

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Δημιουργία απτικών διεπαφών για βοήθεια ατόμων με
προβλήματα λεπτής κινητικότητας»



Του φοιτητή
Παπαδόπουλου Ευθύμη
Αρ. Μητρώου: 164811

Επιβλέπων
Ονοματεπώνυμο
Κοκκώνης Γεώργιος
Αναπληρωτής Καθηγητής

Ιούλιος 2026

Τίτλος Δ.Ε. Δημιουργία απτικών διεπαφών για βοήθεια ατόμων με προβλήματα λεπτής κινητικότητας

Κωδικός Δ.Ε. 23340

Ονοματεπώνυμο φοιτητή ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ ΕΥΘΥΜΗΣ

Ονοματεπώνυμο εισηγητή ΚΟΚΚΩΝΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε 23/12/24

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε Ιούλιος Σεπτέμβριος 2026

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 Παπαδόπουλου Ευθύμη 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.

Πρόλογος

Η επιλογή του θέματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας προέκυψε από το προσωπικό μου ενδιαφέρον για την ανάπτυξη μιας εφαρμογής που συνδυάζει στοιχεία παιχνιδιού και εκπαίδευσης, με σκοπό την υποστήριξη ατόμων στον τομέα της προσβασιμότητας. Η υλοποίηση του έργου απαιτούσε τη χρήση εργαλείων με τα οποία είχα ήδη εξοικειωθεί μέσω προηγούμενων μαθημάτων της σχολής, όπως το Unity, για τη δημιουργία του εικονικού περιβάλλοντος και την υλοποίηση της λειτουργικότητας της εφαρμογής. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσίασε η αξιοποίηση της συσκευής απτικής ανατροφοδότησης Touch Haptic Device, καθώς αποτέλεσε μια καινοτόμο και πρωτόγνωρη εμπειρία. Επιπλέον, σημαντικό κίνητρο για την επιλογή του συγκεκριμένου θέματος αποτέλεσε η ικανοποίηση που προκύπτει από τη συμβολή σε έναν κοινωνικά ωφέλιμο σκοπό και την υποστήριξη μιας ευάλωτης κοινωνικής ομάδας. Κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας, απέκτησα πολύτιμες γνώσεις, εμβαθύνοντας στις τεχνολογίες και στις δυνατότητες που προσφέρει το Unity για την ανάπτυξη εφαρμογών και των επιμέρους στοιχείων τους. Παράλληλα, ανέπτυξα δεξιότητες και ευαισθητοποίηση σχετικά με τον σχεδιασμό εφαρμογών με κεντρικό άξονα την προσβασιμότητα και τη συμπερίληψη των χρηστών.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την ανάπτυξη μιας εκπαιδευτικής εφαρμογής βασισμένης στην Εικονική Πραγματικότητα, η οποία αξιοποιεί τρισδιάστατα μοντέλα που δημιουργήθηκαν στην πλατφόρμα Unity, σε συνδυασμό με την απτική τεχνολογία της 3D Systems. Κύριος σκοπός της εφαρμογής είναι να διευκολύνει άτομα με κινητικές δυσκολίες στη διαδικασία σχηματισμού των γραμμάτων της αλφαβήτου. Για την αλληλεπίδραση του χρήστη με το ψηφιακό περιβάλλον αξιοποιήθηκε η συσκευή Touch Haptic Device, η οποία προσφέρει τη δυνατότητα απτικής ανατροφοδότησης, επιτρέποντας την αίσθηση διαφορετικών υφών και σχημάτων μέσω της αφής. Με τον τρόπο αυτό, οι χρήστες είχαν την ευκαιρία να εκπαιδευτούν και να αλληλεπιδράσουν μέσα σε ένα ασφαλές και ελεγχόμενο εικονικό περιβάλλον, χωρίς να εκτίθενται σε πραγματικούς κινδύνους. Η διαδικασία ανάπτυξης περιλάμβανε τη δημιουργία τρισδιάστατων αντικειμένων, τη διαμόρφωση εικονικών σκηνών στο Unity, καθώς και την υλοποίηση διαδραστικών σεναρίων που υποστηρίζουν τη μαθησιακή εμπειρία.

«Design and development of haptic interfaces for supporting individuals with fine motor difficulties»

«Papadopoulos Euthimis»

Abstract

This thesis focuses on the development of an educational Virtual Reality application that utilizes three-dimensional models created in the Unity platform, in combination with the haptic technology provided by 3D Systems. The main objective of the application is to assist individuals with motor impairments in the process of forming letters of the alphabet. For the user's interaction with the digital environment, the Touch Haptic Device was employed, offering haptic feedback that enables the perception of different textures and shapes through the sense of touch. In this way, users were able to practice and interact within a safe and controlled virtual environment, without being exposed to real-world risks. The development process involved the creation of three-dimensional objects, the design of virtual environments in Unity, and the implementation of interactive scenarios that enhance the learning experience.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Γεώργιο Κοκκώνη με τον οποίο συνεργαστήκαμε άψογα και με την πολύτιμη καθοδήγηση και στήριξή του κατάφερα να ολοκληρώσω την παρούσα διπλωματική εργασία. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ την γυναίκα μου που μου στάθηκε σαν βράχος καθόλη την διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας και αποτέλεσε έμπνευση ώστε να μην τα παρατήσω στις δυσκολίες που υπήρξαν.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	3
Περίληψη	4
Abstract.....	5
Ευχαριστίες	6
Περιεχόμενα	7
Κατάλογος Σχημάτων	10
Συντομογραφίες.....	11
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή	12
1.1 Η αίσθηση της αφής σε ψηφιακά περιβάλλοντα.	12
1.2 Ο ρόλος της αφής στη διαδικασία αντίληψης.	14
1.3 Κατανόηση και Σημασία της Ρεαλιστικής Προσομοίωσης Υφών	15
1.4 Σκοπός και Επιδιώξεις της Εφαρμογής	16
1.5 Λεπτή κινητικότητα και ανάγκη υποστήριξης	17
1.6 Διάρθρωση της εργασίας	17
1.7 Επίλογος.....	18
Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό υπόβαθρο	19
2.1 Ανάλυση Θεωρίας	19
2.2 Συσκευές Αφής και Χρήσεις τους.....	20
2.2.1 Wearable Haptics.....	21
2.2.2 Desktop Haptics.....	22
2.2.3 Surface Haptics.....	23
2.2.4 Συγκριτική θεώρηση των κατηγοριών	24
2.3 Απτική αλληλεπίδραση μέσω υπολογιστών (Computer Haptics)	24
2.3.1 Αλγόριθμοι ανίχνευσης και απόκρισης σύγκρουσης	25
2.4 Αίσθηση αφής στο δέρμα.....	26
2.5 Αντίστοιχες μελέτες.....	27
2.6 Απτική τεχνολογία στην αποκατάσταση και την κινητική μάθηση	28
2.7 Πολυαισθητηριακή ανάδραση και μάθηση.....	29
2.8 Απτική τεχνολογία σε εικονική και επανυξημένη πραγματικότητα.....	29
2.9 Παθοφυσιολογία και Προφίλ Χρηστών με Προβλήματα Λεπτής Κινητικότητας	30
2.9.1 Εισαγωγή στις Κινητικές Διαταραχές	30
2.9.2 Νευρολογικές Παθήσεις και Επίδραση στη Διεπαφή	31
2.9.3 Μυοσκελετικές Παθήσεις.....	31

2.9.4	Ο Ρόλος της Ιδιοδεκτικότητας και η Αισθητηριακή Υποκατάσταση	31
2.10	Κατηγορίες και Μηχανισμοί Απτικών Τεχνολογιών (Hardware)	32
2.10.1	Κιναισθητική Ανάδραση (Kinesthetic / Force Feedback).....	32
2.10.2	Δερματική Ανάδραση (Cutaneous / Tactile Feedback)	32
2.10.3	Τύποι Ενεργοποιητών (Actuators).....	32
2.11	Αρχές Σχεδιασμού (User-Centered Design) για AMEA.....	34
2.11.1	Προσαρμοστικότητα (Adaptability) και Μηχανική Μάθηση	34
2.11.2	Εργονομία και Μείωση Γνωστικού/Φυσικού Φορτίου	35
2.12	Μεθοδολογία Αξιολόγησης και Μετρικές Απόδοσης	35
2.12.1	Ποσοτικές Μετρικές (Quantitative Metrics)	35
2.12.2	Ποιοτικές Μετρικές (Qualitative Metrics)	36
2.13	Επίλογος.....	36
Κεφάλαιο 3ο:	Συσκευή Geomagic touch	38
3.1	Εισαγωγή	38
3.2	Λίγα λόγια για τη Συσκευή.....	38
3.2.1	Τεχνικά χαρακτηριστικά	39
3.2.2	Force Feedback.....	40
3.3	Χρήσεις της Συσκευής.....	41
3.3.1	Haptic Based Software (Λογισμικό που βασίζεται στην απτική λειτουργία).....	41
3.4	Εγκατάσταση και Οδηγοί (Drivers).....	42
3.5	Το προγραμματιστικό περιβάλλον OpenHaptics	44
3.6	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα	45
3.7	Επίλογος.....	46
Κεφάλαιο 4ο:	Σχεδίαση και υλοποίηση της εφαρμογής	47
4.1	Εισαγωγή	47
4.2	Εργαλεία και τεχνολογίες ανάπτυξης	47
4.3	Δομή του εικονικού περιβάλλοντος	47
4.3.1	Ρύθμιση της φυσικής και του συστήματος συντεταγμένων	48
4.4	Το περιβάλλον ανάπτυξης και η σκηνή στη Unity	48
4.5	Αρχιτεκτονική του λογισμικού.....	49
4.6	Αναπαράσταση του γράμματος και απτικά όρια.....	51
4.7	Οπτική, ηχητική και απτική ανατροφοδότηση.....	53
4.8	Υποστήριξη πολλαπλών γραμμάτων και διεπαφή χρήστη	55
4.9	Λειτουργία με ποντίκι και με τη συσκευή Geomagic Touch	56
4.10	Επιβράβευση και διεπαφή χρήστη.....	57

4.11	Η ροή χρήσης της εφαρμογής	58
4.12	Διαδικασία ανάπτυξης και δοκιμών	58
4.13	Επεκτασιμότητα και εργαλεία ανάπτυξης	59
4.14	Επίλογος.....	59
Κεφάλαιο 5ο:	Πειραματική αξιολόγηση της εφαρμογής	60
5.1	Σκοπός και ερευνητικά ερωτήματα	60
5.2	Συνθήκες του πειράματος	60
5.3	Μετρικές αξιολόγησης.....	61
5.4	Συμμετέχοντες και προτεινόμενο πρωτόκολλο διεξαγωγής	61
5.5	Προτεινόμενες πιλοτικές δοκιμές και ρύθμιση παραμέτρων	61
5.6	Προτεινόμενη καταγραφή των ποσοτικών αποτελεσμάτων	62
5.7	Προτεινόμενη αξιολόγηση της εμπειρίας των χρηστών	63
5.8	Αναμενόμενοι περιορισμοί της προτεινόμενης αξιολόγησης	63
5.9	Επίλογος.....	64
Κεφάλαιο 6ο:	Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης	65
6.1	Συμπεράσματα	65
6.2	Περιορισμοί.....	65
6.3	Προτάσεις βελτίωσης και μελλοντική εργασία.....	66
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		68

Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 1 Διάφορες απτικές συσκευές που αναφέρονται στις βασικές επιστημονικές αρχές.....	13
Εικόνα 2 Διερευνητικές κινήσεις της αφής για την αντίληψη των ιδιοτήτων ενός αντικειμένου	15
Εικόνα 3 Αντικείμενα ίδιας βασικής μορφής με διαφορετικά μοτίβα υφής στην επιφάνειά τους (μαύρα και λευκά τετράγωνα).	16
Εικόνα 4 Παραδείγματα απτικών συσκευών: απτικό γάντι, συσκευή τύπου γραφίδας (Geomagic Touch) και χειριστήριο κονσόλας.....	21
Εικόνα 5 Απτικό γάντι HaptX σε συνδυασμό με κάσκα εικονικής πραγματικότητας (HTC Vive).	22
Εικόνα 6 Χειριστήριο κονσόλας (PlayStation DualSense) με απτική ανάδραση δόνησης.	23
Εικόνα 7 Ποντίκι υπολογιστή με απτική ανάδραση (δόνηση).	24
Εικόνα 8 Αρχιτεκτονική κινητήρα ERM	33
Εικόνα 9 Αρχιτεκτονική κινητήρα LRA	34
Εικόνα 10 Η απτική συσκευή Touch της 3D Systems (Geomagic Touch).	38
Εικόνα 11 Τεχνικά Χαρακτηριστικά της συσκευής Touch από την επίσημη σελίδα της 3D Systems...	40
Εικόνα 12 Οι οδηγοί (drivers) της συσκευής μέσω της πλατφόρμας OpenHaptics της 3D Systems. ...	43
Εικόνα 13 Το περιβάλλον ρύθμισης (Touch Setup) της συσκευής.	44
Εικόνα 14 Το περιβάλλον της Unity με τη σκηνή της εφαρμογής: η ιεραρχία των αντικειμένων (αριστερά), η τρισδιάστατη προβολή του πίνακα με το γράμμα και τα σημεία της διαδρομής (κέντρο) και ο επιθεωρητής με το αντικείμενο LetterApp, που φέρει τη λογική και τη διεπ.....	49
Εικόνα 15 Η διαδρομή του γράμματος όπως δημιουργείται στη σκηνή: τα διαδοχικά σημεία (waypoints) κάθε γραμμής γραφής και το κανάλι ανοχής γύρω από αυτά (κυανά βοηθητικά σχήματα). Δεξιά, στον επιθεωρητή, οι παράμετροι του LetterPath (πλάτος καναλιού, ανοχή επιπέδο	52
Εικόνα 16 Η εφαρμογή κατά την έναρξη: το γράμμα Άλφα εμφανίζεται λευκό, η γραφίδα βρίσκεται εκτός του γράμματος και η πρόοδος είναι μηδενική. Αριστερά διακρίνεται το μενού επιλογής γράμματος, με τα επόμενα γράμματα κλειδωμένα.	53
Εικόνα 17 Ιχνηλάτηση σε εξέλιξη: όσο η γραφίδα κινείται εντός του καναλιού το γράμμα αλλάζει χρώμα, η ένδειξη κατάστασης ενθαρρύνει τον χρήστη και η μπάρα προόδου συμπληρώνεται σταδιακά.	54
Εικόνα 18 Ολοκλήρωση του γράμματος Άλφα: το γράμμα γίνεται χρυσό, εμφανίζεται το μήνυμα επιβράβευσης με τον χρόνο ολοκλήρωσης και ξεκλειδώνεται το επόμενο γράμμα.	54
Εικόνα 19 Αυτόματη μετάβαση στο γράμμα Γάμα μετά την ολοκλήρωση του Άλφα· το μενού εμφανίζει πλέον ξεκλειδωτά δύο γράμματα και τον καλύτερο χρόνο του χρήστη.....	55
Εικόνα 20 Ιχνηλάτηση του τρίτου γράμματος (Δέλτα), το οποίο αποτελείται από τρεις γραμμές γραφής και απαιτεί μεγαλύτερο έλεγχο της κίνησης· η μπάρα προόδου δείχνει το ποσοστό της διαδρομής που έχει καλυφθεί.....	56
Εικόνα 21 Ολοκλήρωση και των τριών γραμμάτων: η εφαρμογή εμφανίζει το τελικό μήνυμα επιβράβευσης και τον χρόνο της τελευταίας προσπάθειας.	56

Συντομογραφίες

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΙΠΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο εισάγει τον αναγνώστη στο αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας και στη σημασία της αφής κατά την αλληλεπίδραση με ψηφιακά περιβάλλοντα. Αρχικά εξετάζεται η αίσθηση της αφής σε ψηφιακά περιβάλλοντα και ο ρόλος της στη διαδικασία της αντίληψης, στη συνέχεια αναλύεται η σημασία της ρεαλιστικής προσομοίωσης υφών, και τέλος παρουσιάζονται ο σκοπός και οι επιδιώξεις της εφαρμογής που αναπτύχθηκε.

1.1 Η αίσθηση της αφής σε ψηφιακά περιβάλλοντα.

Για να προσεγγίσουμε ουσιαστικά την έννοια της απτικής αλληλεπίδρασης και να τη μεταφέρουμε σε ψηφιακά περιβάλλοντα, είναι αναγκαίο να κατανοήσουμε πρώτα τις βασικές επιστημονικές αρχές που τη διέπουν. [1]

Η απτική αίσθηση (tactile) αφορά την ανίχνευση πίεσης, δύναμης ή θερμικής ενέργειας στο δέρμα και επιτρέπει την αναγνώριση χαρακτηριστικών ενός αντικειμένου, όπως οι άκρες, τα ανοίγματα, η τριβή της επιφάνειας και ο βαθμός ακαμψίας του.

Η Haptics αναφέρεται στην τεχνολογία που αναπαράγει την αίσθηση της αφής μέσω της εφαρμογής δυνάμεων ή δονήσεων στο σώμα του χρήστη. Ο άνθρωπος διαθέτει δύο κύριες μορφές απτικής αντίληψης: την απτική (tactile) και την κιναισθητική (kinesthetic).

Η κιναισθητική αίσθηση σχετίζεται με την αντίληψη της κίνησης του σώματος και της μυϊκής δύναμης, βοηθώντας μας να αντιλαμβανόμαστε τη μάζα και τη ροπή ενός αντικειμένου όταν αυτό ανυψώνεται ή μετακινείται.

Οι δύο αυτές μορφές αντίληψης δεν λειτουργούν ανεξάρτητα, αλλά συνεργάζονται στενά κατά τη διάρκεια κάθε πραγματικής αλληλεπίδρασης. Όταν, για παράδειγμα, ένα άτομο πιάνει ένα αντικείμενο και το περιστρέφει στο χέρι του, ο εγκέφαλος συνδυάζει ταυτόχρονα τα δερματικά σήματα από τους μηχανοϋποδοχείς του δέρματος με τα κιναισθητικά σήματα από τους μυς, τους τένοντες και τις αρθρώσεις. Το αποτέλεσμα είναι μια ενιαία, συνεκτική αντίληψη του αντικειμένου, η οποία περιλαμβάνει τόσο τα επιφανειακά του χαρακτηριστικά (υφή, θερμοκρασία, τραχύτητα) όσο και τις ογκομετρικές του ιδιότητες (σχήμα, βάρος, ακαμψία). Η κατανόηση αυτής της συνέργειας είναι θεμελιώδης για τον σχεδιασμό απτικών συστημάτων, καθώς μια συσκευή που αναπαράγει μόνο τη μία διάσταση της αφής προσφέρει αναγκαστικά μια μερική και λιγότερο πειστική εμπειρία.

Στο πλαίσιο των ψηφιακών περιβαλλόντων, η αναπαραγωγή της απτικής πληροφορίας παρουσιάζει ιδιαίτερες τεχνικές προκλήσεις σε σύγκριση με την οπτική και την ακουστική. Ενώ η όραση και η ακοή μπορούν να διεγερθούν από απόσταση, μέσω φωτός και ήχου αντίστοιχα, η αφή απαιτεί άμεση, φυσική επαφή και ανταλλαγή δυνάμεων μεταξύ του χρήστη και της συσκευής. Αυτό σημαίνει ότι ένα απτικό σύστημα πρέπει όχι μόνο να υπολογίζει με ακρίβεια τις δυνάμεις που θα αποδοθούν, αλλά και να τις παράγει μηχανικά σε πραγματικό χρόνο, με ρυθμούς ανανέωσης που φτάνουν συχνά το ένα χιλιοστό του δευτερολέπτου (1 kHz), προκειμένου η αίσθηση να γίνεται αντιληπτή ως συνεχής και ρεαλιστική. Οποιαδήποτε καθυστέρηση ή ασυνέχεια στην απόδοση των δυνάμεων γίνεται άμεσα αντιληπτή από τον χρήστη και υποβαθμίζει σημαντικά την εμπειρία.

Η σημασία της αφής στην ανθρώπινη εμπειρία δεν περιορίζεται στην αναγνώριση αντικειμένων. Η αφή αποτελεί το πρώτο αισθητήριο σύστημα που αναπτύσσεται στο έμβρυο και συνοδεύει τον άνθρωπο σε όλη τη διάρκεια της ζωής του, διαδραματίζοντας κρίσιμο ρόλο στην κινητική μάθηση, στη

συναισθηματική επικοινωνία και στην αλληλεπίδραση με το περιβάλλον. Ειδικά στην περίπτωση ατόμων με αισθητηριακές ή κινητικές δυσκολίες, η αξιοποίηση της απτικής οδού μπορεί να λειτουργήσει αντισταθμιστικά, προσφέροντας ένα εναλλακτικό κανάλι πρόσληψης και απόδοσης πληροφορίας εκεί όπου οι υπόλοιπες αισθήσεις υστερούν ή δεν επαρκούν.

Η ιστορική εξέλιξη της απτικής τεχνολογίας ακολούθησε την πρόοδο της ρομποτικής και των συστημάτων τηλεχειρισμού. Οι πρώτες απτικές διατάξεις αναπτύχθηκαν τη δεκαετία του 1950 για τον χειρισμό ραδιενεργών υλικών από απόσταση, όπου ο χειριστής χρειαζόταν να «αισθάνεται» τις δυνάμεις που ασκούσε ο απομακρυσμένος βραχίονας. Από τότε, το πεδίο διευρύνθηκε σημαντικά, καλύπτοντας εφαρμογές που εκτείνονται από την ιατρική εκπαίδευση και τη χειρουργική τηλεπαρουσία έως τα ηλεκτρονικά παιχνίδια, τον βιομηχανικό σχεδιασμό και, πιο πρόσφατα, την υποστηρικτική τεχνολογία για άτομα με αναπηρία. Η παρούσα εργασία εντάσσεται σε αυτό το τελευταίο, ραγδαία αναπτυσσόμενο ρεύμα, το οποίο επιχειρεί να θέσει την απτική τεχνολογία στην υπηρεσία ευάλωτων κοινωνικών ομάδων.[1]

Η υποστηρικτική τεχνολογία (assistive technology) αποτελεί έναν ευρύ τομέα που περιλαμβάνει κάθε συσκευή, λογισμικό ή σύστημα που βοηθά άτομα με αναπηρία να εκτελούν εργασίες τις οποίες διαφορετικά θα δυσκολεύονταν ή δεν θα μπορούσαν να πραγματοποιήσουν. Παραδοσιακά, οι υποστηρικτικές τεχνολογίες εστίαζαν στην αντιστάθμιση αισθητηριακών ελλειμμάτων —όπως οι αναγνώστες οθόνης για άτομα με προβλήματα όρασης ή τα ακουστικά βαρηκοΐας— ενώ πιο πρόσφατα το ενδιαφέρον στράφηκε και στην υποστήριξη κινητικών λειτουργιών. Στο πλαίσιο αυτό, η απτική τεχνολογία προσφέρει μια μοναδική δυνατότητα: αντί απλώς να παρέχει πληροφορία, μπορεί να παρέμβει ενεργά στην κίνηση του χρήστη, καθοδηγώντας το χέρι του και υποστηρίζοντας την εκτέλεση δεξιοτήτων που απαιτούν λεπτό κινητικό έλεγχο.

Η γραφή, ειδικότερα, αποτελεί μια από τις πιο απαιτητικές λεπτές κινητικές δεξιότητες και ταυτόχρονα μια από τις πιο σημαντικές για την εκπαίδευση και την κοινωνική ένταξη. Η δυσκολία στη γραφή, γνωστή και ως δυσγραφία όταν εμφανίζεται ως ειδική διαταραχή, μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες στη σχολική πορεία και στην αυτοεκτίμηση ενός ατόμου. Μια εφαρμογή που υποστηρίζει την εκμάθηση του σχηματισμού των γραμμάτων μέσω απτικής καθοδήγησης μπορεί, επομένως, να έχει ουσιαστικό αντίκτυπο, προσφέροντας ένα εργαλείο εξάσκησης που είναι ταυτόχρονα αποτελεσματικό, ενθαρρυντικό και προσβάσιμο.



Εικόνα 1 Διάφορες απτικές συσκευές που αναφέρονται στις βασικές επιστημονικές αρχές [2]

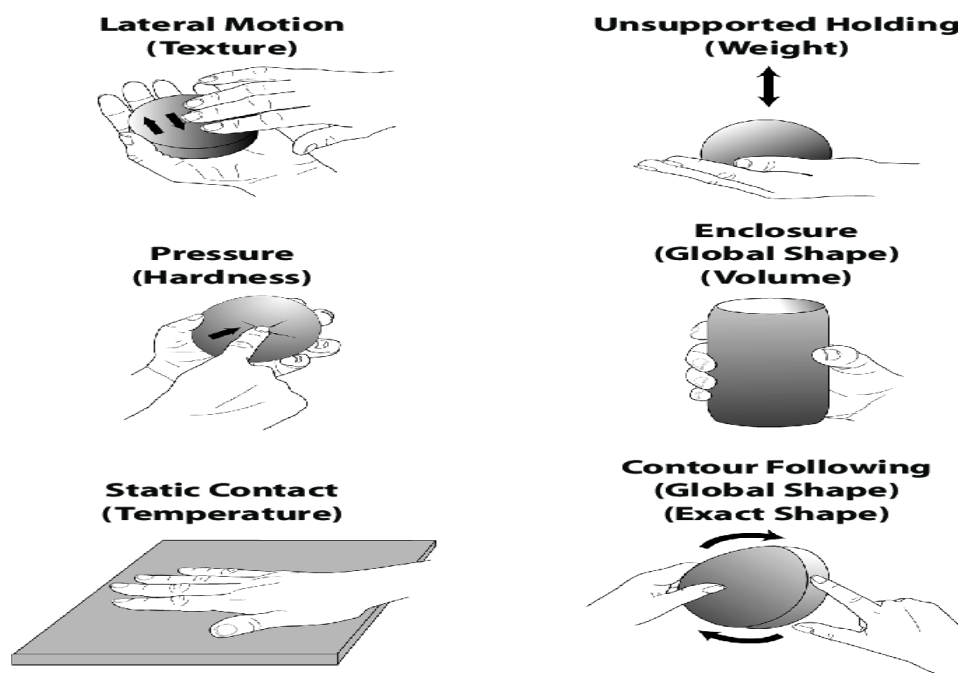
1.2 Ο ρόλος της αφής στη διαδικασία αντίληψης.

Οι άνθρωποι αντιλαμβανόμαστε το περιβάλλον μας μέσω των αισθήσεών μας, όπως η όραση, η όσφρηση, η ακοή, η γεύση και η αφή. Μέχρι σήμερα, οι υπάρχουσες τεχνολογίες επιτρέπουν τη σχετικά αξιόπιστη μετάδοση μόνο οπτικών και ακουστικών πληροφοριών, διεγείροντας κατ' ουσίαν δύο από τις ανθρώπινες αισθήσεις. Με την ανάπτυξη, ωστόσο, νέων τεχνολογιών που σχετίζονται με τις απτικές αλληλεπιδράσεις, καθίσταται πλέον εφικτή η απτική επικοινωνία, δηλαδή η δυνατότητα συλλογής απτικών δεδομένων και η μεταφορά τους μέσω του διαδικτύου. [3]

Κάθε αντικείμενο έχει ορισμένα χαρακτηριστικά που μπορούμε να τα καταλάβουμε μόνο όταν το αγγίζουμε. Για παράδειγμα, καταλαβαίνουμε πόσο τραχιά ή λεία είναι μια επιφάνεια σέρνοντας το δάχτυλό μας πάνω της. Νιώθουμε πόσο σκληρό ή μαλακό είναι κάτι πιέζοντάς το, ενώ αντιλαμβανόμαστε το συνολικό του σχήμα και τον όγκο αγκαλιάζοντάς το με την παλάμη μας. Τη θερμοκρασία τη νιώθουμε απλώς ακουμπώντας το χέρι μας πάνω του χωρίς να το μετακινούμε, το βάρος το καταλαβαίνουμε όταν το κρατάμε στον αέρα, και τις ακριβείς λεπτομέρειες του σχήματός του τις αναγνωρίζουμε ακολουθώντας τα περιγράμματά του με τα δάχτυλα.

Η διαδικασία της απτικής εξερεύνησης δεν είναι τυχαία, αλλά ακολουθεί συγκεκριμένα μοτίβα κινήσεων, τα οποία οι Lederman και Klatzky περιέγραψαν ως «διαδικασίες εξερεύνησης» (exploratory procedures). Κάθε τέτοια διαδικασία συνδέεται με μια συγκεκριμένη ιδιότητα του αντικείμενου: η πλευρική κίνηση των δακτύλων χρησιμοποιείται για την αντίληψη της υφής, η στατική επαφή για τη θερμοκρασία, η πίεση για τη σκληρότητα, το κράτημα και η ζύγιση για το βάρος, το περίγραμμα με τα δάκτυλα για το ακριβές σχήμα και το κλείσιμο της παλάμης γύρω από το αντικείμενο για τον συνολικό του όγκο. Το γεγονός ότι ο άνθρωπος επιλέγει αυθόρμητα τη βέλτιστη κίνηση για κάθε ιδιότητα καταδεικνύει πόσο εξειδικευμένο και αποτελεσματικό είναι το απτικό σύστημα ως μηχανισμός συλλογής πληροφορίας.

Ιδιαίτερη σημασία για την παρούσα εργασία έχει η διάκριση μεταξύ ενεργητικής και παθητικής αφής. Στην ενεργητική αφή ο χρήστης κινεί ελεύθερα το χέρι του και εξερευνά το αντικείμενο με τον δικό του ρυθμό, ενώ στην παθητική αφή το ερέθισμα εφαρμόζεται στο δέρμα χωρίς τη δική του πρωτοβουλία. Οι έρευνες δείχνουν ότι η ενεργητική αφή οδηγεί σε πληρέστερη και ακριβέστερη αντίληψη, καθώς ο χρήστης ελέγχει την κίνηση και συνδυάζει τα δερματικά με τα κιναισθητικά σήματα. Για τον λόγο αυτό, οι απτικές συσκευές που επιτρέπουν στον χρήστη να κινείται ελεύθερα και να εξερευνά το εικονικό περιβάλλον, όπως η συσκευή που αξιοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, προσφέρουν σαφώς ανώτερη εμπειρία σε σχέση με τα παθητικά συστήματα δόνησης.



Εικόνα 2 Διερευνητικές κινήσεις της αφής για την αντίληψη των ιδιοτήτων ενός αντικειμένου [4]

1.3 Κατανόηση και Σημασία της Ρεαλιστικής Προσομοίωσης Υφών

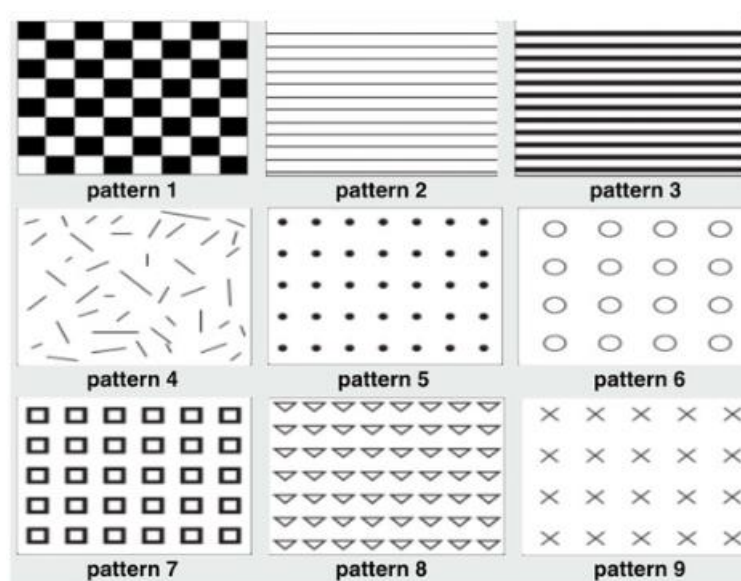
Στα περιβάλλοντα επαυξημένης πραγματικότητας, η ρεαλιστική αναπαράσταση των υφών παίζει καθοριστικό ρόλο στην αίσθηση εμπύθισης του χρήστη. Ο όρος υφή περιγράφει τα χαρακτηριστικά μιας επιφάνειας που γίνονται αντιληπτά μέσω απτικής επαφής, όπως η τραχύτητα ή ομαλότητα, η σκληρότητα και η μορφολογία κατά την κίνηση του χεριού πάνω σε αυτήν. Η πιστή αναπαράσταση αυτών των ιδιοτήτων στο ψηφιακό περιβάλλον εξυπηρετεί δύο βασικούς σκοπούς. Αφενός, ενισχύει τον ρεαλισμό και την πειστικότητα της εικονικής εμπειρίας, επιτρέποντας στον χρήστη να αλληλεπιδρά με αντικείμενα που συμπεριφέρονται όπως τα πραγματικά, αντί για αφηρημένα ψηφιακά μοντέλα. Αφετέρου, υποστηρίζει την εκπαίδευση και την κατανόηση σε εφαρμογές όπου η αίσθηση της αφής είναι ουσιαστική, όπως σε ιατρικές προσομοιώσεις ή σε εκπαιδευτικά προγράμματα σχολικής φύσης σε τομείς όπως η βιολογία και η χημεία. Συχνά, η οπτική πληροφορία από μόνη της δεν αρκεί, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία της πιστής απτικής αναπαράστασης. Ένα αντικείμενο σε ένα εικονικό περιβάλλον μπορεί να φαίνεται σωστά οπτικά, αλλά να μην μεταφέρει πλήρως τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του. Για παράδειγμα, δύο αντικείμενα μπορεί να εμφανίζονται παρόμοια στην όψη, αλλά να διαφέρουν ως προς την τραχύτητα ή τη σκληρότητα. Η ακριβής προσομοίωση αυτών των διαφορών αυξάνει σημαντικά τον ρεαλισμό της προσομοίωσης και βελτιώνει την εμπειρία του χρήστη.

