφορετικών διαμέτρων ( $\varnothing 220$ ,  $\varnothing 110$  και  $\varnothing 68$  mm), τρία χάρτινα κουτιά διαστάσεων  $145 \times 113 \times 110$  mm,  $63 \times 45 \times 49$  mm,  $46 \times 30 \times 40$  mm, ένα δοχείο δοσομέτρησης ( $\varnothing 120$  mm) και ένα μπουκάλι νερού. Όλα τα πειράματα διενεργήθηκαν χωρίς την υποβοήθηση του αντίχειρα. Η σκοπιμότητα της συγκεκριμένης επιλογής ήταν να διαπιστωθεί κατά πόσο το ρομποτικό δάχτυλο μπορεί να βοηθήσει άτομα που έχουν χάσει το συγκεκριμένο μέλος του χεριού τους. Ακολούθως ως *επαυξημένο χέρι* ορίζουμε το συνδυασμό του ρομποτικού δαχτύλου με τα τέσσερα εναπομείναντα ανθρώπινα δάχτυλα.



Σχήμα 4.8: Ενδεικτικές λαβές που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του ρομποτικού δαχτύλου (a) - (c) Μπάλες διαφορετικών διαμέτρων (d) - (f) Χάρτινα κουτιά, (g) Δοχείο δοσομέτρησης και (h) Μπουκάλι νερού.

Κριτήριο	Σφαίρα διαμέτρου 68 mm		Σφαίρα διαμέτρου 110 mm	
	Ανθρώπινο χέρι	Επαυξημένο χέρι	Ανθρώπινο χέρι	Επαυξημένο χέρι
$Q_{MSV}^a$	0.5024	1.0838	0.4947	1.1128
$Q_{VEW}^a$	2.8396	3.2616	3.6459	2.8901
$Q_{GII}^a$	0.0261	0.0907	0.0221	0.0990
$Q_{DSC}^a$	0.1640	0.2553	0.2086	0.3254
$Q_{VME}^a$	16.5929	4.7315	16.418	8.2144
$Q_{UOT}^b$	108.094	24.355	78.2719	20.064

Κριτήριο: <sup>a</sup> μεγιστοποίηση, <sup>b</sup> ελαχιστοποίηση

Πίνακας 4.2: Συγκριτικός πίνακας λαβής αντικειμένων με βάση τα διαφορετικά κριτήρια.

Τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας ήταν τα επιθυμητά, με το χρήστη να πραγματοποιεί με επιτυχία τις λαβές των αντικειμένων που προαναφέρθηκαν. Λόγω του μεγάλου μήκους του ρομποτικού δαχτύλου απαιτήθηκε μεγαλύτερη επιδεξιότητα εκ μέρους του χρήστη, ως προς την τοποθέτηση των δαχτύλων του, έτσι ώστε να πιάσει αντικείμενα μικρού μεγέθους.

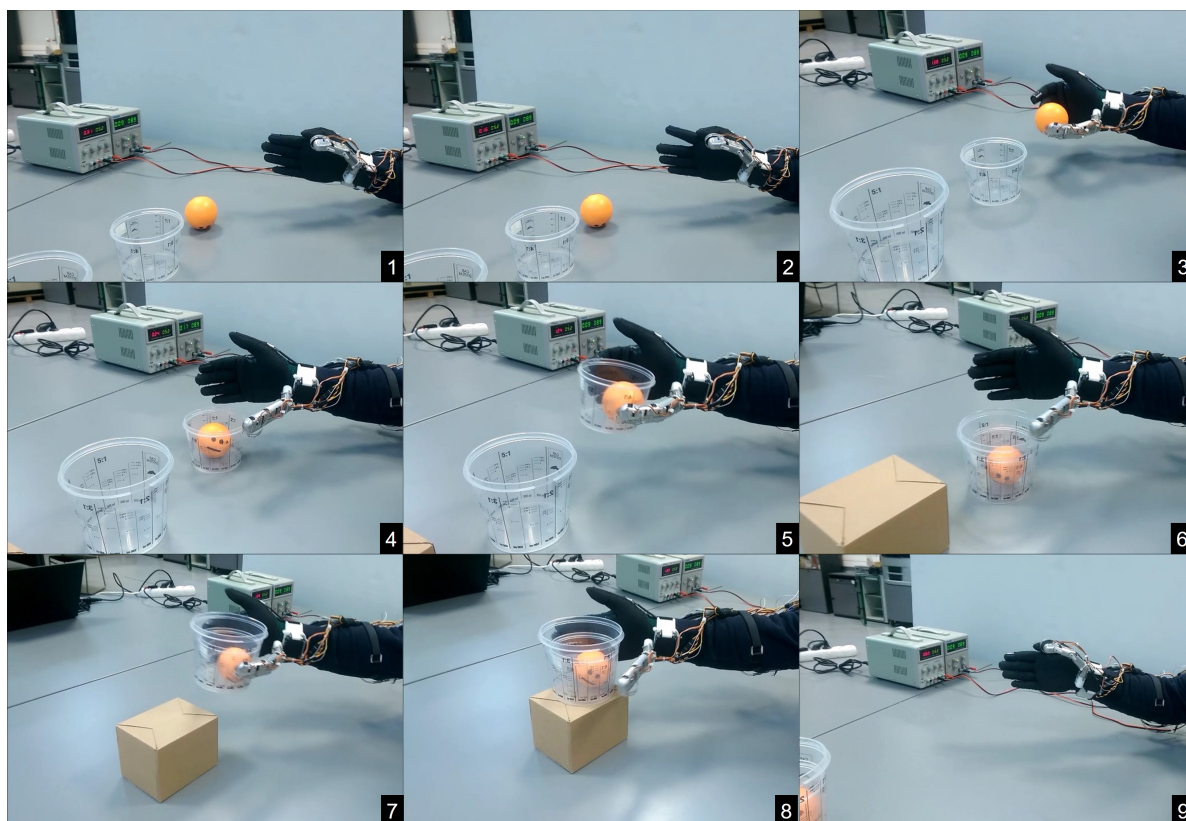
Για τη σύγκριση των λαβών του ανθρώπινου χεριού με αυτές του επαυξημένου, εξήχθησαν οι δείκτες με βάση τα κριτήρια που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 4.4. Το μοντέλο της επαφής που χρησιμοποιήθηκε είναι η σημειακή επαφή με τριβή (*Hard Finger, HF*). Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα από τη λαβή δύο σφαιρικών αντικειμένων διαφορετικής διαμέτρου. Όπως υποδεικνύει και το υπόμνημα του πίνακα, οι πέντε πρώτοι δείκτες θα πρέπει να μεγιστοποιούνται και ο τελευταίος να ελαχιστοποιείται για να θεωρηθεί ότι η λαβή είναι καλύτερη.

Στην πλειοψηφία τους παρουσιάζουν βελτίωση όταν η λαβή πραγματοποιείται με τη χρήση του ρομποτικού δαχτύλου και χωρίς την υποβοήθηση του αντίχειρα. Πιο συγκεκριμένα οι δείκτες  $Q_{GII}$  και  $Q_{UOT}$ , όπως αναλύθηκε και στην Ενότητα 4.4, θα πρέπει να πλησιάζουν τη μονάδα, που είναι και η βέλτιστη περίπτωση. Η αύξηση και μείωση που παρουσιάζουν αντίστοιχα υποδηλώνει ότι η λαβή του αντικειμένου έχει βελτιωθεί και άρα μπορεί να αντισταθμίσει με μεγαλύτερη ευκολία εξωτερικές διαταραχές.

Επομένως το συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί είναι ότι η αντιστάθμιση της απώλειας κάποιου μέλους του χεριού είναι εφικτή με τη χρήση μίας τέτοιας διάταξης. Επιπλέον μπορεί να βελτιωθεί η δυνατότητα λαβής και χειρισμού αντικειμένων. Αυτό οφείλεται και στην απλότητα του ελέγχου κίνησης, η οποία βοήθησε έτσι ώστε να μην απαιτηθεί αρκετός χρόνος για την εξοικείωση του χρήστη με τη διάταξη και τον τρόπο λειτουργίας της.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε πείραμα το οποίο περιελάμβανε την εκτέλεση διαδοχικών εργασιών από το χρήστη. Αυτές ήταν: α) η λαβή και τοποθέτηση μίας σφαίρας στο εσωτερικό ενός δοχείου, β) η λαβή και τοποθέτηση του δοχείου στο εσωτερικό ενός δοχείου μεγαλύτερης διαμέτρου και γ) η λαβή και τοποθέτηση όλων των προηγούμενων στην επάνω επιφάνεια ενός χάρτινου κουτιού. Στο Σχήμα 4.9 απεικονίζονται ενδεικτικά στιγμιότυπα της παραπάνω πειραματικής διαδικασίας. Στο πρώτο φαίνεται η εκκίνηση της διαδικασίας με τα δάχτυλα σε πλήρη έκταση και το ρομποτικό δάχτυλο στη θέση ηρεμίας, ενώ στο δεύτερο η διαδικασία επι-





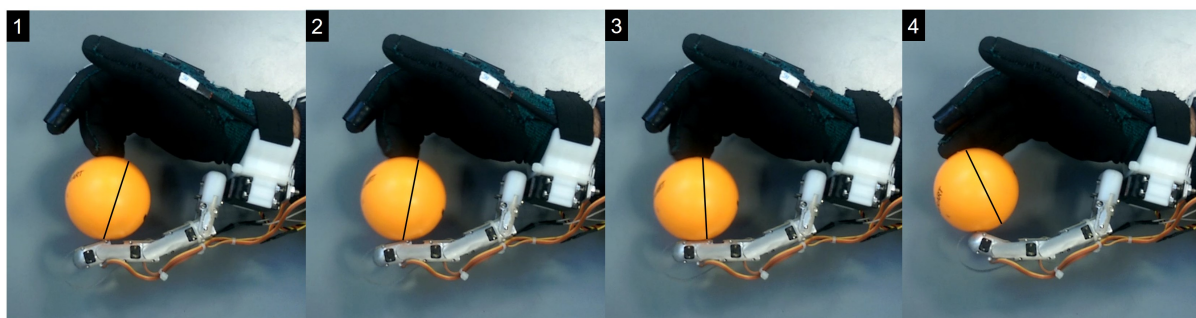
Σχήμα 4.9: Στιγμιότυπα εκτέλεσης διαδοχικών εργασιών στατικής λαβής.

λογής της επιθυμητής κατάστασης λειτουργίας. Στα στιγμιότυπα 3-8 φαίνονται οι επιμέρους εργασίες όπως αυτές περιγράφηκαν παραπάνω. Τέλος στο στιγμιότυπο 9 φαίνεται η επαναφορά των δαχτύλων, ρομποτικού και χεριού, στην αρχική θέση μετά το τέλος της διαδικασίας. Ο χρήστης μπόρεσε να ολοκληρώσει όλες τις εργασίες.

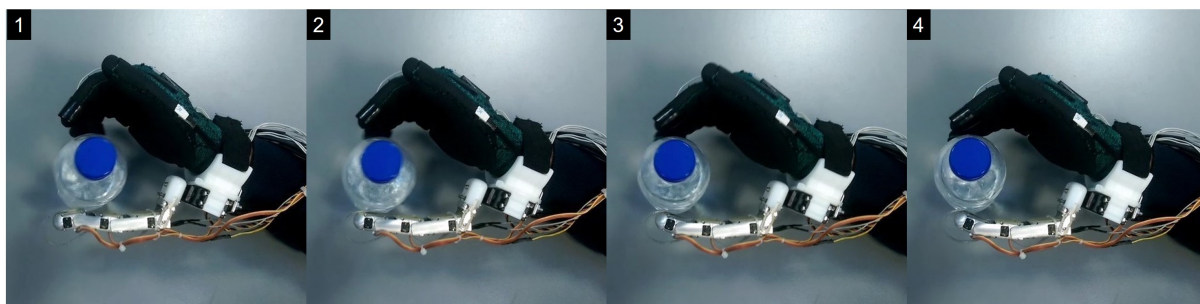
#### 4.6.2 Αλλαγή προσανατολισμού

Αναφορικά με τη δεύτερη κατάσταση λειτουργίας, εκτελέστηκαν πειράματα με δύο διαφορετικά αντικείμενα, μία σφαίρα και ένα μπουκάλι. Στο Σχήμα 4.10 απεικονίζονται ενδεικτικά στιγμιότυπα από τη λαβή και εν συνεχεία την κύλιση των αντικειμένων μεταξύ των δύο δαχτύλων, όπου φαίνεται η δυνατότητα αλλαγής του προσανατολισμού τους. Επίσης διακρίνονται οι γωνίες των τριών πρώτων αρθρώσεων του ρομποτικού δαχτύλου που παραμένουν σταθερές από τη στιγμή που ο αλγόριθμος εισέλθει σε λειτουργία μικροχειρισμού, καθώς ορίζονται από τη Σχέση (4.30). Επίσης στα στιγμιότυπα  $a1$ ,  $b1$  διακρίνεται και η διαφορετική διαμόρφωση της τελευταίας άρθρωσης του ρομποτικού δαχτύλου, όπως αυτή καθορίζεται από τη Σχέση (4.31).

Τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας ήταν τα επιθυμητά, με το χρήστη να πραγματοποιεί με επιτυχία αρχικά τη λαβή και στη συνέχεια την κύλιση του αντικειμένου. Σημαντικό στοιχείο της παραπάνω διαδικασίας, όπως αναφέρθηκε και στην ανάλυση της δεύτερης κατάστασης λειτουργίας (Ενότητα 4.5.2), είναι ο περιορισμός του εύρους κύλισης κοντά στα αρχικά σημεία επαφής, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί μία ευσταθής λαβή. Επιπρόσθετα, η τοποθέτηση των



(a)



(b)

Σχήμα 4.10: Στιγμιότυπα εκτέλεσης κύλισης που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του ρομποτικού δαχτύλου, (a) Μπάλα και (b) Μπουκάλι.

