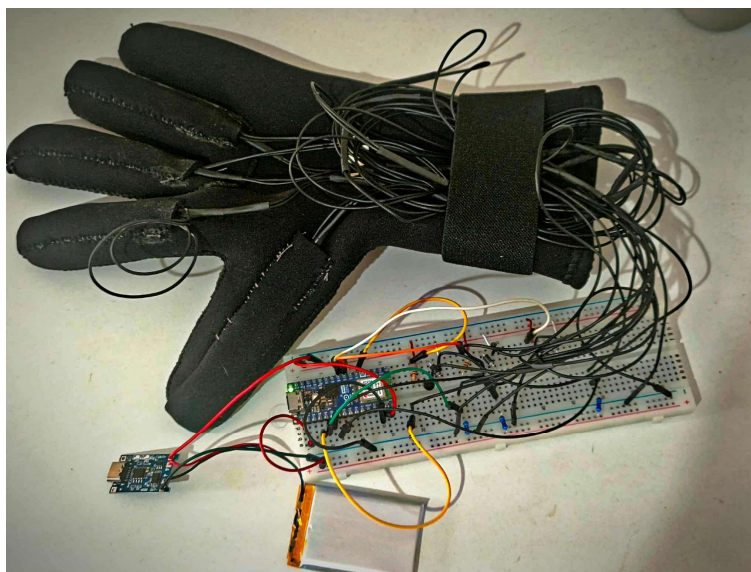




ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«ΑΠΤΙΚΟ ΓΑΝΤΙ ΤΗΛΕΧΕΙΡΙΣΜΟΥ
ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ»



Του φοιτητή
Γιαννακού Κωνσταντίνου
Αρ. Μητρώου: 516021

Επιβλέπων
Κοκκώνης Γεώργιος
Βαθμίδα: Επίκουρος Καθηγητής

Ημερομηνία 12/9/2025

Τίτλος Δ.Ε.

Κατασκευή απτικού γαντιού για ασύρματο τηλεχειρισμό ρομποτικού βραχίονα.

Κωδικός Δ.Ε. 24256

Γιαννακός Κωνσταντίνος

Κοκκώνης Γεώργιος

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 10/10/2024

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 12/9/2025

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

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

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

Η παρούσα πτυχιακή εργασία είναι αφιερωμένη στην μητέρα και στην αδερφή μου που με την στήριξη τους κατάφερα να φέρω εις πέρας τις σπουδές μου.

Στους φίλους και συναδέλφους που στάθηκαν δίπλα στην πορεία μου όλα αυτά τα χρόνια.

Και τέλος στον εαυτό μου, για την δύναμη και την υπομονή που έχω καταβάλει καθόλη την διάρκεια των σπουδών.

«Αφιέρωση»

Πρόλογος

Η παρούσα πτυχιακή εργασία επικεντρώνεται στο σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός συστήματος τηλεχειρισμού ρομποτικού βραχίονα μέσω ενός απτικού γαντιού με ανάδραση.

Με την τεχνολογία να εξελίσσεται ραγδαία στο κομμάτι των “έξυπνων” εφαρμογών και πιο συγκεκριμένα στο κομμάτι της απτικής διάδρασης και του τηλεχειρισμού μέσω αυτής, αποφασίσαμε να δημιουργήσουμε ένα απτικό γάντι για απομακρυσμένο χειρισμό ενός ρομποτικού βραχίονα με σκοπό να παρέχουμε στον χρήστη την δυνατότητα να ελέγχει την κίνηση και την ενέργεια του ρομποτικού βραχίονα από απόσταση.

Για την υλοποίηση της συσκευής βασιστήκαμε στον μικροελεγκτή Arduino Nano ESP32 λόγω του ότι προσφέρει ενσωματωμένη συνδεσιμότητα WI-FI και επιτρέπει την επικοινωνία, ανταλλαγή δεδομένων και ελέγχου των μικροελεγκτών μέσω αυτού.

Η εργασία αυτή συνδυάζει τόσο θεωρητικές όσο και πρακτικές γνώσεις για την ανάπτυξη ενός σύγχρονου συστήματος απτικής διάδρασης αξιοποιώντας τις δυνατότητες της σύγχρονης τεχνολογίας.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο τον σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός ασύρματου συστήματος απτικού τηλεχειρισμού ρομποτικού βραχίονα. Το ασύρματο σύστημα με απτικό τηλεχειρισμό παρέχει την δυνατότητα στον χρήστη να ελέγχει απομακρυσμένα την κίνηση των δαχτύλων του βραχίονα. Καθώς η σύγχρονη κοινωνία προχωρά προς πιο φυσικές και συναισθηματικά εμπλουτισμένες διεπαφές, η μελέτη της απτικής τεχνολογίας θεωρείται κρίσιμη για την κατανόηση και ενίσχυση της ανθρώπινης-μηχανικής αλληλεπίδρασης. Οι δυνατότητες του χρήστη επεκτείνονται πέρα από την οπτικοακουστική ανατροφοδότηση, ενσωματώνοντας τη φυσική επαφή στο ψηφιακό περιβάλλον. Η ικανότητα προσωποποιημένης και πολυτροπικής απτικής ανατροφοδότησης —μέσω βιο-εμπνευσμένων ελεγχόμενων διατάξεων— φέρνει τη μηχανική αντίληψη και απόκριση πιο κοντά στην ανθρώπινη εμπειρία, συμβάλλοντας θετικά σε πεδία με σημαντικές κοινωνικές, εκπαιδευτικές και ιατρικές προεκτάσεις. Η συνολική δομή της εργασίας στοχεύει στο να προσφέρει μια πλήρη εικόνα, τόσο σε θεωρητικό επίπεδο, όσο και στην πρακτική υλοποίηση. Η εργασία αρχικά παραθέτει μία βιβλιογραφική ανασκόπηση στην εξέλιξη των απτικών συστημάτων, παρουσιάζοντας τη μετάβαση από τις αρχικές, απτικές εφαρμογές σε πιο σύγχρονες, ασύρματες και “έξυπνες” εφαρμογές, στις τεχνολογίες και στα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν, τόσο σε επίπεδο υλικού όσο και λογισμικού, δίνοντας έμφαση στον μικροελεγκτή Arduino Nano ESP32. Εν συνεχεία, περιγράφεται λεπτομερώς η διαδικασία σχεδιασμού του κυκλώματος, η σύνδεση των απαραίτητων περιφερειακών (flex sensors, servo motors, πιεζοαντιστάσεις κ.λπ.), καθώς και ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται η επικοινωνία των δύο συσκευών. Τέλος, παρουσιάζεται αξιολόγηση του συστήματος, αναλύονται τα αποτελέσματα και προτείνονται πιθανές βελτιώσεις.

«Giannakos Konstantinos»

Abstract

This paper deals with the design and implementation of a wireless tactile control system for a robotic arm. The wireless system with tactile control allows the user to control the movement of the arm's fingers remotely. As modern society moves towards more natural and emotionally enriched interfaces, the study of haptic technology is considered critical to understanding and enhancing human-machine interaction, as it extends the user's capabilities beyond audiovisual feedback by incorporating physical contact into the digital environment. The ability to provide personalized and multimodal tactile feedback—through bio-inspired, wearable, or mentally controlled devices—brings mechanical perception and response closer to human experience, contributing to fields with significant social, educational, and medical implications. The overall structure of the work aims to provide a complete picture, both at a theoretical level and in practical implementation. The thesis begins with a literature review on the development of haptic systems, presenting the transition from early tactile applications to more modern, wireless, and "smart" applications, the technologies and tools used, both in terms of hardware and software, with an emphasis on the Arduino Nano ESP32 microcontroller. It then describes in detail the circuit design process, the connection of the necessary peripherals (flex sensors, servo motors, piezoresistors, etc.), and how the two devices communicate. Finally, we conclude with an evaluation of the system, analyzing the results and suggesting possible improvements.

«Giannakos Konstantinos»

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Κοκκώνη Γεώργιο, Επίκουρο Καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, χάριν του οποίου κατάφερα να ολοκληρώσω την παρούσα εργασία στα πλαίσια των σπουδών μου. Η καθοδήγησή του και η εμπιστοσύνη που μου έδειξε στάθηκαν σημαντικοί παράγοντες για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Θερμές ευχαριστίες στο σύνολο του διδακτικού προσωπικού του τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, για την πολύτιμη βοήθειά τους, το πολύ υψηλό επίπεδο παροχής γνώσεων και εμφύσησης αγάπης για το αντικείμενο. Τέλος, ευχαριστώ όσους με στήριξαν ηθικά για την ολοκλήρωση της συγγραφής της παρούσας εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	i
ABSTRACT	ii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	iv
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	viii
ΕΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Απτική Τεχνολογία	3
1.1.Ορισμός.....	3
1.2. Ιστορική Αναδρομή	3
1.3. Σημασία Τηλεχειρισμού και Απτικής Ανάδρασης	6
1.3.1. Τηλεχειρισμός.....	6
1.3.2. Απτική Ανάδραση.....	6
1.4. Υφιστάμενες εφαρμογές	10
1.4.1. Τομέας Υγείας	10
1.4.2. Εικονική και Επαυξημένη Πραγματικότητα	13
1.4.3. Βιομηχανία Ψυχαγωγίας και Βιντεοπαιχνιδιών.....	15
1.4.4. Έξυπνες φορητές συσκευές και καταναλωτική τεχνολογία	17
1.4.5. Ρομποτική και βιομηχανικός Αυτοματισμός	18
1.5. Περιορισμοί στον Τηλεχειρισμό.....	20
1.5.1. Χαμηλή Χωρική και Χρονική Ανάλυση των Απτικών Συστημάτων	21
1.5.2. Τεχνικοί Περιορισμοί στην Απόδοση και στην Φορητότητα.....	21
1.5.3. Περιορισμοί στη Μετάδοση και Επεξεργασία Απτικών Δεδομένων.....	21
1.5.4. Ανθρώπινοι Φυσιολογικοί και Γνωστικοί Περιορισμοί.....	22
1.5.5. Περιορισμοί Προτυποποίηση και Διαλειτουργικότητα.....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Σύγκριση με Παρόμοια Συστήματα	24
2.1. Παρόμοια Συστήματα	24
2.1.1. Sense Glove Nova.....	25
2.1.2. HapticC Glove (G1/DK2).....	26
2.1.3. Manus Prime 3 Haptic CR.....	28
2.1.4. Cyber Grasp	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Δομικά Στοιχεία του Συστήματος	32
3.1 Αισθητήρες	32
3.1.1. Flex Sensor	32
3.1.2. Force Sensitive Resistor (FSR).....	34
3.1.3. Σύγκριση Flex Sensor και Force Sensitive Resistor	35

3.2. Ενεργοποιητές.....	35
3.2.1. Servo Motor.....	36
3.2.2. Vibrator Motor.....	37
3.2.3. Σύγκριση Servo Motor και Vibrator Motor.....	38
3.3. Arduino Nano ESP32.....	39
3.4. Προσομοίωση/ Tinkercad.....	41
3.4.1. Σκοπός της Προσομοίωσης.....	43
3.4.2. Δημιουργία Κυκλώματος.....	43
3.4.3. Προγραμματισμός του Arduino.....	44
3.4.4. Έλεγχος Λειτουργικότητας.....	46
3.5. Υλοποίηση Συστήματος.....	46
3.5.1. Σχεδιαστικές Προδιαγραφές και Απαιτήσεις.....	46
3.5.2. Περιγραφή Υλικών και Εξαρτημάτων.....	47
3.5.3. Ηλεκτρονικός και Μηχανικός Σχεδιασμός.....	51
3.5.4. Πειραματικό Στάδιο Ελέγχου Λειτουργίας.....	54
3.6. Τροφοδοσία Συστήματος – Ενσωμάτωση μπαταρίας για ασύρματη λειτουργία .	60
3.7. Ρομποτικός Βραχίονας.....	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Προγραμματισμός και Επικοινωνία Συστήματος.....	70
4.1. Περιγραφή Κώδικα Απτικού Γαντιού.....	71
4.2. Δηλώσεις και Καθολικές Μεταβλητές.....	71
4.3. Δομές Δεδομένων.....	72
4.4. Ρύθμιση Αισθητήρων.....	73
4.5. Συνάρτηση Επεξεργασίας Δόνησης - vibration().....	73
4.6. Συνάρτηση Δόνησης - mediumIntensityVibration().....	74
4.7. Λήψη δεδομένων - onDataRcv().....	74
4.8. Επεξεργασία Αισθητήρων Κάμψης - processFlexSensor().....	76
4.9. Συνάρτηση setup().....	76
4.10. Συνάρτηση loop().....	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Μετρήσεις και Συγκρίσεις.....	78
5.1. Αποτελέσματα.....	78
5.2. Σύγκριση Υλοποίησης Απτικού Γαντιού.....	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Περιορισμοί και Προοπτικές για το μέλλον.....	82
6.1. Περιορισμοί.....	82
6.2. Προοπτικές για το μέλλον.....	83
6.3. Συνεισφορά στην επιστημονική και εκπαιδευτική κοινότητα.....	84
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Συμπεράσματα.....	85

Βιβλιογραφία	87
Παράρτημα	91

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Σύγκριση εφαρμογών απτικών γαντιών.....	31
Πίνακας 2: Σύγκριση αισθητήρων Flex Sensors και FSR.....	35
Πίνακας 3: Συγκριτικός πίνακας Servo Motor και Vibraor Motor.....	38
Πίνακας 4: Πλεονεκτήματα σε Σχέση με Άλλες Πλακέτες.....	41
Πίνακας 5: Αποτελέσματα ερωτηματολογίου για τη ευχαρίστηση των χρηστών κατά τη χρήση του απτικού γαντιού.....	78

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: 3D Σύστημα Αισθητήρια Συσκευή (Touch Haptic Device).....	5
Εικόνα 2: 3D Σύστημα Αισθητήρια Συσκευή (Touch Haptic Device).....	5
Εικόνα 3: Διάγραμμα του συστήματος AVATAR με το φορητό σύστημα ανάδρασης δύναμης (WeHAPTIC)	6
Εικόνα 4: Σύστημα ανάδρασης δύναμης (WeHAPTIC).....	7
Εικόνα 5: Σύγκριση μεταξύ απτικής και δερματικής προσέγγισης	8
Εικόνα 6: Διάταξη πειράματος για την εργασία χειρισμού εύθραυστων αντικειμένων	9
Εικόνα 7: Επίδειξη του πειράματος της Εικόνας 6.....	9
Εικόνα 8: Ρομποτικό χειρουργικό σύστημα da Vinci.....	11
Εικόνα 9: Λαβή da Vinci master με προσαρμοσμένο ενεργοποιητή για απτική απεικόνιση των δονήσεων του εργαλείου.....	11
Εικόνα 10: Προσομοιωτής εικονικής πραγματικότητας για ορθοπαιδική χειρουργική με χρήση απτικής ανάδρασης (3D systems, Rock Hill, SC, USA)	12
Εικόνα 11: Προσομοιωτής εικονικής πραγματικότητας για ορθοπαιδική χειρουργική με χειριστήρια Oculus Rift (χωρίς απτική ανάδραση)	12
Εικόνα 12: Πάτος παπουτσιού Lechal	13
Εικόνα 13: Πρωτότυπο γάντι απτικής τεχνολογίας	14
Εικόνα 14: HaptX DK2 gloves	14
Εικόνα 15: Συσκευές απτικής ανάδρασης για εικονική πραγματικότητα και βιντεοπαιχνίδια	15
Εικόνα 16: Χειριστήριο PS5 DualSense με απτική τεχνολογία	16
Εικόνα 17: Χειριστήριο Xbox Gamepad με μηχανισμό θερμικής ανάδρασης για φορητές συσκευές σε περιβάλλον παιχνιδιού.....	16
Εικόνα 18: Γιλέκο απτικής τεχνολογίας και σχεδιασμός υλικών που εφαρμόζονται στην επιφάνεια του γιλέκου με απτική ανάδραση	17
Εικόνα 19: Γιλέκο απτικής τεχνολογίας και σχεδιασμός υλικών που εφαρμόζονται στην επιφάνεια του γιλέκου με απτική ανάδραση	17
Εικόνα 20: Απτικά εικονίδια και οι σχετικές κυματομορφές δόνησης.....	18
Εικόνα 21: Φορητές συσκευές εισαγωγής δεδομένων.....	18
Εικόνα 22: Χωρική ταξινόμηση της αλληλεπίδρασης ανθρώπου-ρομπότ (HRI: Human-Robot Interaction)	19

Εικόνα 23: Τηλεχειρισμός στη βιομηχανία: (Α) Χειριστής και (Β) Βιομηχανική γερανογέφυρα	20
Εικόνα 24: Απτικό γάντι SenseGlove Nova 2 για εκπαίδευση μέσω εικονικής πραγματικότητας.....	25
Εικόνα 25: HaptX Gloves, G1 και DK2	26
Εικόνα 26: Απτικό γάντι Manus Prime 3 Haptic XR.....	28
Εικόνα 27: Απτικό γάντι Cyber Grasp.....	29
Εικόνα 28: Flex Sensor	32
Εικόνα 29: Αισθητήρας Force Sensitive Resistor (FSR).....	34
Εικόνα 30: Ενεργοποιητής σερβοκινητήρας (servo motor).....	36
Εικόνα 31: Ενεργοποιητής Vibrator Motor.	37
Εικόνα 32: Μικροελεγκτής Arduino Nano ESP32.	39
Εικόνα 33: Προσομοίωση κυκλώματος ανάδρασης αισθητήρων κάμσεις με σερβομηχανισμών.....	42
Εικόνα 34: Σχεδίαση του κυκλώματος στο περιβάλλον του Tinkercad	44
Εικόνα 35: Παράθυρο προγραμματισμού Arduino στο Tinkercad.....	45
Εικόνα 36: Εκτέλεση της προσομοίωσης με ενεργοποιημένα εξαρτήματα	45
Εικόνα 37: Γάντι neoprene	48
Εικόνα 38: Αισθητήρας (flex sensor) με καλωδίωση	49
Εικόνα 39: Ενεργοποιητής με καλωδίωση.....	50
Εικόνα 40: Σύνδεση αισθητήρα κάμψης με κύκλωμα διαιρέτη τάσης.....	51
Εικόνα 41: Σύνδεση αισθητήρα πίεσης με κύκλωμα διαιρέτη τάσης.....	52
Εικόνα 42: Σύνδεση σερβοκινητήρων στο κύκλωμα.....	53
Εικόνα 43: Σύνδεση δονητικού κινητήρα στο κύκλωμα	54
Εικόνα 44: Συνδεσμολογία του Arduino Nano ESP32.....	55
Εικόνα 45: Πειραματικό στάδιο λειτουργικής επαλήθευσης	56
Εικόνα 46: Τοποθέτηση προστατευτικών καλυμάτων αισθητήρων και δονητικών ενεργοποιητών	57
Εικόνα 47: Κόλληση ηλεκτρονικών συνδέσεων αισθητήρα Flex sensor	58
Εικόνα 48: Κόλληση ηλεκτρονικών συνδέσεων αισθητήρα Flex sensor	58
Εικόνα 49: Τοποθέτηση αισθητήρων Flex Sensor.....	59
Εικόνα 50: Τοποθέτηση δονητικού ενεργοποιητή (Vibrator Motor) στην άκρη του δακτύλου.....	60
Εικόνα 51: LiPo Battery	61

Εικόνα 52: TP4056	62
Εικόνα 53: Συνδεσμολογία μπαταρίας -TP4056	63
Εικόνα 54: Ο Ρομποτικός Βραχίονας.....	64
Εικόνα 55: Κλείσιμο Δαχτύλων.....	66
Εικόνα 56: Κράτημα ενός αυγού	67
Εικόνα 57: Αρπαγή ποτενσιόμετρου	68
Εικόνα 58: Αρπαγή ποτνσιόμετρου	68
Εικόνα 59: Κράτημα ποτνσιόμετρου	54
Εικόνα 60: Κράτημα ποτνσιόμετρου	54

Εισαγωγή

Η ανθρώπινη αλληλεπίδραση με ρομποτικά συστήματα εξελίσσεται ραγδαία μέσω της ανάπτυξης συσκευών που προσφέρουν φυσική και απτική διεπαφή. Τα απτικά γάντια αποτελούν έναν από τους πλέον υποσχόμενους τρόπους για τον φυσικό και άμεσο έλεγχο ρομποτικών βραχιόνων, αξιοποιώντας αισθητήρες κάμψης, πίεσης και δονητικά μοτέρ. Η παρούσα εργασία αφορά την κατασκευή και δοκιμή ενός απτικού γαντιού, το οποίο επιτρέπει τον τηλεχειρισμό ρομποτικού βραχίονα μέσω ασύρματης επικοινωνίας και παρέχει ανάδραση αφής στον χρήστη, μέσω αισθητήρα πίεσης και δόνησης.

Η απτική τεχνολογία (haptic technology) είναι ένας τομέας που συνδυάζει τη μηχανολογία, τα ηλεκτρονικά και την επιστήμη υπολογιστών με στόχο να παρέχει στον χρήστη την αίσθηση της αφής σε ψηφιακά ή απομακρυσμένα περιβάλλοντα [39]. Με τη χρήση κατάλληλων αισθητήρων και ενεργοποιητών, η τεχνολογία αυτή επιτρέπει την ανίχνευση της κίνησης και των δυνάμεων που ασκεί ο χρήστης, αλλά και την παροχή απτικής ανάδρασης, ώστε να προσομοιώνεται η αίσθηση της επαφής με αντικείμενα. Ενώ οι πρώτες εφαρμογές της απτικής τεχνολογίας περιορίζονταν σε ειδικευμένα συστήματα τηλεχειρισμού σε τομείς όπως η πυρηνική βιομηχανία και η εξερεύνηση του διαστήματος, σήμερα βρίσκει εφαρμογή σε ένα ευρύ φάσμα, από την εικονική πραγματικότητα και την εκπαίδευση, έως τη ρομποτική και την ιατρική χειρουργική εξ αποστάσεως [25].

Στον τομέα της ρομποτικής, η απτική διεπαφή παίζει καθοριστικό ρόλο στην αύξηση της ακρίβειας και της αποτελεσματικότητας των χειρισμών. Σε αντίθεση με τις απλές οπτικές διεπαφές, η απτική τεχνολογία επιτρέπει στον χειριστή να «αισθάνεται» το περιβάλλον εργασίας του ρομπότ, κάτι που ενισχύει την ακρίβεια, μειώνει τον χρόνο εκτέλεσης και αυξάνει την ασφάλεια [37]. Η δονητική ανάδραση (vibrotactile feedback), που αποτελεί την τεχνολογία επιλογής σε αυτή την εργασία, είναι μια αποδοτική και σχετικά απλή μέθοδος παροχής πληροφορίας αφής, η οποία βασίζεται σε μικρά μοτέρ που δημιουργούν δονήσεις [24]. Με τον τρόπο αυτό, ο χρήστης μπορεί να αντιλαμβάνεται γεγονότα όπως η επαφή με ένα αντικείμενο ή η εφαρμογή δύναμης, χωρίς την ανάγκη περίπλοκων μηχανισμών αντίστασης.

Το συγκεκριμένο έργο εστιάζει στην ανάπτυξη ενός custom απτικού γαντιού, σχεδιασμένου να αναπαράγει με πιστότητα τις κινήσεις του χεριού του χρήστη σε έναν εξίσου custom ρομποτικό βραχίονα. Η σχεδίαση του γαντιού περιλαμβάνει την τοποθέτηση αισθητήρων κάμψης στα δάχτυλα για ακριβή ανίχνευση των γωνιών

κάμψης, ενώ οι αισθητήρες πίεσης καταγράφουν τις δυνάμεις που ασκούνται κατά την επαφή. Η δονητική ανάδραση ενσωματώνεται μέσω μοτέρ σε στρατηγικά σημεία, τα οποία ενεργοποιούνται δυναμικά όταν το ρομπότ έρχεται σε επαφή με αντικείμενα. Αυτό δημιουργεί μια αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ χρήστη και ρομπότ, η οποία βελτιώνει την εμπειρία χειρισμού και αυξάνει την ακρίβεια των κινήσεων [36].

Η επικοινωνία μεταξύ γαντιού και ρομποτικού βραχίονα γίνεται ασύρματα, επιτρέποντας στον χειριστή ελευθερία κινήσεων χωρίς περιορισμούς καλωδίων. Το σύστημα έχει σχεδιαστεί με στόχο την ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης (latency) στη μετάδοση δεδομένων, ώστε η απόκριση να είναι όσο το δυνατόν πιο άμεση και φυσική [33]. Οι εντολές που αποστέλλονται περιλαμβάνουν την κίνηση και θέση κάθε δακτύλου, ενώ τα δεδομένα επαφής που προέρχονται από τον βραχίονα μετατρέπονται σε δονητικά σήματα προς τον χρήστη.

Η ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων προσφέρει σημαντικές δυνατότητες για πλήθος εφαρμογών. Από τη βιομηχανική παραγωγή, όπου απαιτείται τηλεχειρισμός σε επικίνδυνα περιβάλλοντα, μέχρι την εκπαίδευση και την έρευνα, ένα απτικό γάντι που συνεργάζεται με ρομποτικό βραχίονα μπορεί να προσφέρει έναν φυσικό, ασφαλή και αποδοτικό τρόπο αλληλεπίδρασης με μηχανές. Η δυνατότητα προσαρμογής του συστήματος στις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής, χάρη στον custom σχεδιασμό του, δίνει ιδιαίτερη ευελιξία και ανοίγει τον δρόμο για μελλοντικές επεκτάσεις και βελτιώσεις.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως στόχο όχι μόνο την τεχνική υλοποίηση του απτικού γαντιού και τη σύνδεσή του με τον ρομποτικό βραχίονα, αλλά και την αξιολόγηση της απόδοσής του σε πραγματικές συνθήκες χρήσης. Μέσα από τον συνδυασμό μηχανολογικού σχεδιασμού, ανάπτυξης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και προγραμματισμού, επιχειρείται η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου συστήματος που γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ ανθρώπινης αφής και μηχανικής αλληλεπίδρασης.

Κεφάλαιο 1: Απτική Τεχνολογία

1.1. Ορισμός

Ως απτική τεχνολογία (haptic technology) ορίζεται ο διεπιστημονικός και τεχνολογικός τομέας που εστιάζει στην μελέτη, στην ανάπτυξη και στην εφαρμογή διασυνδεδεμένων συστημάτων τα οποία επιτρέπουν την αλληλεπίδραση μέσω της αίσθησης της αφής και της κίνησης, την αντίληψη και παραγωγή απτικών ερεθισμάτων – όπως δύναμη, πίεση, δόνηση και κίνηση – μέσω μηχανικών ή ηλεκτρονικών διεργασιών [1] [2], [3].

Ο όρος “haptics” προέρχεται από την ελληνική λέξη “ἅπτομαι” (έρχομαι σε επαφή) και περιλαμβάνει τόσο την επιδερμική (cutaneous) αίσθηση, όσο και τη βαθύτερη ιδιοδεκτικότητα και κινησιαισθησία (proprioception και kinesthesia)[4]. Μέσω του συνδυασμού της επιδερμικής και κιναισθητικής πληροφόρησης, οι απτικές διεπαφές ενεργοποιούν αισθητηριακά και κινητικά μονοπάτια του ανθρώπινου σώματος με σκοπό τη προσομοίωση των φυσικών ιδιοτήτων των αντικειμένων όπως η υφή, η ακαμψία, η μάζα και η θερμοκρασία [1], [3], [4]. Επιπλέον, επιτρέπει την απτική εξερεύνηση και τον χειρισμό εικονικών αντικειμένων σε εφαρμογές όπως η τηλεχειρουργική, η εκπαίδευση, η εικονική πραγματικότητα και η αποκατάσταση [2], [3].

Ο απώτερος στόχος της απτικής τεχνολογίας είναι η προσομοίωση της φυσικής αφής σε περιβάλλοντα υπολογιστικής αλληλεπίδρασης, ενισχύοντας τη ρεαλιστικότητα, την ενσώματη εμπειρία και την αποτελεσματικότητα της ανθρώπινης διάδρασης με ψηφιακά ή απομακρυσμένα φυσικά περιβάλλοντα. [5].

1.2. Ιστορική Αναδρομή

Η απτική τεχνολογία (haptic technology), ως τεχνολογική υλοποίηση της ανθρώπινης αίσθησης της αφής, ακολουθεί μια ιστορική πορεία που ξεκινά από τα μέσα του 20ού αιώνα και πιο συγκεκριμένα από τις πρώτες εφαρμογές της τηλεκίνησης. Η απτική τεχνολογία (AT) αποτελεί έναν ταχέως αναπτυσσόμενο τομέα της σύγχρονης επιστήμης και τεχνολογίας, με τις πρώτες εφαρμογές της να εμφανίζονται στον τομέα της αεροναυπηγικής και των στρατιωτικών προσομοιώσεων, κυρίως μέσω εξομοιωτών πτήσης που παρείχαν ανάδραση δύναμης (force feedback) στους χειριστές και να εξελίσσεται μέχρι τα σύγχρονα πολυτροπικά και εξατομικευμένα απτικά συστήματα.

Οι συσκευές εξομοίωσης πτήσης χρησιμοποιούσαν σερβομηχανισμούς ώστε να μεταδώσουν στον πιλότο απτική πληροφορία σχετικά με την αεροδυναμική συμπεριφορά του αεροσκάφους [2].

Αναλυτικότερα, οι απαρχές της απτικής τεχνολογίας εντοπίζονται στα πρώτα μηχανικά συστήματα τηλεχειρισμού κατά τη δεκαετία του 1940, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη διαχείριση επικίνδυνων υλικών, κυρίως στο πλαίσιο πυρηνικών εφαρμογών [2]. Δύο δεκαετίες αργότερα, τη δεκαετία του 1960, σημαντικό έργο στον τομέα της υποκατάστασης των αισθήσεων προσέφερε ο νευροεπιστήμονας Paul Bach-y-Rita, ο οποίος σχεδίασε συστήματα που μετέτρεπαν οπτικές πληροφορίες σε απτικά ερεθίσματα για την υποβοήθηση της όρασης μέσω αφής. Παράλληλα, η ΑΤ αξιοποιήθηκε σε τηλεχειριστήρια (teleoperators), τα οποία επέτρεπαν σε χρήστες να αλληλεπιδρούν με φυσικά αντικείμενα σε απομακρυσμένα ή επικίνδυνα περιβάλλοντα, όπως στον υποθαλάσσιο και πυρηνικό τομέα. Έως και τη δεκαετία 1970, η ανάπτυξη των πρώτων υπολογιστικά υποβοηθούμενων απτικών διεπαφών σηματοδότησε τη μετάβαση από τα αμιγώς μηχανικά συστήματα σε αυτά που ενσωμάτωναν αισθητήρες και υπολογιστική επεξεργασία. Κομβικής σημασίας υπήρξε η εργασία του Knoll στο Bell Labs, ο οποίος παρουσίασε την πρώτη διεπαφή που επέτρεπε την "αφή" εικονικών σχημάτων μέσω υπολογιστή [1].

Η δεκαετία του 1990 αποτέλεσε καμπή για τον τομέα, καθώς εισήχθησαν οι πρώτες εμπορικά διαθέσιμες συσκευές απτικής ανατροφοδότησης και σηματοδότησε μια ραγδαία πρόοδο, χάρη στην εξάπλωση των υπολογιστικών συστημάτων και της εικονικής πραγματικότητας [1]. Η δημιουργία εξειδικευμένων συσκευών, όπως το σύστημα PHANTOM από τους Massie και Salisbury το 1993–1994, έδωσε τη δυνατότητα υψηλής ακρίβειας στην αλληλεπίδραση με εικονικά αντικείμενα μέσω ανάδρασης δύναμης [1], [3].



Εικόνα 1 & 2. 3D Σύστημα Αισθητήρια Συσκευή (Touch Haptic Device), [6]

Εν συνεχεία, στις αρχές του 21ου αιώνα, (τέλη της δεκαετίας του 1990 και τις αρχές του 2000), η ΑΤ άρχισε να επεκτείνεται σε προϊόντα για επιστημονική χρήση, όπως τα απτικά χειριστήρια και τα γάντια ανατροφοδότησης, π.χ. το CyberGrasp και το FEELit Mouse, επιτρέποντας βασική δερματική ανατροφοδότηση σε ευρύ κοινό [3]. Επίσης, επεκτάθηκε και σε ιατρικές εφαρμογές, με την ανάπτυξη εκπαιδευτικών προσομοιωτών για λαπαροσκοπικές και μικροχειρουργικές επεμβάσεις. Η δυνατότητα αλληλεπίδρασης με εικονικούς ιστούς και οργάνωση της απτικής πληροφορίας συνέβαλε σημαντικά στη βελτίωση της ιατρικής εκπαίδευσης [3].

