ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

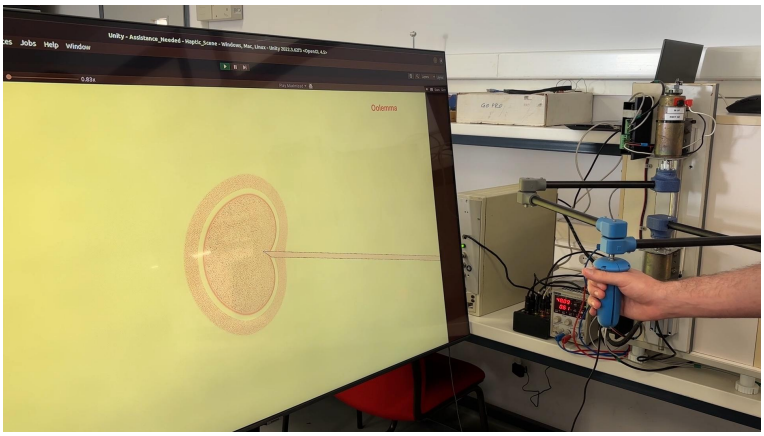
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Ανάπτυξη συσκευής απτικής ανάδρασης για εικονική και απομακρυσμένη αλληλεπίδραση

Στυλιανός Πατσιάς (th20303)

Επιβλέπων: Μ. Σφακιωτάκης, Καθηγητής ΗΜΜΥ



Εκτεταμένη Περίληψη

Εισαγωγή

Οι συσκευές απτικής ανάδρασης αποτελούν έναν ιδιαίτερο τομέα της ρομποτικής, καθώς έχουν ως κύριο σκοπό τη φυσική αλληλεπίδραση με τον άνθρωπο. Συνδέουν τον φυσικό κόσμο με ψηφιακά περιβάλλοντα, επιτρέποντας στον χρήστη να τα αντιληφθεί με μία ακόμη αίσθηση, την αφή. Τέτοιες συσκευές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σενάρια προσομοίωσης, όπως η εξάσκηση χειρουργικών επεμβάσεων, στην αποκατάσταση και την εκπαίδευση κινητικών δεξιοτήτων, καθώς και στον απομακρυσμένο έλεγχο, όπου ο χρήστης λαμβάνει πληροφορία μέσω της ανάδρασης δύναμης. Κατά την υλοποίησή τους

προκύπτουν σημαντικές προκλήσεις. Η δύναμη που δέχεται ο χρήστης πρέπει να μεταδίδει αξιόπιστα την πληροφορία του εκάστοτε σεναρίου, ενώ ο ίδιος ο μηχανισμός πρέπει να επηρεάζει ελάχιστα την κίνηση του χεριού, με την αδράνεια και την τριβή του να περνούν σχεδόν απαρατήρητες. Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει τον σχεδιασμό, την ανάπτυξη και την αξιολόγηση μιας συσκευής απτικής ανάδρασης δύο βαθμών ελευθερίας, με έμφαση στη διαφάνεια (transparency). Η συσκευή υλοποιείται ως παντογράφος πέντε ράβδων (five-bar linkage), με τους κινητήρες να κινούν απευθείας τον μηχανισμό, χωρίς σύστημα μετάδοσης, και με χώρο εργασίας αρκετά μεγάλο ώστε ο χρήστης να κινεί ολόκληρο το χέρι.

