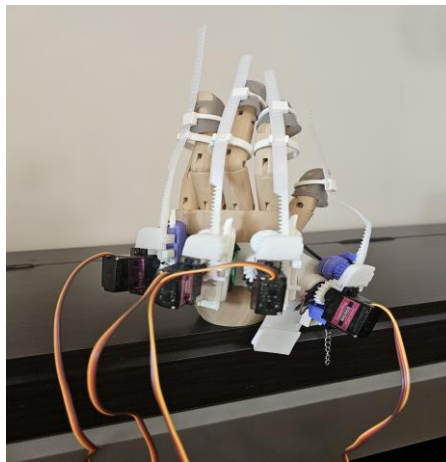


ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«ΑΠΤΙΚΟ ΓΑΝΤΙ»



Του φοιτητή
Χατζημιχαήλ Μιχαήλ
Αρ. Μητρώου: 2019188

Επιβλέπων
Ονοματεπώνυμο Κοκκώνης
Γεώργιος
Βαθμίδα Επίκουρος Καθηγητής

Ημερομηνία 31/05/2025

Τίτλος Δ.Ε. Απτικό Γάντι
Κωδικός Δ.Ε. 24211
Ονοματεπώνυμο φοιτητή Μιχαήλ Χατζημιχαήλ
Ονοματεπώνυμο εισηγητή Κοκκώνης Γεώργιος
Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 12/12/2024
Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 30/05/2025

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 Χατζημιχαήλ Μιχαήλ 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.

« Στους ανθρώπους μου, που στάθηκαν δίπλα μου με αγάπη, κατανόηση και πίστη σε κάθε βήμα αυτής της απαιτητικής διαδρομής. Η στήριξή τους στους δύσκολους αυτούς μήνες της ζωής μου υπήρξε το θεμέλιο για να φτάσω ως εδώ. »

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί την κορήφωση της ενασχόλησής μου με την τεχνολογία της απτικής ανάδρασης, της ρομποτικής και της εικονικής πραγματικότητας. Από νεαρή ηλικία με συναρπάζει η ιδέα ότι η τεχνολογία μπορεί να "γεφυρώσει" τον ψηφιακό και τον φυσικό κόσμο, δημιουργώντας εμπειρίες που αγγίζουν και τις πέντε αισθήσεις μας. Η ανάπτυξη διασυνδεδεμένων συστημάτων, όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων, και η πρόοδος στην τεχνητή νοημοσύνη έχουν ήδη θέσει τα θεμέλια για έναν μελλοντικό κόσμο όπου η αλληλεπίδραση με τα ψηφιακά συστήματα θα γίνεται με τρόπο φυσικό, ρεαλιστικό και πολυαισθητηριακό. Η ρομποτική, ένας τομέας που πάντα με ενθουσίαζε, προσφέρει απίστευτες δυνατότητες βελτιστοποίησης της παραγωγικότητας, της αποδοτικότητας και της ποιότητας ζωής. Όταν συνδυάζεται με την απτική τεχνολογία και την τεχνητή νοημοσύνη, δημιουργούνται πρωτοποριακές εφαρμογές που όχι μόνο επεκτείνουν τις δυνατότητες του ανθρώπου αλλά διαμορφώνουν και έναν νέο τρόπο αντίληψης της πραγματικότητας. Η παρούσα εργασία είναι αποτέλεσμα αυτού του ενθουσιασμού, της επιθυμίας μου να εμβαθύνω στην τεχνογνωσία της απτικής ανάδρασης, και της προσπάθειας να συνεισφέρω με έναν δημιουργικό και πρακτικό τρόπο στο ταχέως εξελισσόμενο πεδίο της ανθρώπινης-μηχανικής διεπαφής.

Περίληψη

Η εργασία αυτή επικεντρώνεται στον σχεδιασμό και την ανάπτυξη ενός χαμηλού κόστους γαντιού απτικής ανάδρασης για εφαρμογές Εικονικής Πραγματικότητας . Αξιοποιώντας ανοιχτού κώδικα τεχνολογίες, όπως το LucidVR και το Unity XR Toolkit, αναπτύχθηκε ένα διαδραστικό σύστημα που επιτρέπει στον χρήστη να αισθάνεται δυνάμεις και πίεση κατά την αλληλεπίδρασή του με το εικονικό περιβάλλον. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη χρήση πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών (piezoelectric actuators) και στην οδήγησή τους για απτική ανάδραση υψηλής ακρίβειας, καθώς και στην αξιοποίηση του μικροελεγκτή ESP32 για ασύρματη διασύνδεση και πραγματικού χρόνου απόκριση. Παράλληλα, εφαρμόστηκαν αισθητήρες μαγνητικού πεδίου Hall effect για την παρακολούθηση της θέσης των δακτύλων, επιτρέποντας την δυναμική οπτικοποίηση του ανθρώπινου χεριού και την αναγνώριση χειρονομιών. Η εργασία εξετάζει επίσης τις τεχνικές παραμέτρους των βασικών υποσυστημάτων, βασιζόμενη σε επίσημα datasheets και προηγούμενη βιβλιογραφία. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι είναι εφικτή η δημιουργία ενός αποδοτικού και ρεαλιστικού συστήματος απτικής ανάδρασης με ελάχιστο κόστος, ανοίγοντας τον δρόμο για μελλοντική έρευνα και εφαρμογές σε πεδία όπως η αποκατάσταση, η εκπαίδευση, και η διεπαφή μεταξύ ανθρώπου και ρομποτικών συστημάτων.

« Haptic Glove »

«Michael Chatzimichael»

Abstract

This dissertation focuses on the design and development of a low-cost haptic feedback glove for Virtual Reality applications. Leveraging open-source technologies such as LucidVR and the Unity XR Toolkit, an interactive system was developed that allows the user to feel forces and pressure when interacting with the virtual environment. Particular emphasis was placed on the use of piezoelectric actuators and their drivers for high-precision haptic feedback, as well as the utilization of the ESP32 microcontroller for wireless interconnection and real-time response. At the same time, Hall effect magnetic field sensors were used to monitor the position of the fingers, allowing the dynamic visualization of the human hand and the recognition of gestures. The paper also examines the technical parameters of the basic subsystems, based on official datasheets and previous literature. The results prove that it is feasible to create an efficient and realistic haptic feedback system at minimal cost, paving the way for future research and applications in fields such as rehabilitation, education, and the interface between humans and robotic systems.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη στην οικογένειά μου για τη συνεχή στήριξη και κατανόηση κατά την υλοποίηση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες απευθύνω και στους συμφοιτητές μου και την κοινότητα του discord LucidVR, για τις απόψεις, τις προτάσεις και τη βοήθειά τους στην αξιολόγηση και τη βελτίωση της παρούσας μελέτης. Θερμές ευχαριστίες οφείλω στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Γεώργιο Κοκκώνα για την καθοδήγηση, τη διαρκή υποστήριξη και τη διάθεσή του να μεταδώσει πολύτιμη γνώση και εμπειρία καθ' όλη τη διάρκεια των μηνών εργασίας μου.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	v
Περίληψη	vi
Abstract	vii
Ευχαριστίες	viii
Περιεχόμενα.....	ix
Κατάλογος Σχημάτων	xiii
Κατάλογος Πινάκων	xiv
Συνοτομογραφίες	xv
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή.....	2
1.1 Αντικείμενο Διπλωματικής	2
1.2 Κίνητρα και Εφαρμογές.....	3
1.3 Σκοπός και Στόχοι.....	3
1.4 Μεθοδολογία.....	4
Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	16
2.1 Unity.....	16
2.1.1 Εισαγωγή στη πλατφόρμα Unity.....	16
2.1.2 Unity και Απτικές Διεπαφές.....	16
2.1.3 Οπτικοποίηση Χεριού & Hand Tracking	17
2.1.4 Gestures: Grab και Pinch	17
2.1.5 Interaction Toolkit και Λογική Interactor / Interactable	18
2.1.6 Ενσωμάτωση Glove μέσω Serial Communication.....	18
2.1.7 Παραδείγματα Εφαρμογών	18
2.1.8 Προκλήσεις και Ευκαιρίες	19
Κεφάλαιο 3ο: Απτικές Διεπαφές.....	5
3.1 Εισαγωγή στις Απτικές Διεπαφές	5
3.1.1 Εισαγωγή.....	5
3.1.2 Τι Είναι οι Απτικές Διεπαφές;.....	5
3.1.3 Σημασία και Εφαρμογές.....	6
3.1.4 Τεχνολογίες που Υποστηρίζουν τις Απτικές Διεπαφές.....	6
3.1.5 Παραδείγματα απτικών διεπαφών.....	7
3.1.6 Σχέση με Άλλες Διεπαφές Ανθρώπου-Υπολογιστή (Όραση, Ακοή).....	8
3.1.7 Αλληλεπίδραση μέσω Όρασης.....	8

3.1.8	Αλληλεπίδραση μέσω Ακοής	8
3.1.9	Αλληλεπίδραση μέσω Αφής.....	9
3.1.10	Συνδυασμός Όρασης, Ακοής και Αφής	9
3.2	Σημασία της Αφής στην Ανθρώπινη Εμπειρία	9
3.2.1	Εισαγωγή.....	9
3.2.2	Φυσιολογία της Αφής.....	9
3.2.3	Τύποι Αισθητηρίων Υποδοχέων	10
3.2.4	Ιδιοδεκτικότητα και Κιναισθησία	10
3.2.5	Διαδικασία Μεταγωγής και Επεξεργασίας Σημάτων.....	10
3.2.6	Νευροπλαστικότητα και Προσαρμογή.....	11
3.2.7	Απτική Αναγνώριση και Αντίληψη.....	11
3.2.8	Απτική Ανάδραση και Κινητική Ρύθμιση.....	11
3.2.9	Η Αφή στην Κοινωνική Επικοινωνία.....	11
3.2.10	Προκλήσεις και Προοπτικές στις Τεχνολογικές Εφαρμογές.....	12
3.3	Πιεζοηλεκτρικά Υλικά και Actuators	12
3.3.1	Εισαγωγή στους Piezoelectric Actuators	12
3.3.2	Το Πιεζοηλεκτρικό Φαινόμενο	12
3.3.3	Πώς Λειτουργούν οι Piezoelectric Actuators.....	13
3.3.4	Τύποι Piezoelectric Actuators	13
3.3.5	Εφαρμογές των Piezoelectric Actuators.....	13
3.3.6	Πλεονεκτήματα και Προκλήσεις.....	14
3.4	Ιστορική αναδρομή και εξέλιξη των απτικών τεχνολογιών.....	14
3.4.1	Εισαγωγή.....	14
3.4.2	Πρώιμες Απτικές Τεχνολογίες	15
3.4.3	Η Έλευση των Ηλεκτρονικών και των Πρώτων Υπολογιστικών Συστημάτων.....	15
3.4.4	Η Εξέλιξη της Τεχνολογίας Απτικής Ανάδρασης.....	15
3.4.5	Η Άνοδος της Εικονικής Πραγματικότητας και της Σύγχρονης Απτικής Τεχνολογίας	16
3.4.6	Σύγχρονες Τάσεις και Μελλοντικές Προοπτικές.....	16
3.5	Τύποι Απτικών Διεπαφών	17
3.5.1	Εισαγωγή.....	17
3.5.2	Ενεργές Διεπαφές (Active Haptic Interfaces)	17
3.5.3	Παθητικές Διεπαφές (Passive Haptic Interfaces).....	19
3.6	Απτική Ανάδραση (Haptic Feedback):	21
3.6.1	Ενεργή Ανάδραση (Active Haptic Feedback).....	21
3.6.2	Παθητική Ανάδραση (Passive Haptic Feedback)	22

3.6.3	Παραδείγματα Απτικής Ανάδρασης.....	23
3.6.4	Επικοινωνία και Έλεγχος Δύναμης της Ανάδρασης.....	26
Κεφάλαιο 4ο:	Ανάλυση Τεχνολογιών και Υλικού.....	27
4.1	Ανάλυση ESP32-WROOM-32E.....	27
4.1.1	Επεξεργαστική Ισχύς και Μνήμη.....	27
4.1.2	Δικτυακές και Ασύρματες Δυνατότητες	27
4.1.3	Περιφερειακά και Διεπαφές Εισόδου/Εξόδου	27
4.1.4	Διαχείριση Ισχύος και Ενεργειακή Αποδοτικότητα.....	28
4.2	Πιεζοηλεκτρικός Ενεργοποιητής PowerHar 1919H022V120 – Ανάλυση Datasheet.....	28
	Κύρια Ηλεκτρικά και Μηχανικά Χαρακτηριστικά:.....	29
Ανάλυση Καμπυλών:	29
4.3	Οδηγός Piezo DRV8662 – Ανάλυση Datasheet	31
	Κύρια Τεχνικά Χαρακτηριστικά:.....	31
Συμπεράσματα:	32
4.4	Ανάλυση Αισθητήρα Hall 49E: Χαρακτηριστικά και Τεχνικές Προδιαγραφές	32
4.4.1	Ηλεκτρικά και Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Αισθητήρα Hall 49E	32
4.4.2	Τεχνική Ερμηνεία και Εφαρμογή.....	33
4.5	Ανάλυση Μικροσερβοκινητήρα MG90S.....	33
4.5.1	Τεχνικά Χαρακτηριστικά του MG90S.....	33
4.5.2	Λειτουργική Περιγραφή και Ρύθμιση PWM	34
4.5.3	Σχόλια Εφαρμογής	34
Κεφάλαιο 5ο:	Firmware esp32 & Unity.....	37
5.1	Ανάλυση Κώδικα ESP32 στο Arduino IDE.....	37
5.1.1	input.ino	37
5.1.2	lucidgloves-firmware.ino	42
5.1.3	_main.ino.....	44
5.1.4	haptics.ino	47
5.1.5	Encoding.ino	49
5.1.6	SerialCommunication.ino.....	50
5.1.7	ICommunication.....	52
5.1.8	ConfigUtils.h.....	52
5.1.9	AdvancedConfig.h	55
5.2	Unity Firmware	57
5.2.1	Σειριακή Επικοινωνία	58
5.2.2	Ανάλυση και Κανονικοποίηση Τιμών	58

5.2.3	Animation Δακτύλων σε Πραγματικό Χρόνο.....	59
5.2.4	Ανίχνευση Αντικειμένων και Ανάδραση	60
5.2.5	Πειραματική Ενσωμάτωση Hand Tracking με Unity XR.....	62
Κεφάλαιο 6ο: Λειτουργία και Ανάλυση Μηχανολογικών Τμημάτων.....		63
6.1	Mount Παλάμης	63
6.2	Sensor Housing	64
6.3	Gear Mechanism και Finger Rack	66
6.4	Servo Rack και Force Feedback.....	66
6.5	Sensor top, Magnet Pinion, Servo Gear	68
6.6	Προβλήματα και Προτάσεις.....	69
Κεφάλαιο 7ο: Τεχνικά Προβλήματα και Αντιμετώπιση.....		71
7.1	Προβλήματα Calibration – Hall Sensors.....	71
7.2	Προβλήματα ESP32 – Bootloop & Καθυστέρηση	72
7.3	Υλοποίηση Piezo ως Sensor & Actuator	74
7.3.1	Αρχική Πειραματική Φάση με Piezoelectric Buzzers και MOSFET.....	74
7.3.2	Δοκιμές με Γεννήτρια Συναρτήσεων	75
7.3.3	Χρήση DRV8662 για Οδήγηση Υψηλής Τάσης.....	75
7.3.4	Απόπειρες Διπλής Χρήσης – Actuation & Sensing	76
7.3.5	Απόρριψη Λύσης με H-Bridge.....	77
7.3.6	Πειραματική Απόρριψη της Χρήσης Piezo ως Αισθητήρα	77
7.3.7	Περιορισμοί Συχνοτήτων και Απτικής Απόκρισης.....	78
7.3.8	Τεχνικά Εμπόδια Κατασκευής – Συγκόλληση DRV8662	78
7.3.9	Συμπεράσματα	78
7.4	Δυσκολίες Εκτύπωσης και Συναρμολόγησης 3D Μοντέλων	79
7.5	Λειτουργία Μηχανικών Τμημάτων και Αντίσταση	80
7.6	Προβλήματα Συναρμολόγησης Αισθητήρων.....	82
Κεφάλαιο 8ο: Συμπεράσματα, Αξιολόγηση και Μελλοντική Έρευνα		83
8.1	Τι Επιτεύχθηκε.....	94
8.2	Περιορισμοί της Υλοποίησης.....	94
8.3	Υλοποίηση PCB.....	94
8.4	Επιλογή Unity αντί SteamVR με OpenGloves Firmware.....	95
8.5	Κριτική Αξιολόγηση από την Υλοποίηση	95
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		88

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1 – Εικόνα από το VR Core δείγμα που δείχνει τη λειτουργία hand visualisation.

Σχήμα 3.1 – Desktop Απτικές Διεπαφές

Σχήμα 3.2 – Εξωσκελετικές απτικές Διεπαφές

Σχήμα 3.3 – Απτικές διεπαφές επιφανείας - δόνησης

Σχήμα 3.4 – Απτικές Διεπαφές εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας- Δόνησης

Σχήμα 4.1 – Μετατόπιση vs Τάση

Σχήμα 4.2 – Επιτάχυνση vs Χρόνος

Σχήμα 4.3 – Τάση vs Δύναμη

Σχήμα 5.1 – Περιβάλλον Unity

Σχήμα 5.2 – Μετασχηματισμός Αρθρώσεων

Σχήμα 5.3 – Inspector Panel

Σχήμα 5.4 – Επισύναψη Haptic σε Interactable

Σχήμα 6.1 – Mount Παλάμης

Σχήμα 6.2 – Sensor Housing

Σχήμα 6.3 – Sensor Splay

Σχήμα 6.3 – Flexion Sensors

Σχήμα 6.4 – Finger Rack

Σχήμα 6.5 – Servo Rack

Σχήμα 6.6 – Gearing Mechanism

Σχήμα 6.7 – Magnet Pinion

Σχήμα 6.8 – Sensor Top

Σχήμα 6.9 – Servo Gear

Σχήμα 6.10 – Ευαίσθητο Overhang

Σχήμα 6.11 – Προσαρμογή στο χέρι χωρίς servo

Σχήμα 6.12 – Προσαρμογή στο χέρι

Σχήμα 7.1 – ESP32-8266(αριστερά) ESP32-WROOM32E(δεξιά)

Σχήμα 7.2 – Piezoelectric Buzzer

Σχήμα 7.3 – DRV8662

Σχήμα 7.4 – PowerHap 1919H022V120

Σχήμα 7.5 – Δοκιμές Πίεσης του Powerhap(1)

Σχήμα 7.6 – Δοκιμές Πίεσης του Powerhap(2)

Σχήμα 7.7 – Low temperature Solder Paste

Σχήμα 7.8 – QFN-20 breakout board

Σχήμα 7.9 – Επίδειξη Καλωδίωσης Sensor Housing

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4.1 - Ηλεκτρικά και Μηχανικά Χαρακτηριστικά 1919H022V120

Πίνακας 4.2 - Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά DRV8662

Πίνακας 4.3 - Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά 49E

Πίνακας 4.4 - Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά MG90S

Συντομογραφίες

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΙΠΙΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία
VR	Virtual Reality (Εικονική Πραγματικότητα)
HMI	Human-Machine Interface (Διεπαφή Ανθρώπου-Μηχανής)
HCI	Human-Computer Interaction (Αλληλεπίδραση Ανθρώπου-Υπολογιστή)
LRA	Linear Resonant Actuator (Γραμμικός Δονητικός Ενεργοποιητής)
ERM	Eccentric Rotating Mass (Εκκεντρική Περιστρεφόμενη Μάζα)
ADC	Analog to Digital Converter (Μετατροπέας Αναλογικού σε Ψηφιακό)
PCB	Printed Circuit Board (Τυπωμένο Κύκλωμα)
PWM	Pulse Width Modulation (Διαμόρφωση Εύρους Παλμού)
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
XR	Extended Reality (Επαυξημένη + Εικονική Πραγματικότητα)
SDK	Software Development Kit (Πακέτο Εργαλείων Ανάπτυξης Λογισμικού)
GUI	Graphical User Interface (Γραφική Διεπαφή Χρήστη)
VUI	Voice User Interface (Φωνητική Διεπαφή Χρήστη)
FIFO	First In, First Out (Πρώτο μέσα, Πρώτο έξω)

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο Διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τον σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός απτικού γαντιού (haptic glove), ικανού να προσφέρει στον χρήστη απτική ανάδραση κατά την αλληλεπίδραση με αντικείμενα σε περιβάλλοντα εικονικής πραγματικότητας (VR). Το σύστημα επιδιώκει να προσομοιώσει, με όσο το δυνατόν πιο φυσικό τρόπο, την αίσθηση του σχήματος, του μεγέθους, της υφής και της αντίστασης των ψηφιακών αντικειμένων, όπως θα τη βίωνε ο χρήστης στον πραγματικό κόσμο.

Η υλοποίηση βασίστηκε στο ανοιχτού κώδικα έργο LucidGloves της κοινότητας LucidVR[31], και συγκεκριμένα στην έκδοση Prototype 5 (proto5), η οποία προσφέρει μια προσεγγίσιμη και παραμετροποιήσιμη λύση για την κατασκευή φθηνών και λειτουργικών απτικών γαντιών. Παρότι το αρχικό πρότζεκτ αποτελεί λειτουργική βάση, παραμένει σε πειραματικό στάδιο και απαιτεί επιπλέον βελτιώσεις τόσο σε επίπεδο υλικού όσο και λογισμικού, ώστε να επιτευχθεί πραγματική αίσθηση απτικότητας και λειτουργική ενσωμάτωση με σύγχρονες εφαρμογές VR.

Η εργασία προχώρησε στην αναβάθμιση και επέκταση αυτής της βάσης, ενσωματώνοντας επιπλέον τεχνολογικά στοιχεία με στόχο την ενίσχυση της λειτουργικότητας. Κεντρικό στοιχείο της επέκτασης αποτελεί η χρήση του περιβάλλοντος της Unity καθώς και η χρήση πιεζοηλεκτρικών modules με διπλή φυσική λειτουργία:

- Ως αισθητήρες (sensors) που μετρούν την πίεση που ασκείται στην άκρη κάθε δακτύλου, προσφέροντας δεδομένα σχετικά με τη δύναμη σύλληψης,
- Και ως ενεργοποιητές δόνησης (vibration actuators), οι οποίοι εκπέμπουν δόνηση σε πραγματικό χρόνο για την προσομοίωση υφής και χαρακτηριστικών διαφορετικών υλικών.

Επιπρόσθετα, το γάντι ενσωματώνει μηχανική απτική ανάδραση μέσω σερβοκινητήρων. Οι σερβοκινητήρες εφαρμόζουν ελεγχόμενη δύναμη στα δάχτυλα, δημιουργώντας φυσική αντίσταση όταν ο χρήστης προσπαθεί να τα κλείσει περισσότερο από το σημείο επαφής με ένα εικονικό αντικείμενο. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η ψευδαίσθηση σύγκρουσης με το αντικείμενο, κάτι που δεν μπορεί να επιτευχθεί μόνο μέσω δόνησης. Η αντίσταση βασίζεται στην ελεγχόμενη κίνηση του servo που «φρενάρει» το δάκτυλο, αποτρέποντας τη συνέχιση της κάμψης, με τρόπο που να ανταποκρίνεται δυναμικά στη θέση και κατάσταση του ψηφιακού αντικειμένου.

Το σύστημα χρησιμοποιεί τον μικροελεγκτή ESP32 για την επεξεργασία σημάτων και την οδήγηση των ενεργοποιητών, ενώ η επικοινωνία με το VR περιβάλλον επιτυγχάνεται μέσω USB serial, σε συνεργασία την Unity.

Ο αιώτερος στόχος είναι η ανάπτυξη μιας λειτουργικής, οικονομικά προσβάσιμης και επεκτάσιμης λύσης απτικού γαντιού που υποστηρίζει τόσο την αναγνώριση κίνησης των δακτύλων όσο και ρεαλιστική απτική ανατροφοδότηση, ώστε να βελτιωθεί δραστικά η εμπειρία αλληλεπίδρασης σε εικονικά περιβάλλοντα.

1.2 Κίνητρα και Εφαρμογές

Η αίσθηση της αφής αποτελεί μία από τις βασικότερες διαστάσεις της ανθρώπινης αντίληψης και αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον. Σε αντίθεση με την όραση και την ακοή, η αφή εμπλέκει άμεσα σωματική επαφή, πίεση, θερμοκρασία και δονήσεις, στοιχεία που είναι κρίσιμα για την αντίληψη υφών, αντικειμένων και κινδύνων στον φυσικό κόσμο. Παρόλα αυτά, η απτική αίσθηση παραμένει υποεκπροσωπούμενη στα περισσότερα ψηφιακά και εικονικά περιβάλλοντα.

Η ραγδαία ανάπτυξη τεχνολογιών εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας (VR/AR) έχει οδηγήσει σε αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ενσωμάτωση απτικών διεπαφών (haptic interfaces), οι οποίες επιτρέπουν στους χρήστες να "αισθανθούν" το ψηφιακό περιβάλλον. Γάντια με ενσωματωμένους αισθητήρες και ενεργοποιητές παρέχουν τη δυνατότητα όχι μόνο για αναγνώριση κίνησης των δακτύλων, αλλά και για απτική ανατροφοδότηση κατά την αλληλεπίδραση με εικονικά αντικείμενα. Τέτοιες εφαρμογές βρίσκουν χρησιμότητα σε πολλαπλούς τομείς:

- Εικονική Πραγματικότητα (VR): Παιχνίδια, προσομοιώσεις, εκπαιδευτικά περιβάλλοντα και εμπειρίες εμβύθισης (immersion).
- Αποκατάσταση & Ιατρική Εκπαίδευση: Ασκήσεις κινητικότητας χεριών, φυσικοθεραπεία, και προσομοίωση εγχειρήσεων.
- Βιομηχανική Εκπαίδευση: Ασφαλής εξάσκηση χειρισμού εργαλείων και εξαρτημάτων.
- Αλληλεπίδραση σε Τηλε-ρομποτικά Συστήματα: Τηλεχειρισμός ρομποτικών βραχιόνων με απτική ανατροφοδότηση.
- Προσβασιμότητα: Διευκόλυνση της αλληλεπίδρασης ατόμων με αναπηρίες με συστήματα πληροφορικής.

Το κίνητρο για την ανάπτυξη του συγκεκριμένου συστήματος προέρχεται από την ανάγκη ύπαρξης μιας προσβάσιμης και ανοιχτής πλατφόρμας που να συνδυάζει:

- Καταγραφή κίνησης και δύναμης των δακτύλων,
- Απτική ανάδραση μέσω δόνησης και αντίστασης,
- Ενσωμάτωση με υπάρχουσες πλατφόρμες VR, όπως το Unity και το SteamVR.

Η επιλογή χρήσης υλικών χαμηλού κόστους, η αξιοποίηση ανοιχτού λογισμικού, καθώς και η δυνατότητα κατασκευής με 3D printing, καθιστούν το σύστημα ιδανικό για φοιτητική ή ερευνητική χρήση, αλλά και ως βάση για περαιτέρω εμπορική ή επαγγελματική ανάπτυξη.

1.3 Σκοπός και Στόχοι

Ο κύριος σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός προσιτού, λειτουργικού και επεκτάσιμου απτικού γαντιού που θα προσφέρει στον χρήστη ρεαλιστική απτική

αίσθηση σε περιβάλλοντα εικονικής πραγματικότητας (VR), μέσω της αναπαράστασης δύναμης, επαφής, δόνησης και υφής.

Το γάντι που υλοποιείται αξιοποιεί και επεκτείνει υπάρχουσα ανοικτή πλατφόρμα (LucidGloves proto5), και ενσωματώνει τεχνολογίες αιχμής όπως:

- Hall effect αισθητήρες για την αναγνώριση της γωνίας κάμψης των δακτύλων.
- Πιεζοηλεκτρικά στοιχεία που δρουν ως αισθητήρες πίεσης και ενεργοποιητές δόνησης.
- Σερβοκινητήρες που προσφέρουν αντίσταση στην κίνηση των δακτύλων για προσομοίωση επαφής με εικονικά αντικείμενα.
- Επικοινωνία μέσω ESP32 με πλατφόρμες όπως το Unity, μέσω serial ή Bluetooth.

Οι επιμέρους στόχοι της εργασίας είναι:

- Κατασκευή ενός λειτουργικού πρωτοτύπου απτικού γαντιού, με τρισδιάστατα εκτυπωμένα μέρη βασισμένα στο LucidVR και πλήρη συναρμολόγηση με αισθητήρες και ενεργοποιητές.
- Ανάπτυξη firmware για ESP32, για την ανάγνωση αισθητήρων (Hall και piezo) και την οδήγηση ενεργοποιητών (servo και piezo actuators), με κατάλληλους αλγορίθμους καλμπραρίσματος, multiplexing και κωδικοποίησης δεδομένων.
- Ενσωμάτωση με Unity αντί του OpenGloves driver και ανάπτυξη custom λογικής για την προσομοίωση απτικής εμπειρίας σε αντικείμενα, βάσει γεωμετρίας, επαφής και πίεσης.
- Υλοποίηση και αξιολόγηση φυσικής απτικής ανάδρασης, τόσο μέσω δόνησης (για προσομοίωση υφής και υλικών), όσο και μέσω μηχανικής αντίστασης (με servo feedback), κατά την εικονική σύλληψη αντικειμένων.
- Πειραματική δοκιμή και καταγραφή της απόκρισης του συστήματος σε συνθήκες χρήσης, με στόχο τη διατύπωση βελτιωτικών προτάσεων για μελλοντική ανάπτυξη ή εμπορική εφαρμογή.

1.4 Μεθοδολογία

Η μεθοδολογική προσέγγιση της παρούσας εργασίας στηρίζεται σε συνδυασμό θεωρητικής έρευνας, κατασκευαστικού σχεδιασμού και πρακτικής υλοποίησης, με στόχο τη δημιουργία ενός λειτουργικού και επεκτάσιμου απτικού γαντιού. Η πορεία της εργασίας περιλάμβανε διαδοχικά στάδια μελετών, πειραμάτων, κατασκευής και δοκιμών, με έμφαση στην τεχνική ακρίβεια, την προσαρμοστικότητα σε VR περιβάλλοντα, και τη βελτιστοποίηση απτικής ανατροφοδότησης.

Σημεία-κλειδιά της μεθοδολογίας:

- Εκτενής έρευνα υπαρχόντων απτικών γαντιών και τεχνολογιών απτικής διεπαφής, τόσο σε εμπορικό όσο και σε ερευνητικό επίπεδο.
- Ανάλυση του πλαισίου LucidGloves (proto5) για αξιολόγηση των λειτουργικών στοιχείων (δομή, αισθητήρες, κώδικας) και εντοπισμό περιορισμών.
- Ανεξάρτητη σύνδεση με Unity χωρίς χρήση του OpenGloves driver, λόγω ασυμβατότητας με SteamVR, μέσω custom script και σειριακής επικοινωνίας.
- Σειρά πειραμάτων με piezoelectric στοιχεία, με στόχο την επιλογή του πιο κατάλληλου για χρήση σε γάντι .
- Αρχικές δοκιμές με φθηνά piezo, που απέτυχαν να προσφέρουν επαρκή ένταση δόνησης και μετάβαση σε ενισχυμένο στοιχείο με κατάλληλο οδηγό (driver) που δεν απαιτεί εξωτερική τροφοδοσία υψηλής τάσης.
- Χρήση PWM για παραγωγή συχνοτήτων απτικής υφής, με βελτιστοποίηση σε Unity ώστε να συνδέεται η δόνηση με το εκάστοτε αντικείμενο και να αποδίδεται διαφορετική υφή.
- Σχεδιασμός κυκλώματος ανίχνευσης πίεσης με διαίρεση τάσης, για ενεργοποίηση της «τριβής» μόλις το δάχτυλο έρθει σε επαφή με αντικείμενο.
- Ανάπτυξη firmware σε ESP32 για ανάγνωση αισθητήρων (Hall, piezo) και έλεγχο servo και piezo actuators.
- Ενσωμάτωση multiplexer για τη διαχείριση πολλών αναλογικών καναλιών σε περιορισμένα ADC pins.
- Αρχικά τεστ επικοινωνίας με Python script, το οποίο εγκαταλείφθηκε για λόγους απλότητας και ταχύτητας και αντικαταστάθηκε με απευθείας σειριακή επικοινωνία ESP32 ↔ Unity.

Κεφάλαιο 2ο: Απτικές Διεπαφές

2.1 Εισαγωγή στις Απτικές Διεπαφές

2.1.1 Εισαγωγή

Οι απτικές διεπαφές αποτελούν ένα εξειδικευμένο και ταχέως αναπτυσσόμενο πεδίο εντός του ευρύτερου χώρου της Αλληλεπίδρασης Ανθρώπου-Υπολογιστή (Human-Computer Interaction – HCI). Η λέξη "απτικός" προέρχεται από την ελληνική λέξη "αφή", και αναφέρεται στη φυσιολογική ικανότητα του ανθρώπου να ανιχνεύει ερεθίσματα μέσω του δέρματος, των δακτύλων ή άλλων αισθητηριακών επιφανειών. Οι απτικές διεπαφές αξιοποιούν αυτή την ιδιότητα, επιτρέποντας στον χρήστη να βιώσει φυσικές αισθήσεις μέσα σε ψηφιακά ή εικονικά περιβάλλοντα.[5]

2.1.2 Τι Είναι οι Απτικές Διεπαφές;

Με απλά λόγια, οι απτικές διεπαφές είναι τεχνολογίες που επιτρέπουν στο χρήστη να “αισθάνεται” τον ψηφιακό κόσμο. Η επαφή αυτή δεν περιορίζεται στην απλή αφή, αλλά περιλαμβάνει πολύπλοκες μορφές ανάδρασης, όπως:

- Δόνηση: Παροχή κυματομορφών μικρής διάρκειας που ενημερώνουν τον χρήστη για ένα γεγονός (π.χ. ειδοποίηση, σύγκρουση).

- Αντίσταση: Εφαρμογή δύναμης κατά την αλληλεπίδραση, για παράδειγμα κατά το "πιάσιμο" ή την "απόθεση" ενός αντικειμένου.
- Πίεση: Ανάδραση που ανταποκρίνεται στην ποσότητα δύναμης που εφαρμόζεται από τον χρήστη σε μία επιφάνεια.

Αυτά τα σήματα δημιουργούν μια διπλής κατεύθυνσης σχέση: ο χρήστης επενεργεί στο σύστημα και το σύστημα επιστρέφει ένα απτό ερέθισμα, ενισχύοντας την αίσθηση φυσικότητας και τον ρεαλισμό της εμπειρίας.

2.1.3 Σημασία και Εφαρμογές

Η σημασία των απτικών διεπαφών εντοπίζεται στην ικανότητά τους να γεφυρώνουν το χάσμα μεταξύ του φυσικού και του ψηφιακού κόσμου. Εφαρμογές που αξιοποιούν απτική ανάδραση παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε τομείς όπου η αλληλεπίδραση απαιτεί όχι μόνο ακρίβεια αλλά και "αισθητική" εμπειρία:

- Ιατρική Εκπαίδευση και Προσομοιώσεις: Οι εκπαιδευόμενοι γιατροί μπορούν να εξασκηθούν σε εικονικά μοντέλα σώματος και ιστών, νιώθοντας την υφή ή την αντίσταση των διαφορετικών ανατομικών περιοχών. Η χρήση haptics βοηθά στη δημιουργία κινητικής μνήμης, όπως αυτή που αποκτάται μέσω της πραγματικής χειρουργικής πράξης.
- Εικονική Πραγματικότητα (VR): Οι χρήστες μπορούν να αλληλεπιδρούν με αντικείμενα με ρεαλιστική ανάδραση π.χ. να σπρώχνουν, να μεταφέρουν ή να χτυπούν αντικείμενα – και να αισθάνονται φυσική απόκριση που ενισχύει την αίσθηση παρουσίας) στον εικονικό κόσμο
- Ψυχαγωγία και Παιχνίδια: Η απτική ανάδραση δίνει ζωή στα παιχνίδια. Όταν ένας χαρακτήρας χτυπηθεί ή αγγίζει μια επιφάνεια, ο παίκτης βιώνει τη στιγμή σωματικά, ενισχύοντας τη συναισθηματική και αισθητηριακή εμπλοκή.

