

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΤΙΚΗΣ ΑΝΑΚΛΗΣΗΣ

Έλενα Σίδερη, Κώστας Βλάχος, και Ευάγγελος Παπαδόπουλος

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ,
Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου,
email: elsideri@gmail.com, kostaswl@central.ntua.gr,
egrapado@central.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία ερευνά τη δυνατότητα αξιοποίησης της εμπειρίας των ειδικών και τον έλεγχο της ικανότητας του ανθρώπου να ανακαλεί μια συγκεκριμένη απτική εμπειρία, την οποία έχει αποκτήσει στο παρελθόν. Το κίνητρο είναι η διαδεδομένη χρήση εξομοιωτών, οι οποίοι χρησιμοποιούν απτικούς ρομποτικούς μηχανισμούς, τα μοντέλα δύναμης των οποίων βασίζονται στην εμπειρία των ειδικών. Η πειραματική μελέτη πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ενός απτικού ρομποτικού μηχανισμού ενός βαθμού ελευθερίας, ο οποίος κατασκευάστηκε ειδικά για αυτό. Εθελοντές “εκπαιδεύτηκαν” σε μια συγκεκριμένη δύναμη και ακολούθως προσπάθησαν να αναπαράγουν την απτική εμπειρία που είχαν. Η αξιολόγηση και μελέτη των πειραματικών δεδομένων έδειξε ότι η ικανότητα απτικής ανάκλησης στον άνθρωπο υφίσταται, ωστόσο διαφέρει από άτομο σε άτομο. Επομένως, για τον προσδιορισμό ενός μοντέλου δύναμης ή ροπής ενός ρομποτικού απτικού εξομοιωτή μπορούμε να βασιστούμε στην εμπειρία ενός ειδικού, αρκεί να διαθέτει ανεπτυγμένη ικανότητα απτικής ανάκλησης.

Λέξεις κλειδιά: Απτικοί Ρομποτικοί Μηχανισμοί, Απτική Ανάκληση, Ιατρικός Εξομοιωτής, Εικονική Πραγματικότητα.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην εποχή μας πλήθος τεχνολογικών επιτευγμάτων βρίσκουν εφαρμογή στην καθημερινότητα σε τομείς όπως η εργασία, η εκπαίδευση και η ψυχαγωγία. Ένα από αυτά είναι οι εξομοιωτές. Η εξομοίωση είναι μια διαδικασία βασισμένη σε τεχνικές εικονικής πραγματικότητας με στόχο να μεταφέρει το χρήστη, σε ένα τεχνητό, εικονικό και κατασκευασμένο από υπολογιστή περιβάλλον. Ο προγραμματισμός των συσκευών αυτών απαιτεί ρεαλιστική μοντελοποίηση του προς εξομοίωση περιβάλλοντος. Καθίσταται έτσι απαραίτητη η χρήση μαθηματικών μοντέλων και ο προσδιορισμός των παραμέτρων τους. Ένας ικανός τρόπος επιλογής παραμέτρων είναι η αξιοποίηση της εμπειρίας ειδικών. Επομένως, οι παράμετροι της μοντελοποίησης βασίζονται στην εμπειρία κάποιου, ο οποίος γνωρίζει επαρκώς την προς μοντελοποίηση διαδικασία.

Τελευταία, γίνεται όλο και πιο διαδεδομένη η χρήση εξομοιωτών, οι οποίοι περιλαμβάνουν απτικούς ρομποτικούς μηχανισμούς, τα μοντέλα δύναμης των οποίων βασίζονται στην εμπειρία των ειδικών. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι ιατρικοί εξομοιωτές. Ένα ενδιαφέρον ερώτημα, που θα προσπαθήσουμε να απαντήσουμε, είναι εάν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την εμπειρία αυτή με σκοπό να παράγουμε αξιόπιστα μοντέλα δύναμης για εξομοιωτές. Σε περίπτωση καταφατικής απάντησης, προκύπτει ένας απλός και οικονομικός τρόπος για τον καθορισμό του