Στην δεκαετία του 2010, ενσωματώθηκαν αλγόριθμοι θεωρίας πληροφορίας με σκοπό τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των απτικών σημάτων ανάλογα με τις ιδιότητες του χρήστη [5]. Η δεκαετία αυτή χαρακτηρίστηκε από την ευρεία ενσωμάτωση της ΑΤ σε καταναλωτικές συσκευές, όπως τα smartphones, τα smartwatches και τα έξυπνα γάντια. Συσκευές όπως το Apple Watch, που προσέφεραν απτική ειδοποίηση μέσω μικροδονήσεων, ή το SenseGlove, ένα γάντι που επέτρεπε την απτική αναπαράσταση σε περιβάλλοντα εικονικής πραγματικότητας, κατέδειξαν την εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής στην καθημερινότητα.

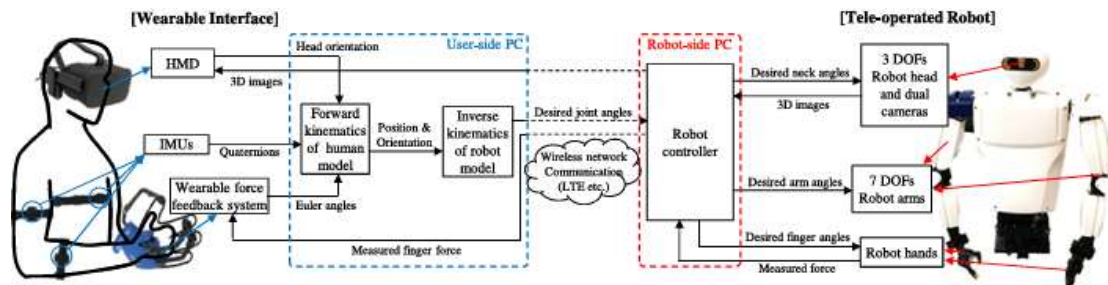
Την τελευταία πενταετία, η ερευνητική δραστηριότητα έχει στραφεί σε πολυαισθητηριακά και βιο-εμπνευσμένα απτικά συστήματα, τα οποία συνδυάζουν απτικά ερεθίσματα, όπως δόνηση, πίεση και θερμοκρασία, με σκοπό τη δημιουργία ρεαλιστικής αφής [5]. Ερευνητές του University College London [7] ανέπτυξαν πρόσφατα ένα σύστημα που μιμείται τις φυσικές ιδιότητες του ανθρώπινου δέρματος, με εφαρμογές τόσο στην αποκατάσταση όσο και στην εικονική αλληλεπίδραση.

Παράλληλα, προωθούνται οι έννοιες των επαναδιαμορφώσιμων (modular) διεπαφών, όπου οι χρήστες μπορούν να προσαρμόζουν τον τύπο και την ένταση των απτικών ερεθισμάτων, ανάλογα με το περιβάλλον χρήσης. Οι εφαρμογές επεκτείνονται σε ποικίλους τομείς, όπως η επαυξημένη πραγματικότητα, η αποκατάσταση της αφής σε άτομα με νευρολογικές βλάβες και οι προηγμένες διεπαφές ανθρώπου-μηχανής [5].

Αναμφίβολα, η ιστορική εξέλιξη της απτικής τεχνολογίας δεν ακολουθεί μια γραμμική πορεία, αλλά καθοδηγείται από τη σύγκλιση επιστημονικών πεδίων όπως η ρομποτική, η νευροεπιστήμη, η υλικοτεχνολογία και η αλληλεπίδραση ανθρώπου-υπολογιστή. Με τις σύγχρονες τάσεις να δείχνουν προς τη δημιουργία καθηλωτικών εμπειριών σε εικονικά περιβάλλοντα, η απτική τεχνολογία φαίνεται να διαδραματίζει ολοένα και πιο καθοριστικό ρόλο στο μέλλον της ανθρώπινης διάδρασης με τα ψηφιακά συστήματα.

1.3. Σημασία Τηλεχειρισμού και Απτικής Ανάδρασης

1.3.1. Τηλεχειρισμός

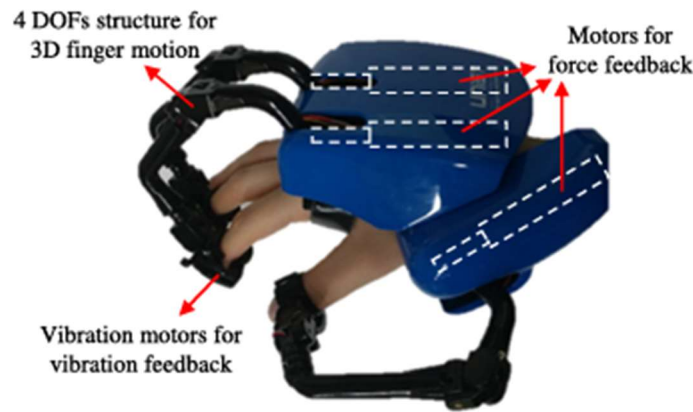


Εικόνα 3. Διάγραμμα του συστήματος AVATAR με το φορετό σύστημα ανάδρασης δύναμης (WeHAPTIC) [8].

Η έννοια του τηλεχειρισμού (teleoperation) και της αλληλεπίδρασης ανθρώπου-μηχανής βρίσκεται στον πυρήνα της ανάπτυξης και της εφαρμογής της απτικής τεχνολογίας. Αρχικά, ο τηλεχειρισμός αποτελεί βασικό πεδίο εφαρμογής της απτικής τεχνολογίας και σύμφωνα με τους Pacchierotti και Prattichizzo (2024) [9], η σημασία του τηλεχειρισμού έγκειται στην δυνατότητα χρήσης και ελέγχου ενός απομακρυσμένου ρομποτικού συστήματος ή συσκευής, με σκοπό τη λήψη πληροφοριών από αισθητήρες και αποστολή εντολών ελέγχου σε ρομπότ. η βασική λειτουργία του τηλεχειρισμού περιλαμβάνει τη μετάδοση εντολών από τον χρήστη προς το ρομπότ, και την επιστροφή αισθητηριακής πληροφορίας στον χειριστή, με σκοπό την επιτυχή ολοκλήρωση μιας αποστολής σε περιβάλλοντα που είναι είτε απρόσιτα με φυσική παρουσία είτε επικίνδυνα [8].

1.3.2. Απτική Ανάδραση

Αντίστοιχα, στο πλαίσιο της απτικής τεχνολογίας, η έννοια της διαισθητικής ανατροφοδότησης ή ανάδρασης (haptic feedback), έχει την ίδια σημασία. Η εισαγωγή της απτικής ανατροφοδότησης, τόσο κινησιοαισθητικής όσο και τακτικής, βελτιώνει την ποιότητα και την ακρίβεια της ανθρώπινης απόκρισης, μετατρέποντας τον τηλεχειρισμό από παθητική σε ενεργή και αισθητηριακά πλούσια διεργασία [9].



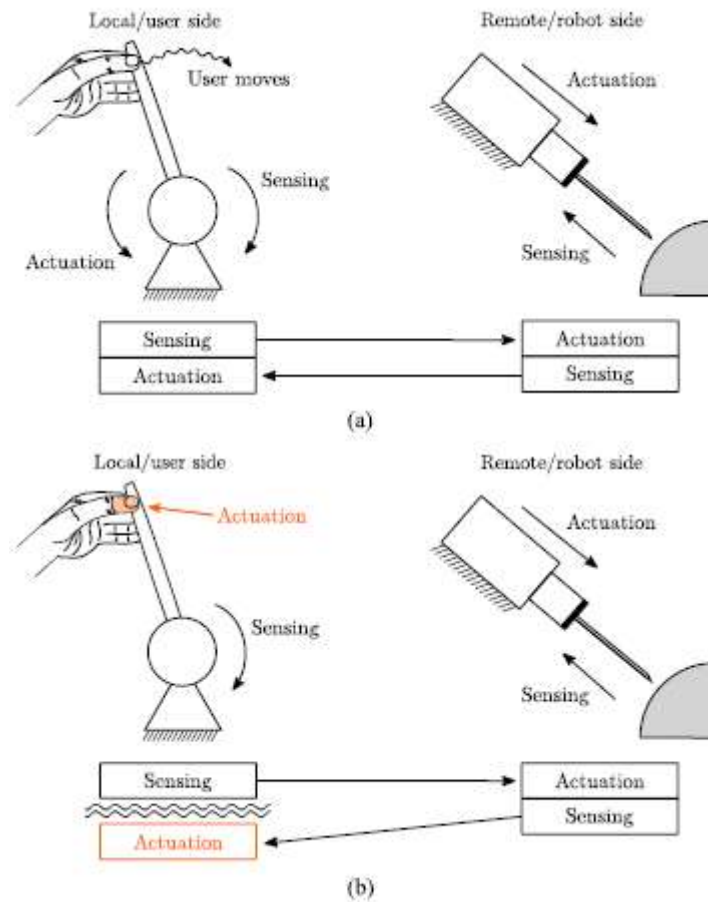
Εικόνα 4. Σύστημα ανάδρασης δύναμης (WeHAPTIC), [8].

Η ανασκόπηση των Pacchierotti και Prattichizzo (2024) επισημαίνει ότι η εισαγωγή της τακτικής απτικής ανάδρασης σε συστήματα τηλεχειρισμού επιλύει σημαντικά προβλήματα σταθερότητας που συναντώνται όταν επιχειρείται η απευθείας αναπαραγωγή των κινησιοαισθητικών ερεθισμάτων. Η χρήση τοπικά εφαρμοζόμενης τακτικής ανατροφοδότησης (π.χ. μέσω δονήσεων, πίεσης ή μηχανικών παραμορφώσεων στο δέρμα του χρήστη) καθιστά τα συστήματα ευσταθή και ενεργειακά αποδοτικά [9].

Ένα σύστημα τηλεχειρισμού με απτική ανατροφοδότηση επιτρέπει την εξερεύνηση και τον χειρισμό αντικειμένων μέσω ενός συνδυασμού κινησιοαισθητικής και απτικής ανατροφοδότησης, ακόμη και όταν η οπτική πληροφόρηση είναι περιορισμένη λόγω απόκρυψης [10]. Με άλλα λόγια, το τηλεχειριζόμενο σύστημα ενσωματωμένο σε γάντι με απτική ανατροφοδότηση, καταγράφοντας την κάμψη των δακτύλων του χρήστη και μεταδίδοντας σήματα, επιτρέπει στον χειριστή να ελέγχει ένα ρομποτικό άκρο για την εκτέλεση πολύπλοκων χειρισμών. Η συνδυαστική χρήση συστημάτων ανάδρασης αφής επιτρέπει στον χειριστή όχι μόνο να κατευθύνει το ρομποτικό μέσο, αλλά και να «αισθάνεται» το περιβάλλον του, γεγονός που βελτιώνει κατακόρυφα την απόδοση, την ακρίβεια και την ασφάλεια των τηλεχειριζόμενων διεργασιών [4].

Η απτική ανατροφοδότηση δρα ως ένα κρίσιμο κανάλι επικοινωνίας μεταξύ του χρήστη και του συστήματος, επιτρέποντας τη φυσική και άμεση κατανόηση των δυναμικών αλλαγών σε ένα περιβάλλον, χωρίς την αποκλειστική εξάρτηση από οπτικά ή ηχητικά ερεθίσματα [9]. Για παράδειγμα, σε μια ρομποτική διεπαφή με ανάδραση δύναμης, ο χρήστης μπορεί να νιώσει την αντίσταση ενός υλικού ή την ολισθηρότητα μιας επιφάνειας, προσαρμόζοντας αυτόματα τις κινήσεις του [11]. Αντίστοιχα, από

μελέτη επιβεβαιώνει ότι ο συνδυασμός κινησιοαισθητικής και επιδερμικής ανατροφοδότησης ενισχύει τον ρεαλισμό και επιτρέπει την ταυτόχρονη αντίληψη πολλαπλών ιδιοτήτων κατά τη χειριστική διεπαφή με εικονικά αντικείμενα [12].



Εικόνα 5. Σύγκριση μεταξύ απτικής και δερματικής προσέγγιση [9].

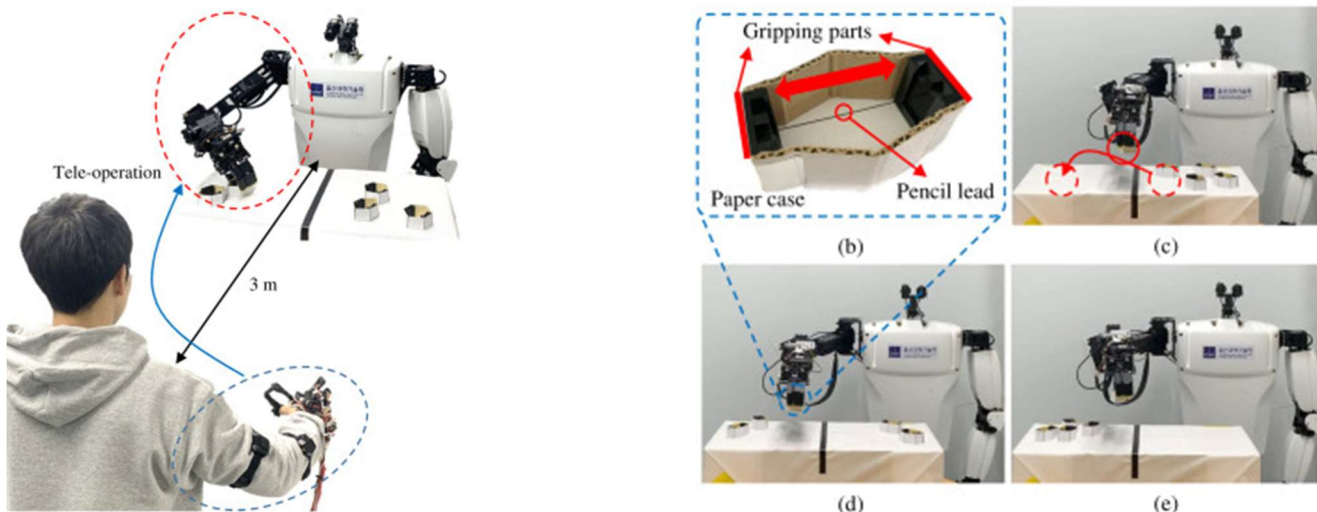
Απτική προσέγγιση: Η ανάδραση δύναμης που λαμβάνει ο χειριστής εφαρμόζεται απευθείας στον τοπικό ενεργοποιητή, ο οποίος ελέγχει και την κίνηση του απομακρυσμένου ρομπότ. Συχνά απαιτούνται ειδικοί έλεγχοι για την αποφυγή ασταθών αντιδράσεων, επειδή η δύναμη αυτή μπορεί να επηρεάσει τη σταθερότητα του συστήματος [9].

Δερματική προσέγγιση: Η ανάδραση εφαρμόζεται απευθείας στο δέρμα του χειριστή (π.χ. στις άκρες των δακτύλων), χωρίς να μεταβάλλει τη θέση της τοπικής διεπαφής. Ως εκ τούτου, η ανίχνευση και η ενεργοποίηση είναι ανεξάρτητες από τον χειρισμό, διατηρώντας το σύστημα σταθερό, όπως θα ήταν χωρίς απτική ανάδραση. Αν και το παράδειγμα που απεικονίζεται στην Εικόνα 5. αφορά τα δάχτυλα, η δερματική ανάδραση μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλα σημεία του σώματος [9].

Περαιτέρω, η δυναμική προσαρμογή της ανθρώπινης συμπεριφοράς βάσει

απτικών ερεθισμάτων αποτυπώνεται σε σύγχρονα ρομποτικά συστήματα. Οι [13] παρουσιάζουν ένα σύστημα δονητικής κλιμακώμενης ανατροφοδότησης ως προς την τριβή, το οποίο ενημερώνει σε πραγματικό χρόνο για επερχόμενη ολίσθηση κατά τη σύλληψη αντικειμένων, επιτρέποντας στους χρήστες να προσαρμόσουν αυτόματα τη δύναμη σύλληψης. Ομοίως, αναπτύχθηκε ένα σύστημα όπου η θέση του ρομπότ προσαρμόζεται αυτόματα βάσει της δύναμης που ασκείται σε κοινά αντικείμενα, ενισχύοντας την ασφαλή συνεργασία μέσω ανατροφοδοτούμενης μετατόπισης [14]. Τα παραπάνω ευρήματα ενισχύονται από νευροφυσιολογικά δεδομένα, όπως παρουσιάζονται από τους [15], τα οποία καταδεικνύουν ότι η ανίχνευση της ολισθηρότητας προκαλεί ενστικτώδη ρύθμιση της δύναμης σύλληψης, ένας μηχανισμός που ήδη ενσωματώνεται σε προηγμένα απτικά ρομποτικά περιβάλλοντα.

Η σημασία του τηλεχειρισμού και της απτικής αλληλεπίδρασης επεκτείνεται πλέον σε πεδία όπως η βιομηχανική παραγωγή, η αποκατάσταση μετά από τραυματισμό, καθώς και οι τεχνολογίες υποβοήθησης για άτομα με αναπηρίες, αποτελώντας σημαντική πρόοδο τόσο στη λειτουργική αυτονομία των ρομπότ, όσο και στη βελτίωση της ασφάλειας σε κρίσιμες εφαρμογές, όπως στη χειρουργική, στην πυρηνική αποσυναρμολόγηση και στην υποθαλάσσια έρευνα. Ιδιαίτερα στον χώρο της τηλεχειρουργικής, η χρήση απτικής ανάδρασης επιτρέπει στους ιατρούς να διατηρούν το επίπεδο ευαισθησίας και δεξιότητας της φυσικής επαφής, ενώ εκτελούν επεμβάσεις σε απόσταση [15], [16], [17].



Εικόνα 6. Διάταξη πειράματος για την εργασία Εικόνα 7. Επίδειξη του πειράματος της Εικόνας 6. [8] χειρισμού εύθραυστων αντικειμένων [8].

Συνοψίζοντας, γίνεται αντιληπτό ότι η συνεισφορά του τηλεχειρισμού και της

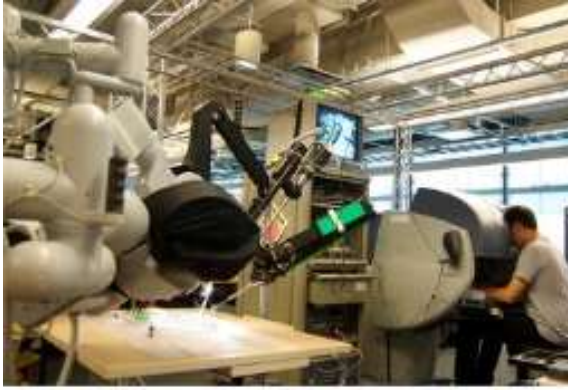
απτικής ανάδρασης στην εξέλιξη της απτικής τεχνολογίας είναι θεμελιώδης, καθώς ο συνδυασμός συστημάτων τηλεχειρισμού με την απτική ανατροφοδότηση ενισχύει τη φυσικότητα και την ακρίβεια της απόκρισης, φέρνοντας τον απομακρυσμένο χειρισμό πιο κοντά στην ανθρώπινη αφή, ενισχύει την εμπιστοσύνη του χρήστη στο σύστημα μέσω της μετάδοσης ακριβούς απτικής πληροφορίας από απομακρυσμένα ρομπότ ή αισθητήρες, επιτρέποντας την εκτέλεση πολύπλοκων εργασιών με ελάχιστο σφάλμα και τέλος, συμβάλλει στη δημιουργία ανθρωποκεντρικών διεπαφών. Ως εκ τούτου, ο συνδυασμός συστημάτων τηλεχειρισμού με την απτική ανατροφοδότηση βασικά επιστημονικά πλαίσια που διαμορφώνουν τη σύγχρονη αντίληψη για την ψηφιακή αφή και την ενσώματη εμπειρία στη σύγχρονη τεχνολογία.

1.4. Υφιστάμενες εφαρμογές

Η απτική τεχνολογία έχει πλέον διαμορφώσει έναν ώριμο και διεπιστημονικό χώρο εφαρμογών, που εκτείνεται από τον τομέα της υγείας και της εκπαίδευσης έως τη βιομηχανία ψυχαγωγίας και τις διασυνδεδεμένες συσκευές καθημερινής χρήσης. Η ραγδαία πρόοδος στην ανάπτυξη απτικών διεπαφών και αισθητήριων συστημάτων έχει επιτρέψει την ενσωμάτωση της αφής σε πλήθος εφαρμογών, καθιστώντας την ένα βασικό μέσο επικοινωνίας μεταξύ ανθρώπου και ψηφιακών συστημάτων.

1.4.1. Τομέας Υγείας

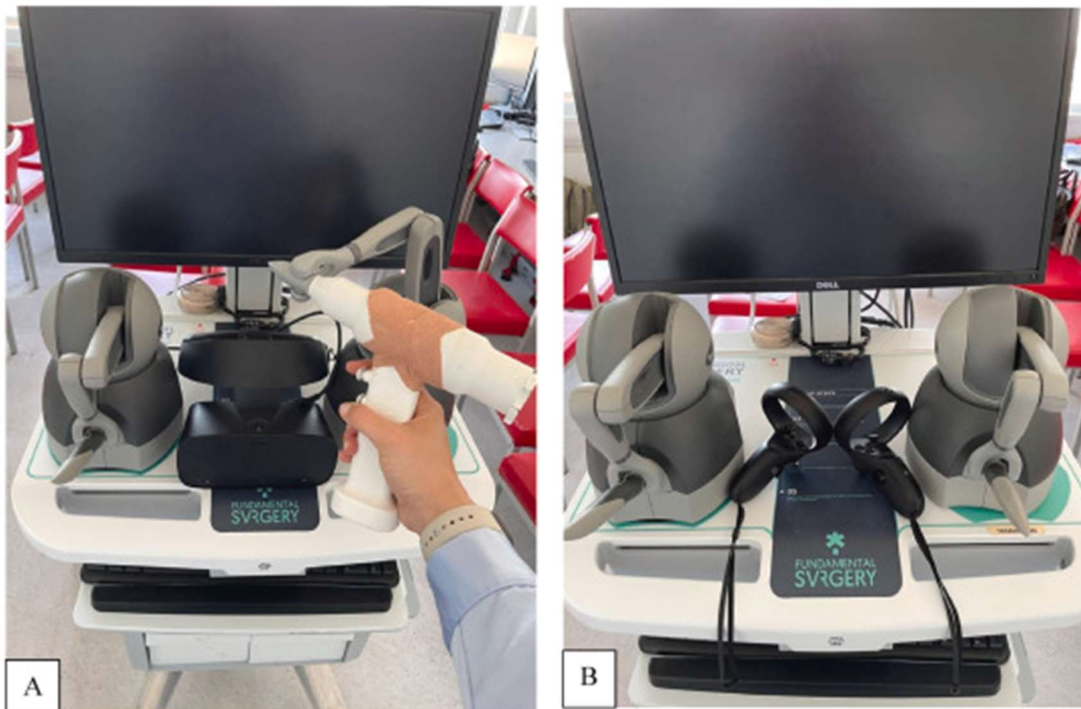
Οι πρόσφατες εξελίξεις στην απτική τεχνολογία φανερώνουν τη σημαντικότητα του τηλεχειρισμού και της απτικής τεχνολογίας στην υγειονομική περίθαλψη, και πιο συγκεκριμένα σε ιατρικές εφαρμογές, ρομποτική χειρουργική, στην χειρουργική προσομοίωση και στην αποκατάσταση. Αρχικά, η ενσωμάτωση της απτικής ανατροφοδότησης σε ρομποτικά χειρουργικά συστήματα βοηθάει στην κατανόηση της υφής των ιστών, της αντίστασης των οργάνων και της αντίδρασης των εργαλείων κατά τη χειρουργική πράξη, οδηγώντας σε μείωση της εφαρμοζόμενης δύναμης, αύξηση της γνώσης, της ακρίβειας και αύξηση των ποσοστών επιτυχίας [6], [18]. Επιπρόσθετα, ο σχεδιασμός ενός συστήματος ανθρωπόμορφου βραχίονα με γάντι αισθητήρων απτικής ανάδρασης, με επεκτάσιμο σύστημα και που λειτουργεί με μικροελεγκτή (Microcontroller-operated anthropomorphic manipulator with haptic feedback), επιτρέπει την τηλεχειρουργική υψηλής ακρίβειας (high-precision tele-surgery) [19].



Εικόνα 8. Ρομποτικό χειρουργικό σύστημα da Vinci [20].

Εικόνα 9. Λαβή da Vinci master με προσαρμοσμένο ενεργοποιητή για απτική απεικόνιση των δονήσεων του εργαλείου [20].

Σημαντική πρόοδος έχει σημειωθεί στην κλινική εκπαίδευση, ιδιαίτερα στην εκπαίδευση χειρουργικών δεξιοτήτων, κατά την οποία ενισχύεται το κίνητρο και η αφοσίωση [18]. Η απτική τεχνολογία αξιοποιεί την αναπαραγωγή ρεαλιστικών συνθηκών σε προσομοιωμένα περιβάλλοντα βελτιώνοντας την ιατρική εκπαίδευση και μέσω χειρουργικής προσομοίωσης. Συστήματα ,όπως το LAP Mentor και το da Vinci Skills Simulator προσφέρουν απτική ανάδραση για την εκπαίδευση χειρουργών σε ελάχιστα επεμβατικές τεχνικές, όπως η λαπαροσκόπηση και η ρομποτική χειρουργική [21], [22]. Στην Εικόνα 8. απεικονίζεται το ρομποτικό χειρουργικό σύστημα da Vinci με χειριστήρια τοποθετημένο από την πλευρά του ασθενούς και στην Εικόνα 9. απεικονίζεται η κεντρική κονσόλα χειρισμού. Ο χειρουργός χειρίζεται τα εργαλεία μέσω των κεντρικών λαβών, ενώ οι λευκοί συνδετήρες στην πλευρά του ασθενούς ανιχνεύουν τις δονήσεις [20].



Εικόνα 10. Προσομοιωτής εικονικής πραγματικότητας για ορθοπαιδική χειρουργική με χρήση απτικής ανάδρασης (3D systems, Rock Hill, SC, USA) (A) και με χειριστήρια Oculus Rift (χωρίς απτική ανάδραση) (B) [23].

Εικόνα 11. Προσομοιωτής εικονικής πραγματικότητας για ορθοπαιδική χειρουργική με χειριστήρια Oculus Rift (χωρίς απτική ανάδραση) (B) [23].

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η εφαρμογή της απτικής τεχνολογίας στην επεμβατική ακτινολογία, όπου αξιοποιείται για την υποβοηθούμενη καθοδήγηση συρμάτων. Συγκεκριμένα, έχει αναπτυχθεί απτική διεπαφή που επιτρέπει στους επεμβατικούς ακτινολόγους να αισθάνονται την αντίσταση και τις μεταβολές δύναμης κατά τη διείσδυση οδηγού σύρματος, ενισχύοντας τον έλεγχο και μειώνοντας τον κίνδυνο επιπλοκών κατά τη διάρκεια ελάχιστα επεμβατικών διαδικασιών [18].

Επιπρόσθετα, το ρομποτικό σύστημα TRINA (Tele-Robotic Intelligent Nursing Assistant) σχεδιάστηκε για να βοηθά τους εργαζόμενους στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης σε εργασίες ρουτίνας φροντίδας ασθενών και διαχείρισης μολυσμένων υλικών, επιτρέποντας την αλληλεπίδραση με απομακρυσμένα ρομποτικά συστήματα, μέσω της αντίληψη βάρους, της κατεύθυνση δύναμης κατά την αλληλεπίδραση με εικονικά αντικείμενα, καθώς και της ανίχνευσης σχημάτων [24].

Από έρευνα που διεξήγαγαν οι [18] σε 34 μελέτες, παρατήρησαν ότι μέσω της απτικής τεχνολογίας βελτιώνεται τόσο η αισθητηριοκινητική απόδοση όσο και η κινητική λειτουργία κατά την αποκατάσταση σε ασθενείς που υπέστησαν εγκεφαλικά επεισόδια, σε εφήβους με αναπτυξιακή διαταραχή συντονισμού (DCD), καθώς και σε

ασθενείς με ακρωτηριασμό ακτίνας ή διάγνωση FAI (μηροκοτυλιαία πρόσκρουση). Η επιτυχία των απτικών συσκευών στην αποκατάσταση οφείλεται κυρίως πραγματοποιώντας αισθητηριακή εισροή, δηλαδή, ανατροφοδότηση της δύναμης που μιμείται πραγματικές αλληλεπιδράσεις, γεγονός που βοηθάει τους χρήστες να κατανοήσουν και να ελέγξουν καλύτερα τις κινήσεις τους [18]. Επίσης, τέτοια συστήματα ενισχύουν την ικανότητα των κλινικών να κατευθύνουν θεραπείες αποκατάστασης μέσω συστημάτων διαδικτυακής παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο [19]. Μία επιπρόσθετη χρήση της απτικής τεχνολογίας σχετίζεται με τα προσθετικά μέλη νέας γενιάς στα οποία έχουν ενσωματωθεί αισθητήρες αφής που επιτρέπουν στους χρήστες να ανακτούν μέρος της αίσθησης επαφής μέσω νευρικής ή μηχανικής ανατροφοδότησης [25].

Ένας λιγότερο διαδεδομένος κλάδος στον οποίο εφαρμόζεται η απτική τεχνολογία είναι στον χώρο της φυσικής κατάστασης και της προπόνησης. Παράδειγμα αποτελεί ένας πάτος παπουτσιού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 12, ο οποίος παρέχει δονητική πλοήγηση και ακριβή παρακολούθηση δραστηριότητας, καταγράφοντας βήματα και θερμίδες χωρίς συνεχή χρήση τηλεφώνου [26].



Εικόνα 12. Πάτος παπουτσιού Lechal,

Η απτική τεχνολογία φαίνεται να διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην ανάπτυξη τεχνολογιών υποβοήθησης για άτομα με αναπηρίες, συμβάλλοντας στη βελτίωση της ποιότητας ζωής και στην αποκατάσταση της λειτουργικότητας [26].

1.4.2. Εικονική και Επαυξημένη Πραγματικότητα

Η εικονική πραγματικότητα (VR) και η επαυξημένη πραγματικότητα (AR) αξιοποιούν ολοένα και περισσότερο απτικά συστήματα για την ενίσχυση της εμπειρίας χρήστη. Συσκευές όπως το SenseGlove, το HaptX Glove και η πλατφόρμα bHaptics επιτρέπουν την αναπαραγωγή απτικών ερεθισμάτων με ακρίβεια, προσφέροντας στον χρήστη την

ψευδαίσθηση φυσικής αλληλεπίδρασης με αντικείμενα στον εικονικό χώρο. Αναλυτικότερα, το SenseGlove προσομοιώνει την επαφή και το σχήμα εικονικών αντικειμένων, μέσω δόνησης και κινησιοαισθητικής απτικής ανατροφοδότησης, βελτιώνοντας την ακρίβεια στην εκτέλεση εικονικών εργασιών και ενισχύοντας το κίνητρο των χρηστών. Παράλληλα, μειώνεται το νοητικό φόρτο κατά την εκπαιδευτική διαδικασία [27], [28]. Σε ότι αφορά το γάντι HaptX αξίζει να σημειωθεί ότι, η ενσωμάτωση πνευματικών απτικών ενεργοποιητών, υψηλής ανάλυσης, επιτρέπουν λεπτομερείς αίσθηση υφών και αντίστασης κατά τη διάρκεια χειρισμού εικονικών αντικειμένων. Ως εκ τούτου, το γάντι HaptX καθίσταται ιδανικό για προσομοιώσεις υγειονομικής περίθαλψης, αξιολογήσεις σχεδιασμού και θεραπευτικά περιβάλλοντα, προσφέροντας ρεαλιστικά απτικά ερεθίσματα σε ελεγχόμενα εικονικά περιβάλλοντα [29].



Εικόνα 13. Πρωτότυπο γάντι απτικής τεχνολογίας [30]. **Εικόνα 14.** HaptX DK2 gloves [31].