2.1.4 Τεχνολογίες που Υποστηρίζουν τις Απτικές Διεπαφές

Η υλοποίηση συστημάτων haptics στηρίζεται σε ποικιλία τεχνολογιών:

- Ηλεκτρομηχανικοί Ενεργοποιητές (Actuators): Αυτά τα εξαρτήματα (π.χ. servos, LRA, ERM, solenoids) μετατρέπουν ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική κίνηση ή δόνηση. Χρησιμοποιούνται για να αναπαράγουν αισθήσεις όπως πίεση, κίνηση ή σύγκρουση.
- Πιεζοηλεκτρικά Υλικά: Αυτά τα υλικά, όπως το PZT ή το PVDF, χρησιμοποιούνται για υψηλής ακρίβειας εφαρμογές, προσφέροντας πολύ λεπτές και γρήγορες κινήσεις. Είναι ιδανικά για συστήματα που απαιτούν μικρομετρική απόκριση ή διαμόρφωση υφής.
- Force Feedback Systems: Πιο προηγμένα συστήματα δύναμης χρησιμοποιούν μηχανισμούς που αντιστέκονται στις κινήσεις του χρήστη, δίνοντάς του την εντύπωση ότι κάτι "υπάρχει" στον χώρο. Αυτά περιλαμβάνουν Haptic arms, συσκευές εξομοίωσης οστών ή μυών, καθώς και ρομποτικά actuators για πλήρως δυναμική ανάδραση.

Η κάθε τεχνολογία επιλέγεται βάσει του είδους εφαρμογής, της επιθυμητής ακρίβειας, του διαθέσιμου χώρου, της απαίτησης για ασφάλεια και –κυρίως– του αισθητηριακού στόχου που καλείται να επιτύχει.[27]

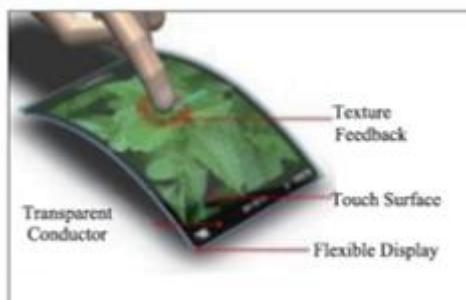
2.1.5 Παραδείγματα απτικών διεπαφών



Σχήμα 3.1 – Desktop Απτικές Διεπαφές[28]



Σχήμα 3.2 – Εξωσκελετικές απτικές Διεπαφές[27]



Σχήμα 3.3 – Απτικές διεπαφές επιφανείας - δόνησης[27]



Σχήμα 3.4 – Απτικές Διεπαφές εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας- Δόνησης[26]

2.1.6 Σχέση με Άλλες Διεπαφές Ανθρώπου-Υπολογιστή (Όραση, Ακοή)

Οι απτικές διεπαφές εντάσσονται στο ευρύτερο πλαίσιο των διεπαφών ανθρώπου–υπολογιστή (Human-Computer Interfaces – HCI), το οποίο περιλαμβάνει ένα σύνολο τεχνολογιών που επιτρέπουν στον χρήστη να επικοινωνεί και να αλληλεπιδρά με υπολογιστικά συστήματα μέσω διαφόρων αισθήσεων. Αν και η όραση και η ακοή υπήρξαν παραδοσιακά οι κυρίαρχες αισθητηριακές εισοδοί, η αφή και γενικότερα η φυσική αίσθηση έχουν αποκτήσει αυξανόμενη σημασία, καθώς προσφέρουν ένα επιπλέον επίπεδο αντίληψης και ρεαλισμού στην ψηφιακή εμπειρία.

2.1.7 Αλληλεπίδραση μέσω Όρασης

Η όραση είναι η πιο διαδεδομένη μορφή αλληλεπίδρασης ανθρώπου–υπολογιστή. Οι γραφικές διεπαφές χρήστη (GUI), που βασίζονται σε οθόνες, εικονίδια και μενού, προσφέρουν άμεση οπτική αναπαράσταση των λειτουργιών και των διαθέσιμων επιλογών. Παράλληλα, τεχνολογίες όπως η εικονική (VR) και επαυξημένη πραγματικότητα (AR) χρησιμοποιούν την όραση για να δημιουργήσουν τρισδιάστατα περιβάλλοντα, επιτρέποντας στον χρήστη να βλέπει και να πλοηγείται σε εικονικούς κόσμους με υψηλό βαθμό φυσικότητας.

Ωστόσο, η όραση από μόνη της δεν επαρκεί για την πλήρη αναπαράσταση της φυσικής αλληλεπίδρασης. Σε συνθήκες μειωμένου φωτισμού, σε περιβάλλοντα υψηλού φορτίου πληροφορίας ή για άτομα με οπτική αναπηρία, οι οπτικές διεπαφές είναι περιοριστικές.

2.1.8 Αλληλεπίδραση μέσω Ακοής

Η ακοή αποτελεί έναν εξίσου σημαντικό διάλογο επικοινωνίας. Μέσω ακουστικής ανάδρασης (audio feedback), το σύστημα ενημερώνει τον χρήστη για συμβάντα, καταστάσεις ή σφάλματα. Επιπλέον, οι φωνητικές διεπαφές (Voice User Interfaces – VUI), όπως οι Alexa, Siri και Google Assistant, επιτρέπουν αλληλεπίδραση χωρίς την ανάγκη οπτικής επαφής, ιδανική για καταστάσεις hands-free ή για άτομα με μειωμένη όραση. Ωστόσο, η ακουστική αλληλεπίδραση μπορεί να είναι περιορισμένη σε περιβάλλοντα με θόρυβο ή όταν απαιτείται υψηλή ακρίβεια σε πολυδιάστατες ενέργειες.

2.1.9 Αλληλεπίδραση μέσω Αφής

Η αφή προσθέτει μία κρίσιμη διάσταση στην εμπειρία χρήστη, η οποία μέχρι πρότινος παρέμενε υποεκμεταλλεζόμενη. Οι απτικές διεπαφές επιτρέπουν στον χρήστη όχι απλώς να βλέπει ή να ακούει το ψηφιακό περιβάλλον, αλλά να το "αισθάνεται". Η χρήση απτικής ανάδρασης (haptic feedback) και ανάδρασης δύναμης (force feedback) ενισχύει την ενσώματη αντίληψη του συστήματος, δίνοντας πληροφορίες μέσω πίεσης, κραδασμών ή μηχανικής αντίστασης.

Η χρήση συσκευών όπως tactile actuators, servo-μηχανισμών ή piezoelectric στοιχείων επιτρέπει την εφαρμογή δυνάμεων στον χρήστη, προσομοιώνοντας φαινόμενα όπως το κράτημα, το βάρος ή την υφή ενός αντικειμένου. Το αποτέλεσμα είναι μία εμπειρία πιο "φυσική" και πλούσια, η οποία εμπλέκει το χρήστη όχι μόνο γνωστικά αλλά και σωματικά.

2.1.10 Συνδυασμός Όρασης, Ακοής και Αφής

Οι σύγχρονες διεπαφές επιδιώκουν την πολυαισθητηριακή αλληλεπίδραση, συνδυάζοντας την όραση, την ακοή και την αφή για να επιτύχουν μεγαλύτερη εμπύθιση, καλύτερη απόδοση και πιο φυσική εμπειρία. Ειδικότερα στις εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας, η συνδυασμένη χρήση headset (οπτική + ακουστική είσοδος), ακουστικών, και απτικών γαντιών ή άλλων συσκευών, επιτρέπει την πλήρη συμμετοχή του χρήστη σε ένα ψηφιακό περιβάλλον, προσομοιώνοντας τον φυσικό κόσμο με ολοένα και μεγαλύτερη ακρίβεια.

Η οπτικοακουστική πληροφόρηση δημιουργεί τον χώρο και τον ήχο· η απτική ανάδραση δίνει "ουσία", "βάρος" και "αντίσταση" σε αυτό που προηγουμένως ήταν μόνο εικόνα και ήχος. Αυτός ο συνδυασμός αυξάνει την αντίληψη, την εμπύθιση, μειώνει τα σφάλματα και ενισχύει την ικανότητα του χρήστη να αλληλεπιδρά αποτελεσματικά, ακόμη και σε πολύπλοκα ή κρίσιμα συστήματα.[17], [27], [3], [4]

2.2 Σημασία της Αφής στην Ανθρώπινη Εμπειρία

2.2.1 Εισαγωγή

Η αφή αποτελεί μια από τις βασικές αισθήσεις του ανθρώπινου σώματος και διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην αντίληψη, την πλοήγηση και την αλληλεπίδραση με το περιβάλλον. Σε αντίθεση με την όραση και την ακοή που λειτουργούν σε μεγαλύτερη απόσταση, η αφή είναι άμεσα ενσωματωμένη στη φυσική παρουσία του ανθρώπου, καθιστώντας τη απαραίτητη για την αντίληψη του χώρου, του σχήματος, της υφής και της δύναμης. Η τεχνολογική αξιοποίηση αυτής της αίσθησης στις απτικές διεπαφές (haptic interfaces) απαιτεί βαθιά κατανόηση των φυσιολογικών και νευρολογικών της μηχανισμών.

2.2.2 Φυσιολογία της Αφής

Το ανθρώπινο δέρμα – το μεγαλύτερο αισθητήριο όργανο – αποτελεί το βασικό σημείο υποδοχής απτικών ερεθισμάτων. Περιέχει εκατομμύρια υποδοχείς οι οποίοι είναι ευαίσθητοι σε διάφορα είδη

ερεθισμάτων: μηχανικά, θερμικά, ή βλαπτικά(πόνος). Οι υποδοχείς αυτοί μετατρέπουν το φυσικό ερέθισμα σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο διαβιβάζεται μέσω των νευρικών οδών στο κεντρικό νευρικό σύστημα για επεξεργασία. Η ακρίβεια και η πολυπλοκότητα της αφής οφείλονται στην εξειδίκευση αυτών των υποδοχέων και στη συντονισμένη λειτουργία τους.

2.2.3 Τύποι Αισθητηρίων Υποδοχέων

Οι κύριοι τύποι αισθητηρίων υποδοχέων στο δέρμα περιλαμβάνουν:

- Meissner's Corpuscles: Υπεύθυνοι για την ανίχνευση ελαφριάς αφής και γρήγορων αλλαγών στην υφή. Συγκεντρώνονται κυρίως στα ακροδάχτυλα και τις παλάμες.
- Merkel Cells: Αντιδρούν σε στατική πίεση και είναι υπεύθυνες για την αντίληψη της υφής και των λεπτομερειών της επιφάνειας.
- Pacinian Corpuscles: Ευαίσθητοι σε ταχείες δονήσεις και βαθιά πίεση. Απαραίτητοι για την ανίχνευση παλμικών ερεθισμάτων.
- Ruffini Endings: Ανιχνεύουν παρατεταμένο τέντωμα και συμβάλλουν στην ιδιοδεκτικότητα.
- Θερμοϋποδοχείς: Ανιχνεύουν αυξομειώσεις της θερμοκρασίας.
- Nociceptors: Ενεργοποιούνται από επικίνδυνα ή βλαβερά ερεθίσματα και σχετίζονται με την αίσθηση του πόνου.
- Proprioceptors: Βρίσκονται σε μυς και αρθρώσεις και παρέχουν πληροφορίες για τη θέση και την κίνηση των μελών του σώματος.

2.2.4 Ιδιοδεκτικότητα και Κιναισθησία

Η ιδιοδεκτικότητα (proprioception) αναφέρεται στην ικανότητα του ατόμου να γνωρίζει τη θέση των μελών του σώματος στον χώρο, χωρίς να τα βλέπει. Συμπληρώνεται από την κιναισθησία, δηλαδή την αίσθηση της κίνησης των μελών και των μεταβολών στη θέση τους. Η απτική ανάδραση σε τεχνολογικά περιβάλλοντα, όπως τα απτικά γάντια, επιδιώκει να προσεγγίσει αυτές τις εσωτερικές αισθήσεις, δημιουργώντας μια ψευδαίσθηση παρουσίας και φυσικής συμμετοχής σε εικονικούς κόσμους.

2.2.5 Διαδικασία Μεταγωγής και Επεξεργασίας Σημάτων

Η αίσθηση της αφής ακολουθεί μια σαφή νευροφυσιολογική αλληλουχία:

- Μεταγωγή (Transduction): Οι υποδοχείς του δέρματος μετατρέπουν φυσικά ερεθίσματα σε ηλεκτρικά δυναμικά.
- Μετάδοση (Transmission): Τα ηλεκτρικά σήματα διαβιβάζονται μέσω των αισθητικών νευρώνων στο νωτιαίο μυελό.
- Επεξεργασία (Processing): Το σήμα φτάνει στον πρωτογενή αισθητικό φλοιό του εγκεφάλου, όπου γίνεται η βασική αποκωδικοποίηση. Η λεπτομερής ανάλυση συνεχίζεται σε δευτερεύουσες περιοχές, όπου προκύπτει η αντιληπτική εμπειρία της αφής.

- Απόκριση (Response): Το σώμα αντιδρά κατάλληλα: προσαρμόζει τη δύναμη, αλλάζει θέση ή αποσύρει άμεσα το μέλος από ένα βλαβερό ερέθισμα.

2.2.6 Νευροπλαστικότητα και Προσαρμογή

Η νευροπλαστικότητα αναφέρεται στην ικανότητα του εγκεφάλου να αναδιαμορφώνει τις νευρωνικές συνδέσεις του με βάση την εμπειρία και τη χρήση. Στο πεδίο της αφής, η νευροπλαστικότητα επιτρέπει την ενίσχυση συγκεκριμένων αισθητηριακών μονοπατιών, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου άλλες αισθήσεις είναι περιορισμένες. Για παράδειγμα, σε άτομα με απώλεια όρασης, παρατηρείται αυξημένη απτική ευαισθησία, καθώς ο αισθητικός φλοιός προσαρμόζεται ώστε να αξιοποιεί καλύτερα τα διαθέσιμα απτικά δεδομένα. Αυτή η προσαρμοστική ικανότητα είναι κρίσιμη για το σχεδιασμό και την εκπαίδευση απτικών διεπαφών, καθώς δείχνει ότι ο εγκέφαλος μπορεί να "μάθει" να αναγνωρίζει τεχνητές απτικές πληροφορίες.

2.2.7 Απτική Αναγνώριση και Αντίληψη

Η αφή επιτρέπει την αναγνώριση αντικειμένων και επιφανειών μέσω απτικής διερεύνησης, διαδικασία γνωστή ως haptic recognition. Πρόκειται για μια πολυαισθητηριακή εμπειρία, στην οποία εμπλέκονται πίεση, υφή, θερμοκρασία, και σχήμα. Είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν απουσιάζουν οπτικές ενδείξεις, όπως στο σκοτάδι ή κατά την απτική αναγνώριση σε ιατρικές επεμβάσεις. Τεχνολογικά, η πρόκληση είναι η δημιουργία συσκευών που μπορούν να αποδώσουν επαρκώς αυτά τα χαρακτηριστικά, ώστε ο χρήστης να αναγνωρίζει αντικείμενα όχι απλώς οπτικά αλλά και απτικά, κάτι που επιτυγχάνεται μέσω πιεζοηλεκτρικών στοιχείων, μεταβαλλόμενων επιφανειών ή μικρομηχανικών ενεργοποιητών.

2.2.8 Απτική Ανάδραση και Κινητική Ρύθμιση

Η αίσθηση της αφής συνεργάζεται με τη κιναισθησία και την ιδιοδεκτικότητα ώστε να καθοδηγήσει τη ρύθμιση της δύναμης, της λαβής και της ακρίβειας των κινήσεων. Για παράδειγμα, όταν σηκώνουμε ένα εύθραυστο αντικείμενο, η πίεση που ασκούμε τροποποιείται άμεσα μέσω της απτικής πληροφορίας που λαμβάνουμε. Η επαφή με την επιφάνεια και η αίσθηση αντίστασης επιτρέπουν την εκτέλεση πολύπλοκων κινήσεων όπως το γράψιμο ή η χρήση εργαλείων. Οι απτικές διεπαφές οφείλουν να ενσωματώνουν τέτοια ροή πληροφορίας ώστε ο χρήστης να μην αλληλεπιδρά απλώς με μια "εικόνα", αλλά με μια λειτουργική, απτικά ανταποκρινόμενη αναπαράσταση του αντικειμένου.

2.2.9 Η Αφή στην Κοινωνική Επικοινωνία

Η αφή είναι θεμελιώδης και στην κοινωνική και συναισθηματική επικοινωνία. Μέσω απτικών χειρονομιών, όπως η χειραγία, η αγκαλιά ή ένα απλό άγγιγμα, μεταδίδονται πληροφορίες που δεν εκφράζονται εύκολα λεκτικά: οικειότητα, εμπιστοσύνη, παρηγοριά. Πολιτισμικά, η χρήση της αφής διαφέρει, αλλά η σημασία της ως μέσο διαπροσωπικής επαφής είναι καθολική. Οι τεχνολογίες που επιχειρούν να ενσωματώσουν αυτή τη διάσταση, όπως τα απτικά γάντια σε εφαρμογές κοινωνικής τηλεπαρουσίας ή

απομακρυσμένης αλληλεπίδρασης, αντιμετωπίζουν την πρόκληση της μετάδοσης συναισθηματικού νοήματος μέσα από μηχανικά μέσα.[17], [19], [14], [16]

2.2.10 Προκλήσεις και Προοπτικές στις Τεχνολογικές Εφαρμογές

Παρά την πρόοδο, η ακριβής αναπαραγωγή της αφής μέσω μηχανικών ή ηλεκτρονικών συστημάτων παραμένει δύσκολη. Οι βασικές προκλήσεις περιλαμβάνουν:

- Την ακρίβεια της απόδοσης των αισθημάτων πίεσης, δόνησης ή υφής.
- Τον χρονικό συγχρονισμό με τα ερεθίσματα.
- Τη σμίκρυνση των εξαρτημάτων για φορητές εφαρμογές (π.χ. wearables).
- Την ευαισθησία στην παραμετροποίηση ανάλογα με τον χρήστη.

Οι προοπτικές είναι ωστόσο σημαντικές:

- Η αξιοποίηση νέων υλικών με μεταβαλλόμενα μηχανικά χαρακτηριστικά
- Η εφαρμογή εξελιγμένων αλγορίθμων απτικής απεικόνισης
- Η χρήση προβλεπτικών μοντέλων με βάση machine learning για τη βελτιστοποίηση της ανάδρασης σε πραγματικό χρόνο.

Συνολικά, η αφή ως διεπαφή έχει τη δυνατότητα να μεταμορφώσει την αλληλεπίδραση με τα ψηφιακά συστήματα, καθιστώντας την πιο φυσική, ακριβή και ανθρώπινη

2.3 Πιεζοηλεκτρικά Υλικά και Actuators

2.3.1 Εισαγωγή στους Piezoelectric Actuators

Οι piezoelectric actuators (πιεζοηλεκτρικοί ενεργοποιητές) αποτελούν κρίσιμα εξαρτήματα σε σύγχρονες απτικές διεπαφές και σε ευρύ φάσμα τεχνολογικών εφαρμογών που απαιτούν υψηλής ακρίβειας, μικροσκοπική μηχανική μετατόπιση. Η λειτουργία τους βασίζεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, σύμφωνα με το οποίο ορισμένα υλικά παραμορφώνονται μηχανικά όταν εφαρμοστεί ηλεκτρικό πεδίο, και αντιστρόφως, παράγουν ηλεκτρική τάση όταν ασκείται επάνω τους πίεση ή δύναμη.

2.3.2 Το Πιεζοηλεκτρικό Φαινόμενο

- Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ανακαλύφθηκε το 1880 από τους Jacques και Pierre Curie. Αναφέρεται στην εμφάνιση ηλεκτρικού φορτίου στην επιφάνεια ενός υλικού όταν αυτό υφίσταται μηχανική παραμόρφωση και, αντιστρόφως, στη δημιουργία μηχανικής μετατόπισης όταν εφαρμοστεί ηλεκτρική τάση. Σήμερα, τα πλέον διαδεδομένα

πιεζοηλεκτρικά υλικά περιλαμβάνουν φυσικούς κρυστάλλους όπως ο χαλαζίας, κεραμικά υλικά όπως το PZT (μόλυβδο-ζirkόνιο-τιτανικό), και πολυμερή όπως το PVDF (πολυβινυλιδενοφθορίδιο). Η επιλογή του υλικού εξαρτάται από την εφαρμογή, με κριτήρια όπως η ευαισθησία, η μηχανική αντοχή, το εύρος λειτουργίας και η θερμική σταθερότητα.

2.3.3 Πώς Λειτουργούν οι Piezoelectric Actuators

- Οι ενεργοποιητές αυτού του τύπου μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική κίνηση μέσω της παραμόρφωσης του υλικού όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο. Η παραμόρφωση αυτή είναι συχνά μικροσκοπική, στην κλίμακα των μικρομέτρων ή νανομέτρων, αλλά εξαιρετικά ελεγχόμενη και επαναλαμβανόμενη. Λόγω της εγγενούς ταχύτητας απόκρισης των υλικών αυτών, οι piezoelectric actuators μπορούν να ανταποκριθούν σχεδόν ακαριαία σε σήματα, καθιστώντας τους κατάλληλους για εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη και επαναλαμβανόμενη μετακίνηση.
- Με κατάλληλη ενίσχυση μέσω κυκλωμάτων οδήγησης, είναι δυνατή η παραγωγή ελεγχόμενων παλμών ή κυματομορφών δόνησης, χαρακτηριστικό που αξιοποιείται ευρέως σε συστήματα απτικής ανάδρασης, όπως οθόνες αφής ή φορητές διαδραστικές συσκευές.

2.3.4 Τύποι Piezoelectric Actuators

Η κατηγορία των πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών περιλαμβάνει διάφορους τύπους, καθένας εκ των οποίων εξυπηρετεί διαφορετικά σενάρια κίνησης:

- Stack Actuators: Αποτελούνται από πολλαπλά στρώματα πιεζοηλεκτρικού υλικού τοποθετημένα το ένα πάνω στο άλλο, ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη γραμμική μετατόπιση με εφαρμογή υψηλής τάσης. Χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται υψηλή δύναμη με μικρή διαδρομή.
- Bending Actuators (Διφασικοί): Βασίζονται στην κάμψη του υλικού όταν εφαρμοστεί ηλεκτρικό πεδίο. Προσφέρουν μεγαλύτερη διαδρομή κίνησης με μικρότερη δύναμη, ιδανικοί για εφαρμογές χαμηλού φορτίου.
- Shear Actuators: Παράγουν διατμητική μετατόπιση, δηλαδή πλευρική κίνηση, όταν εφαρμόζεται κατάλληλη τάση. Είναι κατάλληλοι για πολύ λεπτές ρυθμίσεις θέσης ή ταχύτατες παρεμβάσεις.
- Tube Actuators: Χρησιμοποιούνται σε κυλινδρικές διατάξεις, όπως συστήματα σάρωσης με λέιζερ ή σε οπτικές ίνες, όπου απαιτείται διαξονική κίνηση ή ελεγχόμενη παραμόρφωση κυκλικού τύπου.

2.3.5 Εφαρμογές των Piezoelectric Actuators

Η αξιοπιστία και η ακριβεία των piezo actuators επιτρέπουν την εφαρμογή τους σε ποικιλία τεχνολογικών τομέων, όπως:

- Μικροσκοπία Ατομικής Δύναμης (AFM): Για την ακριβή μετακίνηση της ακίδας πάνω στην επιφάνεια του δείγματος, σε νανομετρική κλίμακα.
- Οπτικά Συστήματα και Κάμερες: Για την προσαρμογή της θέσης φακών με σκοπό την αυτόματη εστίαση ή τη σταθεροποίηση εικόνας.

- Απτικές Διεπαφές: Για τη δημιουργία τοπικών δονήσεων σε οθόνες, χειριστήρια, ή γάντια εικονικής πραγματικότητας, ενισχύοντας την αίσθηση της αφής.
- Ρομποτική και Micro-Robotics: Όπου απαιτείται πολύ ακριβής έλεγχος κίνησης σε εξαιρετικά μικρή κλίμακα.
- Ιατρικές Συσκευές: Σε διατάξεις μικροχειρουργικής, για τη ρύθμιση εργαλείων ή την ακριβή χορήγηση φαρμάκων.

2.3.6 Πλεονεκτήματα και Προκλήσεις

Οι piezoelectric actuators προσφέρουν πληθώρα πλεονεκτημάτων:

- Υψηλότατη ακρίβεια κίνησης, έως και νανομετρικού επιπέδου
- Σχεδόν ακαριαία απόκριση σε ηλεκτρικά σήματα
- Συμπαγές μέγεθος και απουσία κινούμενων μερών, κάτι που περιορίζει τη φθορά και παρατείνει τον χρόνο ζωής του συστήματος
- Χαμηλό βάρος, ιδιαίτερα σημαντικό για εφαρμογές σε φορητές συσκευές.

Ωστόσο, υπάρχουν και σημαντικές προκλήσεις:

- Περιορισμένο εύρος κίνησης, συνήθως κάτω από 100 μικρόμετρα, εκτός αν χρησιμοποιηθεί μηχανική ενίσχυση
- Απαιτήση για υψηλή τάση (30–100V) για την επίτευξη πλήρους δυναμικής απόκρισης, κάτι που περιπλέκει την ηλεκτρονική σχεδίαση
- Ευαισθησία σε μηχανικές καταπονήσεις και κινδύνους υπερφόρτωσης σε περίπτωση λανθασμένης χρήσης
- Συχνά αυξημένο κόστος, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται ειδικά υλικά ή απαιτείται υψηλή απόδοση σε βιομηχανικές εφαρμογές.

Η κατανόηση των χαρακτηριστικών και των περιορισμών των piezoelectric ενεργοποιητών αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχή ενσωμάτωσή τους σε συστήματα απτικής ανάδρασης, ιδίως όταν οι σχεδιαστικές απαιτήσεις αφορούν φορητές, ασφαλείς και αξιόπιστες εφαρμογές σε άμεση επαφή με τον χρήστη.[16], [18], [19], [20]

2.4 Ιστορική αναδρομή και εξέλιξη των απτικών τεχνολογιών.

2.4.1 Εισαγωγή

Οι απτικές τεχνολογίες, που επιτρέπουν την αλληλεπίδραση μέσω της αφής, έχουν μια ενδιαφέρουσα ιστορία που συνδέεται στενά με την ανάπτυξη των τεχνολογιών διεπαφής ανθρώπου-υπολογιστή. Από τις πρώτες απλές συσκευές έως τις σύγχρονες προηγμένες εφαρμογές,

η εξέλιξη των απτικών τεχνολογιών αντικατοπτρίζει την πρόοδο της κατανόησης της αίσθησης της αφής και την επιθυμία να ενσωματωθεί αυτή η αίσθηση στη χρήση υπολογιστικών συστημάτων και ψηφιακών περιβαλλόντων.

2.4.2 Πρώιμες Απτικές Τεχνολογίες

Οι πρώτες μορφές απτικών τεχνολογιών ήταν κυρίως μηχανικά συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν για εκπαιδευτικούς σκοπούς και για την ανάπτυξη δεξιοτήτων και ήταν παθητικές απτικές διεπαφές. Για παράδειγμα:

- **Μηχανικά Συστήματα Διδασκαλίας Αφής:** Κατά τον 19ο αιώνα, οι πρώτες συσκευές που αξιοποιούσαν την αίσθηση της αφής για εκπαιδευτικούς σκοπούς σχεδιάστηκαν για την εκπαίδευση τυφλών ατόμων. Αυτές οι συσκευές χρησιμοποιούσαν ανάγλυφες επιφάνειες και σύμβολα, δίνοντας τη δυνατότητα στους χρήστες να "διαβάζουν" μέσω της αφής.
- **Ανάπτυξη Απτικών Χαρτών και Εργαλείων:** Οι απτικοί χάρτες και τα ανάγλυφα αντικείμενα άρχισαν να χρησιμοποιούνται για να βοηθήσουν στην εκπαίδευση και καθοδήγηση ατόμων με προβλήματα όρασης. Οι χάρτες αυτοί επέτρεπαν στους χρήστες να αισθάνονται τη διαμόρφωση της γης ή των κτηρίων, επιτρέποντάς τους να κατανοήσουν το περιβάλλον μέσω της αφής.

2.4.3 Η Έλευση των Ηλεκτρονικών και των Πρώτων Υπολογιστικών Συστημάτων

Με την ανάπτυξη της ηλεκτρονικής και των πρώτων υπολογιστικών συστημάτων στα μέσα του 20ού αιώνα, άρχισαν να εμφανίζονται οι πρώτες απτικές διεπαφές που συνδύαζαν μηχανικά και ηλεκτρονικά στοιχεία. Αυτές οι ενεργές απτικές διεπαφές σχεδιάστηκαν για να παρέχουν ανάδραση μέσω της αφής, κυρίως σε εξειδικευμένες εφαρμογές:

- **Συστήματα Πτήσεων με Ανάδραση Δύναμης:** Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, η αεροναυπηγική βιομηχανία ανέπτυξε συστήματα ελέγχου πτήσης που περιλάμβαναν ανάδραση δύναμης. Οι πιλότοι λάμβαναν ανάδραση μέσω των χειριστηρίων τους για να αισθάνονται την αντίσταση και την κίνηση του αεροσκάφους, βελτιώνοντας έτσι την ακρίβεια και την ασφάλεια της πτήσης.
- **Πρώιμα Ερευνητικά Προγράμματα:** Κατά τη δεκαετία του 1960, ερευνητικά προγράμματα, όπως εκείνα στο Πανεπιστήμιο του Στάνφορντ, άρχισαν να εξερευνούν τη χρήση της απτικής ανάδρασης σε προσομοιώσεις και αλληλεπιδράσεις με υπολογιστές. Αυτά τα προγράμματα συνέβαλαν στη θεμελίωση της σύγχρονης επιστήμης των απτικών διεπαφών.

2.4.4 Η Εξέλιξη της Τεχνολογίας Απτικής Ανάδρασης

Η τεχνολογία απτικής ανάδρασης άρχισε να εξελίσσεται ραγδαία κατά τις δεκαετίες του 1970 και του 1980, καθώς η υπολογιστική ισχύς αυξανόταν και οι ανάγκες για πιο φυσικές και διαισθητικές διεπαφές γίνονταν πιο επιτακτικές:

- **Ανάπτυξη Εργαλείων Σχεδίασης με Απτική Ανάδραση:** Στη δεκαετία του 1970, η τεχνολογία CAD (Computer-Aided Design) άρχισε να ενσωματώνει απτική ανάδραση, επιτρέποντας στους μηχανικούς και σχεδιαστές να "αισθάνονται" τα εικονικά αντικείμενα που δημιουργούσαν μέσω του υπολογιστή.
- **Η Αρχή των Απτικών Συσκευών για Χειριστήρια Παιχνιδιών:** Στη δεκαετία του 1980, εμφανίστηκαν οι πρώτες απτικές συσκευές για βιντεοπαιχνίδια. Αυτές οι συσκευές παρείχαν απτική ανάδραση, όπως δονήσεις και ανάδραση δύναμης, για να ενισχύσουν την εμπειρία του παιχνιδιού.

2.4.5 Η Άνοδος της Εικονικής Πραγματικότητας και της Σύγχρονης Απτικής Τεχνολογίας

Η ανάπτυξη των τεχνολογιών εικονικής πραγματικότητας (VR) έδωσε νέα ώθηση στην ανάπτυξη των απτικών τεχνολογιών. Οι απτικές διεπαφές έγιναν πιο εξελιγμένες και άρχισαν να χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύτερο φάσμα εφαρμογών:

- Απτικές Συσκευές για Εικονική Πραγματικότητα: Με την άνοδο της εικονικής πραγματικότητας, αναπτύχθηκαν συσκευές που επιτρέπουν στους χρήστες να αισθάνονται τις επιφάνειες και τα αντικείμενα σε ένα εικονικό περιβάλλον. Αυτές οι συσκευές περιλαμβάνουν γάντια VR με απτική ανάδραση, που δίνουν στους χρήστες τη δυνατότητα να αισθανθούν την υφή, τη θερμοκρασία και την αντίσταση των αντικειμένων.
- Προσομοιωτές για Επαγγελματική Εκπαίδευση: Οι απτικές τεχνολογίες άρχισαν να χρησιμοποιούνται ευρέως σε προσομοιωτές εκπαίδευσης για επαγγελματίες, όπως χειρουργοί, πιλότοι και μηχανικοί. Αυτοί οι προσομοιωτές επιτρέπουν την αλληλεπίδραση με εικονικά εργαλεία και περιβάλλοντα, παρέχοντας απτική ανάδραση που προσομοιώνει την πραγματική εμπειρία.
- Απτικές Διεπαφές για Καθημερινή Χρήση: Στη δεκαετία του 2000 και μετά, οι απτικές τεχνολογίες άρχισαν να ενσωματώνονται σε φορητές συσκευές, όπως smartphones και tablets. Η ανάδραση μέσω δόνησης κατά την αλληλεπίδραση με οθόνες αφής έγινε κοινή, προσθέτοντας ένα νέο επίπεδο απτικότητας στη χρήση ψηφιακών συσκευών.

2.4.6 Σύγχρονες Τάσεις και Μελλοντικές Προοπτικές

Σήμερα, οι απτικές τεχνολογίες βρίσκονται σε μια φάση ραγδαίας εξέλιξης και καινοτομίας. Μερικές από τις σύγχρονες τάσεις περιλαμβάνουν:

- Εξελιγμένα Υλικά και Συστήματα Απτικής Ανάδρασης: Η ανάπτυξη νέων υλικών, όπως τα έξυπνα υλικά που αλλάζουν μορφή ή αντίσταση με βάση ηλεκτρικά ή θερμικά ερεθίσματα, επιτρέπει την κατασκευή συσκευών που προσφέρουν πιο ρεαλιστική και λεπτομερή απτική ανάδραση.
- Ενσωμάτωση Απτικών Τεχνολογιών σε Καθημερινές Συσκευές: Οι σύγχρονες συσκευές, όπως wearables, έξυπνα ρολόγια και αυτοκίνητα, αρχίζουν να ενσωματώνουν απτική ανάδραση για να βελτιώσουν την εμπειρία του χρήστη και να παρέχουν πιο φυσική αλληλεπίδραση.
- Έρευνα σε Απτικές Τεχνολογίες για Άτομα με Αναπηρίες: Η απτική ανάδραση προσφέρει σημαντικές δυνατότητες για τη βελτίωση της πρόσβασης σε τεχνολογίες από άτομα με προβλήματα όρασης ή άλλες αναπηρίες, δίνοντας τους τη δυνατότητα να αλληλεπιδρούν με συστήματα μέσω της αφής.
- Ενσωμάτωση με Τεχνολογίες Τεχνητής Νοημοσύνης: Η ενσωμάτωση απτικών διεπαφών με συστήματα τεχνητής νοημοσύνης επιτρέπει την ανάπτυξη προσαρμοζόμενων και έξυπνων διεπαφών που ανταποκρίνονται στις ανάγκες του χρήστη με βάση την αλληλεπίδραση και τα δεδομένα αφής.[5], [17], [12], [1], [8]

2.5 Τύποι Απτικών Διεπαφών

2.5.1 Εισαγωγή

Οι απτικές διεπαφές μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες:

Τις Ενεργές Απτικές Διεπαφές (Active Haptic Interfaces) και τις Παθητικές Απτικές Διεπαφές (Passive Haptic Interfaces):

2.5.2 Ενεργές Διεπαφές (Active Haptic Interfaces)

Οι ενεργές απτικές διεπαφές (Active Haptic Interfaces) είναι ένα σημαντικό υποσύνολο των απτικών τεχνολογιών που προσφέρουν ανάδραση μέσω της παραγωγής φυσικών δυνάμεων και κινήσεων. Αυτές οι διεπαφές χρησιμοποιούν μηχανικούς ή ηλεκτρομηχανικούς actuators για να δημιουργήσουν αίσθηση αφής, όπως πίεση, αντίσταση ή δόνηση, και επιτρέπουν στους χρήστες να "αισθάνονται" και να αλληλεπιδρούν απτικά με εικονικά ή φυσικά περιβάλλοντα.

