

Απτικές Τεχνολογίες για Μικροσκοπικά ή Εικονικά Βιολογικά Περιβάλλοντα

Κώστας Βλάχος* και Ευάγγελος Παπαδόπουλος[◇]

*Μεταδιδάκτορας Ερευνητής, [◇]Αναπλ. Καθηγητής
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτομάτου Ελέγχου,
Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780 Ζωγράφος, Αθήνα, Ελλάδα

*Τηλ.: 2107722643, Φαξ: 2107721455, E-mail: kostaswl@central.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Σκοπός του ερευνητικού έργου ήταν η προχωρημένη έρευνα στους τομείς της απτικής τεχνολογίας, εικονικής πραγματικότητας, τεχνολογίας εξομοιωτών, γραφικών και συστημάτων αυτόματου ελέγχου και η εφαρμογή τους σε περιβάλλοντα ιατρικών επεμβάσεων σε μακρο και μικρο επίπεδο. Μακροσκοπικά ασχοληθήκαμε κυρίως με τους περιορισμούς των ιατρικών εκπαιδευτικών εξομοιωτών. Δηλαδή τη δυσκολία κατασκευής απτικών μηχανισμών ελάχιστης αδράνειας και τριβής, τη δυσκολία για πειστική γραφική απεικόνιση σε πραγματικό χρόνο και την ανυπαρξία κατάλληλων μοντέλων περιγραφής δυνάμεων αλληλεπίδρασης ιστών και εργαλείων. Η έρευνα αντιμετώπισε τα παραπάνω εμπόδια επιτυχώς με ανάπτυξη μεθόδων ελαχιστοποίησης αδράνειας και τριβής σε απτικούς μηχανισμούς, δημιουργία γρήγορων και αξιόπιστων μοντέλων δυνάμεων, ανάπτυξη λογισμικού πιστής γραφικής απεικόνισης, ανθρώπινης ανατομίας και επεμβάσεων, έρευνα πάνω στον καθορισμό κριτηρίων και μεθόδων αξιολόγησης εκπαιδευόμενων σε εξομοιωτή και ανάπτυξη κατάλληλων αλγόριθμων ελέγχου. Μικροσκοπικά, η έρευνα επεκτάθηκε στην σύνδεση απτικών τεχνολογιών και τηλεχειρισμού μικρορομποτικών μηχανισμών για εφαρμογές βιοτεχνολογίας, με αποτέλεσμα την οδήγηση υπάρχουσας μικρορομποτικής πλατφόρμας με ανάλυση μικρομέτρου.

Λέξεις Κλειδιά: Απτικοί ρομποτικοί μηχανισμοί, ιατρικοί εξομοιωτές, απτικός μικρο-τηλεχειρισμός.

ABSTRACT: Our goal was the advanced research in haptic technologies, virtual reality, simulators, and automatic control, and their application in medical operations in macro and microenvironment. In macroenvironment we investigated the factors that determine the simulator effectiveness, i.e. the inertia and friction that the simulator shows, the reliability of the real time graphical representation, and the force model that describes the interaction between virtual tools and environment. We confronted successfully with these problems by formulating new inertia and friction minimization methodologies in haptic mechanisms, developing fast and reliable force models, and creating realistic virtual representation of human anatomy. Our research focused also on the definition of trainee evaluation criteria and methods, and on the formulation of appropriate control algorithms. In microenvironment, we researched the application of haptic technologies in biotechnology. The result is the development of a micro-telemanipulation environment and the haptic telemanipulation of an existing micro-robotic platform with micrometer resolution.

Keywords: Haptic robotic mechanisms, medical simulators, haptic micro-telemanipulation.

I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί κατακόρυφα η σχετική ερευνητική δραστηριότητα με έμφαση στην Ιατρική, ενώ παράλληλα αναπτύσσονται απτικά συστήματα και λογισμικό απεικόνισης επεμβάσεων, με κύρια εφαρμογή την εκπαίδευση χειρουργών. Η

ραγδαία εξέλιξη των υπολογιστών, έκανε δυνατή την ανάπτυξη πιστών εικονικών περιβαλλόντων ιατρικών επεμβάσεων και διευκόλυνε τη χρήση εξομοιωτών στην ιατρική εκπαίδευση. Η εκπαίδευση αυτή εξαπλώνεται γιατί είναι οικονομική, πραγματοποιήσιμη οπουδήποτε και οποτεδήποτε, με δυνατότητα μέτρησης της απόδοσης του εκπαιδευόμενου και δυνατότητα προσαρμογής σε διαφορετικά περιστατικά. Συγχρόνως, αποφεύγεται η χρήση πειραματόζωων ή η εξάσκηση σε ασθενείς.

Στον τομέα των ιατρικών εξομοιωτών, υφίστανται δύο κυρίαρχες τάσεις. Η πρώτη χαρακτηρίζεται από την χρήση απτικών μηχανισμών γενικού τύπου που δεν κατασκευάστηκαν αποκλειστικά για ιατρικές εφαρμογές, όπως το Phantom [1], το Pantoscope [2] και το Freedom-7, [3]. Ιατρικοί εκπαιδευτικοί εξομοιωτές που χρησιμοποιούν μηχανισμούς γενικού τύπου περιγράφονται στα [4] και [5]. Η δεύτερη τάση χαρακτηρίζεται από τη χρήση εξειδικευμένων απτικών μηχανισμών. Αυτοί χρησιμοποιούνται κυρίως για εκπαίδευση στις λαπαροσκοπικές επεμβάσεις. Παραδείγματα αποτελούν το Laparoscopic Impulse Engine και το Virtual Laparoscopic Interface, [6]. Οι λαπαροσκοπικοί εξομοιωτές Karlsruhe Endoscopic Surgery Trainer και Virtual Endoscopic Surgery Training (VEST) χρησιμοποιούν το λογισμικό KISMET και ποικιλία απτικών μηχανισμών, [7]. Οι συγγραφείς της παρούσας εργασίας σχεδίασαν και κατασκεύασαν απτικό μηχανισμό και εκπαιδευτικό εξομοιωτή ουρολογικών επεμβάσεων, [8]. Τεχνικές βελτιστοποίησης ρομποτικών και απτικών μηχανισμών μελετώνται στις [9], [10]. Παραδείγματα μεθόδων μοντελοποίησης μαλακών ιστών και παραμόρφωσης τους παρουσιάζονται στις [11], [12]. Η αλληλεπίδραση σωμάτων στον εικονικό χώρο και η ανάπτυξη των δυνάμεων αλληλεπίδρασης μελετώνται στα [13], [14].

Οι απτικοί μηχανισμοί χρησιμοποιούνται επίσης σε τηλεχειριζόμενα ρομποτικά συστήματα, παρέχοντας εντολές κίνησης σε ρομποτικές διατάξεις επέμβασης. Τα συστήματα αυτά παρέχουν ασφάλεια και ακρίβεια κατά τη διάρκεια ιατρικών επεμβάσεων σε μακροσκοπικό επίπεδο, ή τη δυνατότητα επεμβάσεων σε μικροσκοπικό επίπεδο. Σε αυτά, η ανάδραση στο χέρι του χειριστή εφαρμόζεται από τον απτικό μηχανισμό (master), ενώ η σχετική πληροφορία προέρχεται από τη διάταξη επέμβασης (slave) και όχι από εικονικό περιβάλλον. Σε μικρο-επίπεδο, χρησιμοποιούνται διατάξεις επέμβασης κλίμακας mm ή nm, έτσι ώστε να μπορούν να εισχωρούν στο ανθρώπινο σώμα, ή να επεμβαίνουν σε επίπεδο μορίου. Στο επίπεδο αυτό, οι πραγματικές εφαρμοζόμενες δυνάμεις είναι κάτω από τα όρια αντίληψης του

ανθρώπου και επομένως, οι δυνάμεις που εφαρμόζει ο απτικός μηχανισμός στον χρήστη πρέπει να είναι κατάλληλα ενισχυμένες. Εφαρμογές των τηλεχειριζόμενων μικρο-ρομποτικών συστημάτων στην Ιατρική σε μακρο-επίπεδο παρουσιάζονται στις [15] και [16]. Ένας σφαιρικού τύπου απτικός μηχανισμός, για εφαρμογές τηλεχειρισμού και εικονικής πραγματικότητας περιγράφεται στην [17]. Ένας εξωσκελετικός απτικός μηχανισμός για εφαρμογές τηλεχειρισμού έχει μελετηθεί, [18], ενώ απτικός μηχανισμός γενικού τύπου, έχει χρησιμοποιηθεί στον τηλεχειρισμό μιας μικρο-αρπάγης, [19].