Κίνητρο και Στόχοι

Στη βιβλιογραφία των απτικών παντογράφων συναντώνται πολλές υλοποιήσεις, μεταξύ των οποίων μικρές συσκευές για χειρισμό με το δάκτυλο, που έχουν πολύ χαμηλή αδράνεια, και συσκευές μεγάλου χώρου εργασίας, που ασκούν μεγάλες δυνάμεις μέσω συστημάτων μετάδοσης ροπής, αλλά συνήθως με μεγάλη αδράνεια και περιορισμένο εύρος συχνοτήτων. Σπάνια ωστόσο συναντάται παντογράφος μεγάλου χώρου εργασίας που να παραμένει ταυτόχρονα διαφανής. Η εργασία στοχεύει στην κάλυψη του συγκεκριμένου κενού με έναν παντογράφο που συνδυάζει μεγάλο χώρο εργασίας με χαμηλή αδράνεια, κινείται ελεύθερα υπό το χέρι του χρήστη και αποδίδει δυνάμεις σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Παρουσιάζονται ο σχεδιασμός και η κατασκευή της συσκευής, η ταυτοποίηση του συστήματος επενέργησης, η κινηματική ανάλυση, η επικύρωση της παραγόμενης δύναμης, η ανάπτυξη σεναρίων απτικής ανάδρασης και το δυναμικό μοντέλο του μηχανισμού.

Σχεδιασμός και Αρχιτεκτονική Ελέγχου

Η συσκευή κατασκευάστηκε στο εργαστήριο από εξαρτήματα ακριβείας σε συνδυασμό με τρισδιάστατα εκτυπωμένες αρθρώσεις και συνδέσμους. Ο χώρος εργασίας της έχει εμβέλεια περίπου 60 cm. Οι κινητήρες βρίσκονται σε κοινό κατακόρυφο άξονα και κινούν τον μηχανισμό χωρίς μειωτήρα, ώστε η μόνη τριβή του συστήματος να προέρχεται από τους κινητήρες και τις αρθρώσεις. Το άκρο του μηχανισμού φέρει λαβή με ενσωματωμένη δυναμοκυψέλη (load cell), η οποία μετρά τη δύναμη σύσφιξης του χρήστη. Ο έλεγχος εκτελείται σε κλειστό βρόχο πραγματικού χρόνου με συχνότητα έως και 2 kHz μέσω του περιβάλλοντος QUARC για MATLAB/Simulink.

Ταυτοποίηση και Βαθμονόμηση

Το σύστημα επενέργησης χαρακτηρίστηκε μέσα από μια σειρά συστηματικών πειραμάτων. Η απόκριση των οδηγών και η ροπή των κινητήρων περιγράφηκαν

με γραμμικές σχέσεις, μέσω της διαγωγιμότητας (transconductance) των οδηγών και της ισοδύναμης σταθεράς ροπής (effective torque constant) του συνόλου οδηγού–κινητήρα. Με βάση τον χαρακτηρισμό αυτό, ο ελεγκτής του κλειστού βρόχου μετατρέπει την επιθυμητή ροπή σε εντολές τάσης. Η ταυτοποίηση της τριβής έδειξε ότι οι κινητήρες, που φέρουν φθορά από προηγούμενη χρήση, αποκλίνουν από τις ονομαστικές τιμές του κατασκευαστή.

Κινηματική Ανάλυση

Οι κινηματικές εξισώσεις του παντογράφου προκύπτουν σε κλειστή μορφή με γεωμετρική μέθοδο, εξαρτώμενες μόνο από τις γωνίες των ενεργών αρθρώσεων (αυτών που κινούν οι κινητήρες). Από αυτές υπολογίζεται η αναλυτική Ιακωβιανή, η οποία συνδέει τις ταχύτητες των αρθρώσεων με την ταχύτητα του άκρου και, μέσω της ανάστροφής της, τις δυνάμεις στο άκρο με τις ροπές των κινητήρων. Με χρήση της Ιακωβιανής αναλύθηκε ο χώρος εργασίας ως προς την ισοτροπία και τη διακριτική ικανότητα των κωδικοποιητών.

Ανάλυση και Επικύρωση Δύναμης

Η θεωρητική ανάλυση έδειξε ότι η συσκευή αποδίδει τουλάχιστον 5 N προς κάθε κατεύθυνση στον κεντρικό χώρο εργασίας και περίπου 12 N σε ευνοϊκές κατευθύνσεις και διατάξεις του μηχανισμού. Μετρήσεις με δυναμοκυψέλη σε διάφορες θέσεις του χώρου εργασίας επιβεβαίωσαν την ανάλυση. Η συσκευή αποδίδει τις δυνάμεις που της ζητούνται με μικρό σφάλμα, χωρίς να απαιτείται ανάδραση δύναμης. Μια πρώτη εκτίμηση της απόκρισης συχνότητας έδειξε ότι το πλάτος της δύναμης ακολουθεί πιστά την εντολή σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων.

