

# Απτικός μηχανισμός για τηλεχειρισμό μικρορομπότ

Οι απτικοί μηχανισμοί, οι οποίοι βασίζονται στην τεχνολογία επικοινωνίας ανθρώπου και ρομπότ (Human Robot Interaction [HRI]) χρησιμοποιώντας την αίσθηση της αφής, αποτελούν έναν ταχέως αναπτυσσόμενο τομέα.

Οι εφαρμογές τους κυμαίνονται από την τηλερομποτική, την ψυχαγωγία και την εκπαίδευση, μέχρι τους ρεαλιστικούς προσομοιωτές για την εκπαίδευση νέων χειρουργών και μέχρι το σχεδιασμό περίπλοκων χειρουργικών διαδικασιών.

ΓΡΑΦΟΥΝ ΟΙ Κ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΠΑΠΑΝΑΓΙΩΤΟΥ, ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ ΛΑΜΠΟΥΣΗΣ, ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΚΑΡΑΪΣΚΟΣ ΚΑΙ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ.

**Σ**το Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου (ΕΑΕ) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ) έχει αναπτυχθεί μία εργασία μοναδική διεθνώς, με ουσιαστικό στόχο τη βελτίωση του τρόπου εκπαίδευσης των ουρολόγων χειρουργών (βλ. εικ. 1). Οι παραδοσιακοί τρόποι εκπαίδευσης των νέων χειρουργών χρησιμοποιούν ανθρώπινες σορούς, πειραματόζωα, προπλάσματα ή βίντεο από εγχειρήσεις. Όμως οι τρόποι αυτοί εγγέρουν αρκετές δυσκολίες καθώς και ηθικά ζητήματα.

Στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής του Κ. Βλάχου και ενός ερευνητικού προγράμματος σε συνεργασία με το Λαϊκό Νοσοκομείο και τον ουρολόγο χειρουργό κ. Δ. Μητρόπουλο (καθηγητή του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών [ΕΚΠΑ]), δη-

μιουργήθηκε ένας εξομοιωτής ουρολογικών επεμβάσεων υπό την επίβλεψη του καθηγητή ΕΜΠ κ. Ευάγγελου Παπαδόπουλου. Πιο συγκεκριμένα, η ερευνητική ομάδα δημιούργησε ένα σύστημα εξομοιώσης το οποίο αναπαριστά με γραφικά μία εικονική ουροθράση, στην οποία ο εκπαιδευόμενος έχει τη δυνατότητα να διεισδύει με το εικονικό χειρουργικό εργαλείο - ενδοσκόπιο, το οποίο μπορεί να κινεί όπως επιθυμεί και να πραγματοποιεί μία απολύτως θεατική εικονική εγχειρηση.

Ο εξομοιωτής αποτελείται από:

1. Το μηχανισμό ανάδρασης ασθενών δυνάμεων.
2. Το σύστημα αυτομάτου ελέγχου.
3. Το σύστημα γραφικής αναπαράστασης - εικονικής πραγματικότητας.