Σχετικά με την πλατφόρμα bHaptics, οι [32] και [33], υποστηρίζουν ότι προσαρμόζεται εύκολα σε ποικίλες εφαρμογές επαυξημένης και εικονικής πραγματικότητας και μέσω απτικών γιλέκων παράγει τοπικά στοχευμένα απτικά μοτίβα, ενισχύοντας σημαντικά τον ρεαλισμό και την αίσθηση εμπύθισης και συμβάλλοντας στη σταθεροποίηση του ατόμου, στη ρύθμιση συναισθημάτων και σε παρεμβάσεις βασισμένες στην έκθεση.



Εικόνα 15. Συσκευές απτικής ανάδρασης για εικονική πραγματικότητα και βιντεοπαιχνίδια [6].

Η πλατφόρμα bHaptics χρησιμοποιείται ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα εκπαίδευσης προσωπικού, όπως ασκήσεις ασφαλείας ή ομαδικές εικονικές προσομοιώσεις. Και οι τρεις τεχνολογίες που αναφέρθηκαν παραπάνω χρησιμοποιούνται εκτενώς σε τομείς, όπως η εκπαίδευση προσωπικού, η αρχιτεκτονική προσομοίωση, η ψυχοθεραπεία και η αποκατάσταση μετά από τραύμα [27], [28], [32], [33].

Ωστόσο, συστήματα που χρησιμοποιούν πνευματικούς ενεργοποιητές παρουσιάζουν καθυστερήσεις στην απτική απόκριση, περιορίζοντας την αίσθηση ρεαλισμού. Για να ξεπεράσουν αυτά τα όρια, απαιτείται η ενσωμάτωση αισθητήρων αφής και ηλεκτροστατικού συμπλέκτη στα γάντια, ώστε να προστεθεί και ανάδραση δύναμης, προσφέροντας στους χρήστες πιο φυσική και πιστή εμπειρία επαφής [34].

1.4.3. Βιομηχανία ψυχαγωγίας και βιντεοπαιχνιδιών

Η βιομηχανία των βιντεοπαιχνιδιών αποτελεί έναν από τους πρώτους και πιο δημοφιλείς τομείς εφαρμογής της απτικής τεχνολογίας, καθώς η εφαρμογή τους ενισχύει την πολυαισθητηριακή εμπειρία των χρηστών και προσφέροντας ένα νέο επίπεδο εμπύθισης. Απτικά ερεθίσματα που συγχρονίζονται με οπτικοακουστικό περιεχόμενο, προσφέροντας δονήσεις, θερμικά ερεθίσματα ή ακόμα και αίσθηση κίνησης εφαρμόζονται στον κινηματογράφο, και ιδιαίτερα μέσω της ανάπτυξης της τεχνολογίας 4D [35].

Σε ότι αφορά τον τομέα των βιντεοπαιχνιδιών, αξιοποιείται η τεχνητή νοημοσύνη για την κατηγοριοποίηση ηχητικών γεγονότων σε παιχνίδια εικονικής πραγματικότητας (VR), τα οποία μετατρέπονται αυτόματα σε απτικά πρότυπα που διαχέονται μέσω απτικής στολής σε όλο το σώμα του χρήστη προσφέροντας την

αίσθηση εκρήξεων, κραδασμών ή απτικών σημάτων [36]. Ως εκ τούτου, με τη χρήση της απτικής τεχνολογίας επιτυγχάνεται ρεαλιστική αίσθηση γεγονότων μέσα στο παιχνίδι, αυξάνεται η αμεσότητα και συμμετοχικότητα κατά την εμπειρία του παίκτη, ενισχύοντας τη συνολική εμπειρία ψυχαγωγίας. Στα περισσότερα video game controllers (π.χ. Sony DualSense και τα Haptic Feedback Controllers της Xbox) των τελευταίων ετών έχει ήδη ενσωματωθεί προηγμένος απτικός μηχανισμός, όπως κραδασμός, πίεση και μεταβολή έντασης, ο οποίος είναι συγχρονισμένος με γεγονότα που διαδραματίζονται κατά τη διάρκεια των βιντεοπαιχνιδιών, προσφέροντας ρεαλισμό και αυξάνοντας την εμπύθιση και τη συναισθηματική εμπλοκή των χρηστών [37].

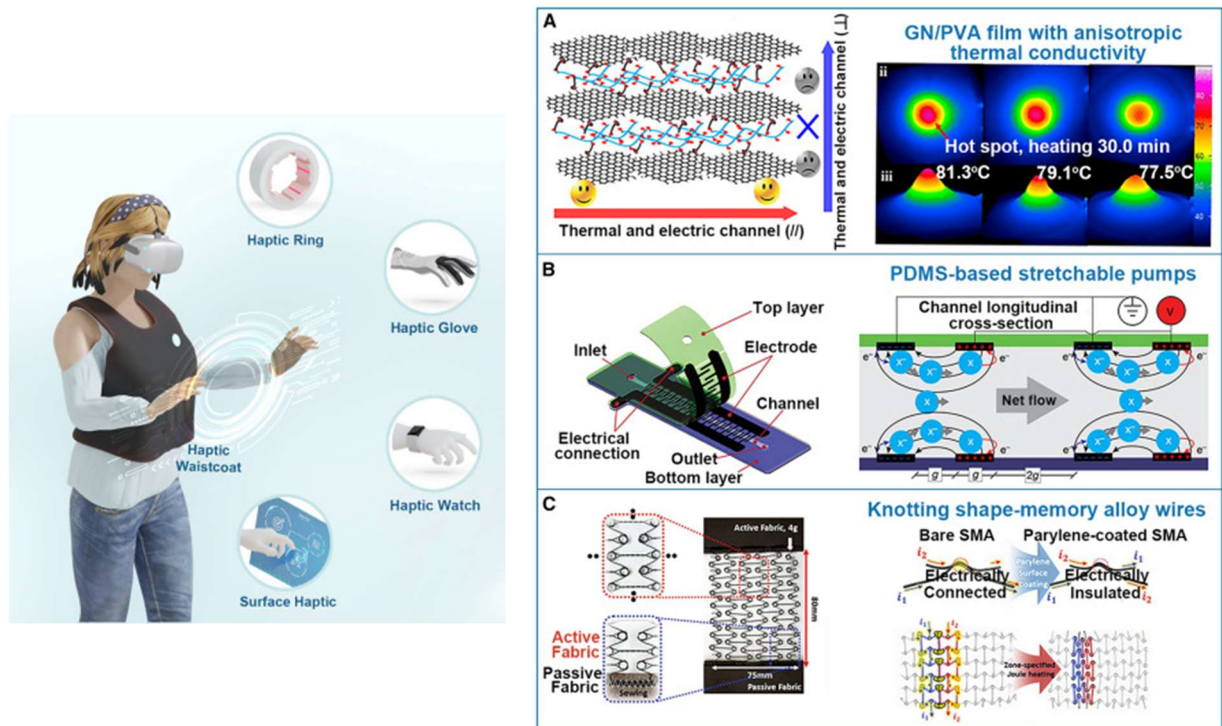


Εικόνα 16. Χειριστήριο PS5 DualSense με απτική τεχνολογία [38].



Εικόνα 17. Χειριστήριο Xbox Gamepad με μηχανισμό θερμικής ανάδρασης για φορητές συσκευές σε περιβάλλον παιχνιδιού [39].

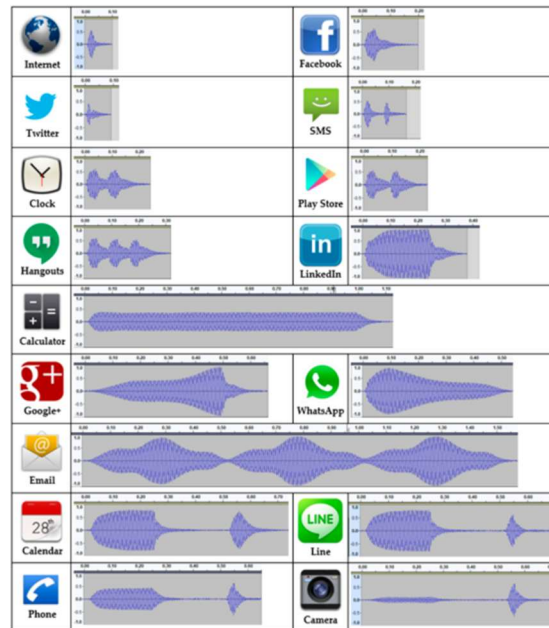
Επιπρόσθετες απτικές συσκευές αποτελούν τα γιλέκα Woojer και τα TactSuit, τα οποία αναπαράγουν την αίσθηση εκρήξεων, κραδασμών, πυροβολισμών ή απτικών σημάτων σε διάφορα μέρη του σώματος και από τις φορητές συσκευές χειρισμού, αξιοποιούνται σε καθίσματα gaming ή κινηματογραφικά συστήματα 4D, ενισχύοντας την εμπειρία εικονικής πραγματικότητας και βιντεοπαιχνιδιών [40].



Εικόνα 18 & 19. Γιλέκο απτικής τεχνολογίας και σχεδιασμός υλικών που εφαρμόζονται στην επιφάνεια του γιλέκου με απτική ανάδραση [40].

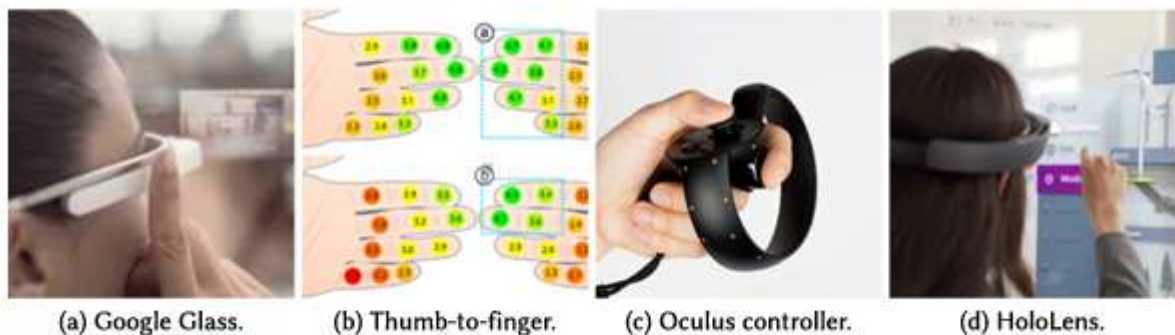
1.4.4. Έξυπνες Φορητές Συσκευές και Καταναλωτική Τεχνολογία

Η ενσωμάτωση απτικής τεχνολογίας με ανάδραση σε καθημερινές φορητές συσκευές, όπως smartphones, smartwatches και wearables, αποτελεί πλέον αναπόσπαστο κομμάτι του καθημερινού χρήστη καθώς επιτρέπει τη βελτίωση της εμπειρίας μέσα από στοχευμένα, διακριτικά και προσαρμόσιμα απτικά σήματα [41]. Απτική ανάδραση με δόνηση εφαρμόζεται κυρίως σε έξυπνες συσκευές για λειτουργίες όπως οι ειδοποιήσεις που έρχονται στα κινητά τηλέφωνα, η πλοήγηση μέσω GPS και κατά την πληκτρολόγηση σε ηλεκτρονικές συσκευές [41]. Η απτική ειδοποίηση μέσω μικροδονήσεων αντικαθιστά ή συμπληρώνει τον ήχο και την εικόνα, προσφέροντας πρόσβαση σε πληροφορίες χωρίς να διαταράσσεται το περιβάλλον και αυξάνει την ευκαιρία για προσβασιμότητα σε άτομα με προβλήματα όρασης, ενισχύοντας την ικανοποίηση του χρήστη [42].



Εικόνα 20. Απτικά εικονίδια και οι σχετικές κυματομορφές δόνησης [43].

Παραδείγματα περιλαμβάνουν το Apple Taptic Engine ή τις τεχνολογίες της Immersion Corporation, που υποστηρίζουν την απτική ανάδραση σε διεπαφές αφής και gaming εφαρμογές. Επιπρόσθετα, η απτική αλληλεπίδραση με τη συσκευή δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής δεδομένων μέσω μιας ενσωματωμένης επιφάνειας αφής, όπως για παράδειγμα τα γυαλιά της Google, τα οποία διαθέτουν touchpad στο πλαίσιο των γυαλιών, επιτρέποντας την πλοήγηση και την επιλογή στοιχείων του μενού που προβάλλονται στον φακό και χρησιμοποιώντας κινήσεις σάρωσης.

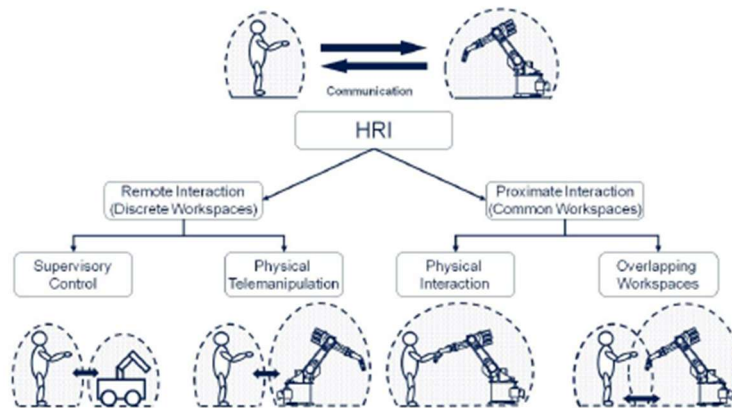


Εικόνα 21. Φορητές συσκευές εισαγωγής δεδομένων [44].

1.4.5. Ρομποτική και Βιομηχανικός Αυτοματισμός

Η υιοθέτηση της απτικής τεχνολογίας στη ρομποτική και τον βιομηχανικό αυτοματισμό συμβάλλει ουσιαστικά στην αλληλεπίδραση ανθρώπου-μηχανής, στην

ασφάλεια, στην ακρίβεια και στη βελτιστοποίηση απομακρυσμένων ή περίπλοκων εργασιών στη βιομηχανία.



Εικόνα 22. Χωρική ταξινόμηση της αλληλεπίδρασης ανθρώπου-ρομπότ (HRI: Human-Robot Interaction) [45].

Πιο συγκεκριμένα, οι συσκευές απτικής τεχνολογίας που εφαρμόζονται στη ρομποτική και στον βιομηχανικό αυτοματισμό βελτιώνουν την αλληλεπίδραση ανάμεσα σε ρομπότ και περιβάλλον, μέσω της ενσωμάτωσης απτικών αισθητήρων σε ρομποτικούς βραχίονες και τεχνητά άκρα, προσφέροντας την ικανότητα αντίληψης πληροφοριών, όπως δύναμη, πίεση και ολίσθηση ενός αντικειμένου, προσαρμόζοντας δυναμικά τις κινήσεις τους [25]. Ως εκ τούτου, τέτοια συστήματα επιτρέπουν προσαρμόζεται δυναμικά η ισχύς ή η θέση των ρομποτικών συστημάτων με υψηλή ακρίβεια, μείωση του ρίσκου και των ατυχημάτων, κάτι κρίσιμο σε βιομηχανικές μονάδες και κατασκευές [25]. Η χρήση προηγμένης απτικής τεχνολογίας επιτρέπει στα ρομπότ να εκτελούν με ακρίβεια εργασίες υψηλής λεπτότητας όπως σε εργασίες συναρμολόγησης, διαχείρισης ευπαθών υλικών και χειρισμού αντικειμένων μικρών διαστάσεων, ενώ παράλληλα ενισχύει την ασφάλεια και την συνεργασία μεταξύ ανθρώπου–ρομπότ [46]. Σημαντική χρήση τέτοιων συστημάτων γίνεται σε αυτοματοποιημένες παραγωγικές διαδικασίες, καθώς πραγματοποιείται ανίχνευση ελαττωμάτων μέσω tactile αισθητήρων ή μετρήσεις δύναμης και θέσης κατά τις διαδικασίες τοποθέτησης ή εισαγωγής εξαρτημάτων, περισσότερη αξιοπιστία [47].

2.



(A)

(B)

Εικόνα 23. Τηλεχειρισμός στη βιομηχανία: (Α) Χειριστής και (Β) Βιομηχανική γερανογέφυρα [45]

Επίσης, ένα σύστημα τηλε-λειτουργίας, που αποτελείται από ένα ρομποτικό χέρι και ένα ασύρματο γάντι μπορεί να εφαρμοστεί στη βιομηχανία χημικών ουσιών και στο χειρισμό ραδιενεργών ουσιών, όπου επιτρέπει τον ασφαλή χειρισμό επιβλαβών χημικών ουσιών από απόσταση, μειώνοντας την έκθεση της ανθρώπινης ζωής σε επικίνδυνα περιβάλλοντα [48]. Επιπλέον, η εφαρμογή τέτοιων συστημάτων προσφέρει διαισθητική προσέγγιση ελέγχου και καλύτερη διεπαφή ανθρώπου-μηχανής, καθιστώντας την ιδανική κατά τη διαχείριση καταστροφών αλλά και κατά τη διαστημική εξερεύνηση [48].

1.5. Περιορισμοί στον Τηλεχειρισμό

Η απτική τεχνολογία έχει αναδειχθεί ως μία από τις πλέον υποσχόμενες διαστάσεις στην ανθρώπινη-μηχανική αλληλεπίδραση, κυρίως στον τομέα του τηλεχειρισμού. Ωστόσο, κατά την εφαρμογή της εμφανίζονται σημαντικοί περιορισμοί που καλείται η επιστημονική κοινότητα να αντιμετωπίζει και σχετίζονται με τεχνικούς, φυσιολογικούς, λειτουργικούς και συστημικούς παράγοντες. Αυτοί οι περιορισμοί επιδρούν άμεσα στην αποτελεσματικότητα, την ακρίβεια και την ευχρηστία των συστημάτων τηλεχειρισμού, ειδικά όταν αυτά καλούνται να λειτουργήσουν σε πραγματικό χρόνο.

1.5.1. Χαμηλή Χωρική και Χρονική Ανάλυση των Απτικών Συστημάτων

Πρωτίστως, ένας βασικός τεχνικός περιορισμός σχετίζεται με τη χαμηλή χωρική και χρονική ανάλυση. Αναλυτικότερα, τα περισσότερα υπάρχοντα απτικά συστήματα διαθέτουν περιορισμένη ευαισθησία στους αισθητήρες, περιορίζοντας την ακριβή καταγραφή πολύπλοκων μηχανικών παραμέτρων, όπως της μικρο-ολίσθησης, της υφής και της απαιτούμενης ακρίβειας και ταχύτητας για την απόδοση ρεαλιστικής απτικής εμπειρίας [49]. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα περιορισμό στον έλεγχο λαβής και στην απόκριση του συστήματος, καθώς επίσης και αδυναμία σε νέες συσκευές να αποδώσουν με πιστότητα πολύπλοκες υφές, μικροκινήσεις ή λεπτές αλλαγές στην πίεση, γεγονός που περιορίζει την αίσθηση ρεαλισμού κατά τον τηλεχειρισμό. Επιπλέον, η καθυστέρηση στη μετάδοση της απτικής πληροφορίας (latency), δηλαδή η χρονική καθυστέρηση ανάμεσα στην εντολή και στην απτική απόκριση μεταξύ του απομακρυσμένου αντικειμένου και του χρήστη μπορεί να προκαλέσει απώλεια συγχρονισμού, να περιορίζει την αντίληψη λεπτής υφής και επιφανειακών χαρακτηριστικών και να μειώσει τη συνολική αποτελεσματικότητα του συστήματος.

1.5.2. Τεχνικοί Περιορισμοί στην Απόδοση και στην Φορητότητα

Σε ότι αφορά, φορητά απτικά συστήματα, όπως γάντια και εξωσκελετοί, καθώς είναι τεχνικά πολύπλοκα, ενεργοβόρα και περιορισμένης φορητότητας, οι περιορισμοί που αντιμετωπίζουν σχετίζονται με την εργονομία, το βάρος και την ενσωματωμένη ισχύ [50]. Πιο συγκεκριμένα, η φορητότητα μίας συσκευής και η χρήση της σε πεδία εκτός εργαστηρίου περιορίζεται σημαντικά από απαίτηση για την παροχή κινησιοαισθητικής ανάδρασης, ενώ η πολυπλοκότητα του μηχανικού σχεδιασμού αυξάνει το κόστος και τις πιθανότητες [50].

1.5.3. Περιορισμοί στη Μετάδοση και Επεξεργασία Απτικών Δεδομένων

Ανασταλτικό παράγοντα αποτελεί και η μετάδοση των απτικών δεδομένων, καθώς η συνεχής ροή πολυαισθητηριακών σημάτων δημιουργεί υψηλό υπολογιστικό φορτίο, ιδιαίτερα όταν μεταδίδεται απτική πληροφορία σε πραγματικό χρόνο [51]. Σε εφαρμογές τηλεχειρισμού, όπου ο χρήστης βρίσκεται γεωγραφικά απομακρυσμένος

από το αντικείμενο ή το ρομπότ που ελέγχει και υπάρχει χαμηλό εύρος ζώνης ή περιβάλλον με περιορισμένη υπολογιστική ισχύ στην άκρη του δικτύου, η σταθερότητα και η ταχύτητα της μετάδοσης των σημάτων είναι καθοριστική και μπορεί να αποτελέσει τεχνικό εμπόδιο [51]. Οποιαδήποτε απώλεια δεδομένων ή παρεμβολή στο δίκτυο μπορεί να οδηγήσει σε καθυστερημένες ή λανθασμένες απτικές ενδείξεις, με ενδεχόμενες σοβαρές συνέπειες, ιδίως σε ιατρικές, στρατιωτικές ή βιομηχανικές εφαρμογές υψηλής ακρίβειας.

1.5.4. Ανθρώπινοι Φυσιολογικοί και Γνωστικοί Περιορισμοί

Παράλληλα με τους τεχνικούς περιορισμούς, υπάρχουν και αυτοί που σχετίζονται με τις φυσιολογικές και γνωστικές δυνατότητες των ανθρώπων, οι οποίες περιορίζουν την αποτελεσματική χρήση της απτικής ανάδρασης, εξαιτίας παρατεταμένης χρήσης οδηγώντας σε μυϊκή κόπωση [52]. Το ανθρώπινο απτικό σύστημα έχει περιορισμένη ικανότητα διάκρισης σύνθετων ή ταυτόχρονων ερεθισμάτων και απαιτεί εκπαίδευση ώστε να αποκτήσει την ικανότητα ερμηνείας ψηφιακών απτικών σημάτων. Συνεπώς, δυσκολεύεται η λειτουργία των συστημάτων όταν ο χρήστης καλείται να επεξεργαστεί την ίδια στιγμή οπτικά, απτικά και ηχητικά ερεθίσματα σε περιβάλλοντα υψηλής πίεσης, όπως στην ιατρική τηλε-χειρουργική ή στη ρομποτική διάσωσης, υπερφορτώνοντας το γνωστικό σύστημα [52].

1.5.5. Περιορισμένη Προτυποποίηση και Διαλειτουργικότητα

Ένας επιπλέον σημαντικός περιορισμός αποτελεί η απουσία κοινών προτύπων και διαλειτουργικότητας [48]. Με άλλα λόγια, η ποικιλομορφία κατασκευαστών και τεχνολογικών προσεγγίσεων, οι οποίες βασίζονται σε ιδιοκατασκευασμένες λύσεις που δύσκολα συνδυάζονται με συστήματα άλλων κατασκευαστών, έχει οδηγήσει σε μία έλλειψη ενιαίας γλώσσας επικοινωνίας μεταξύ συσκευών, λογισμικού και εφαρμογών. Ως εκ τούτου, δημιουργούνται εμπόδια διασύνδεσης μεταξύ διαφορετικών απτικών συστημάτων σε «πολυπλατφορμικά» περιβάλλοντα και δημιουργούνται προβλήματα επεκτασιμότητας των συστημάτων [48].

Συνοψίζοντας, μπορεί η απτική τεχνολογία να έχει εισέλθει δυναμικά στον χώρο του τηλεχειρισμού, ωστόσο η εφαρμογή της καθίσταται δύσκολη καθώς υπάρχουν περιορισμοί σε πολλά επίπεδα που δοκιμάζουν την αξιοπιστία της. Για την υπερπήδηση

των περιορισμών που προαναφέρθηκαν απαιτείται συνδυασμένη πρόοδος, τόσο στην τεχνολογική καινοτομία, όσο και στην κατανόηση των δυνατοτήτων και ορίων του ανθρώπινου αισθητηρίου συστήματος.

Κεφάλαιο 2: Σύγκριση με Παρόμοια Συστήματα

Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται μία σύγκριση για την υλοποίηση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας με άλλες παρόμοιες ερευνητικές ή εμπορικές εφαρμογές. Μέσω της σύγκρισης επιτρέπεται η κατανόηση των τεχνολογικών επιλογών, των δυνατοτήτων και των περιορισμών κάθε συστήματος, καθώς και η αξιολόγηση της καταλληλότητάς τους για συγκεκριμένες εφαρμογές. Η ανάλυση που ακολουθεί εστιάζει σε βασικές παραμέτρους όπως οι τύποι αισθητήρων και ενεργοποιητών, η ακρίβεια και η εμβέλεια, ο τρόπος διασύνδεσης, το κόστος καθώς και ο στόχος χρήσης.

Στόχος είναι να αναδειχθούν οι ομοιότητες και οι διαφορές μεταξύ των συστημάτων και να εντοπιστούν τα πλεονεκτήματα και οι αδυναμίες κάθε προσέγγισης.

2.1. Παρόμοια Συστήματα

Τα συστήματα απτικής τεχνολογίας που συγκρίνονται είναι το Sense Glove Nova, το HaptX Gloves (εκδόσεις G1 και DK2), το Manus Prime 3 Haptic XR, καθώς και η υλοποίηση που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

2.1.1. Sense Glove Nova



Εικόνα 24. Απτικό γάντι SenseGlove Nova 2 για εκπαίδευση μέσω εικονικής πραγματικότητας (www.senseglove.com).

Το SenseGlove, που απεικονίζεται στην Εικόνα 23, αποτελεί ένα προηγμένο απτικό γάντι, που υποστηρίζει πλήρη απτική ανάδραση με χρήση δονητικών μοτέρ και ενεργοποιητών αντίστασης. Χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας και τηλεχειρισμού, διαθέτοντας υψηλή ακρίβεια καταγραφής κινήσεων και ανάδρασης. Υποστηρίζει σύνδεση με HMD συστήματα (VR) και παρέχει αναλυτική χαρτογράφηση δακτύλων, ενώ απαιτεί σύνθετο λογισμικό και έχει υψηλό κόστος. Το Sense Glove είναι ένας εξωσκελετός, πλήρως τρισδιάστατα εκτυπωμένος, χρησιμοποιεί μηχανικά φρένα και σερβοκινητήρες (έναν ανά δάχτυλο) που τράβαγαν νήματα για να εφόσουν μονόδρομη ανάδραση δύναμης στην κάμψη των δακτύλων, καθώς και δυνατότητα παραγωγής κραδασμών [31] [30].

Σε ότι αφορά την ανάδραση δύναμης (Force Feedback) της συσκευής, διαθέτει μαγνητική τριβή τεσσάρων μονάδων για αντίσταση σε αντίχειρα, δείκτη, μέσο και παράμεσο (not pinky), με δυναμικότητα έως 20 N ανά δάχτυλο.

Σχετικά με την δονητική ανάδραση (Vibrotactile Feedback), το γάντι διαθέτει ενσωματωμένο voice coil actuator (το λεγόμενο "Thumper") στο πίσω μέρος του χεριού και δύο LRA actuators σε αντίχειρα και δείκτη για αναπαραγωγή δονήσεων. Για την παρακολούθηση των κινήσεων των δακτύλων (Finger Tracking) χρησιμοποιούνται 5 αισθητήρες κυρίαρχης επιμήκυνσης καλωδίων. Εν των οποίων οι τέσσερις αφορούν

τα flex/extension των ακροτάτων δακτύλων και ένας αφορά την απαγωγή/προσαγωγή του αντίχειρα, ενώ το μικρό δάχτυλο ακολουθεί τον παράμεσο. Επίσης, η απόκριση των δεδομένων ανέρχεται σε 60 Hz με ακρίβεια $\sim 0,03$ mm, απαιτείται επανακαλιμπράρισμα ανά session.

Τέλος, ενώ διαθέτει ενσωματωμένη μονάδα αδρανειακών μετρήσεων (Inertial Measurement Unit / IMU) που υποστηρίζει πρόσθετη ανίχνευση κίνησης με συνδυασμό hardware, δεν διαθέτει αυτόνομη 3D παρακολούθηση, καθιστώντας απαραίτητη την τοποθέτηση εξωτερικών αισθητήρων (π.χ. Vive Tracker ή controllers πάνω στο γάντι). Το SenseGlove δεν είναι ασύρματο, το βάρος του ανέρχεται στα 300 γραμμάρια ανά γάντι και το κόστος του είναι αρκετά υψηλό [30].

2.1.2. HaptX Gloves (G1/DK2)



Εικόνα 25. HaptX Gloves, G1 και DK2 (www.forbes.com)

Το δεύτερο σύστημα που εξετάζεται είναι το HaptX Gloves, και ειδικά οι σειρές G1 και DK2. Το σύστημα αυτό επικεντρώνεται σε προηγμένη προσομοίωση εικονικής πραγματικότητας, δίνοντας τη δυνατότητα ανάπτυξης προσομοίωσης με ρεαλιστική απτική ανάδραση και φυσική αλληλεπίδραση. Έχουν σχεδιαστεί κυρίως για εφαρμογές εκπαίδευσης και προσομοίωσης σε περιβάλλοντα εικονικής πραγματικότητας (VR), με έμφαση σε βιομηχανικούς χρήστες, και έχουν χρησιμοποιηθεί σε μελέτες για την

εκπαίδευση χειρισμών σε θαλάμους γαντιών (glovebox operations) [30] [31].

Η αρχή ενεργοποίησής του πραγματοποιείται με πνευματική διαδικασία μέσω ενσωματωμένων καναλιών αέρα και για την ακριβή καταγραφή των κινήσεων των δακτύλων (κάτω του χιλιοστού) χρησιμοποιήθηκαν μαγνητικοί αισθητήρες [30]. Συνδυάζοντας βιομημητικό εξωσκελετό για αντίσταση ανάδρασης δύναμης (Force Feedback) παρέχεται υψηλή ανάλυση, υψηλή μετατόπιση και απτική ανάδραση [30]. Τα γάντια HaptX (G1 & DK2) αποτελούνται από ένα τύπο εξωσκελετού που προσφέρει μέγιστη δύναμη ανάδρασης έως 22 N ανά δάχτυλο, παρέχοντας ταυτόχρονα ανατροφοδότηση δύναμης, απτική ανατροφοδότηση και παρακολούθηση της κίνησης του χεριού. Δεν διαθέτουν ασύρματη λειτουργία, καθώς βασίζονται σε έξυπνο ύφασμα με ενσωματωμένα κανάλια αέρα, γεγονός που απαιτεί ενσύρματη σύνδεση.

Το συγκεκριμένο σύστημα παρουσιάζει καθυστέρηση απόκρισης 16-23 ms, με ρυθμό ενημέρωσης ~120-125 Hz, ώστε να εξασφαλίζεται άμεσο feedback και το βάρος του ανέρχεται στα 570 γραμμάρια περίπου ανά γάντι. Επιπλέον, το λογισμικό που χρησιμοποιεί το HaptX SDK είναι το Unity3D και το Unreal Engine για τη διαχείριση εικονικών αντικειμένων και συγκρούσεων, ενώ για χρήση σε ρομποτικά συστήματα και VR εφαρμογές πολλαπλών χρηστών χρησιμοποιεί το ROS integration. Τέλος, περιλαμβάνει πρότυπα εφέ, API και υποστήριξη Unity/Unreal plug-ins [30] [31].

2.1.3. Manus Prime 3 Haptic XR (Manus Prime Haptic)



Εικόνα 26. Απτικό γάντι Manus Prime 3 Haptic XR, [53].