Η αναπαραγωγή ρεαλιστικών υφών στηρίζεται σε δύο βασικές οικογένειες προσεγγίσεων. Η πρώτη, οι φυσικο-βασισμένες (physically-based) μέθοδοι, επιχειρούν να μοντελοποιήσουν με μαθηματικές εξισώσεις τη γεωμετρία και τις μηχανικές ιδιότητες της επιφάνειας, υπολογίζοντας σε πραγματικό χρόνο τις δυνάμεις που θα ένιωθε ο χρήστης. Οι μέθοδοι αυτές παράγουν ιδιαίτερα ακριβή αποτελέσματα, αλλά απαιτούν σημαντική υπολογιστική ισχύ και λεπτομερή γνώση των φυσικών παραμέτρων κάθε υλικού. Η δεύτερη οικογένεια, οι μέθοδοι βασισμένες σε δεδομένα (data-driven), καταγράφουν πραγματικές υφές με ειδικούς αισθητήρες και αναπαράγουν τα καταγεγραμμένα σήματα κατά την αλληλεπίδραση. Οι προσεγγίσεις αυτές είναι υπολογιστικά ελαφρύτερες και αποδίδουν

πειστικά αποτελέσματα, όμως απαιτούν εκ των προτέρων καταγραφή κάθε επιμέρους υλικού και δυσκολεύονται να γενικευτούν σε νέες, μη καταγεγραμμένες υφές.[5]

Στην εκπαιδευτική εφαρμογή που αναπτύχθηκε, η υφή δεν αξιοποιείται ως αυτοσκοπός αλλά ως λειτουργικό εργαλείο καθοδήγησης. Η επιφάνεια πάνω στην οποία σχηματίζεται το γράμμα αποκτά ελεγχόμενες ιδιότητες τριβής και σκληρότητας, ώστε ο χρήστης να αντιλαμβάνεται απτικά τη διαδρομή του γράμματος και να διακρίνει πότε η γραφίδα βρίσκεται εντός ή εκτός των ορίων του. Με τον τρόπο αυτό, η ρεαλιστική απόδοση της υφής μετατρέπεται σε μηχανισμό υποστήριξης της κινητικής μάθησης, γεγονός που συνδέει άμεσα τη θεωρητική συζήτηση περί υφών με τον πρακτικό σκοπό της εφαρμογής.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η προσομοίωση υφών δεν αφορά μόνο την πιστότητα της αναπαράστασης, αλλά και τη λειτουργική της αξία στο εκάστοτε πλαίσιο χρήσης. Σε μια εφαρμογή ηλεκτρονικού εμπορίου, για παράδειγμα, η υφή ενός υφάσματος πρέπει να αναπαράγεται όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά ώστε να ενημερώνει την αγοραστική απόφαση. Αντίθετα, σε μια εκπαιδευτική εφαρμογή γραφής, όπως η παρούσα, η υφή αξιοποιείται συμβολικά και λειτουργικά: δεν είναι απαραίτητο να αναπαριστά μια συγκεκριμένη πραγματική επιφάνεια, αλλά να προσφέρει στον χρήστη σαφή και συνεπή απτική πληροφορία για το πού βρίσκεται η γραφίδα σε σχέση με τη διαδρομή του γράμματος. Η διάκριση αυτή είναι σημαντική, καθώς καθορίζει τις σχεδιαστικές προτεραιότητες και τα κριτήρια επιτυχίας της εφαρμογής.[5]



Εικόνα 3 Αντικείμενα ίδιας βασικής μορφής με διαφορετικά μοτίβα υφής στην επιφάνειά τους (μαύρα και λευκά τετράγωνα).[6]

1.4 Σκοπός και Επιδιώξεις της Εφαρμογής

Η ανάπτυξη της συγκεκριμένης εφαρμογής, καθώς και οι έρευνες που διεξήχθησαν με τη χρήση της, επικεντρώθηκαν στην προσέγγιση της ρεαλιστικής απτικής προσομοίωσης επιλεγμένων υφών μέσω της αξιοποίησης ενός haptic interface (συσσκευής αφής) σε περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας. Η εφαρμογή που αξιοποιήθηκε για τους πειραματικούς σκοπούς δημιουργήθηκε με τη μηχανή Unity3D, ενώ για την απτική αλληλεπίδραση με τα εικονικά υλικά χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Touch της 3D Systems, η οποία επιτρέπει την αναπαραγωγή της απτικής πληροφορίας μέσω συγκεκριμένων

παραμέτρων. Στόχος της εφαρμογής είναι να έχουμε όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικό αποτέλεσμα, ώστε να καταλάβει ο κάθε χρήστης που θα χρησιμοποιήσει την εφαρμογή τις υφές του γράμματος.

1.5 Λεπτή κινητικότητα και ανάγκη υποστήριξης

Ο όρος λεπτή κινητικότητα (fine motor skills) αναφέρεται στην ικανότητα εκτέλεσης μικρών, ακριβών και συντονισμένων κινήσεων, κυρίως με τα δάκτυλα και τα χέρια, σε συνεργασία με το οπτικό σύστημα. Δραστηριότητες όπως η γραφή, το κούμπωμα ενός ρούχου, η χρήση ψαλιδιού ή ο χειρισμός μικρών αντικειμένων απαιτούν υψηλό βαθμό λεπτής κινητικότητας και ακριβούς νευρομυϊκού ελέγχου. Οι δεξιότητες αυτές αναπτύσσονται σταδιακά κατά την παιδική ηλικία και αποτελούν προϋπόθεση για την αυτονομία του ατόμου στην καθημερινή ζωή, καθώς και για τη σχολική επίδοση, ιδίως στον τομέα της γραφής.[7]

Δυσκολίες στη λεπτή κινητικότητα μπορούν να προκύψουν από ποικίλες αιτίες, όπως νευροαναπτυξιακές διαταραχές (π.χ. δυσπραξία ή αναπτυξιακή διαταραχή του κινητικού συντονισμού), εγκεφαλική παράλυση, κρανιοεγκεφαλικές κακώσεις, αγγειακά εγκεφαλικά επεισόδια, καθώς και εκφυλιστικές νόσους. Τα άτομα που αντιμετωπίζουν τέτοιες δυσκολίες συχνά εμφανίζουν τρόπο, μειωμένο έλεγχο της δύναμης και της κατεύθυνσης της κίνησης, δυσκολία στη διατήρηση σταθερής τροχιάς και αυξημένη κόπωση κατά την εκτέλεση επαναλαμβανόμενων εργασιών. Οι δυσκολίες αυτές έχουν άμεσο αντίκτυπο στην ικανότητα γραφής, η οποία απαιτεί τον συντονισμό πολλών μικρών μυών και τη διαρκή προσαρμογή της κίνησης.

Η παραδοσιακή αποκατάσταση της λεπτής κινητικότητας στηρίζεται σε επαναλαμβανόμενες ασκήσεις υπό την καθοδήγηση εργοθεραπευτή. Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή παρουσιάζει περιορισμούς: απαιτεί τη διαρκή φυσική παρουσία ειδικού, μπορεί να γίνεται μονότονη και αποθαρρυντική για τον ασκούμενο και δεν προσφέρει πάντοτε αντικειμενική, ποσοτική καταγραφή της προόδου. Οι ψηφιακές και απτικές τεχνολογίες προσφέρουν μια ελπιδοφόρα εναλλακτική, καθώς επιτρέπουν τη δημιουργία ελεγχόμενων, επαναλήψιμων και ενθαρρυντικών περιβαλλόντων εξάσκησης, στα οποία η δυσκολία μπορεί να ρυθμίζεται και η πρόοδος να καταγράφεται αυτόματα.[7]

Η απτική ανάδραση δύναμης, ειδικότερα, ανοίγει τη δυνατότητα ενεργητικής καθοδήγησης της κίνησης του χρήστη. Αντί ο ασκούμενος να προσπαθεί να ακολουθήσει μια διαδρομή χωρίς υποστήριξη, η συσκευή μπορεί να ασκεί ήπιες δυνάμεις που τον οδηγούν κατά μήκος της σωστής τροχιάς, μειώνοντας την επίδραση του τρόμου και των ακούσιων κινήσεων. Αυτή ακριβώς η αρχή αποτελεί τον πυρήνα της εφαρμογής που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία, όπου η συσκευή Geomagic Touch αξιοποιείται ως «μαγνητικός» οδηγός για την υποστήριξη της γραφής γραμμάτων από άτομα με δυσκολίες λεπτής κινητικότητας.[8]

1.6 Διάρθρωση της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία οργανώνεται σε έξι κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο εισάγεται η έννοια της αφής και της απτικής αλληλεπίδρασης, αναλύεται η σημασία της ρεαλιστικής προσομοίωσης υφών και παρουσιάζονται ο σκοπός της εργασίας, το πρόβλημα της λεπτής κινητικότητας και η ανάγκη υποστήριξής της. Το δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσει το θεωρητικό υπόβαθρο, εξετάζοντας τις κατηγορίες των απτικών συσκευών, την απτική αλληλεπίδραση μέσω υπολογιστών, τη φυσιολογία της αφής στο δέρμα και σχετικές ερευνητικές μελέτες. Το τρίτο κεφάλαιο εστιάζει στη συσκευή Geomagic Touch, στα τεχνικά της χαρακτηριστικά, στις χρήσεις της και στη διαδικασία εγκατάστασης. Το τέταρτο κεφάλαιο περιγράφει αναλυτικά τη σχεδίαση και υλοποίηση της εφαρμογής, από τα εργαλεία

ανάπτυξης έως την αρχιτεκτονική του λογισμικού και τους μηχανισμούς απτικής καθοδήγησης. Τέλος, το πέμπτο κεφάλαιο συνοψίζει τα συμπεράσματα, καταγράφει τους περιορισμούς και διατυπώνει προτάσεις για μελλοντική εργασία. Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική αξιολόγηση της εφαρμογής, με τα ερευνητικά ερωτήματα, τις συνθήκες σύγκρισης, τις μετρικές, το πρωτόκολλο διεξαγωγής και την καταγραφή των αποτελεσμάτων, ενώ στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα και διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική εργασία.

1.7 Επίλογος

Συνοψίζοντας, στο πρώτο κεφάλαιο αναλύθηκε η έννοια της αφής και η συλλογή των δεδομένων που προκύπτουν από την επαφή με αντικείμενα. Τονίστηκε η σημασία της κατανόησης της απτικής αλληλεπίδρασης στον ψηφιακό χώρο και η ανάγκη για πιστή αναπαράσταση των ψηφιακών υφών. Τέλος, παρουσιάστηκαν ο σκοπός και οι στόχοι της εφαρμογής, καθώς και η χρήση της για την εκτέλεση της σχετικής έρευνας.

Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό υπόβαθρο

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας. Ξεκινώντας από την ανάλυση της σχετικής θεωρίας, περιγράφονται οι κατηγορίες των απτικών συσκευών και οι χρήσεις τους, η απτική αλληλεπίδραση μέσω υπολογιστών (computer haptics) και ο τρόπος με τον οποίο το δέρμα αντιλαμβάνεται την αφή, ενώ το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την επισκόπηση αντίστοιχων μελετών.

2.1 Ανάλυση Θεωρίας

Τα τελευταία δέκα χρόνια, η τεχνολογία της εικονικής πραγματικότητας (VR) έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο, προσφέροντας ενισχυμένη οπτική εμπύθιση σε διάφορα ψηφιακά περιβάλλοντα. Παρά τις εξελίξεις στην απεικόνιση ρεαλιστικών τρισδιάστατων γραφικών, τα σύγχρονα εικονικά περιβάλλοντα εξακολουθούν να περιορίζονται, καθώς δεν μπορούν να αναπαράγουν πλήρως τα αισθητηριακά ερεθίσματα που βιώνουν οι άνθρωποι στις φυσικές τους αλληλεπιδράσεις. Ιδιαίτερα, η έλλειψη της αίσθησης της αφής μειώνει τον ρεαλισμό και καθιστά την εμπύθιση μερική, δεδομένου ότι η ανθρώπινη αντίληψη είναι από τη φύση της πολυαισθητηριακή και διαδραστική.[9] Τα πολυαισθητηριακά περιβάλλοντα VR, όπου οι χρήστες βιώνουν όχι μόνο οπτικά αλλά και απτικά ερεθίσματα, προσφέρουν νέες δυνατότητες σε τομείς όπως το ηλεκτρονικό εμπόριο, η εκπαίδευση και τα ψηφιακά παιχνίδια. Στο ηλεκτρονικό εμπόριο, η ενσωμάτωση απτικών στοιχείων θα επιτρέψει στους καταναλωτές να αλληλεπιδρούν με προϊόντα σε τρισδιάστατη μορφή και να λαμβάνουν άμεση απτική ανατροφοδότηση, προσομοιώνοντας πολύ πιο πιστά τη φυσική εμπειρία και ενισχύοντας την εμπιστοσύνη τους.[9][10] Η υφή ενός αντικειμένου καθορίζεται από τα μικροδομικά χαρακτηριστικά της επιφάνειάς του, όπως η τραχύτητα και η κατανομή των λεπτομερειών σε διαφορετικές χωρικές συχνότητες. Η κίνηση μιας χειροκίνητης απτικής συσκευής πάνω σε μια επιφάνεια παράγει δονητικά σήματα, τα οποία εξαρτώνται τόσο από τον τρόπο κίνησης του χρήστη (ταχύτητα, πίεση, κατεύθυνση) όσο και από τις φυσικές ιδιότητες του υλικού. Αυτές οι δονήσεις είναι καθοριστικές για την ανθρώπινη αντίληψη της υφής, επηρεάζοντας τον τρόπο που αναγνωρίζονται και κατηγοριοποιούνται τα υλικά μέσω της αφής.[11][12] Για την αναπαράσταση απτικών εμπειριών προτείνονται δύο βασικές προσεγγίσεις: οι φυσικο-βασισμένες και οι μεθοδολογίες βασισμένες σε δεδομένα. Οι φυσικο-βασισμένες μέθοδοι προσπαθούν να αναπαραστήσουν με ακρίβεια την απτική εμπειρία, χρησιμοποιώντας πλήρη γνώση της γεωμετρίας και των φυσικών ιδιοτήτων του αντικειμένου. Ωστόσο, η εφαρμογή τους εκτός εργαστηρίου είναι δύσκολη, ενώ τα υπολογιστικά μοντέλα που απαιτούνται είναι ιδιαίτερα απαιτητικά, καθιστώντας δύσκολη τη χρήση τους σε πραγματικό χρόνο. Οι παραδοσιακές μέθοδοι βασισμένες σε δεδομένα επιτρέπουν λειτουργία σε πραγματικό χρόνο, αλλά συνήθως απαιτούν ξεχωριστό μοντέλο για κάθε τύπο υλικού, γεγονός που αυξάνει το κόστος σε χρόνο και πόρους και περιορίζει την επεκτασιμότητα σε ποικίλες υφές.[13] Επιπλέον, διαφορετικές επιφάνειες δημιουργούν ποικιλία δονήσεων στα δάκτυλα ή σε φορητές απτικές συσκευές, και η σχέση μεταξύ των δονήσεων, των ιδιοτήτων του υλικού και της κίνησης του χρήστη είναι πολύπλοκη και μη γραμμική, καθιστώντας την αξιόπιστη μοντελοποίηση ιδιαίτερα απαιτητική. Παρά τις εξελίξεις στην απτική τεχνολογία, η πιστή αναπαραγωγή υφών—όπως η τραχύτητα, η ομαλότητα και οι λεπτές απτικές λεπτομέρειες—παραμένει μια σημαντική πρόκληση, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για δονήσεις υψηλής συχνότητας και σύνθετες υφές. Οι τεχνικές όπως η απτική ανάδραση παλμών, οι ηλεκτροστατικές μέθοδοι και οι υπερηχητικές τεχνολογίες έχουν βελτιώσει την εμπειρία αφής, αλλά παρουσιάζουν περιορισμούς στην ακρίβεια και στην αναπαραγωγή λεπτομερειών. Οι νέες προσεγγίσεις με τεχνητή νοημοσύνη και βαθιά μάθηση προσφέρουν δυνατότητες για δυναμική, εξατομικευμένη απτική ανατροφοδότηση, όμως βρίσκονται ακόμα σε πειραματικό στάδιο. Επιπλέον, η ακριβής αναπαραγωγή

απτικών ιδιοτήτων σε εικονικά αντικείμενα μέσω haptic proxies παραμένει δύσκολη σε μεγάλης κλίμακας συστήματα, καθώς η πολυπλοκότητα αυξάνεται εκθετικά με την ποικιλία των αντικειμένων και των μοναδικών τους χαρακτηριστικών.

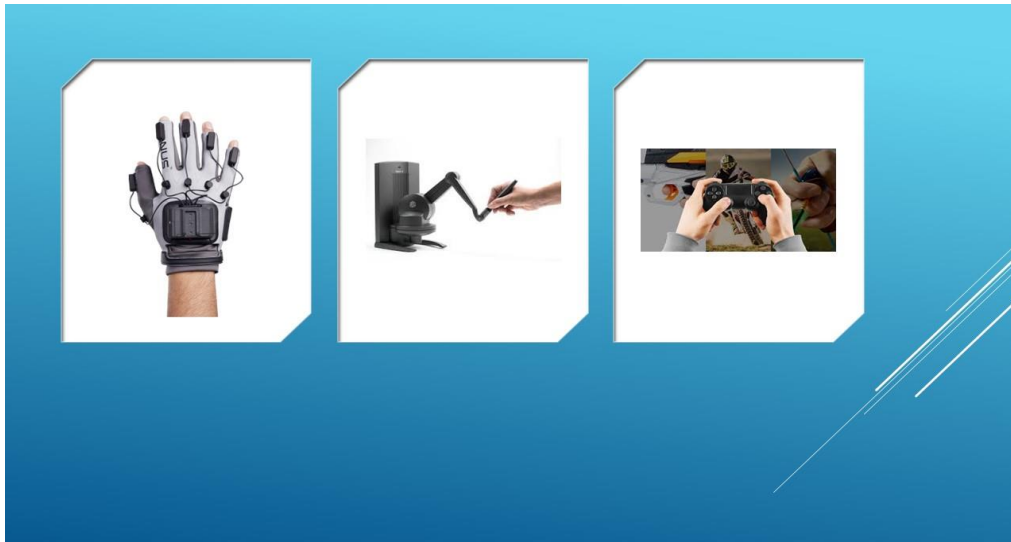
Πέρα από τις καθαρά τεχνικές προκλήσεις, η ανάπτυξη απτικών συστημάτων εγείρει και ζητήματα ανθρωποκεντρικού σχεδιασμού. Η ανθρώπινη απτική αντίληψη είναι υποκειμενική και εξαρτάται από παράγοντες όπως η ηλικία, η κατάσταση του δέρματος, η εμπειρία και οι προσδοκίες του χρήστη. Ένα σύστημα που θεωρείται ρεαλιστικό από έναν χρήστη μπορεί να γίνει αντιληπτό διαφορετικά από κάποιον άλλο. Ως εκ τούτου, ο σχεδιασμός απτικών εφαρμογών οφείλει να λαμβάνει υπόψη τη διακύμανση αυτή και, όπου είναι δυνατόν, να προσφέρει δυνατότητες εξατομίκευσης, ώστε η εμπειρία να προσαρμόζεται στις ανάγκες και τις ικανότητες κάθε χρήστη.[14]

Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον σκοπό της εφαρμογής. Για εφαρμογές που απαιτούν αντίληψη σχήματος, όγκου και αντίστασης, όπως η εικονική γλυπτική ή η χειρουργική προσομοίωση, ενδείκνυνται οι συσκευές δυναμικής ανάδρασης (force feedback). Αντίθετα, για εφαρμογές που στοχεύουν κυρίως στην ειδοποίηση ή στην απόδοση υφών, όπως τα κινητά τηλέφωνα ή τα φορετά συστήματα, επαρκούν συχνά οι απλούστερες τεχνολογίες δόνησης. Στην παρούσα εργασία, όπου το ζητούμενο είναι η ενεργητική καθοδήγηση της κίνησης του χεριού κατά τη γραφή, η επιλογή μιας συσκευής δυναμικής ανάδρασης με γραφίδα αποτελεί τη φυσική και τεχνικά ενδεδειγμένη λύση.[15]

Η δυναμική ανάδραση (force feedback), στην οποία ανήκει η συσκευή που αξιοποιήθηκε, βασίζεται στην αρχή ότι κάθε φυσική αλληλεπίδραση συνοδεύεται από ανταλλαγή δυνάμεων. Όταν ένα χέρι πιέζει μια επιφάνεια, η επιφάνεια ασκεί ίση και αντίθετη δύναμη στο χέρι· όταν το χέρι κινείται μέσα σε ένα παχύρρευστο υλικό, το υλικό αντιστέκεται στην κίνηση. Οι απτικές συσκευές δυναμικής ανάδρασης αναπαράγουν ακριβώς αυτές τις δυνάμεις αντίδρασης μέσω κινητήρων, δημιουργώντας στον χρήστη την ψευδαίσθηση ότι αλληλεπιδρά με πραγματικά, στερεά αντικείμενα. Η ποιότητα και η σταθερότητα της απτικής αλληλεπίδρασης επηρεάζονται, μεταξύ άλλων, από την ακρίβεια μέτρησης της θέσης, την ταχύτητα του βρόχου ελέγχου και τις δυνατότητες παραγωγής δύναμης της συσκευής. Ιδιαίτερα, υψηλός ρυθμός ανανέωσης του βρόχου force feedback είναι σημαντικός για τη σταθερότητα και την ποιότητα της απτικής αλληλεπίδρασης[16]

2.2 Συσκευές Αφής και Χρήσεις τους

Σήμερα έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνολογίες αφής που διευκολύνουν τα άτομα με προβλήματα όρασης να αλληλεπιδρούν με τον ψηφιακό κόσμο και να βελτιώνουν την καθημερινότητά τους. Παραδείγματα αποτελούν οι δυναμικές οθόνες Braille, οι απτικές ενδείξεις σε έξυπνα ρολόγια ή βραχιόλια για πλοήγηση και οι εφαρμογές κινητών που παρέχουν δονήσεις κατεύθυνσης. Έτσι, η αφή λειτουργεί ως βασικό κανάλι επικοινωνίας, αναπληρώνοντας σε σημαντικό βαθμό την απουσία οπτικών ερεθισμάτων. Η πρόοδος στην απτική αλληλεπίδραση δείχνει ότι η αίσθηση της αφής αποτελεί σημαντικό εργαλείο για την ενίσχυση της προσβασιμότητας και τη δημιουργία πιο φυσικών, εμπυθιστικών εμπειριών.[17] Συσκευές όπως τα γάντια απτικής ανάδρασης και οι χειριστήριες συσκευές με δύναμη ανάδρασης επιτρέπουν στους χρήστες να αντιλαμβάνονται υφές, πίεση ή θερμοκρασία εικονικών αντικειμένων και χρησιμοποιούνται όχι μόνο σε παιχνίδια και προσομοιώσεις, αλλά και σε τομείς όπως η ιατρική εκπαίδευση, η τηλεχειρουργική και ο έλεγχος ρομποτικών συστημάτων.



Εικόνα 4 Παραδείγματα απτικών συσκευών: απτικό γάντι, συσκευή τύπου γραφίδας (Geomagic Touch) και χειριστήριο κονσόλας [18]

2.2.1 Wearable Haptics

Η πρόοδος στα συστήματα εικονικής πραγματικότητας συνοδεύεται από την ανάγκη ανάπτυξης νέων μηχανισμών απτικής ανάδρασης. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση χρήστη που μετακινείται σε εκτεταμένο χώρο εργασίας, ενώ ταυτόχρονα δέχεται ελεγχόμενες δυνάμεις σε επιλεγμένες περιοχές του σώματος, όπως στο άνω άκρο ή στα δάχτυλα. Η αποτελεσματικότητα της αλληλεπίδρασης μεταξύ φυσικού και εικονικού περιβάλλοντος μέσω φορετών διεπαφών HMI εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των αμφίδρομων απτικών συστημάτων και από την ικανότητά τους να μεταδίδουν και να λαμβάνουν πληροφορία αφής σε πραγματικό χρόνο. Η διάδοση των τεχνολογιών εικονικής πραγματικότητας επέτρεψε στους χρήστες να χειρίζονται εικονικά αντικείμενα μέσω τρισδιάστατης απεικόνισης, γεγονός στο οποίο συνέβαλαν ουσιαστικά οι φορητές συσκευές VR, όπως τα Oculus Rift και HTC Vive.[19] Παράλληλα, οι εξελίξεις στην επιστήμη των υλικών οδήγησαν στην υλοποίηση νέων φορετών και εμφυτεύσιμων διατάξεων με εύκαμπτες και ελαστικές δομές, ικανές να εφάπτονται στο ανθρώπινο σώμα και να καταγράφουν με υψηλή ακρίβεια εξωτερικά ερεθίσματα. Τέτοιες διατάξεις μπορούν να λάβουν διαφορετικές μορφές, όπως επιφάνειες αφής, ζώνες καρπού, γιλέκα ή γάντια. Στο πλαίσιο αυτό, τα απτικά γάντια αποτελούν αντιπροσωπευτική κατηγορία φορετών συστημάτων. Συνήθως ενσωματώνουν αισθητήρες αφής, πίεσης ή κάμψης, ενώ τα τεχνολογικά τους χαρακτηριστικά καθορίζουν και τον προορισμό χρήσης. Διακρίνονται, για παράδειγμα, γάντια βασισμένα σε χειρονομίες (με χρήση σε εφαρμογές αποκατάστασης), γάντια επικεντρωμένα στην απτική επικοινωνία, καθώς και υβριδικές λύσεις που συνδυάζουν και τις δύο προσεγγίσεις, προσφέροντας ανώτερη διαδραστική εμπειρία. Επιπλέον, η ανάπτυξη ηλεκτρονικών δερμάτων ενισχύει τον σχεδιασμό «έξυπνων» γαντιών με αμφίδρομη λειτουργία, τα οποία ενσωματώνουν τόσο αισθητήρες αφής όσο και ενεργοποιητές απτικής ανάδρασης. Με βάση αυτή τη λογική έχουν παρουσιαστεί διάφορα εμπορικά συστήματα, όπως τα CyberGrasp, H-glove, Dexmo, HaptX, Plexus και Vrglun. [20]



Εικόνα 5 Απτικό γάντι HaptX σε συνδυασμό με κάσκα εικονικής πραγματικότητας (HTC Vive).[21]

2.2.2 Desktop Haptics

Οι εν λόγω διατάξεις κατατάσσονται στα συστήματα κιναισθητικής ανάδρασης. Αποτελούνται από αισθητήρες που καταγράφουν τις κινήσεις της γραφίδας την οποία χειρίζεται ο χρήστης, καθώς και από ενεργοποιητές —συνήθως ηλεκτροκινητήρες— οι οποίοι παράγουν τις δυνάμεις ανάδρασης κατά την αλληλεπίδραση με το εικονικό αντικείμενο. Η δύναμη που προκύπτει από την επαφή με άκαμπτα αντικείμενα υπολογίζεται συνήθως βάσει του μοντέλου ελατηρίου, ενώ στην περίπτωση παραμορφώσιμων αντικειμένων οι δυνάμεις προκύπτουν απευθείας από τις ιδιότητες παραμόρφωσης του εκάστοτε μοντέλου. Οι συσκευές απτικής ανάδρασης διακρίνονται σε παθητικές (συσκευές αντίστασης) και ενεργητικές. Οι πρώτες περιορίζουν κυρίως την κίνηση —όπως, για παράδειγμα, ένα τιμόνι σε παιχνίδι προσομοίωσης—, ενώ οι δεύτερες χρησιμοποιούν κινητήρες για να επιβάλουν κίνηση στο ανθρώπινο μέλος. Τα ενεργητικά συστήματα προσφέρουν ευρύτερες δυνατότητες προσομοίωσης, απαιτούν όμως συνεχή τροφοδοσία ισχύος, σε αντίθεση με τις παθητικές λύσεις που μπορούν να λειτουργούν χωρίς ενεργό έλεγχο. Ωστόσο, η πολυπλοκότητά τους είναι μεγαλύτερη, γεγονός που δυσχεραίνει τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία τους. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί μια επιτραπέζια συσκευή απτικής ανάδρασης: ένας ρομποτικός βραχίονας που φέρει γραφίδα, την οποία κρατά ο χρήστης. Η διάταξη αυτή καταγράφει την τροχιά της γραφίδας και ταυτόχρονα αποδίδει τις δυνάμεις ανάδρασης που αντιστοιχούν στην αλληλεπίδραση με το εικονικό περιβάλλον.

Στην κατηγορία αυτή ανήκει και η συσκευή Geomagic Touch της 3D Systems, η οποία αξιοποιήθηκε στην παρούσα εργασία και αναλύεται εκτενώς στο επόμενο κεφάλαιο. Η δημοφιλία των επιτραπέζιων συσκευών δυναμικής ανάδρασης οφείλεται στον συνδυασμό σχετικά προσιτού κόστους, ακρίβειας και ευκολίας ενσωμάτωσης σε λογισμικό, χαρακτηριστικά που τις καθιστούν κατάλληλες τόσο για ερευνητικές όσο και για εκπαιδευτικές εφαρμογές.[22]



Εικόνα 6 Χειριστήριο κονσόλας (PlayStation DualSense) με απτική ανάδραση δόνησης.

2.2.3 Surface Haptics

Τα συστήματα απτικής ανάδρασης έχουν ως σκοπό την τεχνητή ενεργοποίηση της αίσθησης αφής. Με βάση τον τρόπο διέγερσης των αισθητηριακών υποδοχέων, διακρίνονται τρεις κύριες κατηγορίες: οι διατάξεις που προκαλούν μηχανική παραμόρφωση στους υποδοχείς μέσω εξωτερικών κινήσεων, τα συστήματα που διεγείρουν άμεσα τις νευρικές ίνες με την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου και οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούν εστιασμένα υπερηχητικά κύματα για στοχευμένη απτική αίσθηση.

Πλήθος υλοποιήσεων βασίζεται σε δονήσεις, ηλεκτρικά ερεθίσματα, πίεση αέρα ή ακουστικά κύματα, με στόχο την αναπαράσταση της επαφής του χεριού με αντικείμενα του εικονικού περιβάλλοντος. Μέσω αυτών των συστημάτων, ο χρήστης μπορεί να αντιληφθεί χαρακτηριστικά όπως το περίγραμμα, η ανομοιομορφία ή η τραχύτητα μιας επιφάνειας. Στην απτική διερεύνηση δίνεται ιδιαίτερο βάρος σε ιδιότητες όπως η υφή, το σχήμα και η γεωμετρία της επιφάνειας.

