



ΙΟΝΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΞΕΝΩΝ ΓΛΩΣΣΩΝ, ΜΕΤΑΦΡΑΣΗΣ & ΔΙΕΡΜΗΝΕΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕ ΘΕΜΑ:

Μετάφραση και Σχολιασμός «Requirements Based Design and End-to-End Dynamic Modeling of a Robotic Tool for Vitreoretinal Surgery» (2018), του Ανέστη Μαμπλέκου-Αλεξίου

ΑΝΑΓΥΡΟΣ ΜΑΜΠΛΕΚΟΣ-ΑΛΕΞΙΟΥ (Ξ2014102)

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΠΟΠΤΕΙΑΣ:

ΣΩΤΗΡΙΟΣ ΚΕΡΑΜΙΔΑΣ (ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ)

ΠΑΣΧΑΛΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΥ (ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ)

ΚΕΡΚΥΡΑ, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2018

- ❖ *Μετάφραση και Σχολιασμός «Requirements Based Design and End-to-End Dynamic Modeling of a Robotic Tool for Vitreoretinal Surgery» (2018), του Ανέστη Μαμπλέκου-Αλεξίου*

Περιεχόμενα

<i>Πρόλογος</i>	5
<i>Μετάφρασμα</i>	6
<i>Πρωτότυπο κείμενο</i>	15
<i>Σχολιασμός</i>	23
<i>Βιβλιογραφία</i>	27
<i>Γλωσσάρι</i>	28

Πρόλογος

Η συγκεκριμένη εργασία αποτελεί το τελευταίο στάδιο των προπτυχιακών μου σπουδών, πριν την έξοδό μου στην αγορά εργασίας, ως πτυχιούχος μεταφραστής. Έψαχνα λοιπόν να ασχοληθώ με ένα θέμα πάνω στον τομέα της τεχνολογίας, περίπλοκο και ταυτόχρονα ιδιαίτερα ασυνήθιστο για πτυχιακή εργασία. Μετά από αρκετή έρευνα, αποφάσισα να μεταφράσω το paper που ο αδερφός μου συνέθεσε και μάλιστα παρουσίασε το Μάιο του 2018 στο International Conference on Robotics and Automation (ICRA) που έλαβε χώρα στο Μπρίσμπεϊν της Αυστραλίας. Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή μου κύριο Σωτήριο Κεραμίδα διότι χωρίς τη βοήθεια του δεν θα μπορούσα να ολοκληρώσω την εργασία μου, καθώς με κατηύθυνε και μου έδειξε εμπιστοσύνη από το πρώτο λεπτό. Κατ' επέκταση, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον κύριο Πασχάλη Νικολάου που δέχτηκε χωρίς δεύτερη σκέψη να μπει στην επιτροπή εποπτείας, παρά τον αυξημένο φόρτο εργασίας του. Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον αδερφό μου Ανέστη που όχι μόνο με εμπιστεύτηκε και μου ανέθεσε τη μετάφραση ενός έργου που με τόσο κόπο κατάφερε να βγάλει εις πέρας, αλλά ήταν πρόθυμος να μου λύσει οποιαδήποτε απορία είχα πάνω στην ρομποτική ορολογία. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, χωρίς τους οποίους δεν θα μπορούσα ποτέ να κάνω τα όνειρα μου πραγματικότητα.

Η παρούσα εργασία έχει θέμα τη μετάφραση και το σχολιασμό του «Requirements Based Design and End-to-End Dynamic Modeling of a Robotic Tool for Vitreoretinal Surgery». Όπως προανέφερα, το συγκεκριμένο paper παρουσιάστηκε τον περασμένο Μάιο στο ICRA στην Αυστραλία και προτείνει τη μοντελοποίηση ενός ρομποτικού εργαλείου με σκοπό την χειρουργική επέμβαση υαλοειδούς-αμφιβληστροειδούς. Στο πρώτο μέρος λοιπόν της εργασίας παρατίθεται το μετάφρασμα και το πρωτότυπο κείμενο. Κατόπιν, ακολουθεί σχολιασμός του μεταφράσματος και του πρωτοτύπου αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, αναλύεται το πρωτότυπο κείμενο και περιγράφονται τα μεταφραστικά προβλήματα που κλήθηκα να αντιμετωπίσω. Τέλος παρατίθενται τόσο οι βιβλιογραφικές αναφορές όσο και το γλωσσάρι των όρων.

Σχεδιασμός βάσει απαιτήσεων και δυναμική μοντελοποίηση ενός ρομποτικού εργαλείου για χειρουργικές επεμβάσεις υαλοειδούς-αμφιβληστροειδούς.

Ανέστης Μαμπλέκος-Αλεξίου, Sebastien Ourselin, Lyndon da Cruz*, και Χρήστος Μπεργελές

Περίληψη— Παρά το γεγονός ότι πολλά ρομπότ έχουν προταθεί για χειρουργικές επεμβάσεις υαλοειδούς-αμφιβληστροειδούς, υπάρχουν περιορισμένες πληροφορίες σχετικά με τη μοντελοποίηση της δυναμικής τους. Αυτό το κενό οδηγεί σε μη βέλτιστη επιλογή κινητήρων και εμποδίζει την εφαρμογή προηγμένων συστημάτων ελέγχου που θα εκπληρώνουν το στόχο της ακρίβειας μικρομέτρου σε χειρουργικές επεμβάσεις. Αυτή η εργασία παρουσιάζει τη διαδικασία σχεδιασμού και μια μελέτη δυναμικής ενός ρομποτικού συστήματος πολλαπλών βαθμών ελευθερίας (ΒΕ), που είναι εμπνευσμένο από τις καθιερωμένες αρχιτεκτονικές συν-χειρισμού. Προτείνουμε μια ενδελεχή κινηματική και δυναμική ανάλυση του τμήματος του ρομπότ που είναι υπεύθυνο για το χειρισμό του χειρουργικού εργαλείου κατά τη φάση του χειρουργείου του αμφιβληστροειδούς. Συγκεκριμένα, οι εξισώσεις κίνησης Euler-Lagrange, οι οποίες περιγράφουν τη δυναμική του χειρουργικού ρομποτικού χειριστή τριών συνδέσμων, συνδυάζονται με νέα αναλυτικά μοντέλα των αντίστοιχων μηχανισμών μετάδοσης κάθε συνδέσμου, συμπεριλαμβανομένου ενός συστήματος κοχλία κίνησης εξάλειψης διάκενου και ενός ατέρμονα κοχλία. Τα μοντέλα που προκύπτουν, μεταβιβάζονται σε υπάρχοντες χειριστές, παρέχουν μια σχολαστική ανάλυση της απόδοσης του ρομπότ που μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για μηχανολογικό σχεδιασμό όσο και για ακρίβειες ελέγχου.

I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

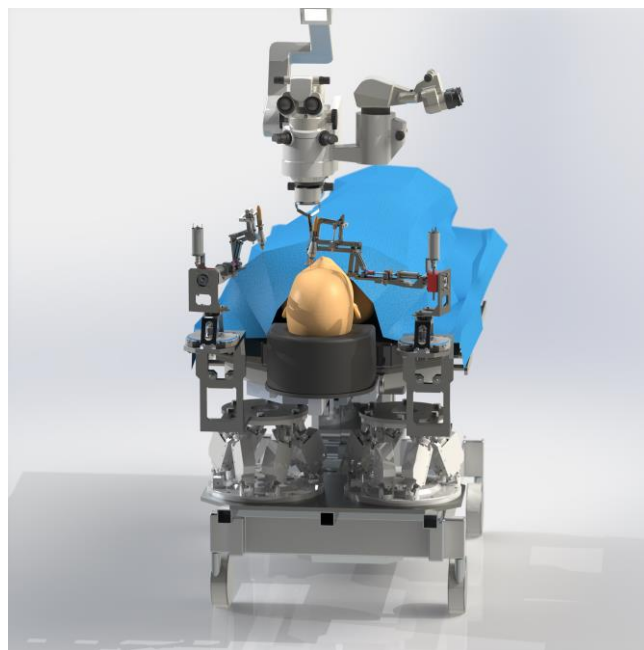
Η επέμβαση υαλοειδούς-αμφιβληστροειδούς και η ακριβής υπαμφιβληστροειδική χορήγηση των επερχόμενων θεραπειών αποκατάστασης της όρασης απαιτούν ακρίβεια σε κλίμακα μικρομέτρου. Ο απαιτούμενος βαθμός ακρίβειας, σε συνδυασμό με τα περιορισμένα όρια της ανθρώπινης ικανότητας [1-3], υποδηλώνουν ότι ειδικά κατασκευασμένα ρομποτικά συστήματα μπορούν να βελτιώσουν τα αποτελέσματα της επέμβασης.

Μέσα σε λίγες μόνο δεκαετίες από την αρχική εμφάνισή της, η ρομποτική χειρουργική υαλοειδούς-αμφιβληστροειδούς εξελίχθηκε σε δυναμικό και ταχέως αναπτυσσόμενο χώρο έρευνας. Προτεινόμενη αρχικά για την παροχή βοήθειας

* Τη συγγραφική ιδιότητα.

Η έρευνα αυτή υποστηρίχθηκε από το ίδρυμα Michael Uren, το φιλανθρωπικό ίδρυμα Helena Charitable Trust, μια χορηγία του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου Έρευνας (ΕΣΕ) [714562], το βραβείο UCL-Future Leaders, το βραβείο Wellcome/EPSCRC Centre of Excellence [203145Z/16/Z], και το χρηματοδοτούμενο από το EPSRC, UCL Centre for Doctoral Training in Medical Imaging [EP / L016478 / 1].

Όλοι οι συγγραφείς συνεργάζονται με το Wellcome / EPSRC Centre for Interventional and Surgical Sciences, UCL, Λονδίνο, Ηνωμένο Βασίλειο. Ο Ανέστης Μαμπλέκος-Αλεξίου και ο Lyndon da Cruz συνεργάζονται επιπρόσθετα με το UCL Institute of Ophthalmology και το Moorfield Eye Hospital, Λονδίνο, Ηνωμένο Βασίλειο. Ο Sebastien Ourselin και ο Χρήστος Μπεργελές συνεργάζονται επιπρόσθετα με το Center for Medical Image Computing, UCL, Λονδίνο, Ηνωμένο Βασίλειο (αντίστοιχος συγγραφέας Ανέστης Μαμπλέκος-Αλεξίου, email: anestis.mamplekos-alexou.16@ucl.ac.uk ή mamplekos@gmail.com).



Εικόνα 1. Πρότυπο σχεδίασης με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD) του προτεινόμενου ρομποτικού συστήματος εγκατεστημένο στο χειρουργικό περιβάλλον.

στους χειρουργούς σε απαιτητικές αλλά κοινές επεμβάσεις που απαιτούν υψηλή επιδεξιότητα, όπως η απολέπιση των επιθηλιακών μεμβρανών, [4], [5], τα ρομπότ για επεμβάσεις υαλοειδούς-αμφιβληστροειδούς συμμετέχουν πλέον σε νέες μεθόδους θεραπείας που προσφέρουν δυνατότητες οι οποίες, μαζί με αναπτυσσόμενες θεραπείες βλαστοκυττάρων [6] και γονιδίων, αναμένεται να φέρουν την επανάσταση στη μικροχειρουργική του αμφιβληστροειδούς και να εκπληρώσουν το στόχο της αναγέννησης της όρασης.

Σήμερα, το εύρος των προτεινόμενων χειρουργικών πλατφορμών για επεμβάσεις υαλοειδούς-αμφιβληστροειδούς είναι εντυπωσιακό και οι τεχνολογικές συνεισφορές των ρομποτιστών έχουν οδηγήσει το πεδίο σε υψηλό επίπεδο ανάπτυξης [7-12]. Παρά την αδιαμφισβήτητη πρόοδο όσον αφορά τις στρατηγικές σχεδιασμού και ελέγχου, η τρομακτική απαίτηση ακρίβειας μικρομέτρου επηρεάζει ολόκληρη τη διαδικασία σχεδιασμού και εισάγει διάφορα τεχνικά εμπόδια που πρέπει να ξεπεραστούν. Οι δυσκολίες ελέγχου που προκύπτουν, σε συνδυασμό με τους περιορισμούς που υπάρχουν στο χειρουργείο, παρεμποδίζουν την μέχρι στιγμής κλινική υιοθέτηση των ρομπότ για επεμβάσεις υαλοειδούς - αμφιβληστροειδούς, παρά τις εντυπωσιακές πρώτες δοκιμές σε ανθρώπους που πραγματοποιήθηκαν από [7], [8].

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζουμε ένα νέο σχέδιο για ένα ρομπότ για επεμβάσεις υαλοειδούς-αμφιβληστροειδούς εμπνευσμένο από επιτυχημένες πλατφόρμες συν-χειρισμού [7], [11]. Λαμβάνουμε υπόψη τους εργονομικούς και δομικούς περιορισμούς κατά τη διάρκεια αυτών των

επεμβάσεων και προτείνουμε ένα χειρουργικό ρομπότ που χτίζεται σταδιακά από χαμηλής σε υψηλής ακρίβειας μέρη, σχεδιασμένο ώστε να ελαχιστοποιεί τη διαταραχή της κλινικής ροής της εργασίας. Παρουσιάζουμε μια διαδικασία σχεδιασμού που κατευθύνεται από τη δυναμική του προτεινόμενου χειριστή. Συνδυάζοντας τις εξισώσεις κίνησης του ρομπότ με νέα μαθηματικά μοντέλα των αντίστοιχων επενεργητών του, αποκτάμε μια λεπτομερή περιγραφή της κινηματικής και της δυναμικής του. Αυτή η περιγραφή περιλαμβάνει όλες τις μη γραμμικότητες που οφείλονται στην τριβή που προκύπτει από τη χρήση συστημάτων μετάδοσης, όπως οι κοχλίες κίνησης και οι ατέρμονες κοχλίες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρέως στη ρομποτική μικροχειρουργική αλλά σπάνια ερευνώνται διεξοδικά. Τα εξελιγμένα μοντέλα μπορούν να υποστηρίξουν την επιλογή των μικροεπενεργητών, με βάση τις απαιτήσεις, επιτρέποντας προσαρμοσμένες διαμορφώσεις που αποφεύγουν προκατασκευασμένα προϊόντα που μπορεί να επηρεάσουν την ακρίβεια και την ταχύτητα του χειριστή. Επιπλέον, η προσέγγισή μας υποστηρίζει τη μελλοντική εισαγωγή στρατηγικών ακριβούς ελέγχου που περιλαμβάνουν τη δυναμική του συστήματος.