Λόγω έλλειψης χώρου και για μια πιο ολοκληρωμένη παρουσίαση η παρούσα εργασία εστιάζει σε τρεις επιλεγμένες σημαντικές περιοχές του ερευνητικού έργου. Η πρώτη είναι η ανάπτυξη μεθοδολογιών βελτιστοποίησης απτικών ρομποτικών μηχανισμών και περιγράφεται στο υποκεφάλαιο Β του κεφαλαίου ΙΙ. Η δεύτερη αναπτύσσεται στο υποκεφάλαιο Γ του ίδιου κεφαλαίου και περιγράφει την ανάπτυξη γραφικού περιβάλλοντος ιατρικού εξομοιωτή. Αυτά τα κεφάλαια αφορούν στην εφαρμογή απτικών τεχνολογιών σε ιατρικούς εκπαιδευτικούς εξομοιωτές σε μακροσκοπικά περιβάλλοντα. Η τρίτη περιοχή αποτελεί το κεφάλαιο ΙΙΙ και παρουσιάζει την έρευνά μας σχετικά με την εφαρμογή απτικών τεχνολογιών στον μικρόκοσμο. Η παρούσα έρευνα συμπληρώνει και επεκτείνει τα αποτελέσματα προηγούμενης μας έρευνας που εστιάσθηκε στη δημιουργία εκπαιδευτικού εξομοιωτή ουρολογικών επεμβάσεων.

ΙΙ. ΑΠΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΕΞΟΜΟΙΩΤΕΣ

Α. Εισαγωγή

Γενικά, ένας ιατρικός εκπαιδευτικός εξομοιωτής αποτελείται από α) απτικό μηχανισμό ανάδρασης δυνάμεων, ο οποίος μεταφέρει στον εκπαιδευόμενο δυνάμεις και στο εικονικό μοντέλο ιστών τη θέση του τελικού του σημείου δράσης, β) εικονικό μοντέλο, το οποίο περιλαμβάνει σύστημα γραφικής απεικόνισης εικονικού περιβάλλοντος και των παραμορφώσεων του και μοντέλο υπολογισμού των δυνάμεων αλληλεπίδρασης ιατρικών εργαλείων και εικονικού περιβάλλοντος, και γ) σύστημα ελέγχου, που συντονίζει και ελέγχει τον απτικό μηχανισμό και το εικονικό μοντέλο.

Β. Βελτιστοποίηση απτικού μηχανισμού

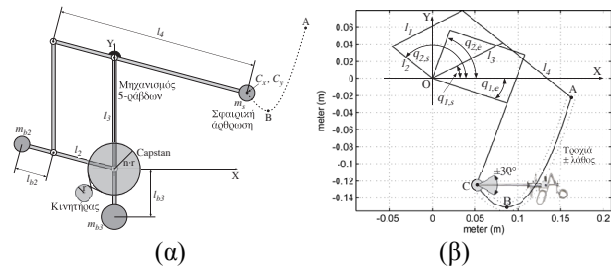
Μια από τις μεγαλύτερες δυσκολίες στο σχεδιασμό απτικών μηχανισμών ανάδρασης δυνάμεων είναι η επιθυμία μας να είναι “διαφανής”, δηλαδή να μην γίνεται αντιληπτός από τον χρήστη. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει η δυναμική του να είναι “ελάχιστη”, δηλαδή όλοι οι όροι που σχετίζονται με τη δυναμική του συμπεριφορά πρέπει να είναι αμελητέοι. Η έρευνα που πραγματοποιήσαμε με στόχο την ελαχιστοποίηση της δυναμικής του απτικού μηχανισμού κατέληξε σε μια γενική μεθοδολογία μεγιστοποίησης της «διαφάνειας» ενός απτικού μηχανισμού, ανεξάρτητα από τον τύπο του και την εφαρμογή του. Χρησιμοποιήθηκε αλγόριθμος βελτιστοποίησης μίας αντικειμενικής συνάρτησης πολλών μεταβλητών. Η αντικειμενική συνάρτηση, f (Εξ. (1)), η οποία ελαχιστοποιείται κατά τη βελτιστοποίηση, περιέχει

όλες τις παρασιτικές ροπές και δυνάμεις που σχετίζονται με την δυναμική του μηχανισμού, έτσι όπως εμφανίζονται από την πλευρά του εκπαιδευόμενου χρήστη.

$$f = \sum_{i=1}^k f_i = \sum_{i=1}^k w_i \text{Norm}(\tilde{M}\dot{\mathbf{v}} + \tilde{\mathbf{V}} + \tilde{\mathbf{G}})_i \quad (1)$$

Περιέχει επίσης χαρακτηριστικά των κινητήρων και του συστήματος μετάδοσης του μηχανισμού. Η βελτιστοποίηση επιτυγχάνεται όχι μόνο για κάποιο σημείο στο χώρο εργασίας του μηχανισμού, ούτε για μια συγκεκριμένη τροχιά, αλλά για μια σειρά από τροχιές γύρω από μια τυπική. Η μεθοδολογία δίνει ως αποτελέσματα α) τη γεωμετρία του μηχανισμού, β) τη θέση της τυπικής τροχιάς του τελικού σημείου δράσης του μηχανισμού σε σχέση με την βάση του, γ) τα βάρη ζυγοστάθμισης του μηχανισμού, δ) τη θέση των βαρών ζυγοστάθμισης, ε) το λόγο μετάδοσης των κινητήρων και στ) το μέγεθος των κινητήρων των μεταφορικών βαθμών ελευθερίας.

Στην αντικειμενική συνάρτηση f , βλέπε Εξ. (1), $\tilde{M}\dot{\mathbf{v}}$ είναι οι όροι αδράνειας, $\tilde{\mathbf{V}}$ είναι μη γραμμικοί όροι εξαρτώμενοι από την ταχύτητα και $\tilde{\mathbf{G}}$ είναι οι όροι βαρύτητας του απτικού μηχανισμού. Η αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποιήθηκε ικανοποιώντας ταυτόχρονα διάφορους κινηματικούς και κατασκευαστικούς περιορισμούς. Η μεθοδολογία που αναπτύξαμε εφαρμόστηκε στην περίπτωση του απτικού μηχανισμού ενός εκπαιδευτικού εξομοιωτή ουρολογικών επεμβάσεων. Το Σχήμα 1α δείχνει τις παραμέτρους του μηχανισμού που βελτιστοποιούνται και το Σχήμα 1β απεικονίζει σχηματικά τον μηχανισμό σύμφωνα με τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης στην αρχή και το τέλος της τυπικής διαδρομής του τελικού σημείου δράσης.



Σχήμα 1 – (α) Οι παράμετροι του μηχανισμού που βελτιστοποιούνται. (β) Ο μηχανισμός σύμφωνα με τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης στην αρχή και το τέλος της τυπικής διαδρομής του τελικού σημείου δράσης.