Στις ενεργές διεπαφές, το σύστημα παρέχει φυσική ανάδραση στον χρήστη με τη μορφή δύναμης, πίεσης ή δόνησης. Για παράδειγμα, τα χειριστήρια παιχνιδιών με ανάδραση δόνησης είναι μια απλή μορφή ενεργών απτικών διεπαφών.

Αυτές οι διεπαφές απαιτούν την ύπαρξη μηχανισμών ή συσκευών που μπορούν να παράγουν φυσικές δυνάμεις.

Χαρακτηριστικά των Ενεργών Απτικών Διεπαφών

Οι ενεργές απτικές διεπαφές έχουν διάφορα χαρακτηριστικά που τις διακρίνουν από τις παθητικές:

Παραγωγή Δύναμης:

Οι ενεργές απτικές διεπαφές μπορούν να παράγουν δυνάμεις που ασκούνται στον χρήστη, όπως αντίσταση ή ώθηση, προσφέροντας μια πιο ρεαλιστική και διαδραστική εμπειρία. Αυτή η δυνατότητα επιτρέπει στους χρήστες να αισθάνονται την αντίδραση των αντικειμένων που αλληλεπιδρούν μαζί τους, όπως η αίσθηση του βάρους ή της δύναμης που απαιτείται για να πιέσουν ένα κουμπί.

Δυναμική Ανάδραση:

Οι ενεργές διεπαφές είναι σε θέση να αλλάζουν δυναμικά την απτική ανάδραση που παρέχουν, ανάλογα με την αλληλεπίδραση του χρήστη. Για παράδειγμα, η ανάδραση μπορεί να προσαρμοστεί με βάση την πίεση και την δύναμη που ασκεί ο χρήστης, την ταχύτητα με την οποία κινεί ένα χειριστήριο και την θέση στην οποία τοποθετεί το εικονικό αντικείμενο.

Τεχνολογίες Πίσω από τις Ενεργές Απτικές Διεπαφές

Η ανάπτυξη ενεργών απτικών διεπαφών βασίζεται σε μια ποικιλία τεχνολογιών, οι οποίες επιτρέπουν την παραγωγή της επιθυμητής απτικής ανάδρασης:

- Ηλεκτρομηχανικοί Ενεργοποιητές (Electromechanical Actuators)
Οι ενεργοποιητές αυτοί είναι υπεύθυνοι για τη δημιουργία των φυσικών δυνάμεων που αισθάνεται ο χρήστης. Χρησιμοποιούνται σε διάφορες μορφές, όπως μοτέρ που παράγουν περιστροφή ή δόνηση, γραμμικοί ενεργοποιητές που παράγουν κίνηση εμπρός και πίσω, και piezoelectric ενεργοποιητές που προκαλούν δονήσεις υψηλής συχνότητας.
- Πιεζοηλεκτρικά Υλικά (Piezoelectric Materials):
Αυτά τα υλικά αλλάζουν σχήμα όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο και χρησιμοποιούνται για να δημιουργούν λεπτομερείς και ακριβείς δονήσεις που μπορούν να προσομοιώσουν την υφή ή άλλες απτικές ιδιότητες.
- Δυναμικά παραμορφωσιζόμενες επιφάνειες:
Αυτές οι συσκευές χρησιμοποιούν μικροελεγχόμενους ακροδέκτες που μετακινούνται για να προσομοιώσουν επιφάνειες ή σχήματα, επιτρέποντας στους χρήστες να "αισθάνονται" την επιφάνεια ενός εικονικού αντικειμένου.

Εφαρμογές των Ενεργών Απτικών Διεπαφών

Οι ενεργές απτικές διεπαφές βρίσκουν εφαρμογή σε ποικίλους τομείς, προσφέροντας μοναδικές δυνατότητες αλληλεπίδρασης:

- Χειρουργική Προσομοίωση:
Στην εκπαίδευση χειρουργών, οι ενεργές απτικές διεπαφές επιτρέπουν στους εκπαιδευόμενους να αισθάνονται την υφή, την αντίσταση και την ανατομία των ιστών σε εικονικά περιβάλλοντα. Αυτό βελτιώνει την ακρίβεια και την αυτοπεποίθηση των χειρουργών πριν αυτοί εργαστούν σε πραγματικούς ασθενείς.
- Εικονική Πραγματικότητα (VR):
Χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν την εμπειρία VR, επιτρέποντας στους χρήστες να αισθάνονται αντικείμενα και επιφάνειες σε εικονικά περιβάλλοντα. Για παράδειγμα, ένα γάντι VR με ενεργούς ενεργοποιητές μπορεί να δώσει την αίσθηση ότι αγγίζετε ή πιάνετε ένα εικονικό αντικείμενο.
- Τηλεχειρισμός (Teleoperation):
Οι ενεργές απτικές διεπαφές είναι χρήσιμες σε εφαρμογές όπου ένας χρήστης πρέπει να χειριστεί μηχανές ή ρομπότ εξ αποστάσεως, όπως στη βιομηχανία ή στις διαστημικές αποστολές. Οι χρήστες μπορούν να αισθανθούν τη δύναμη ή την αντίσταση κατά τη διάρκεια της αλληλεπίδρασης με το ρομπότ, προσφέροντας μεγαλύτερη ακρίβεια και έλεγχο.
- Παιχνίδια και Ψυχαγωγία:
Σε βιντεοπαιχνίδια, οι ενεργές απτικές διεπαφές χρησιμοποιούνται για να παρέχουν ανάδραση που ενισχύει την εμπειρία του παίκτη, όπως δονήσεις ή αντιδράσεις που προσομοιώνουν την αίσθηση των αντικειμένων ή των επιπτώσεων.

Πλεονεκτήματα και Προκλήσεις των Ενεργών Απτικών Διεπαφών

Πλεονεκτήματα:

- **Ρεαλιστική Εμπειρία:** Η ικανότητα των ενεργών διεπαφών να παράγουν φυσικές δυνάμεις προσφέρει μια πιο ρεαλιστική και ενστικτώδη εμπειρία αλληλεπίδρασης.
- **Προσαρμοστικότητα:** Οι ενεργές διεπαφές μπορούν να προσαρμόζουν την ανάδραση ανάλογα με την αλληλεπίδραση του χρήστη, καθιστώντας τις ιδανικές για προσομοιώσεις και περίπλοκες εφαρμογές.

Προκλήσεις:

- **Κόστος και Πολυπλοκότητα:** Οι ενεργές απτικές διεπαφές συχνά απαιτούν προηγμένη τεχνολογία και υλικά, κάτι που τις καθιστά ακριβές και πολύπλοκες στην κατασκευή και συντήρηση.
- **Ενεργειακές Απαιτήσεις:** Η δημιουργία δυνάμεων και η δυναμική ανάδραση μπορεί να απαιτούν υψηλή κατανάλωση ενέργειας, κάτι που αποτελεί πρόκληση για φορητές ή μικρές συσκευές.
- **Ακρίβεια και Καθυστέρηση:** Η εξασφάλιση ακριβούς και άμεσης απτικής ανάδρασης χωρίς καθυστέρηση είναι μια τεχνική πρόκληση, ιδίως σε εφαρμογές όπου η ακρίβεια είναι κρίσιμη.

2.5.3 Παθητικές Διεπαφές (Passive Haptic Interfaces)

Οι παθητικές απτικές διεπαφές (Passive Haptic Interfaces) αποτελούν μια κατηγορία απτικών τεχνολογιών που επιτρέπουν στους χρήστες να αισθάνονται φυσική επαφή με αντικείμενα και επιφάνειες χωρίς την παροχή ενεργής ανάδρασης από κάποια μηχανή ή συσκευή. Σε αντίθεση με τις ενεργές απτικές διεπαφές, οι παθητικές διεπαφές δεν παράγουν οι ίδιες δυνάμεις ή κινήσεις, αντιθέτως, στηρίζονται στις ιδιότητες των υλικών και των αντικειμένων που είναι ήδη παρόντα στο περιβάλλον για να δημιουργήσουν την αίσθηση της αφής.

Οι παθητικές διεπαφές επιτρέπουν την αίσθηση της αφής μέσω της φυσικής επαφής με σταθερά αντικείμενα ή δομές. Για παράδειγμα, η αίσθηση των πλήκτρων ενός πληκτρολογίου είναι παθητική απτική διεπαφή. Αυτές οι διεπαφές είναι συνήθως πιο απλές από τις ενεργές, καθώς δεν απαιτούν την ύπαρξη μηχανισμών που να παράγουν δυνάμεις.

Χαρακτηριστικά των Παθητικών Απτικών Διεπαφών

Οι παθητικές απτικές διεπαφές χαρακτηρίζονται από τα εξής:

- **Απουσία Ενεργής Ανάδρασης:**
Οι παθητικές διεπαφές δεν περιλαμβάνουν μηχανικούς actuators που θα μπορούσαν να παράγουν δυνάμεις ή δονήσεις. Αντίθετα, η αλληλεπίδραση του χρήστη με τα αντικείμενα είναι φυσική και στηρίζεται στα στατικά χαρακτηριστικά τους, όπως το σχήμα, η υφή, το βάρος και η αντίσταση.
- **Αντίληψη Υλικών και Επιφανειών:**
Η αίσθηση της αφής στις παθητικές διεπαφές προκύπτει από την αλληλεπίδραση του χρήστη με αντικείμενα και επιφάνειες που έχουν διαφορετικά υλικά χαρακτηριστικά. Η αναγνώριση αντικειμένων μέσω της αφής σε παθητικές διεπαφές βασίζεται κυρίως στην αισθητηριακή ικανότητα του χρήστη να επεξεργάζεται πληροφορίες όπως η υφή, η σκληρότητα, και η θερμοκρασία των αντικειμένων.
- **Φυσική Αναγνώριση και Αλληλεπίδραση:**

Οι παθητικές διεπαφές επιτρέπουν στους χρήστες να χρησιμοποιούν τις φυσικές τους ικανότητες για να αναγνωρίζουν και να αλληλεπιδρούν με αντικείμενα. Η αίσθηση της αφής σε αυτές τις διεπαφές είναι άμεση και δεν απαιτεί την εμπλοκή κάποιας τεχνολογίας για την ενίσχυση ή την προσαρμογή της εμπειρίας.

Παραδείγματα Παθητικών Απτικών Διεπαφών

Οι παθητικές απτικές διεπαφές βρίσκονται παντού γύρω μας και μπορούν να ενσωματωθούν σε διάφορες εφαρμογές:

- **Ανάγλυφες Επιφάνειες και Χειριστήρια:**
Ορισμένα φυσικά χειριστήρια και πληκτρολόγια χρησιμοποιούν ανάγλυφα χαρακτηριστικά για να επιτρέπουν την αλληλεπίδραση με τον χρήστη μέσω της αφής. Τα κουμπιά με διαφορετικά σχήματα ή υφές βοηθούν τους χρήστες να τα αναγνωρίζουν και να τα χρησιμοποιούν χωρίς να χρειάζεται να τα δουν.
- **Απτικοί Χάρτες και Εργαλεία:**
Οι απτικοί χάρτες που χρησιμοποιούνται από άτομα με προβλήματα όρασης είναι παραδείγματα παθητικών διεπαφών. Οι χρήστες μπορούν να αισθανθούν τα ανάγλυφα χαρακτηριστικά ενός χάρτη για να κατανοήσουν την τοπογραφία ή τη διάταξη ενός χώρου μέσω της αφής.
- **Φυσικά Σχήματα και Δομές:**
Σε εικονικά περιβάλλοντα και προσομοιώσεις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν φυσικά αντικείμενα ή κατασκευές για να παρέχουν παθητική απτική ανάδραση. Για παράδειγμα, ένα φυσικό πλαίσιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθοδηγήσει τις κινήσεις ενός χρήστη σε μια προσομοίωση, προσδίδοντας μια πιο ρεαλιστική εμπειρία χωρίς τη χρήση ενεργών μηχανισμών.
- **Πληκτρολόγια και Κουμπιά με Μηχανική Αντίσταση:**
Τα μηχανικά πληκτρολόγια και τα κουμπιά με αντίσταση είναι παραδείγματα παθητικών διεπαφών, όπου η αίσθηση που λαμβάνει ο χρήστης προέρχεται από την αντίσταση και την επιστροφή των μηχανικών εξαρτημάτων όταν πατιούνται.

Εφαρμογές των Παθητικών Απτικών Διεπαφών

Οι παθητικές απτικές διεπαφές βρίσκουν εφαρμογή σε πολλούς τομείς λόγω της απλότητάς τους και της φυσικής τους φύσης:

- **Πρόσβαση για Άτομα με Αναπηρίες:**
Οι παθητικές διεπαφές χρησιμοποιούνται ευρέως για να βοηθήσουν άτομα με προβλήματα όρασης να αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον τους. Οι απτικοί χάρτες, τα ανάγλυφα σύμβολα, και τα πληκτρολόγια με ανάγλυφα σημεία αποτελούν βασικά εργαλεία για την προσβασιμότητα.
- **Εκπαίδευση και Μάθηση:**
Στην εκπαίδευση, οι παθητικές διεπαφές χρησιμοποιούνται για να βοηθήσουν τους μαθητές να μάθουν μέσω της αφής. Οι απτικοί χάρτες και τα ανάγλυφα μοντέλα είναι εξαιρετικά εργαλεία για τη διδασκαλία της γεωγραφίας, της ανατομίας, και άλλων θεμάτων όπου η αίσθηση της αφής μπορεί να ενισχύσει την κατανόηση.
- **Παιχνίδια:**
Σε ορισμένα παιχνίδια, χρησιμοποιούνται παθητικά αντικείμενα για να προσδώσουν μια φυσική αίσθηση της αφής. Για παράδειγμα, τα επιτραπέζια παιχνίδια με ανάγλυφα στοιχεία ή παιχνίδια που απαιτούν τη φυσική αλληλεπίδραση με αντικείμενα (όπως τοποθέτηση κομματιών) χρησιμοποιούν παθητικές διεπαφές για να εμπλουτίσουν την εμπειρία του χρήστη.
- **Βιομηχανική Εφαρμογή:**

Στις βιομηχανίες, οι παθητικές διεπαφές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εργαλεία και μηχανές όπου οι χειριστές πρέπει να αισθάνονται τη μηχανική αντίσταση ή τη θέση των εξαρτημάτων μέσω της αφής. Αυτό βοηθά στην εκτέλεση εργασιών με μεγαλύτερη ακρίβεια και ασφάλεια.

Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί των Παθητικών Απτικών Διεπαφών

Πλεονεκτήματα:

- **Απλότητα και Αξιοπιστία:** Οι παθητικές διεπαφές δεν απαιτούν ηλεκτρονικά ή μηχανικά συστήματα για να λειτουργήσουν, καθιστώντας τις πιο αξιόπιστες και ανθεκτικές. Δεν έχουν ανάγκη από παροχή ενέργειας, κάτι που τις καθιστά ιδανικές για εφαρμογές που απαιτούν απλότητα και μακροχρόνια λειτουργία.
- **Φυσική Αλληλεπίδραση:** Επιτρέπουν στους χρήστες να αλληλεπιδρούν με τα αντικείμενα με έναν φυσικό και άμεσο τρόπο, χωρίς την ανάγκη για τεχνολογική διαμεσολάβηση.
- **Χαμηλό Κόστος:** Η κατασκευή παθητικών διεπαφών είναι συνήθως οικονομικότερη σε σχέση με τις ενεργές, λόγω της απουσίας σύνθετων μηχανισμών.

Περιορισμοί:

- **Περιορισμένη Δυναμική Ανάδραση:** Σε αντίθεση με τις ενεργές διεπαφές, οι παθητικές διεπαφές δεν μπορούν να προσαρμόσουν δυναμικά την απτική εμπειρία του χρήστη. Η απτική αίσθηση είναι στατική και εξαρτάται αποκλειστικά από τα χαρακτηριστικά του υλικού ή του αντικειμένου.
- **Απουσία Ανάδρασης Δύναμης:** Οι παθητικές διεπαφές δεν μπορούν να παρέχουν ενεργή ανάδραση δύναμης, κάτι που τις καθιστά λιγότερο κατάλληλες για εφαρμογές που απαιτούν προσομοίωση φυσικών δυνάμεων ή αντίστασης.[5], [13], [14], [1], [8]

2.6 Απτική Ανάδραση (Haptic Feedback):

Η απτική ανάδραση (Haptic Feedback) είναι η διαδικασία κατά την οποία ένας χρήστης λαμβάνει φυσικές αισθήσεις μέσω της αφής κατά την αλληλεπίδραση με ένα σύστημα ή συσκευή. Αυτή η ανάδραση μπορεί να περιλαμβάνει αισθήσεις όπως δόνηση, πίεση, αντίσταση ή ακόμα και αλλαγές στη θερμοκρασία. Η απτική ανάδραση είναι κρίσιμη για την εμπειρία χρήστη, καθώς προσθέτει μια επιπλέον διάσταση αλληλεπίδρασης πέρα από την οπτική και ακουστική ανάδραση.

Η απτική ανάδραση μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε δύο βασικούς τύπους: την ενεργή και την παθητική ανάδραση. Κάθε τύπος έχει τα δικά του χαρακτηριστικά και χρήσεις, προσφέροντας διαφορετικά επίπεδα αλληλεπίδρασης και εμπειρίας για τον χρήστη.

2.6.1 Ενεργή Ανάδραση (Active Haptic Feedback)

Η ενεργή απτική ανάδραση περιλαμβάνει τη δημιουργία φυσικών δυνάμεων και κινήσεων μέσω μηχανικών ή ηλεκτρομηχανικών συσκευών. Αυτή η μορφή ανάδρασης είναι δυναμική και προσαρμόζεται σε πραγματικό χρόνο στις ενέργειες του χρήστη. Τα συστήματα που παρέχουν

ενεργή απτική ανάδραση χρησιμοποιούν συνήθως ενεργοποιητές (actuators) για να δημιουργήσουν φυσικές αντιδράσεις όπως:

- Δόνηση: Η πιο κοινή μορφή ενεργής ανάδρασης, όπου οι συσκευές παράγουν μικρές δονήσεις για να μεταφέρουν πληροφορίες στον χρήστη. Οι δονήσεις αυτές μπορεί να ποικίλουν σε ένταση και συχνότητα, επιτρέποντας τη διαφοροποίηση μεταξύ συμβάντων ή ειδοποιήσεων.
- Αντίσταση: Οι ενεργές συσκευές μπορούν να δημιουργήσουν αντίσταση όταν ο χρήστης επιχειρεί να μετακινήσει ή να πιέσει ένα εικονικό αντικείμενο. Για παράδειγμα, ένα χειριστήριο με ανάδραση δύναμης μπορεί να δίνει την αίσθηση ότι ωθείτε ή τραβάτε ένα αντικείμενο σε ένα εικονικό περιβάλλον.
- Πίεση και Παραμόρφωση: Μερικές ενεργές απτικές συσκευές μπορούν να παράγουν την αίσθηση της πίεσης ή της παραμόρφωσης αντικειμένων, επιτρέποντας στους χρήστες να "αισθάνονται" εικονικά αντικείμενα σαν να ήταν πραγματικά.

Παραδείγματα Ενεργής Ανάδρασης:

- Συσκευές VR: Τα γάντια VR με ενεργοποιητές παρέχουν ανάδραση δύναμης όταν οι χρήστες "πιάνουν" εικονικά αντικείμενα, επιτρέποντας τους να αισθάνονται το βάρος και την υφή αυτών των αντικειμένων.
- Χειριστήρια Παιχνιδιών: Τα χειριστήρια με ανάδραση δόνησης, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στις κονσόλες παιχνιδιών, παρέχουν απτική ανάδραση κατά τη διάρκεια του παιχνιδιού, κάνοντας τον παίκτη να αισθάνεται εκρήξεις, συγκρούσεις ή άλλες ενέργειες.

Πλεονεκτήματα της Ενεργής Ανάδρασης:

- Ρεαλιστική Αλληλεπίδραση: Η δυνατότητα των ενεργών συσκευών να δημιουργούν φυσικές δυνάμεις επιτρέπει μια πιο ρεαλιστική και ενστικτώδη εμπειρία αλληλεπίδρασης.
- Δυναμική Προσαρμογή: Οι ενεργές διεπαφές μπορούν να προσαρμόζουν την απτική ανάδραση σε πραγματικό χρόνο, προσφέροντας εξατομικευμένες και προσαρμοσμένες εμπειρίες.

Προκλήσεις της Ενεργής Ανάδρασης:

- Υψηλό Κόστος και Πολυπλοκότητα: Η ανάγκη για προηγμένες τεχνολογίες, όπως ενεργοποιητές και σύνθετα συστήματα ελέγχου, καθιστούν την ενεργή ανάδραση πιο ακριβή και τεχνικά πολύπλοκη.
- Απαιτήσεις Ενέργειας: Οι ενεργές διεπαφές απαιτούν πηγή ενέργειας για να λειτουργήσουν, κάτι που μπορεί να περιορίσει τη χρήση τους σε φορητές συσκευές.

2.6.2 Παθητική Ανάδραση (Passive Haptic Feedback)

Η παθητική απτική ανάδραση, από την άλλη πλευρά, δεν περιλαμβάνει την ενεργή δημιουργία δυνάμεων ή δονήσεων από μηχανές ή συσκευές. Αντίθετα, η αίσθηση της αφής που λαμβάνει ο χρήστης προκύπτει από τη φυσική αλληλεπίδραση με αντικείμενα ή επιφάνειες που υπάρχουν ήδη στο περιβάλλον. Η παθητική ανάδραση βασίζεται στα φυσικά χαρακτηριστικά των υλικών και των αντικειμένων για να μεταδώσει πληροφορίες μέσω της αφής.

- **Αντίσταση και Σκληρότητα:** Οι χρήστες αισθάνονται την αντίσταση ή τη σκληρότητα των αντικειμένων με βάση τα φυσικά τους χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, όταν ένας χρήστης αγγίζει ένα ξύλινο τραπέζι, η αίσθηση της σκληρότητας και της σταθερότητας προέρχεται από την υλική φύση του τραπεζιού, χωρίς την ανάγκη για πρόσθετους μηχανισμούς.
- **Υφή και Αναγνώριση Επιφανειών:** Οι επιφάνειες με διαφορετικές υφές παρέχουν παθητική ανάδραση μέσω της αφής, επιτρέποντας στους χρήστες να αναγνωρίζουν διαφορετικά υλικά ή αντικείμενα.
- **Σχήμα και Μέγεθος:** Η αίσθηση του σχήματος και του μεγέθους ενός αντικειμένου, όπως ένα κουμπί ή μια χειρολαβή, προέρχεται από την άμεση φυσική αλληλεπίδραση με το αντικείμενο.

Παραδείγματα Παθητικής Ανάδρασης:

- **Πληκτρολόγιο:** Τα πληκτρολόγια με φυσικά κουμπιά παρέχουν παθητική ανάδραση μέσω της μηχανικής αντίστασης και της αίσθησης του κουμπιού όταν πατιέται.
- **Ανάγλυφες Επιφάνειες:** Οι απτικοί χάρτες και τα ανάγλυφα σήματα χρησιμοποιούνται για να παρέχουν πληροφορίες μέσω της αφής.

Πλεονεκτήματα της Παθητικής Ανάδρασης:

- **Απλότητα και Αξιοπιστία:** Χωρίς την ανάγκη για μηχανικούς ή ηλεκτρονικούς μηχανισμούς, η παθητική ανάδραση είναι απλή και αξιόπιστη, με χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης.
- **Μηδενικές Απαιτήσεις Ενέργειας:** Η παθητική ανάδραση δεν απαιτεί ενέργεια, καθιστώντας την ιδανική για εφαρμογές όπου η κατανάλωση ενέργειας πρέπει να είναι ελάχιστη ή μηδενική.

Προκλήσεις της Παθητικής Ανάδρασης:

- **Περιορισμένη Προσαρμοστικότητα:** Η παθητική ανάδραση δεν μπορεί να προσαρμοστεί δυναμικά στις ενέργειες του χρήστη ή στο πλαίσιο της εφαρμογής, κάτι που περιορίζει τη δυνατότητα εξατομίκευσης και προσαρμογής της εμπειρίας.
- **Στατική Ανάδραση:** Η παθητική ανάδραση είναι στατική και περιορίζεται από τα φυσικά χαρακτηριστικά των αντικειμένων και των υλικών.

2.6.3 Παραδείγματα Απτικής Ανάδρασης

Η απτική ανάδραση προσφέρει μια πλούσια και ενστικτώδη αίσθηση αφής, επιτρέποντας στους χρήστες να αλληλεπιδρούν με συσκευές και συστήματα μέσω φυσικών αισθήσεων. Οι βασικές μορφές απτικής ανάδρασης περιλαμβάνουν δονήσεις, δύναμη και αντίσταση, και χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες εφαρμογές για να βελτιώσουν την εμπειρία χρήστη, να παρέχουν πληροφορίες και να ενισχύσουν την ακρίβεια των αλληλεπιδράσεων.

1. Δονήσεις (Vibration Feedback)

Οι δονήσεις είναι η πιο κοινή και αναγνωρίσιμη μορφή απτικής ανάδρασης. Χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν πληροφορίες στον χρήστη μέσω μικρών, επαναλαμβανόμενων κινήσεων της συσκευής. Οι δονήσεις μπορούν να ποικίλουν σε ένταση, συχνότητα και διάρκεια, επιτρέποντας στους σχεδιαστές να δημιουργήσουν μια μεγάλη ποικιλία απτικών σημάτων.

Παραδείγματα Χρήσης Δονήσεων:

- **Συσκευές Κινητών Τηλεφώνων:** Στα smartphones, οι δονήσεις χρησιμοποιούνται για την παροχή ειδοποιήσεων χωρίς ήχο, όπως εισερχόμενες κλήσεις, μηνύματα ή ειδοποιήσεις εφαρμογών. Οι δονήσεις σε διαφορετικά μοτίβα μπορούν να αντιστοιχούν σε διαφορετικές ειδοποιήσεις, επιτρέποντας στους χρήστες να αναγνωρίζουν τι είδους ειδοποίηση έχουν λάβει χωρίς να χρειάζεται να κοιτάξουν την οθόνη.
- **Βιντεοπαιχνίδια:** Στα χειριστήρια παιχνιδιών, οι δονήσεις προσφέρουν απτική ανάδραση κατά τη διάρκεια του παιχνιδιού, όπως όταν ο χαρακτήρας υφίσταται ζημιά, όταν εκρηγνυται κάτι κοντά, ή όταν ο παίκτης αλληλεπιδρά με το περιβάλλον. Οι δονήσεις αυξάνουν την εμπειρία του παίκτη, κάνοντας το παιχνίδι πιο καθηλωτικό.
- **Συστήματα Πλοήγησης Αυτοκινήτου:** Σε συστήματα GPS, οι δονήσεις στο τιμόνι ή στο κάθισμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προειδοποιούν τους οδηγούς για αλλαγές στην πορεία, όπως όταν το όχημα ξεφεύγει από τη λωρίδα ή πλησιάζει σε ένα εμπόδιο.

Πλεονεκτήματα των Δονήσεων:

- **Ευκολία Ενσωμάτωσης:** Οι δονήσεις μπορούν να ενσωματωθούν σε μικρές και φορητές συσκευές, καθιστώντας τις ιδανικές για καθημερινή χρήση.
- **Διακριτικότητα:** Οι δονήσεις προσφέρουν διακριτικές ειδοποιήσεις, κατάλληλες για περιβάλλοντα όπου ο ήχος μπορεί να είναι ενοχλητικός ή ανεπιθύμητος.

Περιορισμοί των Δονήσεων:

- **Περιορισμένη Πληροφορία:** Οι δονήσεις μπορούν να μεταδώσουν μόνο βασικές πληροφορίες και είναι δύσκολο να μεταδώσουν σύνθετα δεδομένα.
- **Εξοικείωση:** Οι χρήστες μπορεί να συνηθίσουν σε συγκεκριμένα μοτίβα δονήσεων, μειώνοντας έτσι την αποτελεσματικότητά τους ως μέσο ειδοποίησης.

2. Δύναμη (Force Feedback)

Η ανάδραση δύναμης είναι μια πιο προηγμένη μορφή απτικής ανάδρασης, όπου οι συσκευές παρέχουν φυσικές δυνάμεις που ασκούνται στον χρήστη. Η ανάδραση δύναμης επιτρέπει στους χρήστες να αισθάνονται την αντίσταση, το βάρος, ή την ώθηση που ασκείται από ή σε ένα αντικείμενο κατά τη διάρκεια της αλληλεπίδρασης. Αυτή η μορφή ανάδρασης είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ακρίβεια και φυσική αίσθηση.

Παραδείγματα Χρήσης Δύναμης:

- **Προσομοιωτές Πτήσης:** Στους προσομοιωτές πτήσης, η ανάδραση δύναμης στο χειριστήριο επιτρέπει στους πιλότους να αισθάνονται την αντίσταση και την αεροδυναμική δύναμη καθώς ελέγχουν το αεροσκάφος. Αυτή η ανάδραση βελτιώνει την αίσθηση ρεαλισμού και βοηθά τους πιλότους να προετοιμαστούν για πραγματικές συνθήκες πτήσης.
- **Ρομποτική Χειρουργική:** Σε συστήματα ρομποτικής χειρουργικής, οι χειρουργοί λαμβάνουν ανάδραση δύναμης μέσω των εργαλείων τους, επιτρέποντάς τους να αισθάνονται την αντίσταση των ιστών και να εκτελούν λεπτές κινήσεις με ακρίβεια. Αυτό μειώνει τον κίνδυνο τραυματισμού των ασθενών και βελτιώνει την έκβαση της επέμβασης.
- **Χειριστήρια Βιντεοπαιχνιδιών:** Ορισμένα εξελιγμένα χειριστήρια παιχνιδιών προσφέρουν ανάδραση δύναμης για να δώσουν την αίσθηση της πραγματικής δύναμης ή αντίστασης, όπως όταν οδηγεί κανείς ένα όχημα ή πυροβολεί με ένα όπλο σε ένα παιχνίδι.

•
Πλεονεκτήματα της Δύναμης:

- **Αυξημένη Ρεαλιστικότητα:** Η ανάδραση δύναμης μπορεί να προσομοιώσει με ακρίβεια τις φυσικές ιδιότητες των αντικειμένων, προσφέροντας μια πιο ρεαλιστική και ενστικτώδη εμπειρία.
- **Βελτίωση Ακρίβειας:** Σε επαγγελματικές εφαρμογές, όπως η χειρουργική ή η μηχανική, η ανάδραση δύναμης επιτρέπει στους χρήστες να εκτελούν λεπτές και ακριβείς κινήσεις.

Περιορισμοί της Δύναμης:

- **Κόστος και Πολυπλοκότητα:** Οι συσκευές με ανάδραση δύναμης είναι συνήθως πιο ακριβές και τεχνικά πιο πολύπλοκες από άλλες μορφές απτικής ανάδρασης.
- **Ενεργειακές Απαιτήσεις:** Η δημιουργία δυνάμεων απαιτεί περισσότερη ενέργεια, καθιστώντας τη χρήση σε φορητές συσκευές πιο δύσκολη.

3. Αντίσταση (Resistance Feedback)

Η αντίσταση είναι μια μορφή απτικής ανάδρασης όπου οι συσκευές προσφέρουν αντίσταση στην κίνηση του χρήστη. Η αντίσταση μπορεί να είναι στατική ή μεταβλητή και χρησιμοποιείται για να παρέχει μια αίσθηση φυσικής παρουσίας ή να εμποδίζει μια κίνηση, δίνοντας στον χρήστη την αίσθηση της αντίδρασης του αντικειμένου.

Παραδείγματα Χρήσης Αντίστασης:

- **Πληκτρολόγια και Κουμπιά:** Τα πληκτρολόγια με μηχανική αντίσταση και τα κουμπιά σε διάφορες συσκευές παρέχουν απτική ανάδραση όταν πιέζονται. Η αντίσταση που νιώθει ο χρήστης όταν πιέζει ένα πλήκτρο ή ένα κουμπί βοηθά στην αποφυγή λανθασμένων ενεργειών και προσφέρει ικανοποιητική αίσθηση ολοκλήρωσης της ενέργειας.
- **Εικονική Πραγματικότητα (VR):** Σε περιβάλλοντα VR, η αντίσταση χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει την αίσθηση ότι ένα αντικείμενο είναι στερεό ή ότι υπάρχει ένας φραγμός. Για παράδειγμα, ένα γάντι VR μπορεί να προσφέρει αντίσταση όταν ο χρήστης επιχειρεί να "σπρώξει" έναν εικονικό τοίχο.
- **Συστήματα Προσομοίωσης Οδήγησης:** Στους προσομοιωτές οδήγησης, η αντίσταση στο τιμόνι μπορεί να προσαρμοστεί για να αναπαριστά τις συνθήκες οδήγησης, όπως η οδήγηση σε ανώμαλο δρόμο ή το στρίψιμο σε μια στροφή με μεγάλη ταχύτητα.

Πλεονεκτήματα της Αντίστασης:

- **Ρεαλιστική Αίσθηση:** Η αντίσταση προσφέρει μια άμεση και φυσική αίσθηση φυσικής επαφής, καθιστώντας την ιδανική για προσομοιώσεις και εφαρμογές όπου η φυσική αλληλεπίδραση είναι κρίσιμη.
- **Βελτίωση της Εμπειρίας Χρήστη:** Η αντίσταση μπορεί να προσφέρει επιπλέον ανατροφοδότηση στους χρήστες, βοηθώντας τους να κατανοήσουν καλύτερα τις ενέργειές τους και να εκτελέσουν κινήσεις με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Περιορισμοί της Αντίστασης:

- **Περιορισμένη Προσαρμοστικότητα:** Η στατική αντίσταση μπορεί να μην είναι επαρκώς προσαρμοσμένη στις ενέργειες του χρήστη ή στις ανάγκες της εφαρμογής.

- Απαιτήσεις Χώρου: Οι συσκευές που προσφέρουν αντίσταση μπορεί να είναι ογκώδεις ή να απαιτούν φυσικό χώρο, κάτι που μπορεί να περιορίσει την εφαρμογή τους σε φορητές ή μικρές συσκευές.

2.6.4 Επικοινωνία και Έλεγχος Δύναμης της Ανάδρασης

Η επικοινωνία και ο έλεγχος δύναμης (Force Feedback Communication and Control) είναι μια κρίσιμη πτυχή των σύγχρονων συστημάτων απτικής ανάδρασης, ιδιαίτερα σε εφαρμογές όπου η φυσική αλληλεπίδραση με το περιβάλλον ή τα εικονικά αντικείμενα απαιτεί ακριβή και ρεαλιστική αίσθηση δύναμης. Το force feedback επιτρέπει στους χρήστες να "αισθάνονται" τις δυνάμεις που ασκούνται από ή σε ένα αντικείμενο, προσφέροντας μια ενστικτώδη και φυσική εμπειρία αλληλεπίδρασης που είναι ζωτικής σημασίας σε τομείς όπως η ρομποτική, οι προσομοιωτές, και τα συστήματα εικονικής πραγματικότητας (VR).

Τι είναι η Επικοινωνία και Έλεγχος Δύναμης;

Η επικοινωνία και έλεγχος δύναμης αναφέρεται στη διαδικασία κατά την οποία ένα σύστημα υπολογίζει, παράγει και ελέγχει τις δυνάμεις που αισθάνεται ο χρήστης κατά τη διάρκεια της αλληλεπίδρασης. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει την ανίχνευση των κινήσεων του χρήστη, τον υπολογισμό των αντίστοιχων δυνάμεων που πρέπει να ασκηθούν, και την ανάδραση αυτών των δυνάμεων μέσω ενεργοποιητών (actuators) στο χρήστη.

Τεχνολογίες Ελέγχου Δύναμης

Η ανάπτυξη και η χρήση του force feedback απαιτεί τη συνεργασία διαφόρων τεχνολογιών και αρχών μηχανικής. Οι βασικές τεχνολογίες περιλαμβάνουν:

Αισθητήρες Δύναμης και Κίνησης:

- Οι αισθητήρες δύναμης είναι απαραίτητοι για την ανίχνευση των δυνάμεων που ασκούνται από ή στον χρήστη. Αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να είναι τοποθετημένοι σε χειριστήρια, χειρολαβές, ή γάντια VR, και ανιχνεύουν τις αντιδράσεις του χρήστη καθώς αυτός κινείται ή αλληλεπιδρά με το περιβάλλον.
- Οι αισθητήρες κίνησης παρακολουθούν την ακριβή θέση και την ταχύτητα των μελών του σώματος του χρήστη, παρέχοντας κρίσιμες πληροφορίες στο σύστημα ελέγχου για τον υπολογισμό των δυνάμεων.