### ■ Ο απτικός μηχανισμός

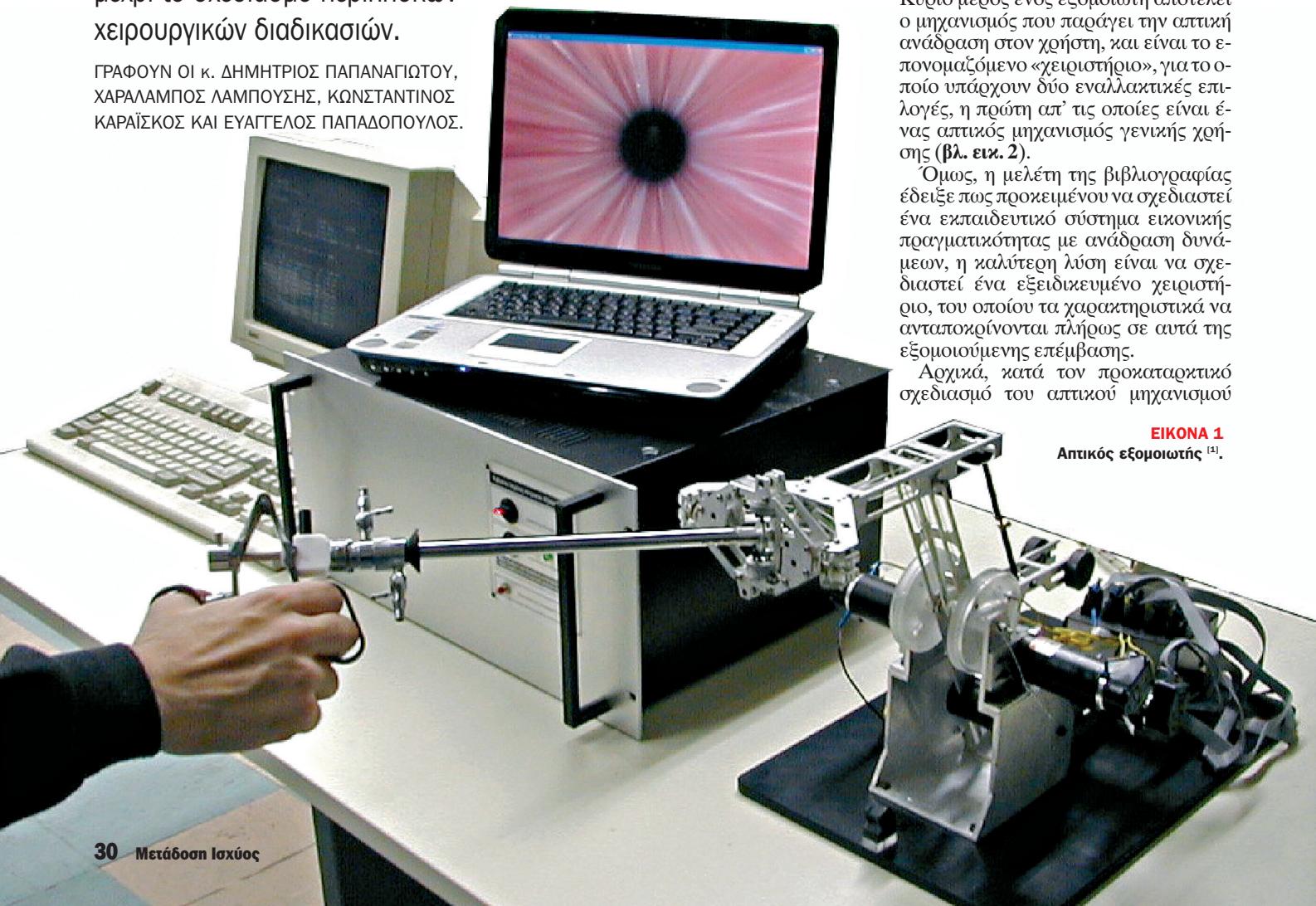
Κύριο μέρος ενός εξομοιωτή αποτελεί ο μηχανισμός που παράγει την απτική ανάδραση στον χοήστη, και είναι το επονομαζόμενο «χειριστήριο», για το οποίο υπάρχουν δύο εναλλακτικές επιλογές, η πρώτη απ' τις οποίες είναι ένας απτικός μηχανισμός γενικής χρήσης (βλ. εικ. 2).