Γ. Γραφικό περιβάλλον

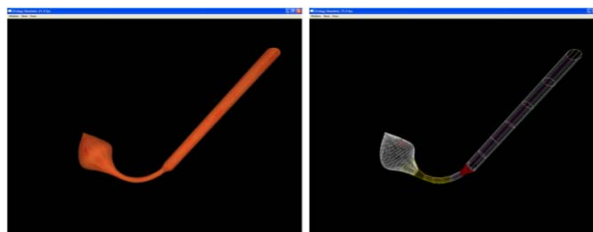
Η ρεαλιστική απεικόνιση της πραγματικότητας είναι αποφασιστικός παράγοντας για την αξιοπιστία ενός εξομοιωτή. Κατά τη διάρκεια της παρούσας έρευνας επεκτείναμε παλαιότερη δουλειά μας πάνω σε εκπαιδευτικό εξομοιωτή ουρολογικών επεμβάσεων, σχεδιάζοντας ξανά την ουρήθρα ενός άνδρα και συμπληρώνοντας το εικονικό περιβάλλον με την ουροδόχο κύστη. Γενικά η εικονική ουροδόχος κύστη αποτελεί μεγαλύτερη πρόκληση από την ουρήθρα διότι α) δεν μπορεί να προσεγγισθεί από κάποιο απλό σώμα όπως ο κύλινδρος στην περίπτωση της ουρήθρας, β) ακολουθεί πιο σύνθετους κανόνες παραμόρφωσης από την τελευταία και γ) απαιτεί διαφορετικούς κανόνες

κίνησης του ενδοσκοπίου μέσα σε αυτήν. Για την προσομοίωση, αναζητήσαμε μεθοδολογία η οποία αφενός να καλύπτει τις παραπάνω απαιτήσεις και αφετέρου να μπορεί στο μέλλον να επεκταθεί και να περιλαμβάνει και άλλες λειτουργίες όπως π.χ. κοπή εικονικών ιστών. Για την γραφική απεικόνιση της ουροδόχου κύστης και των παραμορφώσεων της αναπτύχθηκε διαφορετική μεθοδολογία από την μεθοδολογία απεικόνισης της ουρήθρας, διότι η τελευταία αν και γρήγορη και αποτελεσματική λύση για την ουρήθρα, δεν μπορούσε να καλύψει τις αυξημένες και πιο σύνθετες ανάγκες της κύστης. Κατόπιν τούτου ακολούθησε μια έρευνα σχετικά με τους κανόνες που διέπουν την προσομοίωση στην περιοχή εκείνη. Καταλήξαμε λοιπόν στα εξής. Α) Ο τρόπος σχεδίασης της κύστης πρέπει να δίνει την δυνατότητα αναπαράστασης της πολύπλοκης γεωμετρίας της. Β) Απαιτείται τρισδιάστατη κίνηση του ενδοσκοπίου στον χώρο της ουροδόχου κύστης χωρίς η θέση του να επηρεάζει τα τοιχώματα αν δεν υπάρχει επαφή. Γ) Σε περίπτωση επαφής να παρουσιάζεται μια παραμόρφωση η οποία θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη της την γεωμετρία των τοιχωμάτων στο σημείο της επαφής. Δ) Μετά την απομάκρυνση του εργαλείου από το τοίχωμα να εξασφαλίζεται η επιστροφή στην αρχική κατάσταση. Ε) Η όλη μεθοδολογία που θα κατασκευαστεί να περιλαμβάνει ή να μπορεί να περιλάβει αργότερα και την δυνατότητα κοπής του μαλακού ιστού.

Πιο συγκεκριμένα, η ουρήθρα κατασκευάστηκε με την βοήθεια διατομών, όπως και στην παλαιότερη δουλειά μας, εμπλουτίστηκε όμως από μία δομή που περιείχε τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε διατομής όπως την αρχική ακτίνα, την θέση του κέντρου της, και την θέση της στο σύνολο της ουρήθρας. Ανάλογα με την θέση του ενδοσκοπίου στην ουρήθρα καταγράφονται στις δομές αυτές οι αλλαγές στις χαρακτηριστικές τιμές της κάθε διατομής διατηρώντας και τις αρχικές τιμές αυτών που είναι απαραίτητες για την σωστή απεικόνιση της παραμόρφωσης (υπολογισμός δυνάμεων, επιστροφή στην αρχική κατάσταση). Κατόπιν δημιουργήθηκε μια μεταβαλλόμενου πλήθους λίστα στην οποία καταχωρούνται οι δομές αυτές ανάλογα με την θέση τους στην ουρήθρα. Αυτή η λίστα είναι αρκετή για την απεικόνιση της ουρήθρας με την βοήθεια μιας συνάρτησης που περιέχει κλήσεις στην βιβλιοθήκη της OpenGL. Πευχαίνουμε έτσι την ανεξαρτητοποίηση του υπολογιστικού κομματιού της προσομοίωσης από το σχεδιαστικό κομμάτι. Στην περίπτωση μας αυτό είναι πολύ σημαντικό εξαιτίας της μεγάλης ανάγκης της σχεδίασης σε υπολογιστική ισχύ λόγω της πληθώρας πράξεων που απαιτεί η μέθοδος παραμετρικών κυβικών καμπυλών.

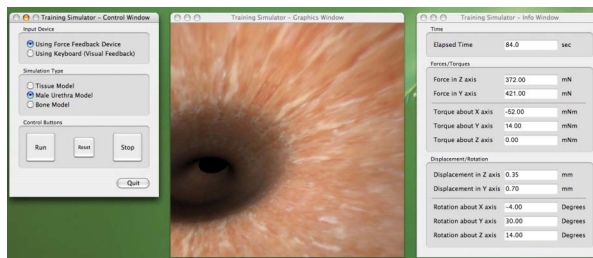
Η μοντελοποίηση της ουροδόχου κύστης ακολουθεί τη λογική των Vertex-based τεχνικών. Για την κατασκευή της ορίζεται αρχικά ένα πλήθος σημείων, τα σημεία επιφάνειας, τα οποία σχηματίζουν την δομή της κύστης. Ο ορισμός των σημείων επιφάνειας περιλαμβάνει α) τις αρχικές συντεταγμένες του σημείου στο χώρο, β) τις τρέχουσες συντεταγμένες και γ) ένα αρχικό διάνυσμα κάθετο στην επιφάνεια προσομοίωσης, το “διάνυσμα κατεύθυνσης”. Οι τιμές αυτές αποθηκεύονται σε μια δομή και κάθε δομή σε μια λίστα. Κατά τη διάρκεια της

προσομοίωσης λαμβάνεται η θέση του ενδοσκοπίου από τον απτικό μηχανισμό. Στη συνέχεια ελέγχεται αν αυτό έχει επαφή με τα τοιχώματα της κύστης, χρησιμοποιώντας τεχνικές ανίχνευσης επαφής που εφαρμόζεται στα σημεία επιφάνειας. Για να επιταχύνουμε την όλη διαδικασία, ο έλεγχος δεν γίνεται για κάθε σημείο επιφάνειας αλλά για μια ομάδα γύρω από την θέση του ενδοσκοπίου. Ο κάθε κύκλος ελέγχου ολοκληρώνεται με τον υπολογισμό των δυνάμεων ανάδρασης. Οι δυνάμεις αυτές υπολογίζονται από τα διανύσματα μεταβολής των σημείων. Το Σχήμα 2 δείχνει την ουροδόχο κύστη και την εικονική ουρήθρα υπό παραμόρφωση.



Σχήμα 2 – Η ουροδόχος κύστη με την εικονική ουρήθρα, ενώ παραμορφώνεται, η δεύτερη, από το ενδοσκόπιο.

Επιπλέον, σχεδιάστηκε και δημιουργήθηκε ένα Γραφικό Περιβάλλον Επικοινωνίας Χρήστη (Graphical User Interface, GUI) το οποίο είναι απλό στην χρήση του, φιλικό προς τον χρήστη και δίνει τη δυνατότητα αξιολόγησης των εκπαιδευόμενων, Σχήμα 3.



Σχήμα 3 – Το Γραφικό Περιβάλλον Επικοινωνίας Χρήστη (GUI).