μοντέλου δύναμης. Στην αντίθετη περίπτωση, ο καθορισμός του μοντέλου ανάδρασης δύναμης γίνεται αρκετά πιο σύνθετος και η αξιοπιστία του μοντέλου εξαρτάται και από την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του. Ιδιαίτερα όσον αφορά τους ιατρικούς εξομοιωτές, η χρήση της εμπειρίας των ειδικών ξεπερνά το πρόβλημα της περίπλοκης μαθηματικής μοντελοποίησης του ανθρώπινου ιστού και προσφέρει μια απλή, ασφαλή και οικονομική εναλλακτική.

Η χρήση της εμπειρίας ενός ειδικού σε ένα επιστημονικό πεδίο ως αξιόπιστη πηγή δεδομένων για την μοντελοποίηση δυνάμεων έχει απασχολήσει τους ερευνητές τόσο από την σκοπιά της νευρολογίας όσο και από την σκοπιά της ρομποτικής. Ένας πρωτότυπος απτικός μηχανισμός για την εξομοίωση ουρολογικών επεμβάσεων, ο οποίος σχεδιάστηκε για εκπαιδευτική χρήση, χρησιμοποιώντας την εμπειρία του ειδικού παρουσιάζεται στο [Vlachos, 2003]. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης των απτικών μηχανισμών για την εκπαίδευση των γιατρών, όπως και η πειραματική απόδειξη ότι η χρήση της απτικής ανάδρασης μειώνει τον τραυματισμό των ιστών, παρουσιάζονται στο [Wagner, 2006]. Οι έρευνες έχουν οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι η δυνατότητα ενός ατόμου να ανακαλεί απτικές εμπειρίες διαφέρει ιδιαίτερα από άτομο σε άτομο [Batteau, 2004]. Επίσης, παρουσιάστηκε στην συγκεκριμένη έρευνα ότι η δυνατότητα της απτικής ανάκλησης είναι ανεξάρτητη από την επαγγελματική εμπειρία, όσον αφορά την αντίληψη μιας συγκεκριμένης εμπειρίας. Ωστόσο η συγκεκριμένη έρευνα στόχευε σε ένα περιορισμένο εύρος ατόμων (ιατροί, νοσοκόμες). Η δυνατότητα ενός ατόμου να ανακαλεί στο μυαλό του και να αναπαράγει μια συγκεκριμένη δύναμη, την οποία δέχτηκε στο παρελθόν, έχει ερευνηθεί, [Toffin, 2003], ως προς την ανάκληση του μέτρου της δύναμης και της κατεύθυνσής της. Από αυτή την έρευνα εξήχθη το συμπέρασμα, ότι το άτομο δεν μπορεί να ανακαλέσει ακριβώς το διάνυσμα της δύναμης, αλλά μπορεί να ανακαλέσει την αναγκαία μυϊκή δραστηριότητα ώστε να αντισταθεί στη δύναμη ή να την αναπαράγει. Η διαφορά με την παρούσα εργασία είναι ότι τα πειράματα, τα οποία κάναμε δεν στοχεύουν στην απομνημόνευση διανύσματος δύναμης αλλά στην απομνημόνευση μιας συγκεκριμένης παραμέτρου.