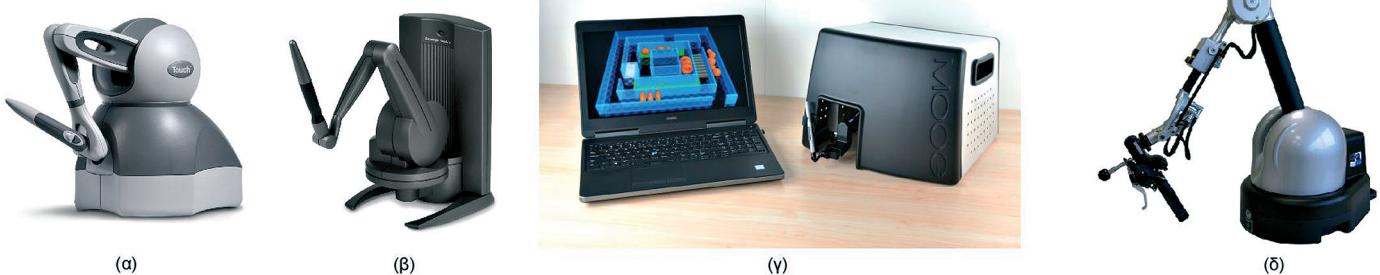
Όμως, η μελέτη της βιβλιογραφίας έδειξε πως προκειμένου να σχεδιαστεί ένα εκπαιδευτικό σύστημα εικονικής πραγματικότητας με ανάδραση δυνάμεων, η καλύτερη λύση είναι να σχεδιαστεί ένα εξειδικευμένο χειριστήριο, του οποίου τα χαρακτηριστικά να ανταποκρίνονται πλήρως σε αυτά της εξομοιούμενης επέμβασης.

Αρχικά, κατά τον προκαταρκτικό σχεδιασμό του απτικού μηχανισμού

EIKONA 1

Απτικός εξομοιωτής<sup>[1]</sup>.





**EIKONA 2** Απικές συσκευές εμπορίου: α) Touch, β) TouchX, γ) Desktop Haptic, δ) Virtuose 6D Desktop.

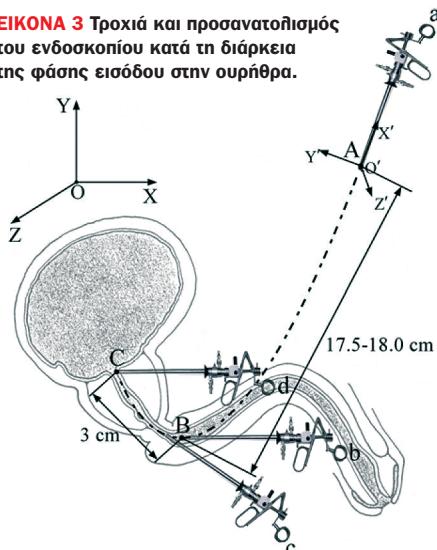
και με τη βοήθεια του καθηγητή κ. Δ. Μητρόπουλου, μελετήθηκε το περιβάλλον των ουρολογικών επεμβάσεων με στόχο τον καθορισμό των τεχνικών προδιαγραφών του. Ύστερα από την παρακολούθηση πραγματικών επεμβάσεων σε ασθενείς και εκπαιδευτικών επεμβάσεων σε πειραματόζωα, καθώς και μετά τη συλλογή συναφών πληροφοριών, προσδιορίστηκαν οι κινηματικές απαιτήσεις τις οποίες ο απτικός μηχανισμός πρέπει να ικανοποιεί.

Στην εικόνα 3 παρουσιάζεται η κίνηση που εκτελεί το ενδοσκόπιο κατά τη φάση της εισαγωγής στον ασθενή. Παρατηρείται ότι δεν υπάρχει μεταφορική κίνηση κατά τον άξονα Z. Αντίθετα, το ενδοσκόπιο πρέπει να περιστρέφεται γύρω από όλους τους άξονες αλλά και να κινείται στο επίπεδο XY. Έτσι σχεδιάστηκε ένας μηχανισμός ο οποίος έχει 5 βαθμούς ελεύθεριάς, ενώ η απτική ανάρραση σε κάθε βαθμό ελεύθερίας επιτυγχάνεται χάρη στους ηλεκτροκινητήρες που είναι τοποθετημένοι στη βάση του μηχανισμού (βλ. εικ. 4). Οι δυνάμεις και οι ροπές φτάνουν στο ενδοσκόπιο (και από εκεί στο χέρι) χάρη σε ειδικά σχεδιασμένο σύστημα μετάδοσης, με χρήση μη εκτατών νημάτων και capstan drives.