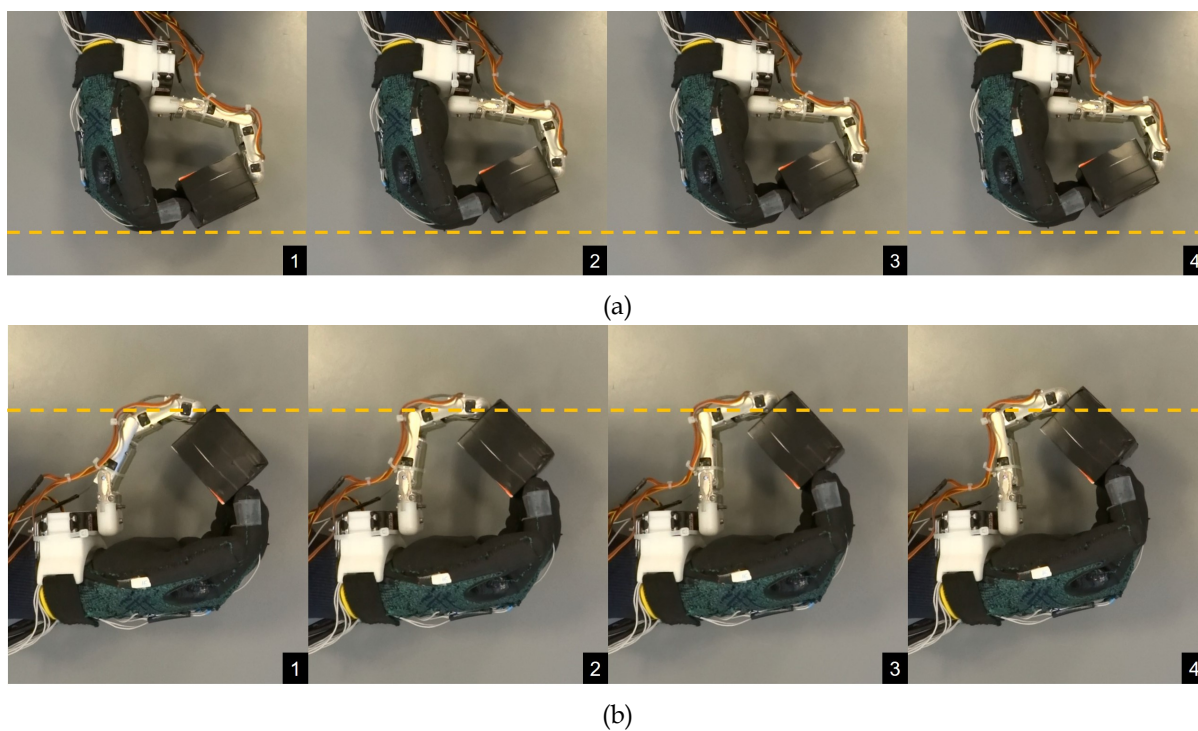
δαχτύλων του χεριού και κατά συνέπεια του ρομποτικού δαχτύλου θα πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει ευελιξία ως προς το χειρισμό του αντικειμένου για την εκτέλεση της κύλισης.

Τέλος, το μικρό βάρος της σφαίρας βοήθησε στην εκτέλεση της κύλισης χωρίς να τοποθετηθεί επάνω σε επιφάνεια. Αντίθετα το μεγάλο βάρος του μπουκαλιού κατέστησε αναγκαία την τοποθέτησή του επάνω σε επιφάνεια για την πραγματοποίηση του πειράματος.

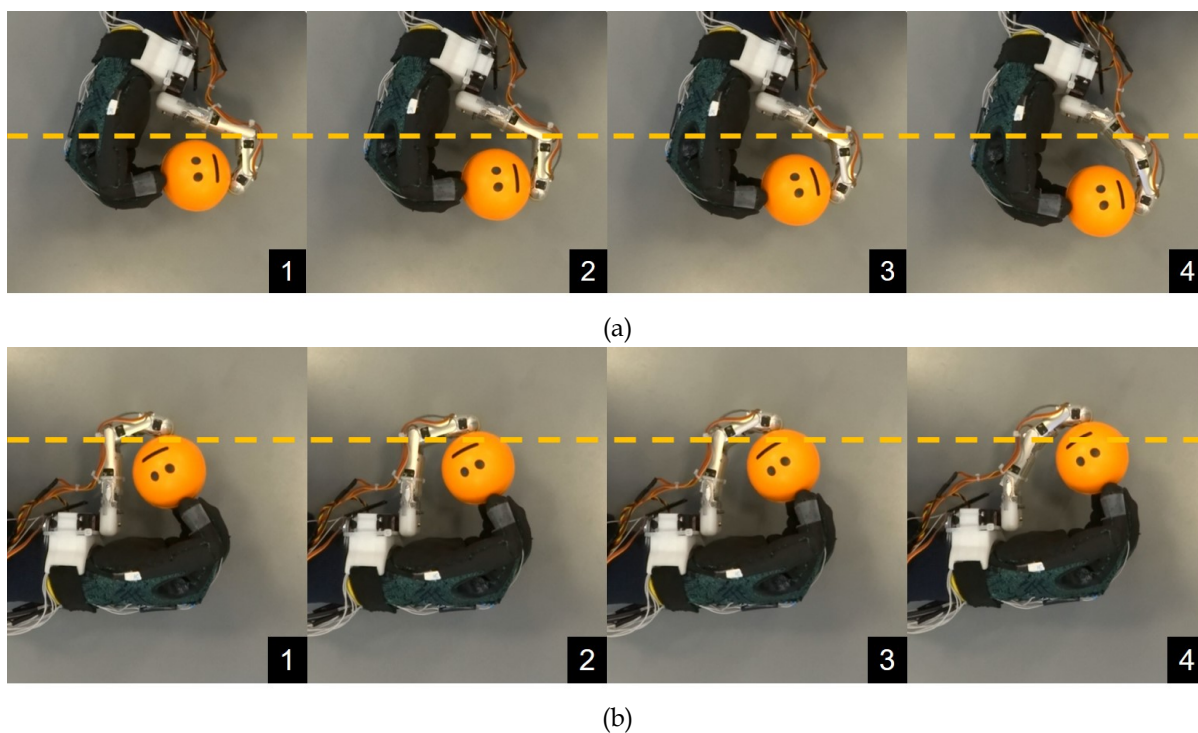
### 4.6.3 Αλλαγή θέσης

Τέλος, στην τρίτη κατάσταση λειτουργίας εκτελέστηκαν πειράματα με ένα χάρτινο κουτί και μία μπάλα. Στο Σχήμα 4.11 και 4.12 απεικονίζονται ενδεικτικά στιγμιότυπα από την εκτέλεση μετακίνησης του πρώτου και δεύτερου αντικειμένου αντίστοιχα, κατά τους άξονες  $x - y$ . Επίσης φαίνεται και η διαμόρφωση των γωνιών του ρομποτικού δαχτύλου όπως προέκυψαν από την επίλυση του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος.

Ο περιορισμός του εύρους της μετακίνησης εξασφάλισε την επιτυχή εκτέλεση των κινήσεων. Μεγάλες μεταβολές είχαν ως αποτέλεσμα να μην υπάρχει λύση για το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα με βάση και τον επιθυμητό προσανατολισμό. Επιπρόσθετα απαιτήθηκε μεγαλύτερη επιδεξιότητα εκ μέρους του χρήστη, συγκριτικά με τις δύο προηγούμενες καταστάσεις λειτουργίας, ως προς την τοποθέτηση των δαχτύλων του για τον καλύτερο χειρισμό των αντικειμένων.



Σχήμα 4.11: Στιγμιότυπα εκτέλεσης μετακίνησης του χάρτινου κουτιού στο επίπεδο, (a) Κατά τον  $x$  άξονα και (b) Κατά τον  $y$  άξονα.



Σχήμα 4.12: Στιγμιότυπα εκτέλεσης μετακίνησης μίας μπάλας στο επίπεδο, (a) Κατά τον  $x$  άξονα και (b) Κατά τον  $y$  άξονα.

## Κεφάλαιο 5

# Σχόλια, Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Εξέλιξη

### 5.1 Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η σχεδίαση, κατασκευή και ο έλεγχος ενός εξωσκελετικού επιπρόσθετου ρομποτικού δαχτύλου μέσω γαντιού συλλογής δεδομένων. Βασικός στόχος ήταν η διερεύνηση της δυνατότητας ενίσχυσης των ικανοτήτων του χεριού ανθρώπων με κινητικά προβλήματα, λειτουργώντας ως συμπληρωματικό μέλος. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν από τις μελέτες αυτές, καθώς επίσης και μια σειρά από προτάσεις για περαιτέρω βελτιώσεις και αναβαθμίσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν στην πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε.

### 5.2 Σχόλια και συμπεράσματα

Το βασικό συμπέρασμα που προέκυψε από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του ρομποτικού δαχτύλου είναι ότι η χρήση μίας τέτοιας διάταξης μπορεί να αντισταθμίσει την απώλεια κάποιου μέλους του χεριού, αλλά και να βελτιώσει τη δυνατότητα λαβής και χειρισμού αντικειμένων, λειτουργώντας ως συμπληρωματικό μέλος. Αυτό οφείλεται και στην απλότητα του ελέγχου κίνησης, η οποία βοήθησε έτσι ώστε να μην απαιτηθεί αρκετός χρόνος για την εξοικείωση του χρήστη με τη διάταξη και τον τρόπο λειτουργίας της.

Πιο συγκεκριμένα από τις τρεις καταστάσεις λειτουργίας που προτάθηκαν, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα επιλογής μεταξύ της λαβής και του μικροχειρισμού αντικειμένων, με τη δεύτερη να περιλαμβάνει την αλλαγή προσανατολισμού και θέσης του αντικειμένου ως προς την παλάμη. Όλα τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν χωρίς την υποβοήθηση του αντίχειρα, καθώς στόχος ήταν να διαπιστωθεί κατά πόσο το ρομποτικό δάχτυλο μπορεί να βοηθήσει άτομα που έχουν χάσει το συγκεκριμένο δάχτυλο του χεριού τους.

Από τα πειράματα που διεξήχθησαν με την πρώτη κατάσταση λειτουργίας, στατική λαβή (Ενό-

τητα 4.6.1), ο χρήστης πραγματοποίησε με επιτυχία μία σειρά από λαβές με αντικείμενα διαφορετικών μεγεθών και σχημάτων. Μεγαλύτερη επιδεξιότητα ως προς την τοποθέτηση των δαχτύλων απαιτήθηκε σε περιπτώσεις αντικειμένων μικρού μεγέθους, γεγονός το οποίο πιθανώς να οφείλεται στο μεγάλο μήκος των συνδέσμων του ρομποτικού δαχτύλου. Η εξαγωγή των δεικτών (Πίνακας 4.2) με βάση τα κριτήρια που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 4.4 για την ποσοτικοποίηση μίας λαβής επιβεβαίωσε ότι η χρήση μίας τέτοιας διάταξης μπορεί να αντισταθμίσει την απώλεια κάποιου μέλους του χεριού.

Από τα πειράματα που διεξήχθησαν με την δεύτερη κατάσταση λειτουργίας, αλλαγή προσανατολισμού (Ενότητα 4.6.2), ο χρήστης μπόρεσε να πραγματοποιήσει την κύλιση αντικειμένων μεταξύ του μέσου και του επιπρόσθετου δαχτύλου με αποτέλεσμα την αλλαγή του προσανατολισμού τους ως προς την παλάμη. Η εφαρμογή περιορισμών ως προς τη μεταβολή του προσανατολισμού των δαχτύλων οριοθέτησε το εύρος της κύλισης κοντά στα αρχικά σημεία επαφής, εξασφαλίζοντας με αυτό τον τρόπο μία ευσταθή λαβή.

Τα πειραματικά αποτελέσματα από την τρίτη κατάσταση λειτουργίας, αλλαγή θέσης (Ενότητα 4.6.3), ανέδειξαν την ανάγκη περιορισμού της μετακίνησης των αντικειμένων κατά τους άξονες x-y, έτσι ώστε το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα να έχει λύση για τον ζητούμενο προσανατολισμό. Επιπρόσθετα απαιτήθηκε μεγαλύτερη επιδεξιότητα εκ μέρους του χρήστη, συγκριτικά με τις δύο προηγούμενες καταστάσεις λειτουργίας, ως προς την τοποθέτηση των δαχτύλων του για τον καλύτερο χειρισμό των αντικειμένων.

Από τις ενδεικτικές λαβές που πραγματοποιήθηκαν με αντικείμενα διαφορετικών μεγεθών, σχημάτων αλλά και βάρους προκύπτουν συμπεράσματα σχετικά με τη γενικότερη απόδοση της διάταξης όσον αφορά στην πραγματοποίηση καθημερινών δραστηριοτήτων. Αυτές οι δραστηριότητες μπορούν να περιλαμβάνουν τη δυνατότητα συγκράτησης και χειρισμού μεγάλων ή ακανόνιστου σχήματος αντικειμένων, αλλά και την εκτέλεση σύνθετων εργασιών. Πιθανά παραδείγματα τέτοιων εργασιών είναι η συγκράτηση ενός δοχείου ή μπουκαλιού είτε με το αριστερό χέρι, είτε με το δεξί με τη χρήση του ρομποτικού δαχτύλου και άνοιγμα του καπακιού με το ελεύθερο χέρι, αντίστοιχα η συγκράτηση ενός ποτηριού και το γέμισμά του από μπουκάλι με το άλλο χέρι. Στην περίπτωση που ο χρήστης διαθέτει μόνο ένα λειτουργικό χέρι είναι πιθανή η εκτέλεση εργασιών όπως το άνοιγμα μίας πόρτας με τα ανθρώπινα δάχτυλα και η συγκράτηση π.χ. μίας τσάντας με το ρομποτικό δάχτυλο. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες περιπτώσεις δυσκολία εμφανίζεται κατά τη λαβή και χειρισμό πολύ μικρών αντικειμένων, π.χ. ένα στυλό, αλλά και αντικειμένων μεγάλου βάρους, π.χ. ένα γεμάτο μπουκάλι νερό. Το βάρος των αντικειμένων που μπορεί να σηκώσει και να χειριστεί ο χρήστης εξαρτάται άμεσα από τη ροπή που μπορούν να αποδώσουν οι σερβοκινητήρες του ρομποτικού δαχτύλου.

Όσον αφορά στην υλοποίηση του γαντιού συλλογής δεδομένων υπήρξαν σημαντικές βελτιώσεις συγκριτικά με το αρχικό πρωτότυπο [50]. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε γάντι με μικρότερο πάχος και μεγαλύτερη ελαστικότητα ενώ η διαφορετική τοποθέτηση των αισθητήρων πρόσθεσε επιπλέον λειτουργικότητα. Τέλος η κύρια αναβάθμιση βασίζεται στην υλοποίηση ενός νέου ηλεκτρονικού κυκλώματος, για την καταγραφή των γωνιών με μεγαλύτερη ακρίβεια, που ενσωματώνεται σε μία πιο συμπαγή πλακέτα.

Κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης των αισθητήρων, παρατηρήθηκε σε πολλές περιπτώσεις αστάθεια σε επαναλαμβανόμενες μετρήσεις, διαφορετική συμπεριφορά από αισθητήρα σε αισθητήρα, όπως επίσης και μεγάλη απόκλιση από την τιμή που ορίζει ο κατασκευαστής όταν βρίσκονται σε επίπεδη θέση. Με την υλοποίηση κατάλληλου κυκλώματος ενίσχυσης επιτεύχθηκε μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα στην καταγραφή του σήματος των αισθητήρων. Επιπλέον η δυνατότητα ρύθμισης των επιμέρους στοιχείων του κυκλώματος παρέχει ευελιξία για την αξιοποίηση αντίστοιχων αισθητηρίων λαμβάνοντας υπόψη το εύρος μεταβολής της αντίστασής τους. Για την επιβεβαίωση των θεωρητικών υπολογισμών και της λειτουργικότητας του κυκλώματος ενίσχυσης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό προσομοίωσης OrCad.