Το Manus Prime 3 Haptic XR (ή Manus Meta Prime 3 XR) έχει σχεδιαστεί για εφαρμογές εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας, με ιδιαίτερη έμφαση σε ιατρικά και ρομποτικά συστήματα, όπως ο έλεγχος του χειρουργικού ρομπότ da Vinci μέσω του da Vinci Research Kit (dVRK) [54]. Διαθέτει πέντε σετ εύκαμπτων αισθητήρων με δύο βαθμούς ελευθερίας (DoF) για την παρακολούθηση της κάμψης των δακτύλων, καθώς και έξι μονάδες IMU των 9 DoF, οι οποίες καταγράφουν με ακρίβεια την κίνηση και τον προσανατολισμό των δακτύλων και του καρπού [54], [53]. Επίσης, παρέχει ακριβή παρακολούθηση κινήσεων χεριών και παροχή απτικής ανάδρασης, ιδανικό για εφαρμογές τηλεχειρισμού, VR/AR και ρομποτικής. στην ενίσχυση της αίσθησης αφής σε εφαρμογές όπως VR training, design validation και immersive αλληλεπίδραση.

Η παρακολούθηση του χεριού (θέση και προσανατολισμός) επιτυγχάνεται όταν το γάντι συνδέεται με ένα HTC Vive Tracker, ενώ λειτουργεί με συχνότητα 90 Hz και ακρίβεια $\pm 2,5^\circ$. Το λογισμικό του δημιουργεί ένα σκελετικό πλέγμα χεριού, εμπνευσμένο από το πλαίσιο Mediapipe, το οποίο υποστηρίζει την ακριβή απεικόνιση

των κινήσεων. Για την απτική ανατροφοδότηση χρησιμοποιεί δονητικούς ενεργοποιητές (vibrotactile), οι οποίοι παρέχουν αισθητηριακά σήματα στον χρήστη όταν εκτελεί εντολές με χειρονομίες [54] [53],.

Στο πλαίσιο χειρουργικών εφαρμογών, επιτρέπει στους χειρουργούς να ελέγχουν διαισθητικά ρομποτικούς βραχίονες, χρησιμοποιώντας τα δάχτυλά τους για την κίνηση και τον χειρισμό του τελικού εκτελεστή (end-effector), όπως το άνοιγμα και το κλείσιμο της σιαγόνας ενός εργαλείου. Υποστηρίζει επίσης προηγμένες λειτουργίες “clutching” (σύμπλεξη/αποσύμπλεξη κίνησης), συμπεριλαμβανομένης μίας νέας παραλλαγής για την αλλαγή προσανατολισμού του εργαλείου, η οποία δεν υπήρχε στο σύστημα da Vinci. [54]

Κάθε γάντι ζυγίζει μόλις 138 γραμμάρια, καθιστώντας το ένα ελαφρύ και εργονομικό γάντι VR που συνδυάζει αισθητήρες και μηχανισμούς απτικής ανάδρασης για ακριβή παρακολούθηση και έλεγχο ρομποτικών συστημάτων (finger tracking με ενσωματωμένα vibrotactile actuators) [54], [53].

2.1.4. Cyber Grasp



Εικόνα 27. Απτικό γάντι Cyber Grasp (www.cyberglovesystems.com)




Το γάντι Cyber Grasp είναι ένας εμπορικός εξωσκελετός με ανάδραση δύναμης για το χέρι, συνδυάζει τον εξωσκελετό με μία συσκευή γαντιού δεδομένων (dataglove) και θεωρείται ο πιο γνωστός και πρόδρομος στην κατηγορία του, παρά τη χαμηλή εμπορική του επιτυχία. Η πολύπλοκη μηχανική κατασκευή επιτρέπει τη μεταφορά δύναμης μέσω καλωδίου στην άκρη των δακτύλων, χωρίς να περιορίζει τις υπόλοιπες αρθρώσεις. Παράλληλα η παρακολούθηση της κίνησης πραγματοποιείται από το γάντι δεδομένων CyberGlove που φοριέται από κάτω [31], [30], το οποίο παρέχει

πληροφορίες γωνίας άρθρωσης του χεριού και των δακτύλων [55]. Το σύστημα CyberGrasp διαθέτει 22 αισθητήρες γωνίας άρθρωσης χεριού και δακτύλων, τα σήματα ενισχύονται και φιλτράρονται μέσω του ExHand Box, προσφέροντας υψηλή ανάλυση και ταχύτερη δειγματοληψία και κωδικοποιητές θέσης κινητήρα παρέχουν 1000 παλμούς ανά περιστροφή [55].

Το συγκεκριμένο γάντι είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε να χρησιμοποιεί ηλεκτρομαγνητικούς ενεργοποιητές, υποστηρίζοντας πέντε δάχτυλα με πέντε ενεργούς βαθμούς ελευθερίας και παρέχοντας ανάδραση δύναμης έως 12 N. Στα χαρακτηριστικά του συγκαταλέγεται το βάρος του, το οποίο ανέρχεται στα 450 γραμμάρια και το υψηλό του κόστος. Δεν είναι ασύρματο αλλά συνδέεται με τον υπολογιστή ή το σύστημα ελέγχου μέσω καλωδίου, το οποίο μεταφέρει τόσο τα δεδομένα των αισθητήρων όσο και τα σήματα ελέγχου προς τους ενεργοποιητές. Επίσης στα μειονεκτήματά του περιλαμβάνεται η χαμηλή συνδεσιμότητα με άλλες εφαρμογές.

Το πεδίο εφαρμογής του επικεντρώνεται στην απτική αποκατάσταση, στην εκπαίδευση ατόμων με προβλήματα όρασης, στις βιομηχανικές εφαρμογές εκπαίδευσης, ακόμα και σε μελέτες σχετικά με την απόδοση του χρήστη ανάλογα με την ποιότητα οπτικής και απτικής ανάδρασης κατά την τηλεχειριζόμενη σύλληψη που πραγματοποιούνται σε εργαστήρια τηλερομποτικής και απτικής του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (ESA) [55].

Πίνακας 1. Σύγκριση εφαρμογών απτικών γαντιών

Σύστημα	Αισθητήρες	Ενεργοποιητές	Ανάδραση Αφής	Ασύρματη Επικοινωνία	Στόχος Χρήσης	Κόστος
Sense Glove Nova 	Πολύ ακριβείς	Ηλεκτρομαγνητικοί	Πλήρης (έως 20 N ανά δάχτυλο)	NAI USB/ Bluetooth	Επαγγελματικός	Πολύ Υψηλό
HaptX Gloves (G1 / DK2) 	Πολύ ακριβείς	Ηλεκτρομαγνητικοί	Υψηλής ακρίβειας μέσω μικροϋδραυλικών (έως 22 N ανά δάχτυλο)	OXI Ενσύρματο	Βιομηχανικός/ Εκπαιδευτικός	Πολύ Υψηλό
Manus Prime 3 Haptic XR 	Υψηλής ακρίβειας	Δόνηση (vibrotactile)	Δεν εκφράζεται σε N	NAI Bluetooth/ WiFi	Επαγγελματικός/ Ερευνητικός	Υψηλό
Cyber Grasp 	Υψηλής ακρίβειας	Γραμμικούς κινητήρες δύναμης (force feedback actuators) Δονητικούς	Μέτρια (έως 12 N ανά δάχτυλο)	OXI Ενσύρματο	Επαγγελματικός/ Εκπαιδευτικός/ Ερευνητικός	Υψηλό
Τρέχουσα Υλοποίηση	Μέτριας ακρίβειας	Ενεργοποιητές (Vibration Motors)	Δεν εκφράζεται σε N	NAI WiFi	Εκπαιδευτικός/ Ερευνητικός	Χαμηλό

Κεφάλαιο 3: Δομικά Στοιχεία του Συστήματος

3.1. Αισθητήρες

Εισαγωγή

Οι αισθητήρες Flex Sensor και Force Sensitive Resistor (FSR) ανήκουν στην κατηγορία των αναλογικών αισθητήρων και χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές μέτρησης φυσικών μεταβολών, όπως η κάμψη και η πίεση αντίστοιχα. Η χρήση τους είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στην κατασκευή διαδραστικών συστημάτων, στην ρομποτική, στην ιατρική τεχνολογία και σε εφαρμογές ανθρώπινης-μηχανικής διεπαφής (Human-Machine Interface - HMI).

3.1.1. Flex Sensor



Εικόνα 28. Flex Sensor

Λειτουργία: Ο Flex Sensor είναι ένας αισθητήρας που μεταβάλλει την ηλεκτρική του

αντίσταση ανάλογα με τον βαθμό κάμψης του. Όταν ο αισθητήρας είναι ευθύς, η αντίστασή του είναι χαμηλή, ενώ όταν κάμπτεται, η αντίσταση αυξάνεται γραμμικά με τη γωνία κάμψης.

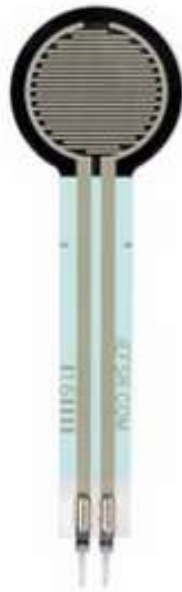
Υλικά κατασκευής: Οι Flex Sensors κατασκευάζονται από ένα λεπτό στρώμα πολυεστερικού υλικού (Mylar), το οποίο φέρει στην επιφάνειά του αγωγίμο μελάνι με ενσωματωμένο καρβόνιο. Το υλικό αυτό αντιδρά στην κάμψη αλλάζοντας την εσωτερική του αντίσταση.

Χαρακτηριστικά:

- Εύρος Αντίστασης: 10 kΩ έως και 30–50 kΩ ανάλογα με τον βαθμό κάμψης.
- Μήκος: Συνήθως διατίθεται σε μήκη 2.2", 4.5" ή μεγαλύτερα.
- Ακρίβεια: Περιορισμένη, αλλά επαρκής για εφαρμογές χαμηλής ή μέσης ευαισθησίας.
- Ευελιξία: Υψηλή, κατάλληλος για ένδυση ή επιφάνειες που κάμπτονται.
- Αναλογική Έξοδος: Παρέχει μεταβαλλόμενο σήμα τάσης μέσω διαιρέτη τάσης.

Συνδεσιμότητα: Ο αισθητήρας συνδέεται σε ένα απλό κύκλωμα διαιρέτη τάσης, συνήθως με μια αντίσταση σταθερής τιμής. Το αναλογικό σήμα τάσης που προκύπτει μπορεί να διαβαστεί από μία αναλογική είσοδο μικροελεγκτή, όπως το Arduino ή Raspberry Pi (μέσω ADC).

3.1.2. Force Sensitive Resistor (FSR)



Εικόνα 29. Αισθητήρας Force Sensitive Resistor (FSR)

Λειτουργία: Ο Force Sensitive Resistor (FSR) είναι ένας αισθητήρας που αλλάζει την ηλεκτρική του αντίσταση σε σχέση με την πίεση ή δύναμη που ασκείται στην επιφάνειά του. Η αντίσταση μειώνεται όσο αυξάνεται η πίεση. Αυτός ο τύπος αισθητήρα δεν μετρά άμεσα την τιμή της δύναμης, αλλά παρέχει σχετική ένδειξη.

Υλικά Κατασκευής: Ο FSR αποτελείται από δύο λεπτές στρώσεις με αγώγιμο μελάνι που χωρίζονται από έναν ημιαγώγιμο χώρο (spacer). Όταν εφαρμόζεται δύναμη, η αντίσταση του αισθητήρα αλλάζει εξαιτίας της μεταβολής της αγώγιμης επιφάνειας.

Χαρακτηριστικά:

- Εύρος Αντίστασης: Από μερικά MΩ χωρίς πίεση, μέχρι περίπου 200 Ω με μέγιστη πίεση.
- Εύρος Δύναμης: Από ~100g έως 10kg (ανάλογα με τον τύπο).
- Αντίδραση: Πολύ γρήγορη απόκριση (<1ms).
- Αναλογική Έξοδος: Παράγει αναλογική τιμή που μεταφράζεται σε επίπεδο πίεσης.

Συνδεσιμότητα: Η σύνδεση του FSR πραγματοποιείται επίσης μέσω κυκλώματος διαίρετη τάσης. Η έξοδος συνδέεται σε αναλογική είσοδο μικροελεγκτή. Οι αισθητήρες

FSR λειτουργούν σε χαμηλές τάσεις (συνήθως 3.3V ή 5V), γεγονός που τους καθιστά ιδανικούς για απευθείας σύνδεση με Arduino, ESP32, STM32 κ.ά.

3.1.3. Σύγκριση Flex Sensors και FSR

Πίνακας 2. Σύγκριση αισθητήρων Flex Sensors και FSR

Χαρακτηριστικό	Flex Sensor	FSR
Ανίχνευση	Κάμψη / Γωνία	Πίεση / Δύναμη
Τύπος Αντίστασης	Αυξάνεται με κάμψη	Μειώνεται με πίεση
Εύρος Αντίστασης	10–50 kΩ	100Ω – ΜΩ
Ανταπόκριση	Μέτρια	Πολύ γρήγορη (<1ms)
Κατασκευή	Πολυεστερική βάση με αγωγίμο μελάνι	Διπλό στρώμα με ημιαγωγίμο υλικό
Κόστος	Χαμηλό	Πολύ χαμηλό

3.2. Ενεργοποιητές

Εισαγωγή

Οι ενεργοποιητές (actuators) αποτελούν βασικό δομικό στοιχείο κάθε συστήματος αυτοματισμού, καθώς μετατρέπουν ηλεκτρικά σήματα σε μηχανική κίνηση ή δόνηση. Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται δύο ευρέως χρησιμοποιούμενοι τύποι ενεργοποιητών: ο σερβοκινητήρας (servo motor) και ο δονητικός κινητήρας (vibrator motor). Και οι δύο συσκευές χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται έλεγχος θέσης, κίνησης ή δόνησης σε πραγματικό χρόνο.

3.2.1. Servo Motor



Εικόνα 30. Ενεργοποιητής σερβοκινητήρας (servo motor)

Λειτουργία: Ο Servo Motor είναι ένας κινητήρας που προσφέρει ακριβή έλεγχο θέσης (και σε ορισμένες περιπτώσεις ταχύτητας και επιτάχυνσης) μέσα από σήμα PWM (Pulse Width Modulation). Εσωτερικά διαθέτει έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος, έναν μηχανισμό αναστροφής (reduction gear), και ένα σύστημα ανάδρασης (feedback system) που παρακολουθεί τη θέση του άξονα.

Υλικά Κατασκευής: Οι περισσότεροι servo motors διαθέτουν πλαστικό ή μεταλλικό γρανάζι (gear train), περιστροφικό DC κινητήρα, ποτενσιόμετρο για ανάδραση θέσης, και ηλεκτρονική πλακέτα ελέγχου.

Χαρακτηριστικά:

- Τάση λειτουργίας: 4.8V – 6V (τυπικά)
- Έλεγχος θέσης: Συνήθως από 0° έως 180° (ή 360° για continuous rotation)
- Σήμα ελέγχου: PWM (συχνότητα ~50Hz, παλμός 1–2ms)
- Ροπή: Από ~1 kg·cm έως >20 kg·cm ανάλογα το μοντέλο
- Ακρίβεια: Υψηλή, ιδανική για εφαρμογές ρομποτικής και αυτοματισμού
- Κατανάλωση ρεύματος: Μεταβλητή ανάλογα με το φορτίο

Συνδεσιμότητα: Ο Servo Motor διαθέτει τρεις ακροδέκτες:

- VCC (συνήθως 5V),
- GND (γή),
- Signal (PWM από μικροελεγκτή).

Μπορεί να συνδεθεί απευθείας σε μια ψηφιακή έξοδο μικροελεγκτή (Arduino, ESP32, STM32), με την τροφοδοσία να προέρχεται είτε από τον μικροελεγκτή (για μικρούς servo) είτε από εξωτερική πηγή για μεγαλύτερους κινητήρες.

3.2.2. Vibrator Motor



Εικόνα 31. Ενεργοποιητής Vibrator Motor

Λειτουργία: Ο Vibrator Motor είναι ένας μικρός κινητήρας με εκκεντρισμένο βάρος στον άξονα του ρότορα. Όταν περιστρέφεται, το εκκεντρικό φορτίο δημιουργεί μη ισορροπημένη φυγόκεντρο δύναμη, η οποία προκαλεί δόνηση στη συσκευή όπου είναι προσαρτημένος. Δεν παρέχει έλεγχο θέσης, αλλά διαρκή ή παλμική δόνηση.

Υλικά Κατασκευής: Το σώμα του vibrator motor αποτελείται από έναν μικρό DC κινητήρα και ένα εκκεντρικό βάρος στο εσωτερικό του. Το περίβλημα είναι συνήθως μεταλλικό ή πλαστικό, με ενισχυμένη βάση για σύνδεση σε επιφάνειες.

Χαρακτηριστικά:

- **Τάση λειτουργίας:** 1.5V – 5V (τυπικά)
- **Κατανάλωση ρεύματος:** 50 – 100 mA
- **Συχνότητα δόνησης:** 100 – 250 Hz περίπου
- **Διαστάσεις:** Πολύ μικρές, συνήθως < 10mm
- **Ενεργοποίηση:** On/Off ή μέσω PWM για ρύθμιση έντασης

Συνδεσιμότητα: Η σύνδεση είναι δίπολη:

- +V (τάση τροφοδοσίας),

- GND (γή).

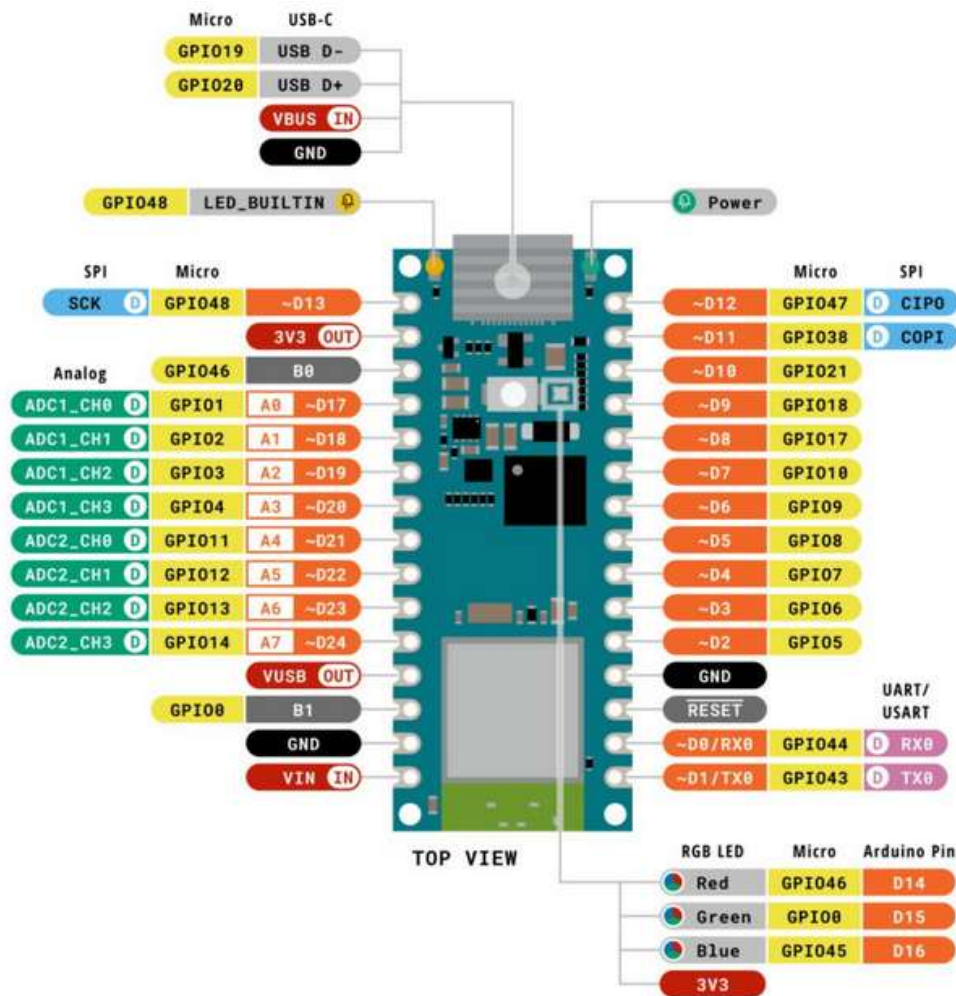
Ο κινητήρας μπορεί να ενεργοποιηθεί μέσω ψηφιακής εξόδου μικροελεγκτή ή μέσω τρανζίστορ/MOSFET, όταν απαιτείται μεγαλύτερο ρεύμα. Για έλεγχο της έντασης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί PWM σήμα.

3.2.3 Σύγκριση Servo Motor και Vibrator Motor

Πίνακας 3. Συγκριτικός πίνακας Servo Motor και Vibrator Motor

Χαρακτηριστικό	Servo Motor	Vibrator Motor
Κύρια Λειτουργία	Έλεγχος θέσης / περιστροφή	Δόνηση
Σήμα Ελέγχου	PWM (για θέση)	On/Off ή PWM (για ένταση)
Έξοδοι	Ακριβής περιστροφή σε μοίρες	Τυχαία μηχανική δόνηση
Ανατροφοδότηση	Ναι (με ποτενσιόμετρο)	Όχι
Τάση λειτουργίας	4.8V – 6V	1.5V – 5V
Τύπος Ελέγχου	Αναλογικός μέσω παλμών	Ψηφιακός ή αναλογικός (PWM)
Τυπικές Εφαρμογές	Ρομποτικοί βραχίονες, servo arms	Ειδοποιήσεις σε συσκευές, wearables

3.3. Arduino Nano ESP32



Εικόνα 32. Μικροελεγκτής Arduino Nano ESP32

Εισαγωγή

Οι μικροελεγκτές αποτελούν την "καρδιά" κάθε ενσωματωμένου (embedded) συστήματος, καθώς αναλαμβάνουν τη διαχείριση σημάτων, αισθητήρων, ενεργοποιητών και επικοινωνιών. Ο Arduino Nano ESP32 είναι ένας σύγχρονος μικροελεγκτής που συνδυάζει την ευκολία χρήσης της πλατφόρμας Arduino με τη υψηλή απόδοση και συνδεσιμότητα του ESP32. Πρόκειται για μία μικρού μεγέθους, αλλά ιδιαίτερα ισχυρή πλακέτα που υποστηρίζει τόσο Wi-Fi όσο και Bluetooth, καθιστώντας την ιδανική για εφαρμογές IoT, αυτοματισμού και ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

Λειτουργία: Ο Arduino Nano ESP32 βασίζεται στον επεξεργαστή ESP32-S3 της εταιρείας Espressif. Η πλακέτα λειτουργεί ως κεντρική μονάδα ελέγχου ενός συστήματος, επεξεργάζοντας και διαβάζοντας δεδομένα από αισθητήρες, και ελέγχοντας ενεργοποιητές. Παράλληλα, έχει τη δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας με άλλες συσκευές μέσω Wi-Fi ή Bluetooth Low Energy (BLE), κάτι που την καθιστά ιδανική για IoT λύσεις.

Υλικά κατασκευής: Η πλακέτα Arduino Nano ESP32 είναι κατασκευασμένη σε μορφή διπλής όψης (double-layer PCB) με επιμεταλλωμένες διαμπερείς οπές (PTH). Περιλαμβάνει:

- Μικροεπεξεργαστή ESP32-S3 (SoC),
- Ενσωματωμένη κεραία κεραμική ή PCB για Wi-Fi/Bluetooth,
- Ρυθμιστή τάσης (voltage regulator),
- Θύρα USB-C με μετατροπέα USB-to-Serial (CH340 ή equivalent),
- Επαφές τύπου pin-header για σύνδεση σε breadboard ή custom PCB.

Χαρακτηριστικά:

- Επεξεργαστής: Dual-core Xtensa LX7 (ESP32-S3)
- Συχνότητα ρολογιού: έως 240 MHz
- Μνήμη RAM: 512 KB SRAM
- Flash μνήμη: 8 MB
- Wi-Fi: IEEE 802.11 b/g/n (2.4 GHz)
- Bluetooth: BLE 5.0
- Αναλογικές Είσοδοι (ADC): έως 12 κανάλια (12-bit)
- Ψηφιακές Είσοδοι/Εξοδοι: 22 GPIO pins
- PWM έξοδοι: Ναι (για έλεγχο κινητήρων, LED, κ.λπ.)
- I2C / SPI / UART: Υποστήριξη για σειριακές διεπαφές
- USB Interface: USB-C για τροφοδοσία και προγραμματισμό
- Τάση λειτουργίας: 3.3V (με level shifting στα 5V για συμβατότητα Arduino)
- Κατανάλωση: Πολύ χαμηλή σε deep sleep mode (υποστήριξη low-power λειτουργίας)

Συνδεσιμότητα:

Η πλακέτα Arduino Nano ESP32 προσφέρει πλήθος επιλογών διασύνδεσης:

- Wi-Fi: Σύνδεση σε δίκτυα για αποστολή δεδομένων (HTTP, MQTT, WebSockets).
- Bluetooth BLE: Επικοινωνία με smartphones ή άλλες BLE συσκευές.
- USB-C: Για προγραμματισμό μέσω Arduino IDE ή Arduino Cloud
- I2C/SPI/UART: Σύνδεση με αισθητήρες και περιφερειακά (π.χ. OLED οθόνες, IMU, GPS).
- GPIO Pins: Για ψηφιακές/αναλογικές εισόδους/εξόδους, PWM, interrupts κ.λπ.

Υποστήριξη προγραμματισμού:

- Arduino IDE (με κατάλληλο board manager για ESP32)
- Arduino Cloud (υποστήριξη OTA updates)
- MicroPython / ESP-IDF (για πιο προχωρημένους χρήστες)

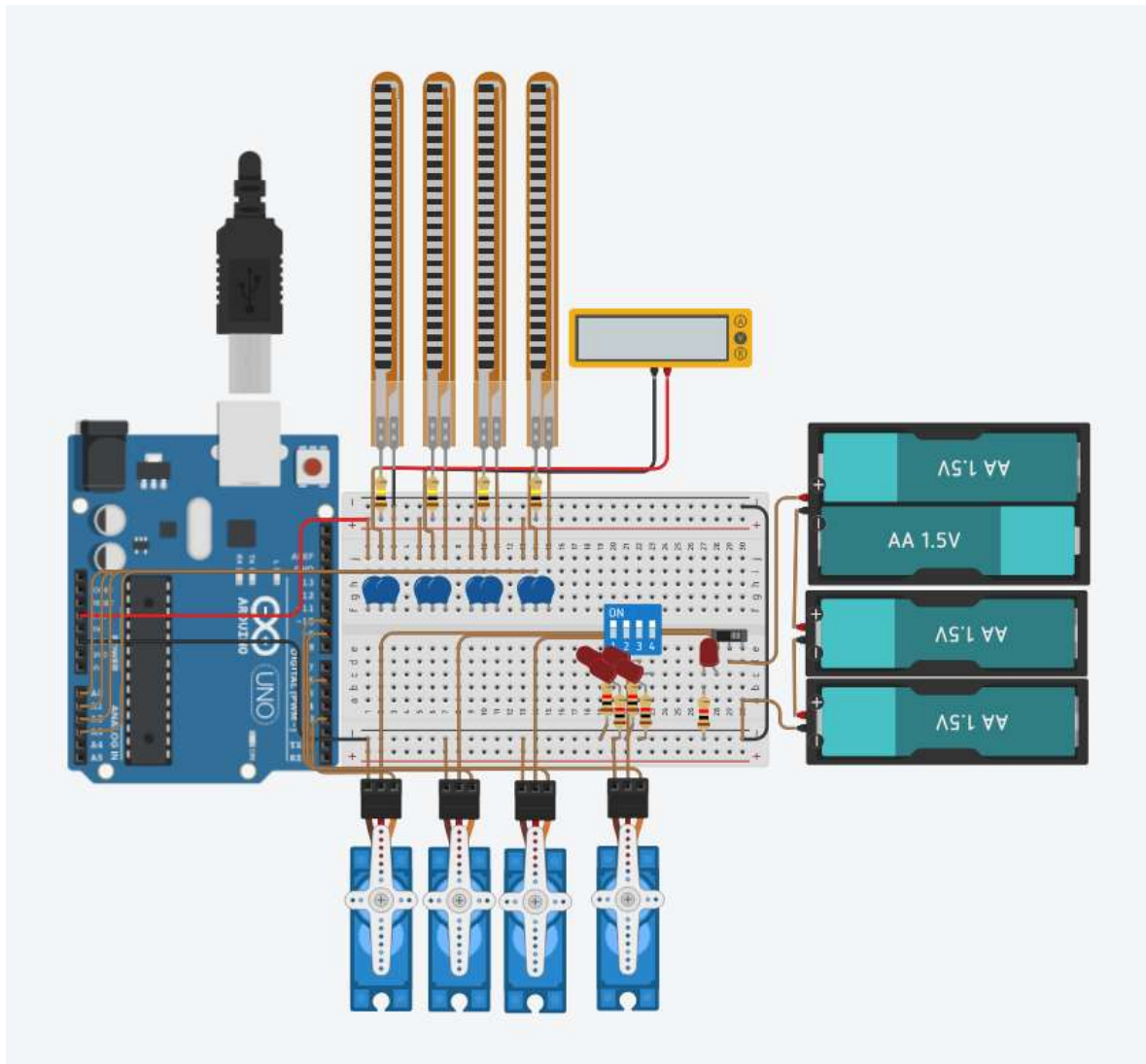
Πίνακας 4. Πλεονεκτήματα σε Σχέση με Άλλες Πλακέτες

Κριτήριο	Arduino Nano ESP32	Arduino Nano (παλαιός)	ESP32 DevKit
Επεξεργαστής	ESP32-S3 Dual-Core	ATmega328P (8-bit)	ESP32-WROOM32
Wi-Fi / BLE	Ναι / Ναι	Όχι / Όχι	Ναι / Ναι
Μέγεθος	Πολύ μικρό	Πολύ μικρό	Μεγαλύτερο
USB-C	Ναι	Όχι (mini USB)	Όχι (micro USB)
Προγραμματισμός	Arduino IDE / Cloud	Arduino IDE	Arduino IDE / ESP-IDF

3.4. Προσομοίωση/ Tinkercad

Για την υλοποίηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας, αρχικά χρησιμοποιήθηκε η διαδικτυακή πλατφόρμα Tinkercad, η οποία αποτελεί ένα εργαλείο σχεδιασμού και προσομοίωσης που έχει αναπτυχθεί από την Autodesk. Το Tinkercad προσφέρει ένα

εύχρηστο περιβάλλον εργασίας και δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας τρισδιάστατων μοντέλων, σχεδίασης κυκλωμάτων και προγραμματισμού μικροελεγκτών μέσω blocks ή γλώσσας τύπου Arduino. Η επιλογή του Tinkercad κρίθηκε κατάλληλη λόγω της προσβασιμότητας, της ευκολίας χρήσης και της ευρείας αποδοχής του στον εκπαιδευτικό και τεχνολογικό τομέα. Στο πλαίσιο της εργασίας παρουσιάζονται οι βασικές λειτουργίες της πλατφόρμας, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο συνέβαλε στην ανάπτυξη και υλοποίηση των επιμέρους τμημάτων του έργου.