### ■ Σύστημα αυτομάτου επέλγου

Η ανάγκη για έλεγχο της δύναμης στο συγκεκριμένο μηχανισμό προκύπτει από το γεγονός ότι οι ροπές και οι δυνάμεις που ασκούνται στο χέρι του χειρουργού κατά τη διάρκεια της εγχείρησης είναι πολύ μικρές αλλά ταυτόχρονα πολύ σημαντικές για την επιτυχία

**EIKONA 3** Τροχιά και προσανατολισμός του ενδοσκοπίου κατά τη διάρκεια της φάσης εισόδου στην ουρήθρα.



### Μικρορομποτικός μηχανισμός με φυγοκεντρική επενέργυση χρησιμοποιείται σε διεργασίες που περιλαμβάνουν χειρισμούς σε περιβάλλον μικροσκοπίου

της επέμβασης, καθώς παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες:

**α)** Για την ορθότητα της διαδρομής που ακολουθεί ο χειρουργός κατά τη φάση της εισαγωγής του ενδοσκοπίου.

**β)** Για το είδος και τη σύσταση των διαφόρων ιστών και οργάνων με τα οποία έρχεται σε επαφή το ενδοσκόπιο

ή τα ιατρικά όργανα που εισάγονται σε αυτό.

Αρχικά εκτελέστηκαν πειράματα ανοιχτού βρόχου ως προς τις δυνάμεις στο χέρι, και παρατηρήθηκε πως το σφάλμα δύναμης είναι της τάξης του 20%. Ως σφάλμα δύναμης παρουσιάζεται η διαφορά μεταξύ στη δύναμη που θεωρητικά ασκεί ο ιστός του δέρματος στο χειρουργό και στη δύναμη που αυτός αντιλαμβάνεται στην πραγματικότητα. Το ποσοστό αυτό είναι μη αποδεκτό στην περίπτωση τόσο λεπτών επεμβάσεων, ιδιαίτερα όταν οι δυνάμεις που ασκούνται στο χέρι του χειρουργού είναι της τάξης των 0,2 N.

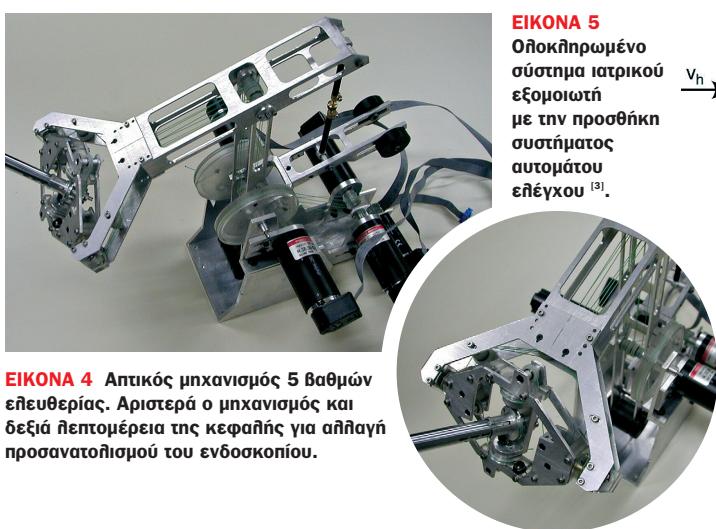
Επίσης είναι απαραίτητη η παρουσία του μηχανισμού (αδράνεια, τριβές) να μη γίνεται αντιληπτή από τον εκπαιδευόμενο, αλλά ταυτόχρονα ο μηχανισμός πρέπει να είναι ικανός να παρέχει αισθητή ισοδύναμη με εκείνη της πραγματικής επέμβασης. Τότε ο μηχανισμός χαρακτηρίζεται ως «διαφανής» (transparent).