Οι απτικές διεπαφές επιχειρούν να αναπαράγουν ερεθίσματα που φυσιολογικά καταγράφονται από τους δερματικούς υποδοχείς, όπως θερμικές μεταβολές, πίεση, τριβή, διάτρηση ή τραχύτητα. Συνήθως αποτελούνται από πίνακα μικροσκοπικών απτικών στοιχείων (ακίδων). Το πλήθος, η χωρική διάταξη και η συχνότητα ενεργοποίησής τους αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους σχεδιασμού· υψηλότερες τιμές οδηγούν σε πιο συνεχή και ρεαλιστική απτική εντύπωση.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η ανανεώσιμη οθόνη Braille, όπου ηλεκτρομηχανικοί μηχανισμοί ανυψώνουν και επαναφέρουν ακίδες μέσα από μια επίπεδη επιφάνεια, προβάλλοντας διαδοχικά τους χαρακτήρες ανάλογα με το ψηφιακό σήμα. Σε άλλο είδος συστημάτων, η ηλεκτροστατική απτική ανάδραση εφαρμόζει ελεγχόμενα ηλεκτρικά ερεθίσματα στις νευρικές απολήξεις του δέρματος, επιτυγχάνοντας ιδιαίτερα ρεαλιστική αίσθηση όταν ενσωματώνεται σε ειδικά γάντια ή στολές.

Επιπλέον, απτικές συσκευές εισόδου —όπως τα απτικά ποντίκια— διευκολύνουν την πρόσβαση χρηστών με μειωμένη όραση, παρέχοντας καθοδηγητική απτική πληροφορία στα δάχτυλα. Η προσέγγιση της υπερηχητικής απτικής ανάδρασης, αντιθέτως, δημιουργεί «πεδία» απτικής αίσθησης στον χώρο μέσω συνδυασμού πομπών υψηλής συχνότητας, επιτρέποντας την αντίληψη ερεθισμάτων χωρίς απευθείας επαφή με συσκευή. Παρά το πλεονέκτημα της απουσίας φορητού εξοπλισμού, οι λύσεις αυτές είναι συνήθως πιο δαπανηρές και προσφέρουν λιγότερο ρεαλιστική εμπειρία σε σχέση με τα δονητικά ή ηλεκτροστατικά συστήματα.[23]

2.2.4 Συγκριτική θεώρηση των κατηγοριών

Οι τρεις κατηγορίες απτικών συστημάτων που παρουσιάστηκαν —τα φορετά, τα επιτραπέζια και τα επιφανειακά— δεν ανταγωνίζονται αλλά συμπληρώνουν η μία την άλλη, καθώς η καθεμία εξυπηρετεί διαφορετικές ανάγκες. Τα φορετά συστήματα προσφέρουν ελευθερία κίνησης και είναι κατάλληλα για εμβυθιστικές εμπειρίες εικονικής πραγματικότητας, αλλά συνήθως αδυνατούν να αποδώσουν ισχυρές, κατευθυνόμενες δυνάμεις. Τα επιτραπέζια συστήματα δυναμικής ανάδρασης υπερέχουν στην απόδοση ακριβών δυνάμεων και στην αντίληψη σχήματος και αντίστασης, περιορίζονται όμως σε έναν σχετικά μικρό χώρο εργασίας. Τα επιφανειακά συστήματα, τέλος, είναι ιδανικά για την απόδοση υφών σε επίπεδες οθόνες αλλά δεν προσφέρουν τρισδιάστατη αλληλεπίδραση.

Για τον σκοπό της παρούσας εργασίας, δηλαδή την καθοδηγούμενη εξάσκηση στη γραφή, το κρίσιμο ζητούμενο είναι η δυνατότητα απόδοσης ελεγχόμενων δυνάμεων που κατευθύνουν το χέρι του χρήστη κατά μήκος μιας συγκεκριμένης διαδρομής. Το χαρακτηριστικό αυτό διαθέτουν κατεξοχήν οι επιτραπέζιες συσκευές δυναμικής ανάδρασης, γεγονός που δικαιολογεί την επιλογή της συσκευής Geomagic Touch.[24]



Εικόνα 7 Ποντίκι υπολογιστή με απτική ανάδραση (δόνηση).[24]

2.3 Απτική αλληλεπίδραση μέσω υπολογιστών (Computer Haptics)

Η απτική απόδοση αποτελεί μια ανερχόμενη ερευνητική περιοχή που ασχολείται με την ανάπτυξη αλγορίθμων και λογισμικού για την αναπαράσταση και απόδοση της αφής σε εικονικά περιβάλλοντα και αντικείμενα. Η υποπεριοχή αυτή περιλαμβάνει δύο βασικά στοιχεία: την οπτική και την απτική απόδοση. Η οπτική απόδοση χρησιμοποιεί αλγορίθμους και τεχνικές για τον υπολογισμό της συμπεριφοράς των γραφικών σε πραγματικό χρόνο, ενώ η απτική απόδοση αφορά στη δημιουργία και υπολογισμό δυνάμεων ως απόκριση στην αλληλεπίδραση του χρήστη με το εικονικό αντικείμενο.

Η απτική απόδοση περιλαμβάνει δυναμική και δερματική απόδοση, με τις συσκευές δυναμικής ανάδρασης να είναι ευρέως διαδεδομένες. Η ποιότητά της επηρεάζει άμεσα την αίσθηση ρεαλισμού, καθώς υψηλότερη απτική ακρίβεια οδηγεί σε πιο πειστική μίμηση του πραγματικού περιβάλλοντος. Για τη βελτίωση της χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι ανίχνευσης και απόκρισης σύγκρουσης, οι οποίοι εντοπίζουν συγκρούσεις μεταξύ του χρήστη και του εικονικού αντικειμένου και υπολογίζουν τις απαιτούμενες δυνάμεις που αποδίδονται μέσω της απτικής συσκευής.

Η ανάπτυξη αυτών των αλγορίθμων αντιμετωπίζει τρεις κύριες προκλήσεις. Η πρώτη αφορά τη μοντελοποίηση δυνάμεων: τα τρέχοντα μοντέλα συχνά βασίζονται σε απλοποιήσεις, όπως ο νόμος Hooke και το βάθος διεisdυσης, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη χαρακτηριστικά όπως σκληρότητα, ιξωδοελαστικότητα, ανομοιογένεια ή ανισοτροπία. Η δεύτερη πρόκληση σχετίζεται με τους βαθμούς ελευθερίας: αλγόριθμοι με περισσότερους βαθμούς ελευθερίας μπορούν να υποστηρίξουν πιο σύνθετες αλληλεπιδράσεις, αλλά αυξάνεται σημαντικά το υπολογιστικό κόστος για πραγματικό χρόνο. Η τρίτη πρόκληση είναι η φυσική προσομοίωση, όπου η χρήση εικονικών απτικών ανιχνευτών επιτρέπει την προσομοίωση των δυνάμεων και ροπών που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση, καθιστώντας κρίσιμη την ακρίβεια της προσομοίωσης για ρεαλιστική εμπειρία.

Ο όρος «απόδοση» στην απτική απόδοση αναφέρεται στη διαδικασία μεταφοράς του επιθυμητού ερεθίσματος στον χρήστη ώστε να παρέχεται πληροφορία για τις φυσικές ιδιότητες των αντικειμένων, όπως σχήμα, ελαστικότητα, μάζα και υφή. Η υφή αποτελεί το βασικό αντικείμενο ενδιαφέροντος της παρούσας έρευνας, καθιστώντας αναγκαία την θεωρητική της διερεύνηση, μετά από μια σύντομη αναφορά στις μεθόδους αναγνώρισης αντικειμένων.

Ένα ακόμη κρίσιμο ζήτημα της απτικής απόδοσης είναι η σταθερότητα του συστήματος. Επειδή η απτική συσκευή βρίσκεται σε συνεχή, αμφίδρομη αλληλεπίδραση με τον χρήστη, σφάλματα στον υπολογισμό των δυνάμεων ή καθυστερήσεις στην ανανέωση μπορούν να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητες ταλαντώσεις ή ακόμη και σε επικίνδυνες, απότομες κινήσεις της συσκευής. Για τον λόγο αυτό, οι αλγόριθμοι απτικής απόδοσης σχεδιάζονται ώστε να διασφαλίζουν παθητικότητα, δηλαδή να μην προσθέτουν ενέργεια στο σύστημα, εγγυώμενοι έτσι μια ασφαλή και προβλέψιμη συμπεριφορά. Στην περίπτωση μιας εκπαιδευτικής εφαρμογής που απευθύνεται σε ευάλωτες ομάδες, η σταθερότητα και η ασφάλεια αυτή αποκτούν ιδιαίτερη σημασία.[25]

2.3.1 Αλγόριθμοι ανίχνευσης και απόκρισης σύγκρουσης

Ο πυρήνας κάθε συστήματος απτικής απόδοσης είναι ο αλγόριθμος ανίχνευσης σύγκρουσης, ο οποίος καθορίζει πότε και πού η γραφίδα του χρήστη έρχεται σε επαφή με ένα εικονικό αντικείμενο. Στα πρώτα, απλά συστήματα, ο έλεγχος γινόταν με σύγκριση της θέσης του δείκτη με την επιφάνεια του αντικειμένου· αν ο δείκτης βρισκόταν κάτω από την επιφάνεια, θεωρούνταν ότι υπάρχει διεisdυση και αποδιδόταν δύναμη ανάλογη του βάθους της. Η προσέγγιση αυτή, ωστόσο, παρουσιάζει το πρόβλημα του «περάσματος διαμέσου» (pop-through), όπου σε λεπτά αντικείμενα ο δείκτης μπορεί να περάσει στην αντίθετη πλευρά και η δύναμη να αντιστραφεί λανθασμένα.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού αναπτύχθηκε η μέθοδος του «αντικειμένου-θεού» (god-object) ή του απτικού διαμεσολαβητή (proxy). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, εκτός από τη φυσική θέση της γραφίδας, το σύστημα διατηρεί και ένα εικονικό σημείο, τον διαμεσολαβητή, ο οποίος δεν επιτρέπεται ποτέ να διαπεράσει τις επιφάνειες των αντικειμένων. Όταν ο χρήστης πιέζει προς το εσωτερικό ενός αντικειμένου, ο διαμεσολαβητής παραμένει στην επιφάνεια, στο πλησιέστερο σημείο προς τη γραφίδα, και η δύναμη ανάδρασης υπολογίζεται ως ένα ελατήριο που συνδέει τη γραφίδα με τον διαμεσολαβητή. Η προσέγγιση αυτή παράγει σταθερή και ρεαλιστική αίσθηση επαφής, ακόμη και σε σύνθετες γεωμετρίες, και αποτελεί τη βάση των περισσότερων σύγχρονων βιβλιοθηκών απτικής απόδοσης, συμπεριλαμβανομένης της OpenHaptics που αξιοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

Η ποιότητα της απτικής απόδοσης εξαρτάται κρίσιμα από τον ρυθμό ανανέωσης του απτικού βρόχου. Ενώ για την οπτική απόδοση ένας ρυθμός 30 έως 60 καρέ ανά δευτερόλεπτο θεωρείται επαρκής, ο απτικός βρόχος πρέπει να εκτελείται με ρυθμό τουλάχιστον 1000 κύκλων ανά δευτερόλεπτο. Ο λόγος είναι ότι το ανθρώπινο απτικό σύστημα είναι εξαιρετικά ευαίσθητο σε ασυνέχειες και καθυστερήσεις:

μια επιφάνεια που ανανεώνεται με χαμηλό ρυθμό γίνεται αντιληπτή ως «μαλακή» ή «τρεμουλιαστή» αντί για στερεή. Η απαίτηση αυτή επιβάλλει την εκτέλεση του απτικού βρόχου σε ξεχωριστό νήμα υψηλής προτεραιότητας, ανεξάρτητο από τον βρόχο των γραφικών, γεγονός που αναλαμβάνουν οι βιβλιοθήκες όπως η OpenHaptics.

Ενδιαφέρον έχει η παρατήρηση ότι ο μηχανισμός της μαγνητικής καθοδήγησης που υλοποιήθηκε στην εφαρμογή στηρίζεται σε παρόμοια αρχή με εκείνη του απτικού διαμεσολαβητή: και στις δύο περιπτώσεις ορίζεται ένα σημείο-στόχος (το πλησιέστερο σημείο της διαδρομής) και η συσκευή ασκεί μια ελαστική δύναμη που έλκει τη γραφίδα προς αυτό. Η διαφορά είναι ότι, ενώ ο διαμεσολαβητής αποτρέπει τη διείσδυση σε αντικείμενα, η μαγνητική καθοδήγηση προσελκύει ενεργά τον χρήστη προς την επιθυμητή τροχιά, μετατρέποντας μια αρχή απόδοσης σε εργαλείο υποστήριξης της κίνησης.[26]

2.4 Αίσθηση αφής στο δέρμα

Στο δέρμα υπάρχουν τέσσερις τύποι απτικών αισθητήρων: τα σφαιρίδια Meissner (πλειοψηφία), οι δίσκοι Merkel, τα σφαιρίδια Pacinian και τα σφαιρίδια Ruffini. Όταν οι αισθητήρες αυτοί ερεθίζονται από κάποιο εξωτερικό παράγοντα, παράγουν μικρές ηλεκτρικές εκκενώσεις, οι οποίες τελικά ανιχνεύονται από τον εγκέφαλο. Οι αισθητήρες Merkel και Ruffini χαρακτηρίζονται ως αισθητήρες αργής προσαρμογής (ΑΠ), καθώς διατηρούν σταθερό ρυθμό εκκενώσεων για μεγάλα χρονικά διαστήματα σε απάντηση σε μια συνεχή δύναμη που εφαρμόζεται στο δέρμα.

Αντίθετα, οι αισθητήρες γρήγορης προσαρμογής (ΓΠ), Meissner και Pacinian, μειώνουν γρήγορα τον ρυθμό των εκκενώσεων τους, έτσι ώστε η σταθερή δύναμη να μην ανιχνεύεται. Αυτή η διαφοροποίηση επιτρέπει στους αισθητήρες να ανταποκρίνονται σε διαφορετικά είδη επαφής: οι ΓΠ αισθητήρες ανιχνεύουν επαφές με μεγάλες διακυμάνσεις, όπως δονήσεις στο δέρμα, ενώ οι ΑΠ αισθητήρες ενεργοποιούνται σε σχετικά σταθερές επαφές, όπως το συνεχές τράβηγμα του δέρματος.[27]

Συνεπώς, οι αισθητήρες Merkel και Ruffini είναι πιο ευαίσθητοι σε χαμηλές συχνότητες (0–10 Hz), ενώ οι Meissner και Pacinian ανταποκρίνονται σε υψηλές συχνότητες (50–300 Hz). Το δεκτικό πεδίο ενός αισθητήρα καθορίζει τη χωρική του ανάλυση: όσο μεγαλύτερο είναι το δεκτικό πεδίο, τόσο μικρότερη η χωρική ανάλυση. Η πυκνότητα των αισθητήρων στο δέρμα επηρεάζει επίσης τη χωρική ανάλυση· για παράδειγμα, στα ακροδάχτυλα, όπου η πυκνότητα είναι μέγιστη, δύο επαφές μπορούν να διακριθούν όταν απέχουν τουλάχιστον 2,5 mm, ενώ στην παλάμη δύο σημεία που απέχουν λιγότερο από 11 mm γίνονται αντιληπτά ως ένα.

Το απτικό σύστημα επιτρέπει επίσης στον οργανισμό να αντιλαμβάνεται τη θέση των μελών του σώματος (ιδιοδεκτικότητα) και την κίνηση (κιναισθησία). Αυτό πραγματοποιείται μέσω νευρικών απολήξεων, όπως τα σφαιρίδια Pacinian και Ruffini, που εντοπίζονται στις αρθρώσεις. Το πλάτος των εκκενώσεων ενός αισθητήρα εξαρτάται από τη θέση της άρθρωσης, ενώ η συχνότητα από την ταχύτητα της κίνησης. Η ακρίβεια με την οποία το σώμα μπορεί να τοποθετήσει τα άκρα του εξαρτάται από την ελάχιστη αλλαγή στη θέση της άρθρωσης που μπορεί να ανιχνευθεί.

Η κατανόηση της φυσιολογίας των μηχανοϋποδοχέων έχει άμεσες πρακτικές συνέπειες για τον σχεδιασμό απτικών συσκευών. Το γεγονός ότι οι υποδοχείς Pacinian ανταποκρίνονται σε υψηλές συχνότητες (έως και 300 Hz) εξηγεί γιατί οι δονητικές συσκευές λειτουργούν αποτελεσματικά σε αυτό το φάσμα, ενώ η ευαισθησία των υποδοχέων Merkel σε χαμηλές συχνότητες και σε στατική πίεση σχετίζεται με την αντίληψη σχήματος και ανάγλυφου. Ένα καλά σχεδιασμένο απτικό σύστημα οφείλει να λαμβάνει υπόψη αυτά τα χαρακτηριστικά, ώστε τα ερεθίσματα που παράγει να εμπίπτουν στο φάσμα ευαισθησίας των αντίστοιχων υποδοχέων και να γίνονται αντιληπτά με τον επιθυμητό τρόπο.[27]

Εξίσου σημαντική είναι η χωρική διακριτική ικανότητα του δέρματος, η οποία διαφέρει σημαντικά ανά περιοχή του σώματος. Το γεγονός ότι τα ακροδάχτυλα διαθέτουν την υψηλότερη πυκνότητα υποδοχέων εξηγεί γιατί οι περισσότερες απτικές συσκευές, συμπεριλαμβανομένης της συσκευής Touch, σχεδιάζονται ώστε η αλληλεπίδραση να γίνεται μέσω των δακτύλων ή μιας γραφίδας που κρατείται με τα δάκτυλα. Η περιοχή αυτή προσφέρει τη μέγιστη δυνατή ευαισθησία και ακρίβεια, μεγιστοποιώντας την ποιότητα της απτικής πληροφορίας που μπορεί να προσληφθεί.

Πέρα από τους μηχανοϋποδοχείς, η αντίληψη της αφής επηρεάζεται και από γνωστικούς παράγοντες, όπως η προσοχή, η προσδοκία και η προηγούμενη εμπειρία του χρήστη. Ο εγκέφαλος δεν καταγράφει παθητικά τα απτικά ερεθίσματα, αλλά τα ερμηνεύει ενεργά, συνδυάζοντάς τα με πληροφορίες από τις υπόλοιπες αισθήσεις και με τη γνώση για τον κόσμο. Το φαινόμενο αυτό, γνωστό ως πολυαισθητηριακή ολοκλήρωση, εξηγεί γιατί η ίδια απτική πληροφορία μπορεί να γίνει αντιληπτή διαφορετικά ανάλογα με το τι βλέπει ο χρήστης. Στην πράξη, αυτό σημαίνει ότι μια απτική εφαρμογή μπορεί να ενισχύσει την πειστικότητά της συνδυάζοντας την απτική ανάδραση με κατάλληλα οπτικά και ηχητικά ερεθίσματα, ακόμη και όταν η καθαρά απτική πληροφορία είναι περιορισμένη.

Η αρχή αυτή αξιοποιείται συνειδητά στην εφαρμογή που αναπτύχθηκε. Η αλλαγή χρώματος του γράμματος και η ηχητική επιβράβευση δεν λειτουργούν απλώς ως διακοσμητικά στοιχεία, αλλά ενισχύουν την απτική εμπειρία μέσω της πολυαισθητηριακής ολοκλήρωσης, καθιστώντας την καθοδήγηση σαφέστερη και την επιτυχία πιο ικανοποιητική για τον χρήστη.[27]

2.5 Αντίστοιχες μελέτες

Κατόπιν της βιβλιογραφικής διερεύνησης, διαπιστώθηκε ότι ο αριθμός των μελετών που ασχολούνται ειδικά με την αναγνώριση υφών σε εικονικά περιβάλλοντα παραμένει ιδιαίτερα περιορισμένος. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι ελάχιστες έρευνες που εντοπίστηκαν.

Στη μελέτη των Martínez, García, Molina, Martínez και González (2013) εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές μορφές απτικής ανάδρασης για την αναγνώριση υφών σε εικονικά περιβάλλοντα. Χρησιμοποιήθηκαν η συσκευή δυναμικής ανάδρασης Phantom, ένα ειδικά σχεδιασμένο γάντι απτικής δόνησης, καθώς και χαρτογραφικά πρωτότυπα. Οι συμμετέχοντες κλήθηκαν να αναγνωρίσουν δύο σύνολα μοτίβων: στο πρώτο, κάθε δείγμα αποτελούνταν από τέσσερις όμοιες γεωμετρικές μορφές, ενώ στο δεύτερο από οριζόντιες γραμμές με διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ τους. Η μελέτη συνέκρινε τις αποδόσεις της δυναμικής, της δερματικής και της δονητικής ανάδρασης, καταλήγοντας ότι η απτική δόνηση φαίνεται να αποτελεί την πιο αποδοτική προσέγγιση για τη διάκριση ορισμένων τύπων υφής. [28]

Στη μελέτη των Wu, Li, Liu, Song και Zhang (2015) διεξήχθη αρχικά ένα πιλοτικό πείραμα, στο οποίο δημιουργήθηκαν δώδεκα εικονικές υφές μέσω της συσκευής δυναμικής ανάδρασης Omni, με τρεις βαθμούς ελευθερίας. Οι υφές διαφοροποιήθηκαν μεταβάλλοντας τη χωρική περίοδο, το ύψος και τον συντελεστή ακαμψίας. Οι συμμετέχοντες, όλοι βλέποντες, αξιολόγησαν τις υφές και φάνηκε ότι χαρακτηριστικά όπως τραχύτητα, πυκνότητα, ομαλότητα και σκληρότητα λειτουργούν ως βασικοί δείκτες διάκρισης. Στο κύριο πείραμα, δεκαεννέα άτομα βαθμολόγησαν τις αντιληπτές διαφορές μεταξύ των υφών και εκτίμησαν το μέγεθος των χαρακτηριστικών τους. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η απτική αντίληψη υφών με δυναμική ανάδραση μπορεί να περιγραφεί σε δύο ή τρεις διαστάσεις, ενώ επίσης ότι οι διαφοροποιήσεις ανάμεσα σε πραγματικούς και εικονικούς χώρους αντανακλούν και διαφορές στις απτικές εμπειρίες των υφών. [29]

Οι μελέτες αυτές, παρά τους περιορισμούς τους, καταδεικνύουν μια σειρά από κοινές αρχές που είναι χρήσιμες για τον σχεδιασμό απτικών εφαρμογών. Πρώτον, η απτική αντίληψη είναι πολυδιάστατη, δηλαδή ο άνθρωπος αξιολογεί ταυτόχρονα πολλαπλά χαρακτηριστικά μιας επιφάνειας (τραχύτητα, σκληρότητα, πυκνότητα). Δεύτερον, η δυναμική ανάδραση αποδεικνύεται ιδιαίτερα αποτελεσματική για τη διάκριση γεωμετρικών χαρακτηριστικών, γεγονός που στηρίζει την επιλογή της για εφαρμογές που βασίζονται σε τροχιές, όπως η γραφή. Τρίτον, ο συνδυασμός όρασης και αφής βελτιώνει την αντίληψη σε σχέση με τη χρήση κάθε αίσθησης χωριστά, ενισχύοντας τη σκοπιμότητα του πολυαισθητηριακού σχεδιασμού.

Τέλος, οι Kang και Kim (2017) διερεύνησαν τον τρόπο με τον οποίο ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται την καμπυλότητα και τις μεταβολές υψής σε τρισδιάστατες εικονικές επιφάνειες, αξιοποιώντας τόσο το οπτικό όσο και το απτικό κανάλι. Στόχος τους ήταν η συλλογή δεδομένων αντίληψης που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν για σχεδιασμό τρισδιάστατων υδατοσήμεων ή τεχνικών συμπίεσης δεδομένων σε εικονικά περιβάλλοντα με πολυτροπική αλληλεπίδραση. Πραγματοποιήθηκαν δύο ψυχοφυσικά πειράματα για την εκτίμηση της διακριτότητας της καμπυλότητας και των ορίων ανίχνευσης αλλαγών υψής, υπό τρεις συνθήκες: μόνο όραση, μόνο αφή και συνδυασμός όρασης-αφής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αφή υπερέχει τόσο στη διάκριση καμπυλωμένων επιφανειών όσο και στην ανίχνευση μεταβολών υψής πάνω σε καμπύλες επιφάνειες. Παράλληλα, η ευαισθησία και των δύο αισθητηριακών καναλιών αυξάνεται γραμμικά όσο αυξάνεται ο βαθμός καμπυλότητας, ενώ όταν όραση και αφή συνυπάρχουν, η μία λειτουργεί αντισταθμιστικά προς την άλλη. [30]

Κοινό στοιχείο των παραπάνω μελετών, πέρα από το αντικείμενό τους (εικονικές υφές), είναι ότι οι συμμετέχοντες ήταν άτομα με φυσιολογική όραση. Συνεπώς, έρευνες που να εξετάζουν συνολικά την αναγνώριση υφών (πέρα από την τραχύτητα, η οποία έχει μελετηθεί ξεχωριστά) σε εικονικά περιβάλλοντα από άτομα με οπτική αναπηρία, φαίνεται να απουσιάζουν. Από τις τρεις μελέτες, μόνο η πρώτη παρουσιάζει στενότερη συνάφεια με την παρούσα εργασία, καθώς εστιάζει στην αναγνώριση υφών βασιζμένων σε επαναλαμβανόμενα μοτίβα. Παρ' όλα αυτά, το πλήθος των υφών που εξετάστηκαν ήταν περιορισμένο, δεν υπήρχε μεγάλη ποικιλία και η αναγνώριση πραγματοποιούνταν αποκλειστικά σε οριζόντιο επίπεδο, γεγονός που δυσχεραίνει τη γενίκευση των αποτελεσμάτων. Ως εκ τούτου, αναδεικνύεται σημαντικό ερευνητικό κενό και καθίσταται απαραίτητη η περαιτέρω διερεύνηση του θέματος σε πληθυσμούς με οπτική αναπηρία. [30]

2.6 Απτική τεχνολογία στην αποκατάσταση και την κινητική μάθηση

Πέρα από την αναγνώριση υφών, ένα ραγδαία αναπτυσσόμενο πεδίο εφαρμογής της απτικής τεχνολογίας είναι η κινητική αποκατάσταση και η υποστήριξη της κινητικής μάθησης. Η βασική ιδέα είναι ότι η απτική ανάδραση δύναμης μπορεί να λειτουργήσει ως εξωτερικός «δάσκαλος» της κίνησης, καθοδηγώντας τον ασκούμενο κατά μήκος μιας επιθυμητής τροχιάς και παρέχοντάς του άμεση, σωματική πληροφορία για το σφάλμα της κίνησής του. Η προσέγγιση αυτή, γνωστή ως απτική καθοδήγηση (haptic guidance), έχει μελετηθεί εκτενώς σε εργασίες όπως η εκμάθηση χειρισμών σε χειρουργικές προσομοιώσεις, η αποκατάσταση μετά από εγκεφαλικό επεισόδιο και η εκμάθηση δεξιοτήτων γραφής. [31]

Οι μηχανισμοί απτικής καθοδήγησης διακρίνονται συνήθως σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη, τη λεγόμενη καθοδήγηση με ενίσχυση (assistive guidance), η συσκευή βοηθά ενεργά τον χρήστη να

ακολουθήσει τη σωστή τροχιά, ασκώντας δυνάμεις που τον οδηγούν προς τη σωστή κατεύθυνση. Στη δεύτερη, την καθοδήγηση με αντίσταση (resistive ή error-augmenting guidance), η συσκευή αυξάνει τεχνητά το σφάλμα, αναγκάζοντας τον χρήστη να το διορθώσει και ενισχύοντας έτσι τη μάθηση. Η πρώτη προσέγγιση είναι καταλληλότερη για αρχάριους ή για άτομα με σοβαρές κινητικές δυσκολίες, καθώς μειώνει το φορτίο και προσφέρει αίσθημα επιτυχίας, ενώ η δεύτερη ταιριάζει σε πιο προχωρημένα στάδια εκπαίδευσης.

Στην εφαρμογή που αναπτύχθηκε υιοθετείται η προσέγγιση της υποστηρικτικής καθοδήγησης, μέσω ενός «μαγνητικού» πεδίου δυνάμεων που έλκει τη γραφίδα προς τη διαδρομή του γράμματος. Η επιλογή αυτή είναι συνεπής με τον στόχο της εφαρμογής, δηλαδή την υποστήριξη ατόμων με δυσκολίες λεπτής κινητικότητας, για τα οποία η ενεργητική βοήθεια στη διατήρηση της τροχιάς είναι πιο ωφέλιμη από την τεχνητή αύξηση της δυσκολίας. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των συστημάτων απτικής καθοδήγησης είναι επίσης η δυνατότητα σταδιακής μείωσης της βοήθειας (fading), καθώς ο χρήστης βελτιώνεται, ώστε τελικά να μπορεί να εκτελεί την κίνηση αυτόνομα. [31]

2.7 Πολυαισθητηριακή ανάδραση και μάθηση

Η αποτελεσματικότητα των εκπαιδευτικών εφαρμογών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τρόπο με τον οποίο παρουσιάζεται η πληροφορία στον χρήστη. Η θεωρία της πολυαισθητηριακής μάθησης υποστηρίζει ότι η ταυτόχρονη διέγερση περισσότερων της μίας αισθήσεων ενισχύει την πρόσληψη, την κατανόηση και τη διατήρηση της γνώσης, καθώς η πληροφορία κωδικοποιείται σε πολλαπλά αισθητηριακά κανάλια. Στο πλαίσιο μιας εφαρμογής εξάσκησης στη γραφή, ο συνδυασμός οπτικής (χρωματική ένδειξη προόδου), ηχητικής (ηχητική επιβράβευση) και απτικής (καθοδήγηση και δόνηση) ανάδρασης αναμένεται να λειτουργεί συνεργατικά, ενισχύοντας τόσο τη μάθηση όσο και το κίνητρο του χρήστη.

Παράλληλα, η άμεση και σαφής ανάδραση επιτυχίας διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη διατήρηση του κινήτρου, ιδίως σε εύλωτες ομάδες χρηστών που ενδέχεται να αποθαρρύνονται εύκολα από την επαναλαμβανόμενη εξάσκηση. Στοιχεία «παιχνιδοποίησης» (gamification), όπως η καταγραφή του χρόνου, η αποθήκευση του καλύτερου χρόνου και η οπτική και ηχητική επιβράβευση, μετατρέπουν την άσκηση από μια μονότονη υποχρέωση σε μια ευχάριστη και ενθαρρυντική εμπειρία. Η φιλοσοφία αυτή διαπερνά τον σχεδιασμό της εφαρμογής που παρουσιάζεται στο τέταρτο κεφάλαιο.[32]

2.8 Απτική τεχνολογία σε εικονική και επαυξημένη πραγματικότητα

Η ραγδαία εξάπλωση των συστημάτων εικονικής (Virtual Reality, VR) και επαυξημένης (Augmented Reality, AR) πραγματικότητας κατά την τελευταία δεκαετία έδωσε νέα ώθηση στην απτική τεχνολογία. Στα περιβάλλοντα αυτά, ο χρήστης βυθίζεται σε έναν ψηφιακό κόσμο τον οποίο βλέπει και ακούει με μεγάλη πιστότητα, όμως η απουσία της αφής δημιουργεί μια αισθητή ασυμφωνία: τα αντικείμενα φαίνονται πραγματικά, αλλά το χέρι περνά μέσα από αυτά χωρίς αντίσταση. Η απτική ανάδραση

καλείται να γεφυρώσει αυτό το χάσμα, αποδίδοντας στον χρήστη την αίσθηση της υλικής υπόστασης των εικονικών αντικειμένων και ολοκληρώνοντας έτσι την εμπειρία εμπύθισης.

Οι εφαρμογές του συνδυασμού VR και απτικής τεχνολογίας είναι πολυάριθμες. Στην ιατρική, οι απτικοί προσομοιωτές επιτρέπουν στους εκπαιδευόμενους χειρουργούς να εξασκούνται σε επεμβάσεις χωρίς κίνδυνο για ασθενείς, νιώθοντας την αντίσταση των ιστών. Στη βιομηχανία, η εικονική συναρμολόγηση με απτική ανάδραση επιτρέπει τον έλεγχο της συναρμολόγης εξαρτημάτων πριν από την κατασκευή τους. Στην εκπαίδευση, τέλος, τα απτικά περιβάλλοντα προσφέρουν διαδραστικές εμπειρίες μάθησης, όπου οι μαθητές μπορούν να «αγγίξουν» αφηρημένες έννοιες, όπως μαγνητικά πεδία ή μοριακές δομές. Η παρούσα εργασία αξιοποιεί την ίδια βασική αρχή —τον συνδυασμό ενός τρισδιάστατου εικονικού περιβάλλοντος με απτική ανάδραση— στο πλαίσιο μιας εκπαιδευτικής εφαρμογής προσανατολισμένης στην προσβασιμότητα.

Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι η εφαρμογή που αναπτύχθηκε δεν κάνει χρήση κράνους εικονικής πραγματικότητας, αλλά προβάλλεται σε συμβατική οθόνη υπολογιστή. Η επιλογή αυτή είναι συνειδητή και εξυπηρετεί τον στόχο της προσβασιμότητας: ένα κράνος VR θα πρόσθετε κόστος, πολυπλοκότητα και πιθανή δυσφορία, στοιχεία ανεπιθύμητα για την ομάδα-στόχο. Η προβολή σε οθόνη, σε συνδυασμό με τη σταθερή μετωπική θέαση και την απτική καθοδήγηση, προσφέρει μια εμπειρία που είναι ταυτόχρονα εμπυθιστική στο απαραίτητο βαθμό και απλή στη χρήση.[33]

2.9 Παθοφυσιολογία και Προφίλ Χρηστών με Προβλήματα Λεπτής Κινητικότητας

Τα προβλήματα λεπτής κινητικότητας αφορούν τη δυσκολία εκτέλεσης κινήσεων που απαιτούν ακρίβεια, συντονισμό και λεπτό έλεγχο των μυών, ιδιαίτερα στα άνω άκρα και στα χέρια. Μπορεί να εμφανιστούν ως αποτέλεσμα νευρολογικών, μυοσκελετικών ή αναπτυξιακών διαταραχών, όπως η νόσος του Parkinson, η εγκεφαλική παράλυση, το εγκεφαλικό επεισόδιο, η σκλήρυνση κατά πλάκας ή τραυματισμοί των άνω άκρων.

Οι χρήστες με τέτοιου είδους δυσκολίες μπορεί να παρουσιάζουν μειωμένη δύναμη και ακρίβεια, τρόμο, μυϊκή δυσκαμψία, ακούσιες κινήσεις ή δυσκολία στον συντονισμό χεριού-ματιού. Οι περιορισμοί αυτοί μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά καθημερινές δραστηριότητες, όπως η γραφή, η χρήση εργαλείων, το κούμπωμα ρούχων και ο χειρισμός μικρών αντικειμένων. Για τον σχεδιασμό κατάλληλων βοηθητικών τεχνολογιών είναι, επομένως, σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη οι διαφορετικές ανάγκες, οι κινητικές ικανότητες και το επίπεδο αυτονομίας κάθε χρήστη.[34]

2.9.1 Εισαγωγή στις Κινητικές Διαταραχές

Η λεπτή κινητικότητα (fine motor skills) απαιτεί τον ακριβή συντονισμό του νευρικού συστήματος και των μικρών μυϊκών ομάδων, κυρίως των χεριών και των δακτύλων. Στο πλαίσιο της αλληλεπίδρασης ανθρώπου-υπολογιστή (HCI), η δυσλειτουργία της λεπτής κινητικότητας δημιουργεί σημαντικά

εμπόδια στη χρήση συμβατικών διεπαφών, όπως το ποντίκι, το πληκτρολόγιο ή οι οθόνες αφής. Οι αιτιολογίες αυτών των διαταραχών ποικίλλουν, χωριζόμενες κυρίως σε νευρολογικές και μυοσκελετικές.[35]

2.9.2 Νευρολογικές Παθήσεις και Επίδραση στη Διεπαφή

- **Νόσος του Parkinson:** Χαρακτηρίζεται από τον τρόμο ηρεμίας (resting tremor), τη βραδυκινησία και τη μυϊκή δυσκαμψία. Σε επίπεδο HCI, ο τρόμος δυσκολεύει τη σταθεροποίηση του κέρσορα σε έναν στόχο, οδηγώντας σε υψηλό ποσοστό λανθασμένων κλικ (miss-clicks) ή αδυναμία εκτέλεσης λειτουργιών "drag-and-drop".
- **Εγκεφαλική Παράλυση (Cerebral Palsy) και Σπαστικότητα:** Οι χρήστες παρουσιάζουν απότομες, μη ηθελημένες μυϊκές συσπάσεις και έλλειψη συντονισμού. Η εφαρμογή μιας σταθερής δύναμης (π.χ. παρατεταμένο πάτημα ενός πλήκτρου) καθίσταται εξαιρετικά δύσκολη.
- **Αγγειακό Εγκεφαλικό Επεισόδιο (Stroke):** Οδηγεί συχνά σε ημιπάρεση. Ο χρήστης μπορεί να παρουσιάσει σοβαρή μυϊκή αδυναμία στο ένα άνω άκρο, μειώνοντας την ικανότητα άσκησης πίεσης σε οθόνες αφής ή συμβατικούς διακόπτες.[36]

2.9.3 Μυοσκελετικές Παθήσεις

Ασθένειες όπως η ρευματοειδής αρθρίτιδα ή το σύνδρομο καρπιαίου σωλήνα προκαλούν πόνο, φλεγμονή και περιορισμένο εύρος κίνησης (Range of Motion - RoM). Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι απτικές διεπαφές δεν πρέπει να απαιτούν μεγάλες γωνιακές μετατοπίσεις των αρθρώσεων ή εφαρμογή μεγάλης δύναμης.[37]

2.9.4 Ο Ρόλος της Ιδιοδεκτικότητας και η Αισθητηριακή Υποκατάσταση

Η ιδιοδεκτικότητα (proprioception) είναι η ικανότητα του οργανισμού να αντιλαμβάνεται τη θέση των μελών του στον χώρο. Σε πολλές νευρολογικές παθήσεις, αυτή η αίσθηση διαταράσσεται. Η απτική ανάδραση (haptic feedback) λειτουργεί ως μηχανισμός «αισθητηριακής υποκατάστασης» (sensory substitution). Όταν το οπτικό ή το ιδιοδεκτικό σύστημα υπολειτουργεί, η συσκευή παρέχει ερεθίσματα (π.χ. δόνηση) που επιβεβαιώνουν στο χρήστη ότι το δάχτυλό του άγγιξε τον στόχο, μειώνοντας το γνωστικό φορτίο και την αβεβαιότητα.[38]

2.10 Κατηγορίες και Μηχανισμοί Απτικών Τεχνολογιών (Hardware)

Η επιστήμη των απτικών διεπαφών χωρίζεται σε δύο θεμελιώδεις άξονες, ανάλογα με τους υποδοχείς του ανθρώπινου σώματος που διεγείρει: την κιναισθητική και τη δερματική (απτική) ανάδραση.

2.10.1 Κιναισθητική Ανάδραση (Kinesthetic / Force Feedback)

Αυτού του είδους οι διεπαφές αλληλεπιδρούν με τους μύες, τους τένοντες και τις αρθρώσεις, εφαρμόζοντας μακροσκοπικές δυνάμεις.

- Μηχανισμός Λειτουργίας: Αποτελούνται συνήθως από ρομποτικούς βραχίονες, εξωσκελετικά συστήματα (exoskeletons) ή συσκευές γραφείου (όπως η συσκευή PHANTOM).
- Εφαρμογή στην αποκατάσταση: Μπορούν να προγραμματιστούν με αλγορίθμους «ενεργής απόσβεσης» (active damping). Για έναν χρήστη με τρόμο (tremor), η συσκευή αντιλαμβάνεται τη συχνότητα του τρόμου και ασκεί αντίρροπη δύναμη (αντίσταση) που τον αποσβένει, επιτρέποντας στον χρήστη να κάνει μια ομαλή κίνηση στην οθόνη.[39]

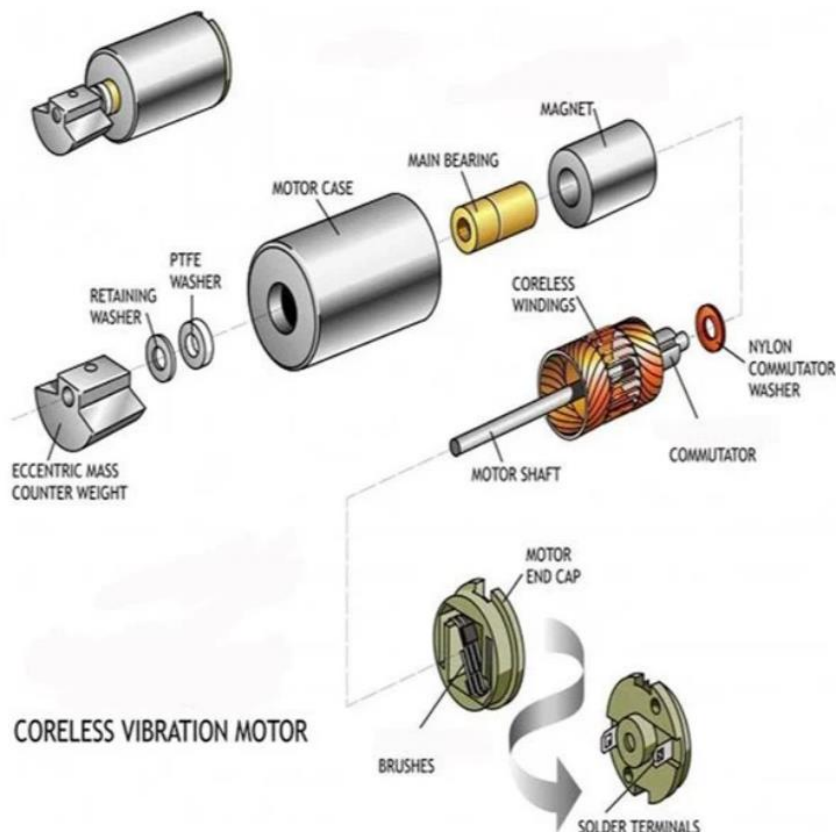
2.10.2 Δερματική Ανάδραση (Cutaneous / Tactile Feedback)

Η δερματική ανάδραση στοχεύει στους μηχανοϋποδοχείς (mechanoreceptors) κάτω από το δέρμα, όπως τα σωμάτια Pacini (υπεύθυνα για τους κραδασμούς) και τα σωμάτια Meissner (υπεύθυνα για την υφή).

2.10.3 Τύποι Ενεργοποιητών (Actuators)

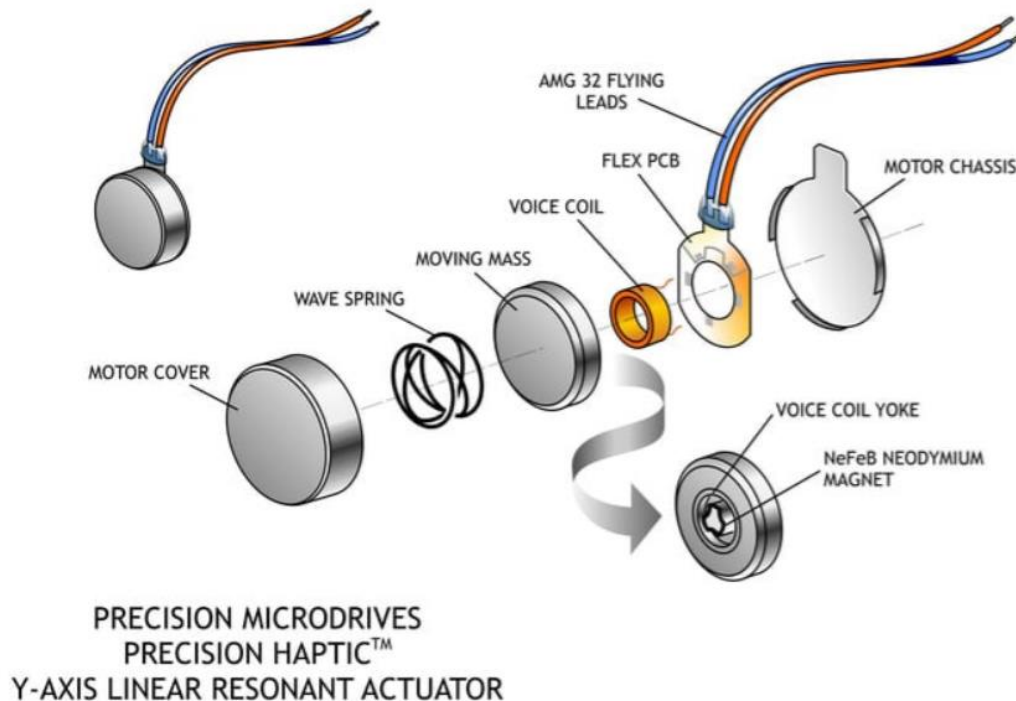
Η επιλογή του σωστού ενεργοποιητή είναι κρίσιμη για τη δημιουργία της διεπαφής:

1. Eccentric Rotating Mass (ERM): Κινητήρες συνεχούς ρεύματος με έκκεντρη μάζα. Είναι φθηνοί και παράγουν έντονη δόνηση, αλλά έχουν αργό χρόνο απόκρισης. Δεν ενδείκνυνται για άτομα που χρειάζονται ακαριαία επιβεβαίωση (crisp feedback), διότι η αργή εκκίνηση/σταμάτημα μπορεί να προκαλέσει σύγχυση. [40]



Εικόνα 8 Αρχιτεκτονική κινητήρα ERM[40]

2. Linear Resonant Actuators (LRA): Βασίζονται σε ένα σύστημα μάζας-ελατηρίου που ταλαντώνεται μαγνητικά. Προσφέρουν πολύ ταχύτερους χρόνους απόκρισης από τους ERM και είναι ιδανικοί για την προσομοίωση της αίσθησης του «κλικ» (button click simulation) για χρήστες που δεν μπορούν να πιάσουν ένα φυσικό κουμπί.



Εικόνα 9 Αρχιτεκτονική κινητήρα LRA[40]

3. **Πιεζοηλεκτρικοί Ενεργοποιητές (Piezoelectric):** Προσφέρουν υψηλή ακρίβεια και μπορούν να αναπαράγουν σύνθετες κυματομορφές (π.χ. υφές, επιφάνειες με τραχύτητα). Για έναν χρήστη με μειωμένη αίσθηση αφής, οι πιεζοηλεκτρικές οθόνες μπορούν να "παράγουν" την αίσθηση ενός 3D αντικειμένου πάνω σε μια επίπεδη 2D γυάλινη οθόνη, βοηθώντας τον να πλοηγηθεί χωρίς να την κοιτάει.
4. **Μαλακή Ρομποτική (Soft Robotics) και Πνευματικά Συστήματα:** Νέες τάσεις που χρησιμοποιούν θαλάμους πεπιεσμένου αέρα (pneumatic actuators) ή κράματα μνήμης σχήματος (Shape Memory Alloys) ενσωματωμένα σε έξυπνα γάντια. Αυτά δεν περιορίζουν καθόλου το ήδη μειωμένο εύρος κίνησης του ασθενούς.[40]

2.11 Αρχές Σχεδιασμού (User-Centered Design) για AMEA

Ο σχεδιασμός απτικών διεπαφών για άτομα με προβλήματα λεπτής κινητικότητας απαιτεί ριζική απομάκρυνση από τα πρότυπα που ισχύουν για αρτιμελείς χρήστες.

2.11.1 Προσαρμοστικότητα (Adaptability) και Μηχανική Μάθηση

Η ικανότητα ενός ασθενούς (π.χ. με Πάρκινσον ή Σκλήρυνση κατά Πλάκας) μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας ανάλογα με την κόπωση ή τη φαρμακευτική αγωγή. Το σύστημα πρέπει να είναι δυναμικό (adaptive). Ενσωματώνοντας φίλτρα Kalman και αλγορίθμους μηχανικής μάθησης, η διεπαφή μπορεί να αναλύει τα μοτίβα κίνησης σε πραγματικό χρόνο:

- Αν εντοπιστεί αύξηση της αστάθειας, το σύστημα αυξάνει την υποβοήθηση (force feedback) ή την ένταση της απτικής επιβεβαίωσης.
- Μειώνει τον «θόρυβο» των ακούσιων κινήσεων πριν αυτές μεταφραστούν σε κίνηση του κέρσορα.[41]

2.11.2 Εργονομία και Μείωση Γνωστικού/Φυσικού Φορτίου

- **Βάρος Συσκευών (Wearables):** Η τοποθέτηση κινητήρων ERM/LRA στα δάχτυλα αυξάνει την αδράνεια. Για άτομα με μυϊκή αδυναμία, αυτό προκαλεί ταχεία κόπωση. Οι σχεδιαστές πρέπει να ακολουθούν την αρχή της ελαχιστοποίησης μάζας στο απομακρυσμένο άκρο (distal end) και μεταφοράς του βάρους στους βραχίονες.
- **Πολυτροπικότητα (Multimodal Interaction):** Η απτική ανάδραση δεν πρέπει να λειτουργεί μεμονωμένα. Ο συνδυασμός ενός ηχητικού σήματος με μια δόνηση μειώνει δραματικά το γνωστικό φορτίο και τους χρόνους αντίδρασης, διευκολύνοντας την ομαλή εκτέλεση της εργασίας.[42]

2.12 Μεθοδολογία Αξιολόγησης και Μετρικές Απόδοσης

Η απόδειξη της αποτελεσματικότητας μιας απτικής διεπαφής απαιτεί τη διενέργεια πειραμάτων με ανθρώπους (human-in-the-loop) και τη χρήση αυστηρών μετρικών. Οι μετρικές αυτές διακρίνονται σε ποσοτικές και ποιοτικές.

2.12.1 Ποσοτικές Μετρικές (Quantitative Metrics)

- **Χρόνος Ολοκλήρωσης Εργασίας (Task Completion Time - TCT):** Ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για να ολοκληρώσει ο χρήστης μια δράση (π.χ. μετακίνηση κέρσορα και κλικ σε ένα εικονίδιο).
- **Ποσοστό Σφαλμάτων (Error Rate):** Το ποσοστό των κλικ που έγιναν εκτός του επιθυμητού στόχου. Για άτομα με σπαστικότητα, ο στόχος είναι η απτική ανάδραση να «συγκρατεί» τον κέρσορα πάνω στον στόχο, μειώνοντας αυτό το ποσοστό.
- **Ο Νόμος του Fitts (Fitts's Law) στην Αποκατάσταση:** Ο νόμος του Fitts αποτελεί το θεμέλιο της αλληλεπίδρασης HCI. Ορίζει ότι ο χρόνος που απαιτείται για τη μετάβαση σε μια περιοχή στόχο, είναι συνάρτηση της απόστασης προς τον στόχο και του μεγέθους του στόχου. Στην περίπτωση ατόμων με κινητικά προβλήματα, οι συντελεστές του Νόμου του Fitts μεταβάλλονται δραματικά. Η εισαγωγή της απτικής ανάδρασης στοχεύει θεωρητικά στη "διεύρυνση" του εικονικού μεγέθους του στόχου (virtual target expansion), κάνοντας τους στόχους πιο "ελκυστικούς" (haptic gravity wells), αυξάνοντας έτσι τη ροή της πληροφορίας (Throughput).[43]

2.12.2 Ποιοτικές Μετρικές (Qualitative Metrics)

Η υποκειμενική αντίληψη του χρήστη είναι εξίσου σημαντική, καθώς αν ένα σύστημα είναι κουραστικό, θα απορριφθεί.

- **Κλίμακα Ευχρηστίας Συστήματος (System Usability Scale - SUS):** Ένα σταθμισμένο ερωτηματολόγιο 10 ερωτήσεων που παρέχει μια συνολική βαθμολογία από το 0 έως το 100 για τη συνολική εμπειρία χρήσης.
- **Δείκτης Φόρτου Εργασίας NASA-TLX (Task Load Index):** Αξιολογεί τον φόρτο εργασίας σε 6 διαστάσεις: Νοητική απαίτηση, Σωματική απαίτηση, Χρονική απαίτηση, Απόδοση, Προσπάθεια και Απογοήτευση/Εκνευρισμός (Frustration). Στα άτομα με κινητικές δυσκολίες, η μείωση του δείκτη "Απογοήτευσης" είναι το σημαντικότερο κριτήριο επιτυχίας μιας απτικής διεπαφής.[44]

2.13 Επίλογος

Συνοψίζοντας, η παρούσα εργασία ανέδειξε τη σημαντική συμβολή της απτικής τεχνολογίας στην ανάπτυξη προσβάσιμων και διαδραστικών εφαρμογών, με ιδιαίτερη έμφαση στην υποστήριξη της λεπτής κινητικότητας και της κινητικής μάθησης. Η μελέτη των διαφορετικών κατηγοριών απτικών συστημάτων έδειξε ότι οι επιτραπέζιες συσκευές δυναμικής ανάδρασης είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για εφαρμογές στις οποίες απαιτείται ακριβής καθοδήγηση της κίνησης, όπως η εξάσκηση στη γραφή. Για τον λόγο αυτό, η αξιοποίηση της συσκευής Geomagic Touch αποτέλεσε μια κατάλληλη επιλογή για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εφαρμογής.

Παράλληλα, η διερεύνηση της ανθρώπινης αίσθησης της αφής και της λειτουργίας των μηχανοϋποδοχέων ανέδειξε τη σημασία της σωστής σχεδίασης των απτικών ερεθισμάτων. Η απτική πληροφορία, σε συνδυασμό με την οπτική και την ηχητική ανάδραση, μπορεί να δημιουργήσει ένα πιο ολοκληρωμένο και κατανοητό περιβάλλον αλληλεπίδρασης. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε εκπαιδευτικές εφαρμογές, όπου η άμεση ανατροφοδότηση μπορεί να ενισχύσει τόσο τη διαδικασία μάθησης όσο και το κίνητρο του χρήστη.

Ιδιαίτερη σημασία έχει επίσης η εφαρμογή της απτικής καθοδήγησης σε χρήστες με προβλήματα λεπτής κινητικότητας. Οι δυσκολίες που σχετίζονται με τον τρόπο, τη μυϊκή δυσκαμψία, τη μειωμένη δύναμη ή τον περιορισμένο συντονισμό μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την εκτέλεση καθημερινών δραστηριοτήτων, όπως η γραφή. Η δυνατότητα της απτικής συσκευής να καθοδηγεί ενεργά τη γραφίδα κατά μήκος μιας επιθυμητής τροχιάς δημιουργεί ένα σημαντικό εργαλείο υποστήριξης της κίνησης.

Τέλος, η βιβλιογραφική διερεύνηση ανέδειξε ότι, παρά την πρόοδο στον χώρο των απτικών τεχνολογιών, εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικά περιθώρια για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη εφαρμογών που να ανταποκρίνονται στις εξατομικευμένες ανάγκες διαφορετικών ομάδων χρηστών. Η παρούσα εργασία εντάσσεται σε αυτή την κατεύθυνση, αξιοποιώντας την απτική ανάδραση όχι μόνο ως μέσο ενίσχυσης του ρεαλισμού, αλλά ως ενεργό μηχανισμό υποστήριξης και εκμάθησης της κίνησης.

Η συνδυασμένη χρήση απτικής, οπτικής και ηχητικής ανάδρασης μπορεί να αποτελέσει τη βάση για μελλοντικές, περισσότερο εξατομικευμένες και προσβάσιμες εφαρμογές αποκατάστασης και εκπαίδευσης.

Κεφάλαιο 3ο: Συσκευή Geomagic touch

Το κεφάλαιο αυτό επικεντρώνεται στη συσκευή Geomagic Touch, η οποία αξιοποιήθηκε για την υλοποίηση της εφαρμογής. Παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά και η αρχή λειτουργίας της, οι κυριότερες χρήσεις της, η διαδικασία εγκατάστασης και οι οδηγοί (drivers), καθώς και τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά της.

3.1 Εισαγωγή

Οι απτικές συσκευές της εταιρείας 3D Systems προσφέρουν πραγματική τρισδιάστατη πλοήγηση και απτική ανάδραση, ενσωματώνοντας την αίσθηση της αφής στα λογισμικά τρισδιάστατης μοντελοποίησης Geomagic Freeform και Geomagic Sculpt, καθώς και σε πλήθος ερευνητικών και εμπορικών εφαρμογών. Οι συσκευές αυτές διαθέτουν τη δυνατότητα ακριβούς καταγραφής της τρισδιάστατης χωρικής θέσης (στους άξονες x, y και z) καθώς και του προσανατολισμού (roll, pitch και yaw) της γραφίδας χειρός, επιτρέποντας έτσι την πιο ρεαλιστική απεικόνιση και αλληλεπίδραση με εικονικά αντικείμενα.

Η εταιρεία 3D Systems αποτελεί έναν από τους πρωτοπόρους στον χώρο της απτικής τεχνολογίας, με την οικογένεια συσκευών της να έχει τις ρίζες της στην αρχική σειρά PHANTOM, η οποία αναπτύχθηκε στο Massachusetts Institute of Technology (MIT) και εμπορευματοποιήθηκε αρχικά από την εταιρεία SensAble Technologies. Η συσκευή Geomagic Touch, γνωστή και ως Phantom Omni στις παλαιότερες εκδόσεις της, αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες απτικές συσκευές παγκοσμίως, τόσο σε ερευνητικά εργαστήρια όσο και σε εκπαιδευτικά ιδρύματα, χάρη στη σχέση κόστους-απόδοσης και στην ώριμη υποστήριξη λογισμικού που τη συνοδεύει.



Εικόνα 10 Η απτική συσκευή Touch της 3D Systems (Geomagic Touch).[45]

3.2 Λίγα λόγια για τη Συσκευή

Όταν η απτική τεχνολογία χρησιμοποιείται σε περιβάλλοντα σχεδίασης και εικονικής γλυπτικής, οι σχεδιαστές μπορούν να αλληλεπιδρούν και να «αισθάνονται» το σχήμα του τρισδιάστατου μοντέλου, όπως αν εργάζονταν σε φυσικό πηλό. Τα διαδραστικά εργαλεία γλυπτικής που μιμούνται την

πραγματική εμπειρία επιτρέπουν μια πολύ πιο διαισθητική διαδικασία τρισδιάστατου σχεδιασμού. Οι πατενταρισμένες απτικές συσκευές της 3D Systems χρησιμοποιούν με ευρηματικό τρόπο κινητήρες για να δημιουργούν δυνάμεις που αντιστέκονται στην κίνηση του χεριού του σχεδιαστή, προσομοιώνοντας την αίσθηση της αφής όταν ο δείκτης αλληλεπιδρά με το τρισδιάστατο μοντέλο στον εικονικό χώρο. Ανάλογα με το μοντέλο, οι απτικές συσκευές της 3D Systems παρέχουν ανάδραση δύναμης με 3 ή 6 βαθμούς ελευθερίας (Degrees of Freedom – DOF).[46]

3.2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά

Η συσκευή Geomagic Touch διαθέτει έναν αρθρωτό βραχίονα με γραφίδα, ο οποίος καταγράφει τη θέση και τον προσανατολισμό της γραφίδας σε έξι βαθμούς ελευθερίας (θέση στους άξονες x, y, z και προσανατολισμό roll, pitch, yaw) και αποδίδει δυνάμεις ανάδρασης σε τρεις βαθμούς ελευθερίας. Ο ωφέλιμος χώρος εργασίας της είναι της τάξης των $160 \times 120 \times 70$ χιλιοστών, μέγεθος που αντιστοιχεί περίπου στην κίνηση του καρπού ενός χρήστη που εργάζεται σε γραφείο. Η συσκευή είναι σε θέση να αποδώσει μέγιστη δύναμη περίπου 3,3 Newton, με ονομαστική δύναμη συνεχούς λειτουργίας χαμηλότερη, ώστε να αποφεύγεται η υπερθέρμανση των κινητήρων.

Η ανάλυση θέσης της συσκευής είναι ιδιαίτερα υψηλή, φτάνοντας τα λίγα χιλιοστά του χιλιοστού, γεγονός που επιτρέπει την πιστή καταγραφή ακόμη και πολύ μικρών κινήσεων της γραφίδας. Η σύνδεση με τον υπολογιστή πραγματοποιείται μέσω θύρας USB στα νεότερα μοντέλα, ενώ τα παλαιότερα χρησιμοποιούσαν θύρα IEEE 1394 (FireWire). Η γραφίδα φέρει δύο προγραμματιζόμενα πλήκτρα, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν από την εφαρμογή για την υλοποίηση διαφόρων ενεργειών, όπως η επιλογή αντικειμένων ή η εναλλαγή λειτουργιών.

Τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν τη συσκευή κατάλληλη για την παρούσα εφαρμογή. Ο περιορισμένος αλλά ακριβής χώρος εργασίας αντιστοιχεί στη φυσική κλίμακα της γραφής, η υψηλή ανάλυση θέσης επιτρέπει την πιστή ιχνηλάτηση των γραμμάτων και η δυνατότητα απόδοσης ελεγχόμενων δυνάμεων ανάδρασης είναι ακριβώς το στοιχείο που αξιοποιείται για τη μαγνητική καθοδήγηση του χεριού του χρήστη.[47]



SPECIFICATIONS	TOUCH™
Workspace	~6.4 W x 4.8 H x 2.8 D in > 160 W x 120 H x 70 D mm
Range of motion	Hand movement pivoting at wrist
Nominal position resolution	> 450 dpi ~0.055 mm
Maximum exertable force and torque at nominal position (orthogonal arms)	0.75 lbf/3.3 N
Stiffness	x-axis > 7.3 lb/in (1.26 N/mm) y-axis > 13.4 lb/in (2.31 N/mm) z-axis > 5.9 lb/in (1.02 N/mm)
Force feedback (6 Degrees of Freedom)	x, y, z
Position sensing/input (6 Degrees of Freedom) [Stylus gimbal]	x, y, z (digital encoders) [Roll, pitch, yaw (± 5% linearity potentiometers)]
Interface	USB 2.0

Εικόνα 11 Τεχνικά Χαρακτηριστικά της συσκευής Touch από την επίσημη σελίδα της 3D Systems[48]

3.2.2 Force Feedback

Η τεχνολογία επανατροφοδότησης δύναμης (Force Feedback) αποτελεί τον θεμελιώδη μηχανισμό που επιτρέπει στους χρήστες να βιώνουν την αίσθηση της αφής μέσα σε ένα εικονικό περιβάλλον. Σε αντίθεση με τις κλασικές διεπαφές, οι οποίες περιορίζονται αποκλειστικά σε οπτικά ή ηχητικά ερεθίσματα, η απτική τεχνολογία προσφέρει τη δυνατότητα αλληλεπίδρασης με αντικείμενα που «υπάρχουν» στον ψηφιακό χώρο, επιτρέποντας στον χρήστη να τα αισθανθεί σαν να ήταν πραγματικά. Στην περίπτωση της συσκευής Touch, που χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η απτική εμπειρία επιτυγχάνεται μέσω ενός ειδικά σχεδιασμένου βραχίονα, στο άκρο του οποίου βρίσκεται μία πένα (stylus) που κινείται ελεύθερα στον τρισδιάστατο χώρο. Καθώς ο χρήστης χειρίζεται την πένα, μπορεί να αγγίζει και να μετακινεί εικονικά αντικείμενα, ενώ η εφαρμογή —σε συνεργασία με τη συσκευή Touch— αξιοποιεί αλγορίθμους φυσικής ώστε να δημιουργεί αντίσταση στο χέρι του χρήστη, αποδίδοντας ρεαλιστικά την αίσθηση επαφής με τα αντικείμενα. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι ο χρήστης μπορεί να αντιληφθεί τότε ακουμπά μία επιφάνεια, τότε τη διαπερνά ή τότε κινείται επάνω σε διαφορετικά εικονικά υλικά με ποικίλα επίπεδα τριβής, ανάγλυφου και σκληρότητας — ακόμη κι αν αυτά φαίνονται πανομοιότυπα οπτικά. Η ρεαλιστική αυτή αίσθηση καθίσταται εφικτή χάρη στην ιδιαίτερα γρήγορη απόκριση του συστήματος της συσκευής Touch, το οποίο καταγράφει συνεχώς τη θέση της πέννας στον πραγματικό χώρο και την αναπαριστά με μεγάλη ακρίβεια στον εικονικό κόσμο.

Ο μηχανισμός της δυναμικής ανάδρασης στηρίζεται σε έναν βρόχο ελέγχου υψηλής συχνότητας. Σε κάθε κύκλο, το σύστημα διαβάσει τη θέση της γραφίδας, ελέγχει αν αυτή έρχεται σε επαφή με κάποιο εικονικό αντικείμενο και, εφόσον υπάρχει επαφή, υπολογίζει τη δύναμη που πρέπει να αποδοθεί ώστε να προσομοιωθεί η αντίσταση της επιφάνειας. Η δύναμη αυτή αποδίδεται στη συνέχεια από τους

κινητήρες της συσκευής στο χέρι του χρήστη. Ο βρόχος αυτός εκτελείται με ρυθμό περίπου 1000 φορές το δευτερόλεπτο, ώστε η αίσθηση της αντίστασης να είναι σταθερή και πειστική, χωρίς αντιληπτές ασυνέχειες.