Εικόνα 33. Προσομοίωση κυκλώματος ανάδρασης αισθητήρων κάμσεις με σερβομηχανισμών

3.4.1 Σκοπός της Προσομοίωσης

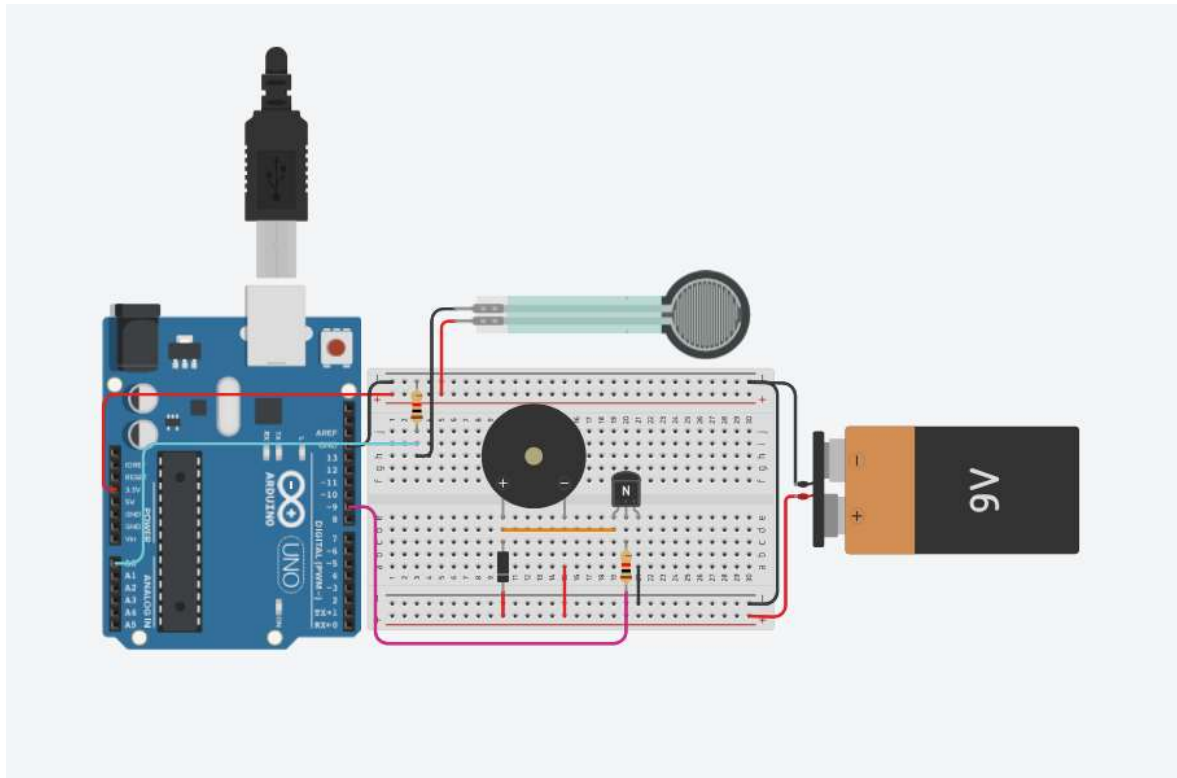
Για τις ανάγκες της παρούσας πτυχιακής εργασίας, το λογισμικό Tinkercad χρησιμοποιήθηκε για τον σχεδιασμό και την προσομοίωση του ηλεκτρονικού κυκλώματος που υλοποιεί το υπό μελέτη σύστημα. Η προσομοίωση αποσκοπούσε στην επιβεβαίωση της σωστής λειτουργίας του κυκλώματος πριν την υλοποίηση σε φυσικό περιβάλλον.

3.4.2 Δημιουργία Κυκλώματος

Αρχικά, στο περιβάλλον κυκλωμάτων του Tinkercad («Circuits»), προστέθηκαν τα απαραίτητα εξαρτήματα, όπως:

- Arduino UNO,
- Αισθητήρες : κάμψης, πίεσης
- Ενεργοποιητές : servo motor, buzzer
- LEDs,
- Αντιστάσεις και άλλα παθητικά στοιχεία.

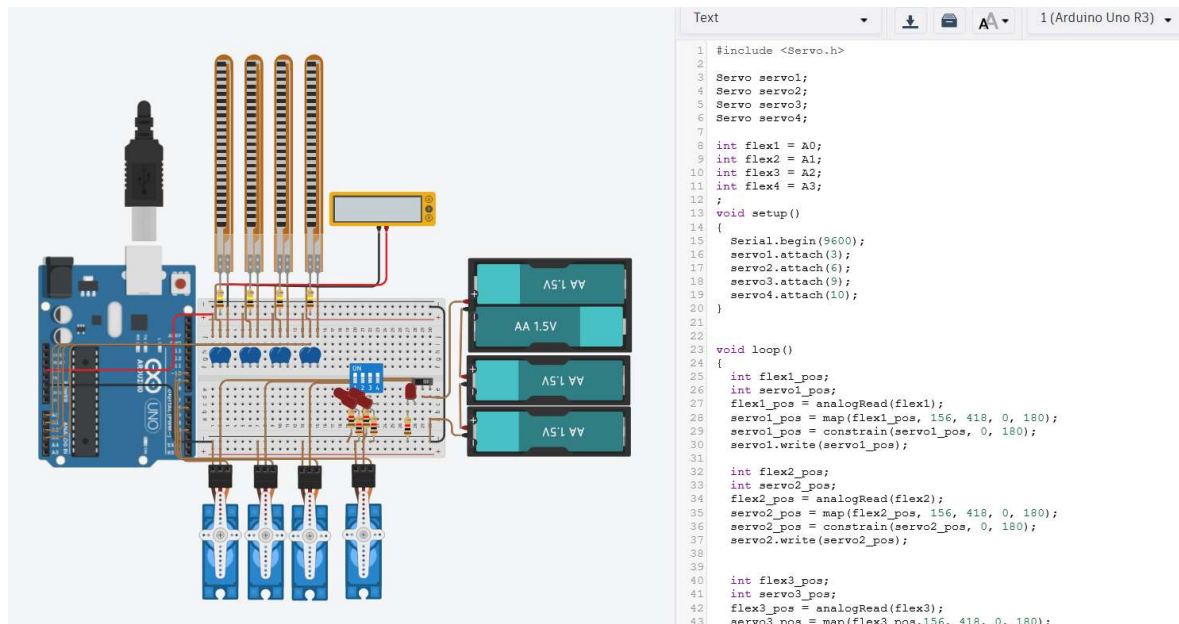
Η σύνδεση των εξαρτημάτων έγινε μέσω των εικονικών καλωδίων του Tinkercad, ακολουθώντας το σχεδιάγραμμα που είχε αρχικά δημιουργηθεί στο στάδιο του σχεδιασμού.



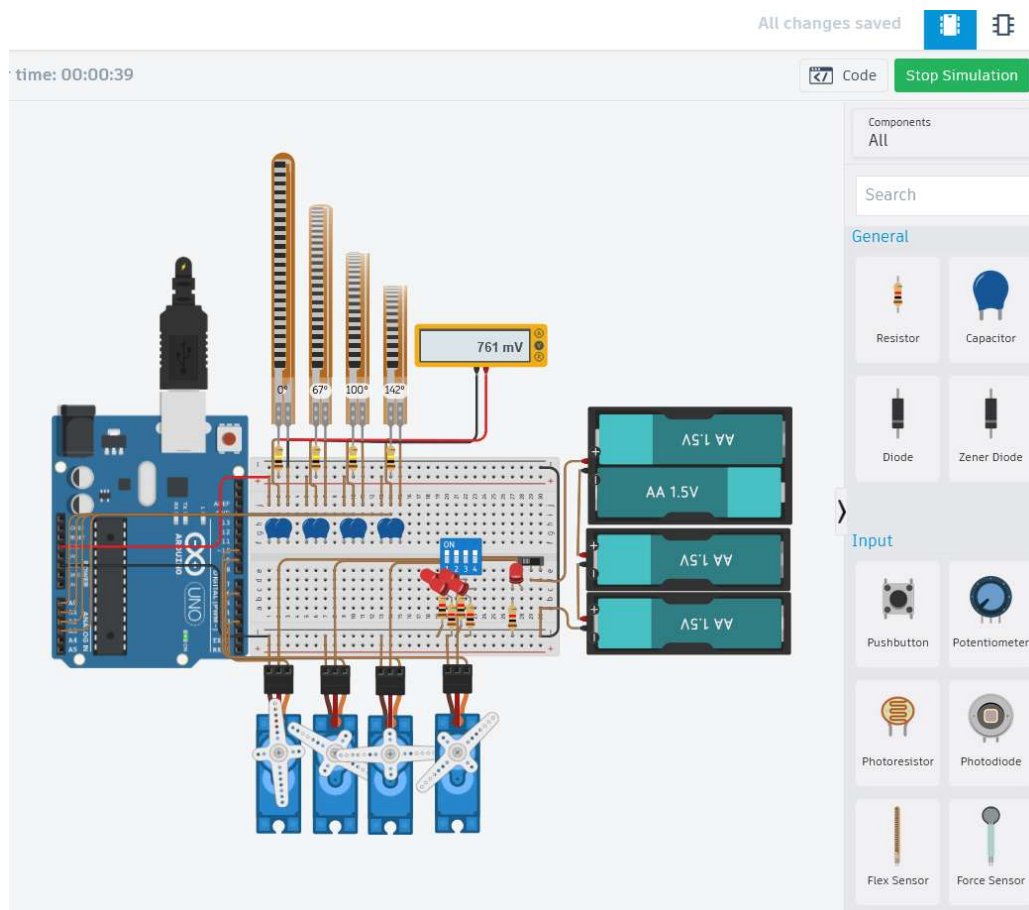
Εικόνα 34. Σχεδίαση του κυκλώματος στο περιβάλλον του Tinkercad

3.4.3 Προγραμματισμός του Arduino

Το Tinkercad παρέχει ενσωματωμένο επεξεργαστή κώδικα για το Arduino, δίνοντας τη δυνατότητα να γραφεί κώδικας είτε μέσω blocks είτε σε γλώσσα C/C++. Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα C++ για την ανάπτυξη του προγράμματος.



Εικόνα 35. Παράθυρο προγραμματισμού Arduino στο Tinkercad



Εικόνα 36. Εκτέλεση της προσομοίωσης με ενεργοποιημένα εξαρτήματα

3.4.4. Έλεγχος Λειτουργικότητας

Αφού ολοκληρώθηκε η σύνδεση και ο προγραμματισμός, η προσομοίωση ενεργοποιήθηκε μέσω της επιλογής "**Start Simulation**". Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης ελέγχθηκαν:

- η σωστή αντίδραση των εξαρτημάτων εισόδου στα ερεθίσματα (Flex sensor, Force sensor),
- η ανταπόκριση των εξόδων (Servo motor, buzzer)
- τυχόν σφάλμα στον κώδικα ή στο κύκλωμα.

3.5. Υλοποίηση Συστήματος

Η διαδικασία υλοποίησης του απτικού γαντιού αποτελεί το κυρίως στάδιο στην παρούσα εργασία. Το στάδιο αυτό συνδυάζει την ηλεκτρονική σχεδίαση, την μηχανική κατασκευή και την ενσωμάτωση αισθητήρων και ενεργοποιητών σε μία εργονομική και λειτουργική μορφή. Στόχος είναι η κατασκευή ενός γαντιού ικανού να ανιχνεύει με ακρίβεια την κίνηση των δακτύλων, παρέχοντας παράλληλα απτική ανάδραση, ώστε ο χρήστης να «αισθάνεται» την αλληλεπίδραση με αντικείμενα σε πραγματικό χρόνο. Το γάντι αυτό θα συνδεθεί μετέπειτα με έναν ρομποτικό βραχίονα, επιτρέποντας τον τηλεχειρισμό του με φυσικές κινήσεις και την άμεση αίσθηση της δύναμης ή της υφής που ασκείται. Ο σκοπός της υλοποίησης είναι να δημιουργηθεί ένα αξιόπιστο, ελαφρύ και εύχρηστο πρωτότυπο, κατάλληλο για δοκιμές και μελλοντική βελτίωση.

3.5.1. Σχεδιαστικές Προδιαγραφές και Απαιτήσεις

Η σχεδίαση του απτικού γαντιού βασίστηκε σε ένα σύνολο λειτουργικών και τεχνικών απαιτήσεων, με στόχο την ανάπτυξη ενός συστήματος που θα προσφέρει ακριβή καταγραφή κινήσεων και ρεαλιστική απτική ανάδραση.

Σε λειτουργικό επίπεδο, το γάντι πρέπει να ανιχνεύει με ακρίβεια την κάμψη και την κίνηση των δακτύλων, χρησιμοποιώντας συνδυασμό αισθητήρων κάμψης (Flex sensors). Επιπλέον, απαιτείται η ενσωμάτωση ενεργοποιητών (Vibrator Motor) που θα παρέχουν δύναμη ανάδρασης, προκειμένου ο χρήστης να λαμβάνει ρεαλιστικά αισθητηριακά ερεθίσματα κατά την αλληλεπίδραση με αντικείμενα μέσω του ρομποτικού βραχίονα.

Σε τεχνικό επίπεδο, το γάντι πρέπει να διατηρεί χαμηλό βάρος για άνετη πολύωρη χρήση, να έχει στιβαρή αλλά ευέλικτη κατασκευή και να εξασφαλίζει χαμηλή

καθυστέρηση στη μετάδοση δεδομένων. Η κατανάλωση ισχύος πρέπει να είναι περιορισμένη ώστε να επιτρέπει παρατεταμένη λειτουργία, ενώ η ασφάλεια χρήσης είναι κρίσιμη, ειδικά σε εφαρμογές με αλληλεπίδραση ανθρώπου–μηχανής.

Τέλος, το σύστημα πρέπει να είναι συμβατό με τις διεπαφές και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας του ρομποτικού βραχίονα, ώστε να υποστηρίζει ομαλή και συγχρονισμένη λειτουργία.

3.5.2. Περιγραφή Υλικών – Εξαρτημάτων

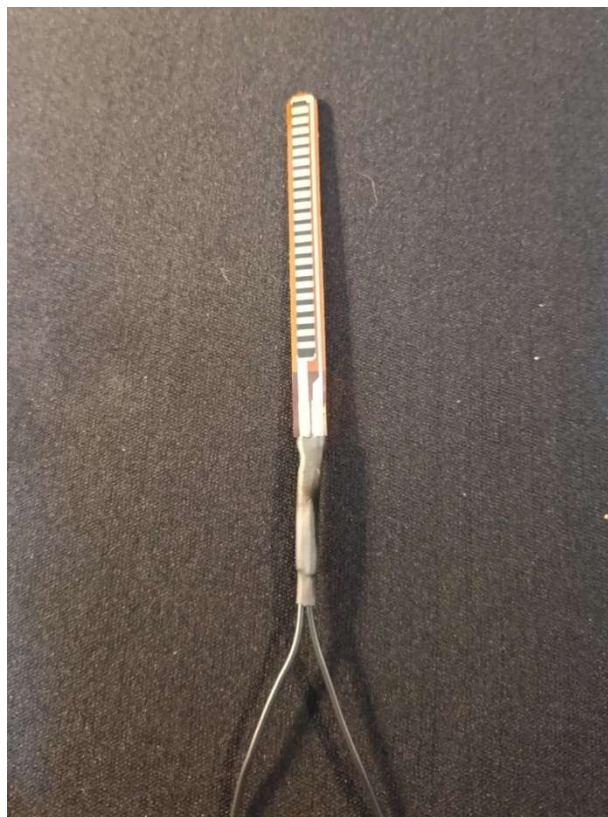
Η επιλογή των υλικών και των εξαρτημάτων για την κατασκευή του απτικού γαντιού πραγματοποιήθηκε με γνώμονα την επίτευξη υψηλής ακρίβειας, χαμηλού βάρους και εργονομίας, καθώς και τη συμβατότητα με το σύστημα ελέγχου του ρομποτικού βραχίονα.

Δομικά Υλικά: Το γάντι βασίζεται σε ελαφρύ και ανθεκτικό ύφασμα νεοπρέν (neoprene), με ελαστικότητα, για άνετη εφαρμογή και αντοχή στη χρήση. Το συγκεκριμένο ύφασμα αποτελεί κατάλληλο υλικό για την κατασκευή απτικών γαντιών λόγω της ελαστικότητας, της αντοχής και του χαμηλού βάρους του. Το γάντι που χρησιμοποιήθηκε ζυγίζει 61 γραμμάρια (χωρίς τα υπόλοιπα υλικά). Το neoprene λόγω της εύκολης κατεργασίας του, επιτρέπει την ενσωμάτωση αισθητήρων, ενεργοποιητών και καλωδίων στην επιφάνειά του χωρίς σημαντική απώλεια μηχανικής ακεραιότητας [56]. Οι καλωδιώσεις είναι λεπτές και εύκαμπτες για να μην περιορίζουν την κίνηση, ενώ τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα προστατεύονται με θήκες, πάλι από ύφασμα νεοπρέν, για να μην περιορίζουν την κίνηση και να υπάρχει ελαστικότητα.



Εικόνα 37. Γάντι neoprene

Αισθητήρες: Για την καταγραφή της κίνησης των δακτύλων επιλέχθηκαν εύκαμπτοι αισθητήρες κάμψης (flex sensors) υψηλής ευαισθησίας, ικανοί να ανιχνεύουν μικρές μεταβολές στη γωνία άρθρωσης.



Εικόνα 38. Αισθητήρας (flex sensor) με καλωδίωση.

Ενεργοποιητές: Η απτική ανατροφοδότηση υλοποιείται μέσω μικρών δονητικών μοτέρ (vibration actuators) τοποθετημένων σε στρατηγικά σημεία, στις άκρες των δακτύλων. Όπου απαιτείται ανάδραση δύναμης, προβλέπεται η χρήση μικρών σερβοκινητήρων.



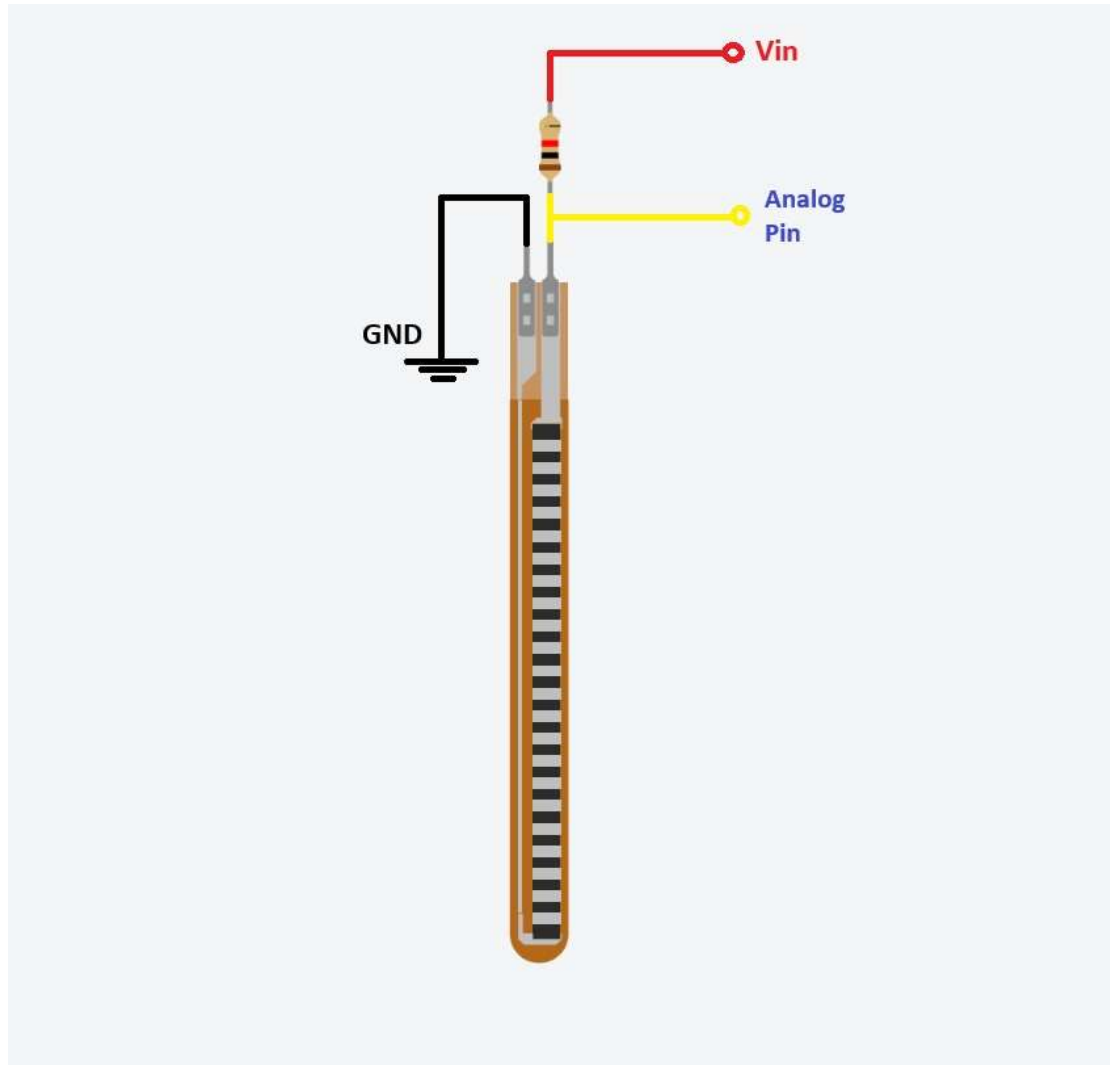
Εικόνα 39. Ενεργοποιητής με καλωδίωση.

Ηλεκτρονική Μονάδα Ελέγχου: Ο έλεγχος και η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιείται από μικροελεγκτή υψηλής ταχύτητας - Arduino Nano ESP32 - ο οποίος υποστηρίζει επικοινωνία μέσω σειριακής σύνδεσης ή πρωτοκόλλων Wi-Fi.

3.5.3. Ηλεκτρονικός και Μηχανικός Σχεδιασμός

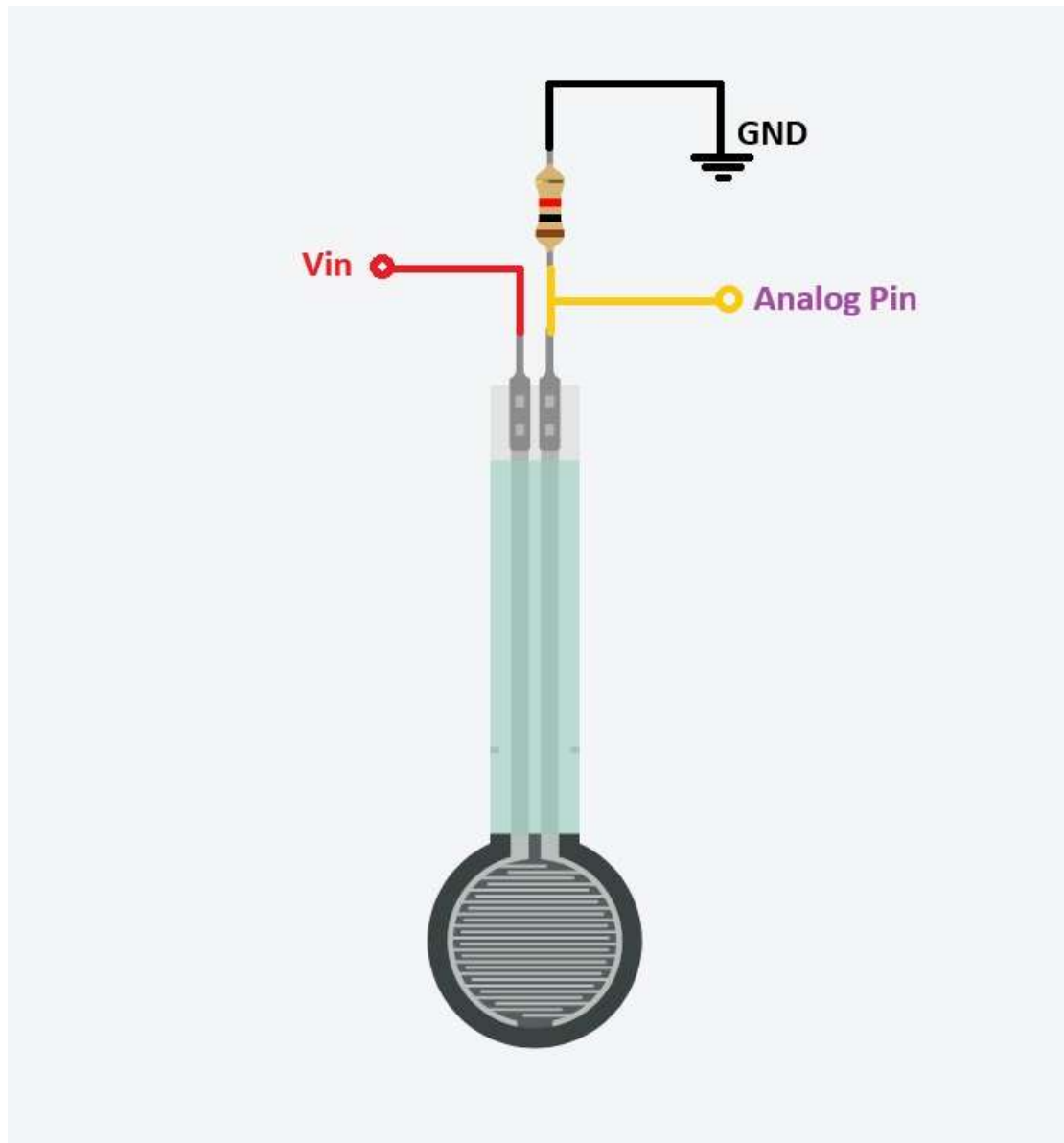
Σχεδίαση κυκλωμάτων

Στις αναλογικές εισόδους του μικροελεγκτή η σύνδεση των αισθητήρων κάμψης πραγματοποιήθηκε μέσω της εφαρμογής του κυκλώματος διαιρέτη τάσης για την λήψη των μεταβαλλόμενων τιμών, όπως φαίνεται παρακάτω.



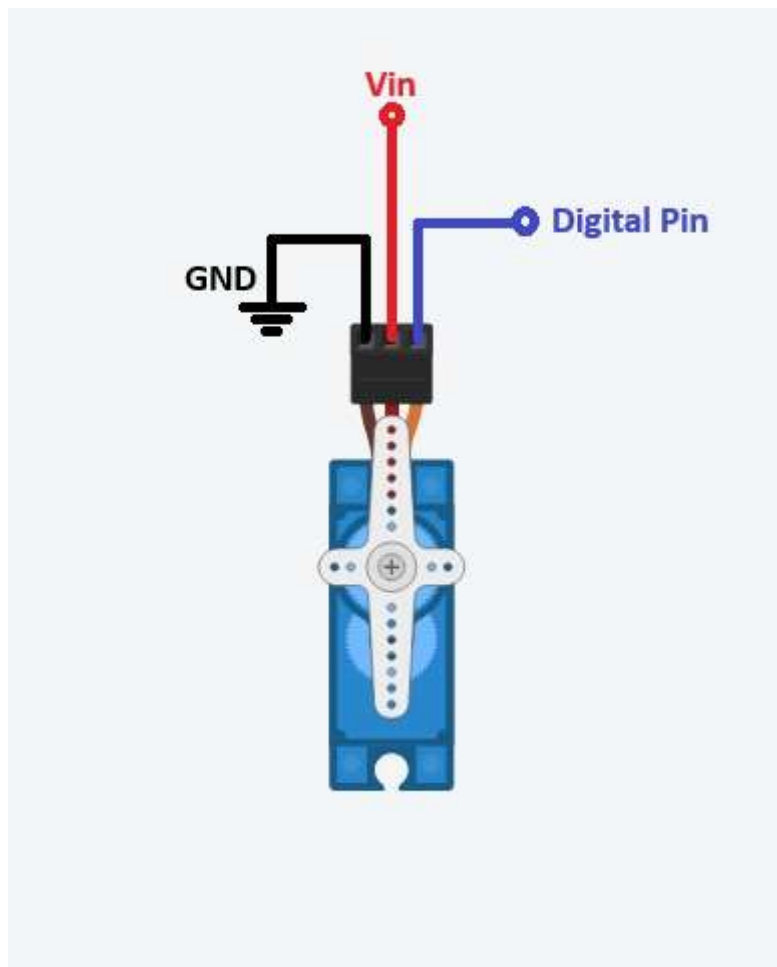
Εικόνα 40. Σύνδεση αισθητήρα κάμψης με κύκλωμα διαιρέτη τάσης.

Την ίδια λογική ακολουθεί και το κύκλωμα του αισθητήρα αντίστασης που έχει προσαρμοστεί στον ρομποτικό βραχίονα.



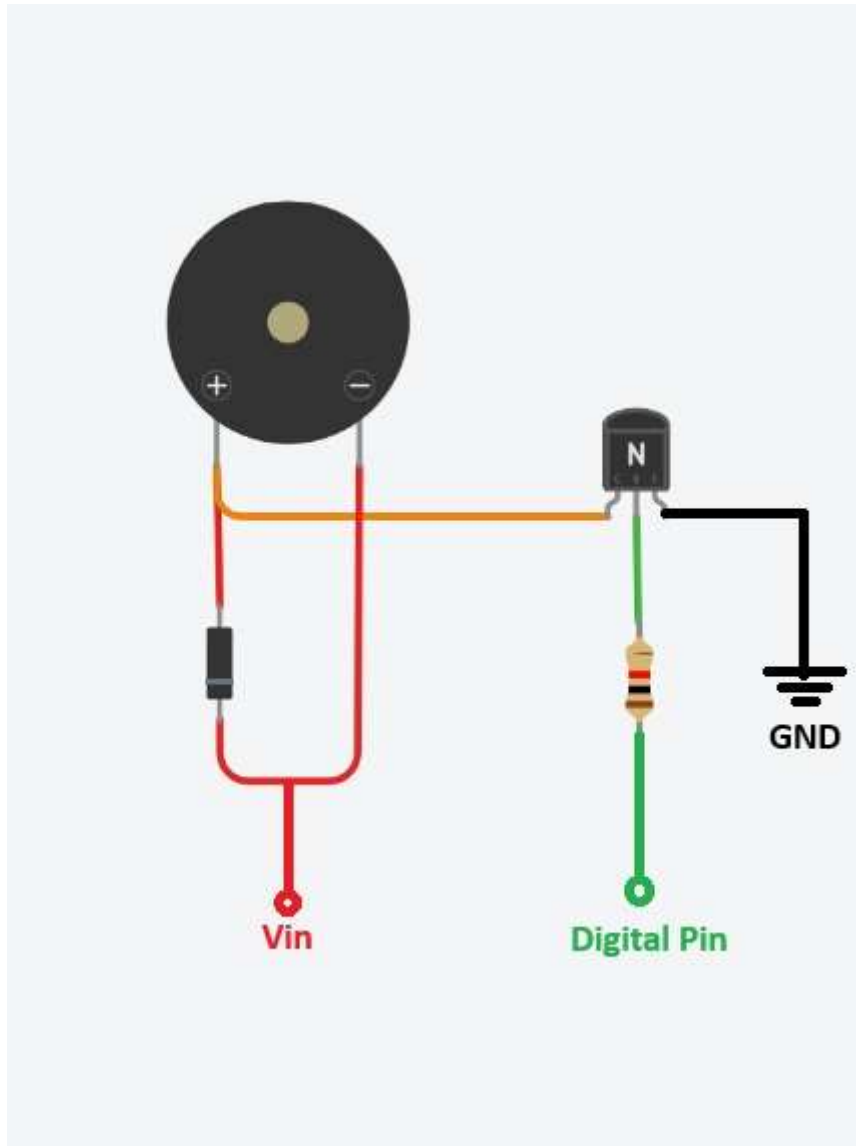
Εικόνα 41. Σύνδεση αισθητήρα πίεσης με κύκλωμα διαιρέτη τάσης.

Στις εξόδους του μικροελεγκτή η σύνδεση των σερβοκινητήρων πραγματοποιείται μέσω του παρακάτω κυκλώματος



Εικόνα 42. Σύνδεση σερβοκινητήρων στο κύκλωμα.

Τέλος η σύνδεση των δονητικών κινητήρων πραγματοποιείται μέσω ενός όχι τόσο απλού όσο τα προηγούμενα κυκλώματα, καθώς συνδυάζει την χρήση ενός διπολικού NPN τρανζίστορ και μίας διόδου, όπως φαίνεται παρακάτω.