Με σκοπό τη διαφάνεια, στη συνέχεια αναλύθηκε θεωρητικά η προσθήκη διαφόρων τύπων ελεγκτών (controller). Όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 5, προτιμήθηκε ένας ελεγκτής PID ο οποίος μείωσε σημαντικά τα ποσοστά σφάλματος, ιδιαίτερα όταν η ταχύτητα του ενδοσκοπίου ήταν αρκετά μικρή, όπως συμβαίνει άλλωστε και σε μία πραγματική επέμβαση<sup>[2]</sup>.

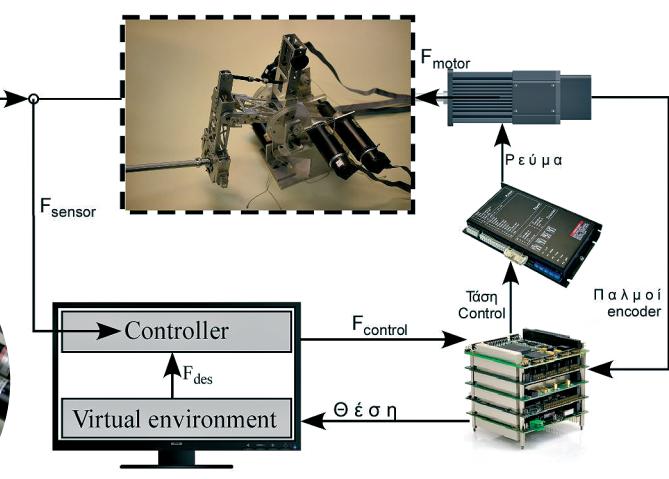
### ■ Γραφική αναπαράσταση

#### - Εικονικό περιβάλλον επέμβασης

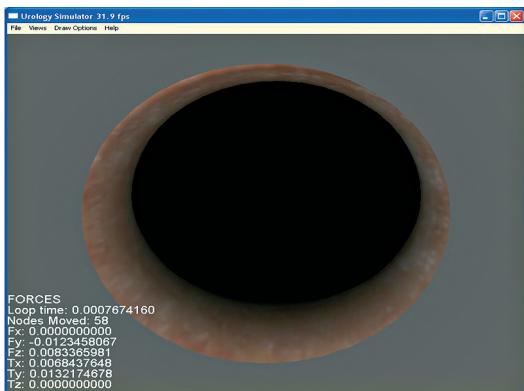
Στις πραγματικές επεμβάσεις, στο άκρο του ενδοσκοπίου προσαρμόζεται



**EIKONA 4** Απικός μηχανισμός 5 βαθμών ελευθερίας. Αριστερά ο μηχανισμός και δεξιά πλευτομέρεια της κεφαλής για αιληση προσανατολισμού του ενδοσκοπίου.



# Αυτοματισμός



**ΕΙΚΟΝΑ 6** Το ενδοσκόπιο στην είσοδο της κύστης, με μείωση ορατότητας πλώγω βάθους<sup>[4]</sup>.

μικροκάμερα, έτσι ώστε ο γιατρός να έχει τις απαραίτητες οπτικές πληροφορίες. Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό της επέμβασης καλύπτεται μέσω της γραφικής απεικόνισης της ουρίθρας, καθώς και της κύστης του ασθενούς (βλ. εικ. 6). Το γραφικό περιβάλλον σχεδιάστηκε αρχικά σε OpenGL / C++<sup>[5]</sup>, και κύρια απάτηση του κώδικα είναι να μπορεί να προσαρμόζεται σε διαφορετικούς τύπους ασθενών και σε ποικιλά σενάρια επεμβάσεων.

Το λογισμικό γραφικής απεικόνισης μπορεί να επεκταθεί στην αναπαράσταση παθολογιών, ανθρώπινης ανατομίας και επεμβάσεων, με έμφαση στη μέθοδο απεικόνισης της εικονικής κοπής ιστών καθώς και της αιμορραγίας.

Τέλος, σημαντικό στοιχείο εξέλιξης του εξομοιωτή που μελετάται είναι ο καθορισμός συγκεκριμένων κριτήριών και μεθόδων αξιολόγησης των εκπαιδευμένων, με βάση στοιχεία πραγματικών επεμβάσεων που εκτελέστηκαν από έμπειρους χειρουργούς.