Η προτεινόμενη ρομποτική σύνθεση απεικονίζεται στην Εικ. 1. Οι απαιτήσεις που οδηγούν το σχεδιασμό της δίνονται στην Εν. II, ενώ στην Εν. III αποδίδεται η δυναμική των 3-BE του τελικού τελεστή. Η Εν. IV παρουσιάζει τα μοντέλα των μηχανισμών μετάδοσης, ενώ η Εν. V περιγράφει την επιλογή των κινητήρων που βασίζεται στη δυναμική. Η εργασία ολοκληρώνεται στην Εν. VI.

II. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Δεδομένου ότι η επιτυχής αποδοχή από τον κλινικό τομέα απαιτεί ελάχιστη διαταραχή στις συνήθεις κλινικές διαδικασίες, ο σχεδιαζόμενος ρομποτικός μηχανισμός έχει σχεδιαστεί για να εκμεταλλεύεται τον διαθέσιμο ελεύθερο χώρο στο χειρουργείο. Οι πραγματικές συνθήκες επεμβάσεων και η διαρρύθμιση χώρου βασικών εξαρτημάτων έχουν αναπαραχθεί με τη χρήση λογισμικού CAD (Computer Aided Design - Σχεδιασμός με χρήση Υπολογιστή), σχεδιάζοντας από την αρχή το χειρουργικό τραπέζι (Opmaster 506P από την Lab-Med) και χειρουργικό μικροσκόπιο (Lumera 700 από την Zeiss), βλ. Εικ. 1. Με αυτόν τον τρόπο, ο ρομποτικός μηχανισμός μπορεί να σχεδιαστεί για να χωρέσει στον διαθέσιμο χώρο. Ο μηχανικός σχεδιασμός του συστήματος αρχίζει με την ανάλυση της κίνησης του εργαλείου κατά τη διάρκεια των συμβατικών χειρουργικών επεμβάσεων του υαλοειδούς-αμφιβληστροειδούς και την απεικόνιση των κινήσεων στα εξαρτήματα του ρομπότ που είναι υπεύθυνα για την εκτέλεσή τους.

A. Εισαγωγή στους Στόχους Σχεδιασμού

Κάθε επέμβαση μπορεί να χωριστεί σε τρεις φάσεις [12]: τη φάση προσέγγισης (φάση-II), τη φάση εισαγωγής (φάση-E) και τη φάση χειρουργείου του αμφιβληστροειδούς (φάση-X).

ΠΙΝΑΚΑΣ I
ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΘΕΣΗΣ ΡΟΜΠΟΤ-Π

Προδιαγραφές περιστροφής και ελέγχου θέσης	Μονάδες	Τιμή
Εύρος διαδρομής στους άξονες XY	mm (χιλιοστόμετρο)	60
Εύρος διαδρομής στον άξονα Z	mm (χιλιοστόμετρο)	35
Εύρος περιστροφής γύρω από τους άξονες X, Y, Z	ο	30
Επαναληψιμότητα στους άξονες X, Y, Z	μm (μικρόμετρο)	0.5

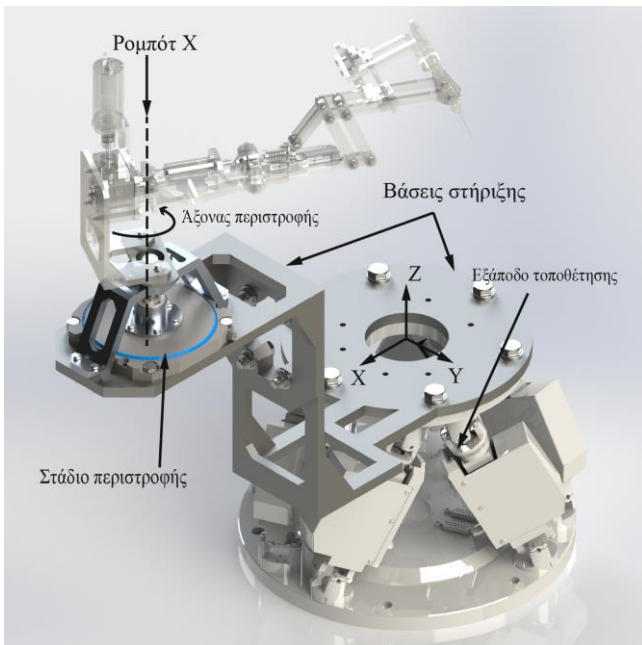
Η φάση-II αντιστοιχεί στο στάδιο όπου ο χειρουργός φέρνει το εργαλείο από τυχαία αρχική θέση στο σημείο τομής στην επιφάνεια του οφθαλμού. Συνήθως, υπάρχουν τρία σημεία τομής, όπου τοποθετούνται τροκάρ: ένα για το χειρουργικό εργαλείο, ένα για τον οπτικό καθετήρα φωτισμού και ένα για μια γραμμή έγχυσης η οποία διατηρεί σταθερή ενδοφθαλμική πίεση. Η κίνηση της φάσης-II αντιστοιχεί σε μια μεταφορική κίνηση στο χώρο, και συνεπώς, απαιτεί ένα ρομπότ με τουλάχιστον τρεις BE.

Η φάση-E περιλαμβάνει την κίνηση του άκρου του εργαλείου ξεκινώντας από το σημείο τομής μέχρι την επιφάνεια του αμφιβληστροειδούς, ενώ η φάση-X περιλαμβάνει όλες τις κινήσεις του οργάνου, μέσα στο θάλαμο του οφθαλμού, που περιστρέφονται γύρω από την είσοδο στο σημείο τομής. Όσον αφορά τις φάσεις-E και X, απαιτούνται κινηματικά τρεις περιστροφικοί BE γύρω από ένα απομακρυσμένο κέντρο περιστροφής (ΑΚΠ) και ένας μεταφορικός που να διέρχεται μέσω αυτού, ώστε να επιτευχθεί περιστροφή γύρω από το ΑΚΠ, καθώς επίσης εισαγωγή και εξαγωγή του εργαλείου.

Ένα ρομποτικό σύστημα που πληροί τις απαιτήσεις των χειρουργικών επεμβάσεων του υαλοειδούς-αμφιβληστροειδούς μπορεί να χωριστεί σε δύο ανεξάρτητα "υπο-ρομπότ": ένα χαμηλής και έναν υψηλής ακρίβειας. Το πρώτο, το Ρομπότ-II, είναι υπεύθυνο για την τοποθέτηση του ΑΚΠ κατά τη διάρκεια της φάσης-II. Το δεύτερο, το Ρομπότ-X, είναι υπεύθυνο για την εκτέλεση της φάσης-X (η φάση-E είναι ένα υποσύνολό της) και αντιστοιχεί στο στάδιο που αλληλοεπιδρά τόσο με τον χειρουργό όσο και με τον ασθενή και απαιτεί υψηλής ποιότητας σχεδιασμό.

B. Σχεδιασμός Ρομπότ-II

Ένας μηχανισμός που παρέχει τουλάχιστον τρεις γραμμικούς BE με επαρκές εύρος κίνησης είναι κατάλληλος για τη φάση-II. Στην εργασία αυτή, ένας προκατασκευασμένος μηχανισμός, βασισμένος σε εξάποδο 6-BE (H-825 από την Physik Instrumente), αρκετά συμπαγής ώστε να χωράει κάτω από το χειρουργικό τραπέζι, επιλέγεται για τη μεταφορά του ΑΚΠ στο επιθυμητό σημείο τομής. Οι προσαρμοσμένες βάσεις στήριξης έχουν σχεδιαστεί για να συνδέουν το Ρομπότ-X με το εξάποδο και να το τοποθετούν σε μια θέση δίπλα στο μαξιλάρι του τραπέζιού, βλ. Εικ. 1. Περιλαμβάνουμε επίσης ένα επιπλέον περιστρεφόμενο εξάρτημα που λειτουργεί ως βάση για το Ρομπότ-X προσθέτοντας έναν επιπλέον BE, βλ. Εικ. 2. Αυτή



Εικόνα 2. Υποσυγκρότημα του Ρομπότ-Π, που αποτελείται από ένα εξάποδο ελέγχου θέσης 6-BE και ένα λεπτό στάδιο περιστροφής.

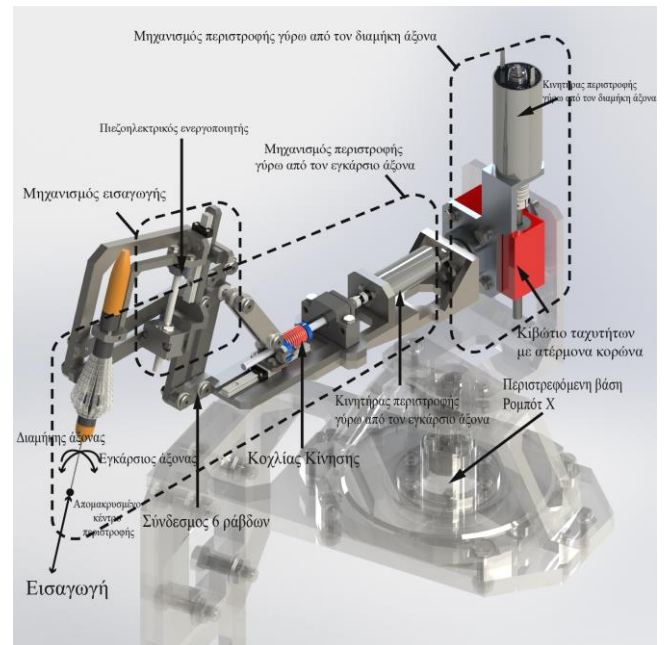
η ελεύθερη περιστροφή, που παρέχεται από μια προκατασκευασμένη λεπτή βάση (U-651 από την PI), δίνει τη δυνατότητα μετακίνησης του ρομπότ μακριά από το χώρο εργασίας, σε θέση τέτοια που δεν διαταράσσει τη ροή εργασίας όταν δεν χρησιμοποιείται. Και οι δύο βραχίονες κλειδώνουν αυτόματα όταν απενεργοποιούνται και έτσι η ακρίβεια στον έλεγχο θέσης δεν επηρεάζεται από εξωτερικές διαταραχές· επίσης η ενέργεια που χάνεται κρατώντας το εργαλείο στη θέση του κατά τη διάρκεια της εγχείρησης ελαχιστοποιείται. Οι προδιαγραφές του ελέγχου θέσης του Ρομπότ-Π δίνονται στον Πίνακα Ι.

Γ. Σχεδιασμός Ρομπότ-Χ

Το Ρομπότ-Χ αποτελείται από μηχανισμούς περιστροφής γύρω από τον διαμήκη και εγκάρσιο άξονα του οποίου οι άξονες περιστροφής τέμνονται σε ένα συγκεκριμένο σημείο του χώρου παρέχοντας ένα μηχανικό ΑΚΠ, παρόμοιο με [7], [11]. Ένα εξάρτημα εισαγωγής προσαρτάται στο άκρο του μηχανισμού περιστροφής γύρω από τον εγκάρσιο άξονα και παρέχει έναν επιπλέον μεταφορικό ΒΕ, υπεύθυνο για την κίνηση του εργαλείου μέσα και έξω από τον θάλαμο του οφθαλμού, διερχόμενος από το ΑΚΠ, βλ. Εικ. 3.

Ο μηχανισμός εισαγωγής χρησιμοποιεί έναν προκατασκευασμένο πιεζοηλεκτρικό επενεργητή (N-422 από την Physik Instrumente) λόγω της ακρίβειας και της συμπαγούς του λειτουργίας. Ο επενεργητής παρέχει συνεχή κίνηση με εύρος διαδρομής 35mm, μέγιστη ταχύτητα 30mm/s και μέγεθος βήματος περίπου 300nm.

Μία διάταξη βασισμένη σε σύστημα ατέρμονα-κορώνας έχει σχεδιαστεί για να παράγει περιστροφή γύρω από τον διαμήκη άξονα. Τα εξαρτήματα που αποτελούν αυτόν τον μηχανισμό είναι ένα κιβώτιο ατέρμονα-κορώνας (P20-120AR από την Ondrives), ένας ειδικά σχεδιασμένος περιστρεφόμενος άξονας που μεταφέρει την ισχύ σε όλα τα περιστρεφόμενα εξαρτήματα και έναν κινητήρα



Εικόνα 3. Υποσυγκρότημα του Ρομπότ-Π, που αποτελείται από έναν μηχανισμό περιστροφής γύρω από τον διαμήκη και εγκάρσιο άξονα και ένα εξάρτημα εισαγωγής.

επενέργησης. Το εύρος κίνησης που παρέχεται από το μηχανισμό περιστροφής γύρω από τον διαμήκη άξονα είναι 360°.

Όσον αφορά την περιστροφή γύρω από τον εγκάρσιο άξονα, επιλέγεται ένας μηχανισμός έξι ράβδων που παρέχει ένα μηχανικό ΑΚΠ [13]. Ο σύνδεσμος των έξι ράβδων κινείται από έναν κοχλία κίνησης, που επενεργείται από έναν κινητήρα (AFA016048RS από την Helix). Καθώς η εφαρμογή απαιτεί εξαιρετική ακρίβεια, επιλέγεται ένα περικόχλιο εξάλειψης του διάκενου που προκαλείται από τα κενά ανάμεσα στη βίδα και το περικόχλιο. Το παρεχόμενο εύρος περιστροφής ως προς τον εγκάρσιο άξονα γύρω από το ΑΚΠ είναι περίπου 60°.

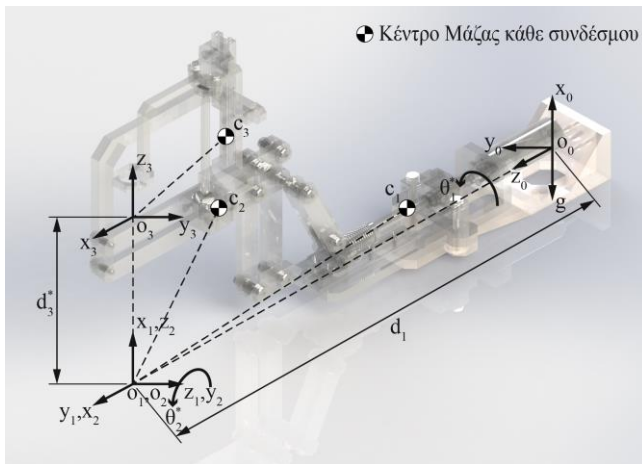
Οι προδιαγραφές των κινητήρων περιστροφής γύρω από τον διαμήκη και εγκάρσιο άξονα παρουσιάζονται στην Εν. 5, μετά την εκτίμηση της ισχύος που πρέπει να παραδώσουν.

III. ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤ-Χ

Το τμήμα του ρομπότ που αλληλοεπιδρά ενεργά με τον ασθενή και χρήζει της βαθύτερης ανάλυσης είναι το Ρομπότ-Χ. Θεωρώντας ότι το Ρομπότ-Π χρησιμοποιείται για την προ-τοποθέτηση του ΑΚΠ στο επιθυμητό σημείο, τα δύο υπο-ρομπότ μπορούν να μελετηθούν ξεχωριστά καθώς είναι δυναμικά αποσυνδεδεμένα.

Α. Ευθεία Κινηματική

Σε αυτή την ενότητα αναπτύσσεται εν συντομία η ευθεία κινηματική του ρομπότ-Χ, κυρίως για τη διευκόλυνση της δυναμικής μοντελοποίησης της επόμενης υποενότητας. Για την παραγωγή των ομογενών μητρώων μετασχηματισμού του ρομπότ, χρησιμοποιείται η μέθοδος των Denavit-Hartenberg (DH).



Εικόνα 4. Το σύστημα συντεταγμένων στο χώρο των Denavit-Hartenberg για το Ρομπότ-Χ τριών συνδέσμων.

Το σύστημα συντεταγμένων στο χώρο απεικονίζεται στην Εικ. 4, όπου $o_0x_0y_0z_0$ είναι η βάση του επιλεγμένου αδρανειακού συστήματος αναφοράς και τοποθετείται πάνω στον διαμήκη άξονα περιστροφής στο σημείο σύνδεσης με το αντίστοιχο σύστημα μετάδοσης. Μόλις δημιουργηθεί η βάση, το σύστημα αναφοράς $o_1x_1y_1z_1$ καθορίζεται στο σημείο του μηχανικού ΑΚΠ σε απόσταση d_1 από το o_0 , και περιστρέφεται γύρω από τον άξονα z_0 . Αυτή η γωνία περιστροφής είναι μια μεταβλητή άρθρωσης και συμβολίζεται με θ_1 . Στη συνέχεια, το σύστημα αναφοράς $o_2x_2y_2z_2$ ορίζεται επίσης στο ΑΚΠ και μπορεί να περιστρέφεται γύρω από τον άξονα z_1 σε μεταβλητή γωνία γύρω από τον εγκάρσιο άξονα, η οποία συμβολίζεται με θ_2 . Το τελευταίο σύστημα αναφοράς $o_3x_3y_3z_3$ τοποθετείται στο σημείο του άκρου του εργαλείου, τον οποίο ελέγχεται η θέση. Η αρχή των αξόνων o_3 επιτρέπεται να μεταφέρεται γραμμικά σε μεταβλητή απόσταση d_3 κατά μήκος του άξονα z_2 . Τέλος, κάθε διάνυσμα $c_i = [c_{xi} \ c_{yi} \ c_{zi}]^T$ δηλώνει τη θέση του Κέντρου Μάζας (ΚΜ) του i -οστού συνδέσμου που εκφράζεται στην αντίστοιχη αρχή των αξόνων o_i . Συνεπώς, με βάση τα καταγεγραμμένα συστήματα αναφοράς στο χώρο που έχουν περιγραφεί, προκύπτουν οι DH παράμετροι θ_i , d_i , a_i , α_i , οι οποίοι δίνονται στον Πίνακα II.

Οι εξισώσεις της ευθείας κινηματικής λαμβάνονται με τη χρήση των τεσσάρων παραμέτρων της μεθόδου DH που δίνονται στον Πίνακα II και αντικαθιστώντας τις στα ομογενή μητρώα μετασχηματισμού A_i για κάθε σύνδεσμο που δίνεται από το [14].

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τα χρονικά παράγωγα των μητρώων περιστροφής $R \in SO(3)$ που προέκυψαν και το επιλεγμένο σύστημα αναφοράς, παράγονται τρεις Ιακωβιανές. Οι εκφράσεις που προκύπτουν από τις παραπάνω λειτουργίες για αυτόν τον συγκεκριμένο χειριστή είναι απλές και παραλείπονται για συντομία.

B. Δυναμική

Οι εξισώσεις κίνησης (ΕΚ) Euler-Lagrange χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη δυναμική συμπεριφορά του Ρομπότ-Χ. Για την αποκόμιση των δυναμικών εξισώσεων του χειριστή, οι μεταβλητές άρθρωσής του επιλέγονται ως γενικευμένες συντεταγμένες.

ΠΙΝΑΚΑΣ II
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ DH ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤ Χ

Σύνδεσμος Ρομπότ	Παράμετροι DH			
	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	$\pi/2$	$d_1 = 0,28m$	θ_1
2	0	$\pi/2$	0	$\theta_2 + \pi/2$
3	0	0	d_3^*	0

Επομένως, $q = [q_1 \ q_2 \ q_3]^T$, όπου $q_1 = \theta_1$, $q_2 = \theta_2$, $q_3 = d_3$. Οι ΕΚ για τον k -σύνδεσμο μπορούν να γραφτούν ως

$$\sum_{j=1}^3 d_{kj}(q) \ddot{q}_j + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 c_{ijk}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j + g_k = \tau_k \quad (1)$$

όπου d_{kj} είναι το (k, j) -στοιχείο ενός μητρώου αδρανείας $D(q)$, c_{ijk} είναι τα σύμβολα Christoffel, g_k αναπαριστά την επίδραση των βαρυτικών δυνάμεων και τ_k περιλαμβάνει όλες τις ροπές λόγω μη συντηρητικών δυνάμεων που ασκούνται στον σύνδεσμο.

IV. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

Οι εξισώσεις που δίνονται από την (1) περιγράφουν τη δυναμική συμπεριφορά των συνδέσμων του ρομπότ δεδομένου ότι αυτοί περιστρέφονται ή μεταφέρονται ελεύθερα κατά μήκος των αντίστοιχων αξόνων τους. Στις περισσότερες εφαρμογές, ωστόσο, μεταξύ κάθε ζεύγους επενεργητή-συνδέσμου, ένα σύστημα μετάδοσης είναι υπεύθυνο για την κατάλληλη μεταφορά της μηχανικής ισχύος. Σε ένα ρομπότ επεμβάσεων υαλοειδούς-αμφιβληστροειδούς, όπου οι απαιτήσεις ακρίβειας είναι εξαιρετικά υψηλές, η λεπτομερής μοντελοποίηση των συστημάτων μετάδοσης είναι σημαντική τόσο από την άποψη της επίτευξης ικανοποιητικού ελέγχου, όσο και για την ακριβή εκτίμηση της ισχύος για σχεδιαστικούς σκοπούς, καθώς τα έντονα φαινόμενα τριβής επηρεάζουν και τους δύο αυτούς παράγοντες. Στη συγκεκριμένη μελέτη, οι σχεδιασμένοι μηχανισμοί περιστροφής γύρω από τον διαμήκη και εγκάρσιο άξονα περιλαμβάνουν ένα κιβώτιο ατέρμονα κορώνα και έναν κοχλία κίνησης με την τεχνική εξάλειψης διάκενου, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές ρομποτικού ελέγχου θέσης. Αυτά τα μοντέλα μηχανισμών μετάδοσης δεν έχουν συμπεριληφθεί μέχρι στιγμής στα πλαίσια της δυναμικής μοντελοποίησης των ρομπότ ακρίβειας μικρομέτρου, και αναπτύσσονται από την αρχή.

A. Σύστημα ατέρμονα-κορώνα

Η μετάδοση ισχύος για τον μηχανισμό περιστροφής γύρω από τον διαμήκη άξονα υλοποιείται με ένα κιβώτιο ατέρμονα-κορώνα. Ο κινητήρας επενέργησης συνδέεται με τον άξονα του ατέρμονα κοχλία και μεταδίδει ισχύ σε όλα τα περιστρεφόμενα εξαρτήματα του μηχανισμού που είναι προσαρτημένα στην κορώνα. Επομένως, το σύστημα αυτό

αποτελείται από δύο μέρη, τα οποία είναι κινηματικά συζευγμένα και κατά συνέπεια μία εξίσωση κίνησης περιγράφει πλήρως τη δυναμική του.

Οι δυναμικές εξισώσεις καθενός από τα δύο εξαρτήματα αναλύονται διαδοχικά. Αρχικά, η εξίσωση κίνησης του άξονα του ατέρμονα κοχλία που συνδέεται άμεσα με τον κινητήρα, μπορεί να γραφτεί ως:

$$J_w \ddot{\theta}_w = \tau_w + \tau'_w \quad (2)$$

Όπου θ_w είναι η γωνία ατέρμονα κοχλία, J_w η αδράνεια του άξονα του ατέρμονα κοχλία, τ_w η ροπή που δημιουργείται από τον κινητήρα επενέργησης και τ'_w η ροπή πάνω στον άξονα λόγω της αλληλεπίδρασης με την κορόνα.

Όσον αφορά την περιστρεφόμενη κορόνα, η οποία συνδέεται άμεσα με το σύνδεσμο-1 του χειριστή, η δυναμική της δίνεται από την (1) για $k = 1$. Για να συσχετιστεί αυτή η έκφραση με τη δυναμική του άξονα του ατέρμονα κοχλία, η (1) αναδιαμορφώνεται ως

$$d_{11}(q)\ddot{q}_1 = \tau'_1 + \tau'_g - \sum_{j=2}^3 d_{1j}(q)\ddot{q}_j - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 c_{ij1}(q)\dot{q}_i\dot{q}_j - g_1 \quad (3)$$

όπου ο αδρανειακός όρος $d_{11}(q)\ddot{q}_1$ που περιέχει την επιτάχυνση της κορόνας διαχωρίζεται από την υπόλοιπη εξίσωση, τ'_1 δηλώνει το άθροισμα της ροπής λόγω των μη συντηρητικών δυνάμεων, εξαιρουμένης της ροπής τ'_g που δημιουργείται λόγω της αλληλεπίδρασης με τον άξονα του ατέρμονα κοχλία. Η εξίσωση (3), τότε, μπορεί να γραφτεί ως

$$d_{11}(q)\ddot{q}_1 = \tau_{11} + \tau'_g \quad (4)$$

όπου

$$\tau_{11} = \tau'_1 - \sum_{j=2}^3 d_{1j}(q)\ddot{q}_j - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 c_{ij1}(q)\dot{q}_i\dot{q}_j - g_1. \quad (5)$$

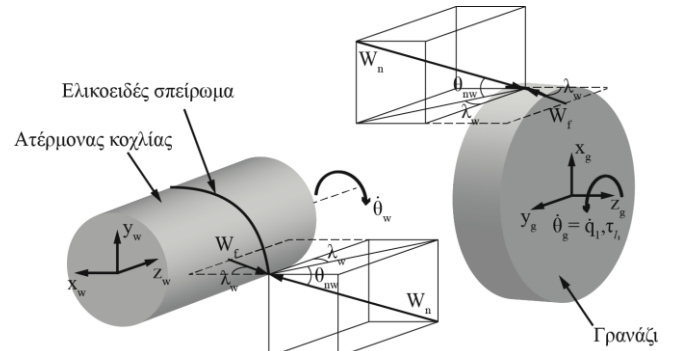
Στη συνέχεια συνδυάζουμε τις (2) και (4) για να προσδιορίσουμε τη σχέση των ροπών τ'_w , τ'_g . Για αυτό το σκοπό τα διαγράμματα ελευθέρων σωμάτων του ατέρμονα κοχλία και της κορόνας απεικονίζονται στην Εικ. 5. Σημειώνεται ότι η ανάλυση αυτών των δυνάμεων ισχύει όταν τόσο η ταχύτητα της κορόνας $\dot{q}_1$ όσο και η εξωτερική ροπή τ_{11} είναι θετικές βάσει του σωματόδετου συστήματος συντεταγμένων για την επιλεγμένη δεξιόστροφη έλικα του ατέρμονα κοχλία. Στην Εικ. 5, λ_w είναι η γωνία του ατέρμονα, θ_{nw} η γωνία πίεσης του σπειρώματος, d_w η διάμετρος του ατέρμονα, d_g η διάμετρος της κορόνας, W_f οι δυνάμεις τριβής μεταξύ των επιφανειών ολίσθησης και W_n η κάθετη αντίδραση (κεκλιμένου) σπειρώματος, όπως ορίζεται από τη θεωρία των στοιχείων μηχανών [15]. Προσδιορίζοντας τις δυνάμεις που παράγουν ροπές κατά την κατεύθυνση της περιστροφής, οι εκφράσεις για τις ροπές τ'_g and τ'_w είναι:

$$\tau'_g = \frac{d_g}{2} (W_n \cos \theta_{nw} \cos \lambda_w + W_f \sin \lambda_w) \quad (6)$$

$$\tau'_w = \frac{d_w}{2} (W_f \cos \lambda_w - W_n \cos \theta_{nw} \sin \lambda_w). \quad (7)$$

Υποθέτοντας ότι ο συντελεστής τριβής είναι σταθερός σε όλο το μήκος του σπειρώματος έχουμε

$$W_f = \mu W_n. \quad (8)$$



Εικόνα 5. Τα διαγράμματα ελευθέρων σωμάτων του συστήματος μετάδοσης ατέρμονα-κορόνας για θετική γωνιακή ταχύτητα γραναζιών και εξωτερική ροπή.

Αντικαθιστώντας την (8) στις (6), (7) και εξαλείφοντας τις εσωτερικές δυνάμεις W_n συνδυάζοντας τις (2) και (4), καταλήγουμε στην ακόλουθη δυναμική έκφραση

$$J_w \ddot{\theta}_w + \xi_{w1} \frac{d_w}{d_g} \ddot{q}_1 = \tau_w + \xi_{w1} \frac{d_w}{d_g} \tau_{11} \quad (9)$$

όπου

$$\xi_{w1} = \frac{\cos \theta_{nw} \sin \lambda_w - \mu \cos \lambda_w}{\cos \theta_{nw} \cos \lambda_w + \mu \sin \lambda_w} \quad (10)$$

είναι μία συνάρτηση τόσο της γεωμετρίας του άξονα του ατέρμονα κοχλία όσο και του συντελεστή τριβής μ και μπορεί να είναι θετική ή αρνητική, κάτι που καθορίζει την ικανότητα αντίστροφης κίνησης του συστήματος μετάδοσης.

Σημειώνεται ότι οποιοδήποτε μοντέλο τριβής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει την επαφή μεταξύ στερεών επιφανειών τριβής χρησιμοποιώντας το αντίστοιχο μοντέλο για το συντελεστή τριβής.