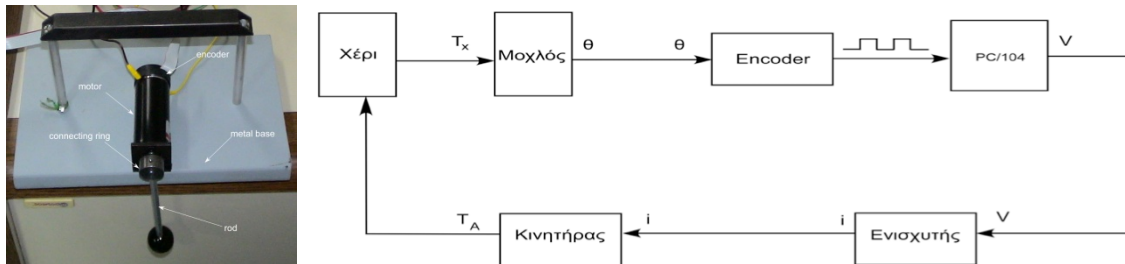
Ο απτικός μηχανισμός που κατασκευάστηκε για τις ανάγκες της εργασίας περιγράφεται στο δεύτερο κεφάλαιο. Η περιγραφή του περιβάλλοντος δυνάμεων, η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα των πειραμάτων, καθώς και η αξιολόγησή τους, παρουσιάζονται στο τρίτο κεφάλαιο. Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο συζητούνται τα εξαγόμενα συμπεράσματα.

2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΑΠΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ

2.1 ΑΠΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ

Με στόχο να εξεταστεί η αξιοπιστία της χρήσης της εμπειρίας του ειδικού, κατασκευάστηκε ένας απτικός μηχανισμός ενός βαθμού ελευθερίας (Σχήμα 1α). Επιλέξαμε την κατασκευή και όχι την χρήση ενός μηχανισμού όπως το PHANTOM ή το DELTA, διότι σε αυτή την φάση των πειραμάτων επιθυμούμε ένα απλό και εύκολα ελεγχόμενο περιβάλλον, δηλ. την κίνηση και εφαρμογή δυνάμεων αποκλειστικά σε έναν βαθμό ελευθερίας, πράγμα δύσκολο με απτικές συσκευές γενικής χρήσης με αρκετούς βαθμούς ελευθερίας όπως οι παραπάνω. Ο απτικός μηχανισμός αποτελείται από μια μεταλλική βάση, με έναν DC κινητήρα των 60 Watt, έναν αισθητήρα θέσης (encoder), ο οποίος διαβάζει τη γωνία του άξονα του κινητήρα και την στέλνει σε έναν υπολογιστή PC/104 όπου γίνεται η ανάλυση των στοιχείων. Ο κινητήρας οδηγείται από

έναν ενισχυτή. Ένας μοχλός με σφαιρική λαβή προσαρμόζεται στον άξονα του κινητήρα. Ο χρήστης αλληλεπιδρά με το μηχανισμό μετακινώντας τη σφαίρα με δύο δάχτυλα (αντίχειρα, δείκτη). Το δομικό διάγραμμα της αλληλεπίδρασης της απτικής διάταξης με το χρήστη παρουσιάζεται στο Σχήμα 1β.



Σχήμα 1. α) Ο απτικός μηχανισμός. β) Δομικό διάγραμμα αλληλεπίδρασης χρήστη-μηχανισμού.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα ο χρήστης περιστρέφει το μοχλό της διάταξης προκαλώντας έτσι τη γωνιακή μετατόπιση που “διαβάζει” ο encoder. Το σήμα οδηγείται στη μονάδα ελέγχου (PC/104), όπου σύμφωνα με το μοντέλο δυνάμεων που έχει προγραμματιστεί, υπολογίζεται η τάση ελέγχου προς τον ενισχυτή. Ο ενισχυτής στη συνέχεια στέλνει το ρεύμα που αντιστοιχεί στον κινητήρα. Έτσι ο χρήστης νιώθει την ανάδραση ενός προεπιλεγμένου μοντέλου δύναμης στο χέρι του. Ο απτικός μηχανισμός σχεδιάστηκε έτσι ώστε να έχει χαμηλό βάρος, μειωμένες τριβές αλλά και να είναι εύκολο να κατασκευαστεί. Επίσης, συνεκτιμήθηκαν διάφορες παράμετροι, όπως η αποφυγή ανατροπής του όταν ο χρήστης στρέφει το μοχλό και η δυνατότητα μεταφοράς του.