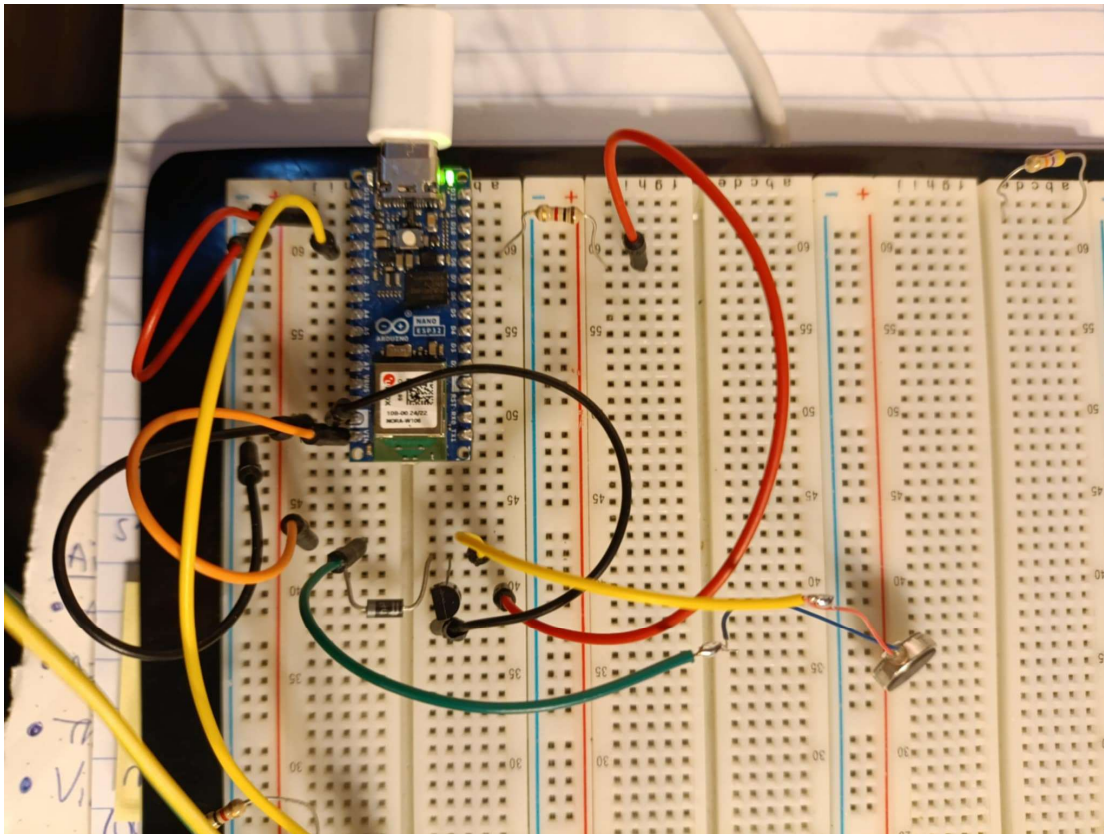
Εικόνα 43. Σύνδεση δονητικού κινητήρα στο κύκλωμα.

3.5.4. Πειραματικό Στάδιο Ελέγχου Λειτουργίας

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε ενσωμάτωση των εξαρτημάτων στο σύστημα κεντρικού ελεγκτή, το Arduino Nano ESP32, με σκοπό την πραγματοποίηση δοκιμών σε πειραματική διάταξη. Ο μικροελεγκτής Arduino Nano ESP32 αποτέλεσε την κεντρική μονάδα ελέγχου, τοποθετημένος σε breadboard για ευκολία στη συνδεσμολογία και στις αλλαγές κατά τη

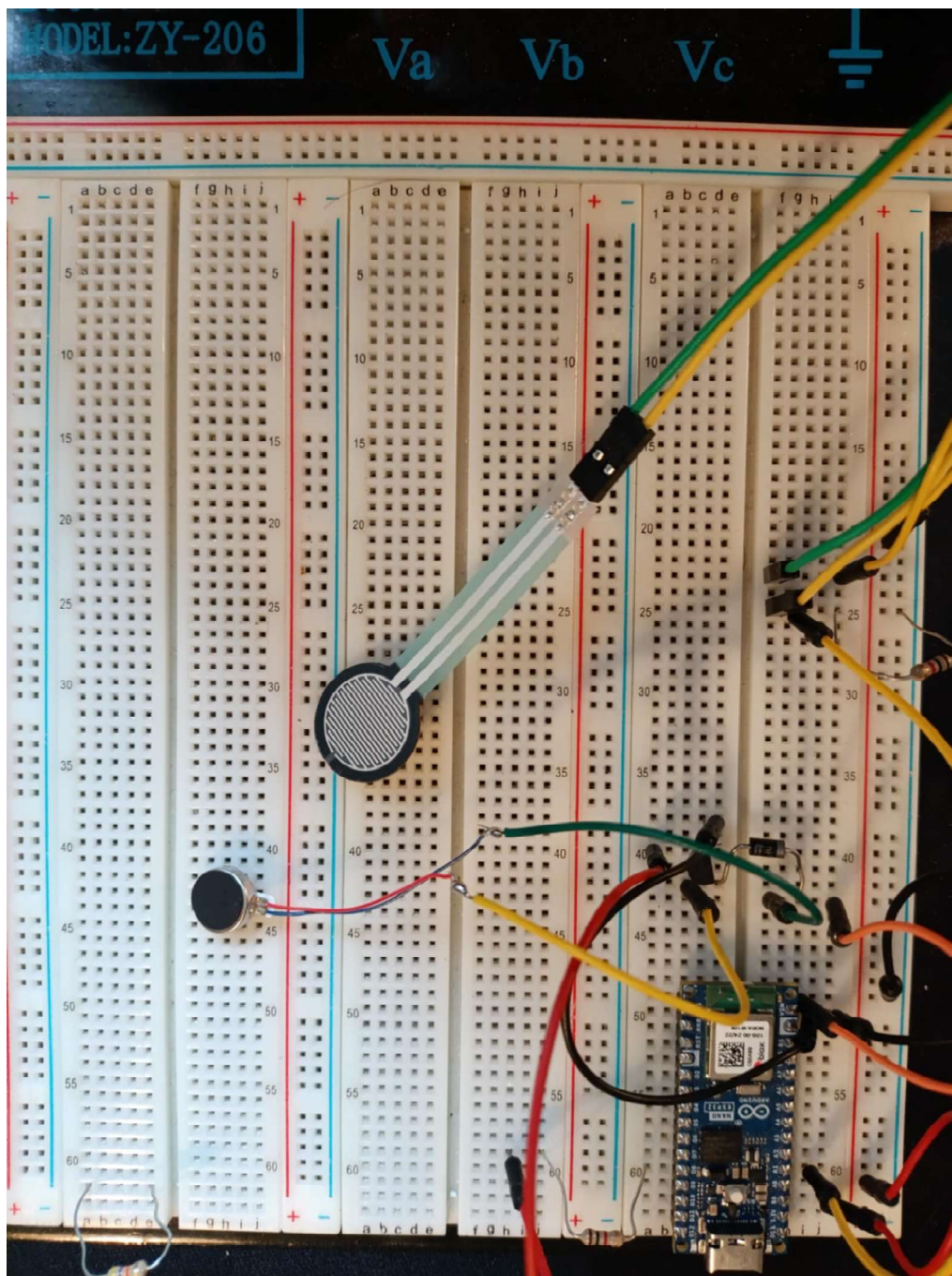
διάρκεια των δοκιμών. Οι αισθητήρες περιλάμβαναν πιεζοαντιστάσεις (force sensors) και δονητικούς ενεργοποιητές, συνδεδεμένους με τον μικροελεγκτή μέσω απλών κυκλωμάτων οδήγησης.

Στην Εικόνα 39 παρουσιάζεται η διαδικασία προτυποποίησης και διακρίνεται η βασική συνδεσμολογία του Arduino με τα κυκλώματα οδήγησης και τις αντιστάσεις προστασίας,



Εικόνα 44. Συνδεσμολογία του Arduino Nano ESP32.

Η χρήση breadboard επέτρεψε τη γρήγορη αξιολόγηση της απόδοσης των αισθητήρων και των ενεργοποιητών, καθώς και τη ρύθμιση των παραμέτρων τους πριν την τελική ενσωμάτωση στο γάντι. Οι συνδέσεις πραγματοποιήθηκαν με εύκαμπτα καλώδια, ώστε να διευκολύνεται η αναδιάταξη του κυκλώματος. Η μηχανική πλευρά του σχεδιασμού επικεντρώθηκε στην εργονομική τοποθέτηση των αισθητήρων επάνω στο γάντι, με σκοπό την ακριβή καταγραφή κινήσεων και την αποτελεσματική μεταφορά απτικής ανατροφοδότησης στον χρήστη.

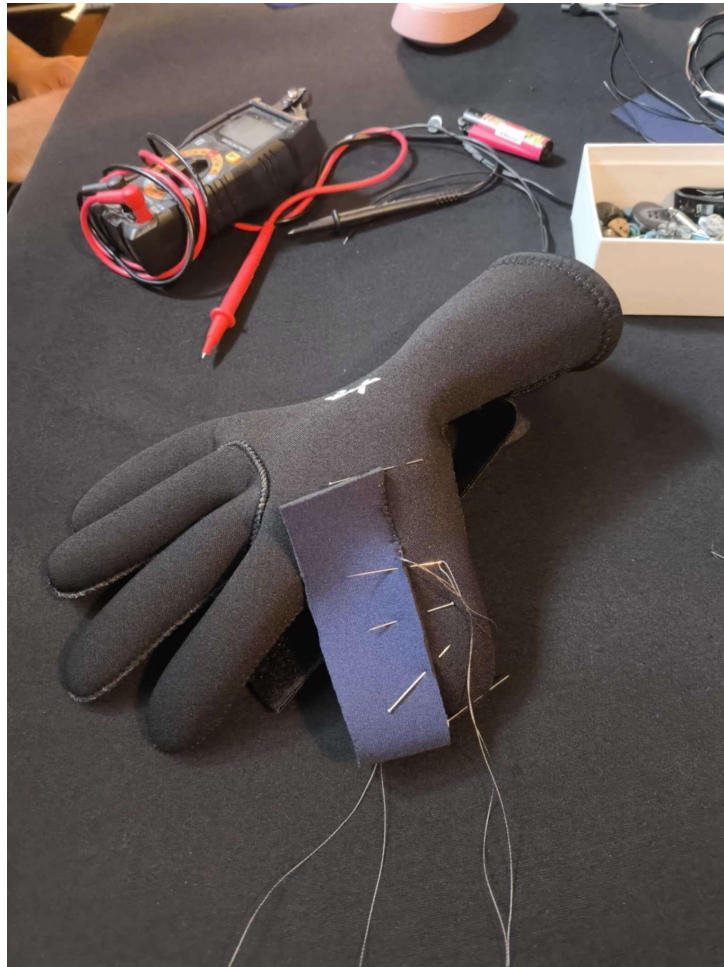


Εικόνα 45. Πειραματικό στάδιο λειτουργικής επαλήθευσης.

Στην Εικόνα 40 απεικονίζεται το τρίτο στάδιο πρωτοτυποποίησης του ηλεκτρονικού συστήματος του απτικού γαντιού, χρησιμοποιώντας πλακέτα δοκιμών (breadboard) για την υλοποίηση και τον έλεγχο των βασικών λειτουργιών. Στο κάτω μέρος της διάταξης βρίσκεται ο μικροελεγκτής Arduino Nano ESP32, ο οποίος αποτελεί την κεντρική μονάδα επεξεργασίας και διαχείρισης σημάτων. Συνδεδεμένοι στο κύκλωμα διακρίνονται ένας αισθητήρας δύναμης τύπου FSR (Force Sensing Resistor) και ένας δονητικός ενεργοποιητής (vibrotactile motor), οι οποίοι αποτελούν τα στοιχεία για την ανίχνευση της πίεσης και την παροχή απτικής ανατροφοδότησης αντίστοιχα.

Η συνδεσμολογία έχει πραγματοποιηθεί με εύκαμπτα καλώδια και αντιστάσεις, επιτρέποντας γρήγορες αλλαγές κατά τη φάση των δοκιμών. Το στάδιο αυτό είναι απαραίτητο για την αξιολόγηση της απόκρισης των αισθητήρων και των ενεργοποιητών, καθώς και για τον έλεγχο της σωστής επικοινωνίας τους με τον μικροελεγκτή, πριν την τελική ενσωμάτωσή τους στο γάντι.

Κατασκευή μηχανικού μέρους του γαντιού: Αρχικά, μετρήθηκαν, κόπηκαν και τοποθετήθηκαν τα προστατευτικά καλύμματα για τους αισθητήρες και τους ενεργοποιητές.



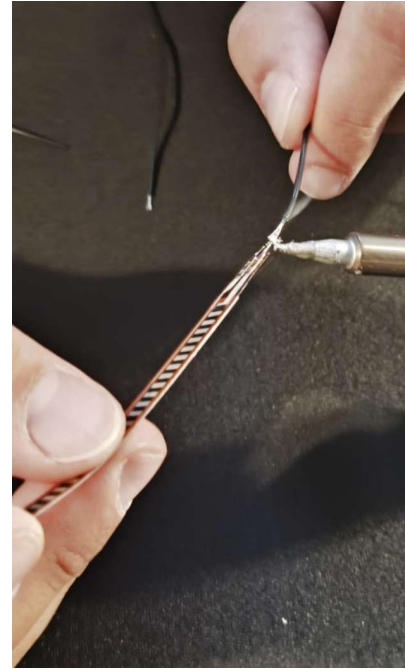
Εικόνα 46. Τοποθέτηση προστατευτικών καλυμμάτων αισθητήρων και δονητικών ενεργοποιητών.

Τοποθέτηση και καλωδίωση εξαρτημάτων: Το επόμενο στάδιο αφορά την κόλληση (soldering) ηλεκτρικών συνδέσεων, χρησιμοποιώντας κολλητήρι με μεταλλική μύτη για να ενώσει έναν εύκαμπτο αγωγό με τις επαφές του αισθητήρα κάμψης (flex sensor). Ο αισθητήρας συγκρατείται σταθερά με το ένα χέρι, ενώ το άλλο χέρι καθοδηγεί τον αγωγό και το καλαί ώστε να επιτευχθεί ασφαλής και ηλεκτρικά αξιόπιστη σύνδεση. Το στάδιο αυτό είναι κρίσιμο, καθώς εξασφαλίζει σωστή μεταφορά σήματος από τον αισθητήρα στον

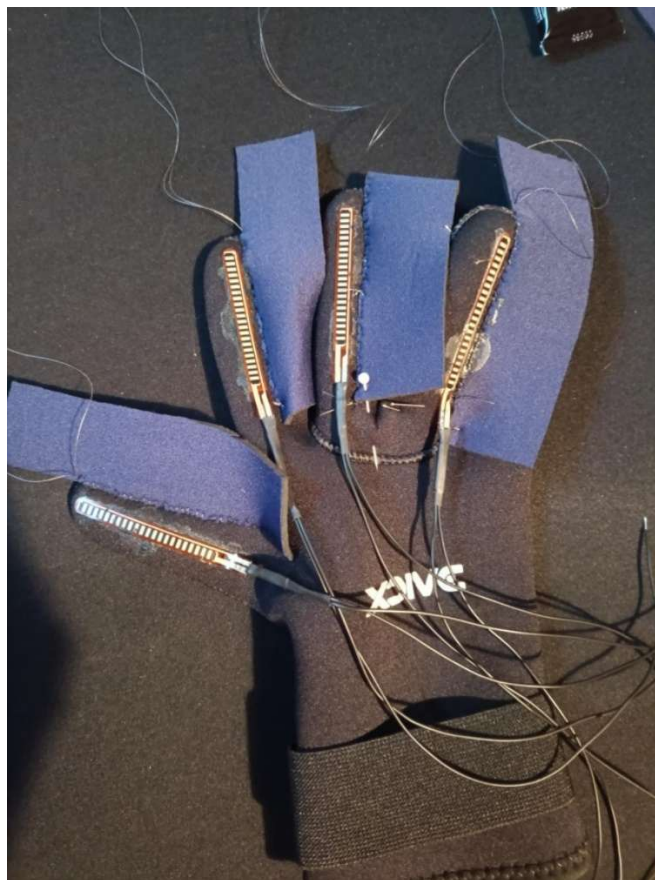
μικροελεγκτή, επηρεάζοντας άμεσα την ακρίβεια και την αξιοπιστία της συσκευής. Το ίδιο ακολουθήθηκε και για τους δονητικούς ενεργοποιητές.



Εικόνα 47. Κόλληση ηλεκτρονικών συνδέσεων αισθητήρα Flex sensor.



Εικόνα 48. Κόλληση ηλεκτρονικών συνδέσεων αισθητήρα Flex sensor.



Εικόνα 49. Τοποθέτηση αισθητήρων Flex Sensor.

Εν συνεχεία, τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες κάμψης στα κατάλληλα σημεία του γαντιού ώστε να καταγράφονται με ακρίβεια οι κινήσεις των δακτύλων. Για την τοποθέτησή τους χρησιμοποιήθηκε κόλλα χλωροπρενίου σχεδιασμένη για neoprene γάντια, καθώς προσφέρει αντοχή, ελαστικότητα και αντοχή σε ψηλές θερμοκρασίες κ.α.



Εικόνα 50. Τοποθέτηση δονητικού ενεργοποιητή (Vibrator Motor) στην άκρη του δακτύλου.

Ακολούθησε η ενσωμάτωση των ενεργοποιητών δόνησης στις άκρες των δακτύλων για παροχή απτικής ανατροφοδότησης, χρησιμοποιώντας την ίδια κόλλα χλωροπρενίου και ασφαρίζοντας με κλωστή αντοχής ειδική για υφάσματα neoprene.

3.6 Τροφοδοσία Συστήματος - Ενσωμάτωση μπαταρίας για ασύρματη λειτουργία

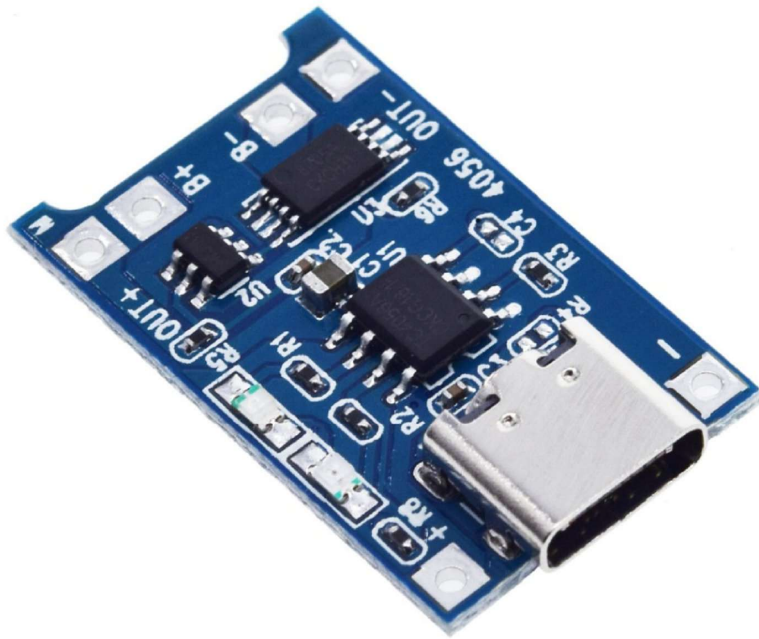
Με σκοπό την ασύρματη και αυτόνομη λειτουργία του συστήματος μελετήθηκε και υλοποιήθηκε η ενσωμάτωση μπαταρίας ως πηγή τροφοδοσίας. Ερευνώντας τους διάφορους τύπους συνδεσμολογίας και τις απαιτήσεις του συστήματος, καταλήξαμε στην επιλογή τροφοδοσίας μέσω μίας μπαταρίας Li-Po (Lithium Polymer battery) των 3,7V 980mAh και 3,63Wh.

- **3,7 V** : Πρόκειται για μια τυπική μπαταρία Li-Po ενός στοιχείου (1S). Αυτή είναι η ακριβής τάση που απαιτείται για την τροφοδοσία του Arduino Nano ESP32 μέσω της ακίδας VIN ή BAT.
- **980 mAh** : Πολύ καλή χωρητικότητα. Το σύστημα (ESP32 + 4x αισθητήρες ευκαμψίας + 4x δονητικοί κινητήρες) θα καταναλώνει περίπου ~184mA, όπως υπολογίσαμε. Οπότε έχουμε θεωρητικό χρόνο λειτουργίας: $980\text{mAh} / 184\text{mA} \approx 5,3$ ώρες. Στην πράξη, θα έχουμε 4-5 ώρες συνεχούς χρήσης.



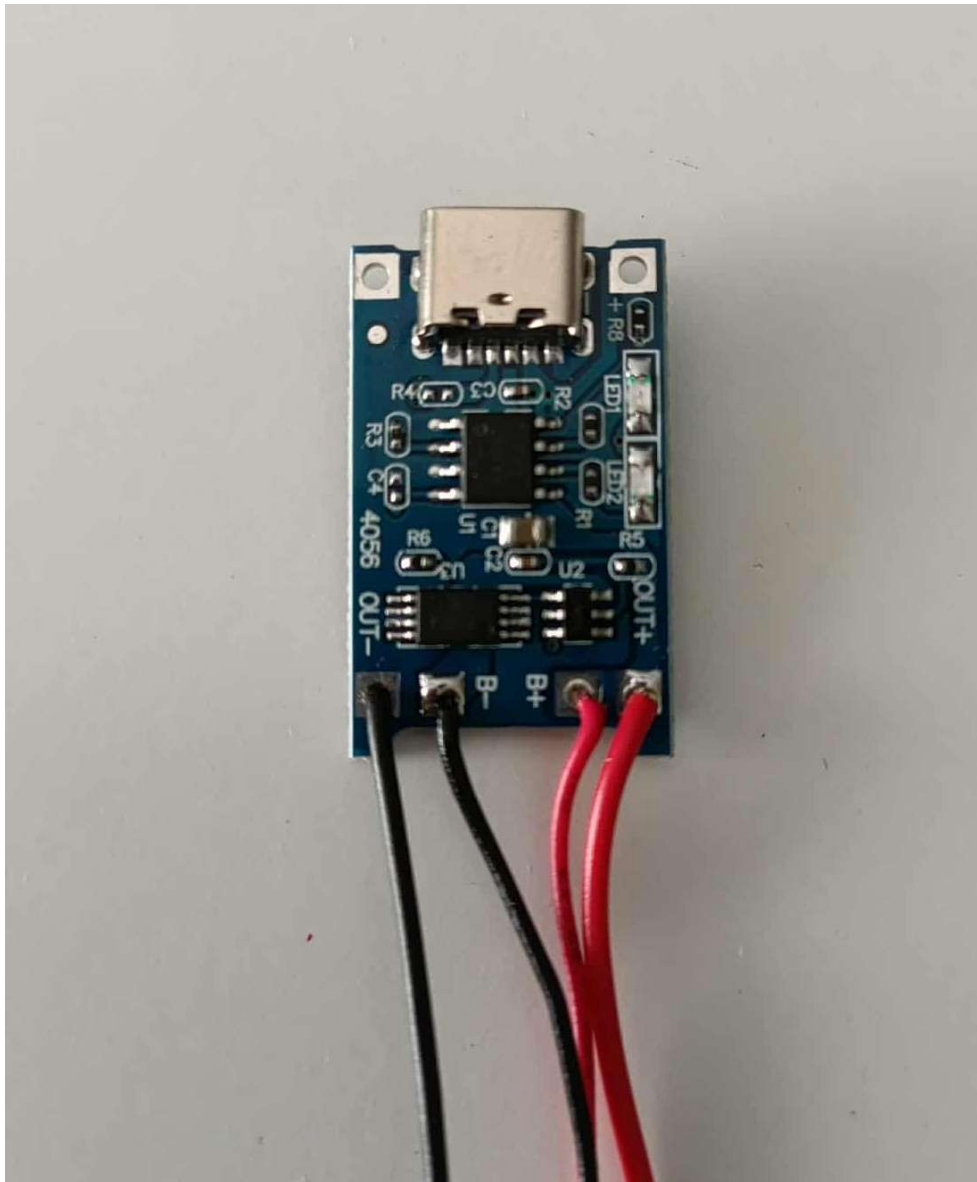
Εικόνα 51. LiPo Battery

Επειδή η ενσωμάτωση της μπαταρίας στο σύστημα δεν μπορεί να γίνει συνδέοντας την απευθείας στον μικροελεγκτή, κρίνεται απαραίτητη η χρήση ενός ενδιάμεσου στοιχείου που ονομάζεται Lithium Battery Charger and Protection Module 1A USB-C - TP4056 για λόγους προστασίας του κυκλώματος από κακή συνδεσμολογία και για την φόρτιση της μπαταρίας.



Εικόνα 52. TP4056

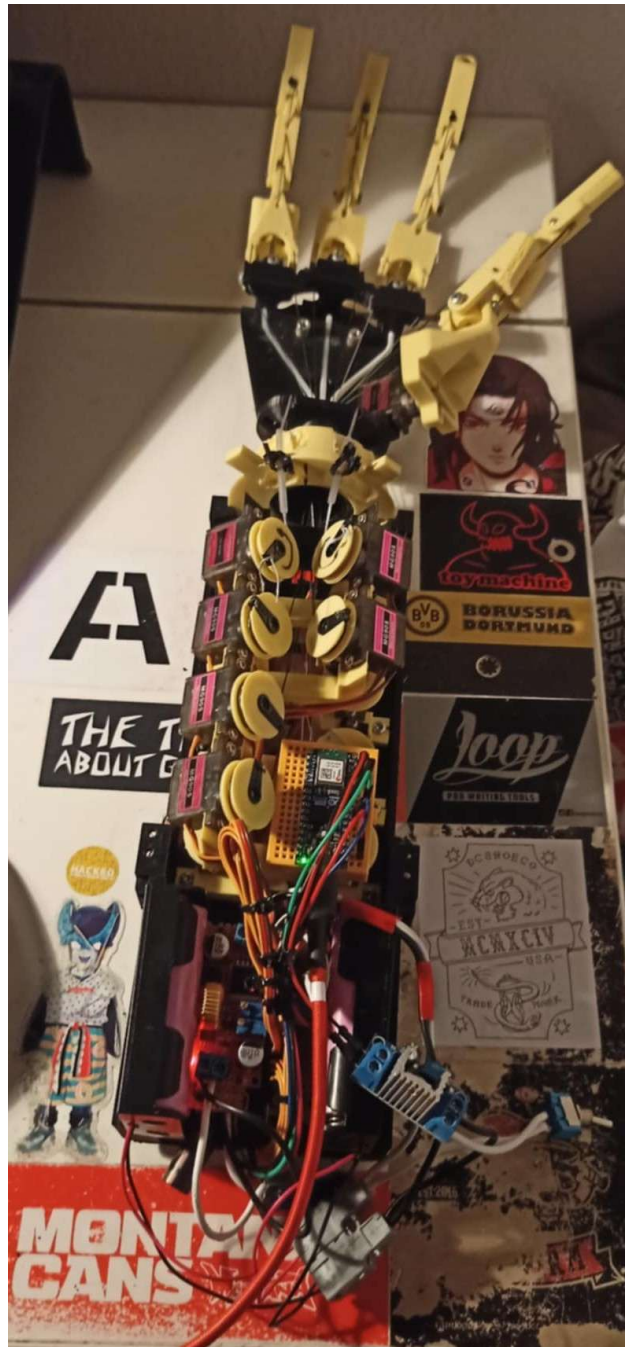
Η σύνδεση γίνεται πολύ απλά συνδέοντας το κόκκινο καλώδιο της μπαταρίας στο pin **BAT+** του module και το μαύρο καλώδιο στο **BAT-**. Σε αυτό το σημείο η μπαταρία συνδεδεμένη στο module μπορεί μόνο να φορτιστεί μέσω της θύρας **USB-C**. Για να μπορέσουμε να τροφοδοτήσουμε το σύστημα συνδέουμε το **OUT+** του module με το **VIN** του μικροελεγκτή και το **OUT-** με την γείωση **GND**. Έτσι πετυχαίνουμε την τροφοδοσία του μικροελεγκτή.



Εικόνα 53. Συνδεσμολογία μπαταρίας - TP4056

Για να τροφοδοτήσουμε τους αισθητήρες και τους ενεργοποιητές αντίστοιχα κρίνεται απαραίτητο να πάρουμε διαφορετική πηγή για τον καθένα αλλά κοινή γείωση για όλους. Συγκεκριμένα οι αισθητήρες κάμψης θα τροφοδοτηθούν από την έξοδο του μικροελεγκτή που παρέχει σταθερά 3,3V και οι δονητικοί κινητήρες θα τροφοδοτηθούν απευθείας από την VIN η οποία είναι συνδεδεμένη με την μπαταρία. Και υπενθυμίζεται ότι πρέπει και τα δύο στοιχεία να συνδεθούν σε κοινή γείωση. Η λεπτομέρεια αυτή είναι πολύ σημαντική και αποτελεί συχνό λάθος στην υλοποίηση διαφόρων πρότζεκτ ειδικότερα με την χρήση Arduino.

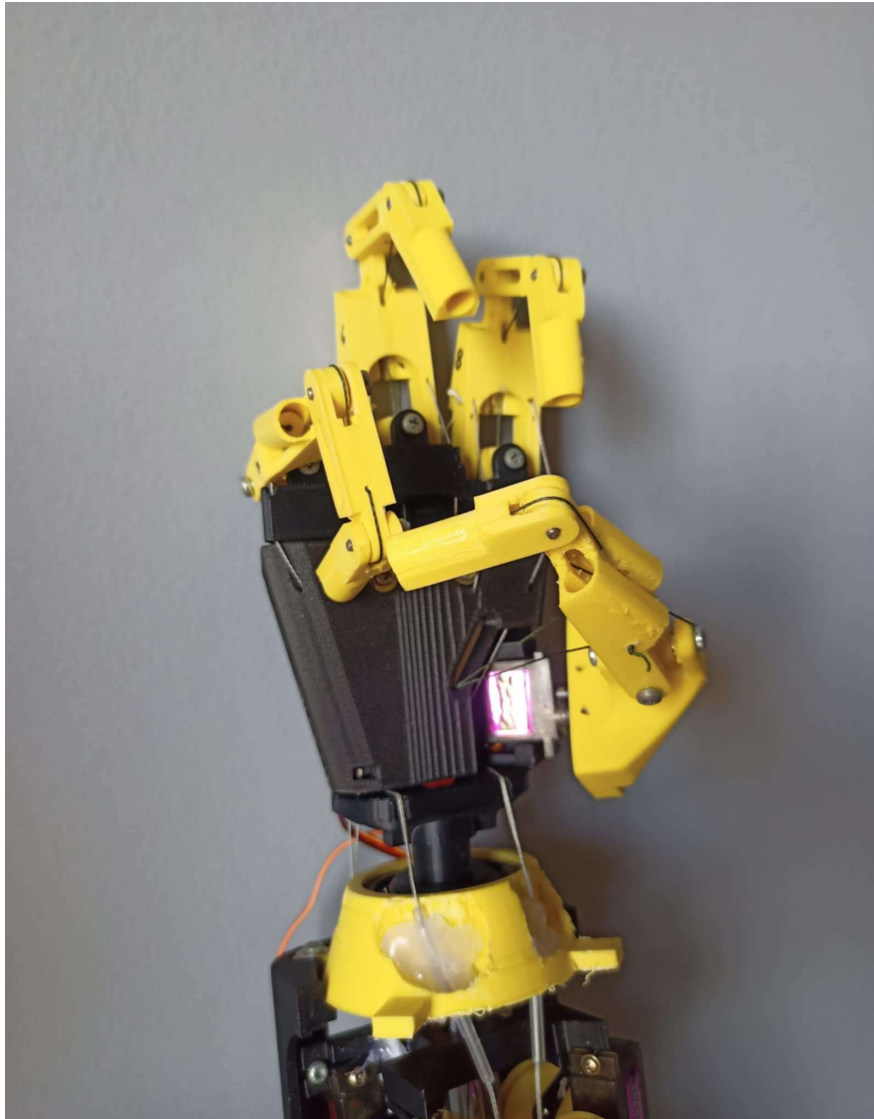
3.7 Ρομποτικός Βραχίονας



Εικόνα 54. Ο ρομποτικός βραχίονας

Στο πλαίσιο της διερεύνησης ρομποτικών συστημάτων αρπαγής, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η κατασκευή ενός ανθρωπόμορφου ρομποτικού βραχίονα, ο οποίος βασίστηκε σε βιομιμητικές αρχές και αναπαράγει βασικές λειτουργίες του ανθρώπινου χεριού. Η ανάπτυξη του συγκεκριμένου μηχανισμού έγινε μελετώντας εκτενώς τη φυσιολογία του ανθρώπινου άνω άκρου και ενσωματώνοντας λύσεις από τη σύγχρονη βιβλιογραφία και τη σχετική τεχνολογία ρομποτικών αρπαγών [58].

Αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη κατασκευή του ρομποτικού βραχίονα σχεδιάστηκε με σκοπό την επικοινωνία και τον άμεσο χειρισμό μέσω του απτικού γαντιού που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Το γάντι αυτό λειτουργεί ως διασύνδεση μεταξύ του χρήστη και του ρομποτικού χεριού, επιτρέποντας την ακριβή αντιγραφή ανθρώπινων κινήσεων και βελτιώνοντας τη φυσικότητα στην αλληλεπίδραση ανθρώπου-μηχανής. Η αρπάγη του ρομποτικού βραχίονα αποτελείται από έναν αντίχειρα και τρία δάχτυλα, με στόχο τη μείωση της πολυπλοκότητας και του κόστους, χωρίς να θυσιάζεται η λειτουργικότητα στη λαβή. Η κίνηση των φαλάγγων επιτυγχάνεται μέσω σέρβο κινητήρων και συστήματος νημάτων και ελατηρίων, προσομοιώνοντας τη δράση των μυών και των τενόντων. Ο αντίχειρας έχει σχεδιαστεί με ιδιαίτερη έμφαση στην ανεξαρτησία κίνησης και την ικανότητα συνεργασίας με τα υπόλοιπα δάχτυλα, ώστε να επιτυγχάνονται σύνθετες αρπαγές και κινήσεις ακριβείας [58].