Η κινηματική εξίσωση που σχετίζει τις γωνιακές θέσεις του ατέρμονα κοχλία και της κορόνας είναι θετική για το επιλεγμένο σύστημα συντεταγμένων και υπολογίζεται από

$$\theta_w = q_1 n_w \quad (11)$$

όπου n_w είναι ο λόγος μετάδοσης.

Αντικαθιστώντας την (11) στην (9), η δυναμική εξίσωση του χειριστή όπως την βλέπει ο κινητήρας περιστροφής γύρω από τον διαμήκη άξονα είναι:

$$(J_w + \xi_{w1} \frac{1}{n_w} \frac{d_w}{d_g} d_{11}) \ddot{\theta}_w = \tau_w + \xi_{w1} \frac{d_w}{d_g} \tau_{11}. \quad (12)$$

Όπως αναφέρθηκε, η παραπάνω έκφραση προκύπτει όταν η εξωτερική ροπή τ_w και οι ταχύτητες θ_w , $\dot{q}_1$ είναι θετικές. Όπως φαίνεται από την (12), για αρνητικό ξ_{w1} , η εξωτερική ροπή επιβραδύνει το σύστημα, παρόλο που ασκείται στην κατεύθυνση της ταχύτητας. Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει ικανότητα αντίστροφης κίνησης της μετάδοσης και κάθε εξωτερική ροπή που ασκείται στο περιστρεφόμενο εξάρτημα αυξάνει την τριβή του συστήματος.

Εκτελώντας την ίδια ανάλυση για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς κατευθύνσεων ροπής-ταχύτητας, καθώς και για την περίπτωση αριστερόστροφης έλικας ατέρμονα κοχλία και γενικεύοντας την ανάλυση για τον k -σύνδεσμο

ενός χειριστή, αποδεικνύεται ότι οι μόνες πληροφορίες που απαιτούνται για να καθοριστούν πλήρως οι εξισώσεις κίνησης του συνδέσμου, όταν οδηγείται από έναν ατέρμονα κοχλία, είναι το πρόσημο του γινόμενου της ταχύτητας $\dot{q}_k$ του συνδέσμου, πολλαπλασιασμένο με το συνολικό εξωτερικό φορτίο τ_{lk} που εφαρμόζεται σ' αυτό. Για απλοποίηση της τελικής δυναμικής παράστασης, ορίζουμε:

$$J_{w1,2} = \xi_{w1,2} \frac{1}{n_w} \frac{d_w}{d_g} d_{kk} \quad (13)$$

$$C_{w1,2} = \xi_{w1,2} \frac{d_w}{d_g} d_{kk} \quad (14)$$

όπου d_{kk} συμβολίζει τη ροπή αδράνειας στον άξονα άρθρωσης k , όταν οι άλλες αρθρώσεις είναι ακίνητες, όπως παρατηρείται από την (1). Επιπλέον, ξ_{w1} δίνεται από την (10) και ξ_{w2} είναι:

$$\xi_{w2} = \frac{\cos \theta_{nw} \sin \lambda_w + \mu \cos \lambda_w}{\cos \theta_{nw} \cos \lambda_w - \mu \sin \lambda_w}. \quad (15)$$

Επομένως, οι ΕΚ του k -συνδέσμου ενός ρομπότ, που οδηγείται από ένα σύστημα μετάδοσης ατέρμονα-κορώνας όπως τις βλέπει ο επενεργητής, μπορούν να γραφτούν ως εξής:

$$(J_w + J)\ddot{\theta}_w = \tau_w + C\tau_{lk} \quad (16)$$

όπου

- Εάν $\tau_{lk}\dot{q}_k > 0$: $J = J_{w1}$ και $C = C_{w1}$
- Εάν $\tau_{lk}\dot{q}_k < 0$: $J = J_{w2}$ και $C = C_{w2}$
- Εάν $\tau_{lk} = 0$: $J = J_{w2}$ και $C = C_{w2}$

Σημειώνεται ότι το τ_{lk} υπολογίζεται με αναδιατύπωση της (5) για την περίπτωση του k -συνδέσμου συνδέσμου ενός χειριστή n αριθμού συνδέσμων. Η εξίσωση (16) είναι μια γενίκευση των εξισώσεων που προκύπτουν από την ανάλυση όλων των περιπτώσεων περιστροφής και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιοδήποτε σύστημα συντεταγμένων ή οποιαδήποτε κατεύθυνση εξωτερικών φορτίων. Οι μόνες απαιτούμενες πληροφορίες είναι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κιβωτίου ατέρμονα-κορώνας, καθώς και ο συντελεστής τριβής μεταξύ των επιφανειών τριβής.

B. Μηχανισμός κοχλία κίνησης με εξάλειψη διάκενου

Ο μηχανισμός περιστροφής γύρω από τον εγκάρσιο άξονα αποτελείται από έναν επενεργητή, έναν κοχλία κίνησης με εξάλειψη διακένου και ένα σύνδεσμο 6 ράβδων. Οι Euler–Lagrange ΕΚ του συγκεκριμένου συνδέσμου του ρομπότ δίνονται από την (1) για $k = 2$. Αναμορφώνοντας την εξίσωση που προέκυψε, όπως στην περίπτωση του εξαρτήματος περιστροφής γύρω από το διαμήκη άξονα, η δυναμική μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$d_{22}(q)\ddot{q}_2 = \tau_{l2} + \tau'_n \quad (17)$$

όπου τ'_n υποδηλώνει τη ροπή που παράγεται από το περικόχλιο του κοχλία κίνησης και τ_{l2} περιλαμβάνει τις υπόλοιπες ροπές λόγω μη συντηρητικών δυνάμεων καθώς επίσης και τους όρους των φυγόκεντρων δυνάμεων και τις δυνάμεις Κοριόλις και δίνονται από την (5) για $k = 2$. Προκειμένου να συσχετιστεί αυτή η δυναμική έκφραση με

το περικόχλιο του κοχλία κίνησης το οποίο κινείται γραμμικά, απαιτείται μια σχέση ταχύτητας μεταξύ της περιστροφής του συνδέσμου και της μεταφοράς του περικοχλίου. Σε αυτή τη συγκεκριμένη περίπτωση, η σχέση αυτή προκύπτει από την ανάλυση του συνδέσμου 6 ράβδων, ο οποίος μπορεί να θεωρηθεί κινηματικά ως ένας τυποποιημένος μηχανισμός στροφάλου.

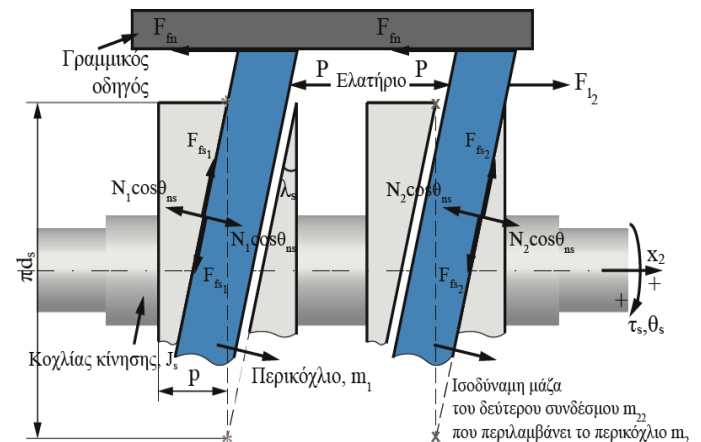
Αντικαθιστώντας την κινηματική του στροφάλου στην (17) παίρνουμε την εξίσωση γραμμικής κίνησης της ακόλουθης μορφής

$$m_{22}(q)\ddot{x}_2 = F_{l2} + F'_n. \quad (18)$$

Η εξίσωση (18), επομένως, περιγράφει τη δυναμική του συνδέσμου όπως φαίνεται από το γραμμικά κινούμενο τμήμα του, το οποίο αντιστοιχεί στο περικόχλιο. Ωστόσο, ένα περικόχλιο εξάλειψης διάκενου αποτελείται από δύο ξεχωριστά τμήματα συνδεδεμένα με ένα ελατήριο προφόρτισης, το οποίο ωθεί και τα δύο προς την επιφάνεια του σπειρώματος του κοχλία κίνησης, εξαλείφοντας το διάκενο. Υποθέτοντας ότι οι μάζες των τμημάτων των περικοχλίων είναι m_1 και m_2 , αντίστοιχα, και καθορίζοντας τον κανόνα ότι ο σύνδεσμος συνδέεται με το τμήμα m_2 , τότε το δυναμικό μοντέλο του σώματος, το οποίο αποτελείται από τον αντίστοιχο σύνδεσμο του ρομπότ και το τμήμα m_2 του περικοχλίου, περιγράφεται από την (18).

Οι εκφράσεις για τα υπόλοιπα εξαρτήματα του κοχλία κίνησης προκύπτουν από τα αντίστοιχα διαγράμματα ελεύθερων σωμάτων. Για αυτόν τον τύπο μετάδοσης, η ανάλυση των δυνάμεων αποκτάται από την επεκτείνοντας ένα σπείρωμα κοχλία με το περικόχλιό του κατά μήκος μιας επιφάνειας [16]. Η σχηματική αναπαράσταση που προκύπτει απεικονίζεται στην Εικ. 6. Υποδεικνύονται οι θετικές κατευθύνσεις για τις ταχύτητες των περικοχλίων και του κοχλία $\dot{x}_2$ και θ_s , αντίστοιχα. Η αδράνεια του κοχλία υποδηλώνεται με J_s , η διάμετρος του κοχλία με d_s , η γωνία κλίσεως με λ_s η γωνία πίεσης του σπειρώματος με θ_{ns} , και το βήμα με p .

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω συμβάσεις υπάρχουν δύο περιπτώσεις κίνησης που βασίζονται στην κατεύθυνση της ταχύτητας $\dot{x}_2$ του περικοχλίου η οποία μπορεί να είναι είτε θετική (προς την κατεύθυνση του τμήματος m_2) είτε αρνητική (προς την κατεύθυνση του τμήματος m_1).



Εικόνα 6. Σπείρωμα κοχλία και περικόχλιο εξάλειψης διάκενου που εκτείνεται σε μία επιφάνεια.

Η ανάλυση των δυνάμεων για θετική ταχύτητα του περικοχλίου απεικονίζεται στην Εικ. 6, όπου F_{fs1} και F_{fs2} είναι οι δυνάμεις τριβής μεταξύ των επιφανειών ολίσθησης του κοχλία και του περικοχλίου, F_{fn} η δύναμη τριβής μεταξύ του κινούμενου περικοχλίου και του γραμμικού οδηγού (γραμμικό ρουλεμάν), $N_1 \cos \theta_{ns}$ και $N_2 \cos \theta_{ns}$ η κάθετη αντίδραση (κεκλιμένου) σπειρώματος, P η δύναμη του ελατηρίου προφόρτισης, τ_s η ροπή του κινητήρα.

Σημειώνεται ότι η ανάλυση των απεικονιζόμενων δυνάμεων ισχύει μόνο όταν το εξωτερικό φορτίο F_{l2} δεν συμπίπτει το ελατήριο. Αυτό μπορεί να διασφαλιστεί με την εκτίμηση των ακραίων τιμών του για μια συγκεκριμένη εφαρμογή και την επιλογή ενός επαρκώς σκληρού ελατηρίου προφόρτισης.

Σε αυτή την περίπτωση, η κινηματική σχέση μεταξύ του κοχλία και των δύο μερών του περικοχλίου είναι:

$$x_2 = \tan \lambda_s \frac{d_s}{2} \theta_s. \quad (19)$$

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με την περίπτωση της κίνησης του κιβωτίου ατέρμονα-κορώνας, δηλαδή την εξάλειψη των εσωτερικών δυνάμεων N_1 και N_2 , προκύπτει η τελική δυναμική εξίσωση και μπορεί να γενικευθεί για τον τυχαίο γραμμικά κινούμενο k -σύνδεσμο ενός ρομπότ με ισοδύναμη μάζα m_{kk} και οδηγείται από μετάδοση κοχλία κίνησης με περικόχλιο εξάλειψης διακένου. Καθορίζοντας τους ακόλουθους συντελεστές:

$$J_{s1,2} = \frac{d_s^2}{4} \tan \lambda_s (\psi_2 m_{1,kk} + \psi_1 m_{kk,1}) \quad (20)$$

$$C_{s1,2} = \frac{d_s}{2} \psi_{1,2} \quad (21)$$

όπου

$$\psi_{1,2} = \frac{\cos \theta_{ns} \sin \lambda_s \mp \mu \cos \lambda_s}{\cos \theta_{ns} \cos \lambda_s \pm \mu \sin \lambda_s} \quad (22)$$

οι εξισώσεις κίνησης του k -συνδέσμου, εκφρασμένες στον άξονα εξόδου του κινητήρα επενέργησης, μπορούν να γραφτούν ως εξής:

$$(J_s + J) \ddot{\theta}_s = \tau_s - \tau_f + CF_{l_k} \quad (23)$$

όπου

$$\tau_f = \frac{d_s}{2} [P(\psi_2 - \psi_1) + F_{fn}(\psi_2 + \psi_1)] \operatorname{sgn} \dot{\theta}_s \quad (24)$$

και

- Εάν $\dot{x}_k$ είναι προς τη κατεύθυνση m_2 : $J = J_{s1}$ και $C = C_{s1}$
- Εάν $\dot{x}_k$ είναι προς τη κατεύθυνση m_1 : $J = J_{s2}$ και $C = C_{s2}$

Η παραπάνω έκφραση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάθε κοχλία κίνησης εξάλειψης διάκενου όπου οι εξισώσεις κίνησης του συνδέσμου που συνδέεται στο τμήμα m_2 του περικοχλίου έχουν τη μορφή που δίνεται από την (18).

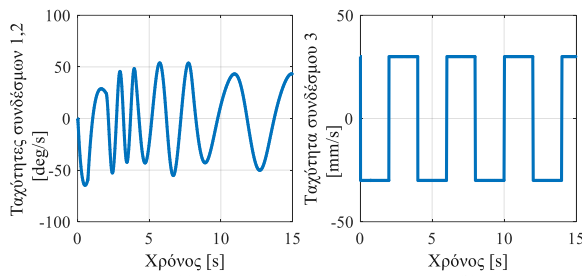
V. ΜΕΛΕΤΗ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Η τελική δυναμική μοντελοποίηση του ρομποτικού χειριστή παρέχει τη δυνατότητα ακριβούς εκτίμησης των απαιτήσεων ισχύος βάσει συγκεκριμένων προδιαγραφών απόδοσης.