## ■ Μικρορομποτικός μηχανισμός με φυγοκεντρική επενέργυση

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ο μικρορομποτικός μηχανισμός του ΕΑΕ (βλ. εικ. 8), ο οποίος έχει σχεδιαστεί να εκτελεί μικροσυργική επίπεδη κίνηση με ανάλυση της τάξης του 1μμ χάρη σε δύο φυγοκεντρικούς κινητήρες πολύ μικρών διαστάσεων.

Η κίνηση του μικρορομπότ προκαλείται από την αλληλεπίδραση της τριβής με τις φυγόκεντρες δυνάμεις που



**ΕΙΚΟΝΑ 7** Εξομοιωτής ασθενών δυνάμεων σε πειτουργία.



**ΕΙΚΟΝΑ 8** Μικρορομποτικός μηχανισμός στο Εργαστήριο Αυτομάτου Επέλγου Ε.Μ.Π.

## Σε επεμβάσεις ελάχιστης διείσδυσης, ρομποτικά ενδοσκόπια εκτελούν χειρισμούς με μικρομετρική ακρίβεια

παράγονται από τους δύο μικροκινητήρες δύνης DC, που είναι εγκατεστημένοι στο εσωτερικό του σώματός του<sup>[5]</sup>. Όταν οι μικροκινητήρες σπρέφονται με ελεγχόμενο τρόπο, οι δονήσεις προκαλούν την πλατφόρμα να επιτελεί ελεγχόμενη κίνηση στο επίπεδο με ανάλυση μικρομέτρου και ταχύτητες μεγαλύτερες από 1 mm/s<sup>[6]</sup>.

Η ταχύτητα του ρομπότ ανέσταται όταν αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής των μικροκινητήρων, έως ένα όριο. Η πρωτοποριακή αρχή της κίνησής του είναι αυτή που το ξεχωρίζει από όλες τις προηγούμενες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για μικροκινητήρες. Τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου επενέργησης είναι η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, τα απλά ηλεκτρονικά ο-

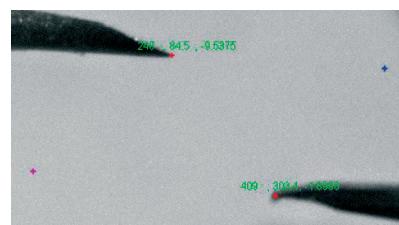
δήγησης, τα μηχανικά μέρη χαμηλού κόστους και τα απλά μηχανήματα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του<sup>[7]</sup>.

Οι εφαρμογές της πλατφόρμας αυτής εστιάζονται σε διεργασίες που περιλαμβάνουν χειρισμούς σε περιβάλλον μικροσκοπίου, όπως είναι η ταξινόμηση και επεξεργασία κυττάρων, η έκχυση κυττάρων, η πειραματική διαπίστωση μηχανικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων των κυττάρων με απομικροσκόπιο δύναμης (AFM) και η τοποθέτηση μικροσυργητήρων σε ιστούς. Επιπλέον, πλήθος μικρορομποτικών εφαρμογών παρουσιάζει η περιοχή των επεμβάσεων ελάχιστης διείσδυσης, όπου ρομποτικά ενδοσκόπια εκτελούν χειρισμούς με μικρομετρική ακρίβεια (βλ. εικ. 9).

Ένα άλλο σημαντικό σκέλος των εφαρμογών των μικρορομποτικών συστημάτων είναι η συναρμολόγηση τουσιδιάστατων μικροκατασκευών και μικροδιατάξεων και κυρίως των μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MEMS), τα οποία αποτελούν έναν ταχύτατα αναπτυσσόμενο χώρο της σύγχρονης τεχνολογίας, με ιδιάτερα σημαντικές εφαρμογές σε συστήματα κατανεμημένων αισθητήρων, βιοϊατρικά εμφυτεύματα, διεργασίες παραγωγής φαρμάκων, οπτικές ίνες κλπ.