Η συσκευή Touch διακρίνεται για την ισορροπία που πετυχαίνει ανάμεσα στην απόδοση και το κόστος. Σε αντίθεση με τα υψηλότερης κατηγορίας μοντέλα, όπως το Touch X, τα οποία προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια και ισχυρότερες δυνάμεις, το βασικό μοντέλο Touch απευθύνεται σε εκπαιδευτικές και ερευνητικές χρήσεις όπου το ζητούμενο είναι η προσιτότητα και η ευκολία χρήσης. Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, η ακρίβεια και η δύναμη του βασικού μοντέλου είναι απολύτως επαρκείς, καθώς η εφαρμογή δεν απαιτεί την απόδοση μεγάλων δυνάμεων αλλά ήπιων, καθοδηγητικών ερεθισμάτων.[49]

3.3 Χρήσεις της Συσκευής

Οι απτικές συσκευές της 3D Systems χρησιμοποιούνται σε κάθε βιομηχανία που απαιτεί ακριβή σχεδίαση οργανικών μορφών, αξιοποιώντας την αίσθηση της αφής για την ταχύτερη και πιο ακριβή δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων.

Οι σχεδιαστές στρέφονται στο λογισμικό Geomagic και στις απτικές συσκευές για να αναπτύξουν επιτυχώς τα σχέδιά τους σε διάφορους τομείς εφαρμογής, όπως η τρισδιάστατη μοντελοποίηση και κατασκευή, η σχεδίαση κοσμημάτων, αυτοκινήτων, παιχνιδιών και υποδημάτων, οι προσομοιώσεις ιατρικών επεμβάσεων και αποκατάστασης, η τέχνη και η γλυπτική, η εγκληματολογική αναπαράσταση, η εκπαίδευση, οι προσομοιώσεις και η αξιολόγηση δεξιοτήτων, τα παιχνίδια, η ψυχαγωγία και η εικονική πραγματικότητα, η κατασκευή καλουπιών και φορμών ψησίματος, ο τηλεχειρισμός και ο ρομποτικός έλεγχος, η εικονική συναρμολόγηση και ανίχνευση συγκρούσεων, οι εφαρμογές για άτομα με προβλήματα όρασης, η μοριακή μοντελοποίηση και ο νανοχειρισμός.

Η ευρύτητα των εφαρμογών αυτών καταδεικνύει τη γενικότητα της απτικής τεχνολογίας ως εργαλείου αλληλεπίδρασης. Κοινό στοιχείο όλων είναι η ανάγκη για ακριβή, διαισθητικό χειρισμό τρισδιάστατων δεδομένων, τον οποίο η απτική ανάδραση καθιστά δυνατό προσθέτοντας τη διάσταση της αφής στην οπτική αναπαράσταση. Στον χώρο της υγείας και της αποκατάστασης ειδικότερα, η απτική τεχνολογία έχει αποδειχθεί πολύτιμη τόσο για την εκπαίδευση επαγγελματιών (π.χ. προσομοιωτές χειρουργικής και οδοντιατρικής) όσο και για τη θεραπεία ασθενών, όπου η ελεγχόμενη απόδοση δυνάμεων επιτρέπει τη δημιουργία εξατομικευμένων προγραμμάτων εξάσκησης. Η εφαρμογή της παρούσας εργασίας εντάσσεται ακριβώς σε αυτή την τελευταία κατηγορία, αξιοποιώντας τις δυνατότητες της συσκευής για την υποστήριξη της κινητικής εξάσκησης.[50]

3.3.1 Haptic Based Software (Λογισμικό που βασίζεται στην απτική λειτουργία)

Geomagic Freeform. Τα προηγμένα εργαλεία οργανικής τρισδιάστατης μηχανικής που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία συνδυάζουν τεχνικές απτικής γλυπτικής σε 3D περιβάλλον, μοντελοποίηση επιφανειών, σχεδίαση βασισμένη στη σχεδιαστική πρόθεση, επεξεργασία δεδομένων τρισδιάστατης σάρωσης, συμβατότητα με συστήματα CAD και διαδικασίες δημιουργίας καλουπιών. Οι λειτουργίες αυτές διευκολύνουν την παραγωγή σύνθετων και γλυπτικών τρισδιάστατων μοντέλων, τα οποία μπορούν να προετοιμαστούν άμεσα για προσθετικές ή αφαιρετικές μεθόδους κατασκευής.

Το λογισμικό διατίθεται σε δύο εκδόσεις — Geomagic Freeform και Geomagic Freeform Plus — και λειτουργεί αποκλειστικά σε συνδυασμό με απτικές συσκευές της 3D Systems.

Geomagic Sculpt. Το Geomagic Sculpt αποτελεί μια εισαγωγική, αλλά ταυτόχρονα γρήγορη και υψηλής ακρίβειας πλατφόρμα εικονικής γλυπτικής, η οποία επιτρέπει την ανάπτυξη οργανικών, ελεύθερης ροής σχεδίων για προϊόντα, γλυπτά, κοσμήματα και καλλιτεχνικές δημιουργίες — σχέδια τα οποία δεν είναι δυνατόν να υλοποιηθούν σε περιβάλλοντα CAD. Το λογισμικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε με συμβατικό ποντίκι είτε με απτική συσκευή της 3D Systems, προσφέροντας ρεαλιστική αίσθηση αφής και έναν ιδιαίτερα διαισθητικό τρόπο σχεδίασης λειτουργικών και αισθητικά ποιοτικών προϊόντων για τρισεξάστη εκτύπωση και διαδικασίες παραγωγής.[51]

3.4 Εγκατάσταση και Οδηγοί (Drivers)

Για να λειτουργήσει σωστά η εφαρμογή με τη συσκευή Touch, απαιτείται η εγκατάσταση των κατάλληλων οδηγών (drivers) που παρέχει δωρεάν η 3D Systems. Η διαδικασία περιλαμβάνει πλοήγηση στην επίσημη ιστοσελίδα της εταιρείας, επιλογή των οδηγών στην κατηγορία OpenHaptics και κατόπιν επιλογή των οδηγών για τη συσκευή Touch.

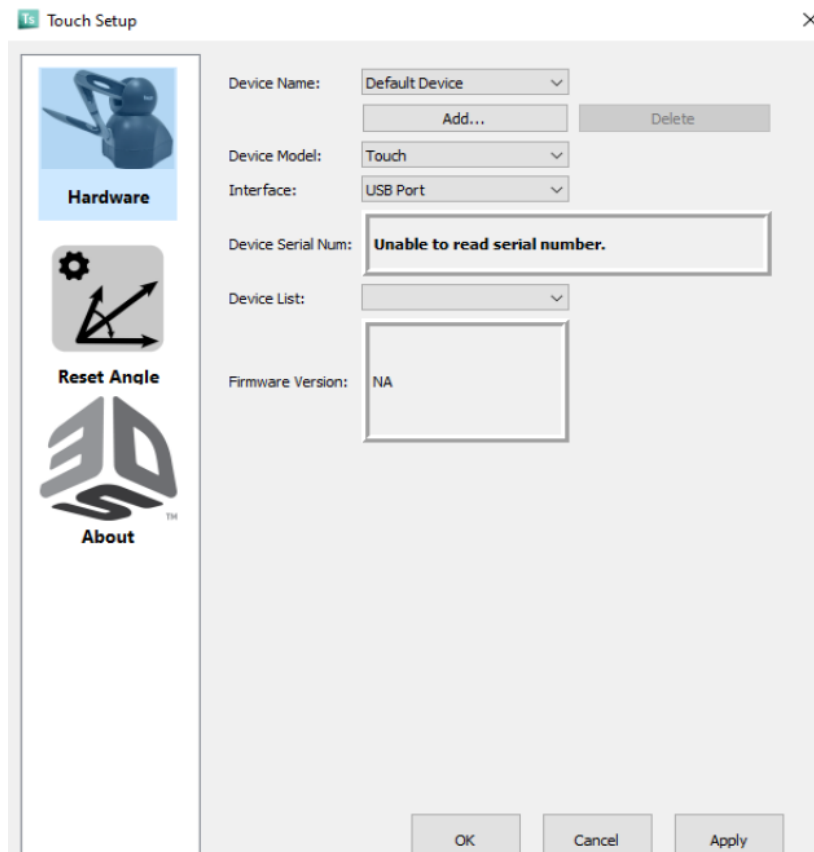
Η επίσημη ιστοσελίδα της 3D Systems για τους Drivers: https://support.3dsystems.com/s/article/Haptic-Device-Drivers-for-OpenHaptics?language=en_US

Ένα screenshot από την επίσημη σελίδα της 3D Systems το οποίο μας δείχνει ποιος είναι ο σωστός driver για να κατεβάσουμε στον υπολογιστή μας[52]

OpenHaptics		
v3.5	Touch Device Driver v2023.10.11: <i>for Ethernet Touch or Touch X, USB Touch or Touch X, and HID Touch or Touch X devices</i> Interface:   OS: 10/11 (64-bit)	Download
	Touch Device Driver v2023.1.4: <i>for Ethernet Touch or Touch X, USB Touch or Touch X, and HID Touch devices</i> Interface:   OS: 10/11 (64-bit)	Download
	Touch Device Driver v2018.10.22: <i>for Ethernet Touch or Touch X, and USB Touch or Touch X devices</i> Interface:   OS: 7/8/10 (64-bit)	Download

Εικόνα 12 Οι οδηγοί (drivers) της συσκευής μέσω της πλατφόρμας OpenHaptics της 3D Systems. [53]

Μετά τη λήψη, θα δημιουργηθεί ένας νέος φάκελος με την ονομασία 3D Systems. Στον φάκελο αυτό θα βρεθεί ένα εκτελέσιμο αρχείο με όνομα Touch_Setup.exe, το οποίο ανοίγει το απαραίτητο γραφικό περιβάλλον για την αρχική ρύθμιση της συσκευής. Μέσα σε αυτό το περιβάλλον εμφανίζονται διάφορες πληροφορίες σχετικά με τη συσκευή, όπως το όνομα της συσκευής (Device Name), το μοντέλο της (Device Model), η διεπαφή (Interface), ο σειριακός αριθμός (Device Serial Number), η λίστα συσκευών (Device List) και η έκδοση του υλικολογισμικού (Firmware Version).



Εικόνα 13 Το περιβάλλον ρύθμισης (Touch Setup) της συσκευής.[53]

Ο χρήστης πρέπει να ελέγξει το Device Serial Number για να βεβαιωθεί ότι η συσκευή αναγνωρίζεται σωστά από το σύστημα. Στη συνέχεια, επιλέγεται η εντολή Apply για να ολοκληρωθούν οι ρυθμίσεις και να επιτευχθεί η σύνδεση με τον υπολογιστή. Η διαδικασία αυτή απαιτείται μόνο κατά την πρώτη χρήση· από εκεί και έπειτα, η συσκευή αναγνωρίζεται αυτόματα χωρίς περαιτέρω παραμετροποίηση.

3.5 Το προγραμματιστικό περιβάλλον OpenHaptics

Η αξιοποίηση της συσκευής Touch από μια εφαρμογή προϋποθέτει, πέρα από τους οδηγούς, και ένα προγραμματιστικό περιβάλλον που εκθέτει τις λειτουργίες της. Το περιβάλλον αυτό είναι η βιβλιοθήκη OpenHaptics της 3D Systems, η οποία αποτελεί το de facto πρότυπο για την ανάπτυξη απτικών εφαρμογών με τις συσκευές της εταιρείας. Η OpenHaptics οργανώνεται σε δύο βασικά επίπεδα: το χαμηλού επιπέδου Haptic Device API (HDAPI), το οποίο παρέχει άμεση πρόσβαση στη θέση της γραφίδας και στην απόδοση δυνάμεων, και το υψηλότερου επιπέδου Haptic Library API (HLAPI), το οποίο διευκολύνει την απτική απόδοση σύνθετων γεωμετριών με μοντέλο παρόμοιο με εκείνο των γραφικών βιβλιοθηκών.

Η άμεση χρήση της OpenHaptics απαιτεί προγραμματισμό σε γλώσσα C/C++ και βαθιά γνώση του βρόχου απτικής απόδοσης. Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία αξιοποιήθηκε το πακέτο HapticsDirect, το οποίο λειτουργεί ως ενδιάμεσο στρώμα μεταξύ της OpenHaptics και της μηχανής Unity. Το πακέτο αυτό αναλαμβάνει τη διαχείριση της επικοινωνίας με τη συσκευή σε χαμηλό επίπεδο και εκθέτει τις βασικές λειτουργίες μέσω κλάσεων C# που ενσωματώνονται φυσικά στο περιβάλλον

της Unity. Έτσι, ο προγραμματιστής μπορεί να επικεντρωθεί στη λογική της εφαρμογής, χωρίς να χρειάζεται να διαχειριστεί ο ίδιος τις λεπτομέρειες του απτικού βρόχου.

Στην πράξη, η ενσωμάτωση επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση ενός ειδικού αντικειμένου (HapticActor) στη σκηνή της Unity, το οποίο φέρει την κλάση διαχείρισης της συσκευής. Το αντικείμενο αυτό εκθέτει, μεταξύ άλλων, τη θέση του απτικού δείκτη, την κατάσταση των πλήκτρων της γραφίδας και μεθόδους για την ενεργοποίηση των εφέ δυνάμεων. Οι υπόλοιπες κλάσεις της εφαρμογής, όπως η μαγνητική επιφάνεια και ο οδηγός της γραφίδας, επικοινωνούν με τη συσκευή αποκλειστικά μέσω αυτού του αντικειμένου, γεγονός που συγκεντρώνει τη διαχείριση του υλικού σε ένα σημείο και απλοποιεί τον υπόλοιπο κώδικα.[54]

3.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Η απτική συσκευή Geomagic Touch παρέχει ρεαλιστική 3D αλληλεπίδραση για γλυπτική, εικονική συναρμολόγηση και εκπαίδευση, προσφέροντας ακριβή ανάδραση δύναμης που βελτιώνει τις κινητικές δεξιότητες και μειώνει τα λάθη σε εικονικά περιβάλλοντα. Ωστόσο, η συσκευή έχει περιορισμένο χώρο εργασίας, δυσκολεύεται να προσομοιώσει σύνθετες υφές και μπορεί να απαιτεί υψηλό κόστος και αξιόπιστη ενσωμάτωση λογισμικού.

Πλεονεκτήματα

Στα βασικά πλεονεκτήματα της συσκευής συγκαταλέγονται ο βελτιωμένος ρεαλισμός και η εμπύθιση, καθώς επιτρέπει ρεαλιστική αίσθηση «αφής» και αλληλεπίδραση με εικονικά αντικείμενα, προσομοιώνοντας βάρος, υφή επιφάνειας και ανάδραση δύναμης· η βελτιωμένη εκπαίδευση, που την καθιστά ιδανική για την απόκτηση δεξιοτήτων σε τομείς όπως η οδοντιατρική, η χειρουργική και τα προσθετικά, προσφέροντας επαναλαμβανόμενη εξάσκηση χωρίς φυσικούς περιορισμούς· η ακριβής σχεδίαση και γλυπτική σε λογισμικά όπως το Geomagic· η μείωση σφαλμάτων και η σταθεροποίηση της κίνησης, καθώς μπορεί να καθοδηγήσει τους χρήστες και να μειώσει τα τρέμουλα· ο τηλεχειρισμός, που βελτιώνει τον έλεγχο και την αίσθηση παρουσίας σε απομακρυσμένες ρομποτικές εργασίες· και η προσβασιμότητα, με δυνατότητα εφαρμογών για άτομα με προβλήματα όρασης, επιτρέποντάς τους να εξερευνούν τρισδιάστατες χωρικές πληροφορίες.[55]

Μειονεκτήματα

Από την άλλη πλευρά, εντοπίζονται και ορισμένοι περιορισμοί: η περιορισμένη ακρίβεια, καθώς παρά τις καλές επιδόσεις η συσκευή μπορεί να δυσκολεύεται να προσομοιώσει πολύπλοκες υφές ή αλληλεπιδράσεις σε σύγκριση με την πραγματικότητα· η υποβάθμιση της απόδοσης, αφού η απτική καθοδήγηση ενδέχεται σε ορισμένες περιπτώσεις να εμποδίζει τη μεταφορά δεξιοτήτων σε πραγματικές εργασίες όταν η συσκευή αφαιρείται· οι τεχνικοί περιορισμοί, καθώς ο χώρος εργασίας και η απόδοση δύναμης διαφέρουν ανάμεσα στα μοντέλα (π.χ. Omni vs. Touch X) και ορισμένες προηγμένες λειτουργίες απαιτούν συγκεκριμένα μοντέλα· το κόστος και η πολυπλοκότητα, αφού τα επαγγελματικά μοντέλα μπορεί να είναι ακριβά και η ανάπτυξη αξιόπιστων εφαρμογών απαιτεί σημαντική τεχνική εξειδίκευση· και η εξάρτηση από το λογισμικό, καθώς η απόδοση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητα του υποκείμενου λογισμικού να παράγει ακριβή και γρήγορη απτική ανάδραση.

Συνολικά, η αποτίμηση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων της συσκευής Touch οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πρόκειται για ένα ώριμο και αξιόπιστο εργαλείο, ιδιαίτερα κατάλληλο για ερευνητικές και εκπαιδευτικές εφαρμογές. Οι περιορισμοί της —ο μικρός χώρος εργασίας και η δυσκολία απόδοσης πολύ σύνθετων υφών— δεν αποτελούν εμπόδιο για την παρούσα εφαρμογή, καθώς η γραφή γραμμικών εκτυλίσσεται σε περιορισμένη περιοχή και δεν απαιτεί την αναπαραγωγή πολύπλοκων υλικών.

Αντίθετα, τα πλεονεκτήματά της —η ακρίβεια, η αξιόπιστη ανάδραση δύναμης και η ώριμη υποστήριξη λογισμικού— αξιοποιούνται πλήρως, καθιστώντας τη συσκευή ιδανική επιλογή για τον σκοπό της εργασίας.[55]

3.7 Επίλογος

Η συσκευή Touch αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για αλληλεπίδραση με εικονικά περιβάλλοντα, συνδυάζοντας ακρίβεια στην ανίχνευση θέσης και προσανατολισμού με απτική ανάδραση. Επιτρέπει στους χρήστες να αντιλαμβάνονται φυσικά χαρακτηριστικά αντικειμένων, βελτιώνοντας την αίσθηση ρεαλισμού και την εμπειρία μάθησης. Παρά τους περιορισμούς χώρου και την ανάγκη συγκεκριμένων οδηγών, η Touch είναι πολύτιμη για εφαρμογές VR και εκπαιδευτικές μελέτες, συμβάλλοντας ουσιαστικά στην κατανόηση της αλληλεπίδρασης ανθρώπου-μηχανής.

Κεφάλαιο 4ο: Σχεδίαση και υλοποίηση της εφαρμογής

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται αναλυτικά η σχεδίαση και η υλοποίηση της εφαρμογής. Παρουσιάζονται τα εργαλεία και οι τεχνολογίες ανάπτυξης, η δομή του εικονικού περιβάλλοντος, ο τρόπος αναπαράστασης των γραμμάτων και των απτικών ορίων, η οπτική, ηχητική και απτική ανατροφοδότηση, η υποστήριξη πολλαπλών γραμμάτων και η διεπαφή χρήστη, καθώς και η λειτουργία της εφαρμογής με ποντίκι και με τη συσκευή Geomagic Touch.

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η σχεδίαση και η υλοποίηση της εκπαιδευτικής εφαρμογής που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας. Σκοπός της εφαρμογής είναι η υποστήριξη ατόμων με δυσκολίες λεπτής κινητικότητας κατά την εκμάθηση του σχηματισμού των γραμμάτων, μέσα από τον συνδυασμό ενός τρισδιάστατου εικονικού περιβάλλοντος και της απτικής συσκευής Touch της 3D Systems. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται τα εργαλεία ανάπτυξης, η αρχιτεκτονική του λογισμικού, ο τρόπος αναπαράστασης των γραμμάτων και των απτικών ορίων, καθώς και οι μηχανισμοί οπτικής, ηχητικής και απτικής ανατροφοδότησης προς τον χρήστη.

4.2 Εργαλεία και τεχνολογίες ανάπτυξης

Η εφαρμογή αναπτύχθηκε στη μηχανή παιχνιδιών Unity, η οποία επιλέχθηκε λόγω της ευελιξίας της στη δημιουργία τρισδιάστατων διαδραστικών περιβαλλόντων, της ευρείας υποστήριξης απτικών και εξωτερικών συσκευών, καθώς και της εξοικείωσης που είχε ήδη αποκτηθεί μέσα από προηγούμενα μαθήματα της σχολής. Για την απόδοση των γραφικών χρησιμοποιήθηκε το Universal Render Pipeline (URP), ενώ για την υψηλής ποιότητας εμφάνιση των γραμμάτων αξιοποιήθηκε το σύστημα TextMesh Pro και για τη δημιουργία της γεωμετρίας του εικονικού πίνακα το εργαλείο ProBuilder.[56]

Η απτική αλληλεπίδραση επιτυγχάνεται μέσω της συσκευής Geomagic Touch της 3D Systems, η οποία ενσωματώνεται στο Unity με τη βοήθεια του πακέτου HapticsDirect. Το πακέτο αυτό στηρίζεται στη βιβλιοθήκη OpenHaptics και αναλαμβάνει την επικοινωνία με τον οδηγό (driver) της συσκευής, την ανάγνωση της θέσης και του προσανατολισμού της γραφίδας σε πραγματικό χρόνο, καθώς και την απόδοση δυνάμεων ανάδρασης. Με τον τρόπο αυτό, η κίνηση της φυσικής γραφίδας αντιστοιχίζεται στην κίνηση ενός εικονικού δείκτη μέσα στη σκηνή, ενώ οι δυνάμεις που υπολογίζει η εφαρμογή αποδίδονται πίσω στο χέρι του χρήστη.

Η επιλογή του πακέτου HapticsDirect έγινε διότι προσφέρει μια απευθείας γέφυρα μεταξύ του περιβάλλοντος της Unity και της βιβλιοθήκης OpenHaptics, εκθέτοντας τις βασικές λειτουργίες της συσκευής μέσω μιας κλάσης διαχείρισης (HapticPlugin) που είναι άμεσα προσβάσιμη από τον κώδικα C#. Μέσω της κλάσης αυτής, η εφαρμογή αποκτά πρόσβαση στη θέση της γραφίδας, στην κατάσταση των πλήκτρων, καθώς και στις λειτουργίες απόδοσης δυνάμεων, όπως το καθολικό ελατήριο (global spring) και η δόνηση (vibration), που αξιοποιούνται εκτενώς στην υλοποίηση.[56]

4.3 Δομή του εικονικού περιβάλλοντος

Το εικονικό περιβάλλον της εφαρμογής αποτελείται από τρία βασικά στοιχεία. Το πρώτο είναι ο εικονικός πίνακας (επίπεδη επιφάνεια) πάνω στον οποίο προβάλλεται το εκάστοτε γράμμα. Το δεύτερο είναι το ίδιο το γράμμα, το οποίο αποδίδεται ως τρισδιάστατο κείμενο και τοποθετείται στο κέντρο του πίνακα. Το τρίτο είναι η άκρη της εικονικής γραφίδας (pen tip), δηλαδή το σημείο με το οποίο ο χρήστης

«γράφει». Η κάμερα της σκηνής τοποθετείται μετωπικά ως προς τον πίνακα, ώστε το γράμμα να εμφανίζεται όρθιο και ευανάγνωστο, ανεξάρτητα από την ανάλυση ή την αναλογία της οθόνης.

Ιδιαίτερη μέριμνα δόθηκε στη σωστή ρύθμιση της φυσικής (physics) της σκηνής, ώστε ο πίνακας και το γράμμα να παραμένουν σταθερά και να μην επηρεάζονται από τη βαρύτητα ή από τις συγκρούσεις με τη γραφίδα. Η επιφάνεια του πίνακα φέρει ιδιότητες απτικού υλικού (τριβή και σκληρότητα), με αποτέλεσμα ο χρήστης να αισθάνεται την αντίσταση και την υφή της επιφάνειας όταν ακουμπά επάνω της με τη γραφίδα.[57]

4.3.1 Ρύθμιση της φυσικής και του συστήματος συντεταγμένων

Η σωστή λειτουργία της εφαρμογής προϋποθέτει την προσεκτική ρύθμιση της φυσικής (physics) της σκηνής και την ακριβή αντιστοίχιση των συστημάτων συντεταγμένων μεταξύ της συσκευής και του εικονικού κόσμου. Ο εικονικός πίνακας και το γράμμα ορίζονται ως στατικά αντικείμενα, τα οποία δεν επηρεάζονται από τη βαρύτητα και δεν μετακινούνται από τις συγκρούσεις με τη γραφίδα. Η ρύθμιση αυτή είναι απαραίτητη, καθώς σε αντίθετη περίπτωση η επαφή της γραφίδας με τον πίνακα θα προκαλούσε ανεπιθύμητη μετατόπιση των αντικειμένων και θα κατέστρεφε την αίσθηση σταθερότητας.

Ένα κρίσιμο τεχνικό ζήτημα είναι η αντιστοίχιση της κίνησης της φυσικής γραφίδας στην κίνηση του εικονικού δείκτη. Η συσκευή Touch αναφέρει τη θέση της γραφίδας στο δικό της σύστημα συντεταγμένων, το οποίο πρέπει να μετασχηματιστεί κατάλληλα ώστε να αντιστοιχεί στο σύστημα συντεταγμένων της σκηνής της Unity. Ο μετασχηματισμός αυτός περιλαμβάνει κλιμάκωση, μετατόπιση και περιστροφή, ώστε ο περιορισμένος χώρος εργασίας της συσκευής να αντιστοιχίζεται στην περιοχή του εικονικού πίνακα. Η σωστή βαθμονόμηση εξασφαλίζει ότι η κίνηση του χεριού του χρήστη μεταφράζεται πιστά στην οθόνη, χωρίς αναντιστοιχίες που θα μπορούσαν να προκαλέσουν σύγχυση ή δυσφορία.

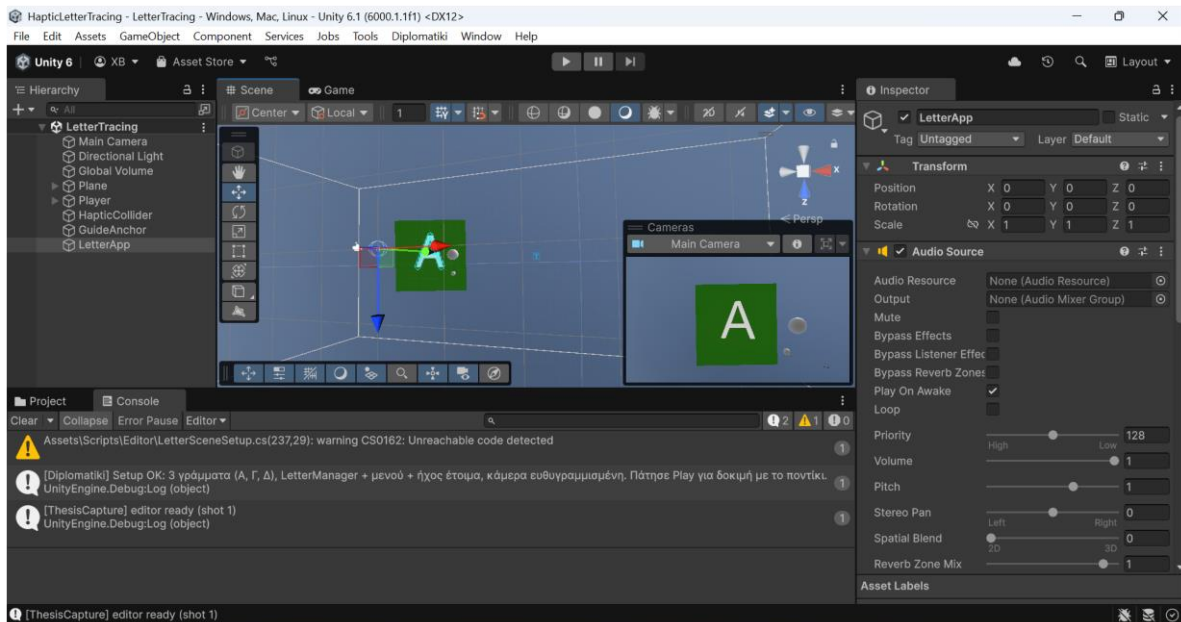
Η κάμερα της σκηνής τοποθετείται μετωπικά ως προς τον πίνακα, ώστε το γράμμα να εμφανίζεται όρθιο και ευανάγνωστο. Η θέση και το πεδίο θέασης της κάμερας ρυθμίζονται αυτόματα ανάλογα με το μέγεθος του πίνακα, ώστε το γράμμα να καταλαμβάνει σταθερό ποσοστό της οθόνης ανεξάρτητα από την ανάλυση. Ο συνδυασμός της σταθερής, μετωπικής θέασης με τη δισδιάστατη φύση της γραφής απλοποιεί σημαντικά την αλληλεπίδραση, καθώς περιορίζει τις σχετικές κινήσεις σε ένα επίπεδο και μειώνει το γνωστικό φορτίο του χρήστη.[58]

4.4 Το περιβάλλον ανάπτυξης και η σκηνή στη Unity

Η υλοποίηση της εφαρμογής πραγματοποιήθηκε εξ ολοκλήρου μέσα στο περιβάλλον επεξεργασίας της Unity. Η σκηνή της εφαρμογής (LetterTracing) περιλαμβάνει έναν μικρό αλλά προσεκτικά οργανωμένο αριθμό αντικειμένων, καθένα από τα οποία εξυπηρετεί συγκεκριμένο ρόλο. Το αντικείμενο HapticActor, το οποίο προέρχεται από το πακέτο HapticsDirect, αποτελεί τη γέφυρα με τη συσκευή Geomagic Touch και φέρει τη συνιστώσα HapticPlugin, μέσω της οποίας η εφαρμογή διαβάζει τη θέση της φυσικής γραφίδας και αποστέλλει εντολές δύναμης και δόνησης. Το αντικείμενο Plane αποτελεί τον εικονικό πίνακα γραφής, ενώ το θυγατρικό του αντικείμενο κειμένου (TextMeshPro) αναλαμβάνει την απεικόνιση του εκάστοτε γράμματος. Το αντικείμενο PenTip αντιπροσωπεύει τη μύτη της εικονικής γραφίδας και φιλοξενεί τις συνιστώσες PenTipDriver και LetterTracer, ενώ το αντικείμενο LetterApp συγκεντρώνει τη λογική της εφαρμογής (LetterManager) και τη διεπαφή χρήστη (LetterAppUI).

Στην Εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται το περιβάλλον της Unity κατά την ανάπτυξη. Στο αριστερό τμήμα διακρίνεται η ιεραρχία των αντικειμένων της σκηνής, στο κέντρο η τρισδιάστατη προβολή με

τον πράσινο πίνακα και το γράμμα Άλφα όπως το βλέπει ο χρήστης, και στα δεξιά ο επιθεωρητής (Inspector) με τις παραμέτρους των συνιστωσών της εφαρμογής. Οι παράμετροι αυτές —όπως ο αριθμός των σημείων ανά γραμμή γραφής, το πλάτος του καναλιού, η ένταση, η συχνότητα και η διάρκεια της δόνησης επιβράβευσης— είναι πλήρως ρυθμιζόμενες από το περιβάλλον της Unity, χωρίς τροποποίηση του κώδικα, γεγονός που διευκόλυνε σημαντικά τη διαδικασία των δοκιμών και της βαθμονόμησης.



Εικόνα 14 Το περιβάλλον της Unity με τη σκηνή της εφαρμογής: η ιεραρχία των αντικειμένων (αριστερά), η τρισδιάστατη προβολή του πίνακα με το γράμμα και τα σημεία της διαδρομής (κέντρο) και ο επιθεωρητής με το αντικείμενο LetterApp, που φέρει τη λογική

Αξίζει να σημειωθεί ότι η σκηνή δεν περιέχει προκατασκευασμένα αντικείμενα για κάθε γράμμα. Ο πίνακας, το κείμενο και η γραφίδα είναι κοινά για όλα τα γράμματα, ενώ η γεωμετρία της διαδρομής κάθε γράμματος δημιουργείται δυναμικά κατά την εκτέλεση. Η επιλογή αυτή κρατά τη σκηνή ελαφριά και καθιστά την προσθήκη νέων γραμμάτων ζήτημα ορισμού δεδομένων και όχι σχεδίασης σκηνής.