Ιδιαίτερη πρόκληση αποτέλεσε η σχεδίαση του κυκλώματος για την κατασκευή των βοηθητικών πλακετών επέκτασης καθώς στόχος ήταν το όσο δυνατόν μικρότερο μέγεθος έτσι ώστε το σύστημα να είναι φορητό και να μπορεί να τοποθετηθεί με ευκολία στο χέρι του χρήστη. Μεγάλο πλεονέκτημα στη σχεδίαση και υλοποίηση του συγκεκριμένου κυκλώματος είναι η δυνατότητα μέτρησης της αντίστασης των ποτενσιομέτρων χωρίς να χρειάζεται να αφαιρεθούν από την πλακέτα, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα μικρορυθμίσεων όπου είναι απαραίτητο ή ακόμα και νέα ρύθμιση στην περίπτωση αλλαγής αισθητήρα.

Η υλοποίηση του μοντέλου ενός χεριού σε περιβάλλον Simscape/Multibody, για την εικονική αναπαράσταση της κίνησης του με βάση τις γωνίες που καταγράφονται από το μικροελεγκτή, έδωσε τη δυνατότητα αξιολόγησης της λειτουργικότητας του γαντιού. Το σύστημα λειτουργεί γρήγορα και παρέχει μία αρκετά καλή αίσθηση στο χρήστη. Από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν επιβεβαιώθηκε η καλή λειτουργία του συστήματος καταγραφής των γωνιών των αρθρώσεων καθώς η αναπαράσταση γινόταν με αρκετή μεγάλη ακρίβεια. Επιβεβαιώθηκε επίσης και η δυσκολία της σωστής καταγραφής των γωνιών της καρπομετακάρπιας άρθρωσης του αντίχειρα λόγω των περιορισμένων επιλογών ως προς την τοποθέτηση του αισθητήρα, με την απεικόνιση να είναι σε αρκετές περιπτώσεις διαφορετική από την πραγματική θέση του αντίχειρα. Η συγκεκριμένη υλοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση και άλλων εφαρμογών που καταγράφουν την κίνηση ενός χεριού.

### 5.3 Μελλοντική εξέλιξη

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται μια σειρά από βελτιώσεις και αναβαθμίσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν στις πειραματικές διατάξεις που αναπτύχθηκαν κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, αλλά και προτάσεις για μελλοντική εξέλιξη της έρευνας που διενεργήθηκε με αυτές.

Αναφορικά με τη ρομποτική διάταξη προτείνονται μία σειρά από βελτιώσεις οι οποίες έχουν να κάνουν τόσο με το κατασκευαστικό κομμάτι όσο και με το λογισμικό που αναπτύχθηκε για τον έλεγχο του συστήματος. Αρχικά προτείνεται η επανασχεδίαση της βάσης έτσι ώστε να μην απαιτείται η προσθήκη του εξαρτήματος για τη σταθεροποίηση της διάταξης. Επίσης η τοποθέτηση μαλακών επιθεμάτων (pads) στο εσωτερικό των συνδέσμων θα βοηθήσει στην καλύτερη προσαρμογή του δαχτύλου στο αντικείμενο.

Η βαθμονόμηση του αισθητήρα δύναμης, με κατάλληλη τροποποίηση του αλγόριθμου, θα προσδώσει περισσότερες δυνατότητες ως προς τον έλεγχο της διάταξης καθώς θα μπορεί να ελέγχεται η δύναμη με την οποία συγκρατείται ένα αντικείμενο. Επίσης η επιλογή ενός αισθητήρα με μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής θα παρέχει αυξημένη ευελιξία ως προς την υλοποίηση διαφορετικών νόμων ελέγχου. Για τον πλήρη έλεγχο της διάταξης προτείνεται η τροποποίηση της καλωδίωσης των σερβοκινητήρων για την "ανάγνωση" της μεσαίας λήψης του ποτενσιόμετρου και την υλοποίηση ελέγχου κλειστού βρόγχου. Η προσθήκη κατάλληλων μπαταριών για την τροφοδότηση τόσο των ηλεκτρικών κυκλωμάτων όσο και των σερβοκινητήρων θα καταστήσει το σύστημα φορητό.

Προτείνεται επίσης η διερεύνηση ανάπτυξης ενός νέου πρωτότυπου με μικρότερο μήκος συνδέσμων, το οποίο πιθανώς να παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία ως προς τη λαβή και το μικροχειρισμό αντικειμένων μικρότερου μεγέθους. Η νέα διάταξη θα μπορούσε να είναι είτε πλήρως επενεργούμενη, είτε υποεπενεργούμενη με την κίνηση να μεταφέρεται στους τελικούς συνδέσμους μέσω μεταλλικού τένοντα. Η τελευταία θα βοηθήσει στην καλύτερη προσαρμογή του δαχτύλου στο αντικείμενο, ενώ δεν απαιτεί και σύνθετους νόμους ελέγχου.

Μία εναλλακτική πρόταση ως προς τον έλεγχο κίνησης της διάταξης είναι η χρήση αισθητήρων ηλεκτρομυογραφίας, αντί του γαντιού συλλογής δεδομένων, έτσι ώστε να μειωθεί ο όγκος των διατάξεων που τοποθετούνται στο χέρι. Επιπρόσθετα με αυτή την υλοποίηση ο χρήστης θα αποκτήσει καλύτερη αίσθηση κατά τη λαβή αντικειμένων.

Αναφορικά με το γάντι συλλογής δεδομένων προτείνεται η διερεύνηση χρήσης διαφορετικού τύπου αισθητήρα (stretch sensors) για την καταγραφή των γωνιών των αρθρώσεων ή τη χρήση αισθητήρων κάμψης καλύτερης ποιότητας δεδομένης της ασταθούς συμπεριφοράς των τελευταίων σε επαναλαμβανόμενες μετρήσεις.

Όπως προαναφέρθηκε στις Ενότητες 3.3.4 και 3.4 η καταγραφή των γωνιών των δύο πρώτων αρθρώσεων του αντίχειρα παρουσιάζει δυσκολίες λόγω των περιορισμένων επιλογών ως προς την τοποθέτηση των αισθητήρων. Προτείνεται είτε η διερεύνηση διαφορετικής τοποθέτησης πάνω στο γάντι είτε η χρήση διαφορετικών αισθητήρων, όπως επιταχυνσιόμετρα. Επίσης η τοποθέτηση αισθητήρων για την καταγραφή της κίνησης απαγωγής/προσαγωγής των υπόλοιπων τεσσάρων δαχτύλων θα βοηθήσει στην πιο ολοκληρωμένη καταγραφή των κινήσεων του χεριού.

# Βιβλιογραφία

- [1] J. L. Pons *et al.*, “Wearable robots: biomechatronic exoskeletons,” 2008.
- [2] H. Kawamoto, “Wearable robot technology,” in *Cybernetics*, pp. 21–39, Springer, 2014.
- [3] C. Davenport, F. Parietti, and H. H. Asada, “Design and biomechanical analysis of supernumerary robotic limbs,” in *ASME 2012 5th Annual Dynamic Systems and Control Conference joint with the JSME 2012 11th Motion and Vibration Conference*, pp. 787–793, American Society of Mechanical Engineers, 2012.
- [4] B. Llorens-Bonilla, F. Parietti, and H. H. Asada, “Demonstration-based control of supernumerary robotic limbs,” in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 3936–3942, IEEE, 2012.
- [5] B. Llorens-Bonilla and H. H. Asada, “Control and coordination of supernumerary robotic limbs based on human motion detection and task petri net model,” in *Asme 2013 Dynamic Systems and Control Conference*, pp. V002T27A006–V002T27A006, American Society of Mechanical Engineers, 2013.
- [6] F. Parietti and H. H. Asada, “Dynamic analysis and state estimation for wearable robotic limbs subject to human-induced disturbances,” in *Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on*, pp. 3880–3887, IEEE, 2013.
- [7] F. Parietti, K. Chan, and H. H. Asada, “Bracing the human body with supernumerary robotic limbs for physical assistance and load reduction,” in *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on*, pp. 141–148, IEEE, 2014.
- [8] F. Parietti and H. H. Asada, “Supernumerary robotic limbs for aircraft fuselage assembly: body stabilization and guidance by bracing,” in *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on*, pp. 1176–1183, IEEE, 2014.
- [9] B. L. Bonilla and H. H. Asada, “A robot on the shoulder: Coordinated human-wearable robot control using coloured petri nets and partial least squares predictions,” in *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on*, pp. 119–125, IEEE, 2014.
- [10] F. Y. Wu and H. Asada, “Bio-artificial synergies for grasp posture control of supernumerary robotic fingers,” 2014.
- [11] F. Wu and H. Asada, “Supernumerary robotic fingers: an alternative upper-limb prosthesis,” in *ASME 2014 Dynamic Systems and Control Conference*, pp. V002T16A009–V002T16A009, American Society of Mechanical Engineers, 2014.
- [12] F. Y. Wu and H. H. Asada, ““hold-and-manipulate” with a single hand being assisted by wearable extra fingers,” in *Robotics and Automation (ICRA), 2015 IEEE International Conference on*, pp. 6205–6212, IEEE, 2015.



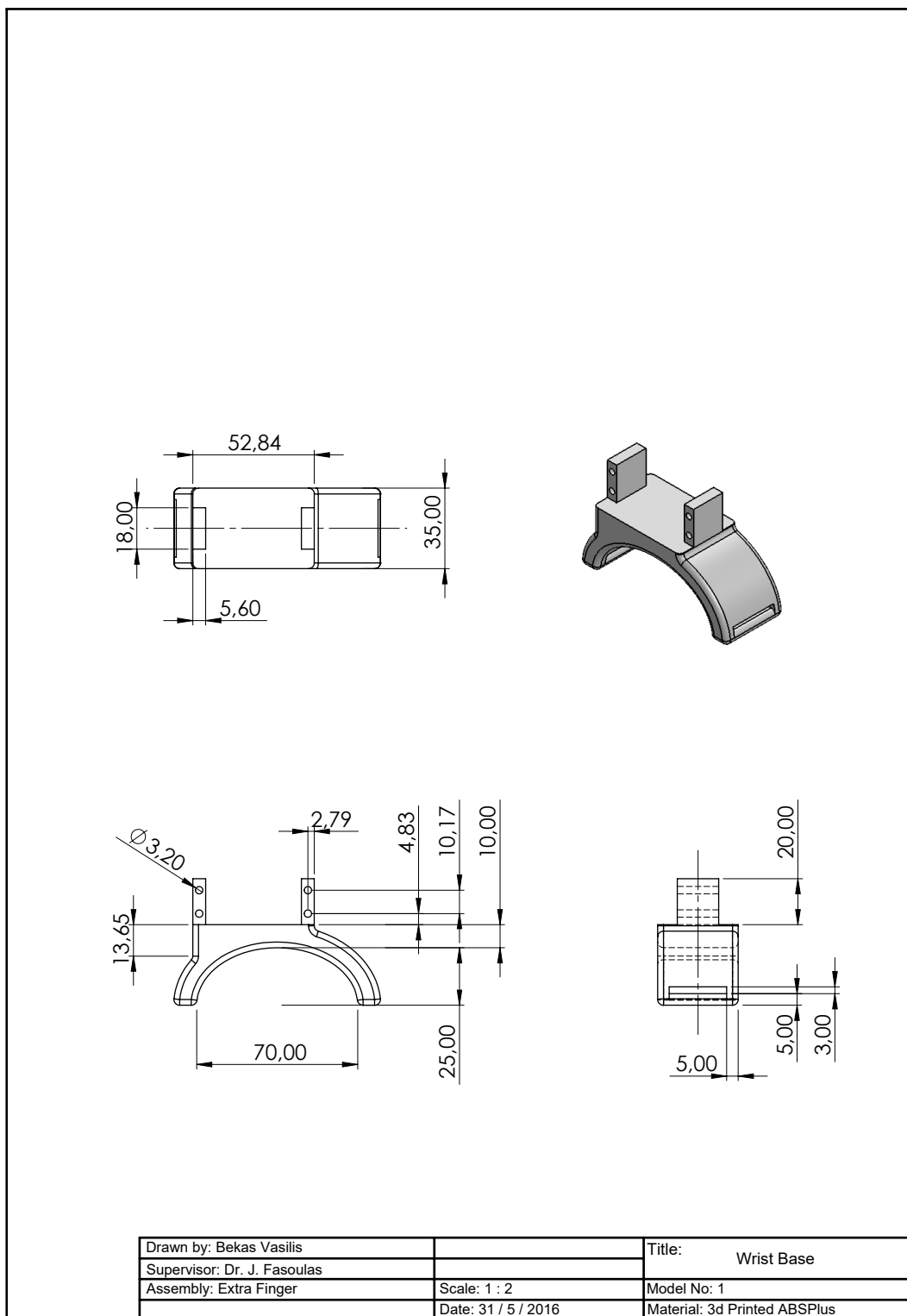
- [13] T. Ort, F. Wu, N. C. Hensel, and H. H. Asada, "Supernumerary robotic fingers as a therapeutic device for hemiparetic patients," in *ASME 2015 Dynamic Systems and Control Conference*, pp. V002T27A010–V002T27A010, American Society of Mechanical Engineers, 2015.
- [14] S.-w. Leigh and P. Maes, "Body integrated programmable joints interface," in *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 6053–6057, ACM, 2016.
- [15] "Myo armband." <http://myo.com/>. Last Accessed: 27-02-2017.
- [16] D. Prattichizzo, M. Malvezzi, I. Hussain, and G. Salvietti, "The sixth-finger: a modular extra-finger to enhance human hand capabilities," in *The 23rd IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 993–998, IEEE, 2014.
- [17] I. Hussain, G. Salvietti, M. Malvezzi, and D. Prattichizzo, "Design guidelines for a wearable robotic extra-finger," in *Research and Technologies for Society and Industry Leveraging a better tomorrow (RTSI), 2015 IEEE 1st International Forum on*, pp. 54–60, IEEE, 2015.
- [18] I. Hussain, L. Meli, C. Pacchierotti, G. Salvietti, and D. Prattichizzo, "Vibrotactile haptic feedback for intuitive control of robotic extra fingers," in *Proc. IEEE World Haptics Conference (WHC), (Chicago, IL), 2015*.
- [19] D. Prattichizzo, G. Salvietti, F. Chinello, and M. Malvezzi, "An object-based mapping algorithm to control wearable robotic extra-fingers," in *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2014 IEEE/ASME International Conference on*, pp. 1563–1568, IEEE, 2014.
- [20] I. Hussain, G. Salvietti, L. Meli, C. Pacchierotti, D. Cioncoloni, S. Rossi, and D. Prattichizzo, "Using the robotic sixth finger and vibrotactile feedback for grasp compensation in chronic stroke patients," in *Rehabilitation Robotics (ICORR), 2015 IEEE International Conference on*, pp. 67–72, IEEE, 2015.
- [21] G. Salvietti, I. Hussain, and D. Prattichizzo, "The robotic sixth finger: a wearable compensatory tool to regain grasping capabilities in paretic hands,"
- [22] I. Hussain, G. Salvietti, G. Spagnoletti, and D. Prattichizzo, "The soft-sixthfinger: a wearable emg controlled robotic extra-finger for grasp compensation in chronic stroke patients," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 1, no. 2, pp. 1000–1006, 2016.
- [23] I. Hussain, G. Spagnoletti, G. Salvietti, and D. Prattichizzo, "an emg interface for the control of motion and compliance of a supernumerary robotic finger," *Frontiers in Neurobotics*, vol. 10, 2016.
- [24] I. Hussain, G. Salvietti, and D. Prattichizzo, "On control interfaces for the robotic sixth finger," in *Proceedings of the 7th Augmented Human International Conference 2016*, p. 49, ACM, 2016.
- [25] G. Salvietti, I. Hussain, D. Cioncoloni, S. Taddei, S. Rossi, and D. Prattichizzo, "Compensating hand function in chronic stroke patients through the robotic sixth finger," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2016.
- [26] I. Hussain, G. Salvietti, G. Spagnoletti, D. Cioncoloni, S. Rossi, and D. Prattichizzo, "A soft robotic extra-finger and arm support to recover grasp capabilities in chronic stroke patients," in *Wearable Robotics: Challenges and Trends*, pp. 57–61, Springer, 2017.
- [27] M. Sobajima, Y. Sato, W. Xufeng, and Y. Hasegawa, "Improvement of operability of extra robotic thumb using tactile feedback by electrical stimulation," in *Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS), 2015 International Symposium on*, pp. 1–3, IEEE, 2015.
- [28] H. Shikida and Y. Hasegawa, "Hand space change after use of extra robotic thumb," in *Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS), 2016 International Symposium on*, pp. 1–4, IEEE, 2016.