Αλγόριθμοι Ελέγχου:

- Οι αλγόριθμοι ελέγχου είναι το κεντρικό σημείο επεξεργασίας που συνδέει τις πληροφορίες από τους αισθητήρες με τους ενεργοποιητές. Αυτοί οι αλγόριθμοι υπολογίζουν την απαιτούμενη δύναμη που πρέπει να παραχθεί για να προσομοιώσει τη φυσική αλληλεπίδραση που επιθυμεί ο χρήστης.
- Ο έλεγχος δύναμης συνήθως περιλαμβάνει αλγόριθμους αναλογικού, ολοκληρωτικού και παραγωγού ελέγχου (PID control), που επιτρέπουν ακριβή και σταθερή παραγωγή δύναμης.

Ενεργοποιητές (Actuators):

Οι ενεργοποιητές είναι τα μηχανικά ή ηλεκτρομηχανικά συστήματα που παράγουν τις δυνάμεις που αισθάνεται ο χρήστης. Αυτοί οι ενεργοποιητές μπορεί να περιλαμβάνουν

μοτέρ, σερβοκινητήρες, vibration motors, πιεζοηλεκτρικά modules, οι οποίοι παράγουν τις απαιτούμενες κινήσεις και αντιστάσεις.

Ανάλυση και Προσομοίωση Δύναμης:

Η προσομοίωση των φυσικών δυνάμεων απαιτεί την ανάλυση των φυσικών ιδιοτήτων των αντικειμένων και του περιβάλλοντος. Αυτό περιλαμβάνει την προσομοίωση της μάζας, της αδράνειας, της τριβής, και άλλων παραμέτρων που επηρεάζουν την αίσθηση της δύναμης.[11]

Κεφάλαιο 3ο: Ανάλυση Τεχνολογιών και Υλικού

3.1 Ανάλυση ESP32-WROOM-32E

Ο **ESP32-WROOM-32EE** αποτελεί ένα σύγχρονο, ενσωματωμένο σύστημα μικροελεγκτή με εντυπωσιακή επεξεργαστική ισχύ, ευρεία γκάμα περιφερειακών, και προηγμένες δυνατότητες ασύρματης επικοινωνίας. Χάρη στην ευελιξία του, αξιοποιείται σε εφαρμογές φορητής τεχνολογίας, συστήματα Internet of Things (IoT), καθώς και διαδραστικά συστήματα απτικής ανάδρασης.

3.1.1 Επεξεργαστική Ισχύς και Μνήμη

Ο πυρήνας του συστήματος βασίζεται σε διπλό επεξεργαστή Xtensa® 32-bit LX6, χρονισμένο έως και στα 240 MHz, παρέχοντας υπολογιστική δυνατότητα τόσο για πραγματικού χρόνου επεξεργασία δεδομένων όσο και για χειρισμό πολλαπλών νημάτων. Διαθέτει:

- 448 KB ROM
- 520 KB SRAM, επιμερισμένη σε IRAM και DRAM.
- Επέκταση με εξωτερική Flash έως και 16 MB.
- Υποστήριξη PSRAM

3.1.2 Δικτυακές και Ασύρματες Δυνατότητες

Το ESP32 υποστηρίζει δύο βασικά πρωτόκολλα ασύρματης επικοινωνίας:

- Wi-Fi 802.11 b/g/n στα 2.4 GHz, με υποστήριξη AP/STA modes, γρήγορο roaming, και πλήρη TCP/IP stack.
- Bluetooth v4.2 BR/EDR και BLE, επιτρέποντας διασύνδεση με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας για φορητές και κινητές εφαρμογές.

Οι δυνατότητες αυτές το καθιστούν εξαιρετικά κατάλληλο για ασύρματη σύνδεση με υπολογιστικά συστήματα, όπως το Unity, χωρίς την ανάγκη επιπλέον hardware.

3.1.3 Περιφερειακά και Διεπαφές Εισόδου/Εξόδου

Το ESP32 υποστηρίζει ένα εντυπωσιακό πλήθος περιφερειακών διεπαφών:

- 34 GPIO pins, από τα οποία τα περισσότερα είναι επαναχρησιμοποιήσιμα για ψηφιακή/αναλογική είσοδο και έξοδο.
- 12-bit ADC και 8-bit DAC , απαραίτητα για ανάγνωση αισθητήρων και παραγωγή σημάτων.
- SPI, I2C, UART, PWM, I2S, υποστηρίζοντας πληθώρα πρωτοκόλλων επικοινωνίας και χειρισμού σημάτων.
- Capacitive Touch Sensing, χρήσιμο για ανάπτυξη επιφανειών αφής.
- CAN υποστήριξη για βιομηχανικές εφαρμογές.

3.1.4 Διαχείριση Ισχύος και Ενεργειακή Αποδοτικότητα

Ο μικροελεγκτής παρέχει προηγμένες λειτουργίες διαχείρισης ενέργειας, με δυνατότητα λειτουργίας σε πολλαπλά sleep modes:

- Active Mode: έως 240 mA @ Wi-Fi TX
- Modem Sleep / Light Sleep: ~5–10 mA
- Deep Sleep: <10 μ A
- Hibernation: ~2.5 μ A

Η υποστήριξη ULP coprocessor επιτρέπει την εκτέλεση ενεργειακά αποδοτικών εργασιών, ακόμη και όταν ο κύριος επεξεργαστής είναι ανενεργός.

Θερμική Ανοχή και Πιστοποιήσεις

Το module λειτουργεί αξιόπιστα σε εύρος θερμοκρασίας -40°C έως $+85^{\circ}\text{C}$, με υψηλή σταθερότητα λειτουργίας ακόμη και σε δυσμενείς συνθήκες. Επιπλέον, συνοδεύεται από όλες τις απαραίτητες πιστοποιήσεις (RoHS, FCC, CE), καθιστώντας το κατάλληλο για εμπορική χρήση.

Πλεονεκτήματα για το Σύστημα Haptic Glove

Η χρήση του ESP32-WROOM-32E αποδείχθηκε καταλυτική για την επιτυχία της παρούσας εφαρμογής:

- Απευθείας σειριακή επικοινωνία με το Unity μέσω USB, χωρίς την ανάγκη ενδιάμεσου firmware bridge όπως το SteamVR ή το OpenGloves.
- Χαμηλή κατανάλωση και υψηλή σταθερότητα για συνεχή λειτουργία με φορητές πηγές ισχύος (powerbanks).
- Ταχεία ADC ανάγνωση για real-time μετατροπή των σημάτων των αισθητήρων Hall.
- Επεκτασιμότητα για ενσωμάτωση επιπλέον λειτουργιών, όπως δόνηση, αισθητήρες αφής[21]

3.2 Πιεζοηλεκτρικός Ενεργοποιητής PowerHap 1919H022V120 – Ανάλυση Datasheet

Ο PowerHap 1919H022V120 της TDK είναι ένας προηγμένος ενεργοποιητής τεχνολογίας mass-loaded piezo, σχεδιασμένος για απτικές εφαρμογές υψηλής ισχύος. [24]

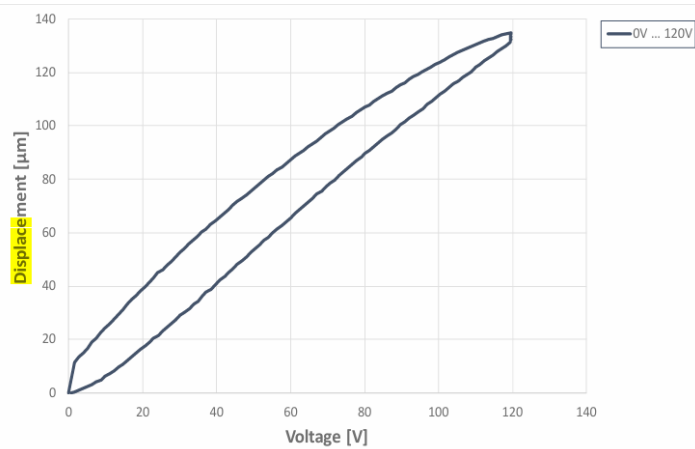
Κύρια Ηλεκτρικά και Μηχανικά Χαρακτηριστικά:

Παράμετρος	Τιμή	Σημασία στην Υλοποίηση
Χωρητικότητα (C)	2.5 $\mu\text{F} \pm 0.5 \mu\text{F}$,1 kHz	Υψηλό φορτίο → απαιτεί ισχυρό οδηγό (DRV8662)
Τάση λειτουργίας (V _{pp})	0–120 V (ονομαστική), έως 200 V _{pp} μέγιστη	Καθορίζει ένταση δόνησης – οδηγείται από boost
Μετατόπιση	έως 135 μm , 120 V	Αναλογική σχέση με την τάση – linearly driven
Δύναμη απόκρισης	έως 19 N (με αντίσταση φορτίου)	Καθορίζει την απτική ένταση
Αντιδραστική δύναμη (stiffness)	~160 N/mm	Απαραίτητο για μηχανική σχεδίαση σε finger mount
Συντονιστική συχνότητα	~13 kHz	Χρήσιμη για αποφυγή μηχανικής ενίσχυσης ή αστάθειας
Εύρος λειτουργίας	έως 500 Hz	Συμβατό με feedback σε ανθρώπινη απτική αίσθηση
Απόκριση τάσης-επιτάχυνσης	έως 20–25g, 120 V	Μεγάλη ένταση ανάδρασης – επαρκής για tactile pulse

Πίνακας 4.1 - Ηλεκτρικά και Μηχανικά Χαρακτηριστικά 1919H022V120

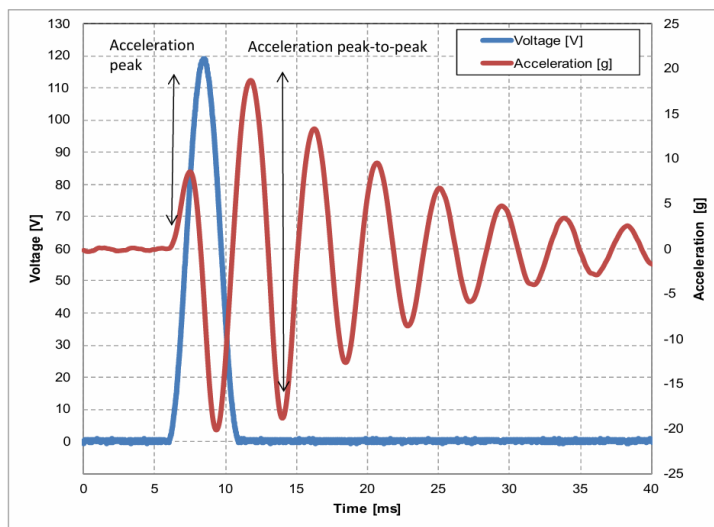
Ανάλυση Καμπυλών:

- **Displacement vs Voltage:** Η μετατόπιση είναι σχεδόν γραμμική μέχρι τα ~120 V και φθάνει περίπου τα 130–135 μm , επιβεβαιώνοντας ότι η παραμόρφωση είναι προβλέψιμη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για απόδοση υψής ή ανατροφοδοτούμενης πίεσης.



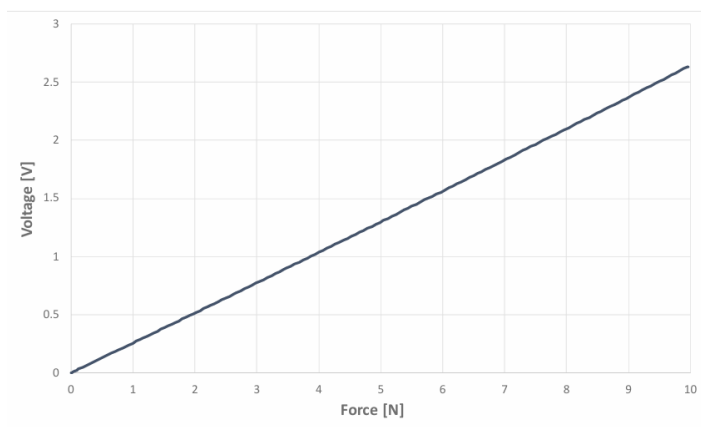
Σχήμα 4.1 – Μετατόπιση vs Τάση

- Acceleration vs Time**
 Παράγει επιτάχυνση έως 22 g peak (100 g φορτίο, 5 ms pulse) με εξαιρετικά σύντομο χρόνο απόκρισης κρίσιμο για δυναμική ανατροφοδότηση.



Σχήμα 4.2 – Επιτάχυνση vs Χρόνος

- Sensor Mode**
 Κατά την εφαρμογή συμπιεστικής δύναμης, το στοιχείο παράγει τάση, γεγονός που επιτρέπει την ενσωμάτωσή του ως force-sensing element.



Σχήμα 4.3 – Τάση vs Δύναμη

3.3 Οδηγός Piezo DRV8662 – Ανάλυση Datasheet

Ο DRV8662 της Texas Instruments είναι ένας ολοκληρωμένος piezo driver που περιλαμβάνει boost converter και διαφορική έξοδο, σχεδιασμένος για την οδήγηση χωρητικών φορτίων όπως οι PowerHap actuators.

Κύρια Τεχνικά Χαρακτηριστικά:

Παράμετρος	Τιμή	Σημασία στην Υλοποίηση
Τροφοδοσία (VDD)	2.5–5.5 V	Ιδανικό για ESP32 χωρίς εξωτερικά ρυθμιστικά
Μέγιστο Output Voltage	έως ± 100 Vpp	Επαρκές για πλήρη ενεργοποίηση του PowerHap
Εύρος συχνοτήτων εισόδου	έως 500 Hz (συνεχής), έως 2 kHz (burst)	Συμβατό με απτική είσοδο σε ανθρώπινη περιοχή
Οδηγούμενη χωρητικότητα	έως 4.7 μ F (με 200 Hz burst @ 105 V)	Συμβατότητα με το PowerHap (2.5 μ F)
Ρεύμα εξόδου (sink/source)	έως 120 mA κατά μέγιστο	Απαιτεί προσοχή σε ρεύμα για συνεχή λειτουργία
Input Mode	PWM ή αναλογικό σήμα (DC–2 kHz)	Ευελιξία στον έλεγχο
Προστασία	UVLO, OCP, Thermal, Short-circuit	Ιδανικό για φορητές και compact συσκευές

Πίνακας 4.2 - Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά DRV8662

Παρατηρήσεις για την Υλοποίηση:

- Το boost converter παράγει την υψηλή τάση από χαμηλή πηγή, γεγονός που καθιστά την ολοκλήρωση εξαιρετικά απλή και ασφαλή για wearable εφαρμογή.
- Η διαφορική έξοδος (OUT+, OUT-) επιτρέπει την πλήρη ταλάντωση της τάσης γύρω από το μηδέν, οδηγώντας πιο αποτελεσματικά το piezo φορτίο χωρίς ανάγκη γείωσης.
- Η χαμηλή απαιτούμενη εξωτερική παθητική υποδομή (μόνο 1 boost inductor και 1 diode) μειώνει τον όγκο και την πολυπλοκότητα του PCB.[20]

Συμπεράσματα:

Η αναλυτική μελέτη των datasheets επιβεβαιώνει ότι:

- Η επιλογή του PowerHar 1919H022V120 παρέχει υψηλή ένταση και δυναμική απόκριση σε ανθρώπινα αντιληπτές συχνότητες (100–400 Hz).
- Ο DRV8662 είναι ιδανικά προσαρμοσμένος για να οδηγεί το PowerHar, προσφέροντας τάση έως ± 100 V_{pp} και υποστήριξη φορτίου μέχρι 4.7 μ F, συμβατότητα που τεκμηριώνεται και από εφαρμογές τρίτων .
- Η ηλεκτρική ταυτότητα του piezo συνδυάζεται με μεγάλη χωρητικότητα και υψηλή τάση οδήγησης, γεγονός που απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό για την αποφυγή θερμικής ή μηχανικής καταπόνησης ιδίως κατά την παρατεταμένη χρήση.

3.4 Ανάλυση Αισθητήρα Hall 49E: Χαρακτηριστικά και Τεχνικές Προδιαγραφές

Ο αισθητήρας Hall τύπου 49E χρησιμοποιήθηκε στο παρόν σύστημα για την ανίχνευση της σχετικής θέσης των δακτύλων, μέσω της μέτρησης της έντασης του μαγνητικού πεδίου που προκαλείται από την μετακίνηση μόνιμου μαγνήτη σε συνάρτηση με την κάμψη ή έκταση των αρθρώσεων. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στο φαινόμενο Hall, σύμφωνα με το οποίο η εφαρμογή μαγνητικού πεδίου κάθετα σε έναν αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα προκαλεί την ανάπτυξη εγκάρσιας διαφοράς δυναμικού, η οποία είναι ανάλογη της έντασης του πεδίου. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας ανήκει στην κατηγορία των αναλογικών Hall effect sensors, γεγονός που τον καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλο για εφαρμογές συνεχούς παρακολούθησης θέσης, καθώς η έξοδός του μεταβάλλεται ομαλά ως προς την αλλαγή έντασης του πεδίου.[

Ηλεκτρικά και Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Αισθητήρα Hall 49E

Παράμετρος	Τιμή	Σημείωση
Τάση Λειτουργίας (V _{cc})	4.5 – 6.0 V	Τυπικά 5V για χρήση με μικροελεγκτή
Ρεύμα Λειτουργίας (I _{CC})	4.0 – 10.0 mA	Χαμηλή κατανάλωση, συμβατό με embedded συστήματα
Τάση Εξόδου σε μηδέν πεδίο	2.25 – 2.75 V	Κανονικά ~2.5V (σε V _{cc} = 5V), απαιτεί offset calibration
Εναισθησία (S)	1.4 – 1.6 mV/G	Παρέχει γραμμική απόκριση με εύρος ± 1000 Gauss
Τύπος Εξόδου	Αναλογική (Linear)	Συνεχής παρακολούθηση μαγνητικής έντασης
Θερμοκρασιακό Εύρος Λειτουργίας	-40 °C έως +100 °C	Κατάλληλο για φορητές εφαρμογές
Γραμμικό Εύρος Ανίχνευσης	$\sim \pm 1000$ G	Συμβατό με μικρούς μαγνήτες NdFeB σε κοντινές αποστάσεις

Πίνακας 4.3 - Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά 49E

Τεχνική Ερμηνεία και Εφαρμογή

Η ευαισθησία του αισθητήρα ρυθμίζει την απόκρισή του σε μεταβολές του μαγνητικού πεδίου. Δεδομένου ότι η έξοδος κυμαίνεται γύρω από το μισό της τάσης τροφοδοσίας (2.5 V σε $V_{CC} = 5$ V), η απόκλιση λόγω μαγνητικής μετατόπισης καταγράφεται με αυξημένη ή μειωμένη τάση εξόδου, αντίστοιχα για νότια ή βόρεια πόλωση του μαγνητικού πεδίου. Αυτή η μεταβολή μετατρέπεται στη συνέχεια από τον μικροελεγκτή σε ψηφιακή αναπαράσταση της κάμψης ή έκτασης των δακτύλων, επιτρέποντας τη δημιουργία ενός δυναμικού συστήματος εντοπισμού κίνησης σε πραγματικό χρόνο. Για την παραγωγή του απαραίτητου πεδίου, χρησιμοποιήθηκαν μικροί νεοδυμίου μαγνήτες διαστάσεων 3×2 mm, με επιφανειακή ένταση μαγνητικού πεδίου άνω των 6000 Gauss. Η επιλογή αυτών των μαγνητών βασίστηκε σε οδηγίες του ανοικτού αποθετηρίου LucidVR, όπου προτείνεται η χρήση πέντε μαγνητών ανά δάχτυλο. Η υψηλή πυκνότητα μαγνητικής ροής επιτρέπει στον αισθητήρα Hall να λειτουργεί εντός του γραμμικού του εύρους, με ακρίβεια, ενώ η μικρή γεωμετρική διάσταση διευκολύνει την ενσωμάτωση στο περιορισμένο προφίλ ενός wearable γαντιού. Η χαμηλή απαίτηση ρεύματος και η δυνατότητα λειτουργίας εντός των συνηθισμένων τάσεων τροφοδοσίας καθιστούν τον 49E ιδανικό για ενσωμάτωση σε wearable συστήματα με περιορισμένο ενεργειακό προϋπολογισμό. Επιπλέον, ιδιαίτερη σημασία έχει η σταθερότητα της τάσης εξόδου σε θερμικά κυμαινόμενες συνθήκες, κρίσιμο χαρακτηριστικό για την ορθή απεικόνιση χειρονομιών. Για την αντιστάθμιση πιθανών αποκλίσεων, εφαρμόστηκε software-based offset κατά την αρχικοποίηση κάθε αισθητήρα, βελτιώνοντας τη συνολική ακρίβεια μέτρησης. Στην παρούσα εφαρμογή, ο 49E τοποθετήθηκε σε απόσταση ικανή ώστε η μέγιστη κάμψη να επιφέρει μεταβολή κοντά στο όριο του γραμμικού εύρους απόκρισης, εξασφαλίζοντας μέγιστη δυναμική ανάλυση εντός του διαθέσιμου εύρους τιμών ADC του ESP32. Ο προσεκτικός συσχετισμός της μηχανικής διαδρομής του δακτύλου με την απόσταση και κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου απέναντι στον αισθητήρα επιτρέπει την αντιστοίχιση της φυσικής κίνησης σε ψηφιακή πληροφορία με ιδιαίτερη ευαισθησία και συνέπεια.[23]

3.5 Ανάλυση Μικροσερβοκινητήρα MG90S

Ο μικροσερβοκινητήρας MG90S χρησιμοποιήθηκε για την παροχή μηχανικής απτικής ανάδρασης σε συγκεκριμένες εφαρμογές πειραματισμού. Ο κινητήρας αυτός είναι ευρέως διαδεδομένος στον χώρο της ρομποτικής και των embedded συστημάτων λόγω του μικρού μεγέθους του, της αξιοπιστίας και της ικανότητας παροχής σχετικά υψηλής ροπής σε χαμηλή τάση λειτουργίας.

Διαθέτει ενσωματωμένο κύκλωμα ελέγχου θέσης μέσω PWM (Pulse Width Modulation), που επιτρέπει τη ρύθμιση της γωνιακής θέσης του άξονα εξόδου με υψηλή ακρίβεια.[22]

Τεχνικά Χαρακτηριστικά του MG90S

Παράμετρος	Τιμή	Σημείωση
Τάση Λειτουργίας	4.8 – 6.0 V	Βέλτιστη λειτουργία στα 5V
Ρεύμα λειτουργίας (χωρίς φορτίο)	120 – 250 mA	Κατάλληλο για άμεση τροφοδοσία από ESP32 μόνο μέσω driver

Ρεύμα αιχμής (stall current)	έως 700 – 800 mA	Απαιτεί εξωτερική τροφοδοσία για αποφυγή πτώσης τάσης
Ροπή εξόδου (5V)	1.8 – 2.2 kg·cm	Επαρκής για ελαφρές εφαρμογές ενεργοποιητών
Εύρος Κίνησης	0° – 180°	Γωνιακή θέση ελέγχεται μέσω PWM
Χρόνος Ανταπόκρισης	~0.1 – 0.2 s/60°	Εξαρτάται από τάση και φορτίο
Βάρος	~13.4 g	Κατάλληλο για ελαφρές και φορητές κατασκευές
Γρανάζια	Μεταλλικά (metal gear)	Αυξημένη ανθεκτικότητα και διάρκεια ζωής

Πίνακας 4.4 - Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά MG90S

Λειτουργική Περιγραφή και Ρύθμιση PWM

Η θέση του άξονα του MG90S ελέγχεται μέσω σήματος PWM. Τυπικά, η χρήση παλμών 20 ms περιόδου με pulse width 1–2 ms αντιστοιχεί σε γωνίες 0°–180°, αντίστοιχα. Αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει την εύκολη διασύνδεση με μικροελεγκτές όπως ο ESP32, που διαθέτουν ενσωματωμένα PWM peripherals και βιβλιοθήκες του Arduino IDE.

Η απαιτούμενη ακρίβεια του PWM επιβάλλει τη χρήση hardware PWM timers και όχι software-based καθυστερήσεων, ειδικά όταν απαιτείται σταθερότητα.

Σχόλια Εφαρμογής

Λόγω των σχετικά υψηλών απαιτήσεων σε ρεύμα κατά τις μεταβατικές καταστάσεις (start-up, stall), προτιμήθηκε η τροφοδοσία μέσω ξεχωριστού 5V bus με κατάλληλη γείωση (common ground) ως προς τον ESP32, ώστε να αποφεύγονται αναπάντεχες επανεκκινήσεις ή αστάθεια λειτουργίας.

Κεφάλαιο 4ο: Θεωρητικό Υπόβαθρο

4.1 Unity

4.1.1 Εισαγωγή στη πλατφόρμα Unity

Η Unity είναι μία από τις πλέον διαδεδομένες μηχανές ανάπτυξης εφαρμογών και περιβαλλόντων 3D, VR και AR, χρησιμοποιούμενη ευρέως σε τομείς όπως τα βιντεοπαιχνίδια, οι προσομοιώσεις, η εκπαίδευση και η ιατρική τεχνολογία. Το ευέλικτο περιβάλλον της και η δυνατότητα για πολυπλατφορμική ανάπτυξη καθιστούν τη Unity ιδανική για την υλοποίηση αλληλεπιδραστικών συστημάτων που απαιτούν ταυτόχρονα γραφική απεικόνιση, αισθητήρες και απτική ανάδραση.

Ένα από τα βασικά της πλεονεκτήματα είναι η ευκολία στη σειριακή επικοινωνία με μικροελεγκτές, όπως το ESP32. Μέσω του C# SerialPort class, επιτρέπεται η αμφίδρομη μεταφορά δεδομένων με χαμηλό latency, γεγονός που καθιστά δυνατή την ανταλλαγή πραγματικού χρόνου

μεταξύ του φυσικού και του εικονικού κόσμου – για παράδειγμα, για τη μετάδοση γωνιών κάμψης ή την ενεργοποίηση απτικής ανάδρασης.

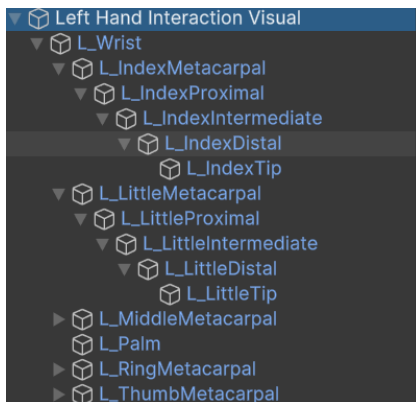
4.1.2 Unity και Απτικές Διεπαφές

Οι απτικές διεπαφές (haptic interfaces) προσφέρουν ένα επιπλέον επίπεδο αλληλεπίδρασης στις εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας. Αντί ο χρήστης να περιορίζεται στην οπτική/ακουστική αναπαράσταση, μπορεί να “αισθανθεί” ένα αντικείμενο να πιέσει, να πιάσει ή και να σπρώξει. Η Unity υποστηρίζει την υλοποίηση τέτοιων λειτουργιών μέσω custom scripts και του XR Interaction Toolkit.

Χάρη στην modular αρχιτεκτονική της, η πλατφόρμα επιτρέπει τον συνδυασμό δεδομένων από αισθητήρες με animated ή ρεαλιστικά hand models και την αποστολή σημάτων ανάδρασης πίσω σε actuators.

4.1.3 Οπτικοποίηση Χεριού & Hand Tracking

Μία σημαντική δυνατότητα της Unity είναι η οπτικοποίηση χεριών σε πραγματικό χρόνο μέσω του λεγόμενου Hand Visualizer. Σε συμβατές συσκευές όπως το Meta Quest 2, ο χρήστης μπορεί να ενεργοποιήσει hand tracking απλώς αφήνοντας τα controller σε κάθετη θέση και με επαρκή φωτισμό, χωρίς την ανάγκη για επιπλέον αισθητήρες.



Σχήμα 1.1 – Εικόνα από το VR Core δείγμα που δείχνει τη λειτουργία hand visualisation.

Η Unity, μέσω του OpenXR subsystem και XR Plugin Management, επιτρέπει την παρακολούθηση της θέσης και στάσης των δακτύλων, κάτι που μπορεί να αξιοποιηθεί για calibration, οπτική αναπαράσταση και φυσικό έλεγχο αντικειμένων. Ο Hand Visualizer σε συνδυασμό με custom glove data μπορεί να βοηθήσει στη σύγκριση μεταξύ φυσικού και ψηφιακού χεριού.

4.1.4 Gestures: Grab και Pinch

Η Unity υποστηρίζει την αναγνώριση χειρονομιών μέσω hand tracking, glove inputs ή VR controllers. Δύο βασικά gestures είναι:

- **Grab:** Ενεργοποιείται όταν τα δάχτυλα κάμπτονται και πλησιάζουν τον αντίχειρα, όπως όταν πιάνουμε ένα αντικείμενο. Το gesture αυτό χρησιμοποιείται για ενέργειες όπως σύλληψη, μετακίνηση ή ενεργοποίηση μηχανισμών force feedback.
- **Pinch:** Εντοπίζεται όταν ο δείκτης αγγίζει τον αντίχειρα. Χρησιμοποιείται για επιλογή αντικειμένων, ενεργοποίηση κουμπιών ή έναρξη αλληλεπίδρασης με ελαφριά πίεση.[30]

Η Unity δίνει τη δυνατότητα ενεργοποίησης συμβάντων βάσει αυτών των gestures, συνδυάζοντας thresholds στις γωνίες κάμψης ή σε απόσταση ανάμεσα σε δάχτυλα.

4.1.5 Interaction Toolkit και Λογική Interactor / Interactable

Το XR Interaction Toolkit της Unity αποτελεί τον βασικό μηχανισμό για αλληλεπίδραση σε XR εφαρμογές. Ορίζονται δύο βασικοί ρόλοι:

- **Interactor:** Το χέρι, ο ελεγκτής ή η ακτίνα (ray) που στέλνει εντολές.
- **Interactable:** Το αντικείμενο που μπορεί να αλληλεπιδράσει, όπως ένας κύβος ή ένα κουμπί.

Ο μηχανισμός αυτός προσφέρει ρεαλιστική αίσθηση αλληλεπίδρασης – για παράδειγμα, ένας χρήστης μπορεί να πιάσει έναν εικονικό κύβο, να τον περιστρέψει, και η Unity να στείλει ταυτόχρονα εντολή μέσω σειριακής σύνδεσης για την ενεργοποίηση ενός actuator στο glove.[29]

4.1.6 Ενσωμάτωση Glove μέσω Serial Communication

Η ενσωμάτωση ενός απτικού γαντιού στην Unity γίνεται συνήθως μέσω σειριακής θύρας (COM port). Ο μικροελεγκτής (ESP32, Arduino κ.λπ.) στέλνει περιοδικά δεδομένα (π.χ. γωνίες κάμψης, επίπεδο πίεσης ή εντολές actuators), τα οποία αναλύονται από C# script μέσα στην Unity. Τα δεδομένα μπορούν να επηρεάσουν άμεσα το Hand Animator ή να ενεργοποιήσουν λειτουργίες, όπως το grab ή το ενεργό φρενάρισμα σε ένα servo. Αντίστροφα, η Unity μπορεί να στέλνει εντολές απτικής ανάδρασης όταν ο χρήστης "αγγίζει" ή "πιάσει" ένα αντικείμενο.

4.1.7 Παραδείγματα Εφαρμογών

Εκπαιδευτικές

Προσομοιώσεις:

Χειρουργικές επεμβάσεις, μηχανικές συναρμολογήσεις, εργαστηριακά πειράματα – όλα μπορούν να εμπλουτιστούν με feedback δύναμης και απτικής σύγκρουσης.

Εφαρμογές

VR:

Η αλληλεπίδραση με ψηφιακά αντικείμενα αποκτά φυσικότητα. Αντικείμενα "αντιστέκονται", γλιστρούν ή παράγουν παλμούς κατά την αφή.

Παιχνίδια:

Η Unity υποστηρίζει πλήρως tactile events. Παράδειγμα: όταν ο χρήστης πυροβολεί, ενεργοποιείται ένα piezo actuator στο δάχτυλο, προσομοιώνοντας ανάκρουση.[17]

4.1.8 Προκλήσεις και Ευκαιρίες

Προκλήσεις:

- Οι φυσικές ιδιότητες των actuators (συχνότητα, ισχύς) δεν έχουν εύκολη απεικόνιση σε software.
- Κάθε glove ή συσκευή μπορεί να χρειάζεται custom integration.

Ευκαιρίες:

- Το κόστος του hardware (π.χ. ESP32, servo, piezo) είναι πλέον χαμηλό και επιτρέπει DIY λύσεις.
- Η Unity διαθέτει ισχυρό developer community και open-source υποστήριξη.
- Η ενοποίηση με ML/AI δίνει περιθώριο για adaptive feedback, έξυπνα gestures και ενίσχυση προσβασιμότητας.

Η Unity προσφέρει μία πλήρη, ανοιχτή και προσαρμόσιμη πλατφόρμα για τον συνδυασμό εικονικού περιβάλλοντος και απτικής πραγματικότητας, δημιουργώντας τα θεμέλια για φυσικότερη και ενσώματη αλληλεπίδραση ανθρώπου-μηχανής.

Κεφάλαιο 5ο: Firmware esp32 & Unity

5.1 Ανάλυση Κώδικα ESP32 στο Arduino IDE

5.1.1 input.ino

1. Median Filter (RunningMedian)

```
#if ENABLE_MEDIAN_FILTER
#include <RunningMedian.h>
RunningMedian rmSamples[5] = {
    RunningMedian(MEDIAN_SAMPLES),
    ...
};
```

#endif

- Χρησιμοποιείται για φιλτράρισμα θορύβου από τους αναλογικούς αισθητήρες flexion.
- Για κάθε δάχτυλο δημιουργείται μια δομή RunningMedian, η οποία διατηρεί έναν κυλιόμενο πίνακα τελευταίων μετρήσεων (μέγεθος MEDIAN_SAMPLES).
- Κάθε νέα μέτρηση προστίθεται στον πίνακα.
- Αντί να χρησιμοποιείται η τελευταία μέτρηση ή ο μέσος όρος, επιστρέφεται η μεσαία τιμή (median) — δηλαδή αυτή που βρίσκεται στο κέντρο όταν ταξινομηθούν οι τιμές.

2. Multiplexer (Πολυπλέκτης)

```
byte selectPins[] = {PINS_MUX_SELECT};
```

Αυτός ο πίνακας περιέχει τα pin του ESP32 που συνδέονται με τις γραμμές επιλογής (select lines) του αναλογικού πολυπλέκτη . Ο πολυπλέκτης επιτρέπει τη χρήση πολλών αισθητήρων με μία μόνο αναλογική είσοδο (MUX_INPUT).

3. Κωδικοποίηση και Λειτουργία του Multiplexer

```
int readMux(byte pin) {  
  int numSelectPins = sizeof(selectPins) / sizeof(selectPins[0]);  
  for (int i = numSelectPins - 1; i >= 0; i--) {  
    digitalWrite(selectPins[i], (pin & (1 << i)) ? HIGH : LOW);  
  }  
  delayMicroseconds(5);  
  return analogRead(MUX_INPUT);  
}
```

- Το pin αναπαριστά το κανάλι που θέλουμε να διαβάσουμε .
- Κάθε selectPin[i] αντιστοιχεί σε ένα bit του pin:π.χ. για pin = 5, το δυαδικό είναι 101, άρα S2=1, S1=0, S0=1.
- Η συνάρτηση γράφει τα bits αυτά στις αντίστοιχες γραμμές επιλογής.
- Μικρό delay (5μs) για να σταθεροποιηθεί το κύκλωμα.
- Τέλος, γίνεται analogRead() στη μοναδική κοινή έξοδο MUX_INPUT.

```
if (ISMUX(pin)) return readMux(UNMUX(pin));
else return analogRead(pin);
```

Όταν το pin είναι από multiplexer, κάνει read μέσω readMux().