Η βάση του κινητήρα είναι κατασκευασμένη από χάλυβα. Όπως φαίνεται και από το προηγούμενο σχήμα πάνω στη βάση έχει προσδεθεί ένα έλασμα από αλουμίνιο, σχήματος Γ, πάνω στο οποίο προσαρμόζεται ο κινητήρας. Στον άξονα του κινητήρα έχει προσδεθεί ένας μεταλλικός δακτύλιος, ο οποίος φέρει στο κάτω μέρος του ακτινικά μια οπή με εσωτερικό σπείρωμα. Στο σπείρωμα αυτό βιδώνεται ο μοχλός, στην άκρη του οποίου υπάρχει μια μικρή σφαίρα ώστε να μπορεί ο χρήστης να στρέφει το μοχλό με το δείκτη και τον αντίχειρά του. Επιπλέον στο άνω μέρος η βάση φέρει μία χειρολαβή ώστε να μετακινείται εύκολα. Σύμφωνα με την στατική μελέτη που πραγματοποιήθηκε για το εξάρτημα της βάσης, το οποίο δέχεται και την μεγαλύτερη καταπόνηση, η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται είναι κατά πολύ χαμηλότερη από την μέγιστη επιτρεπόμενη για το δεδομένο υλικό (αλουμίνιο) και υπολογίστηκε ότι είναι ίση με $3,4 \text{ N/mm}^2$. Οι μελέτες αυτές πραγματοποιήθηκαν με δεδομένο ότι ο κινητήρας, ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί έχει συγκεκριμένα όρια όσον αφορά τη ροπή που μπορεί να αποδώσει.

2.2 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ

Ο κώδικας, ο οποίος γράφτηκε σε γλώσσα προγραμματισμού C και υλοποιείται σε περιβάλλον πραγματικού χρόνου QNX, χωρίζεται σε τρία τμήματα. Το πρώτο τμήμα αποτελείται από τις ρουτίνες που ελέγχουν την κάρτα PC/104 από την οποία διαβάζονται οι encoders. Στο δεύτερο τμήμα γίνονται οι υπολογισμοί από το μοντέλο ροπής για την απαιτούμενη τάση προς τον ενισχυτή. Το τρίτο τμήμα αποτελείται από τις ρουτίνες, οι οποίες “στέλνουν” την εντολή τάσης στην κάρτα αναλογικών εξόδων του PC/104 πύργου. Επίσης, ο κώδικας δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει ποιο πείραμα θέλει να εκτελέσει. Για παράδειγμα εκτός από το πείραμα του ελατηρίου,

στο οποίο έχει προγραμματιστεί η δύναμη ανάδρασης να είναι αυτή ενός εικονικού ελατηρίου, υπάρχει η δυνατότητα επιλογής πειράματος τριβής ή συνδυασμός των δύο.

Για το πείραμα, το οποίο εκτελέστηκε στην παρούσα εργασία υλοποιήθηκαν δύο παρόμοια προγράμματα, ένα για το στάδιο της εκπαίδευσης των χρηστών και ένα για το στάδιο της επιλογής των παραμέτρων. Ουσιαστικά η μόνη διαφορά των δύο είναι ότι στο πρόγραμμα “εκπαίδευσης” ο χρήστης επιλέγει μονάχα το ποιο πείραμα θα εκτελέσει και τότε θα το τερματίσει, χωρίς να έχει καμία επιρροή στο μοντέλο της ροπής ενώ στον κώδικα “επιλογής παραμέτρων” ο χρήστης μπορεί να αλλάζει τις παραμέτρους του μοντέλου κατά τη διάρκεια του πειράματος.

3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Κριτήριο για την επιλογή του περιβάλλοντος του πειράματος ήταν να είναι όσο το δυνατόν πιο απλό και ελεγχόμενο, έτσι ώστε οι χρήστες οι οποίοι έρχονταν για πρώτη φορά σε επαφή με απτικό μηχανισμό να κατανοήσουν τη διαδικασία. Επιπλέον επιλέχθηκε το πείραμα να μην έχει πολλές παραμέτρους, έτσι ώστε να εξεταστεί η δυνατότητα της απτικής ανάκλησης από μια αρχικά απλή βάση. Σε περίπτωση ικανοποιητικών αποτελεσμάτων μπορούν να διεξαχθούν πειράματα με περισσότερες παραμέτρους.