- [29] D. J. Sturman and D. Zeltzer, "A survey of glove-based input," *IEEE Computer graphics and Applications*, vol. 14, no. 1, pp. 30–39, 1994.
- [30] L. Dipietro, A. M. Sabatini, and P. Dario, "A survey of glove-based systems and their applications," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 38, no. 4, pp. 461–482, 2008.
- [31] P. Kumar, J. Verma, and S. Prasad, "Hand data glove: a wearable real-time device for human-computer interaction," *International Journal of Advanced Science and Technology*, vol. 43, 2012.
- [32] C. S. Ingulkar, A. Gaikwad, and P. Narhe, "Hand data glove: A wearable real time device for human computer interaction," *International Journal of Science and Engineering*, vol. 1, pp. 99–104, 2013.
- [33] "Noitom hi5." <http://hi5vrglove.com/>. Last Accessed: 03-02-2017.
- [34] C.-P. Tung and A. C. Kak, "Automatic learning of assembly tasks using a dataglove system," in *Intelligent Robots and Systems 95. Human Robot Interaction and Cooperative Robots', Proceedings. 1995 IEEE/RSJ International Conference on*, vol. 1, pp. 1–8, IEEE, 1995.
- [35] A. Sharma, K. Lewis, V. Ansari, and V. Noronha, "Design and implementation of anthropomorphic robotic arm," *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 4, no. 1, pp. 73–79, 2014.
- [36] M. R. Huertas, J. R. M. Romero, and H. A. M. Venegas, "A robotic arm telemanipulated through a digital glove," in *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, 2007. CERMA 2007*, pp. 470–475, IEEE, 2007.
- [37] N. X. Tran, H. Phan, V. V. Dinh, J. Ellen, B. Berg, J. Lum, E. Alcantara, M. Bruch, M. G. Ceruti, C. Kao, *et al.*, "Wireless data glove for gesture-based robotic control," in *International Conference on Human-Computer Interaction*, pp. 271–280, Springer, 2009.
- [38] A. Z. Shukor, M. F. Miskon, M. H. Jamaluddin, F. bin Ali, M. F. Asyraf, M. B. bin Bahar, *et al.*, "A new data glove approach for malaysian sign language detection," *Procedia Computer Science*, vol. 76, pp. 60–67, 2015.
- [39] K. Wan, N. H. B. Adnan, A. Shahrman, S. K. Za'ba, M. A. A. Aziz, and Z. M. Yusof, "Gesture recognition based on hand postures and trajectories by using dataglove: A fuzzy probability approach—a review," 2012.
- [40] T. Kuroda, Y. Tabata, A. Goto, H. Ikuta, M. Murakami, *et al.*, "Consumer price data-glove for sign language recognition," in *Proc. of 5th Intl Conf. Disability, Virtual Reality Assoc. Tech., Oxford, UK*, pp. 253–258, 2004.
- [41] "Sign language translation." [http://people.ece.cornell.edu/land/courses/ece4760/FinalProjects/s2012/sl787\\_rak248\\_sw525\\_fl229/sl787\\_rak248\\_sw525\\_fl229/](http://people.ece.cornell.edu/land/courses/ece4760/FinalProjects/s2012/sl787_rak248_sw525_fl229/sl787_rak248_sw525_fl229/). Last Accessed: 30-01-2017.
- [42] "Sign language translation." <https://goo.gl/951jIr>. Last Accessed: 30-01-2017.
- [43] S. Micera, E. Cavallaro, R. Belli, F. Zaccone, E. Gulielmelli, P. Dario, D. Collarini, B. Martinelli, C. Santin, and R. Marcovich, "Functional assessment of hand orthopedic disorders using a sensorised glove: preliminary results," in *Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA'03. IEEE International Conference on*, vol. 2, pp. 2212–2217, IEEE, 2003.
- [44] Y. Su, D. Geng, C. Allen, D. Burn, G. Bell, and R. Rowland, "Three-dimensional motion system ("data-gloves"): application for parkinson's disease and essential tremor," in *Virtual and Intelligent Measurement Systems, 2001, IEEE International Workshop on. VIMS 2001*, pp. 28–33, IEEE, 2001.

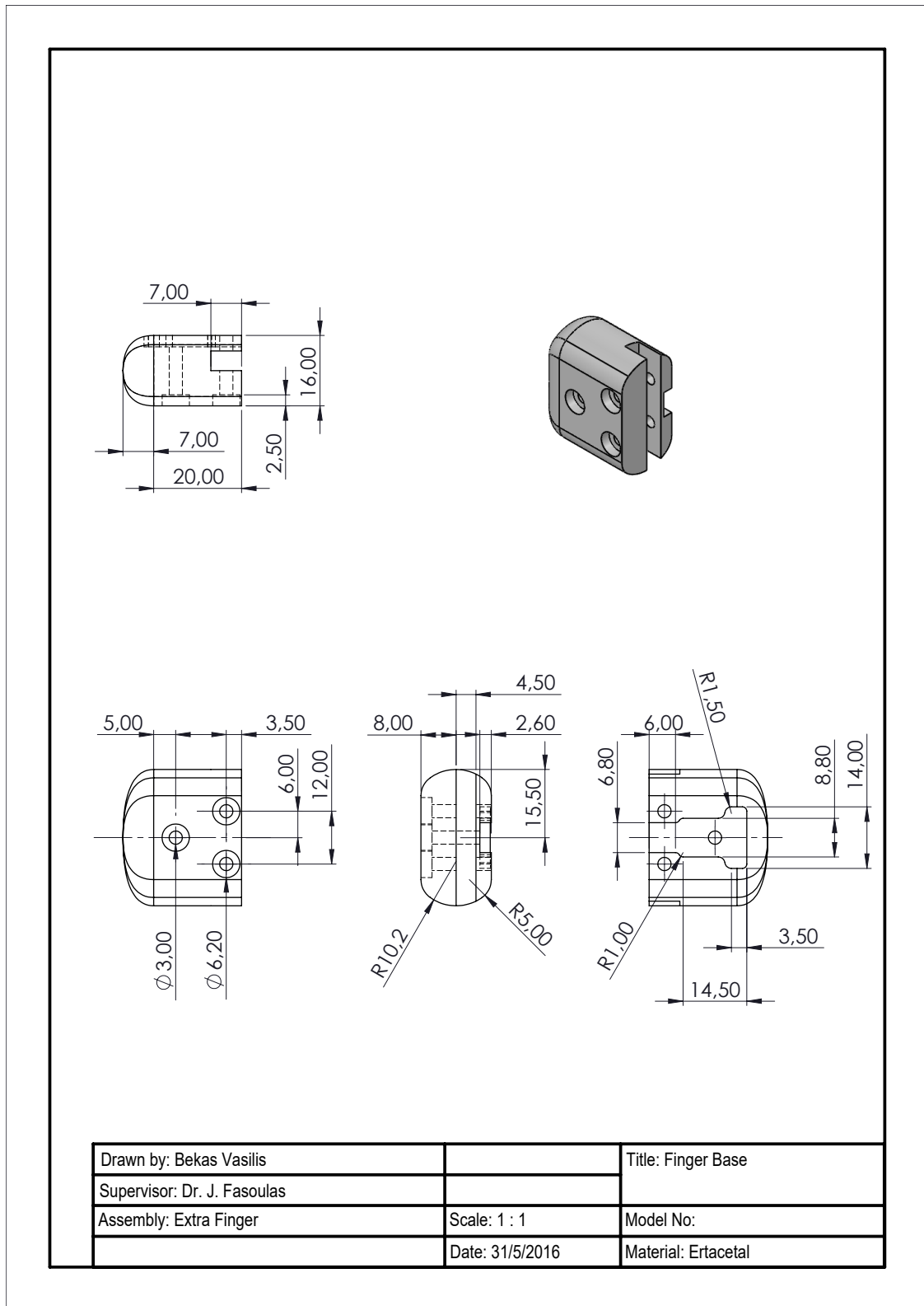
- [45] "Mimu gloves." <https://www.kickstarter.com/projects/mimu/mimu-glove-for-music>. Last Accessed: 29-01-2017.
- [46] "Dg5 vhand 3.0." <http://www.dg-tech.it/vhand3/>. Last Accessed: 2017-01-29.
- [47] "Cyberglove systems llc." <http://www.cyberglovesystems.com/>. Last Accessed: 29-01-2017.
- [48] "5dt data glove ultra." <http://www.5dt.com/data-gloves/>. Last Accessed: 29-01-2017.
- [49] "Acceleglove." <http://metamotion.com/images/AccelerGloveUserGuide.pdf>. Last Accessed: 30-01-2017.
- [50] F. Klajdo, "Manipulation of the humanoid robotic hand through original sensor arrangement placed on a glove," undergraduate thesis, Technological Educational Institute of Crete, 2015.
- [51] I. Konstantoudakis, "Design and construction of humanoid robotic hand," undergraduate thesis, Technological Educational Institute of Crete, 2012.
- [52] N. Kritsotakis, "Kinematic analysis and control of humanoid robot hand motion," undergraduate thesis, Technological Educational Institute of Crete, 2012.
- [53] L. A. Jones and S. J. Lederman, *Human hand function*. Oxford University Press, 2006.
- [54] J. L. Banks, *Design and control of an anthropomorphic robotic finger with multi-point tactile sensation*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [55] J. J. Craig, "Εισαγωγή στη ρομποτική: Μηχανική και έλεγχος," 2008.
- [56] S. Cobos, M. Ferre, M. A. Sánchez-Urán, and J. Ortego, "Constraints for realistic hand manipulation," *Proc. Presence 2007*, pp. 369–370, 2007.
- [57] S. Cobos, J. Ortego, M. A. Sanchez-Uran, M. Ferre, and R. Aracil, *Simplified human hand models for manipulation tasks*. INTECH Open Access Publisher, 2010.
- [58] J. Lin, Y. Wu, and T. S. Huang, "Modeling the constraints of human hand motion," in *Human Motion, 2000. Proceedings. Workshop on*, pp. 121–126, IEEE, 2000.
- [59] V. Vamvoukas, "Design and construction of anthropomorphic metal robotic hand," undergraduate thesis, Technological Educational Institute of Crete, 2017.
- [60] "Atg gloves." <http://www.atg-glovesolutions.com/en/maxiflex/maxiflex-cut/34-8743>. Last Accessed: 24-11-2016.
- [61] "Flex sensor." <http://www.spectrasymbol.com/wp-content/themes/spectra/images/datasheets/FlexSensor.pdf>. Last Accessed: 07-11-2016.
- [62] "Simscape multibody link." <https://www.mathworks.com/help/physmod/smlink/index.html>. Last Accessed: 22-01-2017.
- [63] D. Prattichizzo and J. Trinkle, "Chapter of the handbook on robotics springer 2008,"
- [64] R. Suárez, J. Cornella, and M. R. Garzón, *Grasp quality measures*. Institut d'Organització i Control de Sistemes Industrials, 2006.
- [65] Z. Doulgeri, J. Fasoulas, and S. Arimoto, "Feedback control for object manipulation by a pair of soft tip fingers," *Robotica*, vol. 20, no. 1, p. 1, 2002.
- [66] Z. Doulgeri and J. Fasoulas, "Grasping control of rolling manipulations with deformable fingertips," *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, vol. 8, no. 2, pp. 283–286, 2003.

# Παράρτημα

## A Μηχανολογικό σχέδιο εξωσκελετικού επιπρόσθετου ρομποτικού δαχτύλου



Σχήμα 1: Το μηχανολογικό σχέδιο της βάσης.



Σχήμα 2: Το μηχανολογικό σχέδιο του συνδέσμου τοποθέτησης του δακτύλου.