Το GUI α) είναι απλό στην χρήση του και φιλικό προς τον χρήστη, β) είναι έτοιμο για μελλοντικές επεκτάσεις, όπως για παράδειγμα εξομοίωση διαφορετικών ιατρικών επεμβάσεων, γ) επιτρέπει στον χρήστη την χρήση του πληκτρολογίου του υπολογιστή αντί του απτικού μηχανισμού όταν αυτός δεν είναι διαθέσιμος ή δεν είναι αναγκαίος, π.χ. κατά τη διάρκεια δοκιμών ή αναβάθμισης υλικού ή λογισμικού, δ) παρέχει στον χρήστη όλα τα αναγκαία αριθμητικά δεδομένα, ε) έχει τη δυνατότητα ελέγχου και αξιολόγησης των επιδόσεων του εκπαιδευόμενου και στ) δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να τροποποιεί τις παραμέτρους που καθορίζουν την ανατομία της ουρήθρας και της ουροδόχου κύστης, καθώς και άλλες παραμέτρους όπως ο βαθμός ελαστικότητας του δέρματος και η διάμετρος του ενδοσκοπίου, με στόχο ένα πιο ρεαλιστικό περιβάλλον εκπαίδευσης και τη δυνατότητα διαφορετικών σεναρίων παθολογικών καταστάσεων. Το GUI αποτελείται από τρία παράθυρα, α) το παράθυρο ελέγχου (Control window), β) το παράθυρο γραφικής απεικόνισης (Graphics window) και γ) το παράθυρο πληροφοριών (Info window). Το παράθυρο ελέγχου αποτελείται από τρία πεδία. Στο πρώτο (Input Device) μπορεί ο χρήστης να επιλέξει την συσκευή με την οποία θα οδηγεί την γραφική απεικόνιση. Οι

διαθέσιμες συσκευές είναι ο απτικός μηχανισμός (Using Force Feedback Device) και το πληκτρολόγιο του υπολογιστή (Using Keyboard). Το δεύτερο είναι το πεδίο τύπου εξομοίωσης (Simulation Type), όπου ο χρήστης επιλέγει το είδος της εξομοίωσης στην οποία θέλει να συμμετάσχει. Προς το παρόν μπορεί να επιλέξει την εξομοίωση ουρολογικών επεμβάσεων σε άνδρα ασθενή (Male Urethra Model), την εξομοίωση ανθρώπινων ιστών γενικού τύπου (Tissue Model) ή το εικονικό περιβάλλον σκληρού οστού (Bone Model). Το τρίτο πεδίο του παραθύρου ελέγχου είναι αυτό που περιέχει τα κουμπιά ελέγχου (Control Buttons). Εδώ ο χρήστης μπορεί να ξεκινήσει (Run button) και να τερματίσει (Stop button) την εκπαιδευτική διαδικασία εξομοίωσης, να μηδενίσει τις διάφορες αριθμητικές ενδείξεις και να επαναφέρει την γραφική απεικόνιση στην αρχική της κατάσταση (Reset button).

Το παράθυρο γραφικής απεικόνισης περιέχει τα γραφικά όπως σχεδιάζονται από τα υποπρογράμματα της OpenGL, π.χ. την ουρήθρα (στην εξομοίωση ουρολογικών επεμβάσεων σε άνδρα ασθενή) ή τον ανθρώπινο ιστό (στην εξομοίωση ανθρώπινων ιστών γενικού τύπου) και τις παραμορφώσεις τους. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αλλάζει μέγεθος σε αυτό το παράθυρο ή να το εμφανίσει σε ολόκληρη την οθόνη (full screen). Το παράθυρο πληροφοριών εμφανίζει χρήσιμα δεδομένα σε σχέση με την εκπαιδευτική διαδικασία και είναι και αυτό χωρισμένο σε τρία πεδία. Το πρώτο πεδίο δείχνει το χρόνο που έχει περάσει από την αρχή της εικονικής εκπαίδευσης και μηδενίζεται με το πάτημα του Reset στο παράθυρο ελέγχου. Το δεύτερο πεδίο δείχνει τις δυνάμεις και ροπές που εφαρμόζονται στον εκπαιδευόμενο, στην περίπτωση χρήσης του μηχανισμού ανάδρασης δυνάμεων και το τρίτο πεδίο δείχνει τη θέση και τον προσανατολισμό του εικονικού ενδοσκοπίου κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης. Ο έλεγχος και η αξιολόγηση του εκπαιδευόμενου χρήστη πραγματοποιείται σε δύο επίπεδα. Το πρώτο είναι η μέτρηση του χρόνου εκτέλεσης του εκπαιδευτικού σεναρίου και το δεύτερο είναι η καταγραφή της θέσης και του προσανατολισμού του χειρουργικού εργαλείου που χειρίζεται ο εκπαιδευόμενος σε κάθε χρονική στιγμή και ο υπολογισμός της διαφοράς τους με την ιδανική τροχιά (όπως αυτή εκτιμάται από έμπειρους χειρουργούς). Από αυτές τις διαφορές υπολογίζεται η μέση τιμή του λάθους, το οποίο αποτελεί ένα από τα κριτήρια αξιολόγησης του εκπαιδευόμενου. Το GUI έχει υλοποιηθεί σε υπολογιστή Apple Macintosh χρησιμοποιώντας λειτουργικό σύστημα OSX 10.4 και τα περιβάλλοντα προγραμματισμού Xcode.

III. ΑΠΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ NANOTEΧΝΟΛΟΓΙΑ

A. Εισαγωγή

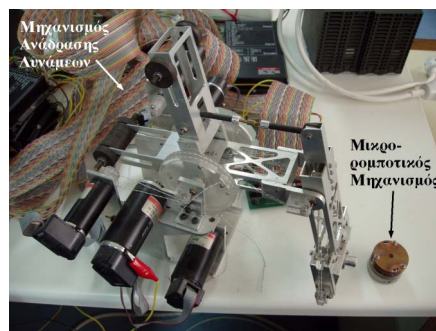
Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί ένα νέο ερευνητικό πεδίο στον τομέα της ρομποτικής, το οποίο επικεντρώνεται στον μικρόκοσμο ή ακόμα και στον νανόκοσμο, σε φαινόμενα δηλαδή που εκτυλίσσονται σε διαστάσεις μερικών μικρομέτρων (μm) ή νανομέτρων (nm). Στόχος της έρευνας είναι η δημιουργία μικρορομποτικών μηχανισμών τα οποία να αναλαμβάνουν εργασίες όπως μικροκατασκευές,

μικροσυναρμολογήσεις, επεμβάσεις μικροχειρουργικής ή ιατρικές επεμβάσεις σε επίπεδο κυττάρων. Συνήθως αυτοί οι μικρορομποτικοί μηχανισμοί ονομάζονται «υπηρέτες» και χειρίζονται από απόσταση (tele-manipulation) από άλλους ρομποτικούς μηχανισμούς, οι οποίοι ονομάζονται «κύριοι». Έχει αποδειχθεί ότι για έναν επιτυχή χειρισμό από απόσταση παίζει σημαντικό ρόλο όχι μόνο η οπτική ανάδραση αλλά και η απτική. Γι'αυτό το λόγο σήμερα, κάποιοι από τους ρομποτικούς μηχανισμούς-κυρίους, είναι απτικές συσκευές, οι οποίες από τη μια οδηγούν κάποιον μικρομηχανισμό-υπηρέτη, και ταυτόχρονα εφαρμόζουν δυνάμεις και ροπές στον χρήστη.

Στα πλαίσια του προγράμματος, δημιουργήσαμε ένα σύστημα απτικού μικροχειρισμού από απόσταση (haptic tele-micromanipulation system), με στόχο τη μελέτη των δυνατοτήτων και των τρόπων με τους οποίους απτικοί μηχανισμοί θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως χειριστήρια εντολών για επεμβάσεις στον μικρόκοσμο ή νανόκοσμο. Το σύστημα αποτελείται από τρία μέρη. 1) Απτικός μηχανισμός ανάδρασης δυνάμεων, ο οποίος χρησιμοποιείται ως χειριστήριο εντολών. 2) Μικρορομποτικός μηχανισμός, ο οποίος ακολουθεί τις εντολές του απτικού μηχανισμού. 3) Περιβάλλον απτικού μικροχειρισμού από απόσταση, το οποίο φροντίζει για την ομαλή λειτουργία και συνεργασία των δύο παραπάνω μερών.

B. Απτικός μηχανισμός ανάδρασης δυνάμεων και Μικρορομποτικός μηχανισμός

Ο απτικός μηχανισμός ανάδρασης δυνάμεων κατασκευάστηκε στα πλαίσια του προγράμματος και περιγράφεται αναλυτικά στο [8], βλέπε Σχήμα 4.



Σχήμα 4 –Ο απτικός μηχανισμός ανάδρασης δυνάμεων και ο μικρορομποτικός μηχανισμός.

Ο μικρορομποτικός μηχανισμός, ο οποίος εικονίζεται στο Σχήμα 4, κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ και χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος, βλέπε [20]. Παρουσιάζει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

1. Μεγάλο πεδίο εφαρμογών το οποίο καλύπτει τόσο περιπτώσεις της βιοϊατρικής και ιατρικής τεχνολογίας όσο και εφαρμογές στο χώρο των μικροκατασκευών.
2. Δυνατότητα για ανάλυση κίνησης 10 μm .
3. Δυνατότητα για μεγάλο εύρος ταχυτήτων. Ταχύτητες μεγαλύτερες από 1mm/s.
4. Ευελιξία στον τρόπο λειτουργίας του. Δηλαδή με μικρό συνδυασμό εργαλείων μπορεί να εκτελέσει πολλές και διαφορετικές μεταξύ τους εφαρμογές.