4.5 Αρχιτεκτονική του λογισμικού

Το λογισμικό της εφαρμογής οργανώνεται σε ένα σύνολο συνεργαζόμενων κλάσεων (components), καθεμία από τις οποίες αναλαμβάνει μια σαφώς καθορισμένη αρμοδιότητα, σύμφωνα με την αρχή του διαχωρισμού των υπευθυνοτήτων. Η οργάνωση αυτή διευκολύνει τη συντήρηση, τον έλεγχο και τη μελλοντική επέκταση του κώδικα, καθώς κάθε λειτουργία μπορεί να τροποποιηθεί ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες. Οι βασικές κλάσεις της εφαρμογής είναι η βιβλιοθήκη γραμμάτων, η διαχείριση της διαδρομής, ο διαχειριστής της εφαρμογής, ο ανιχνευτής ιχνηλάτησης, η μαγνητική επιφάνεια, ο οδηγός της γραφίδας και η διεπαφή χρήστη.

Η βιβλιοθήκη γραμμάτων αποτελεί το κεντρικό σημείο ορισμού των γραμμάτων που υποστηρίζει η εφαρμογή. Κάθε γράμμα περιγράφεται με έναν χαρακτήρα εμφάνισης, μια ονομασία και ένα σύνολο γραμμών γραφής (strokes), όπου κάθε γραμμή ορίζεται ως μια ακολουθία σημείων σε κανονικοποιημένες συντεταγμένες (από 0 έως 1) στον χώρο του γράμματος. Στην παρούσα υλοποίηση περιλαμβάνονται τα κεφαλαία γράμματα Άλφα, Γάμα και Δέλτα, τα οποία αποτελούνται αποκλειστικά από ευθύγραμμα τμήματα. Για παράδειγμα, το Άλφα ορίζεται με τρεις γραμμές: το αριστερό σκέλος

που ανεβαίνει προς την κορυφή, το δεξί σκέλος που κατεβαίνει και την οριζόντια δοκό που τα ενώνει. Η αναπαράσταση αυτή είναι ανεξάρτητη από την κλίμακα, γεγονός που επιτρέπει την προσαρμογή του γράμματος σε οποιοδήποτε μέγεθος.

Ο διαχειριστής της εφαρμογής (LetterManager) αποτελεί τον συντονιστή ολόκληρης της λειτουργίας. Κατά τη φόρτωση ενός γράμματος, ο διαχειριστής εμφανίζει τον χαρακτήρα μέσω του συστήματος TextMesh Pro, διαβάζει τη γεωμετρία του από τα δεδομένα του glyph και υπολογίζει το επίπεδο, τον προσανατολισμό και το μέγεθός του στον τρισδιάστατο χώρο. Στη συνέχεια, με βάση τις κανονικοποιημένες συντεταγμένες της βιβλιοθήκης, δημιουργεί δυναμικά τα σημεία διαδρομής (waypoints) πάνω στο πραγματικό σχήμα του γράμματος. Το πλάτος του καναλιού και η ανοχή ως προς το επίπεδο του γράμματος υπολογίζονται αναλογικά με το ύψος του χαρακτήρα, ώστε η εμπειρία να παραμένει συνεπής ανεξάρτητα από το μέγεθος. Ο διαχειριστής παρακολουθεί επίσης τον χρόνο εκτέλεσης, αποθηκεύει τον καλύτερο χρόνο για κάθε γράμμα και ενεργοποιεί την επιβράβευση με την ολοκλήρωση.

Η κλάση διαχείρισης της διαδρομής (LetterPath) αποθηκεύει τις γραμμές γραφής ως ακολουθίες σημείων και προσφέρει τις βασικές γεωμετρικές λειτουργίες που χρειάζεται η εφαρμογή. Ειδικότερα, υπολογίζει το πλησιέστερο σημείο της διαδρομής προς μια δεδομένη θέση της γραφίδας, μετρώντας την απόσταση στο επίπεδο του γράμματος, και ελέγχει αν η γραφίδα βρίσκεται εντός του «καναλιού» του γράμματος, δηλαδή εντός μιας καθορισμένης απόστασης από τη διαδρομή και αρκετά κοντά στο επίπεδό του. Οι λειτουργίες αυτές αποτελούν τη μαθηματική βάση τόσο για την ανίχνευση της ιχνηλάτησης όσο και για τη μαγνητική καθοδήγηση.

Ο ανιχνευτής ιχνηλάτησης (LetterTracer) είναι υπεύθυνος για την παρακολούθηση της προόδου του χρήστη. Σε κάθε καρτέλα ελέγχει αν η γραφίδα βρίσκεται εντός του γράμματος και, εφόσον βρίσκεται, καταγράφει ως «επισκεφθέντα» τα σημεία διαδρομής που έχει προσεγγίσει ο χρήστης. Η πρόοδος υπολογίζεται ως το ποσοστό των επισκεφθέντων σημείων επί του συνόλου, ενώ το γράμμα ολοκληρώνεται όταν το ποσοστό αυτό φτάσει ένα κατώφλι. Ο ανιχνευτής ελέγχει επίσης το χρώμα του γράμματος, το οποίο παραμένει λευκό όταν η γραφίδα βρίσκεται εκτός, γίνεται κυανό κατά τη σωστή ιχνηλάτηση και χρυσό με την ολοκλήρωση, προσφέροντας άμεση οπτική ανάδραση.

Στον Πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται οι κλάσεις που αναπτύχθηκαν για τις ανάγκες της εφαρμογής, μαζί με τη βασική αρμοδιότητα καθεμιάς. Η κατανομή αυτή των αρμοδιοτήτων ακολουθεί την αρχή του διαχωρισμού των ενδιαφερόντων: κάθε κλάση γνωρίζει όσα χρειάζεται για τον δικό της ρόλο και επικοινωνεί με τις υπόλοιπες μέσω σαφών αναφορών, τις οποίες συνδέει αυτόματα το βοηθητικό εργαλείο ρύθμισης της σκηνής.

Πίνακας 1 Οι κλάσεις της εφαρμογής και οι αρμοδιότητές τους.

Κλάση	Αρμοδιότητα
LetterLibrary	Κεντρικός ορισμός των γραμμάτων: χαρακτήρας, ονομασία και γραμμές γραφής σε κανονικοποιημένες συντεταγμένες (A, Γ, Δ).
LetterManager	Συντονισμός της εφαρμογής: φόρτωση γράμματος, δημιουργία των σημείων διαδρομής πάνω στο glyph του TextMeshPro, χρονομέτρηση, ξεκλείδωμα επόμενου γράμματος, ήχος και δόνηση επιβράβευσης, αποθήκευση καλύτερου χρόνου.

LetterPath	Αναπαράσταση της διαδρομής ως διαδοχικών γραμμών γραφής· υπολογισμός του πλησιέστερου σημείου και έλεγχος αν η γραφίδα βρίσκεται εντός του καναλιού του γράμματος.
LetterTracer	Παρακολούθηση της ιχνηλάτησης: ανίχνευση εισόδου/εξόδου από το γράμμα, καταγραφή των σημείων που έχουν καλυφθεί, υπολογισμός ποσοστού προόδου και χρωματική ανάδραση.
MagneticSurface	Μαγνητική καθοδήγηση: ελατηριακή έλξη της φυσικής γραφίδας προς το πλησιέστερο σημείο της διαδρομής, μέσω της ανάδρασης δύναμης της συσκευής.
PenTipDriver	Αυτόματη εναλλαγή πηγής εισόδου (Geomagic Touch ή ποντίκι) και τοποθέτηση της μύτης της εικονικής γραφίδας.
LetterAppUI	Διεπαφή χρήστη σε IMGUI: μενού γραμμάτων, κατάσταση, μπάρα προόδου, χρόνοι, μήνυμα επιτυχίας και ενεργός τρόπος λειτουργίας.
LetterSceneSetup	Βοηθητικό εργαλείο του επεξεργαστή της Unity: αυτόματη ρύθμιση της φυσικής, δημιουργία των βοηθητικών αντικειμένων και διασύνδεση όλων των αναφορών με μία ενέργεια.

4.6 Αναπαράσταση του γράμματος και απτικά όρια

Κεντρικό στοιχείο της εφαρμογής αποτελεί η αναπαράσταση της διαδρομής κάθε γράμματος. Η διαδρομή ορίζεται ως ένα σύνολο διαδοχικών σημείων (waypoints) που ακολουθούν τις γραμμές γραφής του γράμματος, προσαρμοσμένων αυτόματα πάνω στο σχήμα του χαρακτήρα. Γύρω από τη διαδρομή ορίζεται ένα «κανάλι» καθορισμένου πλάτους, το οποίο αντιπροσωπεύει την περιοχή μέσα στην οποία θεωρείται ότι ο χρήστης κινείται σωστά κατά μήκος του γράμματος.

Η δημιουργία των σημείων διαδρομής (waypoints) γίνεται δυναμικά κατά τη φόρτωση κάθε γράμματος, μέσω μιας διαδικασίας δειγματοληψίας των γραμμών γραφής. Κάθε γραμμή, που ορίζεται στη βιβλιοθήκη ως μια ακολουθία κορυφών, δειγματοληπτείται σε σταθερό αριθμό ισαπεχόντων σημείων κατά μήκος της. Ο αριθμός των σημείων ανά γραμμή αποτελεί ρυθμιζόμενη παράμετρο: περισσότερα σημεία προσφέρουν λεπτομερέστερη παρακολούθηση της προόδου και ομαλότερη καθοδήγηση, με κόστος ελαφρώς υψηλότερο υπολογιστικό φορτίο. Τα σημεία αυτά μετασχηματίζονται από τις κανονικοποιημένες συντεταγμένες του γράμματος στις πραγματικές τρισδιάστατες συντεταγμένες της σκηνής, με βάση τη θέση, τον προσανατολισμό και το μέγεθος του χαρακτήρα, όπως αυτά προκύπτουν από τη γεωμετρία του glyph.

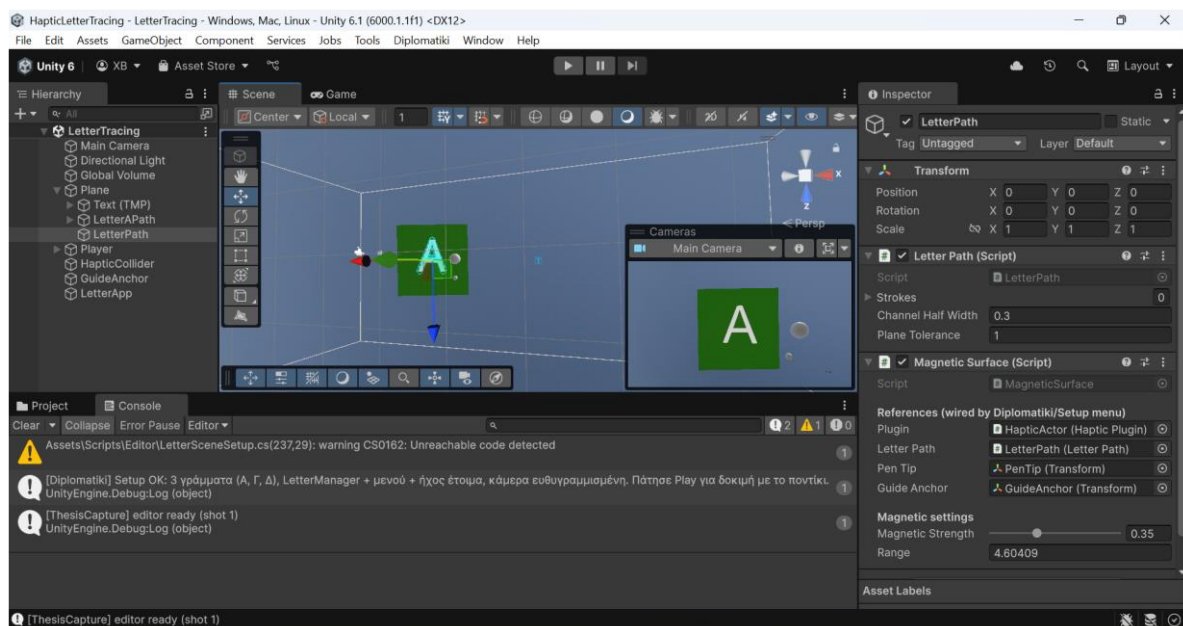
Ο υπολογισμός του πλησιέστερου σημείου της διαδρομής προς τη θέση της γραφίδας, ο οποίος αποτελεί τη βάση τόσο της ανίχνευσης όσο και της καθοδήγησης, γίνεται εξετάζοντας κάθε ευθύγραμμο τμήμα της διαδρομής ξεχωριστά. Για κάθε τμήμα υπολογίζεται η προβολή της θέσης της γραφίδας πάνω σε αυτό, περιορισμένη εντός των άκρων του, και επιλέγεται το τμήμα με τη μικρότερη απόσταση. Η απόσταση μετράται στο επίπεδο του γράμματος, αγνοώντας τη συνιστώσα που είναι κάθετη στο επίπεδο, ώστε η αξιολόγηση να αφορά μόνο την οριζόντια θέση της γραφίδας σε σχέση με τη διαδρομή. Με τον τρόπο αυτό, ο χρήστης μπορεί να αιωρεί ελαφρώς τη γραφίδα πάνω από τον πίνακα χωρίς να θεωρείται ότι έχει βγει από το γράμμα.

Για την υποστήριξη των ατόμων με δυσκολίες λεπτής κινητικότητας, η εφαρμογή αξιοποιεί την ανάδραση δύναμης της συσκευής Touch ώστε να καθοδηγεί το χέρι του χρήστη κατά μήκος της διαδρομής. Όταν η γραφίδα βρίσκεται κοντά στο γράμμα, εφαρμόζεται μια ελεγχόμενη δύναμη έλξης

προς το πλησιέστερο σημείο της διαδρομής, η οποία λειτουργεί ως «μαγνητικός» οδηγός. Ο μηχανισμός αυτός βοηθά τον χρήστη να παραμένει εντός των ορίων του γράμματος, μειώνει την επίδραση ακούσιων κινήσεων ή τρόμου και καθιστά τη διαδικασία γραφής πιο σταθερή και ελεγχόμενη. Παράλληλα, η τριβή και η σκληρότητα της επιφάνειας αποδίδουν την αίσθηση της υφής της διαδρομής, ενισχύοντας τον ρεαλισμό της εμπειρίας.

Ο μηχανισμός της μαγνητικής καθοδήγησης υλοποιείται από την κλάση της μαγνητικής επιφάνειας (MagneticSurface), η οποία αξιοποιεί το καθολικό ελατήριο (global spring) της βιβλιοθήκης OpenHaptics. Σε κάθε κύκλο της φυσικής (FixedUpdate), η κλάση υπολογίζει το πλησιέστερο σημείο της διαδρομής προς τη θέση της γραφίδας και τοποθετεί εκεί ένα κινούμενο «άγκυρα» (anchor). Στη συνέχεια, ενεργοποιεί το ελατήριο της συσκευής με άγκυρα το σημείο αυτό, με αποτέλεσμα η συσκευή να ασκεί στη γραφίδα μια δύναμη ανάλογη της απόστασης, η οποία την έλκει προς τη σωστή διαδρομή. Η ένταση της έλξης ρυθμίζεται μέσω μιας παραμέτρου, ενώ όταν η γραφίδα απομακρύνεται πέρα από μια καθορισμένη ακτίνα η δύναμη απενεργοποιείται, ώστε ο χρήστης να μπορεί να κινείται ελεύθερα εκτός του γράμματος.

Σημαντικό στοιχείο του σχεδιασμού είναι ότι η μαγνητική καθοδήγηση ενεργοποιείται μόνο όταν η συσκευή Geomagic Touch είναι πράγματι συνδεδεμένη. Όταν η εφαρμογή εκτελείται χωρίς τη συσκευή, σε λειτουργία ποντικιού, το ελατήριο παραμένει απενεργοποιημένο, καθώς δεν υπάρχει φυσικός μηχανισμός απόδοσης δυνάμεων. Ο έλεγχος αυτός γίνεται μέσω της κατάστασης σύνδεσης της συσκευής, εξασφαλίζοντας ότι ο ίδιος κώδικας λειτουργεί σωστά και στις δύο περιπτώσεις.



Εικόνα 15 Η διαδρομή του γράμματος όπως δημιουργείται στη σκηνή: τα διαδοχικά σημεία (waypoints) κάθε γραμμής γραφής και το κανάλι ανοχής γύρω από αυτά (κυανά βοηθητικά σχήματα). Δεξιά, στον επιθεωρητή, οι παράμετροι του LetterPath (πλάτος καναλιού, ανοχή επιπέδο

Η οπτικοποίηση αυτή αποδείχθηκε ιδιαίτερα χρήσιμη κατά την ανάπτυξη, καθώς επιτρέπει τον άμεσο έλεγχο του κατά πόσο η δημιουργούμενη διαδρομή ακολουθεί πιστά το σχήμα του γράμματος και του κατά πόσο το πλάτος του καναλιού είναι το κατάλληλο. Ένα υπερβολικά στενό κανάλι καθιστά την άσκηση απογοητευτική, ιδίως για χρήστες με μειωμένη ακρίβεια κίνησης, ενώ ένα υπερβολικά πλατύ κανάλι εκμηδενίζει την απαίτηση ακρίβειας και, συνεπώς, την εκπαιδευτική αξία της άσκησης. Μετά

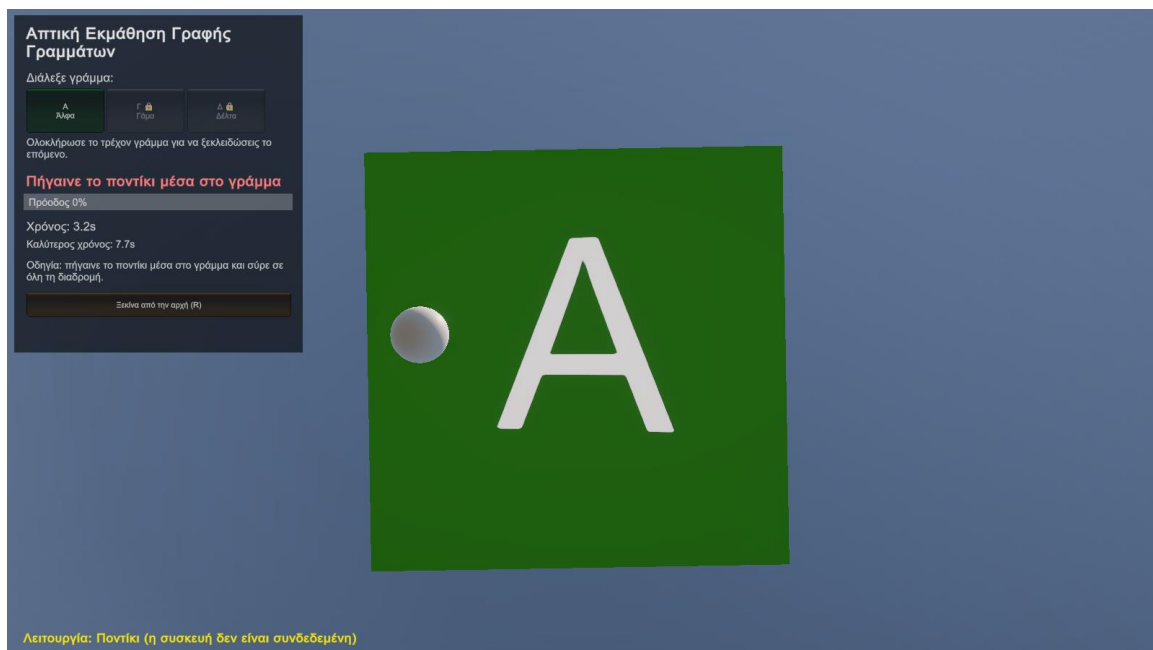
από δοκιμές, το ημιπλάτος του καναλιού ορίστηκε ως ποσοστό του ύψους του γράμματος, ώστε να κλιμακώνεται αυτόματα όταν αλλάζει το μέγεθος του γράμματος.

4.7 Οπτική, ηχητική και απτική ανατροφοδότηση

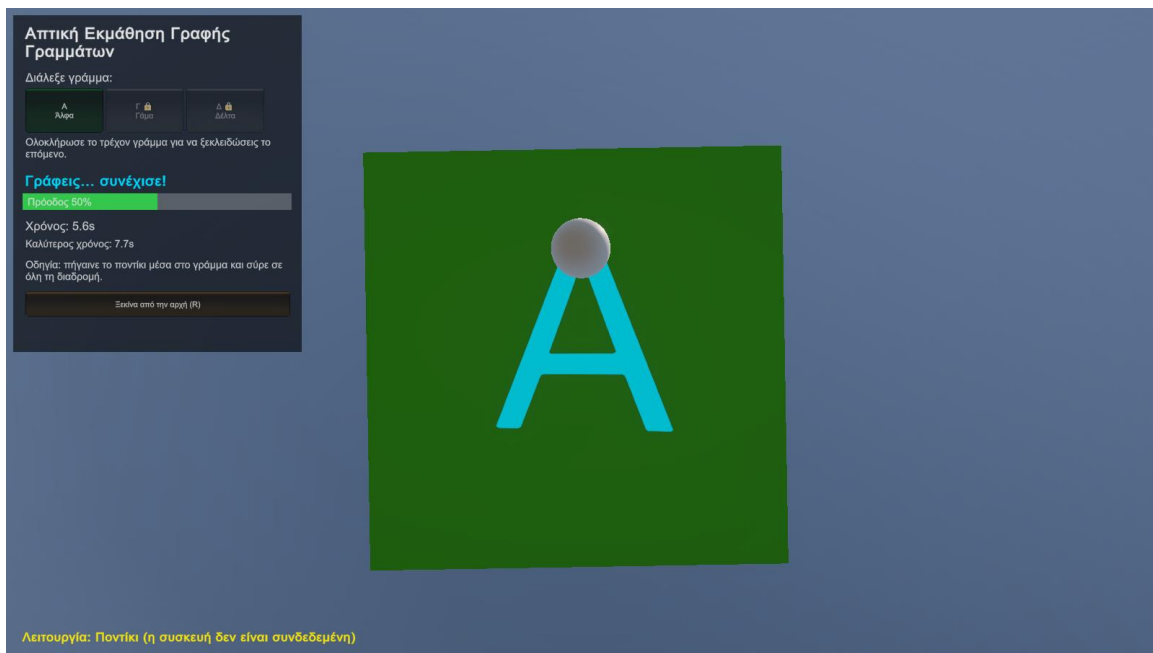
Η εφαρμογή παρέχει πολυαισθητηριακή ανατροφοδότηση, καθώς έρευνες στον χώρο της απτικής αλληλεπίδρασης καταδεικνύουν ότι ο συνδυασμός ερεθισμάτων ενισχύει τη μάθηση και την εμπέδωση [3]. Σε οπτικό επίπεδο, το γράμμα αλλάζει χρώμα ανάλογα με την ενέργεια του χρήστη: παραμένει λευκό όταν η γραφίδα βρίσκεται εκτός του γράμματος, γίνεται κυανό όσο ο χρήστης κινείται σωστά μέσα στο κανάλι και τέλος χρυσό όταν ολοκληρωθεί επιτυχώς η ιχνηλάτηση.

Η πρόοδος του χρήστη παρακολουθείται σε πραγματικό χρόνο και εμφανίζεται ως ποσοστό ολοκλήρωσης, ενώ καταγράφεται και ο χρόνος εκτέλεσης καθώς και ο καλύτερος χρόνος για κάθε γράμμα. Με την ολοκλήρωση του γράμματος, ο χρήστης επιβραβεύεται τόσο ηχητικά, μέσω ενός σύντομου μουσικού μοτίβου, όσο και απτικά, μέσω μιας σύντομης δόνησης της συσκευής Touch. Η συνδυασμένη αυτή επιβράβευση ενισχύει το κίνητρο και προσφέρει σαφή ένδειξη επιτυχίας, στοιχείο ιδιαίτερα σημαντικό σε εκπαιδευτικές εφαρμογές που απευθύνονται σε ευάλωτες ομάδες.

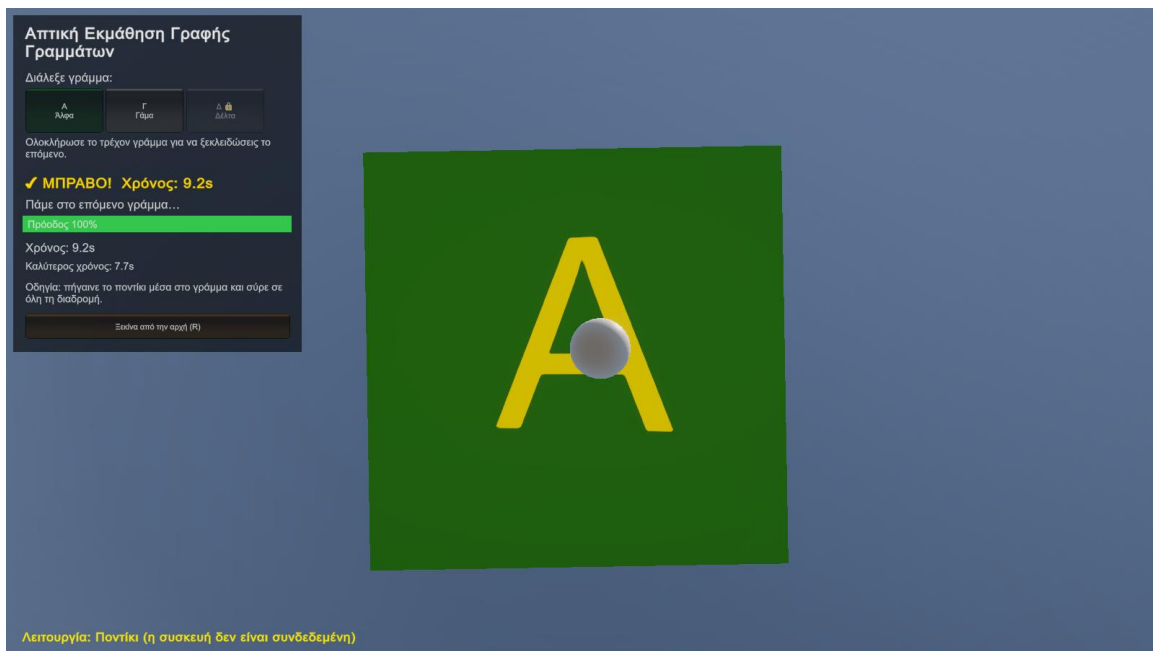
Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται στιγμιότυπα της εφαρμογής σε λειτουργία, τα οποία αποτυπώνουν τις τρεις διακριτές καταστάσεις της ανατροφοδότησης. Στην αρχική κατάσταση το γράμμα εμφανίζεται λευκό και η διεπαφή προτρέπει τον χρήστη να μεταφέρει τη γραφίδα μέσα στο γράμμα, ενώ η μπάρα προόδου βρίσκεται στο μηδέν. Μόλις η γραφίδα εισέλθει στο κανάλι, το γράμμα αλλάζει χρώμα και η ένδειξη κατάστασης επιβεβαιώνει στον χρήστη ότι κινείται σωστά, με την μπάρα προόδου να συμπληρώνεται σταδιακά όσο καλύπτονται τα σημεία της διαδρομής. Τέλος, με την κάλυψη ολόκληρης της διαδρομής το γράμμα γίνεται χρυσό, εμφανίζεται το μήνυμα επιβράβευσης μαζί με τον χρόνο ολοκλήρωσης και ταυτόχρονα αναπαράγεται το ηχητικό μοτίβο επιβράβευσης, ενώ —εφόσον η συσκευή είναι συνδεδεμένη— εκτελείται και η σύντομη δόνηση.



Εικόνα 16 Η εφαρμογή κατά την έναρξη: το γράμμα Άλφα εμφανίζεται λευκό, η γραφίδα βρίσκεται εκτός του γράμματος και η πρόοδος είναι μηδενική. Αριστερά διακρίνεται το μενού επιλογής γράμματος, με τα επόμενα γράμματα κλειδωμένα.



Εικόνα 17 Ιχνηλάτηση σε εξέλιξη: όσο η γραφίδα κινείται εντός του καναλιού το γράμμα αλλάζει χρώμα, η ένδειξη κατάστασης ενθαρρύνει τον χρήστη και η μπάρα προόδου συμπληρώνεται σταδιακά.



Εικόνα 18 Ολοκλήρωση του γράμματος Άλφα: το γράμμα γίνεται χρυσό, εμφανίζεται το μήνυμα επιβράβευσης με τον χρόνο ολοκλήρωσης και ξεκλειδώνεται το επόμενο γράμμα.

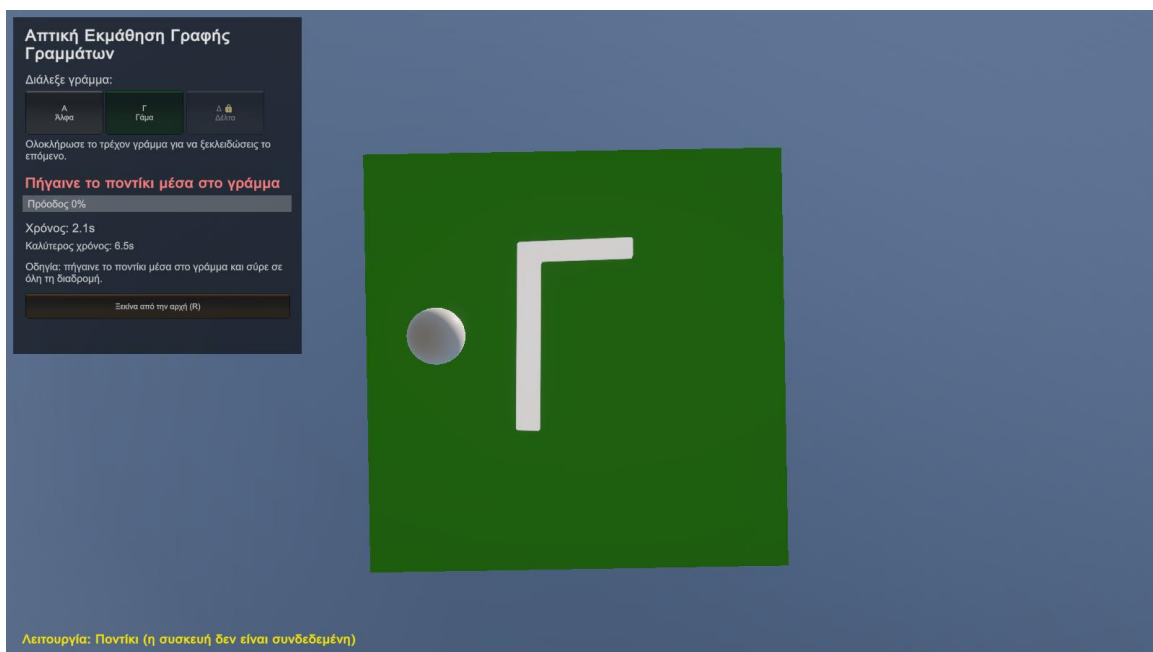
Η επιλογή να συνδυάζονται τρία διαφορετικά κανάλια ανατροφοδότησης —χρώμα, ήχος και δόνηση— δεν είναι τυχαία. Ο χρήστης στον οποίο απευθύνεται η εφαρμογή ενδέχεται να δυσκολεύεται να παρακολουθεί ταυτόχρονα την κίνηση του χεριού του και μια αριθμητική ένδειξη προόδου· η άμεση χρωματική αλλαγή του ίδιου του γράμματος τοποθετεί την πληροφορία ακριβώς εκεί όπου βρίσκεται ήδη η προσοχή του, ενώ ο ήχος και η δόνηση λειτουργούν ως σαφής, μη διφορούμενη επιβεβαίωση της επιτυχίας.