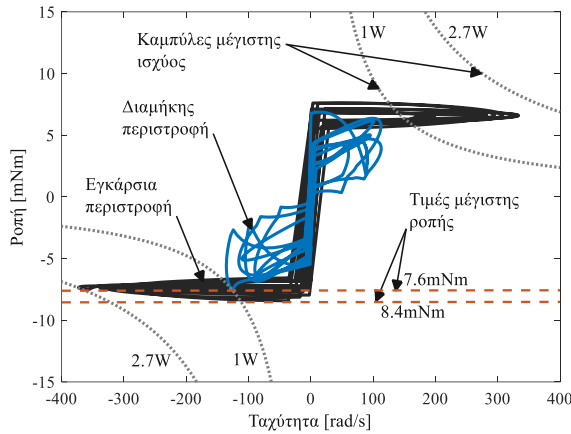
Ορίζουμε τις απαιτήσεις ως απόκριση κίνησης που περιέχει τις μέγιστες γωνιακές και γραμμικές ταχύτητες που πρέπει να επιτύχει το ρομπότ, όπως προσομοιώνονται στην Εικ. 7 για χρονικό διάστημα 15 s. Εστιάζουμε κυρίως στα εξαρτήματα περιστροφής γύρω από τον διαμήκη και εγκάρσιο άξονα για τα οποία σκοπεύουμε να επιλέξουμε κινητήρες, προσομοιώνοντας ακραίες για την εφαρμογή αποκρίσεις ταχύτητας. Το προσομοιωμένο διάστημα που παρουσιάζεται στην Εικ. 7 απεικονίζει την απόκριση ταχύτητας των δύο περιστρεφόμενων εξαρτημάτων, που περιέχει μια παλμοειδή φάση (0-2.5s) και μια ημιτονοειδή (2.5-15s) τριών διαφορετικών συχνοτήτων: συγκεκριμένα 2Hz, 1Hz και 0,5Hz. Οι μέγιστες τιμές επιτάχυνσης $\ddot{q}_{1,2}$ και ταχύτητας $\dot{q}_{1,2}$ είναι περίπου $200^\circ / s^2$ και $65^\circ / s$, αντίστοιχα. Τόσο οι μέγιστες τιμές όσο και οι ημιτονοειδείς συχνότητες ανακτώνται από τη βιβλιογραφία [1], [17]. Παρόλο που δεν απαιτείται διαδικασία επιλογής κινητήρων για τον μηχανισμό εισαγωγής, καθώς και η επενέργησή του έχει ήδη επιλεγεί, η κίνηση του επηρεάζει τη δυναμική του συστήματος όπως φαίνεται στην (1). Επομένως, μια κίνηση με τη μέγιστη ταχύτητα που παράγει ο συγκεκριμένος επενεργητής, προσομοιώνεται στο ίδιο χρονικό διάστημα, βλ. Εικ. 7.

Κατόπιν έκφρασης των απαιτήσεων του ρομπότ-X και χρήσης των αντιστοίχων κινηματικών σχέσεων, προκύπτει η περιστροφή που πρέπει να ακολουθήσει ο κάθε κινητήρας. Ακολουθώντας, χρησιμοποιώντας τις (16) και (24), ανάλογα με τον τύπο μετάδοσης, και λύνοντας για τ_w και τ_s αντίστοιχα, λαμβάνεται η ποσότητα ροπής κάθε κινητήρα που απαιτείται για την απόδοση της προσομοιωμένης περιστροφής, μαζί με μια εκτίμηση κατανάλωσης ισχύος.

Για τη διαδικασία επιλογής κινητήρα, είναι χρήσιμο να αποκτηθεί μια έκφραση της απαιτούμενης ροπής κινητήρα σε σχέση με την αντίστοιχη ταχύτητα. Ο λόγος είναι ότι η χρήση κάθε κινητήρα επηρεάζεται από το εύρος λειτουργίας του, το οποίο καθορίζει τα όρια της συνεχούς χρήσης του σε ότι αφορά την ροπή και την ταχύτητα εξόδου του. Με βάση τις απαιτήσεις περιστροφής που δίνονται στην Εικ. 7 και τα μοντέλα μετάδοσης που έχουν αναπτυχθεί σε αυτή την εργασία, οι προκύπτουσες καμπύλες ροπής-ταχύτητας (τ - ω) για κινητήρες περιστροφής γύρω από τον διαμήκη και εγκάρσιο άξονα παρουσιάζονται στην Εικ. 8, χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους των Πινάκων III, IV.



Εικόνα 7. Προδιαγραφές ταχύτητας Ρομπότ-X: Απόκριση ταχύτητας των περιστροφικών συνδέσμων 1-2 (αριστερά), απόκριση ταχύτητας του συνδέσμου μεταφοράς (δεξιά)



Εικόνα 8. Καμπύλες φορτίου ροπής-ταχύτητας: Περιστροφή γύρω από τον διαμήκη άξονα (μπλε), περιστροφή γύρω από τον εγκάρσιο άξονα (μαύρη)

Για την επιλογή του κινητήρα, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι σε αυτή τη συγκεκριμένη εφαρμογή η χρήση κιβωτίου ταχυτήτων στην έξοδο τους αποφεύγεται λόγω των διακένων που εισάγει. Επομένως, το φορτίο ροπής, που υπολογίζεται για κάθε κινητήρα στην Εικ. 8, πρέπει να βρίσκεται απευθείας μέσα στο εύρος λειτουργίας του. Συνεπώς, το πιο κρίσιμο σημείο που πρέπει να αναγνωριστεί από τα αποτελέσματα προσομοίωσης είναι οι μέγιστες απόλυτες τιμές ροπής που εμφανίζονται στις προκύπτουσες καμπύλες ($\tau-\omega$). Συγκεκριμένα, οι μέγιστες τιμές είναι ελαφρώς μικρότερες από 10mNm και για τους δύο συνδέσμους. Επομένως, ένας κινητήρας με ονομαστική ροπή 10mNm ή υψηλότερη θεωρείται κατάλληλος. Ο σχεδιασμός μας ολοκληρώνεται επιλέγοντας τον κινητήρα DCX-16L DC από την εταιρεία Maxon Motor AG με ονομαστική ροπή στα 12mNm , και για τους δύο συνδέσμους περιστροφής γύρω από τον διαμήκη και εγκάρσιο άξονα, αντίστοιχα.

Σημειώνεται ότι το Static-plus-Kinetic μοντέλο τριβής έχει χρησιμοποιηθεί με $\mu_{st} = 0.15$, και $\mu_{kin} = 0.11$, τους συντελεστές στατικής και κινητικής τριβής αντίστοιχα.

Μέσω της παρούσας διαδικασίας σχεδιασμού, που κατευθύνεται από τη δυναμική του χειριστή μπορεί να επιλεγεί το βέλτιστο ρομπότ για την απαιτούμενη κίνηση, διατηρώντας τις διαστάσεις του συστήματος βέλτιστες και τη συμπεριφορά του μέσα στο εύρος των απαιτήσεων των χειρουργικών επεμβάσεων αμφιβληστροειδούς.

ΠΙΝΑΚΑΣ III
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

Παράμετροι		Τύπος μετάδοσης	
Όνομα	Σύμβολο	Ατέρμονας κοχλίας	Κοχλίας κίνησης
Γωνία κλίσεως	λ	$1.34\pi/180$	$7.8\pi/180$
Γωνία πίεσης	θ_n	$30\pi/180$	$30\pi/180$
Αδράνεια	J	$4.5e-7$	$5e-7$
Μάζα περικοχλίου	m_1	-	0.02
	m_2	-	0.02
Διάμετρος	d_w	$11e-3$	-
	d_g	$31e-3$	-
	d_s	-	$3.175e-3$
Λόγος μείωσης της μετάδοσης	n_w	120:1	-

ΠΙΝΑΚΑΣ IV
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΡΟΜΠΟΤ X

Σύνδεσμος Ρομπότ	Παράμετροι		
	Μάζα	Τανυστής αδράνειας	Κέντρο μάζας (KM)
1 ^{ος} Σύνδεσμος	0.568	$10^{-3} \begin{bmatrix} 1.34 & 0.12 & 0.00 \\ 0.12 & 0.12 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.36 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.002 \\ -0.196 \\ 0.00 \end{bmatrix}$
2 ^{ος} Σύνδεσμος	0.166	$10^{-3} \begin{bmatrix} 1.19 & 0.00 & 0.11 \\ 0.00 & 0.43 & 0.00 \\ 0.11 & 0.00 & 0.25 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.055 \\ -0.015 \\ 0.069 \end{bmatrix}$
3 ^{ος} Σύνδεσμος	0.145	$10^{-3} \begin{bmatrix} 0.10 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.15 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.06 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.00 \\ 0.00 \\ -0.106 \end{bmatrix}$

VI. ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Αυτή η εργασία παρουσίασε τις σχεδιαστικές μελέτες μας για ένα ρομπότ χειρουργικών επεμβάσεων υαλοειδούς-αμφιβληστροειδούς, με ακρίβεια μικρομέτρου, με άνωτερο σκοπό την μεταβίβαση θεραπευτικών στον αμφιβληστροειδή. Βασική συνεισφορά μας είναι η τελική ανάπτυξη των εξισώσεων δυναμικής του χειριστή και η επίδειξη μιας διαδικασίας σχεδιασμού που χρησιμοποιεί τις εν λόγω εξισώσεις για την επιλογή κινητήρων του συστήματος. Το μελλοντικό μας έργο εμπεριέχει τη σύνθεση ενός ελεγκτή που βασίζεται σε μοντέλα δυναμικής και τη σχεδίαση του Ρομπότ-X για τη διεξαγωγή πειραμάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] L. F. Hotraphinyo και C. N. Riviere, "Three-dimensional accuracy assessment of eye surgeons," IEEE Int. Conf. Engineering in Medicine and Biology Soc., T. 4., σελ. 3458-3461, 2001.
- [2] A. D. Jagtap και C. N. Riviere, "Applied Force during Vitreoretinal Microsurgery with Handheld Instruments," IEEE Int. Conf. Engineering in Medicine and Biology Soc., σελ. 2771-2773, 2004.
- [3] S. P. N. Singh και C. N. Riviere, "Physiological Tremor Amplitude during Retinal Microsurgery," IEEE Northeast Bioengineering Conference, Philadelphia, σελ. 171-172, 2002.
- [4] C. N. Riviere, W. T. Ang, and P. K. Khosla, "Toward active tremor canceling in handheld microsurgical instruments," IEEE Trans. Robotics and Automation, T. 19, τ. 5, σελ. 793-800, 2003.
- [5] R. Taylor κ.ά., "A Steady-Hand Robotic System for Microsurgical Augmentation," Int. Journal of Robotics Research, T. 18, τ. 12, σελ. 1201-1210, 1999.
- [6] C. M. Ramsden, M. B. Powner, A. J. Carr, M. J. Smart, L. da Cruz, και P. J. Coffey (2013). Stem cells in retinal regeneration: past, present and future. Development (Cambridge, England), 140(12), 257685.
- [7] A. Gijbels, E. B. Vander Poorten, P. Stalmans, H. Van Brussel, και D. Reynaerts, "Design of a Teleoperated Robotic System for Retinal Surgery," IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, σελ. 2357-2363, 2014.
- [8] H. Meenink κ.ά., "Robot-assisted vitreoretinal surgery," Medical Robotics: Minimally Invasive Surgery, σελ. 185-209, 2012.
- [9] M. Nambi, P. S. Bernstein, και J. J. Abbott, "A Compact Telemanipulated Retinal-Surgery System that Uses Commercially Available Instruments with a Quick-Change Adapter," Journal of Medical Robotics Research, T. 1, τ. 2, 2016.
- [10] M.A. Nasser, "Hybrid Parallel-Serial Micromanipulator for Assisting Ophthalmic Surgery," Ph.D. dissertation, TUM, Munich, 2014.
- [11] A. Uneri κ.ά., "New Steady-Hand Eye Robot with Micro-Force Sensing for Vitreoretinal Surgery," Int. Conf. Biomedical Robotics and Biomechatronics, σελ. 814-819, 2010.
- [12] B. Mitchell κ.ά., "Development and Application of a New Steady-Hand Manipulator for Retinal Surgery," IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, σελ. 623-629, 2007.
- [13] R. H. Taylor, J. Fund, D. D. Grossman, J. P. Karidis, και D. A. LaRose, "Remote center-of-motion for surgery," US Patent 5,397,323, 14 Μαρτίου, 1995.
- [14] J. Denavit και R.S. Hartenberg, "A kinematic notation for lower pair mechanisms based on matrices," Trans. American Society of Mechanical Engineers (ASME). Journal of Applied Mechanics, T. 77, σελ. 215-221, 1995.
- [15] G. Budynas Richard και Nisbett J. Keith, Shigley's Mechanical Engineering Design, New York, United States of America: McGraw-Hill Education, 2015.
- [16] Α. Μαμπλέκος Αλεξίου, Γ. Α. Μπέρτος, και Ε. Παπαδόπουλος, "A Biomechatronic Extended Physiological Proprioception (EPP) Controller for Upper-Limb Prostheses," IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, σελ. 6173-6178, 2015.
- [17] M. A. Nasser κ.ά., "Kinematics and Dynamics Analysis of a Hybrid Parallel-Serial Micromanipulator Designed for Biomedical Applications," IEEE/ASME Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics, σελ. 293-299, 2013

Requirements Based Design and End-to-End Dynamic Modeling of a Robotic Tool for Vitreoretinal Surgery

Anestis Mablekos-Alexiou, Sebastien Ourselin, Lyndon da Cruz*, and Christos Bergeles*

Abstract—Despite several robots having been proposed for vitreoretinal surgery, there is limited information on their dynamic modeling. This gap leads to sub-optimal motor selection and hinders the application of advanced control schemes that would fulfill the goal of micro-precise surgery. This paper presents the design process and a dynamics study of a multi-Degree of Freedom (DoF) robotic system, which is inspired by established co-manipulation architectures. A rigorous kinematics and dynamics analysis of the robot's part that is responsible for manipulating the surgical tool during the retinal surgery phase is provided. In particular, the Euler-Lagrange equations of motion, which describe the dynamics of the 3-link surgical manipulator, are combined with novel analytical models of each link's corresponding transmission mechanism, including an anti-backlash lead screw assembly and a worm drive. The resulting models, transferable to existing manipulators, provide a meticulous analysis of the robot's performance that can be used both for mechanical design and control purposes.

I. INTRODUCTION

Vitreoretinal surgery and the precise subretinal delivery of upcoming sight-restoring therapeutics necessitate micrometer level precision. The required degree of accuracy, combined with the restricted limits of human ability [1-3], suggest that tailored robotic systems can improve intervention outcomes.