Καθώς οι χρήστες μετακινούν το μοχλό δέχονται μια δύναμη από τον κινητήρα. Ο κινητήρας έχει προγραμματιστεί να λειτουργεί ως περιστροφικό ελατήριο, σύμφωνα με την (1).

$$T_{des} = K_{ελ} \theta \quad (1)$$

όπου θ είναι η γωνία σε rad, $K_{ελ}$ είναι η σταθερά του ελατηρίου σε mNm/rad και T_{des} είναι η ροπή σε mNm. Η εντολή τάσης, η οποία στέλνεται στον ενισχυτή υπολογίζεται από την (2).

$$V_{des} = \frac{T_{des}}{K_T K_{amp}} \quad (2)$$

Όπου K_{amp} είναι το κέρδος που ρυθμίζεται χειροκίνητα πάνω στον ενισχυτή, K_T είναι η σταθερά ροπής του κινητήρα, και V_{des} είναι η εντολή τάσης που στέλνεται στον ενισχυτή. Έχοντας υπόψη τη μέγιστη συνεχή ροπή, την οποία μπορεί να αποδώσει ο κινητήρας (88.2 mNm), υπολογίστηκαν τα όρια εντός των οποίων μπορεί να μεταβάλλεται η $K_{ελ}$, βλέπε (3), για επιτρεπόμενες γωνίες ± 0.21 rad.

$$0 < K_{ελ} < 400 \quad (3)$$

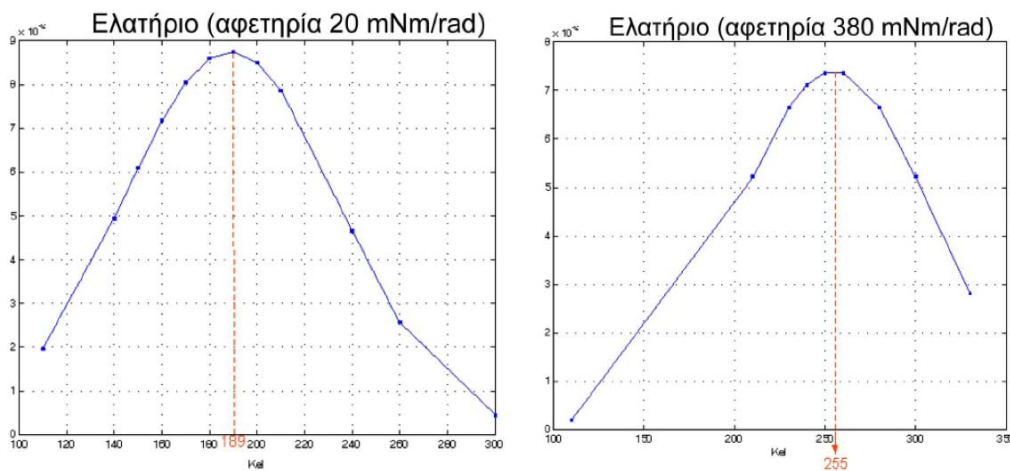
Η διαδικασία περιλαμβάνει δύο φάσεις. Την φάση εκπαίδευσης και την φάση απτικής ανάκλησης. Συνολικά 30 χρήστες συμμετείχαν και στις δύο φάσεις της πειραματικής διαδικασίας. Κατά την διάρκεια της φάσης εκπαίδευσης ο στόχος είναι οι χρήστες να νιώσουν τη δύναμη, η οποία ασκείται στα δάχτυλά τους από το εικονικό ελατήριο και να προσπαθήσουν να την απομνημονεύσουν. Η δύναμη του ελατηρίου εξαρτάται από τη σταθερά σκληρότητας του ελατηρίου, για την οποία οι χρήστες δεν

έχουν απολύτως καμία πληροφορία. Όλοι οι χρήστες εκπαιδεύονται στην ίδια σταθερά ελατηρίου (200 mNm/rad), προκειμένου να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα. Η εκπαίδευση γίνεται σε δύο στάδια ώστε οι χρήστες να εξοικειωθούν ακόμη περισσότερο με την αντίσταση του ελατηρίου. Κάθε στάδιο της εκπαίδευσης διαρκούσε περίπου 5 λεπτά και ανάμεσα στα στάδια μεσολαβούσε χρονικό διάστημα 15 λεπτών.