5. Δυνατότητα εκτέλεσης συνεργατικών καθηκόντων σε περιορισμένο χώρο εργασίας όπως αυτόν του μικροσκοπίου (οπτικού ή ηλεκτρονικού).
6. Λειτουργική αυτονομία. Δηλαδή να μπορεί να φέρει εις πέρας ένα έργο σε ένα μη-δομημένο περιβάλλον χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση.
7. Δυνατότητα για μαζική παραγωγή με χαμηλό κόστος και συμβατικές διεργασίες παραγωγής.
8. Ελάχιστη ενεργειακή κατανάλωση.

Ο μηχανισμός επενέργησης σχεδιάστηκε έτσι ώστε να μπορεί να πραγματοποιεί μικροκινήσεις και παράλληλα να αναπτύσσει ικανές ταχύτητες με μικρή κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος. Ο μικρορομποτικός μηχανισμός, έχει δύο επενεργητές και είναι ικανός για x' , y' , θ κίνηση στο επίπεδο. Ο κάθε επενεργητής αποτελείται από έναν μικροκινητήρα δόνησης. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός επενέργησης αν και αντιστοιχεί σε μη ολόνομη κίνηση στο επίπεδο, έχει τη δυνατότητα να κινείται από οποιαδήποτε αρχική θέση x'_i, y'_i, θ_i σε οποιαδήποτε τελική x'_f, y'_f, θ_f . Η μικρές διαστάσεις του ρομπότ επιτρέπουν τη συνεργασία ομάδας μικρορομπότ σε περιορισμένο χώρο εργασίας. Η θεωρία προβλέπει ανάλυση μετατόπισης μικρότερη του ενός μm. Μέχρι αυτή τη στιγμή έχει επιτευχθεί πειραματικά ανάλυση μετατόπισης περίπου 5μm. Η μέγιστη ταχύτητα κίνησης της πλατφόρμας είναι περίπου 1mm/s. Ο μηχανισμός κίνησης βασίζεται στην αλληλεπίδραση φυγόκεντρων δυνάμεων, παραγόμενων από μικροκινητήρες στηριζόμενους στην βάση του μικρορομπότ, και δυνάμεων τριβής που εφαρμόζονται σε αυτόν.

Γ. Περιβάλλον απτικού μικρο-τηλεχειρισμού

Ο σχεδιασμός και τα χαρακτηριστικά του μικρορομποτικού μηχανισμού οδηγούν σε μια σειρά από προβλήματα, τα οποία έπρεπε να λυθούν κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού του περιβάλλοντος απτικού μικροχειρισμού από απόσταση. Αυτά τα ειδικά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται παρακάτω.

1. Ο μικρορομποτικός μηχανισμός σχεδιάστηκε έτσι ώστε να μπορεί να συνεργάζεται και με άλλους τέτοιας κλίμακας μηχανισμούς, όπως για παράδειγμα σε εργασίες συναρμολόγησης σε κλίματα μικρόμετρων. Επομένως ο μικρορομποτικός μηχανισμός δεν μεταφέρεται στον στόχο του από κάποιο άλλο μεγαλύτερο ρομπότ, αλλά κινείται με ανώτατη ταχύτητα 1.5 mm/s.
2. Η κίνηση του μικρορομποτικού μηχανισμού οφείλεται στην κίνηση δύο μικροκινητήρων δόνησης.
3. Ο απτικός μηχανισμός και ο μικρορομποτικός μηχανισμός έχουν εντελώς διαφορετική κινηματική δομή. Ο πρώτος είναι ένας ρομποτικός μηχανισμός πέντε βαθμών ελευθερίας και ο δεύτερος ένα όχημα δύο βαθμών ελευθερίας.
4. Δεν υπάρχει αναλυτική έκφραση της αντίστροφης κινηματικής του μη γραμμικού μικρορομποτικού μηχανισμού.
5. Όταν οι δύο μικροκινητήρες δόνησης φτάσουν στο 80%-90% της θεωρητικής μέγιστης ταχύτητας τους, τότε η κίνηση του μικρορομποτικού μηχανισμού παύει να είναι ομαλή. Η ανώτατη

επιτρεπτή ταχύτητα εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους.

6. Λόγω δυνάμεων τριβής, ο μικρορομποτικός μηχανισμός σταματά να κινείται πριν σταματήσουν οι μικροκινητήρες δόνησης.
7. Λόγω της φύσης της επενέργησης που προσφέρουν οι μικροκινητήρες δόνησης στον μικρορομποτικό μηχανισμό, οι δυνάμεις που ασκεί ο τελευταίος στους στόχους του είναι κρουστικές.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά και περιορισμοί του μικρορομποτικού μηχανισμού καθορίζουν τις απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιεί ο απτικός μηχανισμός στα πλαίσια του περιβάλλοντος απτικού μικροχειρισμού από απόσταση. Αυτές είναι οι παρακάτω.

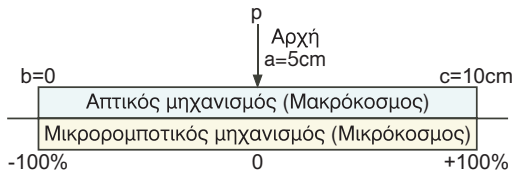
1. Ο απτικός μηχανισμός πρέπει να οδηγεί τον μικρορομποτικό μηχανισμό α) προς τον στόχο του και β) κατά τη διάρκεια των μικροχειρισμών. Κατά τη πρώτη φάση χρειαζόμαστε μεγαλύτερη ταχύτητα και μικρότερη ακρίβεια κίνησης. Κατά τη δεύτερη φάση το αντίθετο.
2. Έχοντας δεδομένη τη διαφορά της κινηματικής δομής ανάμεσα στους δύο μηχανισμούς και την αδυναμία εύρεσης αναλυτικής έκφρασης της αντίστροφης κινηματικής του μικρορομποτικού μηχανισμού σε πραγματικό χρόνο, έπρεπε να βρεθεί κάποια αντιστοιχία ανάμεσα στον Καρτεσιανό χώρο του απτικού μηχανισμού και τον χώρο αρθρώσεων του μικρορομποτικού μηχανισμού.
3. Για να επιτευχθεί ακρίβεια θέσης μικρότερης του μικρομέτρου, πρέπει, ο κάθε ένας από τους δύο μικροεπενεργητές δόνησης του μικρορομποτικού μηχανισμού να ελέγχεται ξεχωριστά.
4. Οι μικροεπενεργητές δόνησης πρέπει να στρέφονται και με αντίθετες κατευθύνσεις, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται στροφή του μικρορομποτικού μηχανισμού, χωρίς καμιά μετατόπιση. Ο απτικός μηχανισμός πρέπει να είναι σε θέση να υλοποιεί και αυτόν τον τρόπο κίνησης.
5. Ο απτικός μηχανισμός πρέπει να μεταφέρει τις δυνάμεις που εμφανίζονται στον μικρόκοσμο, δηλαδή στον μικρορομποτικό μηχανισμό, στον μακρόκοσμο, δηλαδή στον χρήστη του απτικού μηχανισμού, με τέτοιο τρόπο ώστε να γίνονται αντιληπτές και χρήσιμες.

Μεταξύ του απτικού και του μικρορομποτικού μηχανισμού υπάρχει αμφίδρομη επικοινωνία, η οποία υλοποιείται μέσα από δύο κανάλια επικοινωνίας. Το πρώτο είναι από τον απτικό μηχανισμό προς τον μικρορομποτικό μηχανισμό και έχει ως έξοδο του απτικού μηχανισμού το επί τοις εκατό ποσοστό του εύρους παλμού των PWM που οδηγούν τους μικροεπενεργητές δόνησης. Η είσοδος στον απτικό μηχανισμό είναι η εντολή από το χέρι του χρήστη. Το δεύτερο κανάλι επικοινωνίας είναι αντίστροφα από το πρώτο, δηλαδή από τον μικρορομποτικό μηχανισμό προς τον απτικό μηχανισμό. Είσοδος είναι οι μικροδυνάμεις που μετριοούνται κατά τη διάρκεια μικροχειρισμών από ειδικό αισθητήρα προσαρμοσμένο στον μικρορομποτικό μηχανισμό. Αυτές οι δυνάμεις μεταφέρονται στο κέντρο ελέγχου του απτικού μηχανισμού. Η έξοδος του δεύτερου καναλιού επικοινωνίας είναι οι δυνάμεις που ασκεί ο απτικός

μηχανισμός στον χρήστη. Για την υλοποίηση του πρώτου καναλιού επικοινωνίας ορίζονται οι παρακάτω μέθοδοι εισόδου (input modes).