4. sinCosMix(...)

```
int sinRaw = analogPinRead(sinPin);
int cosRaw = analogPinRead(cosPin);
```

Κάθε δάχτυλο έχει δύο αισθητήρες τοποθετημένους κάθετα (σε μορφή sin/cos). Έτσι:

- Ο ένας αισθητήρας μετράει $\sin(\theta)$
- Ο άλλος μετράει $\cos(\theta)$

Κατά το calibration:

```
sinMin[i] = min(sinMin[i], sinRaw);
sinMax[i] = max(sinMax[i], sinRaw);
```

Καταγράφει τα όρια μετρήσεων του κάθε αισθητήρα.

Κανονικοποίηση:

```
sinScaled = map(sinRaw, sinMin[i], sinMax[i], -ANALOG_MAX, ANALOG_MAX);
cosScaled = map(cosRaw, cosMin[i], cosMax[i], -ANALOG_MAX, ANALOG_MAX);
```

Μετατρέπει το κάθε σήμα στο εύρος [-4095, +4095], ώστε να είναι συμβατό με atan2().

Υπολογισμός Γωνίας:

```
double angleRaw = atan2(sinScaled, cosScaled);
float normalized = (angleRaw + PI) / (2.0 * PI);
```

Το atan2(y, x) επιστρέφει γωνία σε ακτίνια από $-\pi$ έως $+\pi$.

Με την πράξη $(\text{angle} + \pi)/(2\pi)$ η τιμή κανονικοποιείται σε [0,1].

Κωδικοποίηση Τελικής Τιμής:

```
int result = (int)(normalized * ANALOG_MAX);
return constrain(result, 0, ANALOG_MAX);
```

Η κανονικοποιημένη τιμή μετατρέπεται σε ακέραιο [0–4095] για να αποσταλεί ή να αποθηκευτεί.

5.getFingerPositions()

Η `getFingerPositions(bool calibrating, bool reset)` είναι η βασική συνάρτηση που υπολογίζει τις τελικές τιμές κάμψης (flexion) για τα πέντε δάχτυλα, βασισμένη σε δεδομένα από αναλογικούς αισθητήρες sin/cos. Η έξοδος της χρησιμοποιείται απευθείας για αποστολή στη Unity.

1. Εσωτερική Δομή

```
static int fingerPos[10];  
int flexRaw[5] = {  
    sinCosMix(...), ...  
};
```

`fingerPos[0]` έως `[4]` αποθηκεύουν τις τιμές flexion (0–4095).

`fingerPos[5]` έως `[9]` κρατούν πιθανές τιμές splay (αν χρησιμοποιούνται).

Η κάθε τιμή κάμψης προκύπτει από `sinCosMix(pin1, pin2, index, calibrating)`.

2. Jitter Threshold (Κατώφλι σταθερότητας)

```
if (abs(fingerPos[i] - flexRaw[i]) > FINGER_JITTER_THRESHOLD) {  
    fingerPos[i] = flexRaw[i];  
}
```

Αποφυγή ασταθών μικρομεταβολών ("jitter") όταν ο αισθητήρας είναι σε ηρεμία ή παρουσιάζει ηλεκτρικό θόρυβο.

Αν η διαφορά μεταξύ της τρέχουσας αποθηκευμένης τιμής (`fingerPos[i]`) και της νέας (`flexRaw[i]`) είναι μικρότερη από `FINGER_JITTER_THRESHOLD`, η αλλαγή αγνοείται. Διαφορετικά, η νέα τιμή γίνεται αποδεκτή. Προσφέρει ομαλή εμπειρία στον χρήστη χωρίς "τρέμουλο" στο μοντέλο χεριού.

3. Clamping – Περιορισμός ακραίων μεταβολών

```
return constrain(result, 0, ANALOG_MAX);
```

Σε αναλογικά συστήματα, μερικές φορές λόγω βλάβης, αστάθειας ή υπερφόρτωσης, μπορεί το αποτέλεσμα της γωνίας να μεταπηδήσει ξαφνικά από 4095 → 0 ή αντίστροφα. Αυτό προκαλεί ορατά "σπασίματα" στο εικονικό χέρι.

Η constrain() φροντίζει ώστε η έξοδος να μην ξεφύγει από το νόμιμο εύρος:

- Κατώτερο: 0
- Ανώτερο: ANALOG_MAX (4095)
- Αν το αποτέλεσμα είναι έξω από τα όρια, το κλιμακώνει στο κοντινότερο άκρο.

4. Median Filtering – RunningMedian

```
rmSamples[i].add(sensorValue);  
filtered = rmSamples[i].getMedian();
```

Τι κάνει:

- Διατηρεί τις τελευταίες N μετρήσεις.
- Επιστρέφει τη μεσαία τιμή, η οποία είναι πολύ σταθερή σε σύγκριση με ακραίες τιμές.

Πλεονέκτημα:

- Πολύ ανθεκτική σε αιχμές και παλμούς βοηθώντας έτσι την σταθεροποίηση των τιμών.

Μειονέκτημα:

Εισάγει καθυστέρηση στην απόκριση:

- Αν MEDIAN_SAMPLES = 20, η τελική έξοδος αντανακλά την “καρδιά” των τελευταίων 20 μετρήσεων, όχι την πιο πρόσφατη.
- Αυτό οδηγεί σε lag (μικρό αλλά υπαρκτό), κυρίως σε γρήγορες κινήσεις ή χειρονομίες.

Μπορεί να γίνει πιο responsive με μικρότερο MEDIAN_SAMPLES, π.χ. 5 ή 7, αλλά σε βάρος της σταθερότητας.

5. Τελική μορφή των τιμών

Οι τελικές τιμές fingerPos[] είναι κανονικοποιημένες και σταθεροποιημένες, έτοιμες για:

- Αποστολή στη Unity.
- Οπτική αναπαράσταση.
- Έλεγχο actuator για απτική ανάδραση.

Ροή

- `getFingerPositions()` καλεί `sinCosMix()` για κάθε δάχτυλο.
- Η `sinCosMix()` μετατρέπει τα `sin/cos` σήματα σε γωνία με `atan2`, και την κανονικοποιεί.
- Αν έχει ενεργοποιηθεί `median` φίλτρο, η γωνία σταθεροποιείται.
- Αν η νέα τιμή έχει διαφορά $>$ `threshold`, αντικαθιστά την προηγούμενη.
- Η τιμή περιορίζεται με `constrain()` στο `[0, 4095]`.
- Επιστρέφεται το `fingerPos[]`.

5.1.2 lucidgloves-firmware.ino

1. Header και πληροφορίες

```
/* LucidGloves Firmware Version 4 */
#include "ConfigUtils.h"
#include "AdvancedConfig.h"
```

Ορίζει τον συγγραφέα και την έκδοση. Περιλαμβάνει εξωτερικά αρχεία με βασικές μακροεντολές και συναρτήσεις (`ConfigUtils.h`, `AdvancedConfig.h`), ώστε να φορτωθούν οι βασικές ρυθμίσεις `hardware/software`.

2. Επιλογή Τύπου Επικοινωνίας

```
#define COMMUNICATION COMM_SERIAL
#define SERIAL_BAUD_RATE 115200
#define BT_SERIAL_DEVICE_NAME "lucidgloves-left"
```

Ορίζει ποια θύρα θα χρησιμοποιείται:

- `COMM_SERIAL` → USB
- `COMM_BT_SERIAL` → Bluetooth (με όνομα συσκευής)

Η ταχύτητα επικοινωνίας ορίζεται στα 115200 baud.

3. Ρυθμίσεις Εισόδων Αισθητήρων

```
#define USING_SPLAY true
#define USING_MULTIPLEXER true
#define FLIP_FLEXION false
#define FLIP_SPLAY true
```

- `USING_SPLAY`: ενεργοποιεί την ανάγνωση πλευρικής απόκλισης δακτύλων.
- `USING_MULTIPLEXER`: ενεργοποιεί χρήση αναλογικού πολυπλέκτη (MUX).

- FLIP_FLEXION: αντιστρέφει τις τιμές flexion (αν τοποθετήθηκαν ανάποδα).
- FLIP_SPLAY: αντιστροφή τιμών splay.

4. Έλεγχος Gesture μέσω κουμπιών

```
#define GRAB_GESTURE false
#define TRIGGER_GESTURE false
#define PINCH_GESTURE false
```

Όταν είναι false, χρησιμοποιούνται αντίστοιχα κουμπιά (PIN_GRAB_BTN, PIN_TRIG_BTN) αντί για αισθητήρες. (Τελικά υλοποιήθηκαν στη Unity.)

5. Αντιστροφή Σημάτων Κουμπιών (Debounce / Pull Logic)

```
#define INVERT_A false
#define INVERT_B false
#define INVERT_JOY false
```

Καθορίζει αν κάποιο κουμπί στέλνει "πατημένο" σήμα όταν δεν έχει πατηθεί (λόγω κυκλώματος). Το false σημαίνει φυσιολογική συμπεριφορά (pull-up σωστή).

6. Joystick Ρυθμίσεις

```
#define JOYSTICK_BLANK true
#define JOYSTICK_DEADZONE 10
```

- Αν δεν χρησιμοποιείται joystick, δηλώνεται με JOYSTICK_BLANK true.
- DEADZONE: αγνοεί μικρές μεταβολές <10% για αποφυγή drift.

7. Επιλογές Tracking

```
#define NO_THUMB false
#define USING_CALIB_PIN false
```

- Αν NO_THUMB = true, δεν παρακολουθείται ο αντίχειρας.
- Αν USING_CALIB_PIN = true, το PIN_CALIB προκαλεί επαναβαθμονόμηση.

8. Force Feedback Ρυθμίσεις

```
#define USING_FORCE_FEEDBACK true
#define FLIP_FORCE_FEEDBACK true
```

```
#define SERVO_SCALING false
```

- Ενεργοποιεί τα servo motors για απτική ανάδραση (force feedback).
- Αν FLIP_FORCE_FEEDBACK = true, αλλάζει την κατεύθυνση περιστροφής του servo (χρήσιμο αν τοποθετήθηκε ανάποδα).
- SERVO_SCALING: εάν ενεργοποιηθεί, προσαρμόζει δυναμικά την ισχύ του servo (δεν χρησιμοποιείται ακόμα).

9. Αντιστοίχιση Pin ESP32

```
#define PIN_PINKY MUX(9)
#define PIN_RING MUX(9)
#define PIN_MIDDLE MUX(6)
#define PIN_INDEX MUX(3)
#define PIN_THUMB MUX(0)
```

- Δηλώνει ποιο κανάλι του multiplexer αντιστοιχεί σε κάθε δάχτυλο. (το μικρό δάχτυλο παρακολουθείται με τη βοήθεια του παράμεσου λόγω καταστροφής ενός sensor housing)
- Η MUX(pin) εντολή χρησιμοποιείται ώστε να αναγνωριστεί ως είσοδος multiplexer στον input.ino.

Συμπέρασμα

Το lucidgloves-firmware.ino είναι καθαρά αρχείο παραμετροποίησης. Δεν περιέχει λογική εκτέλεσης, αλλά ορίζει τις βασικές σταθερές (defines) και επιτρέπει προσαρμογή σε κάθε υλοποίηση, όπως:

- Επιλογή πλακέτας (ESP32),
- Επιλογή καναλιών πολυπλέκτη για αισθητήρες,
- Απενεργοποίηση/ενεργοποίηση κουμπιών και gestures,
- Αντιστροφή σημάτων (flip),
- Χρήση force feedback.

5.1.3 _main.ino

1. Ορισμοί παραμέτρων ελέγχου

```
#define ALWAYS_CALIBRATING false
#define CALIB_OVERRIDE false
#define SERVO_TEST_MODE true
```

- ALWAYS_CALIBRATING: Αν είναι true, το σύστημα κάνει συνεχές καλιμπράρισμα σε κάθε βρόχο (loop()).

- CALIB_OVERRIDE: Αν είναι true, αγνοεί το κουμπί καλιμπραρίσματος (δεν χρησιμοποιείται στην τρέχουσα υλοποίηση).
- SERVO_TEST_MODE: Αν είναι true, εκτελείται δοκιμή των servo κατά την εκκίνηση.

2. Δηλώσεις servo και επικοινωνίας

```
extern Servo thumbServo;
...
ICommunication* comm;
```

- Τα Servo αντικείμενα χρησιμοποιούνται για το force feedback (ένα για κάθε δάχτυλο).
- comm είναι δείκτης τύπου ICommunication, που υλοποιείται από SerialCommunication ή BTSerialCommunication.

3. Συνάρτηση setup() — Αρχικοποίηση

```
comm = new SerialCommunication();
comm->start();
setupInputs();
```

- Δημιουργεί το αντικείμενο επικοινωνίας και ξεκινά την σειριακή σύνδεση.
- Καλεί setupInputs() για να ρυθμίσει όλα τα pins (buttons, multiplexer, κ.λπ.).

```
#if USING_FORCE_FEEDBACK
  setupServoHaptics();
```

Αν είναι ενεργοποιημένο το force feedback, γίνεται αρχικοποίηση των servo.

4. Servo Test Mode

```
for (int angle = 0; angle <= 155; angle += 2) {
  thumbServo.write(angle);
  ...
}
```

- Αν SERVO_TEST_MODE = true, τότε κάθε servo εκτελεί μια πλήρη περιστροφή εμπρός και πίσω.
- Χρήσιμο για να επιβεβαιωθεί ότι τα servo λειτουργούν σωστά.

5. Συνάρτηση loop()

Καλιμπράρισμα:

```
if (loops < CALIBRATION_LOOPS || ALWAYS_CALIBRATING) {  
    calibrate = true;  
    loops++;  
}
```

- Αν είναι η πρώτη εκκίνηση, και δεν έχουν ολοκληρωθεί οι CALIBRATION_LOOPS, γίνεται βαθμονόμηση.
- Εναλλακτικά, αν ALWAYS_CALIBRATING = true, γίνεται συνεχώς. (χρήσιμο για testing)

Εμφάνιση μηνυμάτων debug:

```
if (calibrate && !printedStart) Serial.println(" Calibration started");  
...  
if (!calibrate && loops >= CALIBRATION_LOOPS) Serial.println("Calibration finished");
```

Εμφανίζει μηνύματα στην σειριακή θύρα για το πότε ξεκινά και ολοκληρώνεται η βαθμονόμηση.

Ανάγνωση αισθητήρων:

```
int* fingerPos = getFingerPositions(calibrate, calibButton);
```

Καλεί τη συνάρτηση του input.ino, περνώντας την ένδειξη calibrating, ώστε να εκτελεστεί ο αντίστοιχος υπολογισμός κατά την βαθμονόμηση.

```
bool aButton = getButton(PIN_A_BTN) != INVERT_A;  
...  
bool grabButton = getButton(PIN_GRAB_BTN) != INVERT_GRAB;
```

- Χρησιμοποιεί getButton(pin) για να διαβάσει την κατάσταση κάθε κουμπιού.
- Εφαρμόζει λογική αντιστροφής με INVERT_ εάν χρειάζεται.

```
comm->output(encode(fingerPos, ...));
```

- Όλες οι πληροφορίες (fingerPos, joystick, κουμπιά) κωδικοποιούνται μέσω encode(...).
- Στέλνονται στον υπολογιστή μέσω της σειριακής διεπαφής comm.

Ροή Εκτέλεσης

- Εκτελείται η setup() → ξεκινά επικοινωνία και servo .
- Κάθε επανάληψη της loop():
- Ελέγχει αν είμαστε σε φάση βαθμονόμησης.
- Διαβάζει αισθητήρες.
- Διαβάζει κουμπιά.
- Κωδικοποιεί και στέλνει δεδομένα.

5.1.4 haptics.ino

1. Προετοιμασία Servo και Βιβλιοθήκες

```
#if USING_FORCE_FEEDBACK
#if defined(ESP32)
#include "ESP32Servo.h"
#else
#include "Servo.h"
#endif
```

- Ελέγχει αν είναι ενεργοποιημένη η λειτουργία force feedback (USING_FORCE_FEEDBACK).
- Περιλαμβάνει τη σωστή βιβλιοθήκη για την πλατφόρμα (ESP32 ή Arduino).

2. Δημιουργία Servo αντικειμένων

```
Servo pinkyServo, ringServo, middleServo, indexServo, thumbServo;
```

Κάθε δάχτυλο έχει το δικό του Servo αντικείμενο που ελέγχει το servo rack για να επιτευχθεί απτική ανάδραση.

3. setupServoHaptics()

```
void setupServoHaptics(){  
pinkieServo.attach(PIN_PINKY_MOTOR);  
...  
}
```

- Συνδέει κάθε Servo με το αντίστοιχο pin του ESP32.
- Χρησιμοποιείται κατά την setup() για να προετοιμάσει το hardware.

4. scaleLimits()

```
scaledLimits[i] = 155.0f - hapticLimits[i] / 1000.0f * 155.0f;
```

- Κάνει map της τιμής hapticLimits[i] (0–1000) σε γωνία περιστροφής 0–155°.
- Το 155.0f - αντιστρέφει την κατεύθυνση κίνησης (π.χ. 1000 → 0°, 0 → 155°).
- Η τιμή 155 επιλέχθηκε μετά από testing ως η μέγιστη ασφαλής γωνία περιστροφής για τα περισσότερα servo έτσι ώστε το servo rack να μείνει στην επιθυμητή θέση

5. writeServoHaptics()

```
scaleLimits(hapticLimits, scaledLimits);  
thumbServo.write(scaledLimits[0]);  
...
```

- Καλεί την scaleLimits() για να μετατρέψει τις τιμές από Unity σε μοίρες.
- Έπειτα δίνει εντολές write() στα servo, αν η τιμή είναι έγκυρη (≥ 0).
- Τα servo περιστρέφονται αντίστοιχα, εφαρμόζοντας μηχανική αντίσταση στο glove.

Σημειώσεις Σχεδιασμού

- Οι τιμές hapticLimits[] προέρχονται από την SerialCommunication μέσω parsing σειριακών εντολών.
- Το σύστημα ελέγχει κάθε servo ανεξάρτητα, με δυνατότητα διαφοροποίησης έντασης για κάθε δάχτυλο.

- Δεν χρησιμοποιείται PWM χειροκίνητα, η Servo βιβλιοθήκη το διαχειρίζεται εσωτερικά.

5.1.5 Encoding.ino

Το αρχείο Encoding.ino χειρίζεται τη μετατροπή των δεδομένων του glove σε σειριακή μορφή και την αποκωδικοποίηση εντολών που στέλνονται από την Unity προς το ESP32.

1. encode(...) — Κωδικοποίηση Εξόδου από ESP32 προς Unity

Η encode() δημιουργεί μία συμβολοσειρά που περιέχει τις τιμές κάμψης και απόκλισης για τα δάχτυλα, καθώς και τις τιμές του joystick και άλλων κουμπιών (αν χρησιμοποιείται).

Μορφή συμβολοσειράς:

```
A[val]B[val]C[val]D[val]E[val](AB)[val](BB)[val](CB)[val](DB)[val](EB)[val]\n
```

- A–E: Τιμές επιλογής δαχτύλου από Thumb έως Pinky .
- (AB)–(EB): Τιμές splay ανά δάχτυλο.

Παράδειγμα εξόδου:

```
A1230B1450C1340D1500E1200(AB)3120(BB)2900(CB)3100(DB)3000(EB)2950\n
```

Το Unity παραλαμβάνει τη συμβολοσειρά και αναλύει τις τιμές για animation και επεξεργασία.

2. decodeData(...)

Η decodeData() διαβάζει τις εντολές για απτική ανάδραση (force feedback) από τη σειριακή είσοδο και τις μετατρέπει σε πίνακα hapticLimits[5].

Τύπος Εντολών:

```
A500B750C1000D250E0\n
```

- Οι χαρακτήρες αυτοί αναφέρονται άμεσα στα πέντε δάχτυλα:
- A → Αντίχειρας (Thumb)
- B → Δείκτης (Index)
- C → Μέσος (Middle)
- D → Παράμεσος (Ring)
- E → Μικρός (Pinky)
- Οι αριθμοί val που ακολουθούν κάθε γράμμα είναι ακέραιες τιμές στο εύρος [0 – 1000].
- 1000 σημαίνει καμία απτική αντίσταση (π.χ. servo σε πλήρη απελευθέρωση).
- 0 σημαίνει μέγιστη εφαρμογή δύναμης από το αντίστοιχο servo.

Λειτουργία:

```
hapticLimits[0] = getArgument(stringToDecode, 'A'); // Thumb
...
hapticLimits[4] = getArgument(stringToDecode, 'E'); // Pinky
```

Οι αριθμοί που αντιστοιχούν στα Α–Ε αποθηκεύονται στον πίνακα και χρησιμοποιούνται για έλεγχο των servo στο haptics.ino μέσω της writeServoHaptics().

Μετατροπή σε servo γωνία:

Η τιμή 1000 αντιστοιχεί σε 0° (καμία αντίσταση) , ενώ το 0 σε 155° (πλήρης αντίσταση).

```
scaledLimits[i] = 155.0f - hapticLimits[i] / 1000.0f * 155.0f;
```

Αυτός ο μηχανισμός επιτρέπει στο Unity να ελέγχει αναλογικά την ένταση της απτικής ανάδρασης σε κάθε δάχτυλο, με ελάχιστο υπολογιστικό βάρος.

Συμπέρασμα

Το Encoding.ino υλοποιεί:

- Την αποστολή πλήρους πληροφορίας κάμψης και απόκλισης του χεριού προς τη Unity.
- Την παραλαβή εντολών ενεργοποίησης actuator, με απλή και ξεκάθαρη συμβολοσειρά Α–Ε.

5.1.6 SerialCommunication.ino

Το αρχείο SerialCommunication.ino υλοποιεί τον μηχανισμό επικοινωνίας μέσω σειριακής θύρας, επιτρέποντας την αποστολή και λήψη δεδομένων μεταξύ του γαντιού και της Unity μέσω USB.

1. Κλάση SerialCommunication

```
class SerialCommunication : public ICommunication {
```

Η κλάση υλοποιεί το interface ICommunication, παρέχοντας λειτουργίες start(), isOpen(), readData() και output() για σειριακή επικοινωνία.

2. start()

```
void start() {
    Serial.begin(SERIAL_BAUD_RATE);
    m_isOpen = true;
}
```

- Εκκινεί την επικοινωνία στη δηλωμένη ταχύτητα baud (συνήθως 115200).

- Ορίζει εσωτερική σημαία ότι η σύνδεση είναι ενεργή.

3. isOpen()

```
bool isOpen() { return m_isOpen; }
```

Επιτρέπει στο κύριο loop να γνωρίζει αν η σειριακή θύρα είναι ενεργή.

4. output(char* data)

```
void output(char* data) {
    Serial.println(data);
    Serial.flush();
}
```

Στέλνει συμβολοσειρά μέσω της σειριακής θύρας με println() (με new line για να μπορέσει να ληφθεί από τη Unity) και εξασφαλίζει ότι όλα τα bytes αποστέλλονται με flush().

5. readData(char* input)

```
bool readData(char* input) {
    if (!Serial.available()) return false;
    int index = 0;
    while (Serial.available()) {
        char c = Serial.read();
        if (c == '\n') {
            input[index] = '\0';
            return true;
        }
        if (index < 99) {
            input[index++] = c;
        }
    }
    input[index] = '\0';
    return (index > 0);
}
```

- Διαβάζει χαρακτήρες από τη σειριακή θύρα μέχρι να συναντήσει \n.
- Το αποτέλεσμα αποθηκεύεται σε buffer input, ώστε να αναλυθεί από decodeData().
- Αν δεν υπάρχουν δεδομένα, επιστρέφει false.

Συμπέρασμα

Η SerialCommunication υλοποιεί μια καθαρή, ελαφριά και επεκτάσιμη λύση σειριακής επικοινωνίας. Συνδυάζεται με ICommunication για να μπορεί να αντικατασταθεί από άλλες υλοποιήσεις (π.χ. Bluetooth), χωρίς αλλαγή στο υπόλοιπο πρόγραμμα.

5.1.7 ICommunication

Το αρχείο ορίζει μία αφηρημένη κλάση (interface) με σκοπό να επιτρέπει την εναλλαξιμότητα στον τρόπο επικοινωνίας του glove με εξωτερικά συστήματα επικοινωνίας. Είναι βασισμένο σε καθαρό C++ πρότυπο.

Δήλωση Κλάσης:

```
class ICommunication {
public:
    virtual bool isOpen() = 0;
    virtual void start() = 0;
    virtual void output(char* data) = 0;
    virtual bool readData(char* input) = 0;
};
```

Ανάλυση Μελών:

1. virtual bool isOpen() = 0;

- Επιστρέφει true αν η σύνδεση είναι ενεργή.
- Χρήσιμο για έλεγχο συνδεσιμότητας πριν αποσταλούν δεδομένα.

2. virtual void start() = 0;

- Εκκινεί τον μηχανισμό επικοινωνίας.
- Καλείται μία φορά στο setup().

3. virtual void output(char* data) = 0;

Στέλνει δεδομένα εξόδου (string) μέσω της σύνδεσης.

4. virtual bool readData(char* input) = 0;

- Διαβάζει δεδομένα από τη θύρα.
- Γράφει το αποτέλεσμα στο input buffer και επιστρέφει true αν υπάρχουν νέα δεδομένα.

5.1.8 ConfigUtils.h

1. Κλάση ordered_lock

Η `ordered_lock` είναι μια custom κλάση που εφαρμόζει ασφαλή αποκλεισμό μεταξύ νημάτων (threads), εξασφαλίζοντας ότι οι διεργασίες αποκτούν πρόσβαση σε κρίσιμους πόρους με σειρά FIFO.

Βασικά μέλη:

```
std::queue<std::condition_variable *> cvar;  
std::mutex cvar_lock;  
bool locked;
```

Μέθοδος `lock()`:

```
lockTime = micros() - lockTimeLast;  
lockTimeLast = micros();  
lockTimeTotal += lockTime;  
lockLoops++;
```

- Καταγράφει χρόνους απόδοσης lock
- Αν κάποιος άλλος thread κρατάει το lock, το τρέχον thread μπαίνει σε ουρά αναμονής (FIFO).
- Όταν έρθει η σειρά του, αποκτά αποκλειστική πρόσβαση.

Μέθοδος `unlock()`:

```
if (cvar.empty()) {  
    locked = false;  
} else {  
    cvar.front()->notify_one();  
    cvar.pop();  
}
```

- Αν δεν υπάρχουν άλλα threads στην ουρά, απελευθερώνεται.
- Διαφορετικά, ο επόμενος στην ουρά ειδοποιείται και αναλαμβάνει.

Χρήση:

Η κλάση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον συγχρονισμό:

- Στην σειριακή ανάγνωση/γραφή.
- Στον έλεγχο actuator.

2. Εντολές Επικοινωνίας

```
#define COMM_SERIAL 0
#define COMM_BTserial 1
```

- Ορίζουν τον τύπο επικοινωνίας (USB ή Bluetooth).
- Επιλέγεται στον κεντρικό φάκελο ρυθμίσεων `lucidgloves-firmware.ino`.

3. Μακροεντολές Κωδικοποίησης

```
#define ENCODE_LEGACY 0
#define ENCODE_ALPHA 1
```

Καθορίζουν ποια μορφή encoding χρησιμοποιείται για τα δεδομένα `glove` ↔ `Unity`.

4. Εντολές Multiplexer

```
#define MUX(p) (p + 100)
#define UNMUX(p) (p % 100)
#define ISMUX(p) (p >= 100)
```

- `MUX(p)`: Μετατρέπει ένα κανονικό `pin` (π.χ. 5) σε ειδική αναφορά `multiplexed` (π.χ. 105).
- `UNMUX(p)`: Αντίστροφη μετατροπή, εξάγει τον κανονικό αριθμό `pin`.
- `ISMUX(p)`: Ελέγχει αν ένα `pin` ανήκει σε `multiplexer` (αν είναι ≥ 100).

Χρήσιμο για να γίνεται `analogRead()` ενιαία, είτε από `multiplexer` είτε απευθείας.

5. Ρυθμίσεις Ανάμειξης Αισθητήρων (Finger Mixing)

```
#define MIXING_NONE 0
#define MIXING_SINCOS 2
```

`MIXING_SINCOS`: Ορίζει ότι η κάμψη κάθε δακτύλου προκύπτει μέσω συνδυασμού `sin/cos` αισθητήρων και μαθηματικού υπολογισμού γωνίας μέσω `atan2()`.

5.1.9 AdvancedConfig.h

Το αρχείο AdvancedConfig.h περιλαμβάνει σημαντικές παραμέτρους και ρυθμίσεις που επηρεάζουν τη βασική λειτουργικότητα του συστήματος σε επίπεδο firmware. Πρόκειται για σταθερές (macros) που καθορίζουν το πώς γίνεται η ανάγνωση των αισθητήρων, η εφαρμογή φίλτρων, το εύρος των αναλογικών σημάτων, καθώς και η διαχείριση του calibration.

1. LOOP_TIME

```
#define LOOP_TIME 0
```

- Ορίζει το χρονικό διάστημα (σε millisecond) που πρέπει να περιμένει το σύστημα ανάμεσα σε κάθε κύκλο της loop().
- Τιμή 0 για πιο άμεση ανταπόκριση και καλύτερη VR εμπειρία

2. CALIBRATION_LOOPS

```
#define CALIBRATION_LOOPS 300
```

- Κατά την εκκίνηση, το σύστημα εκτελεί 300 επαναλαμβανόμενους βρόχους όπου συλλέγει ελάχιστες και μέγιστες τιμές από κάθε αισθητήρα.
- Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται για τη σωστή κανονικοποίηση μέσω map().

Εναλλακτικά:

```
#define CALIBRATION_LOOPS -1
```

Σημαίνει συνεχές calibration σε κάθε loop, κάτι που δεν συνιστάται για κανονική χρήση αλλά είναι χρήσιμο για testing.

3. ANALOG_MAX

```
#if defined(ESP32)
#define ANALOG_MAX 4095
#else
#define ANALOG_MAX 1023
#endif
```

- Προσαρμόζει το ανώτερο όριο αναλογικών τιμών ανάλογα με τη πλατφόρμα.
- Στο ESP32 (12-bit ADC), η μέγιστη τιμή είναι 4095.
- Στο Arduino Uno (10-bit ADC), είναι 1023.

Αυτό διασφαλίζει ότι η κανονικοποίηση των τιμών γίνεται σωστά ανάλογα με την αρχιτεκτονική.

4. ENABLE_MEDIAN_FILTER και MEDIAN_SAMPLES

```
#define ENABLE_MEDIAN_FILTER true  
#define MEDIAN_SAMPLES 20
```

- Αν ενεργοποιηθεί, οι τιμές των αισθητήρων περνούν από φίλτρο μεσαίας τιμής (median), όπως αναλύθηκε στο input.ino.
- MEDIAN_SAMPLES καθορίζει το μέγεθος του buffer για κάθε αισθητήρα. Περισσότερα samples → καλύτερη σταθερότητα αλλά μεγαλύτερη καθυστέρηση.

5. CLAMP_FLEXION και CLAMP_SPLAY

```
#define CLAMP_FLEXION true  
#define CLAMP_SPLAY true
```

- Ενεργοποιούν τη χρήση της συνάρτησης constrain() στις τιμές flexion και splay αντίστοιχα.
- Αυτό προστατεύει από εξωπραγματικές τιμές (π.χ. 0→4095 απότομα), ειδικά σε περιπτώσεις wraparound ή σφαλμάτων ανάγνωσης.

6. FINGER_JITTER_THRESHOLD

```
#define FINGER_JITTER_THRESHOLD 10
```

- Καθορίζει το ελάχιστο επιτρεπτό μέγεθος μεταβολής ώστε να γίνει δεκτή μια νέα τιμή.
- Τιμές που διαφέρουν από την προηγούμενη λιγότερο από αυτό το όριο θεωρούνται «θόρυβος» και αγνοούνται.

7. NO_THUMB και JOYSTICK_BLANK

```
#define NO_THUMB false  
#define JOYSTICK_BLANK true
```

- NO_THUMB = true: αγνοείται η μέτρηση του αντίχειρα (π.χ. σε prototype με λιγότερους αισθητήρες).

- `JOYSTICK_BLANK = true`: απενεργοποιεί πλήρως το joystick module (καμία ανάγνωση από αναλογικά κανάλια X/Y).

Συμπερασματικά:

Το `AdvancedConfig.h` λειτουργεί ως πίνακας ελέγχου σταθερών που καθορίζουν:

- Τον ρυθμό ανανέωσης
- Τον τρόπο βαθμονόμησης
- Το φίλτρο εισόδου
- Τα όρια και την ακρίβεια ανάγνωσης,
- Και γενικότερα την προσαρμογή του firmware στις προδιαγραφές του hardware.

Οι τιμές μπορούν να τροποποιηθούν από τον τελικό χρήστη για να προσαρμοστούν σε διαφορετικά γάντια, αισθητήρες ή ανάγκες απόκρισης.

5.2 Unity Firmware

Η εικονική απεικόνιση και λειτουργικότητα του απτικού γαντιού στην εφαρμογή Unity βασίζεται σε συνεργαζόμενα scripts που αλληλεπιδρούν με το μικροελεγκτικό σύστημα ESP32 και τον χρήστη σε πραγματικό χρόνο. Το σύστημα ακολουθεί μια λογική ροής που περιλαμβάνει: ανάγνωση δεδομένων αισθητήρων → επεξεργασία → κινούμενη αναπαράσταση του χεριού → ενεργοποίηση απτικής ανάδρασης. Το αποτέλεσμα είναι μια λειτουργικά συνεκτική και διαδραστική εμπειρία προσομοίωσης.



Σχήμα 5.1 – Περιβάλλον Unity

5.2.1 Σειριακή Επικοινωνία

Ο πυρήνας της επικοινωνίας με το glove είναι η κλάση SerialTest.cs, η οποία είναι συνημμένη σε ένα κενό GameObject με όνομα ESP32Bridge στη σκηνή. Αυτή ανοίγει σύνδεση με τη θύρα COM στην οποία είναι συνδεδεμένο το ESP32 και εκτελεί ανάγνωση και αποστολή μηνυμάτων σε πραγματικό χρόνο.

```
port = new SerialPort(portName, baudRate);
port.Open();
...
if (port.BytesToRead > 0)
{
    string line = port.ReadLine().Trim();
    if (line.StartsWith("A") && line.Contains("(AB)"))
        latestLine = line;
}
```

Η μέθοδος GetLatestGloveLine() καλείται από το animation subsystem ώστε να λαμβάνει τις τελευταίες μετρήσεις.

Για την αποστολή εντολών απτικής ανάδρασης χρησιμοποιείται:

```
public void SendHaptics(int[] hapticLimits)
{
    string message =
    $"A {hapticLimits[0]}B {hapticLimits[1]}C {hapticLimits[2]}D {hapticLimits[3]}E {hapticLimits[4]}\n";
    port.WriteLine(message);
}
```

Αυτό το πρωτόκολλο εξασφαλίζει συμμετρική και αξιόπιστη αμφίδρομη επικοινωνία με τον μικροελεγκτή.

5.2.2 Ανάλυση και Κανονικοποίηση Τιμών

Η κλάση GloveParser.cs (στατική, χωρίς να χρειάζεται να επισυναφθεί σε αντικείμενο) είναι υπεύθυνη για τη μετατροπή των δεδομένων που στέλνει το γάντι σε μορφή αριθμητικών τιμών για τα επίπεδα κάμψης (flexion) και απόκλισης (spray) κάθε δακτύλου.

Επεξεργάζεται γραμμές του τύπου:

A1340B2120C3980(AB)3400(BB)3550...

Και εφαρμόζει κανονικοποίηση ως εξής:

```
data.flexion[i] = Normalize(flexVal, 0, 4095);  
data.splay[i] = NormalizeSplay(splayVal);
```

```
static float Normalize(int val, int min, int max)  
{  
    return Mathf.Clamp01((float)(val - min) / (max - min));  
}
```

Το αποτέλεσμα είναι τιμές μεταξύ [0, 1], συμβατές με το animation engine.