Η δεύτερη φάση είναι η φάση της επιλογής παραμέτρων. Λαμβάνει χώρα μισή ώρα μετά τη φάση της εκπαίδευσης και διαρκεί περίπου 5 λεπτά. Στο στάδιο αυτό οι χρήστες έχουν την δυνατότητα να ρυθμίσουν μόνοι τους τη σταθερά ελατηρίου επιλέγοντας τα πλήκτρα + και - στο πληκτρολόγιο ξεκινώντας από μια προεπιλεγμένη σταθερά ελατηρίου. Ορισμένοι από τους χρήστες αποφασίστηκε να ξεκινήσουν την αναζήτηση από μια πολύ χαμηλή αφετηρία σταθεράς ελατηρίου, δηλαδή από ένα πολύ μαλακό ελατήριο, 20 mNm/rad, ενώ οι υπόλοιποι αποφασίστηκε να ξεκινήσουν από μια αρκετά υψηλή αφετηρία σταθεράς, δηλαδή από ένα αρκετά σκληρό ελατήριο, 380 mNm/rad. Στόχος είναι να συγκριθούν τα αποτελέσματα των δύο ομάδων ώστε να διερευνηθεί αν υπάρχει κάποια σχέση μεταξύ της αφετηρίας της τιμής του $K_{ελ}$ και της τελικής επιλογής των χρηστών. Φυσικά, στους χρήστες δεν ανακοινώνεται καμία πληροφορία για την σταθερά ελατηρίου την οποία έχουν ως αφετηρία, αν δηλαδή είναι υψηλότερη ή χαμηλότερη αυτής στην οποία εκπαιδεύτηκαν.

3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων της πρώτης ομάδας, (αφετηρία από μαλακό ελατήριο), βλέπε Σχήμα 2α, δείχνουν ότι οι περισσότεροι χρήστες ρύθμισαν τη σταθερά ελατηρίου χαμηλότερα από ότι ήταν στην πραγματικότητα. Η πλειοψηφία των χρηστών είχε ιδιαίτερα χαμηλά ποσοστά σφάλματος. Το 69% των χρηστών είχε σφάλμα μικρότερο ή ίσο με 20% και ένα ποσοστό 31% είχε σφάλμα μικρότερο ή ίσο του 5%. Επιπλέον μόνο δύο χρήστες είχαν σφάλμα που ξεπερνούσε το 30%. Το γεγονός ότι τα σφάλματα κυμαίνονται σε χαμηλά ποσοστά είναι αρκετά ενθαρρυντικό, αν λάβει κανείς υπόψη ότι η εκπαίδευση είναι σχετικά σύντομη και οι ροπές που δέχεται ο χρήστης σχετικά μικρές της τάξης των mNm. Μάλιστα ο μέσος όρος σχετικού σφάλματος είναι 18.8%. Η μέση τιμή της κατανομής είναι 189 mNm/rad και η τυπική απόκλιση 45.5, οπότε το σφάλμα μέσης τιμής περιορίζεται σε 5.5% (Σχήμα 2α).



Σχήμα 2. α) Καμπύλη Gauss για τα αποτελέσματα της πρώτης ομάδας (αφετηρία: μαλακό ελατήριο). β) Καμπύλη Gauss για τα αποτελέσματα της δεύτερης ομάδας (αφετηρία: σκληρό ελατήριο).