## A.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά σερβοκινητήρων



*Input Voltage:* 4.8 – 6 V DC  
*Operating Speed (4.8V/6.0V):* 0.24sec/60° - 0.20 sec/60°  
*Torque kg./cm. (4.8V/6.0V):* 7.7 / 9.6  
*Operating Angle:* 180°  
*Motor Type:* 3 Pole Ferrite  
*Bearing Type:* Dual Ball Bearing  
*Gear Type:* Metal  
*Potentiometer Drive:* Indirect Drive  
*Max PWM Signal Range:* 553 – 2520 μsec  
*Travel per μs:* .100° / μsec  
*Operating Temperature:* -20 °C to 60 °C  
*Size in Millimeters:* 40.39 x 19.56 x 37.59  
*Weight grams:* 55

(a)



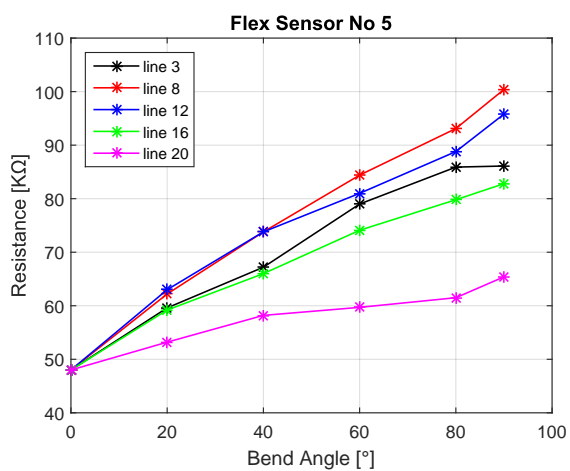
*Input Voltage:* 4.8 – 6 V DC  
*Operating Speed (4.8V/6.0V):* 0.12sec/60° - 0.10 sec/60°  
*Torque kg./cm. (4.8V/6.0V):* 2.3 / 2.5  
*Operating Angle:* 180°  
*Bearing Type:* Top Ball Bearing  
*Gear Type:* Metal  
*Potentiometer Drive:* Indirect Drive  
*Operating Temperature:* -20 °C to 60 °C  
*Size in Millimeters:* 43 x 12.1 x 28.8  
*Weight grams:* 14.7

(b)

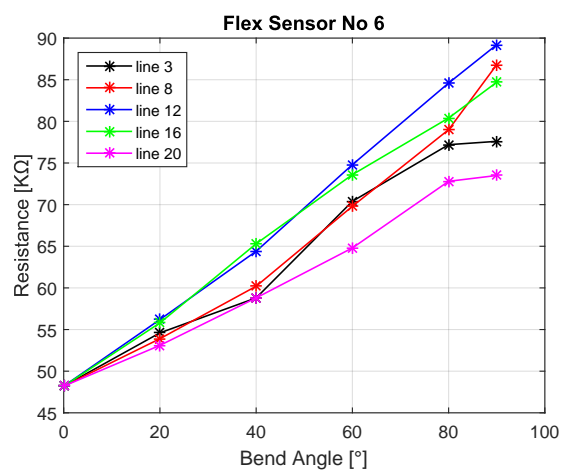
Σχήμα 3: Τεχνικά χαρακτηριστικά σερβοκινητήρων (a)Hitec HS-645MG, (b) Turnigy TGY-9018MG

## B Δεδομένα αισθητήρων κάμψης

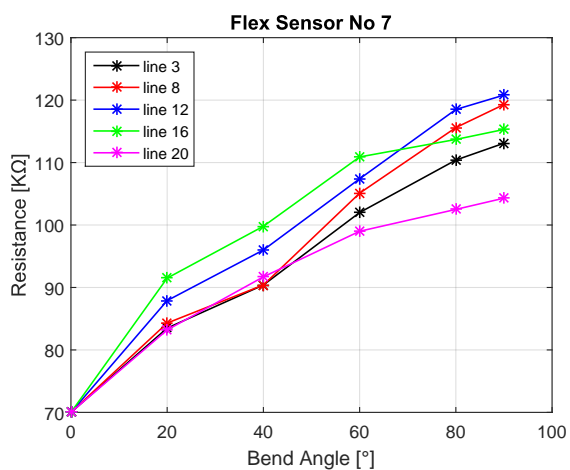
### B.1 Μεταβολή αντίστασης



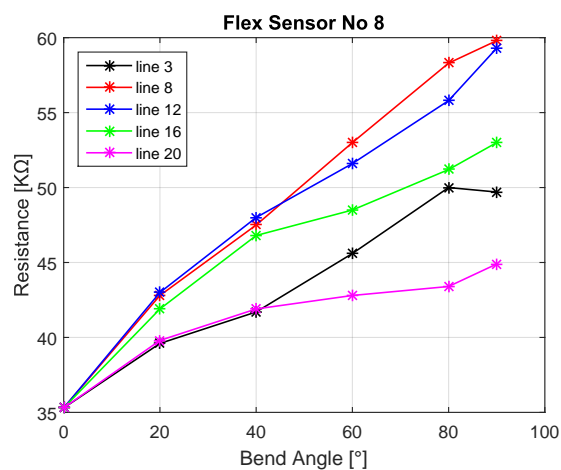
(a)



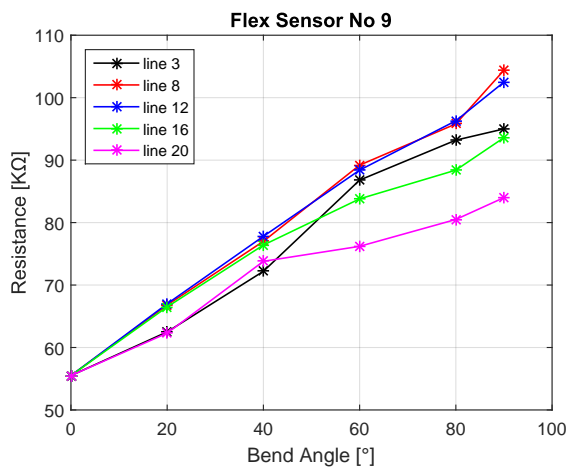
(b)



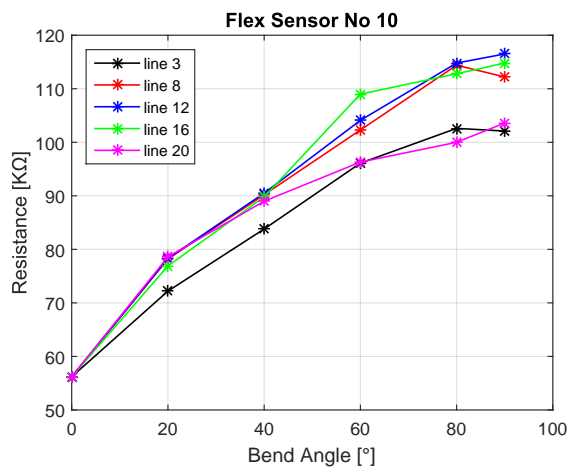
(c)



(d)

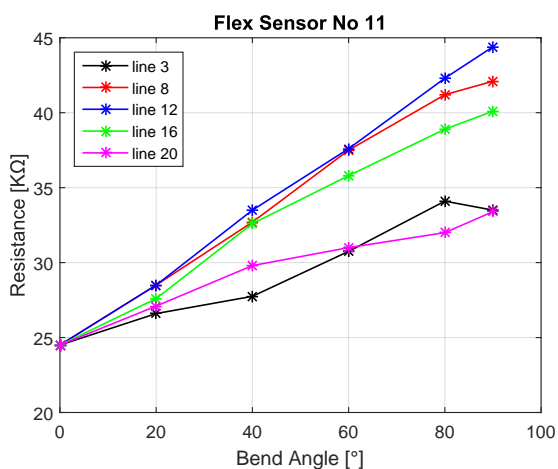


(e)

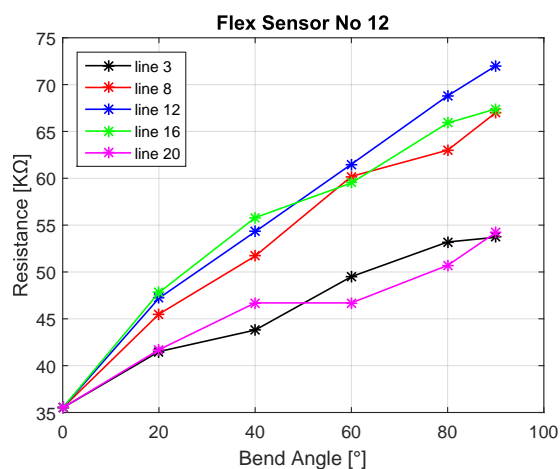


(f)

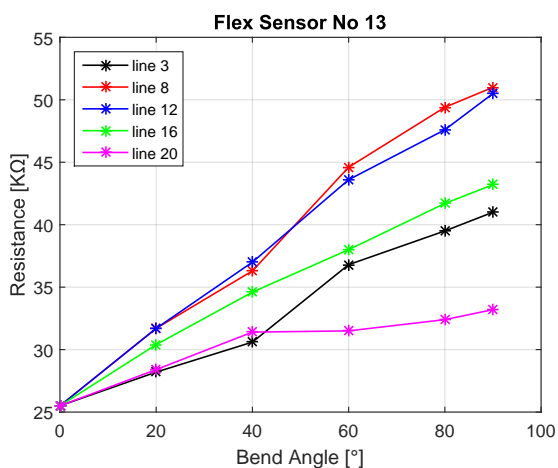




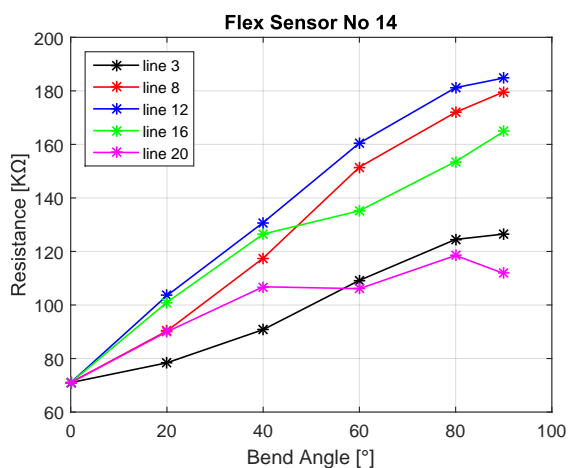
(g)



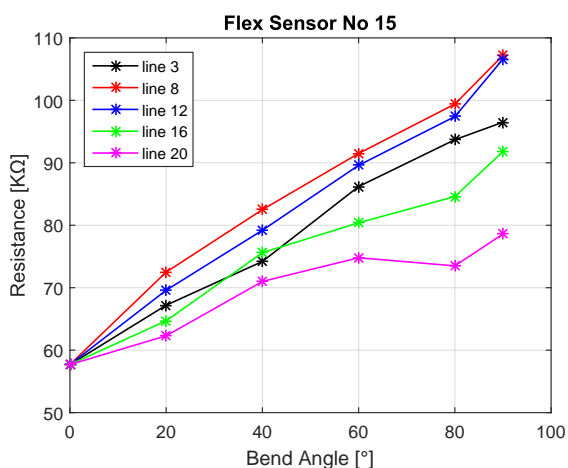
(h)



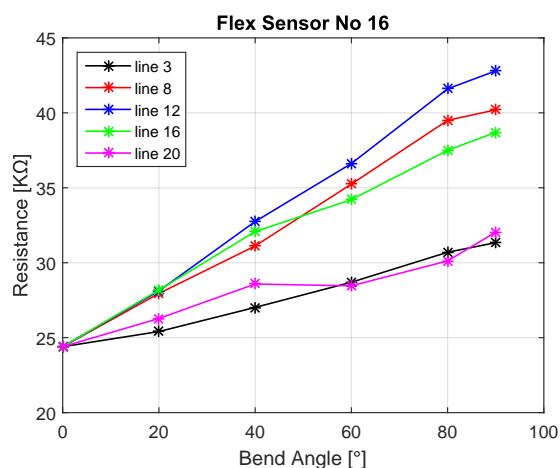
(i)



(j)



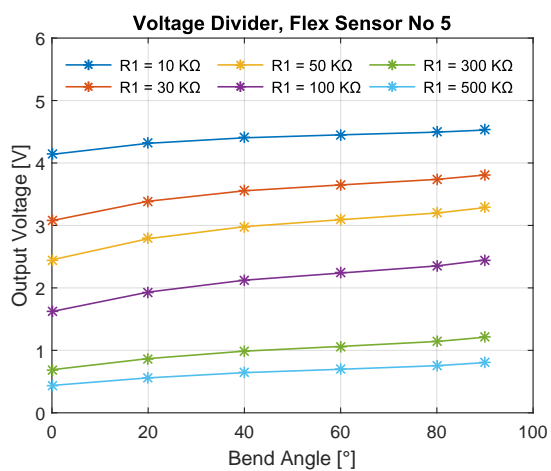
(k)



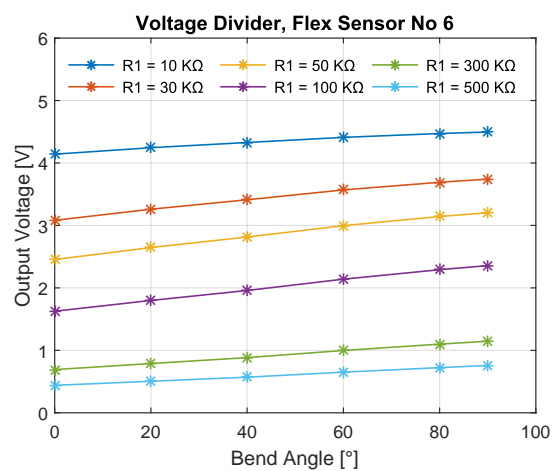
(l)

Σχήμα 4: Διαγράμματα μεταβολής της αντίστασης των αισθητήρων κάμψης 5 - 16 συναρτήσει της γωνίας κάμψης και της γραμμής στην οποία πραγματοποιείται.

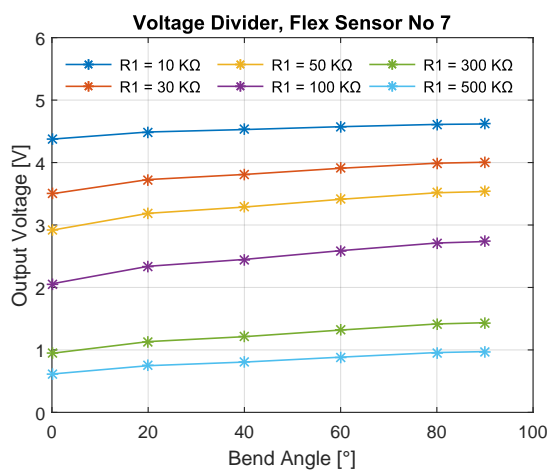
## B.2 Διαίρετης τάσης



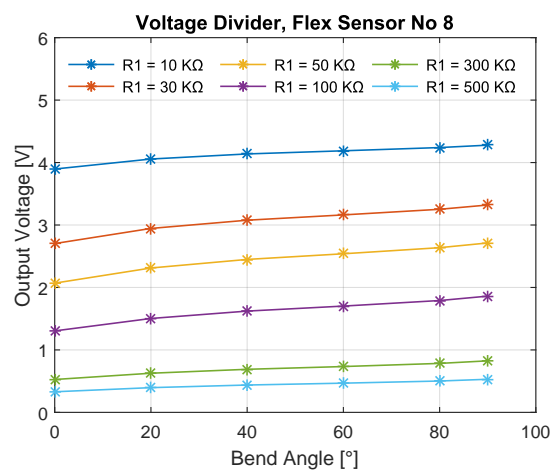
(a)



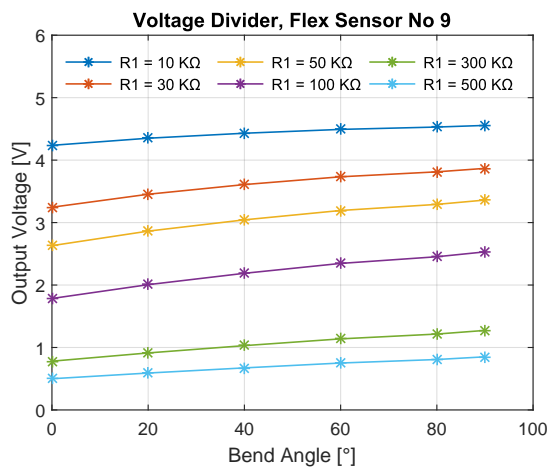
(b)