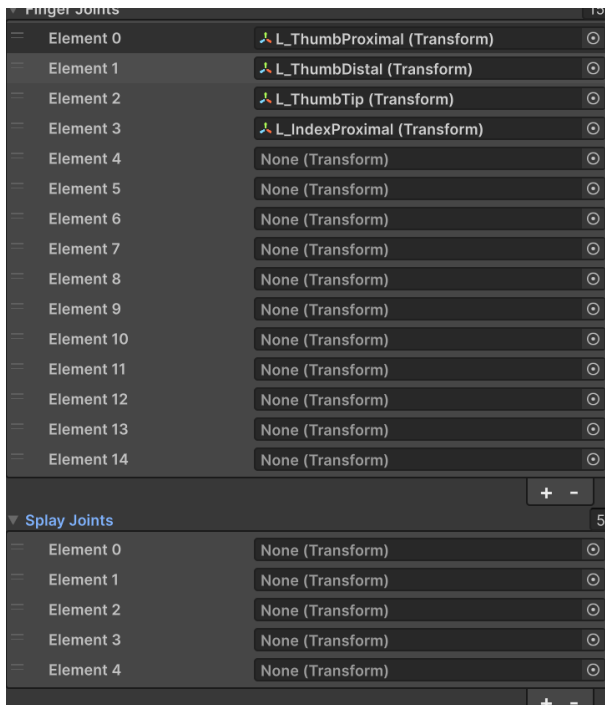
5.2.3 Animation Δακτύλων σε Πραγματικό Χρόνο

Το script `GloveFingerAnimator.cs`, το οποίο είναι επισυναμμένο στο `GameObject LeftHand Interaction Visual`, διαβάζει τις κανονικοποιημένες τιμές από το `SerialTest`, μέσω του `GloveParser`, και τις εφαρμόζει στις αρθρώσεις των δακτύλων.

```
string line = serialReader.GetLatestGloveLine();  
var data = GloveParser.Parse(line);  
AnimateFingers(data);
```

Για κάθε δάχτυλο και άρθρωση:

```
float angle = bend * (j == 0 ? 45f : 30f);  
fingerJoints[idx].localRotation = Quaternion.Euler(angle, 0, 0);
```



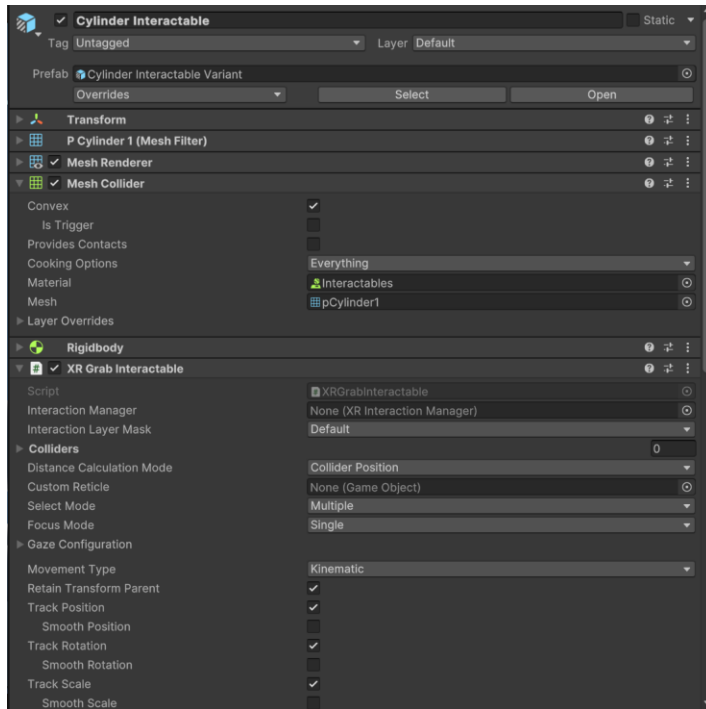
Σχήμα 5.2 – Μετασχηματισμός Αρθρώσεων

Η μεταβλητή bend αναπαριστά την κανονικοποιημένη τιμή κάμψης του δακτύλου (στο εύρος [0, 1]), η οποία προκύπτει από τις τιμές των Hall effect αισθητήρων. Ο πολλαπλασιασμός της με έναν συντελεστή (45° ή 30°) καθορίζει τη μέγιστη δυνατή περιστροφή κάθε άρθρωσης. Συγκεκριμένα, για την πρώτη άρθρωση κάθε δακτύλου (MCP – μετακαρπιοφαλαγγική), επιτρέπεται μεγαλύτερη κίνηση (έως 45°), ενώ για τις επόμενες δύο (PIP και DIP) η μέγιστη περιστροφή περιορίζεται στις 30°. Η επιλογή αυτών των τιμών βασίζεται σε ανατομικά κριτήρια και προσδίδει ρεαλισμό στην κίνηση. Η τελική περιστροφή εφαρμόζεται μέσω της συνάρτησης Quaternion.Euler(...), η οποία δημιουργεί έναν τριδιάστατο μετασχηματισμό (quaternion) με περιστροφή γύρω από τον άξονα X – προσομοιώνοντας έτσι την φυσική κάμψη των δακτύλων ως προς την παλάμη. Με αυτή τη μεθοδολογία, επιτυγχάνεται ρεαλιστική απόδοση των κινήσεων των δακτύλων, προσαρμοσμένη δυναμικά στις αναλογικές μετρήσεις των αισθητήρων, και εξασφαλίζεται η οπτική συνέπεια του εικονικού χεριού με την πραγματική χειρονομία του χρήστη. Το splay εφαρμόζεται ως περιστροφή στην αρχική άρθρωση (base joint), μετακινώντας το δάχτυλο πλευρικά.

5.2.4 Ανίχνευση Αντικειμένων και Ανάδραση

Η HapticGrabHelper.cs συνδέεται με κάθε αντικείμενο που μπορεί να "πιαστεί" από το χρήστη και πρέπει να πληροί τα εξής:

- Να έχει Collider (π.χ. BoxCollider, SphereCollider),
- Να φέρει XRGrabInteractable(μέρος του XR Interaction toolkit)
- Να περιλαμβάνει Rigidbody για φυσική προσομοίωση.



Σχήμα 5.3 – Inspector Panel

Κατά την επαφή (hover ή grab), το script υπολογίζει τον όγκο:

```
float volume = GetObjectVolume(); // from collider geometry
```

Και μετατρέπει τον όγκο σε ένταση:

```
float strength = Mathf.InverseLerp(0.001f, 0.1f, volume);
strength = Mathf.Clamp01(1f - strength);
int value = Mathf.RoundToInt(Mathf.Lerp(minHaptic, maxHaptic, strength));
```

Η αποστολή της έντασης γίνεται με:

```
SerialTest.Instance.SendHaptics(new int[] { value, value, value, value, value });
```

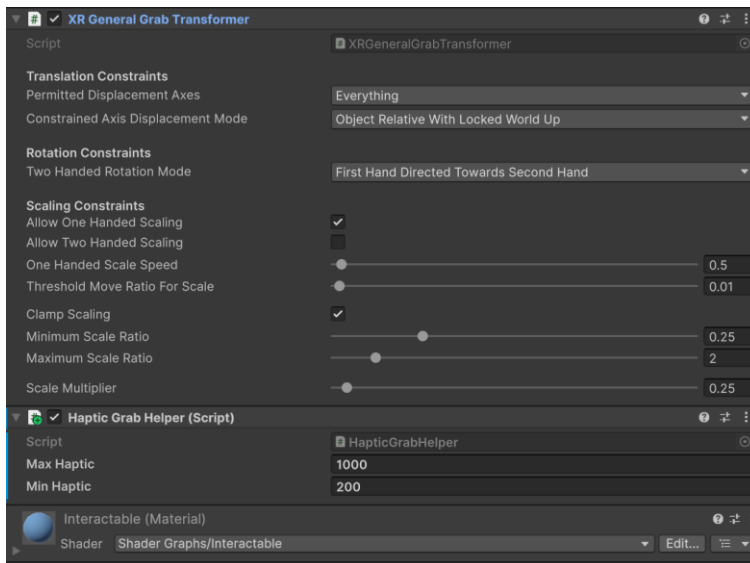
Έτσι, μεγάλα αντικείμενα προσφέρουν υψηλή απτική αντίσταση, ενώ τα μικρά είναι πιο "εύκαμπτα".

Ένα Collider είναι ένα αόρατο όριο γύρω από ένα αντικείμενο το οποίο η Unity χρησιμοποιεί για να αντλαμβάνεται συγκρούσεις και επαφές. Δεν είναι απαραίτητα συνδεδεμένο με την ορατή επιφάνεια, αλλά με τον "όγκο" που έχει φυσική υπόσταση. Ο υπολογισμός όγκου προέρχεται από τις διαστάσεις του Collider. Ο όρος Rigidbody στην Unity αναφέρεται σε ένα βασικό component φυσικής προσομοίωσης, το οποίο προσδίδει σε ένα αντικείμενο τις ιδιότητες ενός σώματος με

μάζα στο φυσικό κόσμο. Συγκεκριμένα, ένα αντικείμενο που φέρει Rigidbody αποκτά τη δυνατότητα να επηρεάζεται από δυνάμεις (π.χ. βάρος, τριβή, πρόσκρουση), να αλληλεπιδρά δυναμικά με άλλα αντικείμενα και να κινείται ή να περιστρέφεται βάσει των κανόνων της μηχανικής. Στην παρούσα εργασία, το Rigidbody είναι απαραίτητο σε κάθε αντικείμενο με το οποίο το glove μπορεί να αλληλεπιδράσει μέσω του XR Interaction Toolkit. Συνδυάζεται με τον Collider για να επιτρέψει τον εντοπισμό σύλληψης (grab), την ενεργοποίηση γεγονότων (events) όπως OnHoverEnter() ή OnGrabStart(), και την φυσική συμπεριφορά κατά την κίνηση ή πτώση του αντικείμενου στο περιβάλλον. Χωρίς την ύπαρξη Rigidbody, το αντικείμενο δεν θα μπορούσε να ανιχνεύεται σωστά από τα χειριστήρια XR ή να δέχεται απτική ανάδραση σε περίπτωση επαφής με το εικονικό χέρι. Η παρουσία Rigidbody καθιστά ένα αντικείμενο πλήρως συμβατό με το φυσικό σύστημα της Unity (PhysX), και είναι θεμελιώδης για κάθε μορφή ρεαλιστικής αλληλεπίδρασης.

5.2.5 Πειραματική Ενσωμάτωση Hand Tracking με Unity XR

Η κλάση CustomHandSkeletonDriver.cs, η οποία επίσης επισυνάπτεται στο LeftHand Visual, χρησιμοποιήθηκε πειραματικά για να αξιοποιηθεί η λειτουργία hand tracking του XR toolkit της Unity.



Σχήμα 5.4 – Επισύναψη Haptic σε Interactable

```
var wristJoint = args.hand.GetJoint(XRHandJointID.Wrist);
if (wristJoint.TryGetPose(out Pose wristPose))
    m_JointLocalPoses[XRHandJointID.Wrist.ToIndex()] = wristPose;
```

Η απόδοση της μεθόδου αυτής ήταν περιορισμένη, με συχνό jitter και χαμηλή ακρίβεια, γι' αυτό χρησιμοποιήθηκε μόνο για συγκριτικούς σκοπούς.

Ροή Συστήματος:

- SerialTest.cs ↔ ESP32: Διεύθυνση σειριακής επικοινωνίας.
- SerialTest → GloveParser → GloveFingerAnimator: Απόδοση τιμών σε κινούμενο μοντέλο.
- GloveFingerAnimator → Transforms: Αναπαράσταση κίνησης.
- HapticGrabHelper → SerialTest: Αντίστροφη ροή ενεργοποίησης απτικής ανάδρασης από επαφή αντικειμένων.

Η αρχιτεκτονική είναι ελαφριά, επεκτάσιμη και διατηρεί εξαιρετικό συγχρονισμό μεταξύ του φυσικού και του εικονικού χεριού με χαμηλό latency.

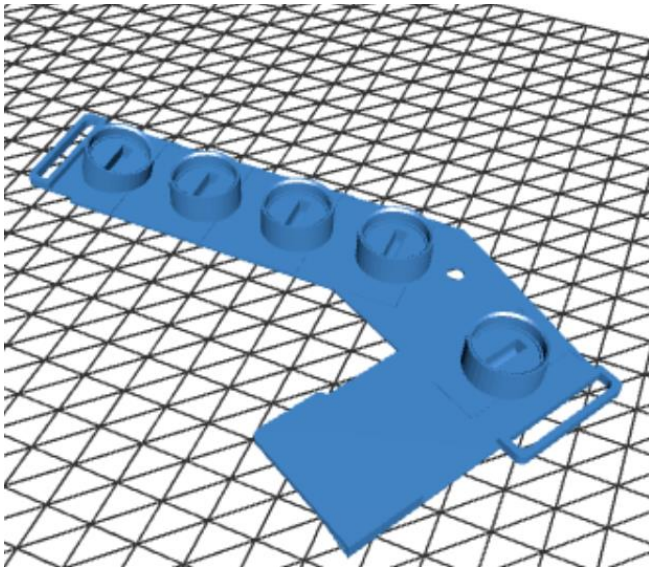
Κεφάλαιο 6ο: Λειτουργία και Ανάλυση Μηχανολογικών Τμημάτων

6.1 Mount Παλάμης

Η βάση του γαντιού, γνωστή και ως mount, αποτελεί το κύριο δομικό στοιχείο πάνω στο οποίο στηρίζεται όλος ο μηχανισμός αντίχενσης και απτικής ανάδρασης. Έχει κατασκευαστεί μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης χρησιμοποιώντας υλικό PLA, με περιορισμένο αριθμό στρώσεων ώστε η τελική κατασκευή να διαθέτει την αναγκαία ευκαμψία. Η ευκαμψία αυτή είναι καθοριστική για την άνεση και την προσαρμοστικότητα του γαντιού, καθώς επιτρέπει στο mount να "αγκαλιάζει" τη φυσική καμπυλότητα της ανθρώπινης παλάμης, διατηρώντας ταυτόχρονα επαρκή μηχανική σταθερότητα.

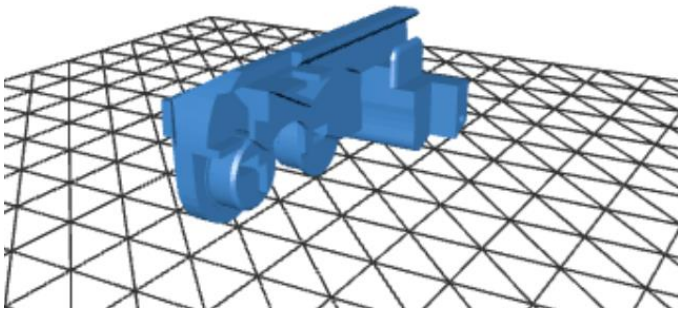
Πάνω στη βάση αυτή τοποθετούνται πέντε ρουλεμάν (bearings), ένα για κάθε δάχτυλο. Τα ρουλεμάν αυτά είναι υπεύθυνα για την περιστροφή του sensor housing σε σχέση με το mount, επιτρέποντας την παρακολούθηση κινήσεων τύπου splay. Κάθε ρουλεμάν συνοδεύεται από πέντε μικρούς μαγνήτες, τοποθετημένους σε συγκεκριμένες θέσεις στο εσωτερικό των ρουλεμάν.

Η επιλογή πέντε μαγνητών ανά ρουλεμάν δεν έγινε αυθαίρετα, αλλά προέκυψε έπειτα από πειραματική αξιολόγηση της έντασης και της σταθερότητας του μαγνητικού πεδίου, ιδιαίτερα σε συνθήκες όπου η απόσταση από τον αισθητήρα είναι σημαντική. Η ύπαρξη πολλών μαγνητών επιτρέπει τη δημιουργία ισχυρότερου και πιο ομοιογενούς πεδίου, το οποίο ενισχύει την αξιοπιστία και την ακρίβεια της αντίχενσης, μειώνοντας παράλληλα την πιθανότητα "νεκρών σημείων" ή ασθενών περιοχών καταγραφής. Αυτό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο δεδομένου ότι το μαγνητικό σήμα μεταδίδεται από την εξωτερική επιφάνεια του δακτύλου προς το εσωτερικό του glove, μέσω του housing και των μηχανικών στοιχείων, διανύοντας αποστάσεις που μπορεί να μειώσουν την ακρίβεια μέτρησης αν δεν ενισχυθεί σωστά το πεδίο.



Σχήμα 6.1 – Mount Παλάμης[31]

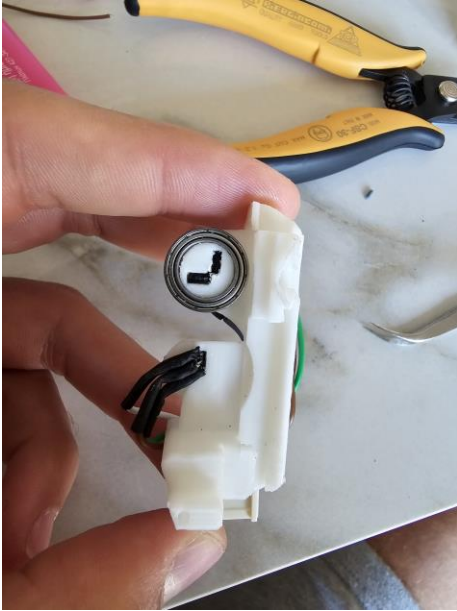
6.2 Sensor Housing



Σχήμα 6.2 – Sensor Housing [31]

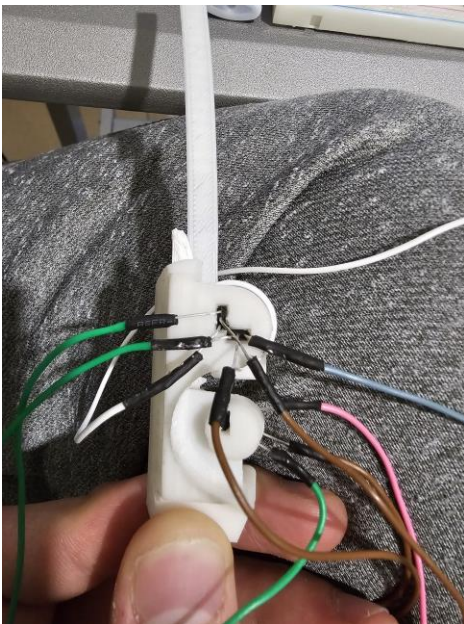
Το sensor housing αποτελεί αναμφίβολα το πλέον κρίσιμο υποσύστημα στην αρχιτεκτονική του απτικού γαντιού, καθώς φιλοξενεί την κύρια μονάδα ανίχνευσης της κίνησης κάθε δακτύλου. Κατασκευασμένο ώστε να εφάπτεται με ακρίβεια επάνω σε ένα ρουλεμάν (bearing), το housing ενσωματώνει τρεις Hall effect αισθητήρες, οι οποίοι λειτουργούν συνδυαστικά για την καταγραφή των βασικών βαθμών ελευθερίας της άρθρωσης του δακτύλου.

Ο πρώτος από αυτούς τους αισθητήρες είναι υπεύθυνος για την ανίχνευση της κίνησης spray, δηλαδή της απαγωγής και προσαγωγής των δακτύλων σε σχέση με την παλάμη. Αυτό επιτυγχάνεται καθώς το σύνολο του sensor housing περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του εντός του ρουλεμάν, όταν το δάχτυλο κινείται πλευρικά. Η σχετική μετατόπιση του μαγνητικού πεδίου που προκύπτει από αυτή την περιστροφή καταγράφεται από τον αισθητήρα ως μεταβολή έντασης, επιτρέποντας την εξαγωγή της θέσης του δακτύλου στον αντίστοιχο άξονα.



Σχήμα 6.3 –Sensor Splay

Οι δύο υπόλοιποι Hall αισθητήρες είναι τοποθετημένοι κάθετα μεταξύ τους, σε διάταξη κατάλληλη ώστε να καταγράφουν τη μεταβολή του πεδίου μαγνήτη κατά την κάμψη και έκταση του δακτύλου. Ο μαγνήτης που συνοδεύει το σύστημα είναι τοποθετημένος πάνω σε έναν κινητό άξονα και μετακινείται σε κυκλική τροχιά μπροστά από τους αισθητήρες, ως αποτέλεσμα της μετάδοσης κίνησης μέσω gear και rack. Η μεταβολή της θέσης του μαγνήτη σε σχέση με τους δύο αισθητήρες δημιουργεί μια ζεύξη σημάτων που είναι μαθηματικά ανάλογη του ημιτόνου και του συνημιτόνου της γωνίας κάμψης.

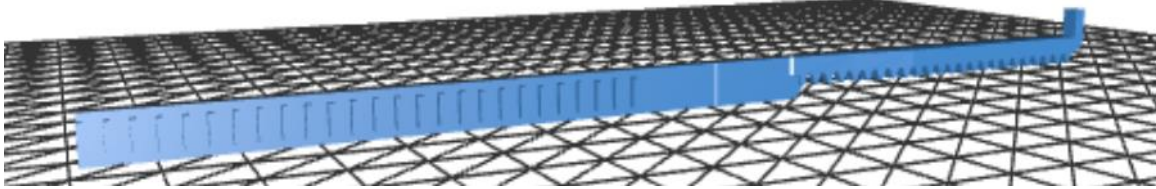


Σχήμα 6.3 – Flexion Sensors

Η τεχνική \sin/\cos mixing, που εφαρμόζεται σε επίπεδο firmware, επιτρέπει τον υπολογισμό της γωνιακής θέσης με υψηλή ακρίβεια, χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση atan2 για τη μετατροπή των δύο αναλογικών σημάτων σε μία συνεχή τιμή γωνίας. Η τοποθέτηση των αισθητήρων αυτών απαιτεί υψηλό βαθμό ακρίβειας, καθώς ακόμη και μικρές αποκλίσεις στην απόσταση ή στην ευθυγράμμιση με τον μαγνήτη μπορεί να οδηγήσουν σε παραμορφώσεις της καταγραφόμενης γωνίας, αστάθεια ή απώλεια ευαισθησίας. Συνολικά, το sensor housing επιτελεί τον ρόλο της ενιαίας πλατφόρμας εντοπισμού κίνησης, με τον σχεδιασμό του να επιτρέπει την καταγραφή τριών ανεξάρτητων βαθμών ελευθερίας με ελάχιστα

εξαρτήματα. Η λειτουργία του αποτελεί τον πυρήνα της μηχανικής-ηλεκτρονικής διασύνδεσης στο γάντι και καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα των απτικών δεδομένων που προκύπτουν.

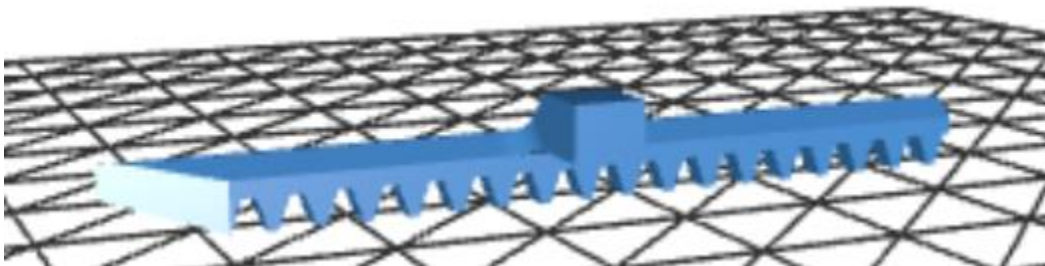
6.3 Gear Mechanism και Finger Rack



Σχήμα 6.4 – Finger Rack [31]

Κατά τη διάρκεια της κάμψης ή της έκτασης ενός δακτύλου, ενεργοποιείται ένας γραμμικός μηχανισμός οδοντωτής ράβδου (rack), ο οποίος ακολουθεί την κίνηση του δακτύλου κατά μήκος της φυσικής άρθρωσης. Το rack αυτό, μέσα από την εμπλοκή του με ένα μικρό γρανάτζι (gear) που βρίσκεται ενσωματωμένο στο σώμα του sensor housing, μετατρέπει τη γραμμική μετατόπιση σε περιστροφική κίνηση. Η περιστροφή αυτή έχει άμεση επίδραση στον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται η σχετική θέση του μαγνήτη ως προς τους Hall effect αισθητήρες που βρίσκονται τοποθετημένοι στο εσωτερικό του housing. Η αλλαγή αυτή του προσανατολισμού του μαγνητικού πεδίου, λόγω της περιστροφικής μετατόπισης του μαγνήτη, καταγράφεται από τους αισθητήρες ως μεταβολή στην αναλογική ένταση του πεδίου. Με τη χρήση της τεχνικής sin/cos mixing και της αντίστοιχης μαθηματικής επεξεργασίας, μπορεί να εξαχθεί η γωνιακή θέση του δακτύλου με υψηλή ευαισθησία και επαναληψιμότητα. Έτσι, ο αρχικός γραμμικός βαθμός ελευθερίας του δακτύλου μετατρέπεται ουσιαστικά σε περιστροφικό σήμα, που είναι πολύ πιο διαχειρίσιμο για μικροελεγκτές και λογισμικά απτικής ανάλυσης. Η μηχανική αυτή λύση επιτρέπει την καταγραφή κίνησης με αξιοσημείωτη απλότητα και ακρίβεια, αποφεύγοντας την ανάγκη για πιο πολύπλοκες και ευπαθείς λύσεις όπως αισθητήρες κάμψης ή συστήματα με ποτενσιόμετρα. Επιπλέον, προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε θέματα χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, καθιστώντας την ιδανική επιλογή για εφαρμογές wearable συσκευών όπως το παρόν γάντι.

6.4 Servo Rack και Force Feedback



Σχήμα 6.5 – Servo Rack [31]

Ο μηχανισμός της απτικής ανάδρασης στο απτικό γάντι βασίζεται σε μία απλή αλλά αποτελεσματική αρχιτεκτονική που αξιοποιεί τη μηχανική παρεμπόδιση της κίνησης του δακτύλου μέσω ενός συστήματος με finger rack και servo rack. Συγκεκριμένα, κάτω από το finger rack —το οποίο ακολουθεί γραμμικά την κάμψη και την έκταση του δακτύλου— τοποθετείται ένα δεύτερο

οδοντωτό στοιχείο, το λεγόμενο servo rack. Το servo rack αυτό είναι μηχανικά ανεξάρτητο από το finger rack και κινείται ελεγχόμενα μέσω ενός σερβοκινητήρα, ο οποίος περιστρέφει ένα μικρό γρανάζι που το ωθεί προς τα εμπρός ή προς τα πίσω, ανάλογα με τις ανάγκες της προσομοίωσης.



Σχήμα 6.6 – Gearing Mechanism

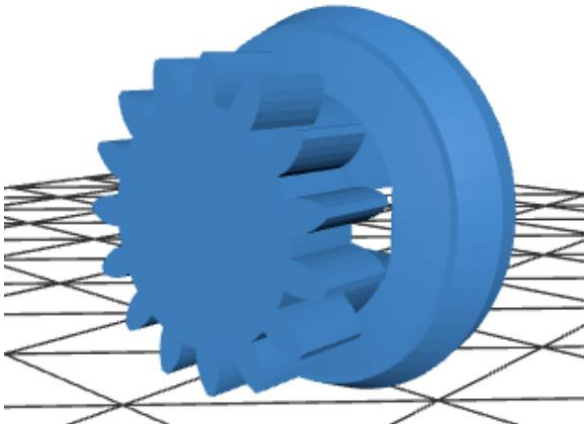
Το κρίσιμο σημείο αυτής της διάταξης βρίσκεται στα κάθετα εξογκώματα που φέρουν τόσο το finger rack όσο και το servo rack. Αυτά τα εξογκώματα είναι επιμελώς σχεδιασμένα ώστε, όταν έρθουν σε επαφή, να εμποδίζουν την περαιτέρω κίνηση του finger rack. Η ενεργοποίηση της απτικής αντίστασης δεν είναι συνεχής, αλλά βασίζεται στη συνθήκη ότι ο χρήστης "αγγίζει" ή "κρατά" ένα αντικείμενο στον εικονικό χώρο. Όταν αυτή η συνθήκη πληρούται —με βάση τα δεδομένα που φτάνουν από το Unity μέσω της σειριακής επικοινωνίας— ο μικροελεγκτής δίνει εντολή στον σερβοκινητήρα να περιστραφεί και να μετατοπίσει το servo rack, φέρνοντας το εξόγκωμά του ακριβώς πίσω από το αντίστοιχο του finger rack.

Η μηχανική επαφή μεταξύ των δύο αυτών εξογκωμάτων δημιουργεί ένα απότομο και σαφές σημείο διακοπής στην κίνηση του δακτύλου, κάτι που ο χρήστης αντιλαμβάνεται ως "αντίσταση" ή "επαφή με σταθερό σώμα". Η κάμψη παύει φυσικά, όχι επειδή το λογισμικό μπλοκάρει την κίνηση, αλλά επειδή ο χρήστης δεν μπορεί πια να συνεχίσει την κίνηση εξαιτίας ενός πραγματικού, φυσικού εμποδίου. Αυτή η τεχνική δημιουργεί ένα αίσθημα ρεαλιστικής κιναισθητικής απτικής εμπλοκής με αντικείμενα, κάτι που είναι ιδιαίτερα πολύτιμο για εφαρμογές σε VR περιβάλλοντα, όπου η φυσική ανατροφοδότηση είναι περιορισμένη ή ανύπαρκτη.

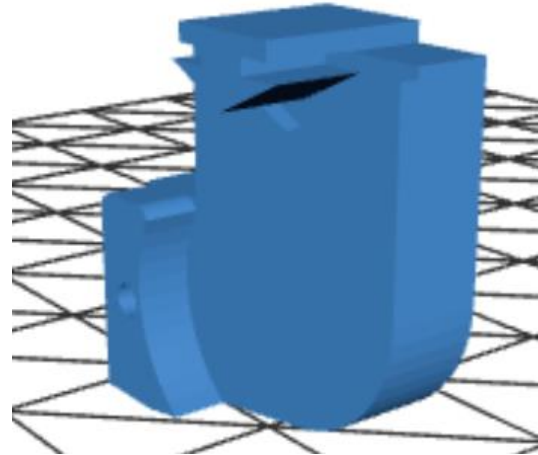
Το σύστημα είναι πλήρως παραμετροποιήσιμο ως προς τη θέση και το χρονισμό του activation point, δηλαδή του σημείου όπου ο σερβοκινητήρας θέτει σε λειτουργία τον περιορισμό. Έτσι,

μπορεί να προσαρμοστεί για αντικείμενα διαφόρων μεγεθών ή να δημιουργήσει δυναμική προσομοίωση ελαστικότητας και σκληρότητας. Παρά τη μηχανική απλότητά του, προσφέρει σημαντικό βαθμό ρεαλισμού και συνιστά μία από τις πιο λειτουργικές και οικονομικά αποδοτικές μεθόδους για μηχανική απτική ανάδραση σε κατασκευές DIY ή ανοικτού κώδικα.

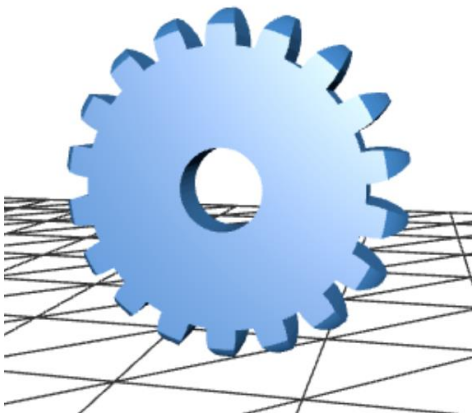
6.5 Sensor top, Magnet Pinion, Servo Gear



Σχήμα 6.7 – Magnet Pinion [31]



Σχήμα 6.8 – Sensor Top [31]



Σχήμα 6.9 – Servo Gear [31]

Το magnet pinion είναι ένα μικρό γράναζι που περιστρέφεται καθώς μετακινείται το finger rack κατά την κάμψη ή την έκταση του δακτύλου. Η περιστροφή του προκύπτει από την εμπλοκή του με το finger rack και μεταφέρεται απευθείας στο εσωτερικό του sensor housing. Στο κέντρο του pinion είναι τοποθετημένοι σε γραμμική διάταξη πέντε μικροί μαγνήτες. Οι μαγνήτες αυτοί περνούν μπροστά από δύο Hall effect αισθητήρες τοποθετημένους κάθετα, οι οποίοι καταγράφουν την αλλαγή θέσης καθώς το pinion περιστρέφεται. Μέσα από αυτή τη διάταξη καταγράφεται η γωνία κάμψης του δακτύλου με ακρίβεια, μετατρέποντας τη γραμμική κίνηση σε πληροφορία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το λογισμικό.

Το sensor top είναι το επάνω μέρος του μηχανισμού που εφαρμόζει επάνω στο sensor housing και αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία τοποθετείται και σταθεροποιείται ο σερβοκινητήρας. Παράλληλα, συγκρατεί το finger rack στη θέση του, εξασφαλίζοντας ότι ολόκληρη η δομή παραμένει σταθερή και σωστά ευθυγραμμισμένη κατά τη διάρκεια της λειτουργίας. Το sensor top κουμπώνει με ακρίβεια πάνω στο housing, δημιουργώντας μια ενιαία μονάδα που συγκρατεί μηχανικά τα κινούμενα μέρη της μονάδας αισθητήρα και ανάδρασης.

Το servo gear είναι το γρανάζι που βρίσκεται προσαρμοσμένο απευθείας στον άξονα του σερβοκινητήρα. Μέσω της περιστροφής του, μεταδίδει κίνηση στο servo rack, το οποίο μετακινείται μπροστά ή πίσω ανάλογα με την εντολή που δίνεται από τον μικροελεγκτή. Το servo gear πρέπει να είναι σωστά ευθυγραμμισμένο με το servo rack ώστε να εξασφαλίζεται ομαλή και αξιόπιστη μετάδοση της κίνησης. Αποτελεί βασικό στοιχείο του μηχανισμού που ευθύνεται για τη δημιουργία της απτικής αντίστασης στο γάντι, όταν ο χρήστης αλληλεπιδρά με ψηφιακά αντικείμενα.

6.6 Προβλήματα και Προτάσεις

Η διαδικασία συναρμολόγησης του μηχανισμού στο σημείο του sensor module αποδείχθηκε ιδιαίτερα απαιτητική και χρονοβόρα, καθώς απαιτούσε εξαιρετική ακρίβεια και προσοχή τόσο λόγω της περιορισμένης γεωμετρικής ανοχής των εξαρτημάτων όσο και της δομικής τους ευθραυστότητας. Ιδιαίτερα στην περιοχή του sensor housing, όπου φιλοξενούνται οι Hall effect αισθητήρες, η οποιαδήποτε απόκλιση κατά την τοποθέτηση επηρέαζε άμεσα τη λειτουργικότητα του συστήματος.

Η εκτύπωση του sensor housing παρουσίασε επανειλημμένες αστοχίες, με αποτέλεσμα να απαιτηθεί η αντικατάστασή του πολλαπλές φορές. Οι αποτυχίες αυτές σχετίζονταν κυρίως με την ακρίβεια εκτύπωσης σε λεπτά τοιχώματα και τη μεταβλητότητα στη γεωμετρία κατά την ψύξη του PLA, το οποίο προκαλούσε ασυμβατότητα κατά τη συναρμολόγηση των υπολοίπων τμημάτων. Η απόσταση μεταξύ των Hall αισθητήρων και των μαγνητών αποδείχθηκε κρίσιμος παράγοντας για την απόδοση της αντίχενωσης. Έτσι, η τοποθέτηση των αισθητήρων δεν μπορούσε να βασιστεί σε εμπειρική τοποθέτηση αλλά απαιτούσε συνεχή χειροκίνητο έλεγχο κατά τη διαδικασία σταθεροποίησής τους.



Σχήμα 6.10 – Ευαίσθητο Overhang

Οι αισθητήρες έπρεπε να τοποθετηθούν όσο το δυνατόν πιο κοντά στους μαγνήτες χωρίς όμως να υπάρχει άμεση επαφή, και να μονωθούν κατάλληλα ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα βραχυκυκλώματος. Η έλλειψη μηχανικών σταθεροποιητών στο αρχικό σχέδιο καθιστούσε την τελική τοποθέτηση ευάλωτη σε μετακινήσεις, ιδιαίτερα μετά από επανειλημμένες μηχανικές καταπονήσεις. Σε αυτές τις περιπτώσεις, χρησιμοποιήθηκε κοινή κόλλα στιγμής (τύπου super glue) για να διατηρηθούν τα μέρη στην επιθυμητή τους θέση, λύση πρακτική αν και όχι ιδανική για μακροχρόνια χρήση.