Η *Μακροσκοπική Είσοδος*, την οποία χρησιμοποιεί ο απτικός μηχανισμός για να οδηγήσει τον μικρορομποτικό μηχανισμό προς τον στόχο του. Σε αυτή τη μέθοδο εισόδου, η θετική ή αρνητική μετατόπιση, κατά τον X άξονα του τελικού σημείου δράσης του απτικού μηχανισμού έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θετικής ή αρνητικής ταχύτητας περιστροφής και των δύο μικροεπενεργητών δόνησης και επομένως την κίνηση του μικρορομποτικού μηχανισμού. Για καμπυλόμορφη μετατόπιση πρέπει να υπάρχει κάποια διαφορά στις ταχύτητες περιστροφής των δύο μικροεπενεργητών, πράγμα το οποίο επιτυγχάνεται περιστρέφοντας το τελικό σημείο δράσης του απτικού μηχανισμού γύρω από τον Y άξονα. Η αντιστοιχία ανάμεσα στην θέση p [cm] του τελικού σημείου δράσης και την επί τοις εκατό εντολή ταχύτητας των μικροεπενεργητών q [%] περιγράφεται από την Εξ. (2) και το Σχήμα 5.

$$q = -20(p - 5) \text{ [%]} \quad (2)$$



Σχήμα 5 – Σχηματική αναπαράσταση της Μακροσκοπικής Είσοδος.

Η *Μακροσκοπική Περιστροφική Είσοδος*, την οποία χρησιμοποιεί ο απτικός μηχανισμός για να οδηγήσει τον μικρορομποτικό μηχανισμό αποκλειστικά σε περιστροφική κίνηση. Αυτό επιτυγχάνεται αν οι δύο μικροεπενεργητές δόνησης περιστρέφονται με ίσου μέτρου και αντίθετης φοράς ταχύτητα.

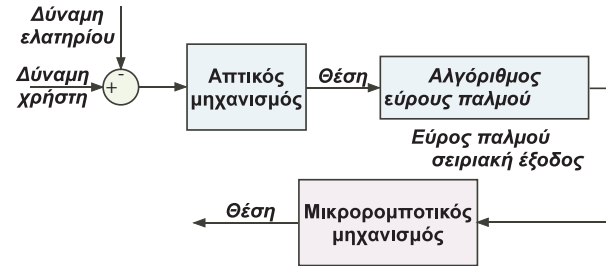
Η *Μικροσκοπική Είσοδος*, την οποία χρησιμοποιεί ο απτικός μηχανισμός για να οδηγήσει τον μικρορομποτικό μηχανισμό κατά τη φάση των μικροχειρισμών, αφού ο τελευταίος έχει φτάσει στον στόχο του. Σε αυτή τη μέθοδο εισόδου οι δύο μικροεπενεργητές δόνησης λειτουργούν κάθε ένας ξεχωριστά ώστε να παραχθεί μια όσο το δυνατό ομαλή κίνηση. Αυτό υλοποιείται κινώντας το τελικό σημείο δράσης του απτικού μηχανισμού στον X άξονα, ώστε να ελέγχεται η ταχύτητα και η διεύθυνση περιστροφής των μικροεπενεργητών, και ταυτόχρονα στρέφοντας το τελικό σημείο δράσης γύρω από τον Y άξονα, ώστε να ελέγχεται ποιος μικροεπενεργητής από τους δύο θα λειτουργεί.

Για την υλοποίηση του δεύτερου καναλιού επικοινωνίας ορίζονται οι παρακάτω φάσεις ελέγχου (control phases). Η *Μακροσκοπική Φάση Ελέγχου*, κατά την οποία ο απτικός μηχανισμός οδηγεί τον μικρορομποτικό μηχανισμό προς τον στόχο του. Σε αυτή τη φάση ο απτικός μηχανισμός δεν ασκεί δυνάμεις στον χρήστη, αφού δεν συμβαίνει κάποιος μικροχειρισμός, αλλά ασκεί δύναμη ελατηρίου ανάλογη της μετατόπισης του τελικού σημείου δράσης, ώστε ο χρήστης να έχει την αίσθηση της αύξησης της ταχύτητας του μικρορομποτικού μηχανισμού, βλέπε

Σχήμα 6. Η δύναμη ελατηρίου f_{sp} περιγράφεται από την Εξ. (3) όπου p είναι η μετατόπιση του τελικού σημείου δράσης και k μια μεταβλητή σταθερά ελατηρίου.

$$f_{sp} = kp \quad (3)$$

Πειραματικά βρέθηκε ότι η ανώτατη επιτρεπτή ταχύτητα περιστροφής των μικροεπενεργητών είναι περίπου το 80% της θεωρητικά μέγιστης. Μετά η κίνηση παύει να είναι ομαλή. Για να μην ξεπεράσει αυτό το όριο ο χρήστης η σταθερά ελατηρίου k σε αυτή τη περιοχή τριπλασιάζεται.



Σχήμα 6 – Η Μακροσκοπική Φάση Ελέγχου.

Η *Μικροσκοπική Φάση Ελέγχου*, κατά την οποία ο απτικός μηχανισμός ασκεί δυνάμεις στον χρήστη λόγω των μικροχειρισμών του μικρορομποτικού μηχανισμού στον στόχο. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7, αφού ο μικρορομποτικός μηχανισμός οδηγούμενος από τον απτικό μηχανισμό έφτασε κοντά στον στόχο του, έρχεται σε επαφή με αυτόν, π.χ. σπρώχνει κάποιο μικροαντικείμενο. Η παραγόμενη δύναμη μετρείται από αισθητήρα δύναμης προσαρμοσμένο στον μικρορομποτικό μηχανισμό και στη συνέχεια μεταφέρεται στο κέντρο ελέγχου του απτικού μηχανισμού, επεξεργάζεται και, αφού ενισχυθεί κατάλληλα, ασκείται στον χρήστη.



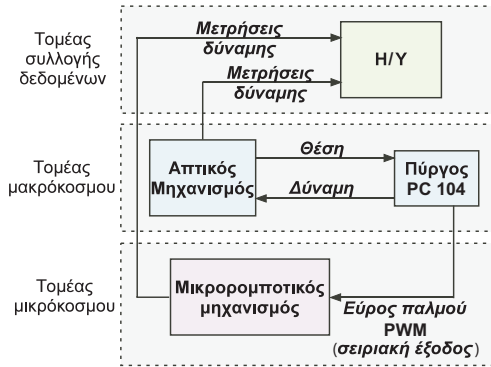
Σχήμα 7 – Η Μικροσκοπική Φάση Ελέγχου.

Λόγω του τρόπου επενέργησης του μικρορομποτικού μηχανισμού οι δυνάμεις που αναπτύσσονται και καταγράφονται από τον αισθητήρα δύναμης είναι κρουστικές. Μια απλή ενίσχυση του μέτρου των δυνάμεων θα είχε ως αποτέλεσμα μη λειτουργικές απτικές πληροφορίες για τον χρήστη, καθώς επίσης θα εγκυμονούσε κινδύνους για τον χρήστη και τον απτικό μηχανισμό. Γι'αυτό οι μετρούμενες δυνάμεις πριν ενισχυθούν φιλτράρονται κατάλληλα. Πειραματικά βρήκαμε ότι ο κατάλληλος παράγοντας ενίσχυσης είναι 100.