Για την δεύτερη ομάδα (αφετηρία από σκληρό ελατήριο), βλέπε Σχήμα 2β, ισχύει ότι οι περισσότεροι ρύθμισαν τη σταθερά υψηλότερα από ότι ήταν στην πραγματικότητα. Το σφάλμα στα αποτελέσματα αυτά ήταν αρκετά υψηλότερο από ότι σε όλα τα προηγούμενα αποτελέσματα. Βέβαια και σε αυτά τα αποτελέσματα η πλειοψηφία των χρηστών (57%) είχε σφάλμα μικρότερο ή ίσο του 30%, αλλά τα σφάλματα των υπολοίπων χρηστών ήταν αρκετά υψηλότερα, γεγονός που αυξάνει το μέσο όρο σφάλματος των συγκεκριμένων αποτελεσμάτων, ο οποίος είναι 34%. Η πλειοψηφία των χρηστών κινήθηκε στην περιοχή 240-300 mNm/rad, ενώ στην περιοχή γύρω από την σταθερά ελατηρίου στην οποία εκπαιδεύτηκαν οι χρήστες (170-230 mNm/rad) υπήρχαν πολύ λιγότερα αποτελέσματα.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας, η επιδίωξη της παρούσας εργασίας ήταν η διερεύνηση της αξιοποίησης της εμπειρίας του ειδικού για τον προσδιορισμό του μοντέλου δυνάμεων σε απτικούς μηχανισμούς. Η εμπειρία του ειδικού μπορεί να αξιοποιηθεί στην περίπτωση που αποδειχτεί πειραματικά ότι ο άνθρωπος διαθέτει την ικανότητα απτικής ανάκλησης. Η πειραματική μέθοδος που εφαρμόστηκε αποτελείται από δύο φάσεις. Οι χρήστες εκπαιδεύονται σε ένα περιβάλλον δυνάμεων, το οποίο προσομοιώνει ένα ελατήριο και στην επόμενη φάση καλούνται να το αναγνωρίσουν, να προσδιορίσουν δηλαδή τη σταθερά ελατηρίου στην οποία εκπαιδεύτηκαν.

Μετά την ολοκλήρωση όλων των πειραμάτων καθώς και την ανάλυση των αποτελεσμάτων, μπορούμε να πούμε ότι οι πρώτες ενδείξεις είναι αρκετά ενθαρρυντικές καθώς η πλειοψηφία των χρηστών κινήθηκε σε ποσοστά σφάλματος μικρότερα του 20%. Η μέση τιμή, η οποία προέκυψε στην δεύτερη φάση ήταν κοντά στην επιθυμητή σκληρότητα ελατηρίου. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα ακολουθούν κανονική κατανομή. Κλείνοντας μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η χρήση της εμπειρίας του ειδικού στην παραμετροποίηση ενός μοντέλου δύναμης εξομοιωτών κρίνεται σε πρώτη φάση ως μια χρήσιμη μέθοδος, η οποία εφόσον ελεγχθεί με ένα ορισμένο εύρος περαιτέρω πειραμάτων και με χρήση και άλλων μοντέλων δύναμης εκτός του ελατηρίου, μπορεί να αποτελέσει μια αξιόπιστη πηγή πληροφοριών όσον αφορά την δημιουργία εικονικών μοντέλων.

5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Batteau, L. M., et al. (2004), "A Study on the Perception of Haptics in Surgical Simulation", *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3078, pp. 185-192.

Toffin D., McIntyre J., Droulez J., Kemeny A., and Berthoz A. (2003), "Perception and Reproduction of Force Direction in the Horizontal Plane", *Journal of Neurophysiology*, vol. 90, pp. 3040-3053.

Vlachos K., Papadopoulos E., and Mitropoulos D. (2003), "Design and Implementation of a Haptic Device for Urological Operations", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 19, no. 5, pp. 801-809.

Wagner C. R. (2006), "Force Feedback In Surgery: Physical Constraints and Haptic Information", PhD, Harvard University.