Σημαντικό πρόβλημα εντοπίστηκε και στο σημείο του sensor top, του πλαστικού καλύμματος που συγκρατεί τον finger rack και τον σερβοκινητήρα στη θέση τους. Κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας του γαντιού, η αντίσταση που ασκούσε ο μηχανισμός του finger rack προς το εσωτερικό του housing οδηγούσε συχνά στην αποκόλληση του sensor top, αποσταθεροποιώντας τον μηχανισμό. Επιπλέον, η κίνηση του σερβοκινητήρα προκαλούσε μικρές αλλά σημαντικές μετατοπίσεις στο gear, το οποίο χρειαζόταν να παραμείνει ευθυγραμμισμένο με το servo rack. Σε περιπτώσεις που το gear μετατοπιόταν ακόμη και ελάχιστα, η δύναμη του σερβοκινητήρα δεν μεταδιδόταν σωστά, οδηγώντας σε αδυναμία παραγωγής απτικής ανάδρασης.

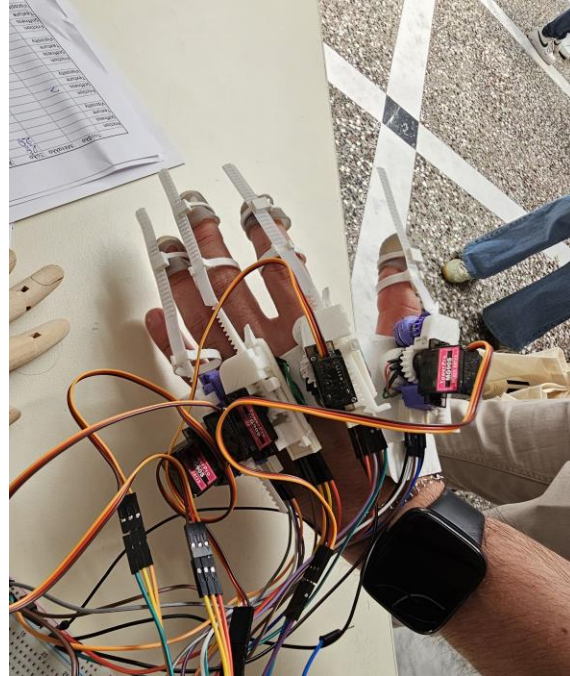
Περαιτέρω δυσκολία εντοπίστηκε στη σύνδεση του gear με τον άξονα (shaft) του σερβοκινητήρα. Ορισμένα από τα gears που χρησιμοποιήθηκαν διέθεταν τρύπα μεγαλύτερης διαμέτρου απ' ό,τι χρειαζόταν, με αποτέλεσμα να μην εφαρμόζουν σταθερά στον άξονα. Αυτό είχε ως συνέπεια, σε συνθήκες αντίστασης, το gear να μην μεταδίδει την περιστροφή, αλλά να παραμένει ακίνητο ενώ ο άξονας περιστρεφόταν. Η πρόχειρη αλλά αποτελεσματική λύση ήταν η συγκόλληση του gear πάνω στον άξονα με κόλλα στιγμής, εξαλείφοντας το πρόβλημα της ολίσθησης.

Η συνολική εμπειρία συναρμολόγησης και λειτουργικής προσαρμογής ανέδειξε την ανάγκη για βελτίωση τόσο του σχεδιασμού των τρισδιάστατων εξαρτημάτων όσο και της συνολικής ηλεκτρομηχανολογικής αρχιτεκτονικής. Σε επόμενες υλοποιήσεις προτείνεται η δημιουργία

προσαρμοσμένου PCB που να περιλαμβάνει τη διανομή ισχύος, τη σύνδεση αισθητήρων και κινητήρων, καθώς και την ολοκληρωμένη στήριξη των εξαρτημάτων. Μια τέτοια παρέμβαση θα μείωνε όχι μόνο τον όγκο και την πολυπλοκότητα της κατασκευής αλλά και τις πιθανότητες μηχανικών ή ηλεκτρικών αστοχιών.[31]



Σχήμα 6.11 – Προσαρμογή στο χέρι χωρίς servo



Σχήμα 6.12 – Προσαρμογή στο χέρι

Κεφάλαιο 7ο: Τεχνικά Προβλήματα και Αντιμετώπιση

7.1 Προβλήματα Calibration – Hall Sensors

Η διαδικασία καλιμπραρίσματος των Hall effect αισθητήρων αποτέλεσε ένα από τα σημαντικότερα τεχνικά εμπόδια που έπρεπε να αντιμετωπιστούν κατά την ανάπτυξη του απτικού γαντιού. Η ακρίβεια στη μέτρηση της γωνίας κάμψης κάθε δακτύλου εξαρτάται άμεσα από την καλή ρύθμιση των ελάχιστων και μέγιστων τιμών του αναλογικού σήματος που λαμβάνεται από τους αισθητήρες.

Η αρχική προσέγγιση βασίστηκε στον προκαθορισμένο μηχανισμό calibration που υπήρχε στο αποθετήριο LucidGloves. Σύμφωνα με αυτόν, ο χρήστης καλείτο να κινήσει το χέρι του από πλήρη έκταση (ανοιχτή παλάμη) σε πλήρη κάμψη (γροθιά), εντός ενός συγκεκριμένου αριθμού κύκλων του setup(). Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, το σύστημα κατέγραφε τις χαμηλότερες και υψηλότερες τιμές από κάθε αισθητήρα και τις αποθήκευε στην EEPROM του ESP32 για μελλοντική χρήση. Το σύστημα κανονικοποίησε(normalisation) βασιζόταν στη μετατροπή αυτών των raw τιμών στο εύρος [0, 1] ώστε να επιτρέψει την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση λειτουργιών όπως grasp ή release στο σύστημα αναγνώρισης χειρονομιών. Ωστόσο, στην πράξη, η αποθήκευση των τιμών min/max δεν πραγματοποιούνταν σωστά, παρόλο που η λειτουργία εγγραφής στην EEPROM εκτελείτο φαινομενικά χωρίς σφάλμα. Οι τιμές παρέμεναν στατικές,

ακόμη και μετά από απότομες και πλήρεις κινήσεις του χεριού. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα η κανονικοποίηση να αποτυγχάνει, οι γωνίες να παραμένουν στάσιμες ή εσφαλμένες και το σύστημα gestures να μη λειτουργεί καθόλου. Παρά τις προσπάθειες εντοπισμού του προβλήματος στο firmware, δεν εντοπίστηκε συγκεκριμένο bug, ενώ η λειτουργία της EEPROM φάνηκε να αποτελεί τον πυρήνα της αστοχίας. Η πρώτη απόπειρα επίλυσης έγινε με χρήση σταθερών min/max τιμών που είχαν προκύψει εμπειρικά από απομονωμένες μετρήσεις. Αργότερα υλοποιήθηκε νέα προσέγγιση calibration, όπου οι αισθητήρες τοποθετούνταν με σταθερό finger rack και συγκεκριμένο προσανατολισμό μαγνητών, έτσι ώστε η θέση "δάχτυλο πλήρως ανοιχτό" να αντιστοιχεί σε τιμή κοντά στο μέγιστο εύρος (4095), ενώ η θέση "γροθιά" πλησίαζε το μηδέν. Ο κώδικας normalisation εφαρμόστηκε αρχικά στο firmware, με min τιμή το 0 και μέγιστη το αναλογικό μέγιστο του ESP32 (4095). Για να αποτραπεί η καταγραφή εσφαλμένων ή απότομων μεταβολών, εφαρμόστηκε επιπλέον λογική φιλτραρίσματος. Αν ανιχνευόταν ξαφνική αλλαγή που υπερέβαινε τον αναμενόμενο ρυθμό μεταβολής (π.χ. κίνηση πάνω από μία πλήρη περιστροφή μαγνήτη), η τιμή μπλοκαριζόταν και αγνοείτο. Προστέθηκε επίσης median φίλτρο για τη σταθεροποίηση των τιμών, αλλά παρατηρήθηκε ότι όσο αυξανόταν ο αριθμός των samples, αυξανόταν και η καθυστέρηση στην εμφάνιση των νέων τιμών στο Unity, επηρεάζοντας αρνητικά την απόκριση. Τελικά, εφαρμόστηκε κατώφλι (threshold) αλλαγής ώστε να αγνοούνται μικρές αυξομειώσεις (jitter) και να αποστέλλονται νέες τιμές μόνο όταν η μεταβολή ήταν ουσιαστική. Μετά από πολλαπλές δοκιμές και αποτυχίες, εγκαταλείφθηκε πλήρως η χρήση της EEPROM, καθώς κρίθηκε ότι πιθανόν αυτή προκαλούσε τη δυσλειτουργία. Αντί για αποθήκευση τιμών, επιλέχθηκε η λύση του δυναμικού calibration κατά την εκκίνηση. Σε κάθε boot της συσκευής, ο χρήστης καλείται να κινήσει σταδιακά όλα τα δάχτυλα από πλήρη έκταση σε πλήρη κάμψη, ώστε να καταγραφούν εκ νέου οι min και max τιμές των αισθητήρων. Η νέα αυτή προσέγγιση, αν και απαιτεί από τον χρήστη μια γρήγορη διαδικασία calibration κάθε φορά, εξασφαλίζει μεγαλύτερη αξιοπιστία και ακρίβεια χωρίς την ανάγκη μόνιμης αποθήκευσης. Είναι σημαντικό ωστόσο η κίνηση αυτή να γίνεται με σωστό τρόπο, καθώς ελλιπές ή λανθασμένο calibration μπορεί να οδηγήσει σε απότομες μεταβολές των τιμών ή τεχνητές αυξομειώσεις, που επηρεάζουν την κανονικοποίηση και κατ' επέκταση τη λειτουργία των gestures στο εικονικό περιβάλλον. Η εμπειρία αυτή επιβεβαίωσε ότι η σταθερή, ακριβής και επαναλαμβανόμενη διαδικασία καλιμπραρίσματος είναι καθοριστική για την αποτελεσματικότητα και αξιοπιστία του συστήματος.

7.2 Προβλήματα ESP32 – Bootloop & Καθυστέρηση

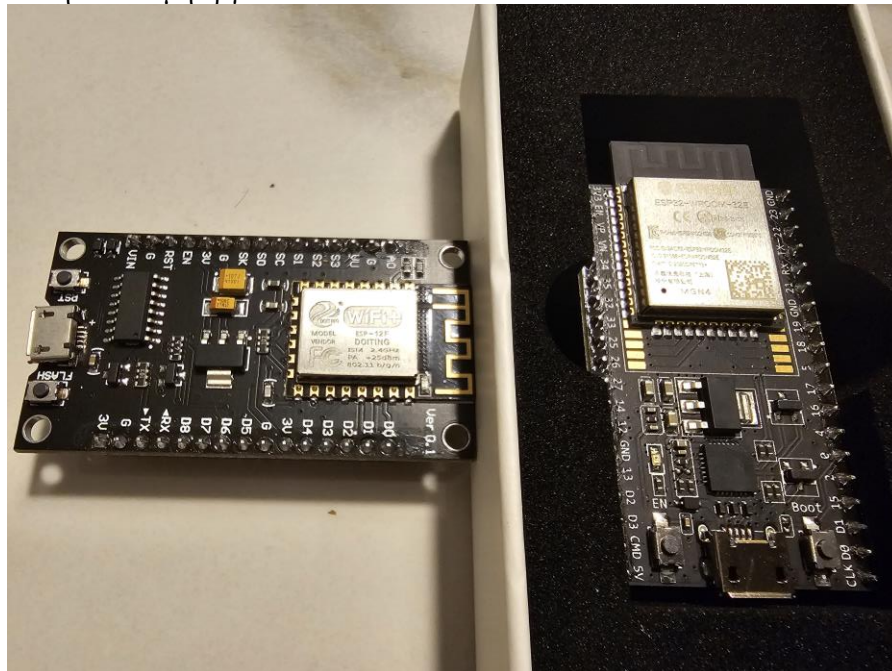
Κατά τα πρώτα στάδια της υλοποίησης, για λόγους διαθεσιμότητας, χαμηλού κόστους και εξοικείωσης με την πλατφόρμα, επιλέχθηκε ένα βασικό μοντέλο ESP32 8266 προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ως κεντρικός μικροελεγκτής του γαντιού. Παρότι σε απλές εφαρμογές είχε αποδειχθεί λειτουργικός, στη συγκεκριμένη περίπτωση αποδείχθηκε μη κατάλληλος για το εύρος των απαιτήσεων που έθετε το συνολικό σύστημα.

Το γάντι απαιτεί την ταυτόχρονη διαχείριση πολλαπλών διεργασιών και υποσυστημάτων σε πραγματικό χρόνο. Συγκεκριμένα:

- την ανάγνωση αναλογικών σημάτων από μεγάλο πλήθος Hall effect αισθητήρων (μέσω αναλογικού πολυπλέκτη),
- την οδήγηση πέντε σερβοκινητήρων με σήματα PWM για τον έλεγχο απτικής ανάδρασης,
- την επεξεργασία των σημάτων αυτών για τη χαρτογράφηση της γωνιακής θέσης των δακτύλων,
- και τη σταθερή επικοινωνία με την πλατφόρμα Unity μέσω σειριακής διεπαφής, με στόχο την ενημέρωση του εικονικού χεριού.

Το αρχικό ESP32 module παρουσίαζε συχνά δυσλειτουργίες κατά την κανονική λειτουργία. Το πιο χαρακτηριστικό πρόβλημα ήταν η εμφάνιση bootloop, δηλαδή συνεχείς αυτόματες επανεκκινήσεις του μικροελεγκτή κατά την εκτέλεση του sketch. Αυτό το φαινόμενο εμπόδιζε τη σταθερή χρήση του συστήματος και ενίοτε οδηγούσε σε πλήρη αδυναμία λειτουργίας. Μετά από ανάλυση, οι πιθανές αιτίες εντοπίστηκαν σε:

- ανεπαρκή διαχείριση μνήμης και διακοπών (interrupts), ιδίως σε περιπτώσεις που πολλαπλές είσοδοι ή εξοδοι έπρεπε να διαχειριστούν εντός του ίδιου loop(),
- πιθανή υπέρβαση των επιτρεπτών ορίων τάσης ή ρεύματος, ειδικά κατά την ταυτόχρονη ενεργοποίηση όλων των σερβοκινητήρων,
- και περιορισμούς στους GPIOs και τη συνολική απόδοση ανά πυρήνα, ιδιαίτερα αν δεν γινόταν σωστή κατανομή εργασιών.



Σχήμα 7.1 – ESP32-8266(αριστερά) ESP32-WROOM32E(δεξιά)

Η αντικατάσταση του αρχικού μικροελεγκτή με έναν πιο ισχυρό και σταθερό μοντέλο, συγκεκριμένα ESP32-WROOM32-E, προσέφερε άμεση βελτίωση στη λειτουργικότητα. Με το νέο module:

- εξαλείφθηκαν πλήρως τα φαινόμενα επανεκκίνησης,
- η σειριακή επικοινωνία με την Unity έγινε πιο σταθερή και αξιόπιστη,
- αξιοποιήθηκε καλύτερα η dual-core αρχιτεκτονική του ESP32: ο ένας πυρήνας χρησιμοποιήθηκε για την απόκριση στις αναγνώσεις των αισθητήρων, ενώ ο άλλος αφιερώθηκε στην επικοινωνία και στη μετάδοση δεδομένων,

Το συγκεκριμένο περιστατικό ανέδειξε τη σημασία της επιλογής κατάλληλου υλικού όχι απλώς βάσει κόστους ή διαθεσιμότητας, αλλά κυρίως βάσει των πραγματικών απαιτήσεων της εφαρμογής. Ιδιαίτερα σε συστήματα με πολλαπλές αλληλεπιδράσεις hardware και real-time ανταλλαγή δεδομένων, είναι κρίσιμο ο μικροελεγκτής να διαθέτει τα απαραίτητα αποθέματα επεξεργαστικής ισχύος, μνήμης και σταθερότητας, ώστε να διασφαλίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία του συνόλου.

7.3 Υλοποίηση Piezo ως Sensor & Actuator

Η χρήση piezoelectric στοιχείων για την παροχή απτικής ανάδρασης αποτέλεσε έναν από τους βασικούς τεχνολογικούς στόχους της παρούσας εργασίας. Η θεωρητική τους ικανότητα να προσφέρουν εντοπισμένη δόνηση με υψηλή συχνοτική απόκριση, μικρό φυσικό μέγεθος και ελάχιστη κατανάλωση τα καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικά για χρήση σε εφαρμογές φορητής απτικής τεχνολογίας, όπως γάντια εικονικής πραγματικότητας. Ωστόσο, κατά την πειραματική φάση διαπιστώθηκαν περιορισμοί τόσο ως προς την ένταση της δόνησης όσο και ως προς τη λειτουργικότητα όταν επιχειρήθηκε παράλληλη χρήση των piezo ως αισθητήρων και ενεργοποιητών.

7.3.1 Αρχική Πειραματική Φάση με Piezoelectric Buzzers και MOSFET

Τα πρώτα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με απλά piezo buzzers, τα οποία οδηγήθηκαν μέσω PWM σήματος από τον ESP32, με τη χρήση διακόπτη τύπου IRLZ44N MOSFET για ενίσχυση του ρεύματος. Το κύκλωμα βασιζόταν στη διάταξη: το θετικό άκρο του piezoelectric στοιχείου συνδεόταν σε εξωτερική τροφοδοσία στα 12V, το αρνητικό στο drain του MOSFET, το source στη γείωση, και η πύλη λάμβανε PWM από τον ESP32. Ωστόσο, τα αποτελέσματα ήταν περιορισμένα: η παραγόμενη δόνηση ήταν ασθενής, ελάχιστα αντιληπτή στο δέρμα και ανεπαρκής για ρεαλιστική απτική απεικόνιση, ιδίως σε συχνότητες άνω των 300 Hz. Η εμπειρική αδυναμία επίτευξης ικανοποιητικής απόδοσης οδήγησε στην εγκατάλειψη της αρχιτεκτονικής αυτής.

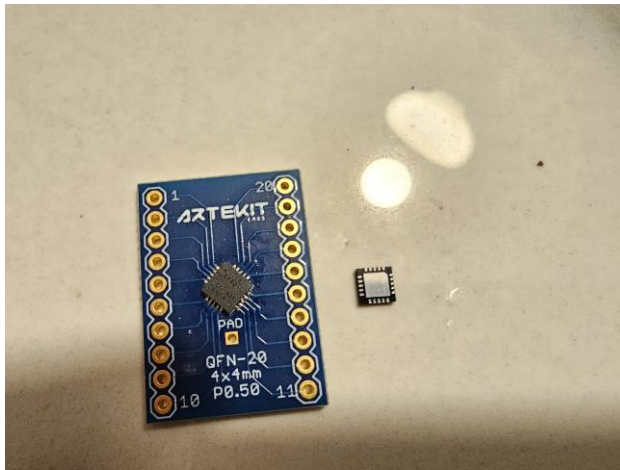


Σχήμα 7.2 – Piezoelectric Buzzer

7.3.2 Δοκιμές με Γεννήτρια Συναρτήσεων

Σε επόμενη φάση πραγματοποιήθηκαν πειράματα με χρήση γεννήτριας συναρτήσεων για την απευθείας διέγερση του piezo module με τάση ± 10 Vp-p. Ο στόχος ήταν να διαπιστωθεί κατά πόσο η μορφή της κυματομορφής και η σταθερότητα της τάσης επηρεάζουν την ένταση και την ποιότητα της παραγόμενης δόνησης. Αν και παρατηρήθηκε μικρή βελτίωση στην απτική αίσθηση, η ένταση παρέμεινε ανεπαρκής για πρακτική χρήση. Η μέγιστη έξοδος ± 10 Vp-p δεν αποδείχθηκε ικανή να προκαλέσει δόνηση ικανή να γίνει αντιληπτή με συνέπεια στην άκρη των δακτύλων.

7.3.3 Χρήση DRV8662 για Οδήγηση Υψηλής Τάσης

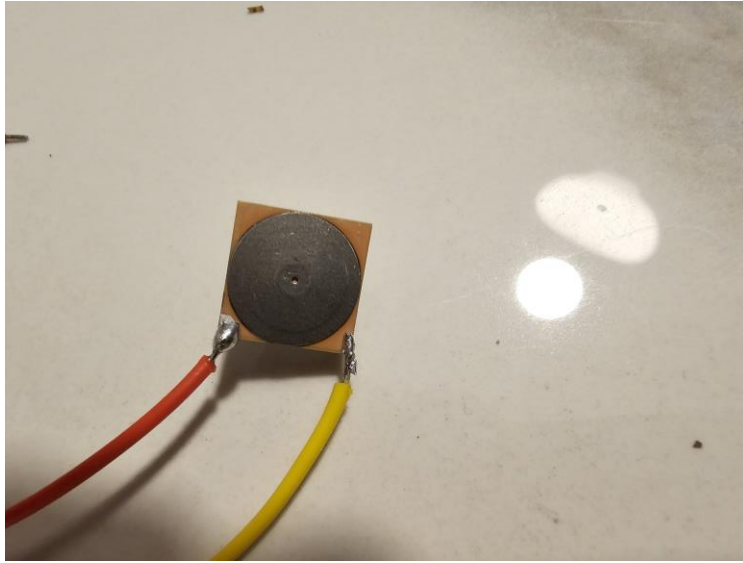


Σχήμα 7.3 – DRV8662

Ως πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση εξετάστηκε η χρήση του DRV8662 της Texas Instruments, ενός driver που ενσωματώνει boost converter και ενισχυτή διαφορικής εξόδου, προσφέροντας έως και 100Vp-p από είσοδο μόλις 5V. Η δυνατότητα αυτή είναι ιδανική για φορητές εφαρμογές, όπου η χρήση εξωτερικών τροφοδοτικών υψηλής τάσης είναι πρακτικά ανεπιθύμητη.

Ο driver υποστηρίζει φορτία έως 2.5 μ F και μπορεί να οδηγηθεί με σήμα PWM ή αναλογική είσοδο. Αν και η συνδεσμολογία υλοποιήθηκε επιτυχώς και ο driver λειτουργήσε χωρίς προφανή σφάλματα, η απόδοση στο τελικό αποτέλεσμα παρέμεινε μέτρια. Η απτική ανάδραση που παραγόταν δεν είχε την ένταση ή τη διακριτικότητα που απαιτείται για να προσδώσει λειτουργικό όφελος στο σύστημα.

7.3.4 Απόπειρες Διπλής Χρήσης – Actuation & Sensing



Σχήμα 7.4 - PowerHap 1919H022V120

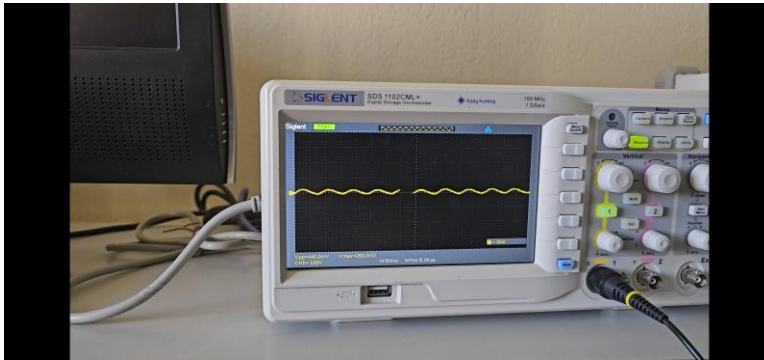
Έγιναν προσπάθειες να χρησιμοποιηθεί το ίδιο piezo στοιχείο ταυτόχρονα ως ενεργοποιητής και ως αισθητήρας πίεσης. Κατά την εφαρμογή πίεσης στο piezo κατά τη διάρκεια λειτουργίας, δεν παρατηρήθηκε κανένα ανιχνεύσιμο ηλεκτρικό σήμα, ούτε καν στιγμιαία peaks, όπως επιβεβαιώθηκε με χρήση παλμογράφου. Φάνηκε ότι η ισχυρή τάση διέγερσης υπερίσχυε πλήρως του παραγόμενου σήματος, καθιστώντας αδύνατη την εξαγωγή οποιασδήποτε χρήσιμης πληροφορίας πίεσης.



Σχήμα 7.5 - Δοκιμές Πίεσης του Powerhap(1)

Επιπλέον, εξετάστηκε η πιθανότητα χρήσης του piezo αποκλειστικά ως αισθητήρα πίεσης, χωρίς παράλληλη διέγερση. Κατά την εφαρμογή εξωτερικής πίεσης και από τις δύο πλευρές του piezoelectric στοιχείου σε ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες, παρατηρήθηκε ότι παράγονταν τάσεις της τάξης των 2V. Ωστόσο, όταν το στοιχείο τοποθετήθηκε εντός του γαντιού, διαπιστώθηκε ότι η φυσική πίεση που μπορεί να ασκήσει ο χρήστης κατά τη χρήση δεν επαρκεί για την παραγωγή αξιοποιήσιμου σήματος. Η αδυναμία άσκησης πίεσης με την απαιτούμενη

ένταση —λόγω του τρόπου που φοριέται το γάντι και της ελαστικότητας των επιφανειών— οδήγησε τελικά στην απόρριψη και αυτής της προσέγγισης.



Σχήμα 7.6 - Δοκιμές Πίεσης του

Powerhap(2)

7.3.5 Απόρριψη Λύσης με H-Bridge

Μία ακόμη λύση που εξετάστηκε ήταν η χρήση διακριτού κυκλώματος H-Bridge για την παραγωγή εναλλασσόμενης τάσης προς το piezo. Θεωρητικά, η μέθοδος αυτή θα μπορούσε να προσφέρει ισχυρότερη δόνηση με μεγαλύτερο swing τάσης, ωστόσο η υλοποίηση της απαιτούσε εξωτερικό τροφοδοτικό υψηλής τάσης, κάτι που δεν είναι πρακτικό ή ασφαλές σε wearable συσκευές.

Η εμπειρία από τη συνολική πειραματική διαδικασία έδειξε ότι, παρά τη θεωρητική ευελιξία και το ενδιαφέρον των piezoelectric υλικών, η πρακτική εφαρμογή τους σε αυτή τη μορφή και με αυτά τα μέσα δεν την καθιστά λειτουργική. Οι τεχνικοί και φυσικοί περιορισμοί που παρατηρήθηκαν κατέστησαν ανέφικτη τόσο τη χρήση τους ως actuator όσο και ως αισθητήρα, επιβεβαιώνοντας ότι απαιτείται διαφορετική προσεγγιστική σχεδίαση ή χρήση εξειδικευμένων εξαρτημάτων για να αξιοποιηθούν ουσιαστικά σε φορητές εφαρμογές απτικής διεπαφής.

7.3.6 Πειραματική Απόρριψη της Χρήσης Piezo ως Αισθητήρα

Αρχικός στόχος ήταν η διπλή χρήση του piezo: τόσο ως actuator (δόνηση), όσο και ως αισθητήρας (ανίχνευση πίεσης κατά τη σύλληψη αντικειμένων). Ωστόσο, δοκιμές με παλμογράφο έδειξαν ότι:

- Κατά τη χρήση γεννήτριας συναρτήσεων (20 V_{p-p}), ακόμη και όταν το piezo συμπιεζόταν και αποσυμπιεζόταν, δεν καταγραφόταν κανένα spike ή αλλαγή στην έξοδο του αισθητήρα,
- Η αρχική ιδέα χρήσης voltage divider για προστασία του ADC απορρίφθηκε, καθώς το σήμα ήταν ήδη αμελητέο σε πλάτος και ανεπαρκές για αναγνώριση.

Το σήμα sensing ουσιαστικά “σκεπαζόταν” από την ισχυρή τάση οδήγησης, και η ταυτόχρονη χρήση δεν ήταν τεχνικά εφικτή.

7.3.7 Περιορισμοί Συχνότητων και Απτικής Απόκρισης

Αν και τα piezo θεωρητικά αποδίδουν καλά σε υψηλές συχνότητες (έως και kHz), πειραματικά διαπιστώθηκε ότι:

- Οι αισθητές διαφορές μεταξύ διαφορετικών συχνότητων μειώνονται μετά τα ~300–500 Hz,
- Η απτική αντίληψη στα δάχτυλα περιορισμένη, και δεν μπορεί να ξεχωρίσει ο χρήστης πάνω από 2 διακριτές "υφές",
- Το αποτέλεσμα ήταν πολύ χαμηλή διακριτική ικανότητα, που δεν επιτρέπει ρεαλιστική αναπαράσταση επιφανειών.

7.3.8 Τεχνικά Εμπόδια Κατασκευής – Συγκόλληση DRV8662

Ο DRV8662 διατίθεται αποκλειστικά σε QFN-20 (4×4mm), γεγονός που καθιστά τη συγκόλληση του ιδιαίτερα δύσκολη. Η διαδικασία έγινε με:

- QFN-20 breakout board (adapter)
- **Σχήμα 7.7** - Low temperature Solder Paste
- solder paste χαμηλής θερμοκρασίας
- hot air station

Η συγκόλληση πέτυχε, αλλά το τελικό κύκλωμα παρουσίασε αστάθεια, πιθανώς λόγω προβλημάτων στο feedback του boost converter, με αποτέλεσμα να μην αξιοποιηθεί λειτουργικά στο τελικό glove.

Σχήμα 7.8 - QFN-20 breakout board



7.3.9 Συμπεράσματα

Παρότι η χρήση piezoelectric στοιχείων εμφανίζεται ως ιδανική λύση στη θεωρία (λόγω ταχύτητας απόκρισης, όγκου, χαμηλής κατανάλωσης), στην πράξη δεν κατέστη δυνατόν να επιτευχθεί το επιθυμητό επίπεδο λειτουργικότητας με ασφάλεια και αξιοπιστία. Η προσέγγιση εγκαταλείφθηκε στο πλαίσιο του παρόντος έργου.

7.4 Δυσκολίες Εκτύπωσης και Συναρμολόγησης 3D Μοντέλων

Η κατασκευή του πρωτοτύπου του απτικού γαντιού στηρίχθηκε σε εξαρτήματα που προήλθαν από τρισδιάστατη εκτύπωση βάσει των ανοικτού κώδικα σχεδίων του έργου LucidGloves (Prototype 5). Αν και τα αρχεία προσφέρουν γενική λειτουργικότητα και πληρότητα ως προς τη βασική αρχιτεκτονική του μηχανισμού, η διαδικασία εκτύπωσης και στη συνέχεια η μηχανική συναρμολόγηση αποδείχθηκαν ιδιαίτερα απαιτητικές, τόσο ως προς την αξιοπιστία όσο και ως προς την απαιτούμενη ακρίβεια εφαρμογής.

Το πιο σύνθετο και προβληματικό εξάρτημα ήταν το sensor housing. Πρόκειται για ένα τμήμα που στεγάζει τρεις Hall effect αισθητήρες, φέρει υποδοχές για την τοποθέτηση ρουλεμάν, gears και μαγνητών, ενώ ταυτόχρονα καλείται να αντέξει τις μηχανικές δυνάμεις που προκύπτουν από τη μετακίνηση του finger rack και τη δράση του μηχανισμού force feedback μέσω του σερβοκινητήρα. Η γεωμετρία του sensor housing είναι ιδιαίτερα περίπλοκη, με γέφυρες και overhangs που καθιστούν απαραίτητη τη χρήση υποστηρικτικών δομών (supports) κατά την εκτύπωση. Τα σημεία αυτά συχνά υπέστησαν αστοχία είτε λόγω ασθενούς πρόσφυσης στην πλάκα, είτε κατά την απομάκρυνση των υποστυλωμάτων, οδηγώντας σε μερική ή πλήρη καταστροφή του αντικειμένου. Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν περισσότερες από δέκα αποτυχημένες εκτυπώσεις του συγκεκριμένου εξαρτήματος, είτε λόγω warping, είτε λόγω φθοράς των λεπτών τμημάτων. Ακόμα και όταν η εκτύπωση ολοκληρωνόταν επιτυχώς, απαιτούσε χειροκίνητη παρέμβαση και σημαντική επεξεργασία: καθαρισμό υπολειμμάτων, λείανση επιφανειών, τροποποιήσεις σε υποδοχές μαγνητών και προσαρμογή στα ρουλεμάν και τους αισθητήρες ώστε να εφαρμόζον χωρίς τριβές ή παραμορφώσεις. Το σημείο με τη μεγαλύτερη συχνότητα αστοχίας ήταν ένα μικρό εξόγκωμα στο πλάι του sensor housing, το οποίο έχει κρίσιμη λειτουργία, καθώς λειτουργεί ως στήριγμα για τον servo rack. Αν και το μέγεθός του είναι μικρό, είναι μηχανικά επιφορτισμένο με τη συγκράτηση του γραναζιού του σερβοκινητήρα στη σωστή του θέση. Το εξόγκωμα αυτό έσπαγε επανειλημμένα, είτε κατά τη φάση της εκτύπωσης λόγω ελλιπούς υλικού, είτε κατά τη συναρμολόγηση και τις πρώτες δοκιμές χρήσης, από την πίεση που ασκείται στο σύστημα όταν το δάχτυλο έρχεται σε πλήρη κάμψη. Για την αποφυγή πλήρους επανεκτύπωσης κάθε φορά που παρουσιαζόταν αστοχία, προτάθηκε και εφαρμόστηκε μια χειροποίητη λύση ενίσχυσης: κατασκευάστηκε ένα λεπτό μεταλλικό φύλλο, κομμένο στις ακριβείς διαστάσεις του εξογκώματος, το οποίο συγκολλήθηκε επάνω στο εκτυπωμένο PLA με χρήση απλής στιγμιαίας κόλλας. Η παρεμβολή αυτή αύξησε σημαντικά τη μηχανική αντοχή της περιοχής, επιτρέποντας τη χρήση του εξαρτήματος χωρίς την ανάγκη για ανασχεδίαση των STL αρχείων ή επανεκτύπωση του housing.

Η εμπειρία αυτή ανέδειξε τη σημασία της προσεκτικής μηχανικής αξιολόγησης και της δυνατότητας τροποποίησης σε έργα που βασίζονται σε τρισδιάστατα εκτυπωμένες δομές. Παράλληλα, ανέδειξε την αναγκαιότητα σχεδιαστικών επιλογών που επιτρέπουν την εύκολη αντικατάσταση τμημάτων, χωρίς να απαιτείται κάθε φορά πλήρης αναπαραγωγή του εξαρτήματος. Η δυνατότητα να ενισχυθούν ή να αντικατασταθούν συγκεκριμένα ευπαθή σημεία αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό βιωσιμότητας για κάθε DIY ή ανοικτού κώδικα σύστημα σε επίπεδο μηχανικής κατασκευής.