Δ. Πειραματικά αποτελέσματα

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από τρεις τομείς, βλέπε Σχήμα 8. Στον *Τομέα μακρόκοσμος* ο χρήστης μετατοπίζει και περιστρέφει το τελικό σημείο δράσης του απτικού μηχανισμού. Οι μετατοπίσεις και στροφές καταγράφονται από αισθητήρες και μεταφέρονται στο κέντρο ελέγχου ο οποίος αποτελείται από κάρτες

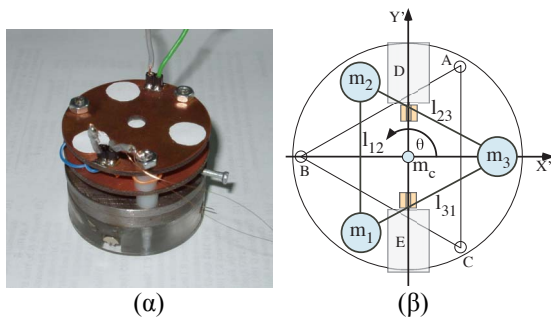
PC/104. Εκεί η είσοδος του χρήστη μεταφράζεται σε εντολές προς τους μικροεπενεργητές δόνησης σύμφωνα με την Εξ. (2).



Σχήμα 8 – Σχηματική παρουσίαση της πειραματικής διάταξης.

Ο *Τομέας μικρόκοσμου* αποτελείται από τον μικρορομποτικό μηχανισμό, τον αισθητήρα δύναμης, προσαρμοσμένο πάνω του, και τους PWM που οδηγούν τους μικροεπενεργητές δόνησης. Η είσοδος των PWM μεταδίδεται από το κέντρο ελέγχου (κάρτες PC/104) μέσω σειριακής εξόδου. Το σήμα από τον αισθητήρα δύναμης μεταδίδεται στον H/Y στον *Τομέα συλλογής δεδομένων* και από εκεί στο κέντρο ελέγχου (κάρτες PC/104). Μετά από το κατάλληλο φιλτράρισμα και την ενίσχυση, οι εντολές στέλνονται στους κινητήρες του απτικού μηχανισμού. Οι δυνάμεις που τελικά αισθάνεται ο χρήστης μετριοούνται από αισθητήρα δύναμης προσαρμοσμένο στο τελικό σημείο δράσης του απτικού μηχανισμού και μεταφέρονται στον H/Y του *Τομέα συλλογής δεδομένων*.

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μας βιντεοσκοπήσαμε την κίνηση του μικρορομποτικού μηχανισμού, έτσι ώστε να αξιολογήσουμε την κίνησή του. Επεξεργαστήκαμε το βίντεο χρησιμοποιώντας τις βιβλιοθήκες επεξεργασίας εικόνας και βίντεο OpenCV της Intel. Για να διευκολυνθεί η παραπάνω διαδικασία, προσθέσαμε άσπρους κύκλους στην επιφάνεια του μικρορομποτικού μηχανισμού σχηματίζοντας ισοσκελές τρίγωνο, βλέπε Σχήμα 9.



Σχήμα 9 – (α) Ο μικρορομποτικός μηχανισμός με άσπρους κύκλους. (β) Το ισοσκελές τρίγωνο.

Ο αλγόριθμος επεξεργασίας εικόνας που προγραμματίσαμε βρίσκει τις συντεταγμένες των κέντρων των άσπρων κύκλων και χρησιμοποιώντας τις Εξ. (4)-(6), βρίσκουμε τις συντεταγμένες του κέντρου του μικρορομποτικού μηχανισμού, $m_{c,x}$, $m_{c,y}$, και τη γωνία θ .

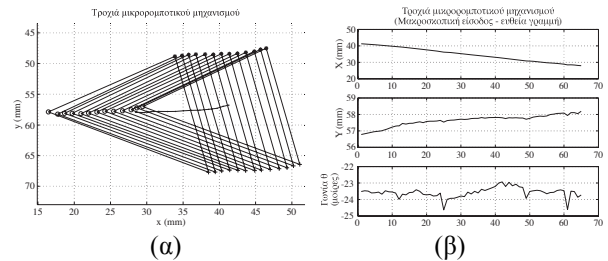
$$\theta = \arcsin\left(\frac{m_{1,y} - m_{3,y}}{\sqrt{(m_{1,x} - m_{3,x})^2 + (m_{1,y} - m_{3,y})^2}}\right) \quad (4)$$

$$m_{c,x} = m_{1,x} + l_{m1c} \cos(30^\circ + \theta) \quad (5)$$

$$m_{c,y} = m_{1,y} - l_{m1c} \sin(30^\circ + \theta)$$

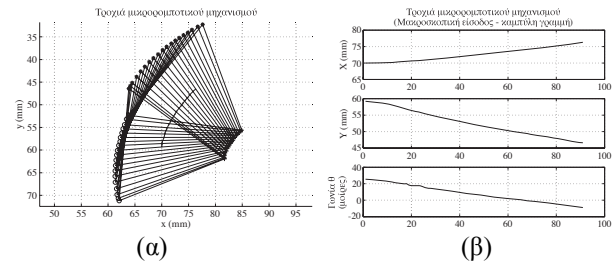
$$l_{m1c} = \frac{\sqrt{(m_{1,x} - m_{2,x})^2 + (m_{1,y} - m_{2,y})^2}}{2 \cos(30^\circ)} \quad (6)$$

Για να μπορέσουμε να αξιολογήσουμε την παραπάνω μεθοδολογία, εκτελέσαμε διάφορα πειράματα. Δύο από αυτά αφορούν στην μέθοδο της *Μακροσκοπικής Εισόδου*. Στο πρώτο ο απτικός μηχανισμός οδηγεί τον μικρορομποτικό μηχανισμό σε ευθεία γραμμή. Στο Σχήμα 10α παρουσιάζεται η τροχιά του μικρορομποτικού μηχανισμού και στο Σχήμα 10β οι x , y συντεταγμένες του κέντρου του μικρορομποτικού μηχανισμού και η γωνία θ .



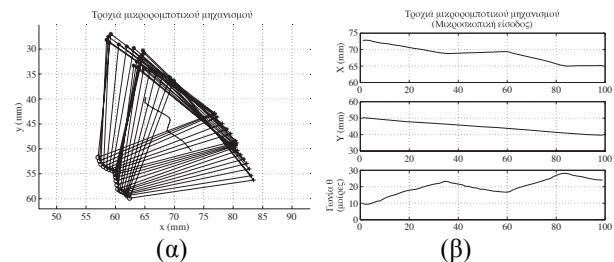
Σχήμα 10 – (α) Η τροχιά του μικρορομποτικού μηχανισμού στο πείραμα μακροσκοπικής εισόδου σε ευθεία γραμμή. (β) Η πορεία των x , y συντεταγμένων του κέντρου του και της γωνίας θ .

Στο δεύτερο πείραμα ο απτικός μηχανισμός οδηγεί τον μικρορομποτικό μηχανισμό σε καμπύλη γραμμή, βλέπε Σχήμα 11. Αυτό επιτυγχάνεται στρέφοντας το τελικό σημείο δράσης του απτικού μηχανισμού κατά 25° ως προς τον Y άξονα, και επομένως ορίζοντας 25% διαφορά στις ταχύτητες περιστροφής των μικροεπενεργητών δόνησης.



Σχήμα 11 – (α) Η τροχιά του μικρορομποτικού μηχανισμού στο πείραμα μακροσκοπικής εισόδου σε καμπύλη γραμμή. (β) Η πορεία των x , y συντεταγμένων του κέντρου του και της γωνίας θ .

Το επόμενο πείραμα έγινε με την μέθοδο της *Μικροσκοπικής Εισόδου*, βλέπε Σχήμα 12.

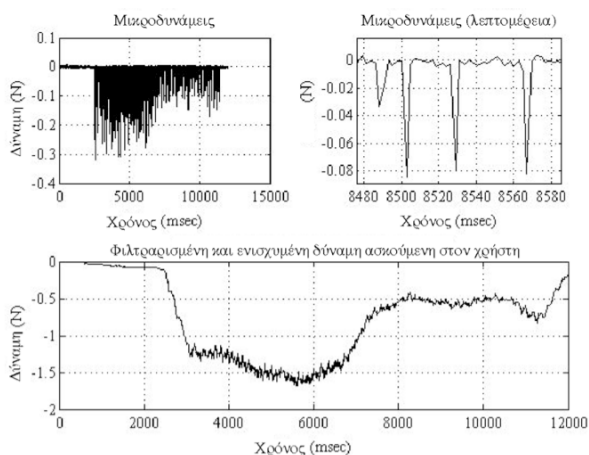


Σχήμα 12 – (α) Η τροχιά του μικρορομποτικού μηχανισμού στο τέταρτο πείραμα μικροσκοπικής εισόδου. (β) Η πορεία των x , y συντεταγμένων του κέντρου του και της γωνίας θ .