Within only a few decades from its initial introduction, vitreoretinal robotic surgery has evolved into a dynamic and rapidly growing research area. Initially proposed for assisting surgeons in challenging but common tasks that require high dexterity, such as epiretinal membrane peeling, [4], [5], vitreoretinal robots are now involved in new treatment methods offering capabilities that together with emerging stem cell [6] and gene therapies are expected to revolutionize retinal microsurgery and fulfill the goal of sight regeneration.

Nowadays, the breadth of proposed vitreoretinal surgical platforms is impressive and the technological contributions from roboticists have driven the field to a high level of maturity [7-12]. Despite the undeniable progress in terms of design and control strategies, however, the daunting

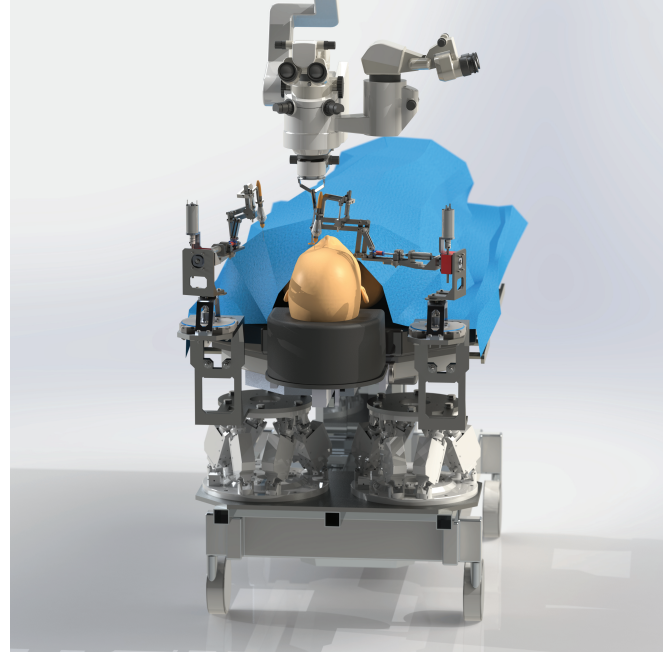


Fig. 1. Computer-Aided Design (CAD) model of the proposed robotic system installed in the surgical environment.

requirement of micrometer accuracy affects the whole design process and introduces several technical hurdles to be overcome. The control challenges that arise, in combination with the constraints that exist in the operating theater, so far hinder the clinical adoption of vitreoretinal robots, despite impressive first-in-human trials by [7], [8].

In this paper, we present a new design for a vitreoretinal surgery robot inspired by successful co-manipulation platforms [7], [11]. We consider the ergonomic and structural limitations in vitreoretinal surgery, and propose a coarse-to-fine surgical robot designed to minimize the disruption of the clinical workflow. We present a design process that is directed by the dynamics of the proposed manipulator. By combining the robot's equations of motion with novel mathematical models of its corresponding actuators, we obtain a detailed description of the robot's kinematics and dynamics. That description includes all the nonlinearities due to friction that arise from the use of transmission systems such as lead screws and worm gear drives, which are widely used in robotic microsurgery but rarely thoroughly investigated. The developed models can support the requirements-based selection of micro-actuators, allowing customized configurations that avoid off-the-shelf products that might affect the manipulator's precision and speed capabilities of the manipulator. Further, our approach

*Equal senior authorship.

This research was supported by the Michael Uren Foundation, Helena Charitable Trust, an ERC Starting Grant [714562], a UCL-Future Leaders Award, a Wellcome/EPSRC Centre of Excellence Award [203145Z/16/Z], and the EPSRC-funded UCL Centre for Doctoral Training in Medical Imaging [EP/L016478/1].

All authors are with the Wellcome/EPSRC Centre for Interventional and Surgical Sciences, UCL, London, UK. Anestis Mablekos-Alexiou and Lyndon da Cruz are additionally with UCL Institute of Ophthalmology and Moorfields Eye Hospital, London, UK. Sebastien Ourselin and Christos Bergeles are additionally with the Centre for Medical Image Computing, UCL, London, UK (corresponding author Anestis Mablekos-Alexiou, e-mail: anestis.mamplekos-alexiou.16@ucl.ac.uk or mamplekos@gmail.com).

supports the future introduction of accurate control strategies that include the system's dynamics.

The proposed robotic setup is illustrated in Fig. 1. The requirements driving its design are given in Sec. II, while Sec. III derives the dynamics of the 3-DoF end-effector. Section IV presents the models of the transmission mechanisms, while Sec. V describes the dynamics-informed selection of motors. The paper concludes in Sec. VI.

II. ROBOTIC SYSTEM DESIGN

Since successful clinical adoption requires minimal disruption to the ordinary clinical procedures, the developed robotic mechanism is designed to exploit the available free space in the operating room. Real surgery conditions and space arrangement of key components have been replicated using Computer-Aided Design (CAD) software, designing, from scratch, the operating table (Opmaster 506P from Lab-Med) and surgical microscope (Lumera 700 from Zeiss), see Fig. 1. This way, the robotic mechanism can be designed to fit in the available space. The system's mechanical design begins by analysing tool movement during conventional vitreoretinal surgery, and mapping the motions to the robot components responsible for their execution.

A. Introduction to Design Goals

Each operation can be divided into three tool-motion phases [12]: the approach phase (A-phase), the insertion phase (I-phase), and the retinal surgery phase (S-phase).

The A-phase corresponds to the stage where the surgeon brings the tool from a random initial position to the incision point on the eye surface. Usually, there are three incision points, fitted with trocars: one for the surgical tool, one for the endoillumination probe, and one for an infusion line to keep the intraocular pressure constant. A-phase motion corresponds to a typical translation in space, and, consequently, requires a robot with at least three DoF.

The I-phase includes the motion of the tool tip starting from the incision until the retinal surface, while the S-phase includes all motions of the tool into the eye chamber rotating about the entrance at the incision point. Concerning the I- and S-phase, three rotational DoF around a Remote Center of Motion (RCM) and one translational that passes through it are kinematically needed to achieve pivoting on the RCM and tool insertion/retraction.

A robotic system that fulfills the requirements of vitreoretinal surgery can be divided into two independent "sub-robots"; a coarse manipulator and a fine manipulator. The first, the A-Robot, is responsible for positioning the RCM during the A-phase. The second, termed S-Robot, is responsible for the S-phase execution (I-phase is a subset of it), and corresponds to the part that interacts with both surgeon and patient and requires the high-quality design.

B. Design of A-Robot

A mechanism that provides at least three translational DoF with a sufficient range of motion is suitable for the A-phase. In this work, an off-the-shelf 6-DoF hexapod-based assembly

TABLE I
A-ROBOT POSITIONING SPECIFICATIONS

Motion and Positioning Specifications	Units	Value
Travel range in XY	mm	60
Travel range in Z	mm	35
Rotation range about X, Y, Z	°	30
Repeatability in X, Y, Z	μm	0.5

(H-825 from Physik Instrumente), compact enough to fit under the surgical table, is selected for transferring the RCM to the desired incision point. Custom flanges are designed to connect the S-Robot with the hexapod and place it at a position next to the table's pillow, see Fig. 1. We include an additional rotating component that functions as the base for the S-Robot, adding an extra rotational DoF, see Fig. 2. This unconstrained rotation, provided by an off-the-shelf low profile stage (U-651 from PI), offers the option of moving the robot away from the working area at a position that does not cause disruption to the workflow when not used. Both manipulators are self-locking when switched off, and positioning accuracy is not affected by external disturbances; the energy dissipated by holding the tool during surgery is minimized. The A-Robot's positioning specifications are given in Table I.

C. Design of S-Robot

The S-Robot consists of a roll and a tilt mechanism whose axes of rotation intersect at a specific point in space providing a mechanical RCM, similar to [7], [11]. An insertion component is attached on the tip of the tilt mechanism and provides an additional translational DoF, responsible for driving the tool in and out of the eye chamber, passing through the RCM, see Fig. 3.

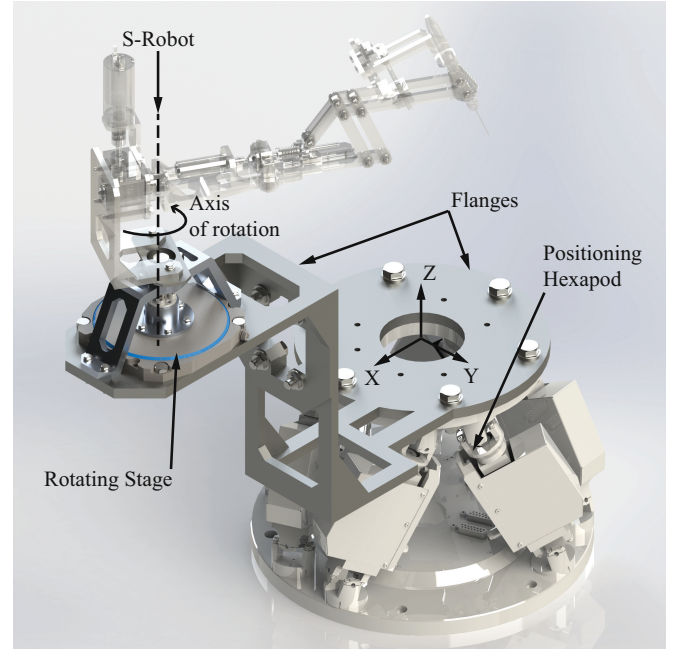


Fig. 2. Illustration of the A-Robot subassembly, consisting of a 6-DoF positioning hexapod and a low profile rotating stage.

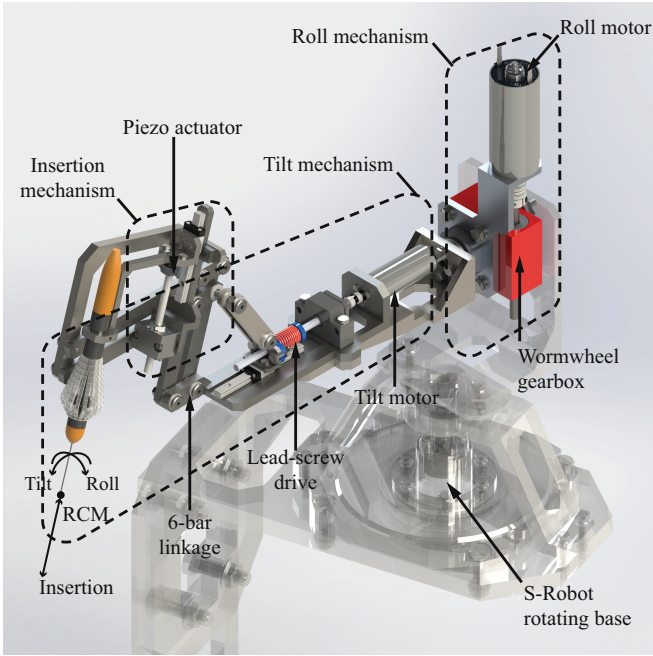


Fig. 3. Illustration of S-Robot subassembly, consisting of a roll, tilt, and an insertion component.

The insertion assembly employs an off-the-shelf piezo actuator (N-422 from PI), due to its accuracy and compactness. The actuator provides continuous motion with 35mm travel range, 30mm/s maximum velocity and a step size at around 300nm.

A wormwheel based configuration is designed to produce roll motion. The components that constitute this mechanism are a wormwheel gearbox (P20-120AR from Ondrives), a custom designed rotating shaft that transfers the power to all rotating components, and an actuating motor. The range of motion provided by the roll mechanism is 360°.

Concerning the tilt motion, a six-bar mechanism that provides a mechanical RCM is selected [13]. The six-bar linkage is actuated by a motorized lead screw drive (AFA016048RS from Helix). As the application requires extreme precision, an anti-backlash nut is chosen to eliminate the clearance caused by gaps between screw and nut. The provided range of tilt rotation about the RCM is around 60°.

The specifications of both roll and tilt motors are presented in Sec. V after estimation of the power that they must deliver.

III. S-ROBOT KINEMATICS & DYNAMICS

The part of the robot that actively interacts with the patient and merits of deeper analysis is the S-Robot. Considering that the A-Robot is used for pre-positioning the RCM at the desired point, the two subassemblies can be studied separately as they are dynamically uncoupled.

A. Forward Kinematics

In this section forward kinematics of the S-Robot manipulator are briefly developed, primarily to aid next subsection's dynamic modeling. For the derivation of the robot's homogeneous transformation matrices, the Denavit-Hartenberg (DH) convention is used.

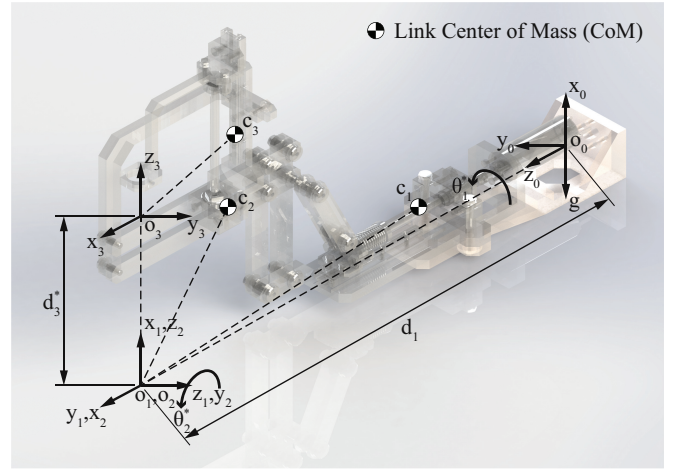


Fig. 4. Denavit-Hartenberg frame assignment for the 3-link S-Robot.

TABLE II
DH PARAMETERS OF THE S-ROBOT

Robot Link	DH Parameters			
	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	$\pi/2$	$d_1=0.28\text{m}$	θ_1^*
2	0	$\pi/2$	0	$\theta_2^* + \pi/2$
3	0	0	d_3^*	0

The coordinate frame assignment in space is illustrated in Fig. 4, where $o_0x_0y_0z_0$ is the selected inertial base frame, and is chosen to be placed on the roll axis of rotation at the point of connection with the corresponding transmission system. Once the base frame is established, the $o_1x_1y_1z_1$ frame is fixed at the mechanical RCM point at a distance d_1 from o_0 , and is rotated about the z_0 -axis. This angle of rotation is a joint variable and is denoted by θ_1 . Subsequently, the $o_2x_2y_2z_2$ frame is also fixed at the RCM and can rotate about the z_1 -axis at a variable tilt angle, which is denoted by θ_2 . The last frame $o_3x_3y_3z_3$ is placed at the point of the tool tip whose position is controlled. The origin o_3 is allowed translation at a variable distance d_3 along the z_2 -axis. Finally, each vector $c_i = [c_{xi} \ c_{yi} \ c_{zi}]^T$ denotes the position of the Center of Mass (CoM) of the i -th link expressed at the corresponding origin o_i . Consequently, based on the described frame assignment, the resulting DH parameters $\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i$ are written in Table II.