## ■ Κατασκευαστική μελέτη του μικρορομποτικού μηχανισμού

Το μικρορομπότ αποτελείται από τέσσερα επίπεδα ηλεκτρονικά, τα οποία



**ΕΙΚΟΝΑ 9** Συνεργασία μεταξύ δύο μικρορομπότ κάτω από μικροσκόπιο με σκοπό την εκτέλεση εργασίας με μικρομετρική ακρίβεια.

συνδέονται μεταξύ τους με κατάλληλες επαφές (βλ. εικ. 10)<sup>[8]</sup>.

Το πρώτο επίπεδο περιλαμβάνει τον «εγκέφαλο» του ρομπότ, δηλαδή τον μικροεπεξεργαστή, ο οποίος είναι υπεύθυνος για όλες τις λειτουργίες της διάταξης. Ο μικροελεγκτής περιλαμβάνει ασύρματη μονάδα επικοινωνίας, και χάρη στην κεραία για ενίσχυση του σήματος υπάρχει δυνατότητα τηλεχειρισμού του.

Το δεύτερο επίπεδο περιλαμβάνει όλα τα ηλεκτρονικά που είναι αναγκαία για τη σωστή τροφοδότηση των υπολοίπων επιτέδων του ρομπότ, καθώς σε αυτό το επίπεδο συνδέεται η μπαταρία ώστε να καθίσταται το ρομπότ αυτόνομο.

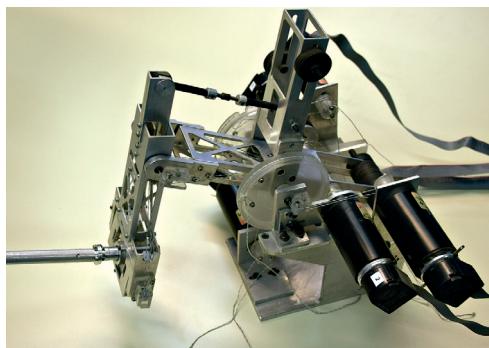
Στο τρίτο επίπεδο βρίσκονται αισθητήρες οι οποίοι παρέχουν πληροφορίες για την κατάσταση του μικρορομπότ, και σε συνδυασμό με τον μικροελεγκτή δίνουν τη δυνατότητα ελέγχου της κίνησης και της θέσης του ρομπότ.

Τέλος, το τέταρτο επίπεδο αποτελεί τη βάση του ρομπότ και περιλαμβάνει τους δύο κυνηγήρες, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την κίνηση του ίδιου και τριών μικροσκοπικών σφαιρών με διάμετρο 2mm, των οποίων η γεωμετρική τοποθέτηση είναι οι κορυφές ενός ισόπλευρου τριγώνου και μέσω των οποίων γίνεται η επαφή του μικρορομπότ με την επιφάνεια εργασίας.

## Απικός μικροτηλεχειρισμός

Στόχος του συγκεκριμένου ερευνητικού έργου είναι η υλοποίηση ενός καινοτόμου απικού τηλεχειρισμού σε μικροκύματα. Η κεντρική ιδέα είναι η υλοποίηση της επικοινωνίας τύπου master - slave, δηλαδή η επικοινωνία ενός κεντρικού μηχανισμού χειρισμού (master) και ενός εξαρτώμενου μικρορομπότορονικού ρομπότ (slave), έτσι ώστε να εκτελούνται βιοϊατρικές επεμβάσεις (βλ. εικ. 11).