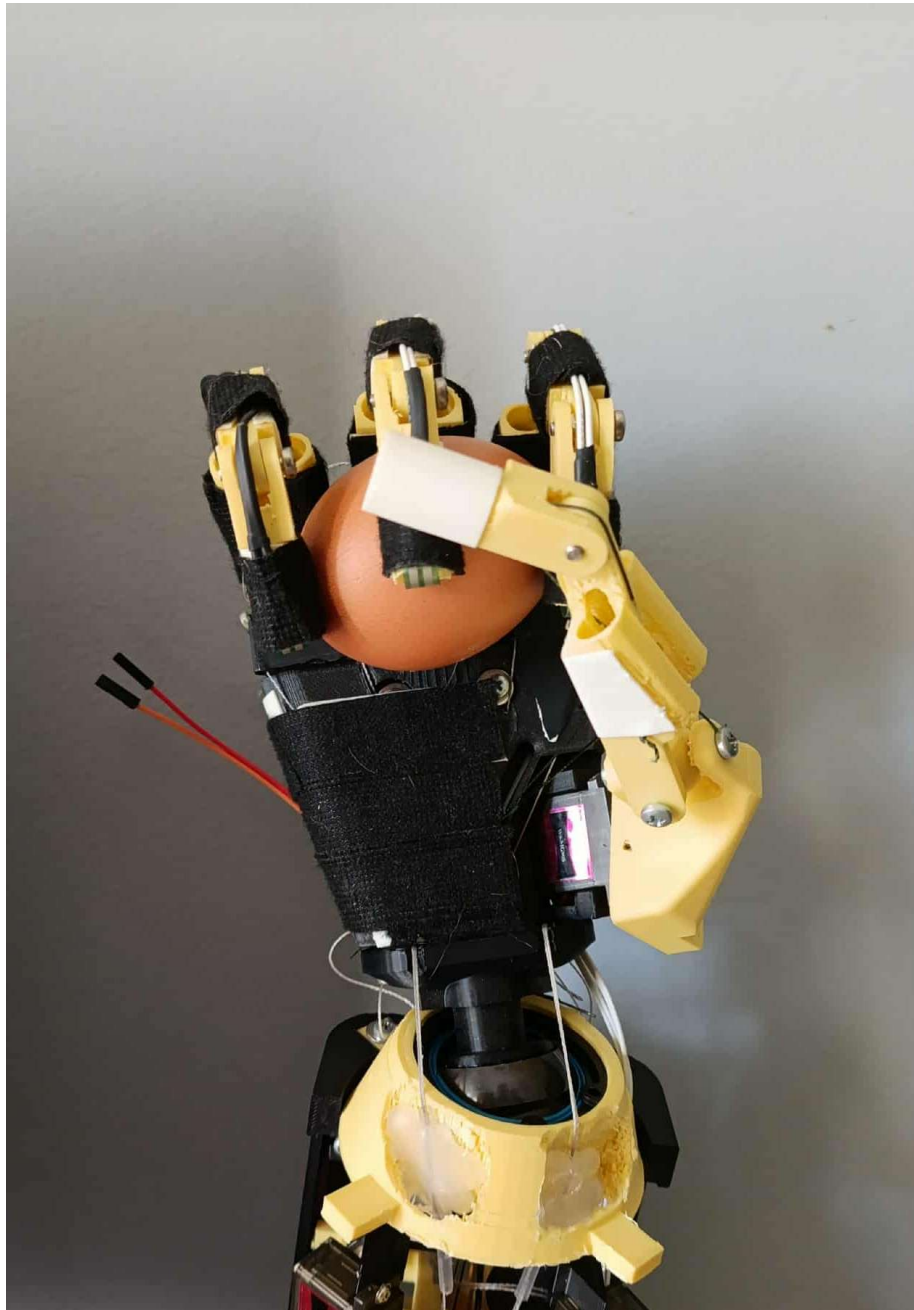


Εικόνα 55. Κλείσιμο δαχτύλων [58]

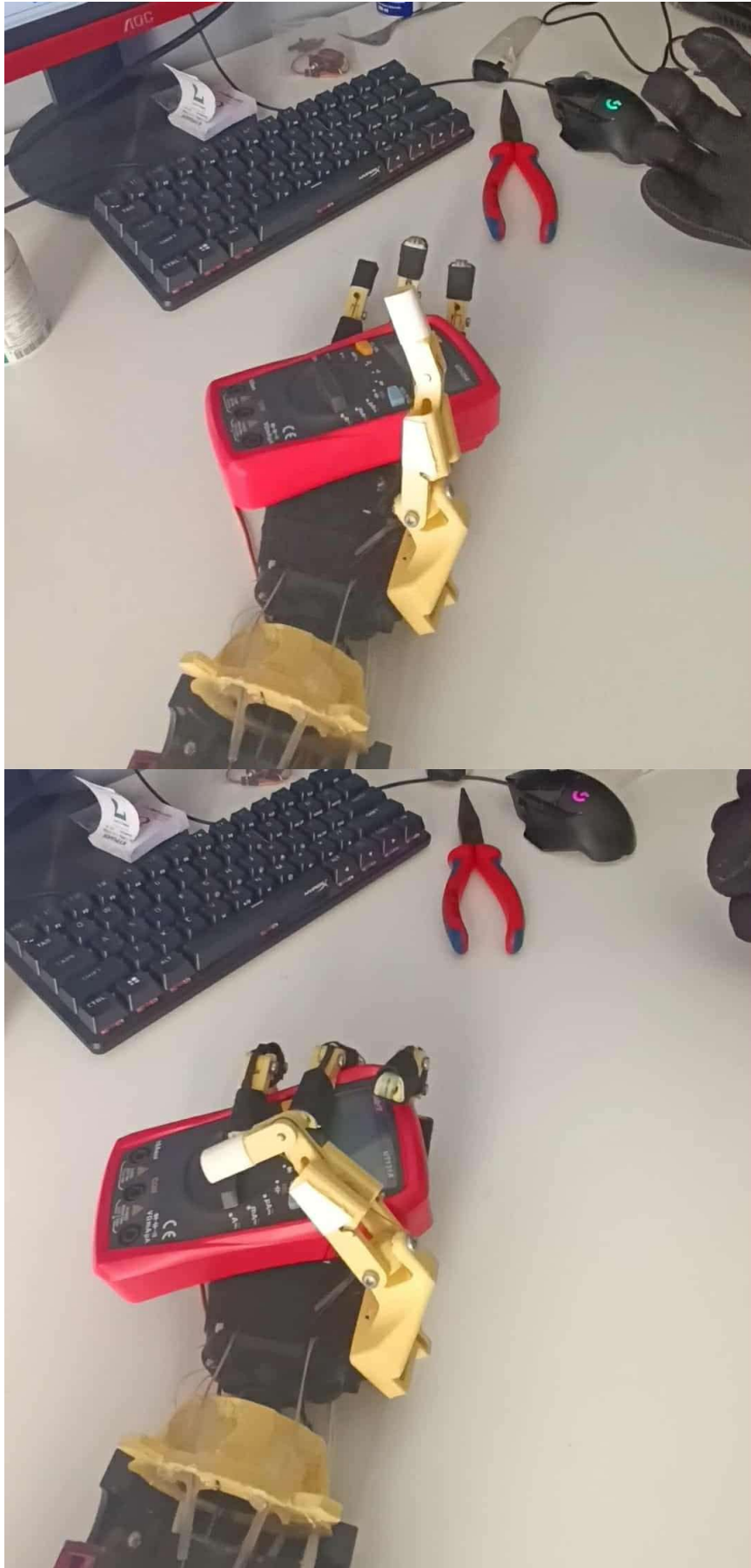
Ο καρπός παρέχει δύο βαθμούς ελευθερίας (κάμψη/έκταση, απαγωγή/προσαγωγή) μέσω τεσσάρων σέρβο κινητήρων και ενός σφαιρικού ρουλεμάν, ενώ ο πήχης στεγάζει όλα τα ηλεκτρονικά μέρη του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των 14 σέρβο κινητήρων, της μονάδας ελέγχου και των μπαταριών. Το σύστημα ελέγχου βασίζεται στην αναπτυξιακή πλακέτα **Arduino ESP32 Nano** και σε οδηγό σέρβο κινητήρων **PCA9685**, υποστηρίζοντας την ταυτόχρονη διαχείριση των κινητήρων με ακρίβεια και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

Η τροφοδοσία υλοποιείται με χρήση τεσσάρων επαναφορτιζόμενων μπαταριών και δύο step-down μετατροπέων τάσης, επιτρέποντας τον διαχωρισμό των κυκλωμάτων ισχύος και ελέγχου για μεγαλύτερη αξιοπιστία και σταθερότητα. Η χρήση νήματος ψαρέματος ως στοιχείο μετάδοσης της κίνησης προσφέρει ελαφρότητα και οικονομία, θυσιάζοντας όμως εν μέρει την αντοχή και την ακαμψία της κατασκευής. Συνολικά, η

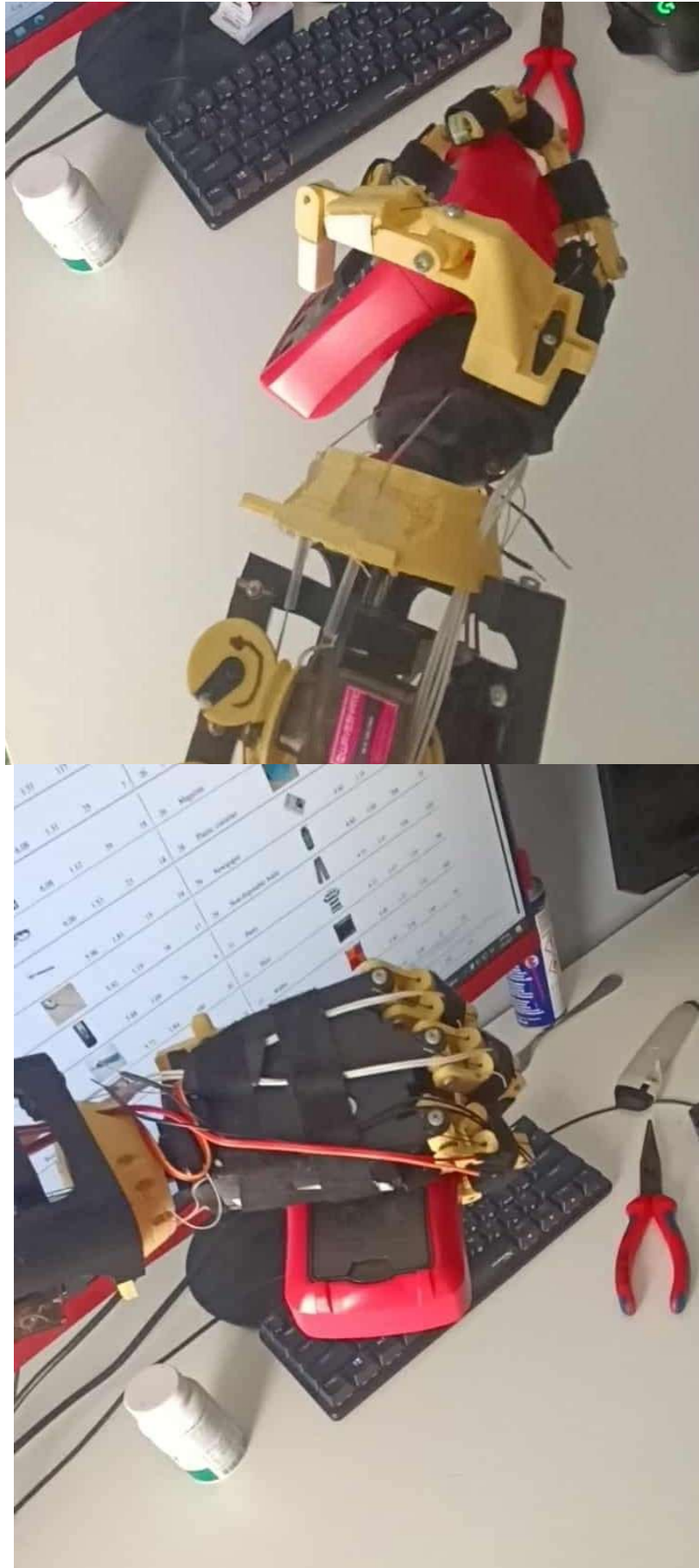
αρπάγη και ο βραχίονας αποτελούνται από **140 διακριτά εξαρτήματα**, προσφέρουν **17 βαθμούς ελευθερίας**, και χαρακτηρίζονται ως **υποενεργοποιημένοι** (underactuated), δηλαδή διαθέτουν περισσότερους βαθμούς ελευθερίας από τον αριθμό των ενεργοποιητών. Η συγκεκριμένη προσέγγιση αναδεικνύει την πολυπλοκότητα αλλά και τη δυνατότητα κατασκευής ικανοποιητικά λειτουργικών ρομποτικών αρπαγών με περιορισμένο κόστος και υψηλό βαθμό μηχανικής ευφυΐας [58].



Εικόνα 56. Κράτημα ενός αυγού [58]



Εικόνες 57 και 58. Αρπαγή ποτενσιόμετρον [58]

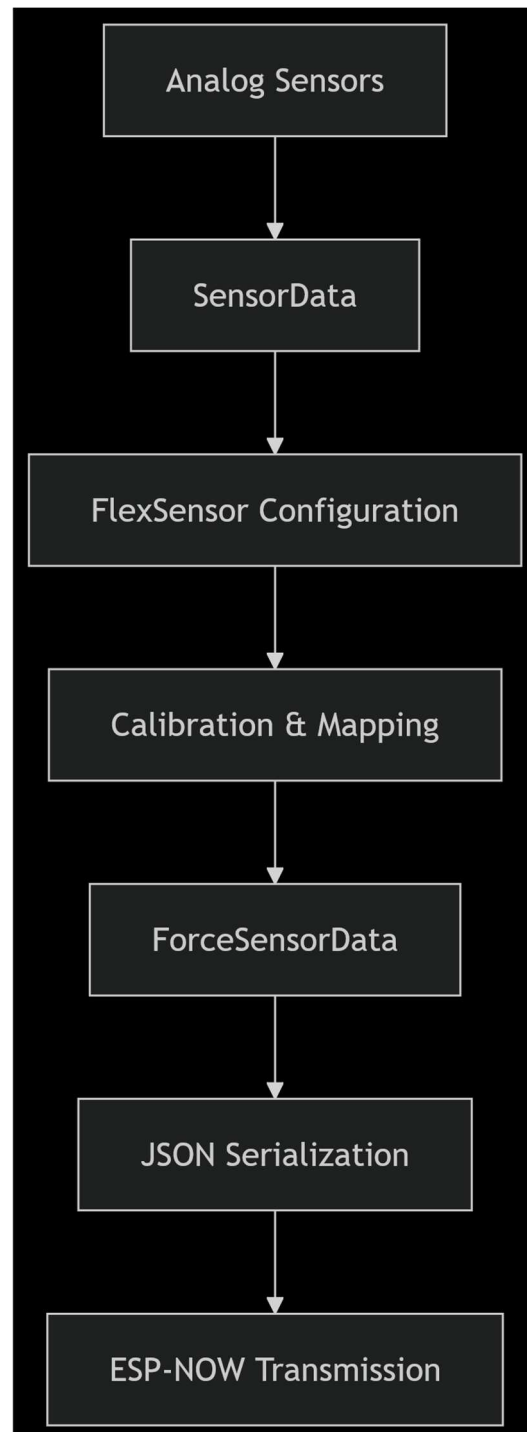


Εικόνες 59 και 60. Κράτημα ποτενσιόμετρον [58]

Κεφάλαιο 4: Προγραμματισμός και επικοινωνία συστήματος

Εισαγωγή

Ο παρακάτω κώδικας είναι γραμμένος σε C++ και αναπτύχθηκε με χρήση του Arduino IDE, αξιοποιώντας τις βιβλιοθήκες WiFi.h, ArduinoJson.h και esp_now.h για την υλοποίηση της αμφίδρομης δικτυακής επικοινωνίας.



4.1. Περιγραφή Κώδικα Απτικού Γαντιού

Ο παρών κώδικας υλοποιεί ένα σύστημα αμφίδρομης ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ μικροελεγκτών ESP32, σχεδιασμένο για εφαρμογές haptic feedback. Το σύστημα αξιοποιεί το πρωτόκολλο ESP-NOW για low-latency επικοινωνία, το οποίο εξασφαλίζει χρόνους απόκρισης κάτω των 200ms, απαραίτητους για εφαρμογές πραγματικού χρόνου, και την βιβλιοθήκη ArduinoJson για structured data exchange, επιτρέποντας την αποδοτική σειριοποίηση και αποσειριοποίηση μηνυμάτων JSON μέχρι 200 bytes. Η αρχιτεκτονική της λύσης βασίζεται σε ένα peer-to-peer μοντέλο επικοινωνίας χωρίς την ανάγκη δρομολογητή WiFi, με στατική ρύθμιση διευθύνσεων MAC για αξιόπιστη σύνδεση, και υλοποιεί μηχανισμούς error handling για αντιμετώπιση αποτυχιών αποστολής ή λήψης δεδομένων. Το σύστημα υποστηρίζει ταυτόχρονη ανάγνωση πολλαπλών αναλογικών αισθητήρων, προσαρμοστικό mapping των τιμών τους σε εύρη λειτουργίας (0-180°), και ενεργοποίηση δονητικών κινητήρων με βάση προκαθορισμένα thresholds, προσφέροντας μια ευέλικτη και κλιμακώσιμη πλατφόρμα για ανάπτυξη διαδραστικών συστημάτων haptic feedback.

4.2. Δηλώσεις & καθολικές μεταβλητές

```
1 #include <esp_now.h>
2 #include <WiFi.h>
3 #include <ArduinoJson.h>
```

- **ESP-NOW:** Για ασύρματη επικοινωνία μεταξύ ESP32
- **WiFi:** Για λειτουργία WiFi station
- **ArduinoJson:** Για διαχείριση δεδομένων JSON

4.3. Δομές Δεδομένων

```
8 typedef struct {
9     int analogValue;
10 } SensorData;
11
12 SensorData dataToSend;
13
14 // Flex sensor configuration
15 struct FlexSensor {
16     int pin;
17     int minValue;
18     int maxValue;
19     int vibrationPin;
20 };
21
22 struct ForceSensorData {
23     int forceValue;
24     int sensorIndex;
25 };
```

- **SensorData:** Βασική δομή για μεταφορά ακατέργαστων δεδομένων από τους αισθητήρες.
- **FlexSensor:** Ομαδοποίηση όλων των παραμέτρων ρύθμισης για κάθε αισθητήρα :
 - **pin:** Hardware mapping για αναλογική ανάγνωση
 - **min/maxValue:** Προκαθορισμένα εύρη βαθμονόμησης
 - **vibrationPin:** Αντίστοιχη έξοδος actuation
- **ForceSensorData:**
 - **forceValue:** Μετασχηματισμένη τιμή after mapping
 - **sensorIndex:** Αναγνωριστικό για sensor-specific processing

4.4. Ρύθμιση Αισθητήρων

```

27 FlexSensor flexSensors[4] = {
28     {A0, 2200, 2550, 2}, // flex1
29     {A1, 3200, 3450, 3}, // flex2
30     {A2, 3700, 3830, 4}, // flex3
31     {A3, 3130, 3450, 5} // flex4
32 };

```

Ο πίνακας flexSensors[4] ορίζει τη διαμόρφωση και τις παραμέτρους βαθμονόμησης και των τεσσάρων αισθητήρων κάμψης. Κάθε στοιχείο του πίνακα είναι μια δομή FlexSensor που περιέχει τις απαραίτητες πληροφορίες για τη λειτουργία του αντίστοιχου αισθητήρα.

- **pin:** Αναλογική είσοδος
- **min/maxValue:** Εύρος τιμών
- **vibrationPin:** Ψηφιακή έξοδος για δόνηση

4.5. Συνάρτηση Επεξεργασίας Δόνησης - vibration()

Η συνάρτηση vibration() υλοποιεί τον κύριο μηχανισμό απόκρισης του συστήματος με βάση τα εισερχόμενα δεδομένα δύναμης.

```

38 void vibration(const ForceSensorData &sensorData) {
39     int sensorIndex = sensorData.sensorIndex;
40     if (sensorIndex < 0 || sensorIndex >= 4) return;
41
42     Serial.print("Sensor ");
43     Serial.print(sensorIndex + 1);
44     Serial.print(": ");
45     Serial.println(sensorData.forceValue);
46
47     // Different thresholds for different sensors
48     int threshold = (sensorIndex == 2) ? 500 : 1000; // sensor 3 (index 2) has lower threshold
49
50     if (sensorData.forceValue > threshold) {
51         mediumIntensityVibration(flexSensors[sensorIndex].vibrationPin);
52     }
53 }

```

4.6. Συνάρτηση Δόνησης - `mediumIntensityVibration()`

Η συνάρτηση `mediumIntensityVibration()` υλοποιεί τον μηχανισμό δόνησης μέσης έντασης για τους δονητικούς κινητήρες.

```

55 void mediumIntensityVibration(int pin) {
56     if (millis() - prevmil > mil) {
57         digitalWrite(pin, HIGH);
58         delay(15);
59         digitalWrite(pin, LOW);
60         delay(20);
61         prevmil = millis();
62     }
63 }

```

- **int pin:** Ο ακροδέκτης εξόδου για τον δονητικό κινητήρα
- **millis():** Επιστρέφει τον χρόνο λειτουργίας σε milliseconds
- **prevmil:** Καταχωρητής προηγούμενου χρόνου ενεργοποίησης
- **mil:** Ελάχιστο διάστημα μεταξύ ενεργοποιήσεων (10ms)
- **HIGH:** Ενεργοποίηση δονητικού (3.3V)
- **delay(15):** Διάρκεια παλμού 15ms
- **LOW:** Απενεργοποίηση δονητικού

4.7. Λήψη δεδομένων - `onDataRecv()`

Η συνάρτηση `onDataRecv` λειτουργεί ως callback για λήψη δεδομένων μέσω ESP-NOW. Όταν φτάνουν δεδομένα, τα αποσειριοποιεί από JSON μορφή χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη `ArduinoJson`. Εξάγει τις τιμές "force" και "sensor" από το JSON αντικείμενο και τις μεταφέρει σε δομή `ForceSensorData`. Στη συνέχεια, καλεί τη συνάρτηση `vibration` για να ενεργοποιήσει τον αντίστοιχο δονητικό κινητήρα βάσει των λαμβανόμενων τιμών. Η διαδικασία περιλαμβάνει έλεγχο σφαλμάτων για αποτυχίες ανάλυσης JSON και εκτύπωση σφαλμάτων through the serial interface για debugging.

```
65 void onDataRecv(const uint8_t *mac, const uint8_t *incomingData, int len) {
66     // Parse JSON data
67     StaticJsonDocument<200> doc;
68     DeserializationError error = deserializeJson(doc, (const char*)incomingData);
69
70     if (error) {
71         Serial.print("JSON parse error: ");
72         Serial.println(error.c_str());
73         return;
74     }
75
76     // Extract data into ForceSensorData struct
77     ForceSensorData sensorData;
78     sensorData.forceValue = doc["force"] | 0;
79     sensorData.sensorIndex = doc["sensor"] | 0;
80
81     Serial.print("Received JSON - Sensor: ");
82     Serial.print(sensorData.sensorIndex + 1);
83     Serial.print(", Force: ");
84     Serial.println(sensorData.forceValue);
85
86     // Process vibration with structured data
87     vibration(sensorData);
88 }
```

- **const uint8_t *mac:** Διεύθυνση MAC της συσκευής αποστολέα (6 bytes)
- **const uint8_t *incomingData:** Δεδομένα που ελήφθησαν (buffer)
- **int len:** Μήκος των δεδομένων σε bytes
- **JSON Field Extraction:** Ανάκτηση τιμών από τα πεδία "force" και "sensor"
- **Default Values:** Χρήση του τελεστή | για default τιμή 0 σε περίπτωση λάθους

4.8. Επεξεργασία Αισθητήρων Κάμψης - processFlexSensor()

```

90 void processFlexSensor(int index) {
91     FlexSensor &sensor = flexSensors[index];
92
93     int flexPos = analogRead(sensor.pin);
94     int servoPos = map(flexPos, sensor.minValue, sensor.maxValue, 0, 180);
95     servoPos = constrain(servoPos, 0, 180);
96
97     // Send structured data as JSON
98     StaticJsonDocument<100> doc;
99     doc["sensor"] = index;
100    doc["value"] = servoPos;
101
102    String jsonString;
103    serializeJson(doc, jsonString);
104
105    esp_now_send(receiverMAC, (uint8_t *)jsonString.c_str(), jsonString.length() + 1);
106
107    Serial.print("Sent JSON from sensor ");
108    Serial.print(index + 1);
109    Serial.print(": ");
110    Serial.println(jsonString);
111
112    delay(10);
113 }

```

Διαβάζει την τιμή του αισθητήρα, την μετατρέπει σε γωνία (0-180°) και την στέλνει ως JSON μήνυμα via ESP-NOW. Χρησιμοποιεί map() και constrain() για βαθμονόμηση και StaticJsonDocument για σειριοποίηση.

4.9. Συνάρτηση setup()

Αρχικοποιεί τη σειριακή communication, το WiFi ως STA, και το ESP-NOW. Προσθέτει τον receiver ως peer και ορίζει τη callback onDataRecv για λήψη δεδομένων. Ρυθμίζει τους ακροδέκτες των αισθητήρων ως εισόδους και των δονητικών ως εξόδους.

```
115 void setup() {
116     Serial.begin(115200);
117     WiFi.mode(WIFI_STA);
118     WiFi.disconnect();
119
120     if (esp_now_init() != ESP_OK) {
121         Serial.println("ESP-NOW init failed");
122         return;
123     }
124
125     esp_now_peer_info_t peerInfo = {};
126     memcpy(peerInfo.peer_addr, receiverMAC, 6);
127     peerInfo.channel = 0;
128     peerInfo.encrypt = false;
129
130     if (!esp_now_add_peer(&peerInfo)) {
131         Serial.println("Peer added");
132         esp_now_register_recv_cb(onDataRecv);
133     }
134
135     // Initialize flex sensor pins
136     for (int i = 0; i < 4; i++) {
137         pinMode(flexSensors[i].pin, INPUT);
138     }
139
140     // Initialize vibration pins
141     for (int i = 0; i < 4; i++) {
142         pinMode(flexSensors[i].vibrationPin, OUTPUT);
143     }
144 }
```

4.10. Συνάρτηση loop()

Σε κάθε επανάληψη του βρόχου, η συνάρτηση διατρέχει και τους **4 αισθητήρες κάμψης** ($i = 0$ έως 3) και για κάθε έναν καλεί τη συνάρτηση `processFlexSensor(i)`. Αυτή διαβάζει την τρέχουσα τιμή του αισθητήρα, την επεξεργάζεται, και στέλνει τα δεδομένα (σε μορφή JSON) μέσω ESP-NOW προς τη συσκευή receiver.

```
146 void loop() {
147     for (int i = 0; i < 4; i++) {
148         processFlexSensor(i);
149     }
150 }
```

Ο βρόχος εκτελείται συνεχώς, επιτρέποντας **πραγματικού χρόνου ανάγνωση και αποστολή** δεδομένων από όλους τους αισθητήρες.

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα και Συγκρίσεις

5.1. Αποτελέσματα

Για τον βαθμό ευχαρίστησης των χρηστών κατά τη χρήση του απτικού γαντιού που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, διαμορφώθηκε ένα σύντομο και περιεκτικό ερωτηματολόγιο, το οποίο και απαντήθηκε επιτόπου από τους χρήστες. Ο αριθμός των χρηστών ανέρχεται σε 11 ενήλικα άτομα.

Πίνακας 5. Αποτελέσματα ερωτηματολογίου για τη ευχαρίστηση των χρηστών κατά τη χρήση του απτικού γαντιού.

Ερώτηση	ΜΟ	SD
Ένταση δόνησης	3.5	1.03
Ρεαλιστικότητα	3.1	1.04
Χρονική απόκριση	4.0	0.98
Σταθερότητα	3.6	1.14
Κατανόηση αλληλεπίδρασης	3.6	1.12
Άνεση	4.2	0.75
Προτίμηση έντασης	3.8	0.75
Σιγουριά κινήσεων	3.6	1.14
Συνολική ικανοποίηση	4.4	0.89
Προτίμηση με/χωρίς δόνηση	4.6	0.49

Αναφορικά με την ένταση και την ρεαλιστικότητα οι περισσότεροι χρήστες βρήκαν την ένταση της δόνησης μέτρια προς ικανοποιητική (βαθμολογίες 3–4), ενώ τρεις ανέφεραν ότι ήταν μέτρια ή ανεπαρκής. Αυτό δείχνει ότι η δόνηση γίνεται αισθητή και χρηστική, αλλά δεν ανταποκρίνεται σε όλες τις προσδοκίες, ιδιαίτερα όταν οι χρήστες αναμένουν μεγαλύτερη δύναμη ή πειστικότητα. Σχετικά με τη ρεαλιστικότητα, οι απαντήσεις ήταν πιο διχασμένες: νεότεροι χρήστες ή όσοι έχουν εμπειρία με VR θεώρησαν την αίσθηση αρκετά φυσική, ενώ πιο έμπειροι επαγγελματίες τη βρήκαν λιγότερο πειστική.

Οι περισσότεροι χρήστες (3–5) δήλωσαν ότι η δόνηση βοήθησε να κατανοήσουν καλύτερα την αλληλεπίδραση με το ρομπότ. Επίσης, σχεδόν όλοι συμφώνησαν ότι η δόνηση ήταν άνετη (βαθμολογίες 4–5), με μόνο έναν χρήστη να δηλώνει μικρή κόπωση σε πιθανή μακρόχρονη χρήση. Η τρέχουσα ένταση (3) είναι ικανοποιητική για το

μεγαλύτερο πλήθος των συμμετεχόντων, ενώ δύο θα ήθελαν πιο δυνατή δόνηση (4–5). Σε ότι αφορά την αίσθηση σιγουριάς η δόνηση συνέβαλε σημαντικά στο να νιώθουν οι χρήστες πιο σίγουροι (βαθμολογίες 3–5). Εν συνεχεία, η συνολική ικανοποίηση για δόνηση κρίθηκε θετική και βασικό πλεονέκτημα του γαντιού, ακόμα κι αν δεν είναι πλήρως ρεαλιστική.

Τέλος, Όλοι οι χρήστες προτίμησαν τη χρήση με δόνηση (βαθμολογίες 4–5), υποδεικνύοντας ότι η δόνηση, παρά τα όποια όρια στην ένταση ή τη ρεαλιστικότητα, θεωρείται απαραίτητη για μια πειστική εμπειρία απτικής διεπαφής.

5.2. Σύγκριση υλοποίησης απτικού γαντιού

Συγκριτική Ανάλυση της τρέχουσας υλοποίησης απτικού γαντιού με το σύστημα απτικού γαντιού, *soft robotic glove*, που υλοποίησε η ομάδα των Li et al., (2023) και επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη ενός γαντιού με κινησιοαισθητική ανάδραση (*kinesthetic feedback*) μέσω πνευματικών μυών McKibben. Και τα δύο συστήματα επιχειρούν να βελτιώσουν την εμπειρία αλληλεπίδρασης μέσω απτικής ανάδρασης, ωστόσο διαφοροποιούνται σημαντικά ως προς τον χρόνο υλοποίησης, τις τεχνικές προκλήσεις και τον βαθμό ικανοποίησης των χρηστών.