The forward kinematics equations are obtained using the four quantities of the DH convention given in Table II and substituting them into the homogeneous transformation matrices A_i for each link given by [14].

Subsequently, using the time derivatives of the resulting rotation matrices $R \in SO(3)$ and the assigned coordinate frame, three manipulator Jacobians are derived. The derived expressions of the above functions for this particular manipulator are straightforward and are omitted for brevity.

B. Dynamics

The Euler-Lagrange equations of motion (EoM) are used to describe the dynamic behavior of the S-Robot. For the derivation of the manipulator's dynamic equations, its joint

variables are chosen as generalized coordinates. Therefore, $q = [q_1 \ q_2 \ q_3]^T$, where $q_1 = \theta_1$, $q_2 = \theta_2$, $q_3 = d_3$. The EoM for the k -th link can be written as

$$\sum_{j=1}^3 d_{kj}(q) \ddot{q}_j + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 c_{ijk}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j + g_k = \tau_k \quad (1)$$

where d_{kj} is the $(k, j)^{th}$ element of an inertia type matrix $D(q)$, c_{ijk} are the Christoffel symbols, g_k represents the effect of gravitational forces, and τ_k includes all the non-conservative torques applied on the link.

IV. MODELING OF TRANSMISSION MECHANISMS

The equations given by (1) describe the dynamic behavior of robot's links assuming that they freely rotate or translate along their corresponding axes. In most applications, however, between each actuator-link pair, a transmission system is responsible for transferring appropriately the mechanical power. In a vitreoretinal surgical robot, where precision requirements are extremely high, detailed modeling of the transmission systems is important in terms of both achieving satisfactory control, and accurate power estimation for design purposes, since the intense friction phenomena affect both of these factors. In this particular study, the designed roll and tilt actuators include a wormwheel mechanism and an anti-backlash lead screw drive, which are both widely used in robotic positioning applications. These transmission models have not so far been included in the context of the dynamics of micro-precise robots, and are developed from scratch.

A. Wormwheel Gearbox

Power transmission for the roll mechanism is implemented with a wormwheel gearbox. The actuating motor is connected to the worm-shaft and transmits power to all rotating components of the assembly attached on the gear. Therefore, this system consists of two rigid bodies, which are kinematically coupled, and consequently one EoM fully describes its dynamics.

The dynamic equations of each of the two components are analyzed sequentially. First, the worm-shaft EoM, which is directly connected to the motor, may be written as

$$J_w \ddot{\theta}_w = \tau_w + \tau'_w \quad (2)$$

where θ_w is the worm angle, J_w the worm-shaft inertia, τ_w the torque generated by the actuating motor, and τ'_w the torque on the shaft due to the interaction with the gear.

Concerning the rotating gear, which is directly connected with the link-1 of the manipulator, its dynamics are given by (1) for $k = 1$. To relate this expression with the worm-shaft dynamics, (1) is reformulated as

$$d_{11}(q) \ddot{q}_1 = \tau'_1 + \tau'_g - \sum_{j=2}^3 d_{1j}(q) \ddot{q}_j - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 c_{ij1}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j - g_1 \quad (3)$$

where the inertial term $d_{11}(q) \ddot{q}_1$ that contains the gear's acceleration is separated from the remaining equation, τ'_1

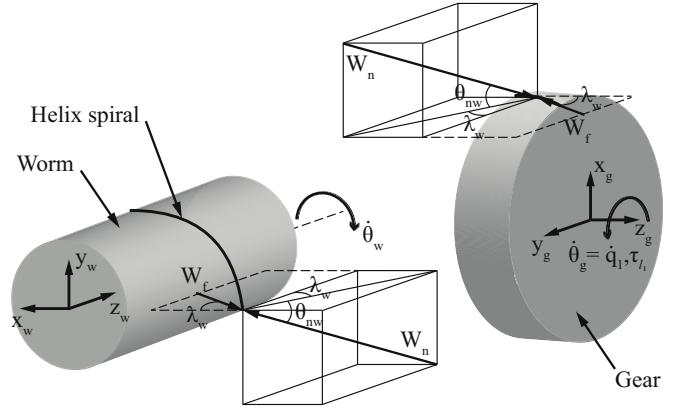


Fig. 5. Free body diagrams of the worm gear transmission system for positive gear angular velocity and external torque.

denotes the sum of non-conservative torques excluding the τ'_g torque which is generated due to the interaction with the worm-shaft. Equation (3), then, can be written as

$$d_{11}(q) \ddot{q}_1 = \tau_{l_1} + \tau'_g \quad (4)$$

where

$$\tau_{l_1} = \tau'_1 - \sum_{j=2}^3 d_{1j}(q) \ddot{q}_j - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 c_{ij1}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j - g_1. \quad (5)$$

We then combine (2) and (4) to identify the relation of torques τ'_w , τ'_g . For that purpose, the free body diagrams of the worm and gear are depicted in Fig. 5. It is noted that these forces' analysis is valid when both the gears velocity $\dot{q}_1$ and external torque τ_{l_1} are positive based on the body-attached coordinate frames and for the selected right-hand worm helix. In Fig. 5, λ_w denotes the worm's lead angle, θ_{nw} the spiral's pressure angle, d_w the worm's diameter, d_g the gear's diameter, W_f the frictional forces between the sliding surfaces and W_n the normal to pitch helix forces, as defined by the theory of machine elements [15]. Identifying the forces that generate torques at the direction of motion, the expressions for the torques τ'_g and τ'_w are

$$\tau'_g = \frac{d_g}{2} (W_n \cos \theta_{nw} \cos \lambda_w + W_f \sin \lambda_w) \quad (6)$$

$$\tau'_w = \frac{d_w}{2} (W_f \cos \lambda_w - W_n \cos \theta_{nw} \sin \lambda_w). \quad (7)$$

Assuming that the coefficient of friction is constant across the length of the spiral then

$$W_f = \mu W_n. \quad (8)$$

Substituting (8) into (6), (7), and eliminating the internal forces W_n by combining (2) and (4), the following dynamics expression is obtained

$$J_w \ddot{\theta}_w + \xi_{w1} \frac{d_w}{d_g} \ddot{q}_1 = \tau_w + \xi_{w1} \frac{d_w}{d_g} \tau_{l_1} \quad (9)$$

where

$$\xi_{w1} = \frac{\cos \theta_{nw} \sin \lambda_w - \mu \cos \lambda_w}{\cos \theta_{nw} \cos \lambda_w + \mu \sin \lambda_w} \quad (10)$$

is a function of both worm-shaft geometry as well as coefficient of friction μ and can be positive or negative

determining the backdrivability of the transmission system. It is noted that any model of friction might be used for describing the solid-to-solid contact of sliding surfaces by using the corresponding coefficient model.

The kinematic equation that relates worm and gear angular positions is positive for the selected coordinate frames and is calculated by

$$\theta_w = q_1 n_w \quad (11)$$

where n_w is the transmission's reduction ratio.

Substituting (11) into (9) the dynamics equation of the manipulator as seen by the roll motor side is

$$(J_w + \xi_{w1} \frac{1}{n_w} \frac{d_w}{d_g} d_{11}) \ddot{\theta}_w = \tau_w + \xi_{w1} \frac{d_w}{d_g} \tau_{l1}. \quad (12)$$

As mentioned, the above expression occurs when the external gear torque τ_w and worm-gear velocities $\dot{\theta}_w$, $\dot{q}_1$ are positive. As revealed by (12), for negative ξ_{w1} , the external torque decelerates the system, although it is acting on the direction of velocity. In that case the transmission is non-backdrivable and any external torque applied on the rotating component increases the system's friction.

Performing the same analysis for all the possible torque-velocity direction combinations as well as for the case of a left-hand worm helix, and generalizing the analysis for the k -th link of a manipulator, it turns out that the only information needed to fully define link's EoM, when driven by a worm gear, is the sign of the product of link's velocity $\dot{q}_k$ multiplied by the total external load τ_{l_k} applied on it. For simplification of the final dynamics expression, we define

$$J_{w1,2} = \xi_{w1,2} \frac{1}{n_w} \frac{d_w}{d_g} d_{kk} \quad (13)$$

$$C_{w1,2} = \xi_{w1,2} \frac{d_w}{d_g} d_{kk} \quad (14)$$

where d_{kk} represents the moment of inertia at joint- k axis, when the other joints are blocked, as revealed by (1). Furthermore, ξ_{w1} is given by (10) and ξ_{w2} is

$$\xi_{w2} = \frac{\cos \theta_{nw} \sin \lambda_w + \mu \cos \lambda_w}{\cos \theta_{nw} \cos \lambda_w - \mu \sin \lambda_w}. \quad (15)$$

Therefore, the EoM of a robot's k -th link that is driven by a wormwheel transmission, as seen by the actuating motor, may be written as follows

$$(J_w + J) \ddot{\theta}_w = \tau_w + C \tau_{l_k} \quad (16)$$

where

- If $\tau_{l_k} \dot{q}_k > 0$: $J = J_{w1}$ and $C = C_{w1}$
- If $\tau_{l_k} \dot{q}_k < 0$: $J = J_{w2}$ and $C = C_{w2}$
- If $\tau_{l_k} = 0$: $J = J_{w2}$ and $C = C_{w2}$

It is noted that τ_{l_k} is calculated by reformulating (5) for the case of the k -th link of an n -link manipulator. Equation (16) is a generalization of the equations derived from the analysis of all rotation cases, and can be used for any coordinate system, or any direction of external loads. The only information needed is the geometrical characteristics of the worm gear assembly, as well as the friction coefficient between the sliding surfaces.

B. Anti-backlash Lead Screw Assembly

The tilt mechanism consists of an actuating motor, an anti-backlash lead screw drive, and a 6-bar linkage. The Euler-Lagrange EoM of this particular link of the robot is given from (1) for $k = 2$. Reformulating the resulting expression as with the case of the roll component, the dynamics may be written as

$$d_{22}(q) \ddot{q}_2 = \tau_{l_2} + \tau'_n \quad (17)$$

where τ'_n denotes the torque produced by the pushing nut of the lead screw, and τ_{l_2} includes the remaining non-conservative torques as well as the centrifugal and Coriolis terms, and is given by (5) for $k = 2$. In order to relate the above dynamic expression with the nut of the lead screw, which moves linearly, a velocity relationship between the link's rotation and nut's translation is required. In this particular case, that relation is obtained by analyzing the 6-bar linkage, which can be kinematically considered as a standard crank mechanism.

Substituting the crank's kinematics into (17) yields the linear motion equation of the following form

$$m_{22}(q) \ddot{x}_2 = F_{l_2} + F'_n. \quad (18)$$

Equation (18), therefore, describes the dynamics of the link as seen by the linearly moving part of it, which corresponds to the nut. An anti-backlash nut, however, consists of two distinct parts attached on a preloading spring which pushes both of them towards the thread of the lead screw eliminating backlash. Assuming that the masses of the nut parts are m_1 and m_2 , respectively, and establishing the convention that the link is connected with the m_2 -part, then the dynamic model of the body, which consists of the corresponding robot link and the m_2 -part of the nut, is described by (18).

The expressions for the remaining components of the lead screw are derived from the corresponding free body diagrams. For this type of transmission, the forces' analysis is derived by extending a screw spiral with its nut along a surface [16]. The resulting schematic representation is illustrated in Fig. 6. The positive directions for nut and screw velocities $\dot{x}_2$, and $\dot{\theta}_s$, respectively, are indicated. The screw inertia is denoted by J_s , the screw diameter by d_s , the lead-angle by λ_s , the spiral pressure angle by θ_{ns} , and the lead pitch by p .

Using the conventions described above, there are two cases of motion based on the direction of nut's velocity $\dot{x}_2$, which can be either positive (towards the direction of m_2 -part) or negative (towards the direction of m_1 -part). The forces' analysis for positive $\dot{x}_2$ is depicted in Fig. 6, where F_{fs1} and F_{fs2} denote the frictional forces between the sliding surfaces of screw and nut, F_{fn} the frictional force between the moving nut and the linear guide, $N_1 \cos \theta_{ns}$ and $N_2 \cos \theta_{ns}$ the normal to the pitch helix forces, P the preloading spring force, and τ_s the motor torque.

It is noted that the illustrated forces' analysis is valid only when the external F_{l_2} load does not compress the

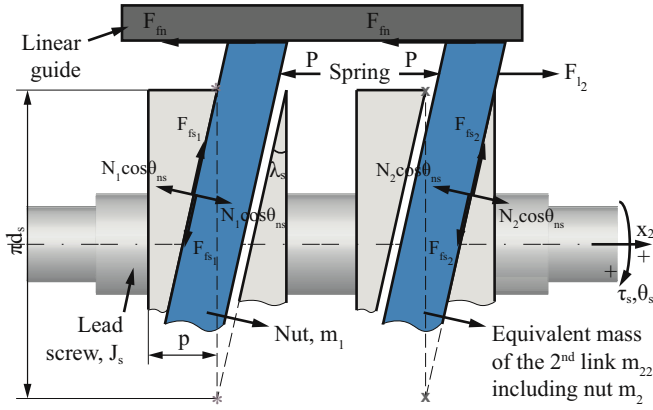


Fig. 6. Surface extended screw spiral and anti-backlash nut.

spring. This can be ensured by estimating its extreme values for a specific application and selecting a sufficiently stiff preloading spring.

In this case, the kinematic relation between screw and both parts of the nut is

$$x_2 = \tan \lambda_s \frac{d_s}{2} \theta_s. \quad (19)$$

Following the same procedure as with the case of the wormwheel drive, namely eliminating the internal forces N_1 and N_2 , the final dynamics equation is obtained, and can be generalized for the random linearly moving k -th link of a robot, with equivalent mass m_{kk} and driven by an anti-backlash lead screw transmission. Defining the following coefficients

$$J_{s1,2} = \frac{d_s^2}{4} \tan \lambda_s (\psi_2 m_{1,kk} + \psi_1 m_{kk,1}) \quad (20)$$

$$C_{s1,2} = \frac{d_s}{2} \psi_{1,2} \quad (21)$$

where

$$\psi_{1,2} = \frac{\cos \theta_{ns} \sin \lambda_s \mp \mu \cos \lambda_s}{\cos \theta_{ns} \cos \lambda_s \pm \mu \sin \lambda_s} \quad (22)$$

the EoM of the k -link driven by an anti-backlash lead screw drive, as seen by the actuating motor's output shaft, may be written as follows

$$(J_s + J) \ddot{\theta}_s = \tau_s - \tau_f + C F_{l_k} \quad (23)$$

where

$$\tau_f = \frac{d_s}{2} [P(\psi_2 - \psi_1) + F_{fn}(\psi_2 + \psi_1)] \operatorname{sgn} \dot{\theta}_s \quad (24)$$

and

- If $\dot{x}_k$ is in the direction of m_2 : $J = J_{s1}$ and $C = C_{s1}$
- If $\dot{x}_k$ is in the direction of m_1 : $J = J_{s2}$ and $C = C_{s2}$

The above expression can be used for any an anti-backlash lead screw drive, where the EoM of the link that is attached on the m_2 -part of the nut is of the form given by (18).