4.8 Υποστήριξη πολλαπλών γραμμάτων και διεπαφή χρήστη

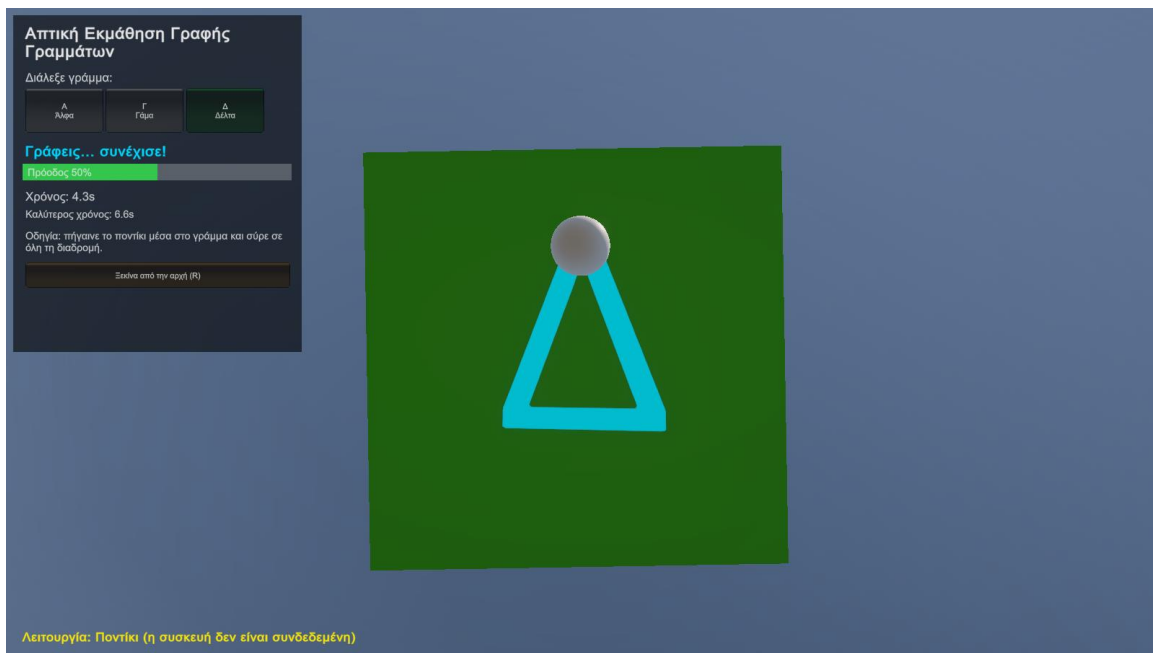
Η αρχιτεκτονική της εφαρμογής σχεδιάστηκε ώστε να υποστηρίζει πολλαπλά γράμματα χωρίς ανάγκη δημιουργίας ξεχωριστής σκηνής για το καθένα. Τα γράμματα ορίζονται σε μια κεντρική βιβλιοθήκη ως σύνολα γραμμών γραφής και φορτώνονται δυναμικά κατά την εκτέλεση. Στην παρούσα υλοποίηση περιλαμβάνονται τα κεφαλαία γράμματα Άλφα (Α), Γάμα (Γ) και Δέλτα (Δ), τα οποία αποτελούνται από ευθύγραμμα τμήματα και προσφέρονται για καθαρή ιχνηλάτηση.

Ο χρήστης επιλέγει το γράμμα που επιθυμεί να εξασκήσει μέσα από ένα απλό γραφικό μενού, το οποίο εμφανίζει τα διαθέσιμα γράμματα, την τρέχουσα πρόοδο, τον χρόνο και επιλογή επανεκκίνησης. Η διεπαφή σχεδιάστηκε ώστε να είναι πλήρως προσαρμόσιμη (responsive), κλιμακούμενη αναλογικά με το ύψος της οθόνης, ώστε να εμφανίζεται σωστά σε κάθε ανάλυση και αναλογία οθόνης υπολογιστή.

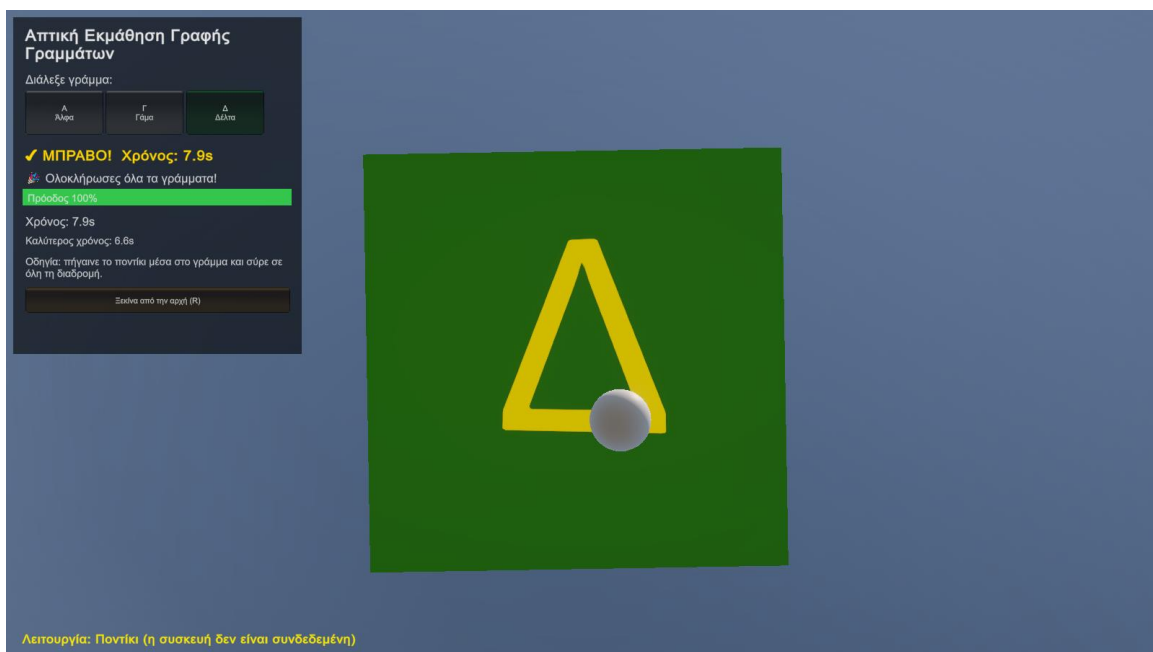
Η εναλλαγή των γραμμάτων παρουσιάζεται στις εικόνες που ακολουθούν. Με την ολοκλήρωση ενός γράμματος ξεκλειδώνεται και φορτώνεται αυτόματα το επόμενο, ενώ το μενού ενημερώνεται ώστε ο χρήστης να μπορεί πλέον να επιστρέψει ελεύθερα σε όποιο από τα ήδη ξεκλειδωμένα γράμματα επιθυμεί. Ο μηχανισμός της σταδιακής αποδέσμευσης επιλέχθηκε ώστε η εξάσκηση να ακολουθεί μια σαφή, αυξανόμενης δυσκολίας πορεία, χωρίς όμως να στερεί από τον χρήστη τη δυνατότητα επανάληψης ενός γράμματος που ήδη κατέκτησε.



Εικόνα 19 Αυτόματη μετάβαση στο γράμμα Γάμα μετά την ολοκλήρωση του Άλφα· το μενού εμφανίζει πλέον ξεκλειδωτά δύο γράμματα και τον καλύτερο χρόνο του χρήστη.



Εικόνα 20 Ιχνηλάτηση του τρίτου γράμματος (Δέλτα), το οποίο αποτελείται από τρεις γραμμές γραφής και απαιτεί μεγαλύτερο έλεγχο της κίνησης· η μπάρα προόδου δείχνει το ποσοστό της διαδρομής που έχει καλυφθεί.



Εικόνα 21 Ολοκλήρωση και των τριών γραμμάτων: η εφαρμογή εμφανίζει το τελικό μήνυμα επιβράβευσης και τον χρόνο της τελευταίας προσπάθειας.

4.9 Λειτουργία με ποντίκι και με τη συσκευή Geomagic Touch

Η εφαρμογή υποστηρίζει δύο τρόπους αλληλεπίδρασης, με αυτόματη εναλλαγή ανάλογα με τη διαθεσιμότητα του εξοπλισμού. Όταν η συσκευή Geomagic Touch είναι συνδεδεμένη, η εικονική γραφίδα ακολουθεί την κίνηση της φυσικής γραφίδας και ο χρήστης απολαμβάνει την πλήρη απτική εμπειρία, με ανάδραση δύναμης, μαγνητική καθοδήγηση και δόνηση επιβράβευσης. Όταν η συσκευή

δεν είναι συνδεδεμένη, η εφαρμογή περνά αυτόματα σε λειτουργία ποντικιού, όπου η γραφίδα ακολουθεί τον δείκτη του ποντικιού πάνω στον πίνακα.

Η αυτόματη εναλλαγή μεταξύ των δύο τρόπων λειτουργίας υλοποιείται από τον οδηγό της γραφίδας (PenTipDriver). Σε κάθε καρέ, ο οδηγός ελέγχει αν η συσκευή είναι συνδεδεμένη· εφόσον είναι, η θέση της εικονικής γραφίδας ταυτίζεται με τη θέση του απτικού δείκτη της συσκευής. Σε αντίθετη περίπτωση, ο οδηγός προβάλλει τη θέση του δείκτη του ποντικιού πάνω στο επίπεδο του εικονικού πίνακα, μέσω μιας ακτίνας (raycast), και τοποθετεί εκεί τη γραφίδα, με μια μικρή απόσταση αιώρησης πάνω από την επιφάνεια. Ο σχεδιασμός αυτός εξασφαλίζει ότι η οπτική συμπεριφορά της εφαρμογής παραμένει πανομοιότυπη και στους δύο τρόπους, με μοναδική διαφορά την απουσία των δυνάμεων ανάδρασης στη λειτουργία ποντικιού.

4.10 Επιβράβευση και διεπαφή χρήστη

Η επιβράβευση της επιτυχούς ολοκλήρωσης ενός γράμματος συνδυάζει ηχητική και απτική ανάδραση. Το ηχητικό ερέθισμα παράγεται προγραμματιστικά, χωρίς τη χρήση εξωτερικού αρχείου ήχου: πρόκειται για ένα σύντομο μουσικό μοτίβο δύο νοτών, το οποίο δημιουργείται σε πραγματικό χρόνο ως ημιτονοειδές κύμα με φθίνουσα περιβάλλουσα. Παράλληλα, εφόσον η συσκευή είναι συνδεδεμένη, ενεργοποιείται μια σύντομη δόνηση ελεγχόμενης έντασης, συχνότητας και διάρκειας, η οποία προσφέρει σωματική επιβεβαίωση της επιτυχίας. Ο συνδυασμός των δύο ερεθισμάτων ενισχύει το αίσθημα ικανοποίησης και λειτουργεί ως θετική ενίσχυση για τη συνέχιση της εξάσκησης.

Η προγραμματιστική παραγωγή του ηχητικού ερεθίσματος επιλέχθηκε αντί της χρήσης έτοιμου αρχείου ήχου για λόγους απλότητας και φορητότητας. Ο ήχος επιβράβευσης συντίθεται σε πραγματικό χρόνο ως ένα σύντομο μοτίβο δύο διαδοχικών νοτών, με τη συχνότητα κάθε νότας να αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο μουσικό τόνο και το πλάτος να φθίνει εκθετικά, δημιουργώντας μια φυσική, «κωδωνοειδή» απόσβεση. Ο τρόπος αυτός εξασφαλίζει ότι η εφαρμογή δεν εξαρτάται από εξωτερικά αρχεία πολυμέσων και ότι το ηχητικό ερέθισμα είναι πάντοτε συνεπές και άμεσα διαθέσιμο.

Η καταγραφή της επίδοσης υλοποιείται μέσω του μηχανισμού μόνιμης αποθήκευσης της Unity, ο οποίος διατηρεί τον καλύτερο χρόνο ολοκλήρωσης για κάθε γράμμα ακόμη και μετά το κλείσιμο της εφαρμογής. Κάθε φορά που ο χρήστης ολοκληρώνει ένα γράμμα, ο χρόνος του συγκρίνεται με τον αποθηκευμένο καλύτερο χρόνο και, εφόσον είναι μικρότερος, καταγράφεται ως νέο ρεκόρ. Ο μηχανισμός αυτός εισάγει ένα διακριτικό στοιχείο πρόκλησης και αυτοβελτίωσης, ενθαρρύνοντας τον χρήστη να επαναλάβει την άσκηση προσπαθώντας να βελτιώσει την επίδοσή του, χωρίς ωστόσο να εισάγει ανταγωνιστική πίεση που θα μπορούσε να αποθαρρύνει ευάλωτους χρήστες.

Η διεπαφή χρήστη σχεδιάστηκε με γνώμονα την απλότητα και την προσβασιμότητα. Υλοποιείται μέσω του συστήματος άμεσης απεικόνισης (IMGUI) της Unity, γεγονός που της επιτρέπει να λειτουργεί χωρίς την ανάγκη ξεχωριστού καμβά ή συστήματος συμβάντων και ανεξάρτητα από το σύστημα εισόδου. Η διεπαφή εμφανίζει τον τίτλο της εφαρμογής, το μενού επιλογής γράμματος με ένδειξη του τρέχοντος γράμματος και του καλύτερου χρόνου, την τρέχουσα κατάσταση, μια μπάρα προόδου, τον χρονομετρητή, το μήνυμα επιτυχίας και τον ενεργό τρόπο λειτουργίας (ποντίκι ή Geomagic Touch). Ένα ιδιαίτερα σημαντικό χαρακτηριστικό είναι ότι όλη η διεπαφή σχεδιάζεται σε μια αναλογία αναφοράς και κλιμακώνεται αυτόματα με βάση το ύψος της οθόνης, ώστε να εμφανίζεται σωστά και με σταθερές αναλογίες σε κάθε ανάλυση, από 720p έως 4K, και σε οποιαδήποτε αναλογία οθόνης.

Η αλληλεπίδραση με την εφαρμογή είναι δυνατή τόσο μέσω των πλήκτρων του μενού όσο και μέσω συντομεύσεων πληκτρολογίου: τα αριθμητικά πλήκτρα επιλέγουν το αντίστοιχο γράμμα, ενώ το

πλήκτρο επανεκκίνησης επαναφέρει το τρέχον γράμμα. Οι εναλλακτικοί αυτοί τρόποι ελέγχου αυξάνουν την προσβασιμότητα της εφαρμογής, επιτρέποντας σε διαφορετικές κατηγορίες χρηστών να τη χειρίζονται με τον τρόπο που τους εξυπηρετεί καλύτερα.

4.11 Η ροή χρήσης της εφαρμογής

Συνοψίζοντας τη λειτουργία της εφαρμογής από τη σκοπιά του χρήστη, η τυπική ροή μιας συνεδρίας εξάσκησης έχει ως εξής. Με την εκκίνηση, η εφαρμογή ανιχνεύει αυτόματα αν η συσκευή Geomagic Touch είναι συνδεδεμένη και ενημερώνει σχετικά τον χρήστη στο κάτω μέρος της οθόνης· στη συνέχεια φορτώνει το πρώτο γράμμα και δημιουργεί τη διαδρομή του πάνω στο σχήμα του γλυφής. Ο χρήστης πιάνει τη γραφίδα και την κατευθύνει προς τον εικονικό πίνακα. Όταν η γραφίδα πλησιάσει το γράμμα, η ελατηριακή δύναμη της μαγνητικής καθοδήγησης αρχίζει να την έλκει προς την πλησιέστερη γραμμή γραφής, βοηθώντας τον χρήστη να «κουμπώσει» στη σωστή διαδρομή. Μόλις η γραφίδα εισέλθει στο κανάλι, το γράμμα αλλάζει χρώμα και η καταγραφή της προόδου ξεκινά.

Ο χρήστης ακολουθεί τη διαδρομή του γράμματος· κάθε σημείο που προσεγγίζει καταγράφεται ως καλυμμένο και η μπάρα προόδου ανεβαίνει. Αν απομακρυνθεί, η δύναμη τον επαναφέρει ήπια, ενώ το γράμμα επιστρέφει στο ουδέτερο χρώμα του, δίνοντας άμεση ένδειξη ότι η κίνηση βγήκε εκτός πορείας. Με την κάλυψη όλων των σημείων, η άσκηση θεωρείται ολοκληρωμένη: το γράμμα γίνεται χρυσό, ακούγεται ο ήχος επιβράβευσης, εκτελείται η δόνηση, καταγράφεται ο χρόνος και, εφόσον είναι καλύτερος από τον προηγούμενο, αποθηκεύεται ως νέα καλύτερη επίδοση. Μετά από μια σύντομη παύση, η εφαρμογή προχωρά αυτόματα στο επόμενο γράμμα. Ο χρήστης μπορεί ανά πάσα στιγμή να επαναλάβει το τρέχον γράμμα ή να επιστρέψει σε προηγούμενο, τόσο από το μενού όσο και με συντομεύσεις πληκτρολογίου.

4.12 Διαδικασία ανάπτυξης και δοκιμών

Η ανάπτυξη της εφαρμογής ακολούθησε μια επαναληπτική διαδικασία, στην οποία κάθε νέα λειτουργία υλοποιούνταν, δοκιμαζόταν και βελτιωνόταν πριν από την προσθήκη της επόμενης. Η δυνατότητα λειτουργίας με ποντίκι, χωρίς τη φυσική παρουσία της απτικής συσκευής, αποδείχθηκε καθοριστική για τη διαδικασία αυτή. Επέτρεψε τον έλεγχο του συνόλου της λογικής της εφαρμογής —της κίνησης της γραφίδας, της ανίχνευσης εισόδου και εξόδου από το γράμμα, της αλλαγής χρώματος, της παρακολούθησης της προόδου, της χρονομέτρησης, του ήχου και της διεπαφής— σε οποιονδήποτε υπολογιστή, ανεξάρτητα από τη διαθεσιμότητα της συσκευής Touch.

Οι δοκιμές που αφορούσαν την απτική ανάδραση, ωστόσο, μπορούσαν να πραγματοποιηθούν μόνο με τη φυσική συσκευή, καθώς δεν υπάρχει επίσημο λογισμικό προσομοίωσης των δυνάμεων. Κατά τις δοκιμές αυτές ελέγχθηκε η ένταση της μαγνητικής καθοδήγησης, ώστε να είναι αρκετά ισχυρή για να υποστηρίζει τον χρήστη αλλά όχι τόσο ώστε να καταργεί την αίσθηση ελέγχου, καθώς και η συμπεριφορά της δόνησης επιβράβευσης. Η ρύθμιση των παραμέτρων έγινε εμπειρικά, με στόχο μια εμπειρία που να είναι ταυτόχρονα υποστηρικτική και ενθαρρυντική.

Παράλληλα με τις λειτουργικές δοκιμές, δόθηκε προσοχή στην απόδοση της εφαρμογής. Επειδή τόσο ο απτικός βρόχος όσο και ο βρόχος της φυσικής της Unity εκτελούνται με υψηλή συχνότητα, οι υπολογισμοί που πραγματοποιούνται σε κάθε κύκλο —όπως η εύρεση του πλησιέστερου σημείου της διαδρομής— σχεδιάστηκαν ώστε να είναι υπολογιστικά ελαφροί. Η επιλογή γραμμάτων που αποτελούνται από λίγα ευθύγραμμα τμήματα συμβάλλει επίσης στη διατήρηση χαμηλού υπολογιστικού φορτίου, εξασφαλίζοντας ομαλή και αδιάλειπτη λειτουργία.

4.13 Επεκτασιμότητα και εργαλεία ανάπτυξης

Ένα από τα βασικά σχεδιαστικά κριτήρια της εφαρμογής ήταν η ευκολία επέκτασής της με νέα γράμματα, χωρίς ανάγκη τροποποίησης του βασικού κώδικα ή δημιουργίας νέων σκηνών. Ο στόχος αυτός επιτεύχθηκε χάρη στον διαχωρισμό μεταξύ του ορισμού των γραμμάτων, που συγκεντρώνεται στη βιβλιοθήκη γραμμάτων, και της λογικής της εφαρμογής, που παραμένει ανεξάρτητη από το συγκεκριμένο περιεχόμενο. Για να προστεθεί ένα νέο γράμμα, αρκεί η προσθήκη ενός ορισμού στη βιβλιοθήκη, με τον χαρακτήρα, την ονομασία και τις γραμμές γραφής του σε κανονικοποιημένες συντεταγμένες· ο υπόλοιπος μηχανισμός —η δημιουργία των σημείων, η ανίχνευση, η καθοδήγηση και η διεπαφή— λειτουργεί αυτόματα με το νέο γράμμα.

Για την επιτάχυνση της διαδικασίας ρύθμισης της σκηνής αναπτύχθηκε ένα βοηθητικό εργαλείο, το οποίο ενσωματώνεται στο περιβάλλον επεξεργασίας της Unity μέσω ενός ειδικού μενού. Το εργαλείο αυτό αναλαμβάνει την αυτόματη δημιουργία και τη διασύνδεση των απαραίτητων αντικειμένων της σκηνής —του πίνακα, του κειμένου του γράμματος, της γραφίδας, της κάμερας και των συνιστωσών λογικής— καθώς και τη σωστή αντιστοίχιση των αναφορών μεταξύ τους. Με τον τρόπο αυτό, η προετοιμασία μιας λειτουργικής σκηνής, που διαφορετικά θα απαιτούσε πολλά χειροκίνητα βήματα και θα ήταν επιρρεπής σε σφάλματα, ολοκληρώνεται με μία μόνο ενέργεια, γεγονός που διευκολύνει σημαντικά τόσο την ανάπτυξη όσο και τη μελλοντική συντήρηση της εφαρμογής.

Η αρθρωτή αυτή αρχιτεκτονική προσφέρει επιπλέον το πλεονέκτημα ότι επιμέρους λειτουργίες μπορούν να αντικατασταθούν ή να επεκταθούν ανεξάρτητα. Για παράδειγμα, ο μηχανισμός δειγματοληψίας της διαδρομής θα μπορούσε να επεκταθεί ώστε να υποστηρίζει καμπύλες, ο μηχανισμός καθοδήγησης θα μπορούσε να αποκτήσει προσαρμοστική ένταση και η διεπαφή θα μπορούσε να εμπλουτιστεί με νέα στοιχεία, χωρίς καμία από αυτές τις αλλαγές να επηρεάζει τις υπόλοιπες. Η ιδιότητα αυτή καθιστά την εφαρμογή μια σταθερή βάση για μελλοντικές επεκτάσεις και ερευνητικές δοκιμές.

Η δυνατότητα αυτή αποδείχθηκε ιδιαίτερα χρήσιμη κατά την ανάπτυξη, καθώς επέτρεψε τον έλεγχο του συνόλου της λογικής και της οπτικής συμπεριφοράς της εφαρμογής —κίνηση της γραφίδας, ανίχνευση εισόδου/εξόδου από το γράμμα, αλλαγή χρώματος, πρόοδος, χρονομέτρηση, ήχος και μενού— χωρίς τη φυσική παρουσία της απτικής συσκευής. Η αίσθηση της δύναμης, ωστόσο, μπορεί να αξιολογηθεί μόνο με την πραγματική συσκευή, καθώς δεν υφίσταται λογισμικό προσομοίωσης της απτικής ανάδρασης.

4.14 Επίλογος

Συνοψίζοντας, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε η πλήρης σχεδίαση και υλοποίηση της εφαρμογής, από τα εργαλεία ανάπτυξης και τη δομή του εικονικού περιβάλλοντος έως τους μηχανισμούς απτικής καθοδήγησης και πολυαισθητηριακής ανατροφοδότησης. Η εφαρμογή που προέκυψε καλύπτει τον βασικό στόχο της εργασίας, προσφέροντας ένα ασφαλές, ελεγχόμενο και ενθαρρυντικό περιβάλλον εξάσκησης στη γραφή γραμμάτων για άτομα με δυσκολίες λεπτής κινητικότητας.

Κεφάλαιο 5ο: Πειραματική αξιολόγηση της εφαρμογής

Στο κεφάλαιο αυτό προτείνεται το πλαίσιο της πειραματικής αξιολόγησης της εφαρμογής. Παρουσιάζονται τα ερευνητικά ερωτήματα, ο σχεδιασμός των πειραμάτων, οι συνθήκες σύγκρισης, οι προτεινόμενες μετρικές και το πρωτόκολλο διεξαγωγής. Παράλληλα, παρουσιάζονται οι προτεινόμενες πιλοτικές δοκιμές, οι πίνακες στους οποίους μπορούν να καταγραφούν τα αποτελέσματα και η προτεινόμενη ποιοτική αξιολόγηση της εμπειρίας των χρηστών.

5.1 Σκοπός και ερευνητικά ερωτήματα

Σκοπός της πειραματικής αξιολόγησης είναι να διερευνηθεί κατά πόσο η απτική ανάδραση δύναμης προσφέρει μετρήσιμο όφελος στην καθοδηγούμενη εξάσκηση της γραφής, σε σύγκριση με την ίδια εφαρμογή χωρίς απτική υποστήριξη. Διατυπώνονται τρία ερευνητικά ερωτήματα. Το πρώτο αφορά την επίδοση: επηρεάζει η απτική καθοδήγηση τον χρόνο ολοκλήρωσης και την ακρίβεια της ιχνηλάτησης; Το δεύτερο αφορά τη μάθηση: βελτιώνεται η επίδοση του χρήστη με την επανάληψη και διατηρείται η βελτίωση αυτή όταν η απτική υποστήριξη αφαιρεθεί; Το τρίτο αφορά την εμπειρία: πώς βιώνουν οι χρήστες την απτική καθοδήγηση σε σχέση με την αίσθηση ελέγχου, την προσπάθεια που καταβάλλουν και την ευχαρίστηση από τη χρήση;

5.2 Συνθήκες του πειράματος

Η εφαρμογή σχεδιάστηκε εξ αρχής ώστε να υποστηρίζει τη σύγκριση διαφορετικών τρόπων αλληλεπίδρασης χωρίς καμία τροποποίηση του κώδικα. Η εναλλαγή μεταξύ ποντικιού και συσκευής Geomagic Touch γίνεται αυτόματα, ενώ η ένταση της μαγνητικής καθοδήγησης είναι ρυθμιζόμενη παράμετρος και μπορεί να μηδενιστεί, δίνοντας μια συνθήκη χρήσης της συσκευής χωρίς υποστηρικτικές δυνάμεις. Έτσι ορίζονται τρεις συνθήκες, οι οποίες συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 2 Οι συνθήκες σύγκρισης της πειραματικής αξιολόγησης.

Συνθήκη	Συσκευή εισόδου	Απτική ανάδραση	Ρόλος
Σ1 — Ποντίκι	Ποντίκι υπολογιστή	Καμία	Συνθήκη αναφοράς (baseline)
Σ2 — Touch χωρίς καθοδήγηση	Geomagic Touch	Μόνο επαφή με τον πίνακα	Απομόνωση της επίδρασης της τρισδιάστατης γραφίδας
Σ3 — Touch με μαγνητική καθοδήγηση	Geomagic Touch	Επαφή και ελατηριακή έλξη προς τη διαδρομή	Πλήρης απτική υποστήριξη

Η σειρά με την οποία κάθε συμμετέχων εκτελεί τις τρεις συνθήκες εναλλάσσεται (counterbalancing), ώστε να εξουδετερωθεί η επίδραση της εξοικείωσης και της κόπωσης στα αποτελέσματα. Κάθε συνθήκη περιλαμβάνει τα τρία γράμματα της εφαρμογής (Α, Γ, Δ), με τρεις διαδοχικές προσπάθειες ανά γράμμα.

5.3 Μετρικές αξιολόγησης

Οι ποσοτικές μετρικές προκύπτουν απευθείας από τους μηχανισμούς που ήδη ενσωματώνει η εφαρμογή: τον χρονομετρητή, τον μετρητή προόδου, την καταγραφή των σημείων που έχουν καλυφθεί και την ανίχνευση εισόδου και εξόδου από το κανάλι του γράμματος. Οι υποκειμενικές μετρικές συλλέγονται με σύντομο ερωτηματολόγιο πενταβάθμιας κλίμακας Likert αμέσως μετά από κάθε συνθήκη, συνοδευόμενο από μια σύντομη ημιδομημένη συνέντευξη.

Πίνακας 3 Οι μετρικές που καταγράφονται κατά την αξιολόγηση.

Μετρική	Ορισμός	Πηγή
Χρόνος ολοκλήρωσης	Δευτερόλεπτα από την είσοδο στο γράμμα έως την κάλυψη όλων των σημείων της διαδρομής.	Χρονομετρητής της εφαρμογής
Ποσοστό κάλυψης	Ποσοστό των σημείων της διαδρομής που καλύφθηκαν σε δεδομένο χρόνο.	Μετρητής προόδου
Αριθμός εξόδων	Πόσες φορές η γραφίδα βγήκε εκτός του καναλιού κατά τη διάρκεια της προσπάθειας.	Ανιχνευτής ιχνηλάτησης
Καλύτερος χρόνος	Η καλύτερη επίδοση ανά γράμμα, ως δείκτης βελτίωσης με την επανάληψη.	Μόνιμη αποθήκευση επιδόσεων
Αντιληπτή προσπάθεια	Υποκειμενική εκτίμηση της απαιτούμενης προσπάθειας (κλίμακα 1–5).	Ερωτηματολόγιο
Αίσθηση ελέγχου	Κατά πόσο ο χρήστης αισθάνεται ότι ελέγχει την κίνηση και δεν οδηγείται από τη συσκευή (1–5).	Ερωτηματολόγιο
Ευχαρίστηση / κίνητρο	Κατά πόσο η εμπειρία ήταν ευχάριστη και ενθαρρύνει την επανάληψη (1–5).	Ερωτηματολόγιο

5.4 Συμμετέχοντες και προτεινόμενο πρωτόκολλο διεξαγωγής

Η αξιολόγηση προτείνεται να πραγματοποιηθεί σε δείγμα δώδεκα ενήλικων συμμετεχόντων χωρίς προηγούμενη εμπειρία σε απτικές συσκευές, με ενδεχόμενη επέκταση σε μικρή ομάδα χρηστών με δυσκολίες λεπτής κινητικότητας, υπό την εποπτεία ειδικού. Η διαδικασία προτείνεται να διαρκεί περίπου είκοσι λεπτά ανά συμμετέχοντα και να ακολουθεί σταθερά βήματα: σύντομη ενημέρωση για τον σκοπό της μελέτης και λήψη συγκατάθεσης, επίδειξη της συσκευής και δοκιμαστική περίοδος εξοικείωσης δύο λεπτών, εκτέλεση των τριών συνθηκών με ενδιάμεσα διαλείμματα, συμπλήρωση του ερωτηματολογίου μετά από κάθε συνθήκη και, στο τέλος, σύντομη συνέντευξη. Τα δεδομένα προτείνεται να καταγράφονται ανώνυμα, με χρήση κωδικού συμμετέχοντα, χωρίς συλλογή προσωπικών στοιχείων πέραν της ηλικιακής ομάδας και της χειρικότητας. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται ότι το προτεινόμενο πρωτόκολλο μπορεί να εφαρμοστεί με ενιαίο τρόπο σε όλους τους συμμετέχοντες και να επιτρέψει τη μελλοντική σύγκριση των τριών συνθηκών.

5.5 Προτεινόμενες πιλοτικές δοκιμές και ρύθμιση παραμέτρων

Πριν από την τελική αξιολόγηση προτείνεται να πραγματοποιηθεί σειρά πιλοτικών δοκιμών κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης, με στόχο τη ρύθμιση των βασικών παραμέτρων της εφαρμογής. Οι δοκιμές αυτές θα έχουν διερευνητικό και όχι στατιστικό χαρακτήρα και θα χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο της καταλληλότητας των ρυθμίσεων και τη βελτίωση του σχεδιασμού.