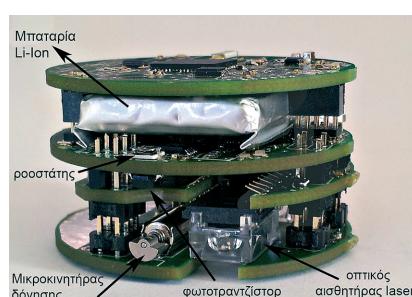
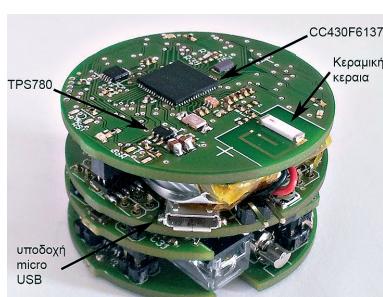
Η καινοτομία έγκειται στο γεγονός ότι ο slave είναι μια μικρομηχανοτροπική διάταξη, η οποία οδηγείται από δύο μικροκυνηγήρες δόνησης μηδαμινού κόστους και εργάζεται σε πολύ διαφορετικό επίπεδο δυνάμεων και μετατοπίσεων από ότι ο master<sup>[9]</sup>. Πράγματι, ο χειριστής κινεί τον απικό μηχανισμό, και οι μετατοπίσεις του



**ΕΙΚΟΝΑ 11** Στο α' το μηχανοτρονικό μικρορομπότ κάτω από βιντεομικροσκόπιο (slave) και στο β' ο κεντρικός μηχανισμός (master).

## Βιβλιογραφία

1. K. Βλάχος, Σχεδιασμός, Υλοποίηση και Έλεγχος Κανονιόμου Απικής Διεπαφής Ιατρικού Εξομιλητή Ασθενών Δυνάμεων, Διδακτορική διαριθμή, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα, 2004.
2. Δ. Παπαναγιώτου, Μοντελοποίηση και έλεγχος απικού εξαιρετικής ασθενών δύναμεων 5 Βαθμών επεισθερίας, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα 2019.
3. A. Τσάμης, Σχεδιασμός και Υλοποίηση Περιβάλλοντος Γραφικών Πραγματικού χρόνου σε OpenGL/C++ για Εκπαιδευτικό Προσμοιωτή Ουραρικών Επεισθερίων, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα 2003.
4. Γ. Τσάμης, Αναβάθμιση Εικονικού Περιβάλλοντος για Εξομιλητή Ουραρικών Επεισθερίων, Μεταπτυχιακή Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα, 2006.
5. Vartholomeos, P. and Papadopoulos, E., "Analysis, Design and Control of a Planar Micro-robot Driven by Two Centripetal-Force Actuators," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '06), May 2006, Orlando, FL, USA, pp. 649-654.
6. Vartholomeos, P. and Papadopoulos, E., "Analysis and Design of a Novel Mini-platform Employing Vibration Micromotors," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '05), April 2005, Barcelona, Spain, pp. 3638-3643.
7. Vartholomeos, P., Mougios, K. and Papadopoulos, E. "Driving Principles and Hardware Integration of Microrobots Employing Vibration Micromotors," Proc. 2007 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Systems (AIM '07), September 4-7, 2007, ETH Zurich, Switzerland. (Best Student Paper Finalist).
8. Λαζαρίδης Χαράλαμπος, «Ανάπτυξη και Υλοποίηση Συστήματος Οπτικών Αισθητήρων και Αυστημάτων Επικονωνίας Μικρορομποτής Πλατφόρμας», Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα 2017.
9. Vlachos, K. and Papadopoulos, E. "Analysis and Experiments of a Haptic Tele-Manipulation Environment for a Microrobot Driven by Centripetal Forces," ASME Journal of Computing Sciences and Information in Engineering, Special Issue on Haptics, Tactile and Multimodal Interfaces, vol. 8, no. 4, December 2008.



**ΕΙΚΟΝΑ 10** Απεικόνιση μικρορομπότ, όπου διακρίνονται τα τέσσερα επίπεδα πλιεκτρονικών.

\*Οι κ. Δημήτριος Παπαναγιώτου, Χαράλαμπος Λαζαρίδης και Κωνσταντίνος Καραδίσκος είναι διπλωματούχοι μηχανολόγοι μηχανικοί (Msc) του Εργαστηρίου Αυτόματου Ελέγχου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ), ενώ ο κ. Ευάγγελος Παπαδόπουλος είναι καθηγητής στο ΕΜΠ.