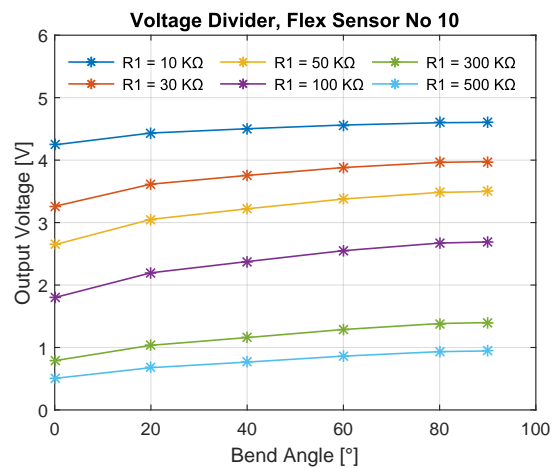
(c)



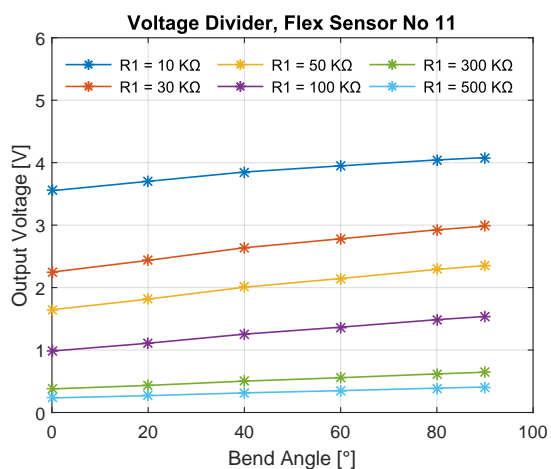
(d)



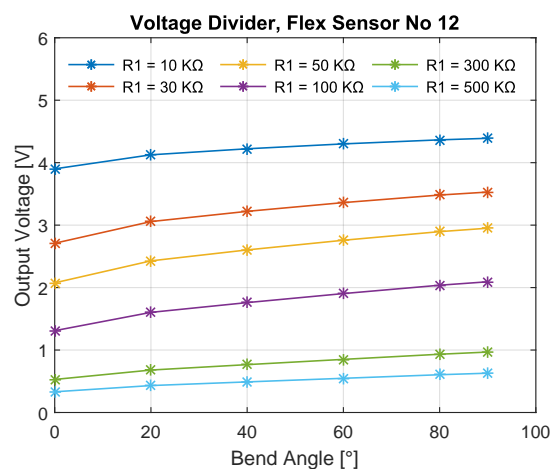
(e)



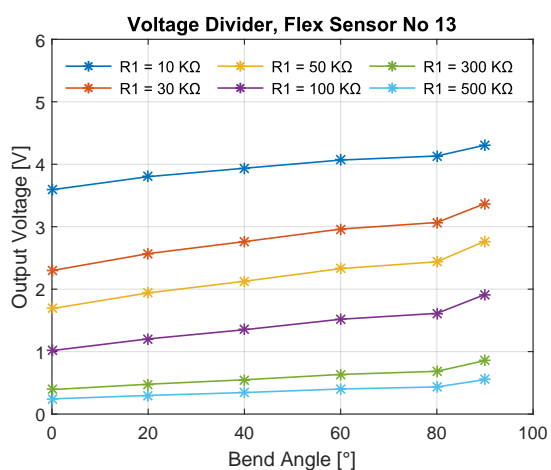
(f)



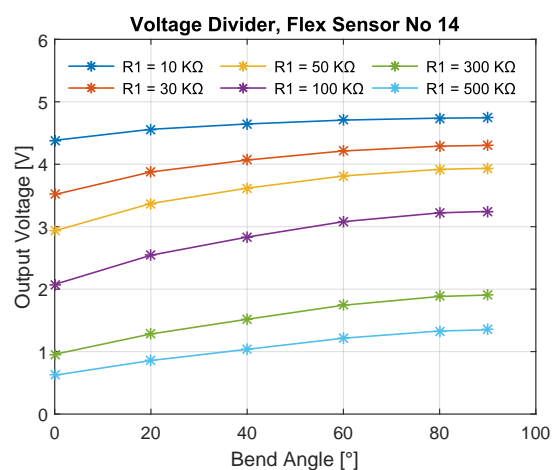
(g)



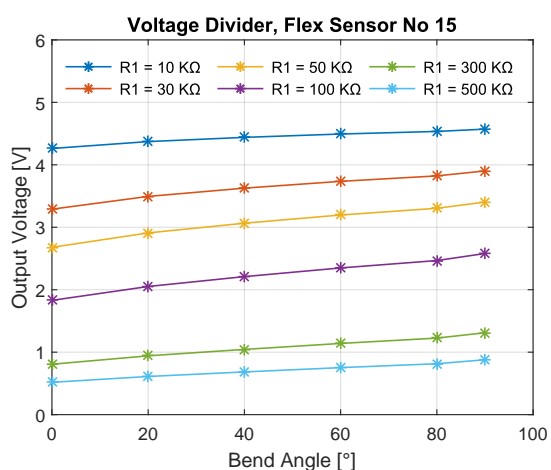
(h)



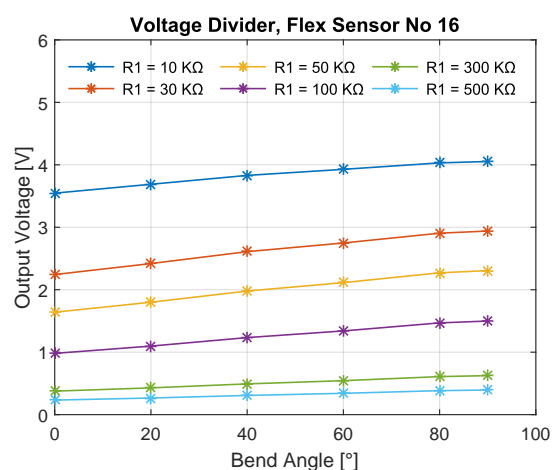
(i)



(j)



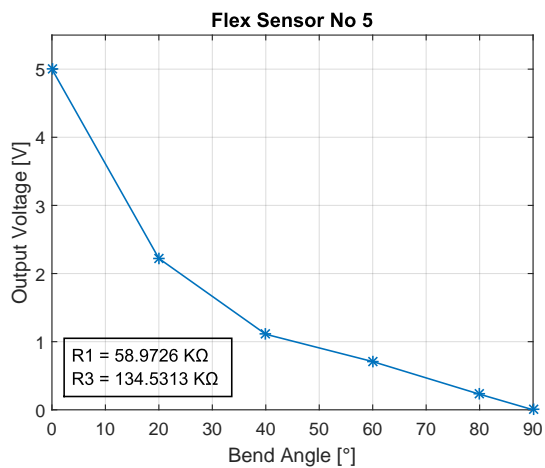
(k)



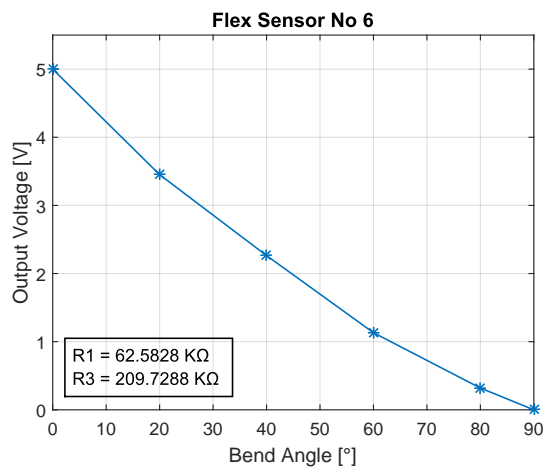
(l)

Σχήμα 5: Διαγράμματα μεταβολής της τάσης εξόδου κυκλώματος διαιρέτη τάσης για τους αισθητήρες κάμψης 5 - 16.

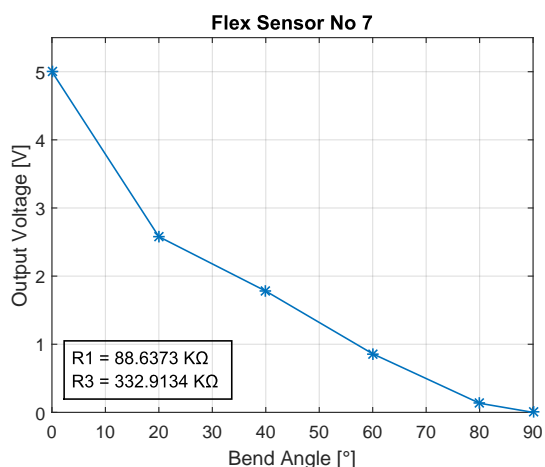
### B.3 Κύκλωμα Ενίσχυσης σήματος αισθητήρα



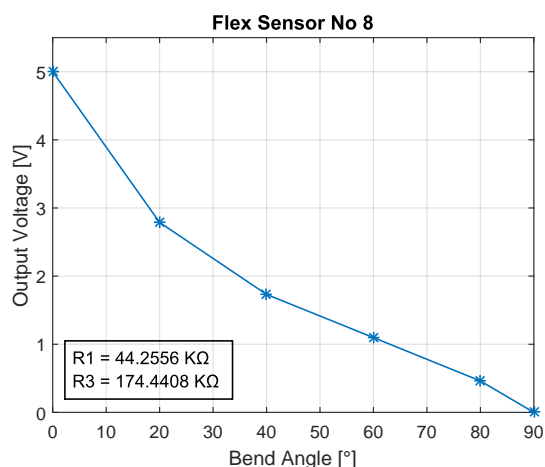
(a)



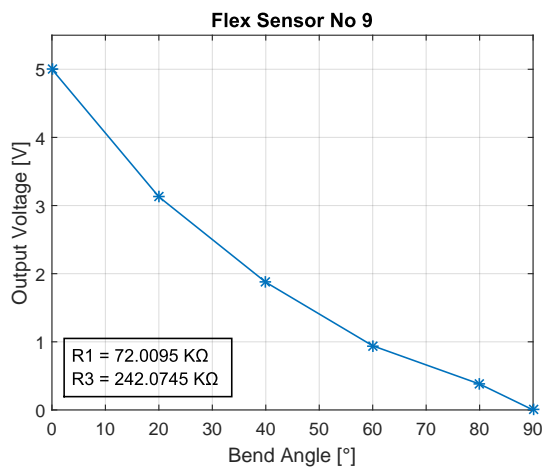
(b)



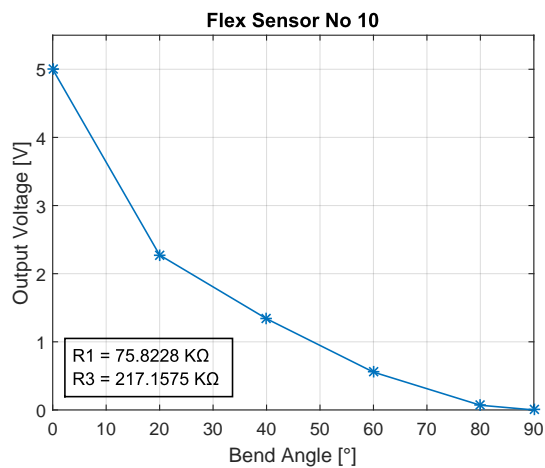
(c)



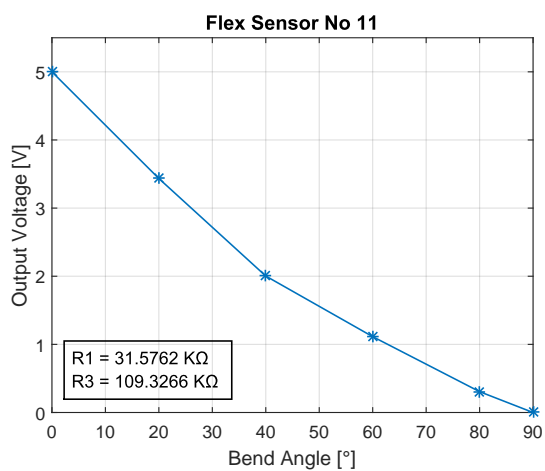
(d)



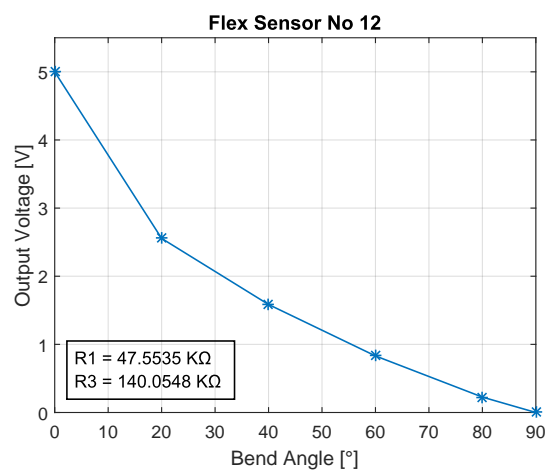
(e)



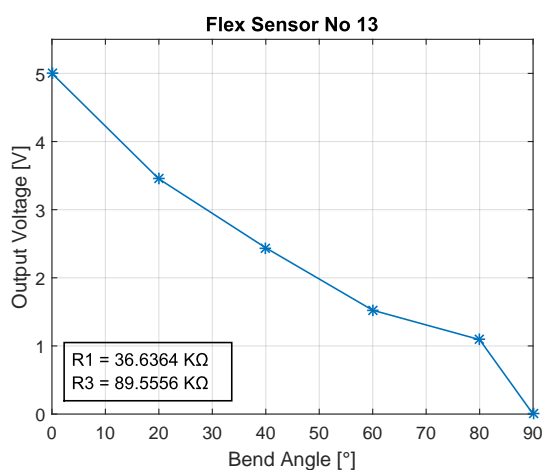
(f)



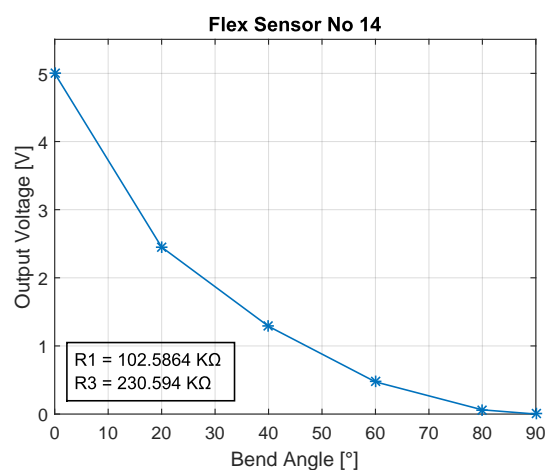
(g)



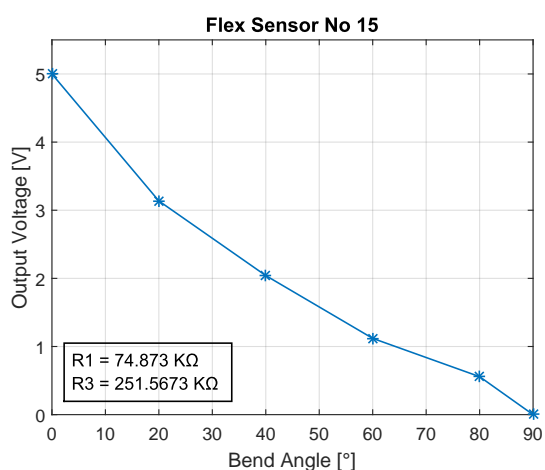
(h)