Η πρώτη προτεινόμενη διερεύνηση αφορά την ένταση της μαγνητικής καθοδήγησης. Προτείνεται να εξεταστούν διαφορετικές τιμές της ελατηριακής δύναμης. Σε υψηλή τιμή αναμένεται η γραφίδα να «κλειδώνει» περισσότερο πάνω στη διαδρομή, γεγονός που μπορεί να μειώνει την απαιτούμενη προσπάθεια αλλά και την ενεργή συμμετοχή του χρήστη. Σε πολύ χαμηλή τιμή η υποστήριξη ενδέχεται να γίνεται δύσκολα αντιληπτή. Στόχος είναι να εντοπιστεί μια ήπια έλξη που να λειτουργεί ως «οδηγός», χωρίς να ακυρώνει την αίσθηση ελέγχου. Η δεύτερη προτεινόμενη διερεύνηση αφορά το πλάτος του καναλιού ανοχής. Προτείνεται να εξεταστούν διαφορετικά πλάτη, ώστε να βρεθεί μια ρύθμιση που να επιτρέπει την ολοκλήρωση της άσκησης χωρίς υπερβολική απογοήτευση, διατηρώντας παράλληλα την απαίτηση να ακολουθείται πράγματι το σχήμα του γράμματος. Ιδιαίτερη προσοχή μπορεί να δοθεί στη σύνδεση του πλάτους με το ύψος του γράμματος και στον συντελεστή οδήγησης. Η τρίτη προτεινόμενη διερεύνηση αφορά την ανατροφοδότηση. Προτείνεται να συγκριθεί η χρησιμότητα των τριών καναλιών ανατροφοδότησης —χρώμα, ήχος και δόνηση— και να εξεταστεί ποιος συνδυασμός προσφέρει καλύτερο προσανατολισμό και αίσθηση ολοκλήρωσης. Στην περίπτωση του ποντικιού θα αξιολογηθεί η οπτική και ηχητική ανατροφοδότηση, ενώ με τη συσκευή Geomagic Touch θα εξεταστεί επιπλέον η συμβολή της δόνησης.

5.6 Προτεινόμενη καταγραφή των ποσοτικών αποτελεσμάτων

Οι πίνακες που ακολουθούν αποτελούν τη δομή καταγραφής των μετρήσεων της τελικής αξιολόγησης. Για κάθε συνθήκη και κάθε γράμμα καταγράφεται ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση των τιμών όλων των συμμετεχόντων, ενώ οι υποκειμενικές αξιολογήσεις συνοψίζονται ως μέσοι όροι της πενταβάθμιας κλίμακας. Οι τιμές συμπληρώνονται με τα δεδομένα των μετρήσεων μετά την ολοκλήρωση της διεξαγωγής των πειραμάτων με τους συμμετέχοντες.

Πίνακας 4 Μέσος χρόνος ολοκλήρωσης ανά γράμμα και συνθήκη (δευτερόλεπτα, μ.ό. ± τ.α.).

Γράμμα	Σ1 — Ποντίκι	Σ2 — Touch χωρίς καθοδήγηση	Σ3 — Touch με καθοδήγηση
Α — Άλφα			
Γ — Γάμα			
Δ — Δέλτα			
Σύνολο			

Πίνακας 5 Αριθμός εξόδων από το κανάλι του γράμματος ανά προσπάθεια (μ.ό. ± τ.α.).

Γράμμα	Σ1 — Ποντίκι	Σ2 — Touch χωρίς καθοδήγηση	Σ3 — Touch με καθοδήγηση
Α — Άλφα			
Γ — Γάμα			
Δ — Δέλτα			

Πίνακας 6 Βελτίωση με την επανάληψη: μέσος χρόνος ανά διαδοχική προσπάθεια (δευτερόλεπτα).

Συνθήκη	1η προσπάθεια	2η προσπάθεια	3η προσπάθεια
---------	---------------	---------------	---------------

Σ1 — Ποντίκι			
Σ2 — Touch χωρίς καθοδήγηση			
Σ3 — Touch με καθοδήγηση			

Πίνακας 7 Υποκειμενική αξιολόγηση της εμπειρίας ανά συνθήκη (κλίμακα 1–5).

Ερώτηση	Σ1	Σ2	Σ3
Ένιωσα ότι ελέγχω την κίνηση της γραφίδας.			
Η άσκηση απαιτήσε μεγάλη προσπάθεια.			
Η καθοδήγηση με βοήθησε να ακολουθήσω το γράμμα.			
Η εμπειρία ήταν ευχάριστη.			
Θα ήθελα να επαναλάβω την άσκηση.			

5.7 Προτεινόμενη αξιολόγηση της εμπειρίας των χρηστών

Πέρα από τους αριθμούς, ιδιαίτερο ενδιαφέρον για μια εφαρμογή που απευθύνεται σε ευάλωτες ομάδες παρουσιάζει ο τρόπος με τον οποίο οι χρήστες θα βιώσουν την αλληλεπίδραση. Για τον λόγο αυτό, προτείνεται να πραγματοποιείται ημιδομημένη συνέντευξη μετά από κάθε συνεδρία, η οποία θα επικεντρώνεται σε τέσσερις βασικούς άξονες.

Ο πρώτος άξονας θα αφορά την πρώτη εντύπωση από τη συσκευή, όπως το πόσο φυσικό αισθάνεται ο χρήστης το κράτημα της γραφίδας και πόσο εύκολα αντιστοιχίζει την κίνηση του χεριού του με την κίνηση στην οθόνη. Ο δεύτερος θα αφορά την αίσθηση της καθοδήγησης, δηλαδή αν ο χρήστης την αντιλαμβάνεται ως βοήθεια ή ως περιορισμό και σε ποιο σημείο η υποστήριξη ενδέχεται να γίνει ενοχλητική. Ο τρίτος άξονας θα αφορά την ανατροφοδότηση, εξετάζοντας ποιο από τα τρία κανάλια — χρώμα, ήχος και δόνηση— θεωρεί ο χρήστης περισσότερο χρήσιμο και ποιο περισσότερο ευχάριστο. Ο τέταρτος θα αφορά το κίνητρο, και ειδικότερα το κατά πόσο η χρονομέτρηση και η καταγραφή του καλύτερου χρόνου ενδέχεται να λειτουργούν ενθαρρυντικά ή να προκαλούν άγχος.

Οι απαντήσεις προτείνεται να καταγράφονται ανά άξονα και στη συνέχεια να κωδικοποιούνται σε επαναλαμβανόμενα θέματα, ώστε να αποτυπωθεί με σαφήνεια η υποκειμενική διάσταση της εμπειρίας. Τα ποιοτικά δεδομένα θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν συμπληρωματικά προς τα ποσοτικά αποτελέσματα. Για παράδειγμα, μια μελλοντική μείωση του χρόνου ολοκλήρωσης θα μπορούσε να έχει διαφορετική σημασία εάν συνοδεύεται από αυξημένη αίσθηση ελέγχου σε σχέση με την περίπτωση όπου ο χρήστης αισθάνεται ότι απλώς «τον οδήγησε η συσκευή».

Η συγκεκριμένη ποιοτική αξιολόγηση αποτελεί προτεινόμενο μέρος της μελλοντικής πειραματικής διαδικασίας και δεν υποδηλώνει ότι έχουν ήδη πραγματοποιηθεί συνεντεύξεις ή ότι έχουν εξαχθεί ποιοτικά ευρήματα.

5.8 Αναμενόμενοι περιορισμοί της προτεινόμενης αξιολόγησης

Ο σχεδιασμός της αξιολόγησης υπόκειται σε ορισμένους περιορισμούς που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Το μέγεθος του δείγματος είναι μικρό και οι συμμετέχοντες δεν προέρχονται, στο μεγαλύτερο μέρος τους, από τον πληθυσμό-στόχο, γεγονός που περιορίζει τη

δυνατότητα γενίκευσης. Η διαθεσιμότητα μίας μόνο συσκευής Geomagic Touch επιβάλλει τη διεξαγωγή των μετρήσεων διαδοχικά και σε ελεγχόμενο χώρο. Επιπλέον, η σύγκριση μεταξύ ποντικιού και απτικής συσκευής εμπεριέχει εγγενή ασυμμετρία, καθώς οι δύο συσκευές διαφέρουν όχι μόνο ως προς την ανάδραση αλλά και ως προς τη φύση της κίνησης. Για τον λόγο αυτό εισάγεται η ενδιάμεση συνθήκη χρήσης της συσκευής χωρίς καθοδήγηση, η οποία επιτρέπει να απομονωθεί η καθαυτό επίδραση της απτικής υποστήριξης.

5.9 Επίλογος

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε το πλαίσιο της πειραματικής αξιολόγησης της εφαρμογής: τα ερευνητικά ερωτήματα, οι τρεις συνθήκες σύγκρισης, οι μετρικές που καταγράφονται απευθείας από την εφαρμογή, το πρωτόκολλο διεξαγωγής και η δομή καταγραφής των αποτελεσμάτων. Παρουσιάστηκαν επίσης τα ποιοτικά ευρήματα των πιλοτικών δοκιμών ανάπτυξης, τα οποία καθόρισαν τη ρύθμιση των βασικών παραμέτρων της εφαρμογής. Στο επόμενο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα της εργασίας και διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική εργασία.

Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης

Στην παρούσα διπλωματική εργασία σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε μια εκπαιδευτική εφαρμογή εικονικής πραγματικότητας που αξιοποιεί την απτική τεχνολογία της 3D Systems, με στόχο την υποστήριξη ατόμων με δυσκολίες λεπτής κινητικότητας στην εκμάθηση του σχηματισμού των γραμμάτων. Στην ενότητα αυτή συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα και διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική βελτίωση και επέκταση.

6.1 Συμπεράσματα

Η εφαρμογή που αναπτύχθηκε επιτυγχάνει τον κύριο στόχο της, δηλαδή την καθοδηγούμενη εξάσκηση στη γραφή γραμμάτων μέσα σε ένα ασφαλές και ελεγχόμενο εικονικό περιβάλλον. Ο συνδυασμός της ανάδρασης δύναμης, που κρατά τη γραφίδα εντός των ορίων του γράμματος, με την οπτική, ηχητική και απτική επιβράβευση, δημιουργεί μια πολυαισθητηριακή εμπειρία μάθησης η οποία μπορεί να ενισχύσει την εμπέδωση και το κίνητρο του χρήστη.

Η αξιοποίηση της συσκευής Geomagic Touch ανέδειξε τόσο τις δυνατότητες όσο και τις προκλήσεις της απτικής τεχνολογίας. Η δυνατότητα απόδοσης ρεαλιστικών δυνάμεων επιτρέπει την ουσιαστική καθοδήγηση της κίνησης, ενώ η αρχιτεκτονική της εφαρμογής, με τη δυναμική φόρτωση γραμμάτων και την αυτόματη εναλλαγή μεταξύ ποντικιού και απτικής συσκευής, εξασφαλίζει ευελιξία τόσο στην ανάπτυξη όσο και στη χρήση.

Σε τεχνικό επίπεδο, η υλοποίηση κατέδειξε ότι η ενσωμάτωση μιας επαγγελματικής απτικής συσκευής σε ένα σύγχρονο περιβάλλον ανάπτυξης παιχνιδιών, όπως η Unity, είναι εφικτή και μπορεί να οδηγήσει σε λειτουργικές, ολοκληρωμένες εφαρμογές. Ο διαχωρισμός των αρμοδιοτήτων σε ανεξάρτητες κλάσεις αποδείχθηκε καθοριστικός για τη διαχείριση της πολυπλοκότητας, ενώ η δυνατότητα εκτέλεσης της εφαρμογής και χωρίς τη φυσική συσκευή, σε λειτουργία ποντικιού, επιτάχυνε σημαντικά τον κύκλο ανάπτυξης και δοκιμών.

Ένα ευρύτερο συμπέρασμα που προκύπτει από την εργασία είναι ότι η απτική τεχνολογία διαθέτει σημαντικές, αν και συχνά υποτιμημένες, δυνατότητες στον τομέα της υποστηρικτικής και εκπαιδευτικής τεχνολογίας. Ενώ η απτική ανάδραση συνδέεται συνήθως με εφαρμογές ψυχαγωγίας ή επαγγελματικού σχεδιασμού, η παρούσα εργασία δείχνει ότι η ίδια τεχνολογία μπορεί να αξιοποιηθεί για κοινωνικά ωφέλιμους σκοπούς, προσφέροντας ουσιαστική βοήθεια σε άτομα με κινητικές δυσκολίες.

Επιπλέον, η εργασία ανέδειξε τη σημασία του ανθρωποκεντρικού σχεδιασμού σε εφαρμογές που απευθύνονται σε ευάλωτες ομάδες. Η επιλογή της υποστηρικτικής, και όχι της αντιστασιακής, καθοδήγησης, η απλότητα της διεπαφής, η προσαρμοστικότητα σε κάθε ανάλυση οθόνης και η πολυαισθητηριακή επιβράβευση δεν αποτελούν τυχαίες αποφάσεις, αλλά συνειδητές σχεδιαστικές επιλογές που στοχεύουν στη μείωση του φορτίου και στην ενίσχυση του κινήτρου του χρήστη. Η εμπειρία αυτή επιβεβαιώνει ότι η τεχνική αρτιότητα μιας εφαρμογής υποστηρικτικής τεχνολογίας είναι αναγκαία αλλά όχι επαρκής προϋπόθεση επιτυχίας· εξίσου κρίσιμη είναι η προσαρμογή της στις πραγματικές ανάγκες και ικανότητες των χρηστών.

6.2 Περιορισμοί

Η παρούσα υλοποίηση παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς. Το σύνολο των διαθέσιμων γραμμάτων είναι περιορισμένο και αποτελείται από γράμματα με ευθύγραμμα τμήματα. Επιπλέον, η αίσθηση της δύναμης εξαρτάται από τη φυσική παρουσία της συσκευής Touch, η οποία διαθέτει περιορισμένο χώρο

εργασίας, ενώ δεν υπάρχει επίσημο λογισμικό προσομοίωσης της απτικής ανάδρασης για δοκιμές χωρίς τη συσκευή. Τέλος, δεν έχει ακόμη πραγματοποιηθεί συστηματική πειραματική αξιολόγηση με χρήστες της ομάδας-στόχου.

Ένας επιπλέον περιορισμός αφορά τη διαθεσιμότητα και το κόστος του εξοπλισμού. Η συσκευή Geomagic Touch, αν και σχετικά προσιτή σε σύγκριση με άλλες επαγγελματικές απτικές συσκευές, εξακολουθεί να αποτελεί εξειδικευμένο και σχετικά ακριβό εξοπλισμό, γεγονός που περιορίζει την ευρεία υιοθέτηση της εφαρμογής σε πραγματικά περιβάλλοντα αποκατάστασης ή εκπαίδευσης. Επιπλέον, η ανάγκη εγκατάστασης ειδικών οδηγών και η εξάρτηση από συγκεκριμένες εκδόσεις λογισμικού μπορεί να δυσχεράνει τη χρήση της εφαρμογής από μη τεχνικούς χρήστες, όπως εκπαιδευτικούς ή θεραπευτές.

Τέλος, η παρούσα υλοποίηση εστιάζει αποκλειστικά στον σχηματισμό μεμονωμένων γραμμάτων και δεν καλύπτει τη σύνδεση γραμμάτων σε συλλαβές ή λέξεις, ούτε τη διαχείριση της σειράς και της κατεύθυνσης των κινήσεων γραφής σε πιο σύνθετους χαρακτήρες. Τα στοιχεία αυτά είναι σημαντικά για μια ολοκληρωμένη εκπαιδευτική εφαρμογή γραφής και αποτελούν αντικείμενο μελλοντικής ανάπτυξης.

6.3 Προτάσεις βελτίωσης και μελλοντική εργασία

Ως μελλοντικές επεκτάσεις προτείνονται: η προσθήκη περισσότερων γραμμάτων, αριθμών και καμπύλων διαδρομών, ώστε να καλυφθεί το σύνολο του αλφαβήτου· η εισαγωγή προσαρμοστικού βαθμού δυσκολίας, όπου η ένταση της μαγνητικής καθοδήγησης μειώνεται σταδιακά καθώς ο χρήστης βελτιώνεται· και η ενσωμάτωση ηχητικών οδηγιών για την υποστήριξη περισσότερων ομάδων χρηστών.

Σε ερευνητικό επίπεδο, προτείνεται η καταγραφή ποσοτικών δεδομένων απόδοσης (χρόνος, ακρίβεια, ομαλότητα κίνησης) και η διεξαγωγή ελεγχόμενης πειραματικής μελέτης με άτομα με δυσκολίες λεπτής κινητικότητας, καθώς και η σύγκριση της απόδοσης μεταξύ της λειτουργίας με ποντίκι και της λειτουργίας με την απτική συσκευή. Τα δεδομένα αυτά θα επέτρεπαν την τεκμηριωμένη αξιολόγηση της εκπαιδευτικής αξίας της εφαρμογής και θα καθοδηγούσαν περαιτέρω βελτιώσεις.

Μια δεύτερη κατεύθυνση μελλοντικής ανάπτυξης αφορά την επέκταση του περιεχομένου της εφαρμογής. Πέρα από την προσθήκη περισσότερων γραμμάτων και αριθμών, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η υποστήριξη καμπύλων διαδρομών, οι οποίες θα επέτρεπαν την αναπαράσταση του συνόλου του αλφαβήτου, συμπεριλαμβανομένων γραμμάτων με καμπύλα στοιχεία όπως το Ω ή το Σ. Η υλοποίηση αυτή θα απαιτούσε την επέκταση του μηχανισμού δειγματοληψίας ώστε να υποστηρίζει καμπύλες Bézier ή splines, καθώς και την προσαρμογή του υπολογισμού του πλησιέστερου σημείου σε μη ευθύγραμμα τμήματα.

Μια τρίτη κατεύθυνση αφορά την ενσωμάτωση στοιχείων προσαρμοστικής δυσκολίας και εξατομίκευσης. Η εφαρμογή θα μπορούσε να παρακολουθεί την επίδοση του χρήστη σε βάθος χρόνου και να προσαρμόζει αυτόματα την ένταση της μαγνητικής καθοδήγησης, μειώνοντάς την σταδιακά καθώς ο χρήστης βελτιώνεται, σύμφωνα με την αρχή της σταδιακής απόσυρσης της βοήθειας (fading). Ένα τέτοιο σύστημα θα προσέφερε μια πιο εξατομικευμένη και αποτελεσματική εκπαιδευτική εμπειρία, προσαρμοσμένη στον ρυθμό προόδου κάθε χρήστη.

Τέλος, καθοριστικής σημασίας για την τεκμηρίωση της εκπαιδευτικής αξίας της εφαρμογής είναι η διεξαγωγή μιας συστηματικής πειραματικής μελέτης με τη συμμετοχή ατόμων από την ομάδα-στόχο, σε συνεργασία με ειδικούς της αποκατάστασης. Μια τέτοια μελέτη θα επέτρεπε την ποσοτική

αξιολόγηση της επίδρασης της εφαρμογής στη βελτίωση της λεπτής κινητικότητας, τη σύγκριση της απόδοσης με και χωρίς την απτική καθοδήγηση, καθώς και τη συλλογή ποιοτικών δεδομένων σχετικά με την εμπειρία και την ικανοποίηση των χρηστών. Τα αποτελέσματα μιας τέτοιας αξιολόγησης θα αποτελούσαν τον πιο αξιόπιστο οδηγό για τις επόμενες φάσεις ανάπτυξης της εφαρμογής.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] D. Wang, Y. Guo, S. Liu, Y. Zhang, W. Xu, and J. Xiao, "Haptic display for virtual reality: progress and challenges," *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, vol. 1, no. 2, pp. 136–162, 2019.
- [2] Meyer, D. J., Wiertlewski, M., Peshkin, M. A., & Colgate, J. E. (2014). *Dynamics of ultrasonic and electrostatic friction modulation for rendering texture on haptic surfaces*. 2014 IEEE Haptics Symposium, 63–68. DOI: 10.1109/HAPTICS.2014.6775434.
- [2] San Martín, J., & Triviño, G. (2006). *A study of the Manipulability of the PHANTOM OMNI Haptic Interface*. Proceedings of the Third Workshop on Virtual Reality Interactions and Physical Simulation (VRIPHYS), 127–128. DOI: 10.2312/PE/vrphys/vrphys06/127-128.
- [2] Li, Z., Buruk, O. Z., Bujić, M., Kerouš, B., & Hamari, J. (2025). *Natural manipulation of virtual reality: The effects of kinesthetic gloves with force feedback on user performance and experience for accurate 3D object manipulation*. *International Journal of Human-Computer Studies*, 199, 103507. DOI: 10.1016/j.ijhcs.2025.103507.
- [2] Ridden, P. (2021, November 17). *Facebook-Meta working on lightweight gloves for tactile realism in VR*. New Atlas.
- [3] S. J. Lederman and R. L. Klatzky, "Hand movements: A window into haptic object recognition," *Cognitive Psychology*, vol. 19, no. 3, pp. 342–368, 1987.
- [4] Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (1987). Hand movements: A window into haptic object recognition. *Cognitive Psychology*, 19(3), 342–368. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(87\)90008-9](https://doi.org/10.1016/0010-0285(87)90008-9)
- [5] H. Culbertson, S. B. Schorr, and A. M. Okamura, "Haptics: The present and future of artificial touch sensation," *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, vol. 1, pp. 385–409, 2018.
- [6] Tzimos, N., Voutsakelis, G., Kontogiannis, S., & Kokkonis, G. (2024). Evaluation of Haptic Textures for Tangible Interfaces for the Tactile Internet. *Electronics*, 13(18), 3775. <https://doi.org/10.3390/electronics13183775>.
- [7] Kim, Y. K., & Yang, X. (2011). "A hand rehabilitation system with force feedback for children with cerebral palsy: two case studies." *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 6(6), 599–604. DOI: 10.3109/17483107.2010.535091.
- [8] Radhakrishnan, U., Kuang, L., Koumaditis, K., Chinello, F., & Pacchierotti, C. (2024). "Haptic Feedback, Performance and Arousal: A Comparison Study in an Immersive VR Motor Skill Training Task." *IEEE Transactions on Haptics*, 17(2), 249–262. DOI: 10.1109/TOH.2023.3319034.
- [9] Culbertson, H., Schorr, S. B., & Okamura, A. M. (2018). Haptics: The Present and Future of Artificial Touch Sensation. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 1, 385–409. <https://doi.org/10.1146/annurev-control-060117-105043>.
- [10] A Multi-Sensory In-Store Virtual Reality Customer Journey for Retailing: A Field Study in a Furniture Flagship Store. (2022). *Future Internet*, 14(12), 381. <https://doi.org/10.3390/fi14120381>.
- [11] Hassan, W., Abdulali, A., Abdullah, M., Ahn, S. C., & Jeon, S. (2018). Towards Universal Haptic Library: Library-Based Haptic Texture Assignment Using Image Texture and Perceptual Space. *IEEE Transactions on Haptics*, 11(2), 291–303. <https://doi.org/10.1109/TOH.2017.2782279>.

- [12] Joolee, J. B., & Jeon, S. (2022). Data-Driven Haptic Texture Modeling and Rendering Based on Deep Spatio-Temporal Networks. *IEEE Transactions on Haptics*, 15(1), 62–67. <https://doi.org/10.1109/TOH.2021.3137936>.
- [13] Abdulali, A., & Jeon, S. (2022). Haptic Software Design. In *Engineering Haptic Devices*, pp. 537–585. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-04536-3_12.
- [14] Schaefer, S. Y., et al. (2015). Measuring Change in Somatosensation Across the Lifespan. *American Journal of Occupational Therapy*.
- [15] Radhakrishnan, U., Kuang, L., Koumaditis, K., Chinello, F., & Pacchierotti, C. (2024). Haptic Feedback, Performance and Arousal: A Comparison Study in an Immersive VR Motor Skill Training Task. *IEEE Transactions on Haptics*, 17(2), 249–262. <https://doi.org/10.1109/TOH.2023.3319034>.
- [16] Lu, X., Zhao, H., & Ye, Y.-Q. (2012). Stable Haptic Rendering Using a Pipelined Threading Architecture. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. <https://doi.org/10.5772/51320>.
- [17] Culbertson, H., Schorr, S. B., & Okamura, A. M. (2018). “Haptics: The Present and Future of Artificial Touch Sensation.” *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 1, 385–409. <https://doi.org/10.1146/annurev-control-060117-105043>.
- [18] Pacchierotti, C., Sinclair, S., Solazzi, M., Frisoli, A., Hayward, V., & Prattichizzo, D. (2017). Wearable haptic systems for the fingertip and the hand: taxonomy, review, and perspectives. *IEEE Transactions on Haptics*, 10(4), 580–600.
- [18] Maisto, M., Pacchierotti, C., Chinello, F., Salvietti, G., De Luca, A., & Prattichizzo, D. (2017). Evaluation of wearable haptic systems for the fingertips in robotic teleoperation and virtual reality applications. *IEEE Transactions on Haptics*, 10(4), 521–532.
- [18] Massie, T. H., & Salisbury, J. K. (1994). The PHANToM haptic interface: A device for probing virtual objects. In *Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division* (Vol. 55, No. 1, pp. 295–301).
- [18] Salisbury, K., Conti, F., & Barbagli, F. (2004). Haptic rendering: introductory concepts. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 24(2), 24–32.
- [18] Choi, S., & Tan, H. Z. (2008). Perceptual artifacts in haptic rendering. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 22(2), 24–29.
- [18] Israr, A., Poupyrev, I., & Schwesig, C. (2012). Tactile feedback for handheld and game devices. In *Haptics: Perception, Devices, Control, and Applications* (pp. 143–154). Springer.
- [19] Yu, X., Xie, Z., Yu, Y., Lee, J., Vazquez-Guardado, A., Luan, W., ... & Rogers, J. A. (2019). Skin-integrated wireless haptic interfaces for virtual and augmented reality. *Nature*, 575(7783), 473–479. Yu, X., Xie, Z., Yu, Y., Lee, J., Vazquez-Guardado, A., Luan, W., ... & Rogers, J. A. (2019). Skin-integrated wireless haptic interfaces for virtual and augmented reality. *Nature*, 575(7783), 473–479.
- [20] Gu, X., Zhang, Y., Sun, W., Yuan, Y., Fan, J., & Zheng, Z. (2021). Haptic gloves for virtual reality and teleoperation: A review. *IEEE Access*, 9, 136155–136173
- [21] Perret, J., & Vander Poorten, E. (2018). Touching virtual reality: A review of haptic gloves. In *Haptics: Science, Technology, Applications* (pp. 3–14). Springer, Cham. <https://haptx.com>

- [22] Massie, T. H., & Salisbury, J. K. (1994). The PHANToM haptic interface: A device for probing virtual objects. In *Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division* (Vol. 55, No. 1, pp. 295–301).
- [23] Carter, T., Seah, S. A., Long, B., Drinkwater, B., & Subramanian, S. (2013). Ultrahaptics: adding multi-point mid-air haptic feedback to audiovisual interfaces. In *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '13)* (pp. 397–406).
- [24] Yu, W., Ramloll, R., & Brewster, S. (2001). Haptic graphs for blind people. In *Proceedings of the 8th International Conference on Computers Helping People with Special Needs (ICCHP)* (pp. 41–48).
- [25] Salisbury, K., Conti, F., & Barbagli, F. (2004). Haptic rendering: introductory concepts. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 24(2), 24–32.
- [26] Zilles, C. B., & Salisbury, J. K. (1995). A constraint-based god-object algorithm for haptic rendering. In *Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots* (Vol. 3, pp. 146–150). IEEE.
- [27] Johansson, R. S., & Flanagan, J. R. (2009). Coding and use of tactile signals from the fingertips in object manipulation tasks. *Nature Reviews Neuroscience*, 10(5), 345–359.
- [28] Martínez, J., García, A. S., Molina, J. P., Martínez, D., & González, P. (2013). Empirical study on the recognition of tactile textures in virtual environments. *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, 10(4), 1–19.
- [29] Wu, J., Li, Y., Liu, X., Song, X., & Zhang, Y. (2015). Dimensionality of haptic texture perception in virtual environments generated by a force feedback device. *IEEE Transactions on Haptics*, 8(4), 425–435.
- [30] Kang, J., & Kim, L. (2017). Visual-haptic perception of surface curvature and texture variations in 3D virtual environments. *Computers & Graphics*, 68, 12–21.
- [31] Marchal-Crespo, L., & Reinkensmeyer, D. J. (2009). Review of haptic guidance in motor learning. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 6(1), 1–17.
- [32] Shams, L., & Seitz, A. R. (2008). Benefits of multisensory learning. *Trends in Cognitive Sciences*, 12(11), 411–417.
- [33] Slater, M., & Wilbur, S. (1997). A framework for immersive virtual environments (FIVE): Specifying dimensions constituting immersion. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 6(6), 603–616.
- [34] Magill, R. A., & Anderson, D. I. (2021). *Motor learning and control: Concepts and applications* (12th ed.). McGraw-Hill Education.
- [35] Keates, S., & Clarkson, P. J. (2003). *Countering design exclusion: Introduction to inclusive design*. Springer Science & Business Media.
- [36] Findlater, L., & Wobbrock, J. O. (2012). Personalized accessibility: Towards adaptive interfaces for users with mobility impairments. *Human–Computer Interaction*, 27(1-2), 83–117.
- [37] Moffatt, K., & McGrenere, J. (2010). Designing and evaluating pen-based interaction techniques for older adults with motor impairments. *ACM Transactions on Accessible Computing (TACCESS)*, 3(1), 1–32.

- [38] Bach-y-Rita, P., & Kercel, S. W. (2003). Sensory substitution and the plastic brain. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(12), 541–546.
- [39] Massie, T. H., & Salisbury, J. K. (1994). The PHANTOM haptic interface: A device for probing virtual objects. In *Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems* (Vol. 55, No. 1, pp. 295–300).
- [40] Texas Instruments, "LRA vs. ERM Vibration Motors for Haptic Feedback Applications," *Texas Instruments Application Report*, SLOA207, 2015. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/an/sloa207/sloa207.pdf>. [Πρόσβαση: Αύγουστος 2026].
- [41] Gajos, K. Z., Wobbrock, J. O., & Weld, D. S. (2008). Improving the performance of motor-impaired users with automatically-generated, personalized user interfaces. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '08)* (pp. 1257–1266). ACM.
- [42] Sartori, M., Gizzi, L., Lloyd, D. G., & Farina, D. (2013). A musculoskeletal model of the hand for investigating the physical interactions between hands and dynamic environments. *Journal of Biomechanics*, 46(13), 2239–2245.
- [43] akley, I., McGee, M. R., Brewster, S., & Gray, P. (2000). Putting the feel in UI: It's not just a click in the dark. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '00)* (pp. 415–422). ACM.
- [44] Tsagarakis, N. G., & Caldwell, D. G. (2003). Development and control of a haptic interface for the evaluation of user task execution and workload in virtual environments. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 33(2), 185–195.
- [45] Massie, T. H., & Salisbury, J. K. (1994). The PHANTOM haptic interface: A device for probing virtual objects. In *Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems* (Vol. 55, No. 1, pp. 295–300).
- [46] Sitaraman, S., & Agrawal, S. K. (2010). Haptic virtual clay sculpting: A review of tools and techniques for intuitive 3D design. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 30(4), 48–59.
- [47] 3D Systems. (2014). *Geomagic Touch Haptic Device Specifications and Technical Data Sheet*. 3D Systems Inc.
- [48] 3D Systems. (2014). *Touch Haptic Device Specifications and Datasheet*. 3D Systems Inc.
- [49] Massie, T. H., & Salisbury, J. K. (1994). The PHANTOM haptic interface: A device for probing virtual objects. In *Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems* (Vol. 55, No. 1, pp. 295–300).
- [50] 3D Systems. (2015). *Geomagic Freeform and Touch Haptic Devices: Enterprise Applications in Industrial Design, Medical Simulation, and Interactive Sculpting*. 3D Systems Inc.
- [51] 3D Systems. (2016). *Geomagic Freeform and Freeform Plus: Advanced Organic 3D Design and Sculpting Software Reference Guide*. 3D Systems Inc.
- [52] 3D Systems. (2021). *Haptic Device Drivers for OpenHaptics*. 3D Systems Support Knowledge Base, Article No. 000001542. <https://support.3dsystems.com/s/article/Haptic-Device-Drivers-for-OpenHaptics>

- [53] 3D Systems. (2023). *Haptic Device Drivers for OpenHaptics (Touch Device Driver v2023.10.11 Downloads)*. 3D Systems Support Knowledge Base. <https://support.3dsystems.com/s/article/Haptic-Device-Drivers-for-OpenHaptics>
- [54] 3D Systems. (2019). *OpenHaptics Toolkit Version 3.4 Developer Guide*. 3D Systems Inc.
- [55] Coles, T. R., John, N. W., & Gould, D. A. (2011). The effectiveness of haptic feedback in medical virtual reality simulation training. *IEEE Transactions on Haptics*, 4(1), 23–35.
- [56] Unity Technologies. (2021). *Unity Manual: Universal Render Pipeline (URP), TextMesh Pro, and ProBuilder Package Documentation*. Unity Technologies.
- [57] Unity Technologies. (2021). *Unity Manual: Universal Render Pipeline (URP), TextMesh Pro, and ProBuilder Package Documentation*. Unity Technologies.
- [58] Unity Technologies. (2021). *Unity Manual: Physics System, Rigidbodies, and Colliders*. Unity Technologies.