Σε ότι αφορά τον χρόνο υλοποίησης, για την εργασία των Li et al., (2023), η διαδικασία απαίτησε πολύπλοκη μηχανική σχεδίαση, την κατασκευή καλουπιών με 3D printing, τη χύτευση σε σιλικόνη, καθώς και την ανάπτυξη μιας custom fluidic control board για τον έλεγχο της πίεσης. Το αποτέλεσμα ήταν μια υλοποίηση υψηλής τεχνικής πολυπλοκότητας, που χρειάστηκε μεγάλο χρόνο ανάπτυξης, όχι μόνο για την κατασκευή του γαντιού αλλά και για την παραμετροποίηση του συστήματος ελέγχου. Ο συνολικός χρόνος υλοποίησης εκτιμάται σε αρκετούς μήνες, δεδομένης της ανάγκης πειραματισμού με διαφορετικά μεγέθη και διαμέτρους μυών, καθώς και της ενσωμάτωσης στο περιβάλλον VR.

Αντίθετα, η υλοποίηση απτικού γαντιού της παρούσας εργασίας εστιάζει σε μέτριας ακρίβειας απτική ανάδραση με δονητικά μοτέρ. Η χρήση υλικού neoprene, flex sensors και ενός Arduino Nano ESP32 με WiFi υποστήριξη επιτρέπει πολύ πιο γρήγορη υλοποίηση. Το κύριο μέρος του χρόνου αφιερώθηκε στη φάση breadboard testing, στη σύνδεση αισθητήρων και μοτέρ δόνησης, και στην ενσωμάτωση των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων στο γάντι. Η υλοποίηση, επομένως, ολοκληρώθηκε σε σαφώς συντομότερο χρονικό διάστημα σε σχέση με το έργο των Li et al., (2023), με στόχο την αποτελεσματική δοκιμή και βελτιστοποίηση του εκπαιδευτικού πρωτοτύπου.

Τα σφάλματα και οι προκλήσεις του συστήματος δόνησης για το γάντι των Li et al., (2023), σχετίζονταν με τη χρονική καθυστέρηση που εισήγαγε η fluidic control board, καθώς και με τον όγκο του συστήματος που έπρεπε να μετατραπεί σε φορητή μορφή. Επίσης, η πολυπλοκότητα των «μυών» που χρησιμοποιήθηκαν, απαιτούσε ιδιαίτερη προσοχή στη στεγανότητα και στη συντήρηση, ώστε να αποφεύγονται διαρροές αέρα.

Στην περίπτωση της υλοποίησης απτικού γαντιού της παρούσας εργασίας, τα σφάλματα και οι προκλήσεις εστιάζονται σε πιο ηλεκτρονικό-προγραμματιστικό επίπεδο. Καταγράφηκαν προβλήματα δόνησης (jittering) των σερβοκινητήρων του ρομποτικού βραχίονα λόγω θορύβου στις μετρήσεις των flex sensors. Αυτό αντιμετωπίστηκε με την ενσωμάτωση φίλτρων εκθετικής κινητής μέσης τιμής (EMA). Σχετικά με το σύστημα δόνησης, πραγματοποιήθηκε vibration test όπου οι δονητικοί ενεργοποιητές απέδωσαν 0.8G (AVG) με εύρος 10–55 Hz, επαρκές για την παροχή αισθητής ανάδρασης χωρίς υπερβολικό ερεθισμό. Επιπλέον, το down-lead's loose strength των 9.8N επιβεβαίωσε την μηχανική αξιοπιστία των μοτέρ δόνησης. Ωστόσο, οι δονήσεις δεν εκφράζονται σε Newton, γεγονός που περιορίζει τη δυνατότητα σύγκρισης με kinesthetic εφαρμογές.

Η αξιολόγηση των Li et al., (2023), έγινε μέσω πιλοτικής μελέτης σε 15 χρήστες, όπου όλοι συμφώνησαν ότι το γάντι αύξησε την αίσθηση εμπύθισης σε περιβάλλον VR, ενώ οι περισσότεροι θεώρησαν ότι προσομοιώνει πειστικά την αίσθηση ενός πλήκτρου. Οι χρήστες χαρακτήρισαν την εμπειρία «μαγευτική» και «πρωτόγνωρη», δείχνοντας υψηλό βαθμό ικανοποίησης. Ωστόσο, κάποιοι εξέφρασαν δυσαρέσκεια για την καθυστέρηση απόκρισης και τον χρόνο εφαρμογής του γαντιού, ενώ πρότειναν περαιτέρω μείωση του μεγέθους του συστήματος. Οι χρήστες που ήρθαν σε επαφή με το γάντι των Li et al., (2023), ανέφεραν πως το γάντι αποδίδει πειστική αίσθηση δύναμης, αλλά η εγκατάσταση και η χρήση ήταν πιο απαιτητικές από ένα απλό δονητικό γάντι.

Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για τα επίπεδα ευχαρίστησης δόνησης κατά τη χρήση του απτικού γαντιού, προκύπτει ότι το απτικό γάντι με δονητικούς ενεργοποιητές παρέχει μια θετική εμπειρία χρήσης, με υψηλή συνολική ικανοποίηση και προτίμηση έναντι γαντιών χωρίς ανάδραση. Οι βασικές αδυναμίες σχετίζονται με την ένταση (μερικοί τη βρίσκουν αδύναμη) και με μικρές καθυστερήσεις/αστάθειες. Επιπρόσθετα η ανάλυση των αποτελεσμάτων αναδεικνύει ότι η επιλογή neoprene και μικρών μοτέρ δόνησης είναι σωστή εργονομικά, αν και ίσως απαιτείται καλύτερη

κατανομή για να μειωθεί η κόπωση. Έπειτα, από τις απαντήσεις προκύπτει ανάγκη για δυναμική ρύθμιση έντασης, ώστε να προσαρμόζεται στο προφίλ και την ευαισθησία του χρήστη.

Κεφάλαιο 6: Περιορισμοί και Προοπτικές για το μέλλον

6.1. Περιορισμοί

Η υλοποίηση του απτικού γαντιού που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, βασίστηκε στην επιλογή υλικών με χαμηλό κόστος. Από τη μία πλευρά, αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του συνολικού προϋπολογισμού, αλλά από την άλλη έχει ως αντίκτυπο τη διακύβευση της μηχανικής αντοχής και της αξιοπιστίας του τελικού προϊόντος. Οι flex sensors, τα καλώδια και τα συστήματα στερέωσης, παρότι λειτουργικά, είναι πιθανό να εμφανίσουν φθορά ή μείωση της απόδοσης με την πάροδο του χρόνου, ιδιαίτερα σε συνθήκες συνεχούς ή έντονης χρήσης. Η περιορισμένη ποιότητα των υλικών αυτών ενδέχεται να επηρεάσει τη συνέπεια και την ακρίβεια των μετρήσεων.

Η κατασκευή του γαντιού πραγματοποιήθηκε εξ ολοκλήρου με χειροποίητη συναρμολόγηση, χωρίς τη χρήση βιομηχανικών εργαλείων ή ειδικής εργονομικής μελέτης. Αυτό συνεπάγεται ότι η ακρίβεια στην τοποθέτηση των εξαρτημάτων είναι περιορισμένη και η κατασκευή ευάλωτη σε μηχανικές αστοχίες. Κατά τη χρήση, οι αισθητήρες μπορεί να χαλαρώσουν ή να μετακινηθούν, ενώ η απουσία προστασίας στις συνδέσεις αυξάνει τον κίνδυνο βλάβης και επηρεάζει την αξιοπιστία των μετρήσεων.

Η παρούσα διάταξη διαθέτει εκτεθειμένα ηλεκτρονικά μέρη, όπως ο μικροελεγκτής, οι αισθητήρες και η καλωδίωση, τα οποία είναι ευάλωτα σε περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως υγρασία, σκόνη και μηχανική καταπόνηση. Η απουσία προστατευτικού περιβλήματος περιορίζει τη χρήση του γαντιού αποκλειστικά σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα, μειώνοντας την πρακτική του εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες εργασίας ή εξωτερικούς χώρους.

Επιπλέον, η απουσία σχεδίασης και κατασκευής ειδικής πλακέτας PCB οδήγησε σε ένα κύκλωμα βασισμένο σε jumper wires και breadboard, με αυξημένο όγκο καλωδίωσης και χαμηλή ηλεκτρονική σταθερότητα. Η λύση αυτή, παρότι κατάλληλη για προτυποποίηση, μειώνει τη φορητότητα και τη μακροχρόνια αξιοπιστία του συστήματος, ενώ περιορίζει τις δυνατότητες επέκτασης και αναβάθμισης. Παράλληλα, ο περιορισμένος αριθμός αισθητήρων και η έλλειψη εργονομικού σχεδιασμού μειώνουν τη λειτουργικότητα και την άνεση του χρήστη, καθιστώντας απαραίτητη μια μελλοντική βελτίωση τόσο σε τεχνικό όσο και σε σχεδιαστικό επίπεδο.

6.2. Προοπτικές για το μέλλον

Το σύστημα απτικού γαντιού για τηλεχειρισμό ρομποτικού βραχίονα, παρότι αναπτύχθηκε με κύριο στόχο την οικονομική και εκπαιδευτική χρήση, παρουσιάζει σημαντικές δυνατότητες για μελλοντική εξέλιξη. Ένα βασικό πεδίο βελτίωσης είναι η προσθήκη διπλής κατεύθυνσης επικοινωνίας. Μέσω αισθητήρων θέσης στον ρομποτικό βραχίονα, θα είναι δυνατή η αποστολή δεδομένων πίσω στο γάντι, παρέχοντας στον χρήστη αίσθηση πραγματικής θέσης και αντίστασης. Αυτό θα βελτιώσει την ακρίβεια και θα κάνει την αλληλεπίδραση πιο φυσική και ρεαλιστική.

Η ενσωμάτωση πρόσθετων αισθητήρων στο γάντι, όπως IMU για την ανίχνευση κίνησης και προσανατολισμού του καρπού ή capacitive αισθητήρων αφής στα δάχτυλα, θα επιτρέψει την αναγνώριση πιο σύνθετων χειρονομιών. Παράλληλα, η μετάβαση από Wi-Fi σε ασύρματα πρωτόκολλα χαμηλής κατανάλωσης, όπως Bluetooth Low Energy ή ESP-NOW, θα αυξήσει την αυτονομία της συσκευής και θα διευκολύνει τη χρήση της σε φορητές εφαρμογές.

Η αξιοποίηση τεχνικών μηχανικής μάθησης μπορεί να προσδώσει στο σύστημα ευφυΐα και προσαρμοστικότητα. Μέσω εκπαίδευσης μοντέλων που αναγνωρίζουν χειρονομίες και προσαρμόζουν τη συμπεριφορά του ρομπότ στον εκάστοτε χρήστη, η λειτουργία θα γίνει πιο φυσική και λιγότερο εξαρτημένη από χειροκίνητες ρυθμίσεις. Επιπλέον, η μηχανική και εργονομική βελτιστοποίηση, όπως η χρήση εύκαμπτων αγωγίμων υφασμάτων και η βελτίωση της δομής για άνετη και μακροχρόνια χρήση, θα καταστήσουν το γάντι πιο φιλικό σε διαφορετικές κατηγορίες χρηστών.

Τέλος, η ανάπτυξη μίας γραφικής διεπαφής χρήστη (GUI) ή web εφαρμογής θα επιτρέψει την παρακολούθηση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, τη ρύθμιση παραμέτρων και την καταγραφή κινήσεων. Η δυνατότητα αποθήκευσης και αναπαραγωγής χειρονομιών θα ανοίξει τον δρόμο για εκπαιδευτικές εφαρμογές και αυτοματοποιημένες εργασίες, αυξάνοντας τη χρηστικότητα του συστήματος σε ευρύτερο φάσμα σεναρίων.

6.3. Συνεισφορά στην επιστημονική και εκπαιδευτική κοινότητα

Η παρούσα εργασία προσφέρει μία σημαντική συμβολή στην επιστημονική και εκπαιδευτική κοινότητα, παρουσιάζοντας ένα πρακτικό, χαμηλού κόστους και ανοιχτού σχεδιασμού απτικό γάντι για ασύρματη τηλεκαθοδήγηση ρομποτικού βραχίονα. Σε μια περίοδο όπου η φυσική αλληλεπίδραση με ρομποτικά συστήματα βρίσκεται στο επίκεντρο της έρευνας, η υλοποίηση αυτή αποδεικνύει ότι η καινοτομία και η αποτελεσματικότητα μπορούν να επιτευχθούν ακόμη και με περιορισμένους πόρους. Το σύστημα καθιστά τη ρομποτική προσιτή σε φοιτητές, εκπαιδευτικά ιδρύματα και ερασιτέχνες, παρέχοντας τη δυνατότητα εκμάθησης και πειραματισμού με βασικές έννοιες όπως η αισθητήρια αντίληψη, η ανατροφοδότηση και ο έλεγχος συστημάτων σε πραγματικό χρόνο.

Παράλληλα, το έργο δημιουργεί ένα ευέλικτο πλαίσιο για μελλοντική έρευνα και βελτιώσεις, προσφέροντας τη δυνατότητα ενσωμάτωσης σύγχρονων τεχνικών, όπως η μηχανική μάθηση, η έξυπνη διαχείριση απτικών σημάτων και η εργονομική βελτιστοποίηση. Με τον τρόπο αυτό, η συμβολή της εργασίας αποκτά διπλή αξία: πρακτική, καθώς δίνει λύσεις που μπορούν να εφαρμοστούν σε πραγματικά σενάρια, και παιδαγωγική, καθώς προωθεί τη διάχυση της τεχνολογίας και ενθαρρύνει τη δημιουργικότητα και την καινοτομία σε προπτυχιακό και ερευνητικό επίπεδο. Το σύστημα λειτουργεί ως γέφυρα μεταξύ θεωρητικής γνώσης και πρακτικής εφαρμογής, ενισχύοντας την κατανόηση και τη δεξιότητα χειρισμού ρομποτικών συστημάτων.

Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα του ερωτηματολογίου καταδεικνύουν υψηλό επίπεδο ικανοποίησης από τη χρήση του απτικού γαντιού με δονητικούς ενεργοποιητές. Ο συνολικός δείκτης ικανοποίησης ($MO = 4,4$) και η προτίμηση της εκδοχής με δόνηση έναντι της εκδοχής χωρίς δόνηση ($MO = 4,6$) επιβεβαιώνουν ότι η ύπαρξη απτικής ανάδρασης συνιστά καθοριστικό παράγοντα για την εμπειρία αλληλεπίδρασης. Η σχεδόν ομόφωνη θετική αξιολόγηση στη συγκεκριμένη διάσταση αναδεικνύει τη σημασία της απτικής πληροφορίας για τη βελτίωση της αίσθησης εμπύθισης και της λειτουργικότητας του γαντιού.

Ειδικότερα, η παράμετρος της άνεσης ($MO = 4,2$, $SD = 0,75$) συγκέντρωσε ιδιαίτερα θετικές αξιολογήσεις, γεγονός που υποδηλώνει ότι η επιλογή υλικών (neoprene) και ο σχεδιασμός με μικρού μεγέθους δονητικούς ενεργοποιητές ευνοούν την εργονομία και την παρατεταμένη χρήση χωρίς σημαντική κόπωση. Αντίστοιχα, η χρονική απόκριση ($MO = 4,0$, $SD = 0,98$) έλαβε υψηλή βαθμολογία με μικρή διακύμανση, στοιχείο που επιβεβαιώνει τον ικανοποιητικό συγχρονισμό της δόνησης με τις ενέργειες του χρήστη, μειώνοντας την πιθανότητα γνωστικής ασυμφωνίας κατά την αλληλεπίδραση.

Η κατανόηση της αλληλεπίδρασης ($MO = 3,6$, $SD = 1,12$) και η σιγουριά στις κινήσεις ($MO = 3,6$, $SD = 1,14$) ενισχύουν την άποψη ότι η δόνηση συνεισφέρει ουσιαστικά στην αντιληπτική πληροφόρηση, παρέχοντας στον χρήστη αίσθημα αυξημένου ελέγχου. Παρά ταύτα, οι σχετικά υψηλές τιμές τυπικής απόκλισης υποδεικνύουν διαφοροποίηση στις εμπειρίες των συμμετεχόντων, πιθανώς λόγω ηλικιακών διαφορών ή βαθμού εξοικείωσης με τεχνολογίες VR/απτικής διεπαφής. Αντιθέτως, δύο παράμετροι εμφανίζονται λιγότερο ικανοποιητικές. Η ρεαλιστικότητα ($MO = 3,1$, $SD = 1,04$) αξιολογήθηκε ως μέτρια, γεγονός που αποκαλύπτει ότι, αν και η δόνηση ήταν σαφώς αισθητή, δεν προσομοίαζε πλήρως πραγματικές απτικές εμπειρίες. Η ένταση της δόνησης ($MO = 3,5$, $SD = 1,03$) καταγράφηκε επίσης σε μέτρια επίπεδα, με ορισμένους χρήστες να επιθυμούν ισχυρότερη ανάδραση. Οι παρατηρήσεις αυτές καταδεικνύουν την ανάγκη για μηχανισμούς δυναμικής ρύθμισης έντασης, ώστε να προσαρμόζεται η ανάδραση στις ατομικές προτιμήσεις και την ευαισθησία κάθε χρήστη. Συνολικά, τα ευρήματα υποδηλώνουν ότι το προτεινόμενο απτικό γάντι επιτυγχάνει τον βασικό του σκοπό, προσφέροντας θετική εμπειρία χρήσης και σαφή προτίμηση έναντι της απουσίας απτικής ανάδρασης. Οι ισχυρές επιδόσεις στις

παραμέτρους της άνεσης, της χρονικής απόκρισης και της συνολικής ικανοποίησης αποδεικνύουν ότι η υλοποίηση είναι τεχνικά και εργονομικά επαρκής. Ωστόσο, οι μέτριες βαθμολογίες σε ένταση και ρεαλιστικότητα υπογραμμίζουν την ανάγκη περαιτέρω βελτίωσης, με έμφαση στην ανάπτυξη πιο σύνθετων προτύπων δόνησης και προσαρμοστικών μηχανισμών ελέγχου. Οι βελτιώσεις αυτές δύνανται να αυξήσουν τον βαθμό ρεαλισμού και να καταστήσουν το σύστημα πιο ανταγωνιστικό σε σχέση με προχωρημένες υλοποιήσεις kinesthetic feedback.

Βιβλιογραφία

[1]	J. K. S. a. M. A. Srinivasan, «Phantom-Based Haptic Interaction with Virtual Objects,» <i>IEEE Computer Graphics and Applications</i> , τόμ. 17, αρ. 5, pp. 6-10, 1997.
[2]	R. Stone, «Haptic Feedback: A Brief History from Telepresence to Virtual Reality,» <i>ecture Notes in Computer Science</i> , 2000.
[3]	G. C. Burdea, «Haptic Feedback for Virtual Reality,» Laval, France, 1999.
[4]	T. B. Sheridan, «Human and machine haptics in historical perspective,» <i>In Workshop on Human and Machine Haptics</i> , p. 2, 1997.
[5]	A. A. Valdivia, B. A. Christie, D. P. Losey και L. H. Blumenschein, «A Modular Haptic Display with Reconfigurable Signals for Personalized Information Transfer,» <i>arXiv preprint arXiv:2506.05648.</i> , 2025.
[6]	I. M. D. & S. A. Shazhaev, «A review of haptic technology applications in healthcare,» <i>Open Journal of Applied Sciences</i> , τόμ. 13, αρ. 12, pp. 163-174, 2023.
[7]	M. C. J. H. G. C. L. C. C. S. E. L. Y. W. X. J. X. G. W. H. Li, «Attention enhancement for exoskeleton-assisted hand rehabilitation using fingertip haptic stimulation,» <i>Frontiers in Robotics and AI</i> , τόμ. 8, 2021.
[8]	S. Park, Y. Park και J. Bae, «Performance evaluation of a tactile and kinesthetic finger feedback system for teleoperation,» <i>Mechatronics</i> , τόμ. 87, 2022.
[9]	C. P. a. D. Prattichizzo, «Cutaneous–Tactile Haptic Feedback in Robotic Teleoperation: Motivation, Survey, and Perspectives,» <i>IEEE Transactions on Robotics</i> , τόμ. 40, 2024.
[10]	Q. d. F. V. P. L. B. M. R. W. M. G. M. d. O. T. E. A. & P. E. M. Zhu, «Teleoperated grasping using a robotic hand and a haptic-feedback data glove,» σε <i>In 2020 IEEE International Systems Conference (SysCon)</i> , 2020.
[11]	M. N. H. T. Y. & Y. Y. Takahashi, «Effective haptic feedback type for robot-mediated material discrimination depending on target properties,» <i>Frontiers in Virtual Reality</i> , τόμ. 4, 2023.
[12]	J. Park, B. Son, I. Han και W. Lee, «Effect of Cutaneous Feedback on the Perception of Virtual Object Weight during Manipulation,» <i>Scientific Reports</i> , τόμ. 10, 2020.
[13]	N. Afzal, B. Hasanen, L. Seneviratne, O. Khatib και I. Hussain, «Friction-Scaled Vibrotactile Feedback for Real-Time Slip Detection in Manipulation using Robotic Sixth Finger,» <i>arXiv preprint arXiv:2503.15447.</i> , 2025.
[14]	S. I. Y. H. P. & T. Y. Ishikawa, «Robot Position Control Using Force Information for Cooperative Work in Remote Robot Systems with Force Feedback,» <i>International Journal of Communications, Network and System Sciences</i> , τόμ. 14, αρ. 1, pp. 1-13, 2021.
[15]	A. D. M. C. C. & D. P. G. Zangrandi, «Neurophysiology of slip sensation and grip reaction: insights for hand prosthesis control of slippage,» <i>Journal of neurophysiology</i> , τόμ. 126, αρ. 2, pp. 477-492, 2021.
[16]	G. S. K. F. X. N. B. K. G. K. Balamurugan, «Human-machine interaction in mechanical systems through sensor enabled wearable augmented reality interfaces,» <i>Measurement: Sensors</i> , τόμ. 39, 2025.
[17]	F. Li , J. Chen, G. Ye , Siwei, S. Dong, Z. Gao και Y. Zhou, «Soft Robotic Glove with Sensing and Force Feedback for Rehabilitation in Virtual Reality,» <i>Biomimetics</i> , τόμ. 8, αρ. 83, 2023.
[18]	K. O.-M. J. & F. F. Pacheco-Barrios, «Haptic Technology: Exploring Its Underexplored Clinical Applications—A Systematic Review,» <i>Biomedicines</i> , τόμ. 12, αρ. 12, p. 2802, 2024.

[19]	A. R. J. M. A. & D. R. Al-Ali, «Microcontroller-operated anthropomorphic manipulator with haptic feedback,» <i>Robotics and Computer-Integrated Manufacturing</i> , τόμ. 23, αρ. 1, pp. 63-70, 2007.
[20]	J. K. K. Koehn, «urgeons and non-surgeons prefer haptic feedback of instrument vibrations during robotic surgery,» <i>Surg Endosc</i> , τόμ. 29, p. 2970–2983, 2015.
[21]	M. W. D. C. R. K. N. B. T. J. D. J. F. & G. K. Salkini, «The role of haptic feedback in laparoscopic training using the LapMentor II,» <i>Journal of Endourology</i> , τόμ. 24, αρ. 1, pp. 99-102, 2010.
[22]	E. D. H. H. M. D. K. R. W. N. N. & K. K. J. Gomez, «Simulation training with haptic feedback of instrument vibrations reduces resident workload during live robot-assisted sleeve gastrectomy,» <i>Surgical Endoscopy</i> , τόμ. 39, αρ. 3, pp. 1523-1535, 2025.
[23]	A. P. O. E. C. S. O. & P. P. Gani, «Impact of haptic feedback on surgical training outcomes: a randomised controlled trial of haptic versus non-haptic immersive virtual reality training,» <i>Annals of Medicine and Surgery</i> , τόμ. 83, 2022.
[24]	Z. & Q. C. Zhang, «Wearable teleoperation controller with 2-DoF robotic arm and haptic feedback for enhanced interaction in virtual reality,» <i>Frontiers in neurorobotics</i> , τόμ. 17, 2023.
[25]	O. K. D. S. & N. S. N. F. Ajayi, «A review of haptic technologies for hardware-in-the-loop development,» <i>Sensors and Actuators Reports</i> , 2025.
[26]	M. B. J. T. F. A. K. M. Kuhail, «Exploring the Role of Haptic Technology in Healthcare,» <i>Advances, Applications and the Future of Haptic Technology</i> , 2024.
[27]	A. L. v. R. B. M. L. J. & M.-C. L. Ratschat, «Evaluating tactile feedback in addition to kinesthetic feedback for haptic shape rendering: a pilot study,» <i>Frontiers in Robotics and AI</i> , τόμ. 11, 2024.
[28]	D. B. Y. C. M. P. S. S. A. S. & K. H. S. Sim, «Low-latency haptic open glove for immersive virtual reality interaction,» <i>Sensors</i> , τόμ. 21, αρ. 11, 2021.
[29]	Y. Z. M. C. X. L. R. G. J. S. Y. & Y. G. Wang, «The application of metaverse in healthcare,» <i>Frontiers in Public Health</i> , τόμ. 12, 2024.
[30]	J. & V. P. E. Perret, «Touching virtual reality: a review of haptic gloves,» σε <i>ACTUATOR 2018; 16th International Conference on New Actuators</i> , 2018.
[31]	J. H. A. A. S. A. L. M. M. C. E. M. .. & C. B. Hornsby, «VR haptics for glovebox operations training,» <i>Frontiers in Virtual Reality</i> , τόμ. 6, 2025.
[32]	D. & M. C. Cui, «Evaluating wearable tactile feedback patterns during a virtual reality fighting game,» σε <i>In 2021 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct</i> , 2021.
[33]	S. I. R. A. H. B. S. M. & Z. A. Banaeian Far, «Virtual Touchability: the impact of wearable sensors in Metaverse naturalization,» <i>Discover Applied Sciences</i> , τόμ. 7, αρ. 8, pp. 1-37, 2025.
[34]	R. P. M. THILAKARATHNA, «Finger tracking for wearable VR glove using flexible rack mechanism,» <i>Reality & Intelligent Hardware</i> , τόμ. 7, αρ. 1, pp. 1-25, 2025.
[35]	S. A. J. & C. S. Han, «Generating haptic motion effects for general scenes to improve 4D experiences,» <i>International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)</i> , pp. 51-60, 2024.
[36]	J. Y. a. S. Choi, «Full-body Haptic Feedback Using Deep Learning-based Tactile Event Mapping in VR Games,» σε <i>Proceedings of the 2025 IEEE World Haptics Conference (WHC)</i> , Seoul, South Korea, 2025.
[37]	«Haptic Technology Market Size, Share & Industry Analysis, By Product Type (Graspable, Touchable, and Wearable), By Application (Information & Communication, Automotive Transportation, Gaming & Console, Consumer Electronics, Medical & Healthcare, and Other,» July 2025. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.fortunebusinessinsights.com/haptic-technology-market-105175 .

[38]	A. S. A. P. P. S. M. K. R. & V. C. Gage, «Haptic Feedback in Movies with a Sony PS5 Controller,» <i>The Journal on Technology and Persons with Disabilities</i> , 2025.
[39]	M. L. T. V. J. C. A. & H. J. Löchtefeld, «Comparing thermal and haptic feedback mechanisms for game controllers,» σε <i>Proceedings of the 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems</i> , 2017.
[40]	Y. X. J. L. Q. H. X. X. W. L. Z. .. & M. Y. Tang, «Advancing haptic interfaces for immersive experiences in the metaverse,» <i>Device</i> , τόμ. 2, αρ. 6, 2024.
[41]	F. J. L.-R. J. L. G. P. M. & D.-E. A. González-Cañete, «Improving the screen exploration of smartphones using haptic icons for visually impaired users,» <i>Sensors</i> , τόμ. 21, αρ. 15, 2021.
[42]	B. C. H. B. L. C. B. M. & A. P. Silva, «User-experience with haptic feedback technologies and text input in interactive multimedia devices,» <i>Sensors</i> , τόμ. 20, αρ. 18, 2020.
[43]	F. J. L.-R. J. L. G. P. M. & D.-E. A. González-Cañete, «Improving the screen exploration of smartphones using haptic icons for visually impaired users,» <i>Sensors</i> , τόμ. 21, αρ. 15, 2021.
[44]	C. & H. P. Bermejo, «A survey on haptic technologies for mobile augmented reality,» <i>ACM Computing Surveys (CSUR)</i> , τόμ. 54, αρ. 9, pp. 1-35, 2021.
[45]	M. & R. G. Radi, «Industrial haptic robot guidance system for assembly processes,» <i>IEEE international workshop on haptic audio visual environments and games</i> , pp. 69-74, 2009.
[46]	A. W.-C. B. C. M. & K. J. Tzemanaki, «Advancing Soft, Tactile, and Haptic Technologies: Recent Developments for Healthcare Applications,» <i>Frontiers in Robotics and AI</i> , τόμ. 12, 2025.
[47]	R. A. Bhavya, B. B. Reddy και M. S. Babu, «Technologies Using Haptics and Soft, Wearable Robotics,» <i>International Journal of Research Publication and Reviews</i> , τόμ. 4, αρ. 5, pp. 3895-3901, 2023.
[48]	S. B. R. S. P. Z. M. & J. D. Bhandari, «Design of robotic hand and wireless glove to tele-operate,» σε <i>Proceedings of the 2021 5th International Conference on Advances in Robotics</i> , 2021.
[49]	E. B. W. N. A. Z. W. J. B. & G. J. L. Capelle, «Design and implementation of a haptic measurement glove to create realistic human-teleoperator interactions,» σε <i>In 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)</i> , 2020.
[50]	F. C. J. Y. G. D. S. G. Z. & Z. Y. Li, «Soft robotic glove with sensing and force feedback for rehabilitation in virtual reality,» <i>Biomimetics</i> , τόμ. 8, αρ. 1, 2023.
[51]	H. P. A. S. G. P. K. A. A. & L. B. Mittal, «Enabling edge intelligence in remote robot control: Architecture, prediction mechanism and offloading,» σε <i>In 2022 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)</i> , 2022.
[52]	S. K. V. K. B. T. M. T. & S. J. P. Jadhav, «Soft robotic glove for kinesthetic haptic feedback in virtual reality environments,» <i>Electronic Imaging</i> , τόμ. 29, pp. 19-24, 2017.
[53]	J. Chung, «Metaverse XR Components,» <i>Emerging Metaverse XR and Video Multimedia Technologies</i> , 2023.
[54]	L. O. K. H. V. V. D. A. H. M. M. D. F. M. .. & G. P. C. Borgioli, «Sensory glove-based surgical robot user interface,» p. arXiv preprint arXiv:2403.13941., 2024.
[55]	M. Aiple και A. Schiele, «Pushing the limits of the CyberGrasp for haptic rendering,» σε <i>IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)</i> , Karlsruhe, Germany, 2013.
[56]	X. Z. Y. W. L. & C. J. Li, «Enhancing oxygen barrier and γ -ray shielding properties of neoprene rubber by bismuth-loaded alkyne graphene,» <i>Journal of Polymer Research</i> , τόμ. 32, αρ. 1, p. 1–14, 2025.

	[57] Li, F., Chen, J., Ye, G., Dong, S., Gao, Z., & Zhou, Y. (2023). Soft robotic glove with sensing and force feedback for rehabilitation in virtual reality. <i>Biomimetics</i> , 8(1), 83.
	[58] Παπακωνσταντίνου Χρήστος, (2025), Μελέτη, Σχεδίαση και Ανάπτυξη Ρομποτικού Χεριού, Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων, ΔΙΠΑΕ.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ**

Ερώτηση	1	2	3	4	5
Πόσο έντονη σας φάνηκε η δόνηση του γαντιού;					
Πόσο φυσική/ρεαλιστική σας φάνηκε η αίσθηση της δόνησης;					
Η δόνηση ενεργοποιούνταν τη σωστή στιγμή σε σχέση με τις ενέργειές σας;					
Πόσο σταθερή ήταν η δόνηση σε διάρκεια και ένταση;					
Η δόνηση βοήθησε να καταλάβετε καλύτερα την αλληλεπίδραση με το ρομπότ ή το περιβάλλον;					
Πόσο άνετη ήταν η αίσθηση της δόνησης στο χέρι σας;					
Θα θέλατε η δόνηση να ήταν πιο έντονη ή πιο αδύναμη;					
Σε ποιο βαθμό η δόνηση σας έκανε να νιώσετε πιο σίγουροι για τις κινήσεις σας;					
Συνολικά, πόσο ικανοποιημένοι είστε από την εμπειρία της δόνησης;					
Θα προτιμούσατε να χρησιμοποιείτε ένα γάντι με δόνηση ή χωρίς;					