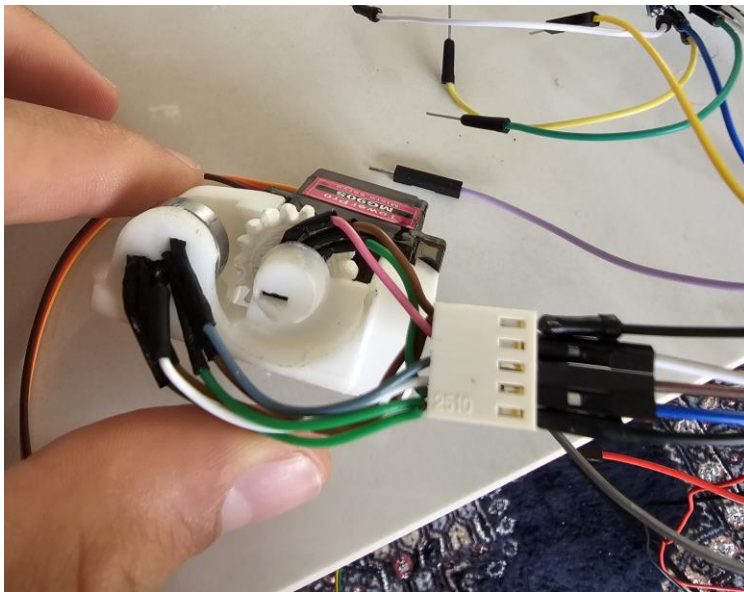
7.5 Λειτουργία Μηχανικών Τμημάτων και Αντίστασης

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του πρωτοτύπου απτικού γαντιού είναι η δυνατότητα παροχής μηχανικής απτικής ανάδρασης μέσω αντίστασης, κατά τη σύλληψη εικονικών αντικειμένων. Σε αντίθεση με απλά συστήματα δόνησης, τα οποία προσφέρουν μόνο προσωρινή ή ασαφή απτική πληροφορία, η μηχανική παρεμπόδιση της κίνησης των δακτύλων επιτρέπει στο χρήστη να "αισθανθεί" την ύπαρξη, τη μάζα ή το σχήμα ενός αντικειμένου στο εικονικό περιβάλλον με τρόπο απτό και άμεσο. Ο μηχανισμός αυτός βασίζεται σε μία συνδυασμένη διάταξη τριών βασικών μερών: το finger rack, το servo rack και ένα σύστημα με gears και bearings που επιτρέπουν τη μετάδοση και την αναχαίτιση κίνησης. Συγκεκριμένα, κάθε δάχτυλο είναι εξοπλισμένο με ένα finger rack, δηλαδή έναν γραμμικό οδοντωτό μηχανισμό (γρανάζι-ράβδος), ο οποίος μετακινείται αναλογικά με την κάμψη ή έκταση του δακτύλου. Όταν ο χρήστης προσπαθεί να λυγίσει το δάχτυλό του, το finger rack κινείται προς τα πίσω, προκαλώντας ταυτόχρονα την περιστροφή ενός gear στο εσωτερικό του sensor housing. Αυτή η κίνηση συνδέεται με το σύστημα Hall effect αισθητήρων και καταγράφει τη γωνιακή θέση. Κάτω από τον finger rack βρίσκεται το servo rack, ένας δεύτερος οδοντωτός μηχανισμός, ο οποίος κινείται ανεξάρτητα μέσω ενός μικρού σερβοκινητήρα. Το servo rack συνδέεται με το finger rack όχι με συνεχή μηχανική σύνδεση, αλλά μέσω ενός συστήματος παρεμβολής που ενεργοποιείται μόνο υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Και τα δύο racks διαθέτουν στο ένα τους άκρο ένα μικρό κάθετο εξόγκωμα. Κατά την ομαλή λειτουργία (όταν το δάχτυλο κινείται ελεύθερα), τα εξογκώματα αυτά βρίσκονται εκτός επαφής. Ωστόσο, όταν ο χρήστης προσεγγίζει ή "αγγίζει" ένα αντικείμενο στο εικονικό περιβάλλον, το Unity αποστέλλει εντολή στον ESP32 ώστε να ενεργοποιήσει τον servo του αντίστοιχου δακτύλου. Ο σερβοκινητήρας μετακινεί το servo rack προς τα εμπρός ή πίσω, και φέρνει το εξόγκωμά του σε θέση ώστε να παρεμποδίσει την περαιτέρω μετακίνηση του finger rack. Το αποτέλεσμα αυτής της ενέργειας είναι η δημιουργία φυσικής αντίστασης, την οποία ο χρήστης αισθάνεται ακριβώς τη στιγμή που θα συνέβαινε η επαφή με το αντικείμενο. Με αυτόν τον τρόπο, η απτική αναπαράσταση δεν είναι μόνο παθητική (π.χ. μέσω δόνησης), αλλά αποκτά μηχανική σημασία και επιτρέπει στον χρήστη να αισθανθεί την παρουσία, το μέγεθος, ακόμα και το όριο σύλληψης ενός αντικειμένου στο εικονικό περιβάλλον. Η ένταση της αντίστασης εξαρτάται από το μέγεθος του αντικειμένου και τη θέση του δακτύλου. Η μεταβολή της θέσης του servo rack επιτρέπει τη δυναμική προσαρμογή της "στάσης" του εξογκώματος, και συνεπώς του σημείου στο οποίο ο χρήστης παύει να μπορεί να λυγίσει περισσότερο το δάχτυλό του. Το σύστημα λειτουργεί με κλιμάκωση, επιτρέποντας μεγαλύτερη κάμψη για μικρότερα αντικείμενα και μικρότερη για μεγαλύτερα. Εκτός από την αίσθηση επαφής, ο μηχανισμός αυτός επιτρέπει και την αναπαράσταση δύναμης σύλληψης. Όταν ο χρήστης προσπαθεί να "σφίξει" ένα αντικείμενο περισσότερο απ' όση επιτρέπει η γεωμετρία του, το σύστημα παρέχει πραγματική αντίσταση, όπως θα συνέβαινε σε έναν πραγματικό φυσικό περιορισμό. Αυτό το χαρακτηριστικό αυξάνει την ρεαλιστικότητα της εμπειρίας και ενισχύει την εμπύθιση στο ψηφιακό περιβάλλον.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο συγκεκριμένος μηχανισμός επιτεύχθηκε με μηδενική χρήση αισθητήρων δύναμης ή force sensors, παράγοντας απτική εμπειρία αποκλειστικά με μηχανικά μέσα. Η

απλότητα της λύσης, με χρήση δύο gear racks, ενός servo και λίγων πλαστικών εξαρτημάτων, προσφέρει εξαιρετική απόδοση με ελάχιστο κόστος, αν και προϋποθέτει πολύ καλή μηχανική ευθυγράμμιση και ακρίβεια στην εκτύπωση και συναρμολόγηση.

Η ηλεκτρική διασύνδεση κάθε δακτύλου του απτικού γαντιού παρουσίασε ιδιαίτερη πρόκληση τόσο σε επίπεδο καλωδίωσης όσο και στη διαχείριση των σημάτων προς τον μικροελεγκτή. Κάθε δάχτυλο περιλάμβανε τρεις Hall effect αισθητήρες και έναν σερβοκινητήρα για την απτική ανάδραση μέσω μηχανικής αντίστασης. Κάθε Hall αισθητήρας απαιτεί ξεχωριστή γραμμή τροφοδοσίας (Vcc), γείωσης (GND) και αναλογικού σήματος (analog out), ενώ ο σερβοκινητήρας απαιτεί επίσης τρεις γραμμές: τάση λειτουργίας, γείωση και γραμμή PWM σήματος για την ελεγχόμενη περιστροφή. Χωρίς βελτιστοποίηση, το κάθε δάχτυλο θα απαιτούσε εννέα ανεξάρτητους αγωγούς, αριθμός που καθιστούσε το σύστημα σύνδεσης και τις καλωδιώσεις υπερβολικά πυκνές, πολύπλοκες και επιρρεπείς σε βλάβες. Το πρόβλημα επιδεινωνόταν από το γεγονός ότι όλα αυτά τα κυκλώματα έπρεπε να δρομολογηθούν σε ένα πολύ περιορισμένο φυσικό περιβάλλον, το σώμα του glove, και να συνδεθούν τελικά με τον μικροελεγκτή ESP32.



Σχήμα 7.9 - Επίδειξη Καλωδίωσης Sensor Housing

Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, εφαρμόστηκε τεχνική τριπλού κριμπαρίσματος στις γραμμές τροφοδοσίας και γείωσης. Πιο συγκεκριμένα, οι γραμμές Vcc και GND των τριών Hall αισθητήρων και του σερβοκινητήρα ανά δάχτυλο ενοποιήθηκαν, επιτρέποντας την κοινή μεταφορά ρεύματος και γείωσης μέσω ενός μόνο αγωγού για καθεμιά από αυτές. Με αυτή τη μείωση, ο συνολικός αριθμός καλωδίων περιορίστηκε σημαντικά και καθίστατο δυνατή η χρήση πενταπολικού (5-pin) connector για κάθε δάχτυλο: δύο γραμμές για Vcc και GND και τρεις γραμμές σήματος. Η λύση αυτή απέφερε ουσιαστική εργονομική βελτίωση, διευκόλυνε τη συντήρηση και μείωσε αισθητά την πιθανότητα κακής επαφής ή τυχαίας αστοχίας.

Παράλληλα, προέκυψε και άλλο τεχνικό εμπόδιο: ο μικροελεγκτής ESP32 διαθέτει περιορισμένο αριθμό ADC καναλιών για την απευθείας σύνδεση όλων των Hall αισθητήρων των πέντε δακτύλων. Για να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός, ενσωματώθηκε πολυπλέκτης (multiplexer), ο οποίος επιτρέπει τη σειριακή επιλογή μεταξύ πολλών αναλογικών εισόδων και την ανάγνωση τους μέσω ενός και μόνο καναλιού ADC. Η επιλογή του ενεργού καναλιού γίνεται μέσω ψηφιακών σημάτων ελέγχου (select pins), τα οποία ελέγχονται από το firmware του ESP32.

Με αυτό τον τρόπο, επιτεύχθηκε πλήρης κάλυψη των αναγκών μέτρησης χωρίς να απαιτείται αναβάθμιση πλατφόρμας μικροελεγκτή ή χρήση εξωτερικού ADC module. Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική αποδείχθηκε επαρκής για τη λειτουργία του glove, διατηρώντας τον αριθμό των απαιτούμενων εξαρτημάτων σε διαχειρίσιμα επίπεδα και επιτρέποντας τη σωστή λειτουργική ολοκλήρωση του hardware.

7.6 Προβλήματα Συναρμολόγησης Αισθητήρων

Η σωστή λειτουργία των Hall effect αισθητήρων, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση της γωνίας κάμψης και της κίνησης των δακτύλων, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό όχι μόνο από την ακρίβεια του firmware, αλλά και από την φυσική τοποθέτηση και σταθερή στήριξή τους εντός του μηχανισμού. Η διαδικασία συναρμολόγησης αποδείχθηκε ιδιαίτερα απαιτητική λόγω του περιορισμένου διαθέσιμου χώρου και των πολύ μικρών γεωμετρικών ανοχών που απαιτούνται για να διασφαλιστεί η ορθή λειτουργία της μαγνητικής ανίχνευσης.

Το sensor housing σχεδιάστηκε ώστε να στεγάζει τρεις Hall effect αισθητήρες. Δύο από αυτούς είναι υπεύθυνοι για την καταγραφή της κάμψης και της έκτασης, ενώ ο τρίτος χρησιμοποιείται για την ανίχνευση της πλευρικής κίνησης (spray) των δακτύλων. Ο διαθέσιμος εσωτερικός χώρος εντός του housing δεν επαρκεί για την κάθετη τοποθέτηση των αισθητήρων με τους ακροδέκτες τους σε πλήρη έκταση. Συνεπώς, ήταν απαραίτητο να λυγιστούν προσεκτικά τα ποδαράκια τους προς συγκεκριμένες κατευθύνσεις ώστε να προσαρμοστούν εντός του περιβλήματος, να επιτρέψουν τη συγκόλληση τους σε καλώδια, και ταυτόχρονα να αποφευχθεί οποιαδήποτε επαφή ή διασταύρωση μεταξύ τους. Η διαδικασία αυτή συνοδευόταν από υψηλό ρίσκο μηχανικής αστοχίας. Κατά το λύγισμα ή την εισαγωγή των αισθητήρων μέσα στο housing, ποδαράκια έσπαγαν συχνά, καθιστώντας αναγκαία την αντικατάσταση του αισθητήρα. Επιπλέον, η μικρή απόσταση μεταξύ των ακροδεκτών δημιουργούσε κίνδυνο βραχυκυκλώματος, ιδιαίτερα όταν οι αγωγοί δεν ήταν απόλυτα σταθεροποιημένοι ή όταν το ίδιο το πλαστικό του housing πίεζε τα σημεία επαφής. Για την προστασία του κυκλώματος και του ίδιου του μικροελεγκτή ESP32, εφαρμόστηκαν τεχνικές ηλεκτρικής μόνωσης. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν θερμοσυστελλόμενα σωληνάκια (heat-shrink) για να καλυφθούν τα εκτεθειμένα σημεία σύνδεσης και να διασφαλιστεί ότι δεν θα υπάρξει επαφή ανάμεσα στα σήματα, ακόμη και σε περιβάλλοντα κραδασμών ή επαναλαμβανόμενης χρήσης.

Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στην απόσταση μεταξύ των αισθητήρων και των αντίστοιχων μαγνητών που βρίσκονται τοποθετημένοι στο κινούμενο μέρος του μηχανισμού. Η απόσταση αυτή είναι κρίσιμη για την ορθή καταγραφή του μαγνητικού πεδίου. Έστω και μικρή απόκλιση λίγων χιλιοστών μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της έντασης του σήματος, προκαλώντας απώλεια ευαισθησίας, μη γραμμική απόκριση, ή μείωση του συνολικού εύρους μέτρησης της γωνίας. Η διαδικασία συναρμολόγησης απαιτούσε σχεδόν “χειρουργική” ακρίβεια: κάθε αισθητήρας έπρεπε να τοποθετείται στη βέλτιστη απόσταση και σε σωστή γωνία σε σχέση με τον μαγνήτη, λαμβάνοντας υπόψη και την τροχιά που ακολουθεί ο μαγνήτης κατά την κίνηση του δακτύλου. Οποιαδήποτε απόκλιση, είτε στη θέση είτε στον προσανατολισμό, οδηγούσε σε αποκλίσεις στην καταγραφή, προκαλώντας σφάλματα στη μέτρηση και επηρεάζοντας την αξιοπιστία ολόκληρου του συστήματος. Η εμπειρία αυτή κατέδειξε ότι, σε κατασκευές που βασίζονται σε αναλογικούς μαγνητικούς αισθητήρες, η ακρίβεια στη μηχανική τοποθέτηση είναι εξίσου σημαντική με την ποιότητα της ηλεκτρονικής διασύνδεσης. Κάθε στάδιο πρέπει να προσεγγίζεται με ιδιαίτερη φροντίδα και σχολαστικότητα, καθώς ακόμη και μικρές αποκλίσεις μπορούν να υπονομεύσουν την συνολική απόδοση του συστήματος.

Κεφάλαιο 8ο: Συμπεράσματα, Αξιολόγηση και Μελλοντική Έρευνα

Η παρούσα εργασία κατέδειξε την εφικτότητα σχεδίασης και υλοποίησης ενός απτικού γαντιού με στόχο τη χαμηλή κατανάλωση, την οικονομική κατασκευή και τη δυνατότητα αλληλεπίδρασης με περιβάλλοντα εικονικής πραγματικότητας μέσω του Unity XR Toolkit. Η χρήση του μικροελεγκτή ESP32 αποδείχθηκε καταλυτική, καθώς επέτρεψε τη σειριακή επικοινωνία, τη συλλογή δεδομένων από αισθητήρες σε πραγματικό χρόνο, και την απτική ανάδραση με εξωτερικούς ενεργοποιητές. Επιπλέον, το hand tracking του Meta Quest 2 χρησιμοποιήθηκε για τη βελτίωση της φυσικότητας των χειρονομιών, προσφέροντας μία υβριδική λύση που αξιοποιεί τόσο hardware-based όσο και vision-based τεχνολογίες.

8.1 Περιορισμοί και Δυσκολίες Κατά την Υλοποίηση

Μηχανική Ασυμβατότητα

Ένα από τα πρώτα εμπόδια της υλοποίησης ήταν η ασυμβατότητα της μηχανικής δομής με διαφορετικά μεγέθη χεριών. Ο σχεδιασμός του finger rack βασίστηκε σε σταθερές διαστάσεις, γεγονός που περιορίσε την ευελιξία του γαντιού. Σε μεγαλύτερες γωνίες κάμψης, παρατηρήθηκε μπλοκάρισμα της κίνησης και μετατόπιση ή αποσύνδεση των αισθητήρων Hall.

Πρόταση:

Ο επανασχεδιασμός του μηχανισμού finger rack σε modular servo rack, με χρήση γραμμικών οδηγών ή εύκαμπτων ιμάντων, θα μπορούσε να προσφέρει αυξημένη προσαρμοστικότητα. Επιπλέον, η ενσωμάτωση ελαστικών ή ρυθμιζόμενων στηριγμάτων ανά δάχτυλο θα εξασφάλιζε μεγαλύτερη εργονομία και συμβατότητα με διαφορετικούς χρήστες.

Περιορισμένη Γωνιακή Απόκριση των Servo

Ο σχεδιασμός του sensor housing επέτρεψε μόνο 155° γωνιακής περιστροφής στα σέρβο MG90S, περιορίζοντας τη φυσική κίνηση του χεριού και υποβαθμίζοντας την πιστότητα στη σύλληψη αντικειμένων.

Πρόταση:

Εναλλακτική προσέγγιση θα μπορούσε να είναι η χρήση flex sensors, όπως στις υλοποιήσεις των LucidGloves ή του DOGlove, ώστε να καταγράφεται η κάμψη με μεγαλύτερη ακρίβεια και χωρίς κινούμενα μέρη. Αυτό προσφέρει επίσης βελτιωμένη φορητότητα και μειωμένη φθορά.

Έλλειψη Προσαρμοστικότητας

Η σταθερή αρχιτεκτονική του γαντιού δεν επέτρεπε ευκολίες προσαρμογής ή αντικατάστασης επιμέρους εξαρτημάτων (όπως αισθητήρων ή δακτύλων). Η συντήρηση ήταν δύσκολη και η συναρμολόγηση χρονοβόρα.

Πρόταση:

Η χρήση αρθρωτού PCB για κάθε δάχτυλο, που θα ενσωματώνει και το σχετικό αισθητήριο και ενεργοποιητή, θα αύξανε την επεκτασιμότητα, μειώνοντας παράλληλα την πολυπλοκότητα των καλωδιώσεων.

Περιορισμοί στον Calibration

Η αρχική μέθοδος καλιμπραρίσματος των αισθητήρων απαιτούσε προσεκτικές χειροκίνητες διαδικασίες και επαναλαμβανόμενες ρυθμίσεις κατά την εκκίνηση του συστήματος.

Πρόταση:

Αυτόματη καταγραφή offset τιμών μέσω adaptive learning κατά την αρχική χρήση και αποθήκευση στο EEPROM, όπως εν μέρει επιχειρήθηκε, θα μπορούσε να προσφέρει πιο εύχρηστο και σταθερό calibration. Επιπλέον, η χρήση visual interface για calibration (μέσω Unity UI) θα διευκόλυνε τον χρήστη.

Κριτική Αξιολόγηση Επιλογής Unity αντί SteamVR

Αν και η χρήση του OpenGloves firmware σε συνδυασμό με SteamVR αποτελεί διαδεδομένη προσέγγιση, εντούτοις απορρίφθηκε λόγω:

- Περιορισμού σε δομή και τύπο δεδομένων.
- Απαιτήσης σταθερής βιβλιοθήκης OpenGloves και SteamVR drivers.
- Δυσκολίας debugging και αργής ανατροφοδότησης.

Πλεονεκτήματα Unity:

- Real-time επεξεργασία σημάτων, χωρίς constraints.
- Προηγμένη διαχείριση animations και Haptic API.
- Ευελιξία επέκτασης σε AR/VR συστήματα πέραν του SteamVR.

Ωστόσο, σημειώθηκε πρόβλημα στη διαχείριση των ενεργοποιητών. Αρχικά, ο κώδικας ήταν ρυθμισμένος να ενεργοποιεί τα μοτέρ με την εντολή grab. Αυτό προκάλεσε καθυστέρηση στην απτική ανάδραση και ανέτρεπε την έννοια της real-time απτικότητας, καθώς η ανάδραση έπρεπε να προηγείται του grab για να υπάρχει φυσικότητα. Η μεταβολή στη λογική ώστε να ενεργοποιούνται τα μοτέρ κατά το hover ήταν αναγκαία αλλά εισήγαγε προβλήματα σταθερότητας λόγω ταχύτατης εναλλαγής hover σε διαδοχικά αντικείμενα.

Η εναλλαγή hover status σε πολλά αντικείμενα σε σύντομο χρόνο δημιούργησε καταπόνηση στο σύστημα. Τα μοτέρ είχαν FIFO-based αρχιτεκτονική εντολών, με αποτέλεσμα καθυστέρηση απόκρισης στην απτική αίσθηση. Αναγκαία θα ήταν η υλοποίηση μιας προτεραιοποιημένης στοίβας ενεργοποίησης ή adaptive logic που να αξιολογεί το context των ενεργειών του χρήστη (π.χ. σταθερότητα hover για X msec πριν την ενεργοποίηση ή χρήση proximity από το αντικείμενο ή κάποιο debounce).

Συγκριτική Ανάλυση με Άλλα Γάντια

- LucidGloves (open-source),
- DOGlove (dexterous force feedback),
- SenseGlove Nova (εμπορικό),
- Αξιολογήσεις από IEEE συνέδρια, ειδικά σε σχέση με προτιμήσεις των χρηστών (hand tracking vs. controllers).

8.2 Συγκριτική Ανάλυση με Άλλες Λύσεις και Προτάσεις Βελτίωσης

Η υλοποίηση του παρόντος συστήματος απτικού γαντιού τοποθετείται στο φάσμα των low-cost και DIY προσεγγίσεων, γεγονός που την καθιστά άμεσα συγκρίσιμη με αντίστοιχες λύσεις ανοιχτού κώδικα, όπως τα LucidGloves και το πρόσφατο DOGlove [12]. Σε επίπεδο

αρχιτεκτονικής, το γάντι βασίζεται σε έναν ESP32 μικροελεγκτή, με Hall effect sensors για την ανίχνευση της κάμψης και servo-driven απτική ανάδραση.

8.2.1 LucidGloves vs Παρούσα Υλοποίηση

Μία ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα σύγκριση προκύπτει μεταξύ της παρούσας υλοποίησης και των LucidGloves, τα οποία αποτελούν μία ευρέως χρησιμοποιούμενη ανοιχτού κώδικα λύση. Τα LucidGloves χρησιμοποιούν είτε flex sensors(λειτουργικό proto 4) είτε Hall effect(υπολειπургικό proto5) αισθητήρες με μαγνήτες για την παρακολούθηση της κίνησης των δακτύλων, σε αντιστοιχία με τη δική μου προσέγγιση, η οποία βασίστηκε σε Hall αισθητήρες σε συνδιασμό με Visual Hand Tracking για αυξημένη ανάλυση και γραμμικότητα.

Σε επίπεδο μικροελεγκτή, οι λύσεις αξιοποιούν Arduino ή ESP32, με την παρούσα εργασία να βασίζεται εξ ολοκλήρου στον ESP32 λόγω των αυξημένων δυνατοτήτων επικοινωνίας και επεξεργασίας.

Η σημαντικότερη διαφοροποίηση εντοπίζεται στο λογισμικό διασύνδεσης. Τα LucidGloves ενσωματώνουν το OpenGloves firmware, το οποίο επικοινωνεί με το SteamVR μέσω ειδικής ενδιάμεσης βιβλιοθήκης, δημιουργώντας ένα επιπλέον στρώμα μετάφρασης μεταξύ φυσικών μετρήσεων και εικονικής αναπαράστασης. Στον αντίποδα, η παρούσα υλοποίηση στηρίχθηκε σε πλήρως προσαρμοσμένο firmware, με απευθείας σειριακή επικοινωνία με το Unity, εξελείφοντας τον ενδιάμεσο μεταφραστή. Αυτή η αρχιτεκτονική προσέφερε χαμηλότερη καθυστέρηση (latency) και μεγαλύτερη ελευθερία ανάπτυξης και δοκιμής.

Όσον αφορά την απτική ανάδραση, τα LucidGloves Proto 4 υιοθετούν ένα σύστημα servo rack με string pull, το οποίο τραβάει τις φάλαγγες του χρήστη με λεπτό καλώδιο, προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία και προσαρμογή. Η παρούσα εργασία, αντίθετα, χρησιμοποίησε finger rack με direct servo κίνηση, μια πιο απλή αλλά λιγότερο ευπροσάρμοστη λύση, η οποία παρουσίασε περιορισμούς σε συμβατότητα με διαφορετικά χέρια και μεγαλύτερες γωνίες κάμψης.

Η διαφορά είναι επίσης εμφανής στον τρόπο παρακολούθησης των κινήσεων. Τα LucidGloves απαιτούν τη χρήση VR controllers και του οικοσυστήματος SteamVR, κάτι που αυξάνει την πολυπλοκότητα εγκατάστασης αλλά προσφέρει υψηλή ακρίβεια. Αντίθετα, η παρούσα λύση βασίστηκε στο hand tracking του Meta Quest 2, μια πιο προσιτή προσέγγιση, η οποία όμως υπόκειται σε περιορισμούς σταθερότητας και εξωτερικού φωτισμού.

Τέλος, όσον αφορά την προσαρμοστικότητα και επεκτασιμότητα, τα LucidGloves ξεχωρίζουν χάρη στο modular σχεδιασμό τους, που επιτρέπει εύκολες επεμβάσεις και αναβαθμίσεις. Η δική μου λύση, αν και λειτουργική, είναι πιο στατική, λόγω του προκαθορισμένου μηχανικού σχεδιασμού του finger rack.

Συνολικά, η παρούσα εργασία υπερέχει σε απλότητα, ευκολία χρήσης και δυνατότητα ενσωμάτωσης με Unity χωρίς εξαρτήσεις από εξωτερικά SDKs, ενώ τα LucidGloves υπερέχουν σε δυνατότητες προσαρμογής και απτικό έλεγχο μέσω string-actuation. Η επιλογή κάθε

προσέγγισης εξαρτάται από το ζητούμενο: ανοιχτότητα και πειραματισμός ή σταθερότητα και ευκολία χρήσης.

8.2.2 DOGlove – Αναδύομενο Σύστημα (2025)

Το DOGlove [12] είναι μία νέα ανοιχτού κώδικα πρόταση με στόχο dexterous grasping μέσω force feedback. Χρησιμοποιεί σαφώς πιο εξελιγμένη μηχανική, όπου οι actuators ελέγχουν το αντίθετο τράβηγμα ανά δάχτυλο ανάλογα με την ψηφιακή γεωμετρία αντικειμένου. Υποστηρίζει καμπύλες πίεσης και δυναμική ανάδραση σε επαφή.

Η υλοποίησή σου σε σύγκριση:

- Πλεονεκτεί σε απλότητα και χαμηλό κόστος.
- Υστερεί σε εξομίωση δύναμης ανάλογης με την επιφάνεια/αντικείμενο, αφού τα servo απλώς πιέζουν μηχανικά χωρίς να προσαρμόζονται στην επιφάνεια.
- Δεν υποστηρίζει καμπύλες σκληρότητας ή pre-shape feedback.

8.2.3 SenseGlove Nova (Εμπορική λύση)

Η εμπορική πλατφόρμα SenseGlove Nova παρέχει υψηλής ακρίβειας haptics με force feedback σε κάθε δάχτυλο και resistance mapping ανά τύπο αντικειμένου. Περιλαμβάνει tactile δονήσεις και πλήρη skeletal tracking μέσω IMUs.[32]

Το κόστος της υπερβαίνει τα 4.000€, επομένως η υλοποίησή σου επιτυγχάνει εξαιρετική σχέση κόστους/λειτουργικότητας, αν και:

- Δεν υποστηρίζει πολυεπίπεδη haptics (vibration + force).
- Δεν επιτυγχάνει την ίδια ακρίβεια στην αναπαράσταση σκληρότητας.

8.2.4 Αξιολόγηση Χρηστών από IEEE Conference

Κατά την παρουσία της λύσης σε IEEE conference, παρατηρήθηκε ότι πολλοί χρήστες:

- Προτιμούν τους controllers λόγω της εξοικείωσης με κουμπιά και τη σταθερότητα στην καταγραφή κινήσεων.
- Δυσκολεύονταν με το hand tracking, ειδικά όταν υπήρχε ταχεία εναλλαγή αντικειμένων (π.χ. γρήγορο hover/pinch), λόγω των latency issues και buffer conflicts (FIFO architecture lag).
- Στην παρούσα λύση, όταν έγινε μετάβαση από activation-on-grab σε hover-based trigger, το πρόβλημα επιλύθηκε μερικώς, αλλά δημιουργήθηκαν bugs όπου το servo ενεργοποιούνταν σε κάθε hover με πολλαπλά αντικείμενα, οδηγώντας σε “overreaction”.

8.2.5 Προτάσεις Βελτίωσης με Βάση τη Σύγκριση

- Αντικατάσταση του finger rack με servo rack με pull strings, επιτρέποντας προσαρμογή ανά χρήστη και μειωμένη μηχανική καταπόνηση.

- Υλοποίηση IMU-based tracking για αύξηση ακρίβειας και ανεξαρτησία από hand tracking συστήματα.
- Καμπύλες έντασης για τη servo ανάδραση, με real-time mapping της πίεσης ανάλογα με την επιφάνεια.
- Haptic waveform preparation πριν την ενεργοποίηση των actuators με διαφορετική προσέγγιση, τα περισσότερα εμπορικά συστήματα (π.χ. DOGlove) υπολογίζουν το pattern πριν την ενεργοποίηση
- Μονάδα επεξεργασίας όγκου και υφής αντικειμένου για υλοποίηση πιο ρεαλιστικού feedback.
- Αλλαγές στην Unity αρχιτεκτονική ώστε οι servo να ενεργοποιούνται μόνο υπό όρους proximity & activation window, αποφεύγοντας false triggers.

Η επιλογή piezoelectric στοιχείων (TDK PowerHar 1919H022V120) παρείχε ισχυρή απόκριση αλλά και προκλήσεις σε συντονισμό, κατανάλωση και μηχανική ενσωμάτωση. Εναλλακτικές όπως linear resonant actuators (LRA) ή coil based συστήματα ίσως προσέφεραν καλύτερη ενσωμάτωση. Επιπλέον, η υποστήριξη και προετοιμασία των δεδομένων haptics μπορεί να εξελιχθεί με συστήματα υπολογισμού "όγκου" αντικειμένων για προσδιορισμό επιφάνειας ή υφής. Η χρήση tactile maps και texture rendering από την επιφάνεια του μοντέλου θα ανέβαζε σημαντικά την εμπειρία.

Συμπερασματικά

Η εργασία αυτή, αν και πρωτότυπη και επιτυχημένη ως προς αρκετούς από τους αρχικούς στόχους, έδειξε ταυτόχρονα σημαντικά πεδία βελτίωσης:

- Μηχανική ανασχεδίαση για εργονομία και συμβατότητα.
- Αναθεώρηση αρχιτεκτονικής Unity για real-time αντιδράσεις.
- Μελέτη και αξιοποίηση σύγχρονων τεχνικών haptics, Ολιστική βελτίωση hardware/software stack ώστε να ανταγωνιστεί ερευνητικά πρότυπα.

Μελλοντικά, προτείνεται η ενσωμάτωση AI-based μοντέλων gesture recognition, καθώς και machine learning συστημάτων calibration. Παράλληλα, μία πιο ολοκληρωμένη μεθοδολογία αξιολόγησης από χρήστες θα ενίσχυε την εφαρμοσιμότητα της λύσης σε τομείς όπως η αποκατάσταση, η ψυχαγωγία και η εκπαίδευση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] M. Masmoudi et al., "Low-cost haptic glove for grasp precision improvement in Virtual Reality-Based Post-Stroke Hand Rehabilitation," *2021 International Conference on Artificial Intelligence*

for *Cyber Security Systems and Privacy (AI-CSP)*, El Oued, Algeria, 2021, pp. 1-3, doi: 10.1109/AI-CSP52968.2021.9671087.

[2] A. McEvoy, N. Murray, and C. Keighrey, “Building a Low-Cost Immersive Haptic Feedback Glove for Virtual Reality,” *Proc. Int. Conf. on Immersive Tech.*, 2023. [Online]. Available: <https://github.com/LucidVR/lucidgloves>

[3] D. Zymelka et al., “Soft Packaging of Flexible Piezoelectric Actuators for Applications in Wearable Haptic Devices,” *Proc. IEEE Transducers*, 2022.

[4] F. Casset et al., “Haptic Interface Based on an Innovative Piezo-in-Flex Piezoelectric Patch Technology,” *Proc. IEEE Transducers*, Kyoto, Japan, 2023.

[5] G. Pacchierotti et al., “Touching Virtual Reality: A Review of Haptic Gloves,” *ACTUATOR 2018: Int. Conf. on New Actuators*, Bremen, Germany, Jun. 2018.

[6] M. Rahimi et al., “Dynamic Spatiotemporal Pattern Identification Using a Fingertip-Based Electro-Tactile Display Array,” *IEEE IROS*, 2019.

[7] M. Kusunoki et al., “MagGlove: A Haptic Glove with Movable Magnetic Force for Manipulation Learning,” *IEEE Conf. on Haptics*, 2023.

[8] A. Keyes et al., “Navigation for the Blind Using a Wireless Sensor Haptic Glove,” *Proc. MECO*, Budva, Montenegro, 2015.

[9] M. Rahimi et al., “Adaptive Spatial Mapping of Electrotactile Threshold Based on Subdivision Bio-Impedance Feedback,” *IEEE RCAR*, 2019.

[10] L. De Bonet, “LucidVR/lucidgloves: Arduino/ESP32 based DIY VR Haptic gloves. Compatible with SteamVR via OpenGloves,” GitHub, 2023. [Online]. Available: <https://github.com/LucidVR/lucidgloves>

[11] M. A. Eid and H. Al Osman, “Affective Haptics: Current Research and Future Directions,” *IEEE Access*, vol. 4, pp. 26–40, 2015.

[12] H. Zhang et al., “DOGlove: Dexterous Manipulation with a Low-Cost Open-Source Haptic Force Feedback Glove,” *arXiv preprint arXiv:2502.07730*, 2025.

[13] S. Yang et al., “A Comprehensive Survey of Electrical Stimulation Haptic Feedback in Human-Computer Interaction,” *arXiv preprint arXiv:2504.21477*, 2025.

[14] Q. Tong et al., “Distant Handshakes: Conveying Social Intentions Through Multi-Modal Soft Haptic Gloves,” *IEEE Trans. Affective Comput.*, vol. 16, no. 1, pp. 423–435, Jan.–Mar. 2025.

[15] M. Masmoudi, Z. Hadjadj, and Y. Izountar, “Low-Cost Haptic Glove for Grasp Precision Improvement in Virtual Reality-Based Post-Stroke Hand Rehabilitation,” *Proc. IEEE Int. Conf. on Rehabilitation Robotics*, 2021.

- [16] R. G. Ballas and D. Schoen, “The Piezoelectric Effect: A Descriptive Representation of an Essential Solid Body Effect Enabling Various Sensor and Actuator Applications in Mechatronics and Microtechnology,” *Proc. IEEE Sensors*, 2023.
- [17] “A Journey through the History and Evolution of Haptic Technology,” Titan Haptics, 2023. [Online]. Available: <https://titanhaptics.com/understanding-haptics-a-journey-through-the-history-and-evolution-of-haptic-technology/>
- [18] “A Brief History of Piezoelectricity,” American Piezo, 2023. [Online]. Available: <https://www.americanpiezo.com/blog/a-brief-history-of-piezoelectricity/>
- [19] “Piezoelectricity,” Wikipedia, 2025. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity>
- [20] TI, “DRV8662 Piezo Haptic Driver,” [Online]. Available: Included as drv8662.pdf.
- [21] Espressif Systems, “ESP32-WROOM-32E/UE Datasheet,” [Online]. Available: Included as esp32-wroom-32e_esp32-wroom-32ue_datasheet_en.pdf.
- [22] TowerPro, “MG90S Mini Servo Technical Specifications,” [Online]. Available: Included as MG90S-Datasheet.pdf.
- [23] C&K, “Hall-Effect Linear Position Sensor Datasheet,” [Online]. Available: Included as K1139513440.pdf.
- [24] TDK “1919H022V120 Magnetic Sensor Datasheet,” [Online]. Available: Included as 1919h022v120.pdf.
- [25] “Haptic Technology,” Wikipedia, 2025. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Haptic_technology
- [26] Oculus Rift, PC-Powered VR Headset. Amazon. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/Oculus-Rift-PC-Powered-Gaming-Headset-pc/dp/B07PTMKYS7>
- [27] L. Zhang et al., “Research status and development trend of wearable haptic devices,” *Journal of Bionic Engineering*, vol. 16, no. 3, pp. 395–409, 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2096579619300130>
- [28] 3D Systems, “Geomagic Touch - Haptic device for desktop 3D interaction,” Immersion Cornershop. [Online]. Available: <https://cornershop-immersion.com/en/capture-interaction/67-geomagic-touch.html>
- [29] Unity Technologies, “Unity XR Interaction Toolkit – Simple Interactable,” Unity Documentation, 2024. [Online]. Available: <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.xr.interaction.toolkit@3.0/manual/xr-simple-interactable.html>

[30] Unity Technologies, “Unity XR Interaction Toolkit – Manual (v3.1),” Unity Documentation, 2024. [Online]. Available: <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.xr.interaction.toolkit@3.1/manual/index.html>

[31] LucidVR, “LucidGloves - Open Source Haptic VR Gloves,” GitHub repository, 2023. [Online]. Available: <https://github.com/LucidVR/lucidgloves/tree/proto5>

[32] SenseGlove, “SenseGlove Nova – Force and Haptic Feedback Glove,” SenseGlove, 2023. [Online]. Available: <https://www.senseglove.com/nova/>