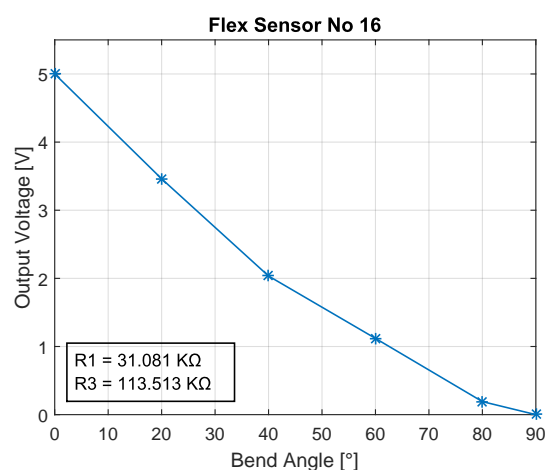
(i)



(j)



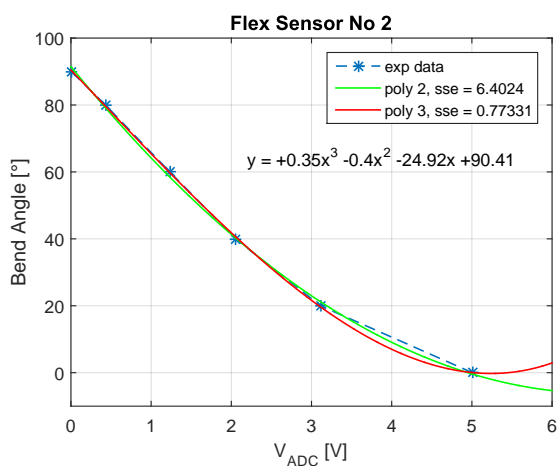
(k)



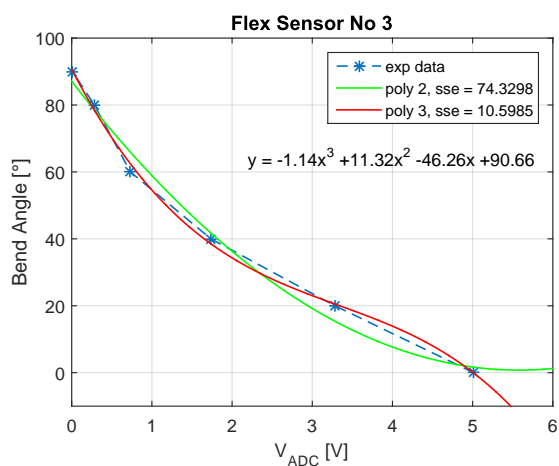
(l)

Σχήμα 6: Διαγράμματα μεταβολής της τάσης εξόδου των αισθητήρων κάμψης 5 - 16 μετά από την ενίσχυση του σήματος.

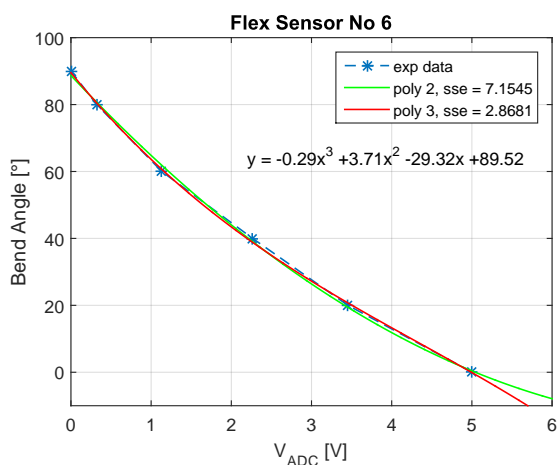
### B.4 Προσεγγιστικές καμπύλες



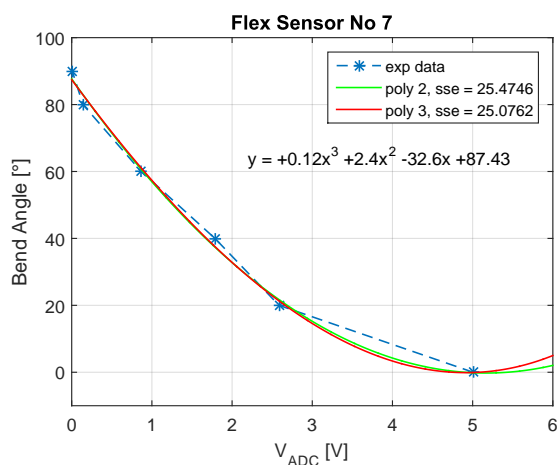
(a)



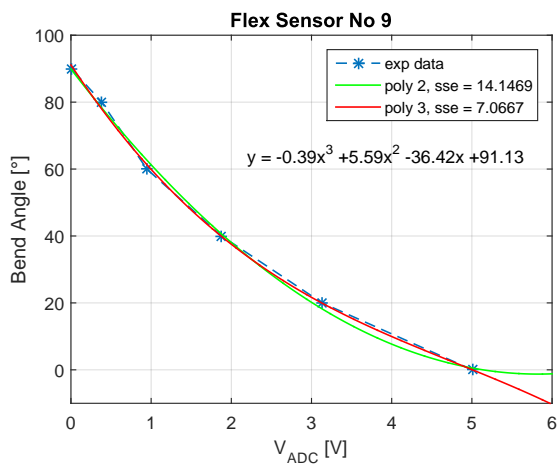
(b)



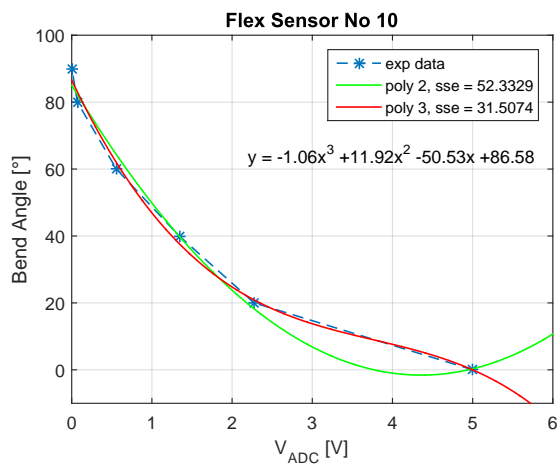
(c)



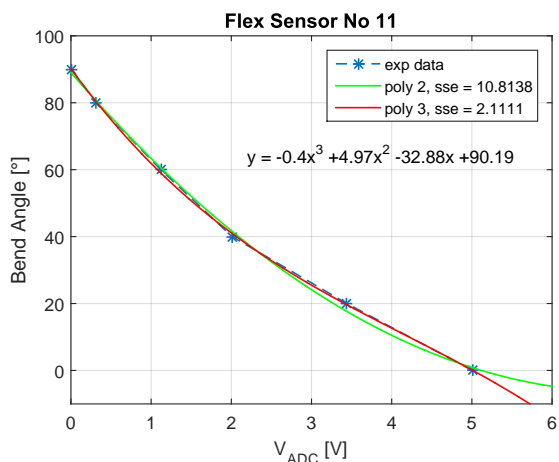
(d)



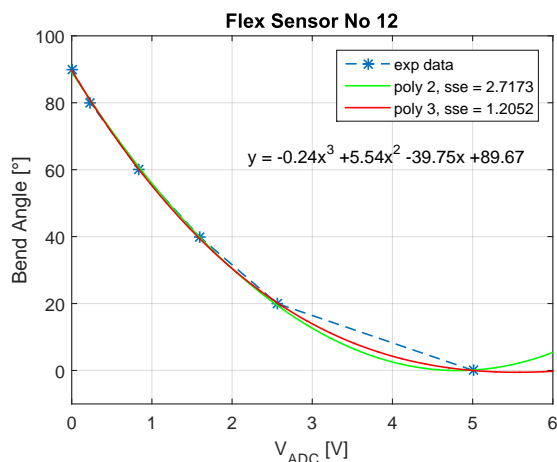
(e)



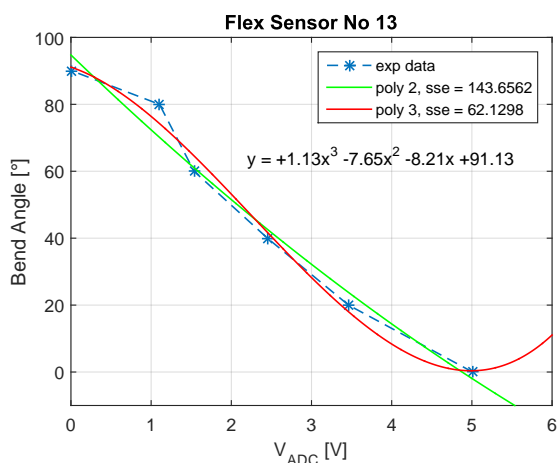
(f)



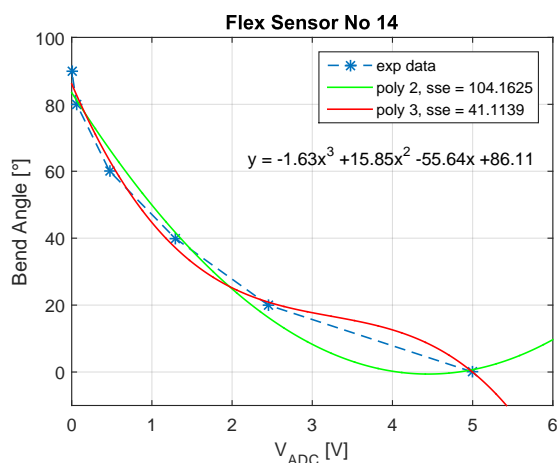
(g)



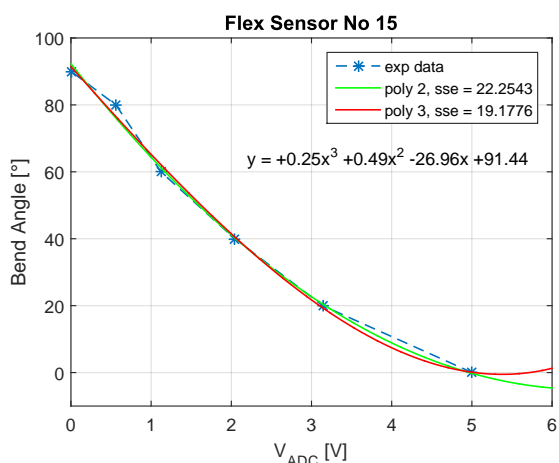
(h)



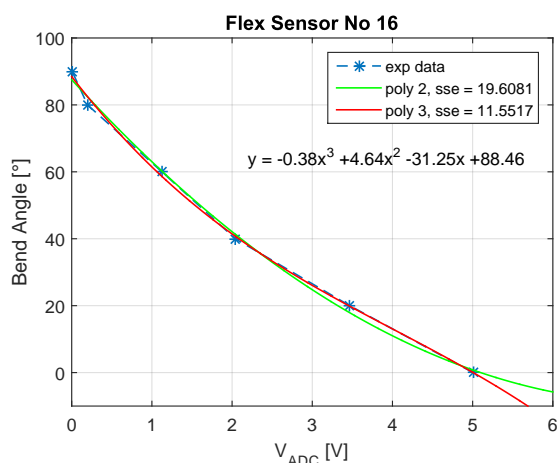
(i)



(j)



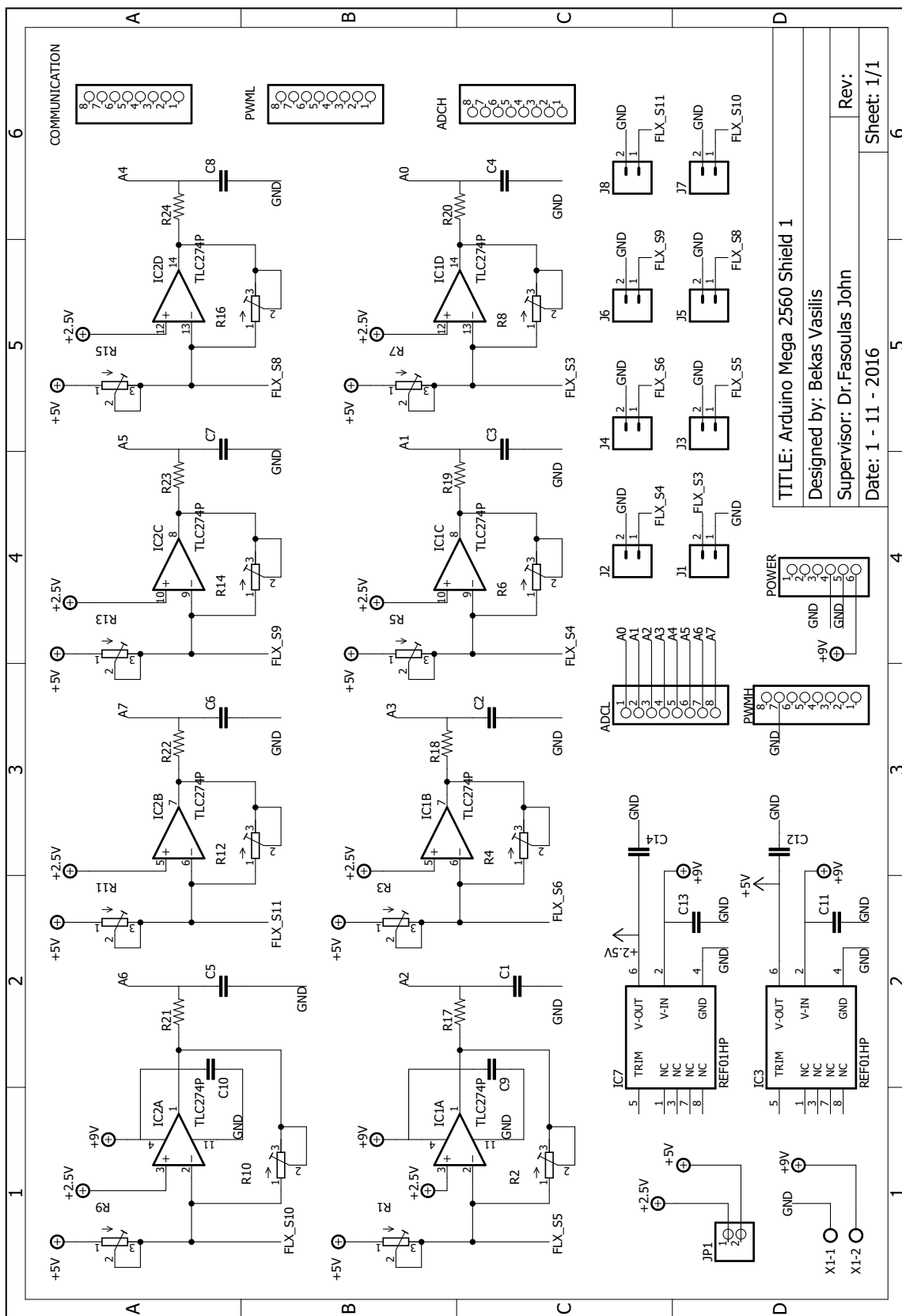
(k)