Απτική Ανάδραση και Δικτυακή Αρχιτεκτονική

Πάνω σε ένα πλαίσιο ελέγχου εμπέδησης (impedance control) αναπτύχθηκαν απλά εικονικά περιβάλλοντα στο επίπεδο, όπως τοιχώματα, όρια και σπειροειδείς διαδρομές, τα οποία περιορίζουν ή καθοδηγούν την κίνηση του χεριού. Τα περιβάλλοντα αυτά αποτελούν τη βάση κάθε σεναρίου απτικής ανάδρασης. Στη συνέχεια, μέρος του βρόχου ελέγχου μεταφέρθηκε σε δεύτερο υπολογιστή, ώστε να καταστεί δυνατή η σύνδεση του παντογράφου με εξωτερικές εφαρμογές. Με το περιβάλλον Unity και μια αρχιτεκτονική επικοινωνίας πραγματικού χρόνου (real-time) υλοποιήθηκαν δύο πιο απαιτητικές εφαρμογές επίδειξης: μια προσομοίωση ενδοκυτταροπλασματικής έγχυσης σπερματοζωαρίου (ICSI), όπου ο χρήστης αισθάνεται τα διαδοχικά στρώματα ενός ωαρίου, και μια άσκηση παρακολούθησης τροχιάς με προσαρμοστική υποβοήθηση (assist-as-needed), η οποία στοχεύει στην εξάσκηση του οπτικοκινητικού συντονισμού.

Δυναμικό Μοντέλο

Το δυναμικό μοντέλο του μηχανισμού αναπτύχθηκε με τη μέθοδο του ανηγμένου μοντέλου του Ghorbel, η οποία εκφράζει την κλειστή κινηματική αλυσίδα μόνο ως προς τις δύο ενεργές αρθρώσεις. Πάνω σε αυτό, ένας ελεγκτής βασισμένος στην παθητικότητα (passivity-based control) παρακολούθησε τροχιές αναφοράς με ακρίβεια, ενώ η προσαρμοστική του επέκταση (adaptive control) αντιστάθμισε μεγάλο μέρος του σφάλματος που προκαλεί ένα άγνωστο φορτίο. Τέλος, το ίδιο μοντέλο εκτιμά ότι η αδράνεια που αισθάνεται ο χρήστης στη λαβή δεν ξεπερνά λίγες εκατοντάδες γραμμάρια.

Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

Αναπτύχθηκε και χαρακτηρίστηκε μια διαφανής συσκευή απτικής ανάδρασης σε υλοποίηση παντογράφου για αλληλεπίδραση με εικονικά περιβάλλοντα, η οποία θέτει τις βάσεις και για σενάρια απομακρυσμένου ελέγχου. Μελλοντικά, η άσκηση προσαρμοστικής υποβοήθησης μπορεί να συμπληρωθεί με τις κατάλληλες κλινικές μετρικές, ώστε ο παντογράφος να αξιοποιηθεί για την αποκατάσταση ατόμων με ανεπαρκή ή διαταραγμένο οπτικοκινητικό συντονισμό. Με την επέκταση των εφαρμογών επίδειξης σε ένα πραγματικό σύστημα, ο παντογράφος μπορεί να υποστηρίξει τον τηλεχειρισμό στο επίπεδο, λαμβάνοντας μετρήσεις δύναμης από το απομακρυσμένο άκρο και αποδίδοντάς τες στον χρήστη.

Λέξεις-κλειδιά: Συσκευή απτικής ανάδρασης, Παντογράφος πέντε ράβδων, Άμεση μετάδοση κίνησης, Μηχανική διαφάνεια, Απόδοση δυνάμεων, Έλεγχος εμπέδησης