Όπως εξηγήσαμε παραπάνω αυτή η μέθοδος θα χρησιμοποιείτε κατά τη διάρκεια των μικροχειρισμών του μικρορομποτικού μηχανισμού. Στόχος μας είναι να

κινήσουμε τον μικρορομποτικό μηχανισμό όσο πιο ομαλά γίνεται και με την μεγαλύτερη δυνατή ανάλυση. Αυτό επιτεύχθηκε δίνοντας εντολές ταχύτητας στους δύο μικροεπενεργητές δόνησης εναλλάξ.

Το τελευταίο πείραμα εξετάζει τις δυνάμεις που ασκούνται στον χρήστη από τον απτικό μηχανισμό κατά την επαφή του μικρορομποτικού μηχανισμού με κάποιο μικροαντικείμενο. Το πείραμα εκτελέστηκε για το 80% και 70% της μέγιστης ταχύτητας. Λόγω της μεγάλης δυσκαμψίας του αντικειμένου με το οποίο έρχεται σε επαφή ο μικρορομποτικός μηχανισμός, οι δυνάμεις που καταγράφονται από τον αισθητήρα δύναμης είναι κρουστικές, βλέπε Σχήμα 13. Η πάνω δεξιά εικόνα δείχνει αυτές τις δυνάμεις με λεπτομέρειες. Φιλτράροντας και ενισχύοντας το σήμα παίρνουμε την κυματομορφή της κάτω εικόνας.



Σχήμα 13 – Οι κρουστικές δυνάμεις που ασκούνται στον χρήστη του απτικού μηχανισμού χωρίς και με φιλτράρισμα.

IV. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια του έργου αναπτύχθηκαν νέες μέθοδοι ελαχιστοποίησης αδράνειας και τριβών σε απτικούς ρομποτικούς μηχανισμούς, οι οποίες εφαρμόστηκαν στην κατασκευή μηχανισμού ανάδρασης δυνάμεων με επιτυχία, δημιουργήθηκαν γρήγορα μοντέλα δυνάμεων αλληλεπίδρασης και ερευνήθηκε πειραματικά η αξιοπιστία τους, προγραμματίστηκε βελτιωμένο εικονικό περιβάλλον χειρουργικής επέμβασης στην ανθρώπινη ουρήθρα και ουροδόχο κύστη. Επίσης, μελετήθηκαν και βρέθηκαν τρόποι βέλτιστης διασύνδεσης και ελέγχου των διαφόρων τμημάτων του εξομοιωτή σε μακρο και μικρο κλίμακα. Τέλος, συνδέθηκε ο απτικός μηχανισμός με υπάρχουσα μικρορομποτική πλατφόρμα η οποία οδηγήθηκε επιτυχώς με ανάλυση μικρομέτρου. Πιστεύουμε ότι η συγκεκριμένη έρευνα είναι πρωτοποριακή για την Ελλάδα και διεθνώς και βρίσκεται στο επίκεντρο της ερευνητικής δραστηριότητας. Τα αποτελέσματα επεκτείνουν δραστικά τόσο τις δυνατότητες εκπαίδευσης χειρουργών, όσο και τις δυνατότητες τηλεχειρισμού σε μακρο και μικρο επίπεδο.

VI. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το έργο αυτό συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο (75%) και από Εθνικούς πόρους (25%) – Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Εκπαίδευσης και Αρχικής Επαγγελματικής Κατάρτισης (ΕΠΕΑΕΚ) και ειδικότερα από το πρόγραμμα ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ.

VII. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Massie, T. H., Salisbury, J. K., 1994, "The PHANTOM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects," in *Proc. of the 1994 ASME Int. Mechanical Engineering Exposition and Congress*, Chicago, Illinois, pp. 295 - 302.
- [2] Baumann, R., et al., 1997, "The PantoScope: A Spherical Remote - Center - of - Motion Parallel Manipulator for Force Reflection," in *Proc. IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, pp. 718 - 723.
- [3] Hayward, V. et al., 1998, "Freedom-7: A High Fidelity Seven Axis Haptic Device With Application To Surgical Training," in *Experimental Robotics V, Casals, A., de Almeida, A. T. (eds.), Lecture Notes in Control and Information Science 232*, pp. 445 - 456.
- [4] Burdea, G., Patounakis, G., Popescu, V., Weiss R., 1999, "Virtual Reality - based Training for the Diagnosis of Prostate Cancer," in *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 46, pp. 1253 - 1260.
- [5] Kyung, K., Kwon, D., Kwon, S., Kang H. S., Ra J. B., 2001, "Force Feedback for a Spine Biopsy Simulator with Volume Graphic Model," in *Proc. 2001 IEEE/RSJ Intl. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS' 01)*, Maui, Hawaii, Oct. 29-Nov. 03, 2001, pp. 1732 - 1737.
- [6] <http://www.immersion.com>, Immersion Corporation.
- [7] Kühnapfel, U., et al., 1997, "The Karlsruhe Endoscopic Surgery Trainer as an example for Virtual Reality in Medical Education," in *Minimally Invasive Therapy and Allied Technologies (MITAT)*, pp. 122-125, Blackwell Science Ltd.
- [8] Βλάχος, Κ., Παπαδόπουλος, Ε., "Σχεδιασμός και Έλεγχος Εκπαιδευτικού Εξομοιωτή Ουρολογικών Επεμβάσεων," 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μηχανολόγων-Ηλεκτρολόγων, Μάρτιος 28-30, 2005, Αθήνα.
- [9] Stocco, L. J., Salcudean, S. E., and Sassani, F., 2001, "Optimal kinematic design of a haptic pen," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 6, no. 3.
- [10] Kurtz, R., Hayward, V., 1992, "Multiple-goal kinematic optimization of a parallel spherical mechanism with actuator redundancy," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 8, no. 5, pp. 644 - 651.
- [11] De S. & Srinivasan M. A., 1999, "Thin-Walled Models for Haptic and Graphical Rendering of Soft Tissues in Surgical Simulations", *Medicine Meets Virtual Reality*, Westwood et al. (Eds.), IOS Press, pp. 94-99.
- [12] Basdogan C., Ho C. & Srinivasan M. A., 2001, "Virtual Environments for Medical Training: Graphical and Haptic Simulation of Laparoscopic Common Bile Duct Exploration", *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol. 6, No. 3, pp. 269-285.
- [13] Yan Zhuang, J. Canny, 2000, "Haptic Interaction with Global Deformations," in *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, April 2000, pp. 2428 - 2433.
- [14] Biechi, A., Scilingo, E. P., De Rossi, D., 2000, "Haptic Discrimination of Softness in Teleoperation: The Role of the Contact Area Spread Rate," in *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, October 2000, Vol. 16, No. 5, pp. 496 - 504.
- [15] Yu, S. and Nelson, B., 2001, "Microrobotic cell injection," *IEEE, Proc. Int. Conf on Robotics and Automation, (ICRA '01)* Seoul, Korea.
- [16] Satava, R. M., 1998, "Cybersurgery, Advanced Technologies for Surgical Practice," Wiley - Liss, Inc. Publication.
- [17] Birglen, L., Gosselin, C., Pouliot, N., Monsarrat, B., Laliberté, T., 2002, "ShaDe, A New 3-DOF Haptic Device," in *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 18, no. 2, April 2002, pp. 166-175.
- [18] Springer, S. L., Ferrier, N. J., 2002, "Design and Control of a Force-Reflecting Haptic Interface for Teleoperational Grasping," in *Journal of Mechanical Design*, vol. 124, June 2002, pp. 277-283.
- [19] Menciasci, A., Eisinberg, A., Carrozza, M. C., Dario, P., 2003, "Force Sensing Microinstrument for Measuring Tissue Properties and Pulse in Microsurgery," in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 8, no. 1, March 2003, pp. 10-17.
- [20] P. Vartholomeos and E. Papadopoulos, "Analysis, Design and Control of a Planar Micro-robot Driven by Two Centripetal-Force Actuators," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA '06)*, May 2006, Orlando, FL, USA, pp. 649-654.