(l)

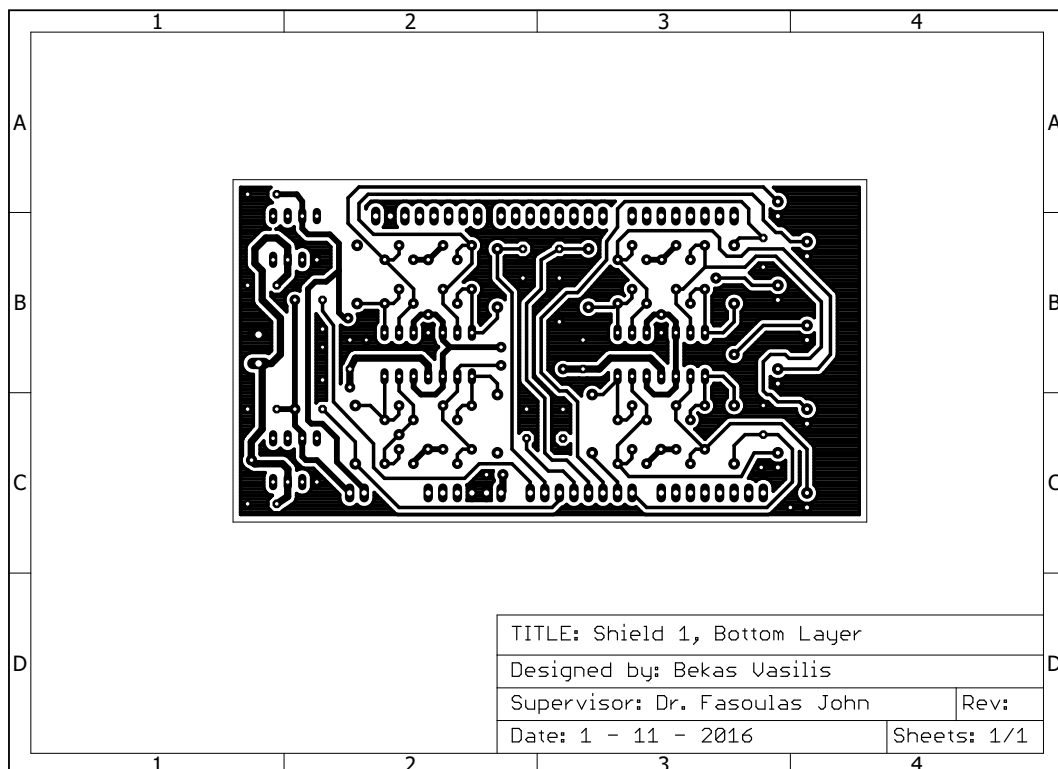
Σχήμα 7: Προσεγγιστικές καμπύλες αισθητήρων κάμψης 2, 3, 6, 7 και 9 - 16.

# C Ηλεκτρονικά κυκλώματα

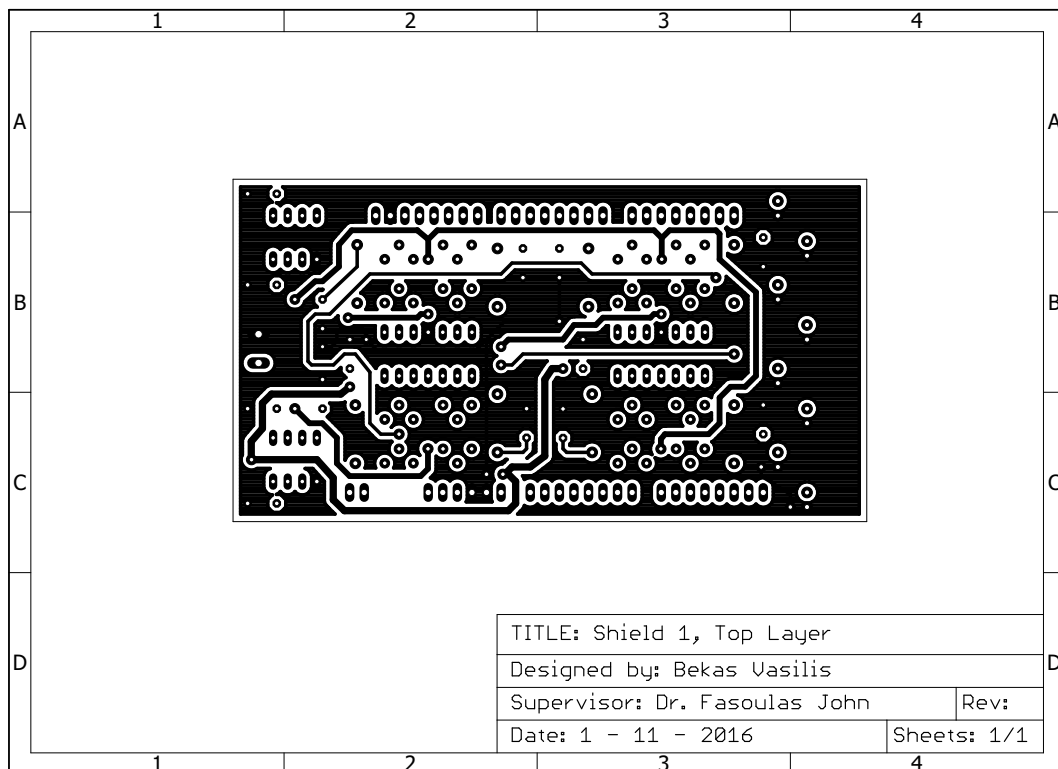


Σχήμα 8: Σχηματικό διάγραμμα πρώτης πλακέτας επέκτασης.

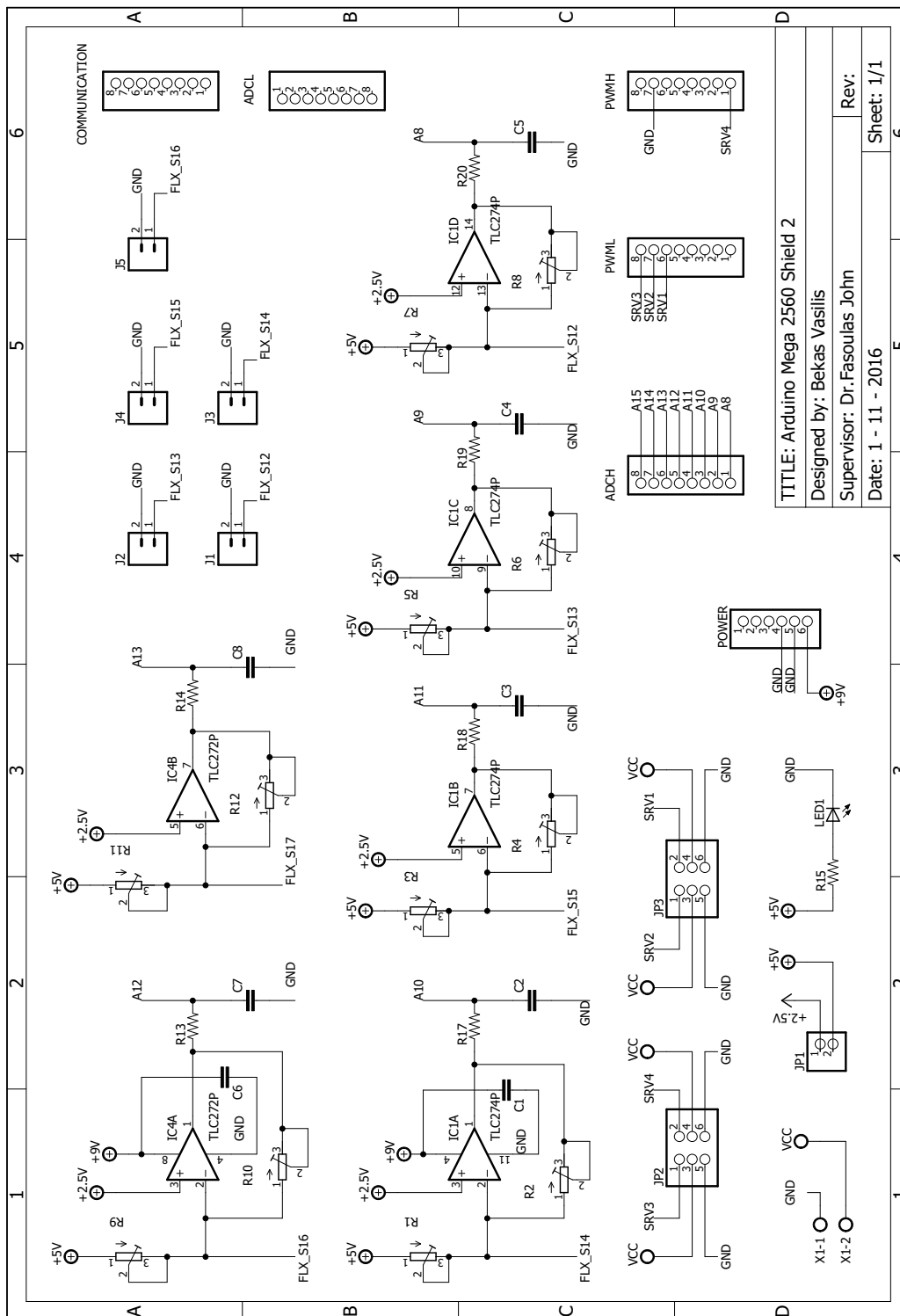




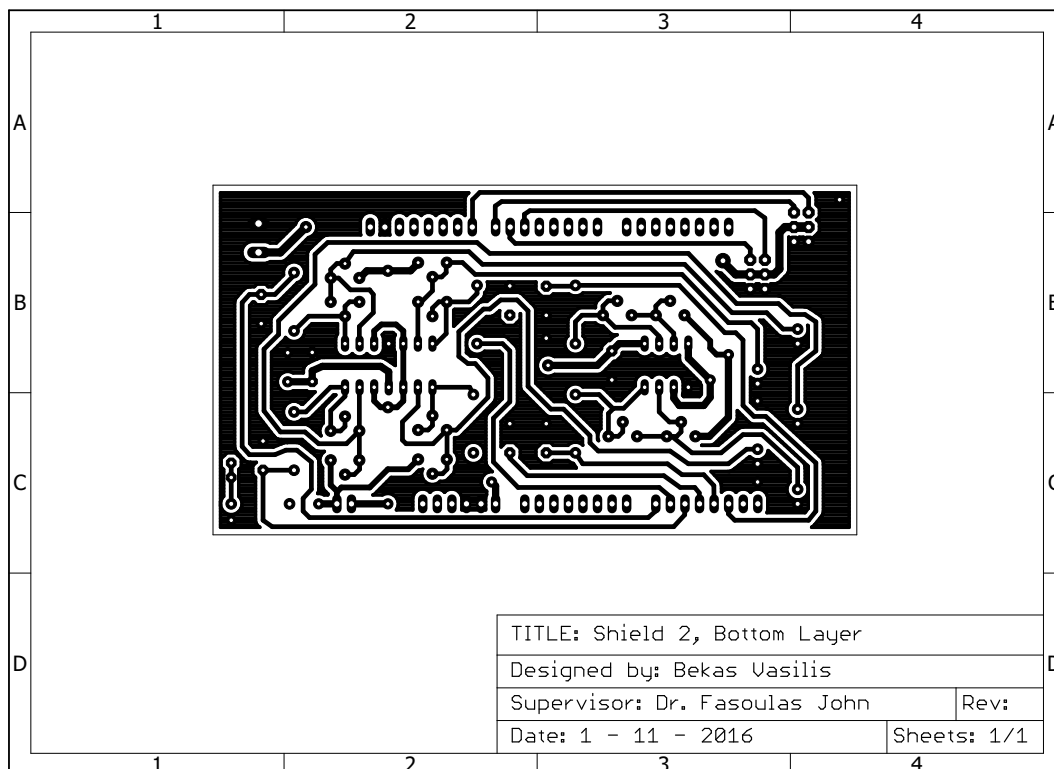
Σχήμα 9: Κάτω όψη πρώτης πλακέτας επέκτασης.



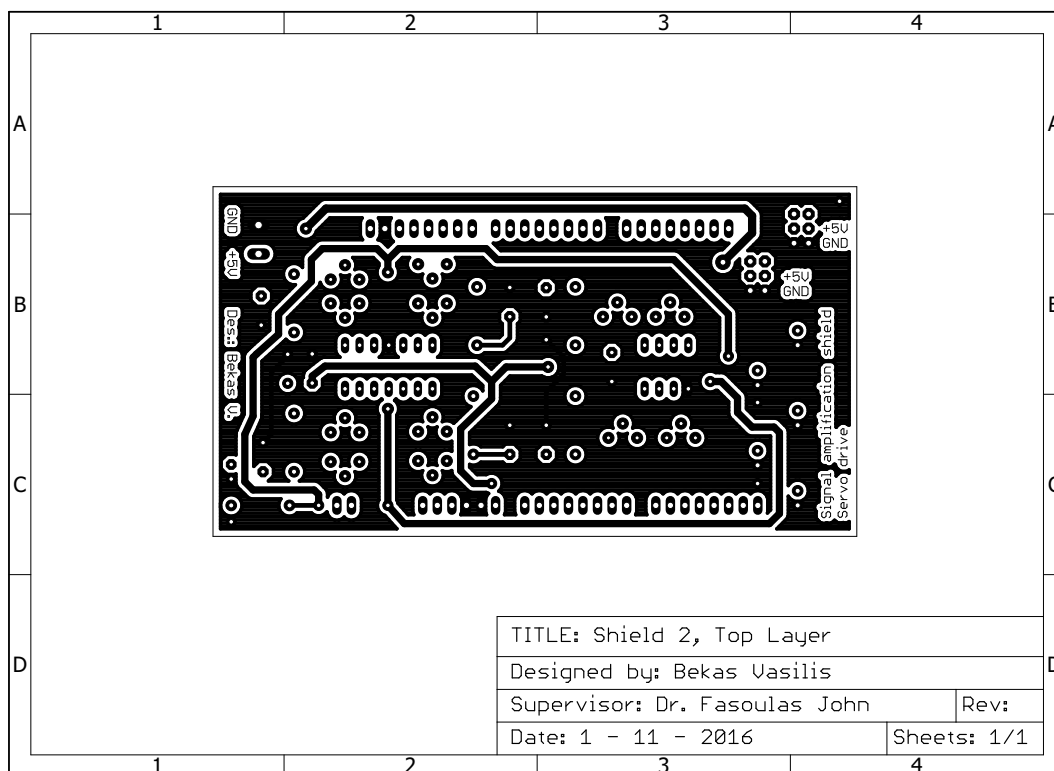
Σχήμα 10: Πάνω όψη πρώτης πλακέτας επέκτασης.



Σχήμα 11: Σχηματικό διάγραμμα δεύτερης πλακέτας επέκτασης.



Σχήμα 12: Κάτω όψη δεύτερης πλακέτας επέκτασης.



Σχήμα 13: Πάνω όψη δεύτερης πλακέτας επέκτασης.