V. POWER CONSIDERATIONS AND MOTORIZATION

The end-to-end dynamic modeling of the robotic manipulator provides the ability of accurate estimation of power demands based on given performance specifications.

We set up the requirements as a motion response that contains the maximum angular and linear velocities that the robot must achieve, as simulated in Fig. 7 for a time interval of 15s. We are mainly focusing on the roll and tilt components that we plan to motorize simulating extreme for the application velocity responses. The simulated interval shown in Fig. 7 depicts the velocity response of the two rotational components, containing an impulse-like phase (0 – 2.5s) and a sinusoidal one (2.5 – 15s) of three different frequencies; namely 2Hz, 1Hz, and 0.5Hz. The maximum values of acceleration $\ddot{q}_{1,2}$, and velocity $\dot{q}_{1,2}$ are at around $200^\circ/s^2$ and $65^\circ/s$, respectively. Both maximum values as well as sinusoidal frequencies are retrieved from literature [1], [17]. Although, a motorization procedure is not required for the insertion component as its actuation is already selected, its motion affects the dynamics of the system as revealed by (1). Therefore, a motion with the maximum velocity that the actuator produces is simulated at the same time interval, see Fig. 7.

After expressing the requirements for the S-Robot and using the corresponding kinematic relations, the motion that each motor-shaft must follow is obtained. Subsequently, using (16) and (24), depending on the transmission type, and solving for τ_w and τ_s , respectively, the amount of each motor torque needed to produce the simulated motion is obtained, together with a power consumption estimation.

For the motorization procedure, it is useful to obtain an expression of the required motor torque with respect to the corresponding velocity. The reason is that each motor's function is affected by its operating range which determines the limits of its continuous operation in terms of the output torque and velocity. Based on the motion requirements given in Fig. 7 and the transmission models that have been developed in this paper, the resulting torque-velocity ($\tau - \omega$) curves for both roll and tilt motors are presented in Fig. 8, using the parameters in Table III, IV.

For the motor selection, it is important to highlight that in this particular application the use of a gearbox at the motors' output is avoided due to the backlash that it introduces. Therefore, the torque load, calculated for each motor in Fig. 8, has to be directly in its operating range. Consequently, the most critical point to identify from the simulation results is the maximum absolute values of torque that appear in the resulting ($\tau - \omega$) curves. In particular, the maximum values are slightly less than $10mNm$ for both links. Thus, a motor with nominal torque at $10mNm$ or higher is considered suitable. Our design is finalized by selecting the DCX-16L DC Motor from Maxon Motor AG with nominal torque at $12mNm$, for both roll and tilt links.

It is noted that the Static-plus-Kinetic friction model has been used with $\mu_{st} = 0.15$, and $\mu_{kin} = 0.11$ the static and kinetic friction coefficients, respectively.

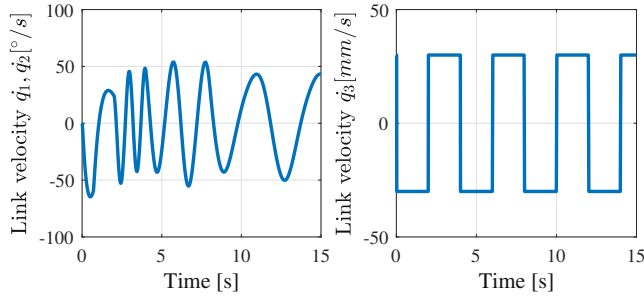


Fig. 7. S-Robot velocity specifications: Velocity response of rotational links 1-2 (left), Velocity response of translational link (right).

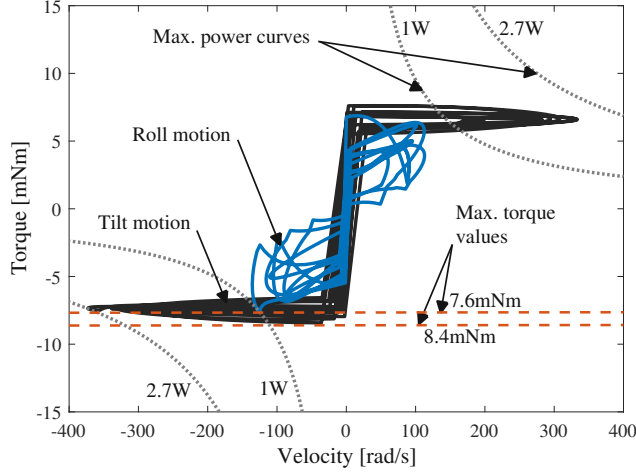


Fig. 8. Torque-velocity load curves: Roll motion (blue), Tilt motion (black).

Through the presented dynamics directed design process, the optimal robot for the required motion models can be selected, keeping the dimensions of the system optimal and its behavior within the range of what retinal surgery requires.

VI. CONCLUSION

This paper presented our design considerations for a micro-precise robot for vitreoretinal surgery, with the ultimate goal of subretinal therapeutics delivery. Our primary contribution is the end-to-end development of the manipulator's dynamics equations, and the demonstration of a design process that uses the said equations to motorize the system. Our future work entails synthesis of a model-based controller, and engineering of the S-Robot for experimentation.

REFERENCES

- [1] L. F. Hotraphinyo and C. N. Riviere, "Three-dimensional accuracy assessment of eye surgeons," *IEEE Int. Conf. Engineering in Medicine and Biology Soc.*, vol. 4., pp. 3458-3461, 2001.
- [2] A. D. Jagtap and C. N. Riviere, "Applied Force during Vitreoretinal Microsurgery with Handheld Instruments," *IEEE Int. Conf. Engineering in Medicine and Biology Soc.*, pp. 2771-2773, 2004.
- [3] S. P. N. Singh and C. N. Riviere, "Physiological Tremor Amplitude during Retinal Microsurgery," *IEEE Northeast Bioengineering Conference*, Philadelphia, pp. 171-172, 2002.
- [4] C. N. Riviere, W. T. Ang, and P. K. Khosla, "Toward active tremor canceling in handheld microsurgical instruments," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 19, no. 5, pp. 793-800, 2003.
- [5] R. Taylor et al., "A Steady-Hand Robotic System for Microsurgical Augmentation," *Int. Journal of Robotics Research*, vol. 18, no. 12, pp. 1201-1210, 1999.

TABLE III
TRANSMISSION PARAMETERS

Parameters [SI]		Transmission Type	
Name	Symbol	Worm drive	Lead screw
Lead angle	λ	$1.34\pi/180$	$7.8\pi/180$
Pressure angle	θ_n	$30\pi/180$	$30\pi/180$
Inertia	J	$4.5e-7$	$5e-7$
Nut mass	m_1	—	0.02
	m_2	—	0.02
Diameter	d_w	$11e-3$	—
	d_g	$31e-3$	—
	d_s	—	$3.175e-3$
Reduction ratio	n_w	120 : 1	—

TABLE IV
S-ROBOT PARAMETERS

Robot Link	Parameters [SI]					
	Mass	Inertial Tensor			Center of Mass	
Link 1	0.568	10^{-3}	1.34	0.12	0.00	0.002
			0.12	0.12	0.00	-0.196
			0.00	0.00	1.36	0.00
Link 2	0.166	10^{-3}	0.19	0.00	0.11	-0.055
			0.00	0.43	0.00	-0.015
			0.11	0.00	0.25	0.069
Link 3	0.145	10^{-3}	0.10	0.00	0.00	0.00
			0.00	0.15	0.00	0.00
			0.00	0.00	0.06	0.106

- [6] C. M. Ramsden, M. B. Pownner, A. J. Carr, M. J. Smart, L. da Cruz, and P. J. Coffey (2013). Stem cells in retinal regeneration: past, present and future. Development (Cambridge, England), 140(12), 257685.
- [7] A. Gijbels, E. B. Vander Poorten, P. Stalmans, H. Van Brussel, and D. Reynaerts, "Design of a Teleoperated Robotic System for Retinal Surgery," *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 2357-2363, 2014.
- [8] H. Meenink et al., "Robot-assisted vitreoretinal surgery," *Medical Robotics: Minimally Invasive Surgery*, pp. 185-209, 2012.
- [9] M. Nambi, P. S. Bernstein, and J. J. Abbott, "A Compact Telemanipulated Retinal-Surgery System that Uses Commercially Available Instruments with a Quick-Change Adapter," *Journal of Medical Robotics Research*, vol. 1, no. 2, 2016.
- [10] M.A. Nasser, "Hybrid Parallel-Serial Micromanipulator for Assisting Ophthalmic Surgery," Ph.D. dissertation, TUM, Munich, 2014.
- [11] A. Uneri et al., "New Steady-Hand Eye Robot with Micro-Force Sensing for Vitreoretinal Surgery," *Int. Conf. Biomedical Robotics and Biomechatronics*, pp. 814-819, 2010.
- [12] B. Mitchell et al., "Development and Application of a New Steady-Hand Manipulator for Retinal Surgery," *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 623-629, 2007.
- [13] R. H. Taylor, J. Fund, D. D. Grossman, J. P. Karidis, and D. A. LaRose, "Remote center-of-motion for surgery," US Patent 5,397,323, March 14, 1995.
- [14] J. Denavit and R.S. Hartenberg, "A kinematic notation for lower pair mechanisms based on matrices," *Trans. American Society of Mechanical Engineers (ASME). Journal of Applied Mechanics*, vol. 77, pp. 215-221, 1995.
- [15] G. Budynas Richard and Nisbett J. Keith, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, New York, United States of America: McGraw-Hill Education, 2015.
- [16] A. Mablekos-Alexiou, G. A. Bertos, and E. Papadopoulos, "A Biomechatronic Extended Physiological Proprioception (EPP) Controller for Upper-Limb Prostheses," *IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, pp. 6173-6178, 2015.
- [17] M. A. Nasser et al., "Kinematics and Dynamics Analysis of a Hybrid Parallel-Serial Micromanipulator Designed for Biomedical Applications," *IEEE/ASME Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 293-299, 2013.

Σχολιασμός

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το «Requirements Based Design and End-to-End Dynamic Modeling of a Robotic Tool for Vitreoretinal Surgery» [4] είναι ένα επιστημονικό άρθρο συνεδρίου (paper) που συνέθεσε ο Ανέστης Μαμπλέκος – Αλεξίου στις αρχές του 2018 και αφού εγκρίθηκε, παρουσιάστηκε, τον Μάιο του 2018, στο IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), που έλαβε χώρα στο Μπρίσμπεϊν της Αυστραλίας. Το Διεθνές Συνέδριο Ρομποτικής και Αυτοματισμού (ICRA) είναι το εμβληματικό συνέδριο της IEEE Robotics and Automation Society και το κορυφαίο διεθνές φόρουμ για ερευνητές ρομποτικής που έχουν σκοπό να παρουσιάσουν και να συζητήσουν το έργο τους. Ιδρύθηκε το 1984 και διοργανώνεται κάθε χρόνο, ενώ στο συνέδριο συμμετέχουν ειδικοί στον τομέα της ρομποτικής και αυτοματισμού για τεχνικές επικοινωνίες μέσω παρουσιάσεων και συζητήσεων. Το συνέδριο δημιουργεί ένα αξιοσημείωτο περιβάλλον, ώστε να εντυπώσουν όλοι όσοι βρίσκονται εκεί στον τομέα της επιστήμης και της τεχνολογίας, στη ρομποτική και στον αυτοματισμό.

Προχωρώντας τώρα στην ανάλυση του πρωτοτύπου κειμένου, βάσει ενός υπάρχοντος πρότυπου μοντέλου, όπως υποστηρίζει η Christiane Nord (1997) [7], ο μεταφραστής καλείται να αναγνωρίσει τόσο του εξωκειμενικούς όσο και τους εσωκειμενικούς παράγοντες του πρωτοτύπου και του μεταφράσματος, ώστε να μπορέσει να διατηρήσει την μεταξύ τους ισοδυναμία. Το 1964, ο Eugene A. Nida [5], προχώρησε στο διαχωρισμό της ισοδυναμίας σε δύο κατηγορίες: την μορφική και τη δυναμική. Η πρώτη αναφέρεται στην πιστή αναπαραγωγή των μορφικών στοιχείων του πρωτοτύπου και η δεύτερη δηλώνει την ισοδυναμία του εξωγλωσσικού επικοινωνιακού αποτελέσματος. Εκτός του Nida, πολλοί ακόμα ασχολήθηκαν με την ισοδυναμία μεταξύ του πρωτοτύπου και του μεταφράσματος. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι Catford, Wills, Taber:

«Η μετάφραση μπορεί να οριστεί ως εξής: η αντικατάσταση του κειμενικού υλικού μιας γλώσσας (ΓΠ) με ισοδύναμο υλικό σε μια άλλη γλώσσα (ΓΣ).» (Catford 1965:20) [2]

«Η μετάφραση οδηγεί από ένα κείμενο της γλώσσας- πηγή σε ένα κείμενο της γλώσσας- στόχου, το οποίο αποτελεί το πλησιέστερο δυνατό ισοδύναμο και προϋποθέτει την κατανόηση του περιεχομένου και του ύφους του πρωτοτύπου κειμένου». (Wills 1977:70) [10]

«Η μετάφραση αποτελεί την αναπαραγωγή στη γλώσσα- στόχο του εγγυτέρου φυσικού ισοδύναμου του μηνύματος της γλώσσας- πηγή.» (Nida και Taber 1969:12) [6]

Επιστρέφοντας όμως στο πρότυπο της Nord, θα πρέπει να αναζητήσουμε τον πομπό του πρωτοτύπου. Ο πομπός, ή ακόμα καλύτερα, ο δημιουργός του κειμένου- πηγή είναι οι συγγραφείς του paper, Ανέστης Μαμπλέκος Αλεξίου, Sebastien Ourselin, Lyndon da Cruz, και Χρήστος Μπεργελές. Οι τέσσερις αυτοί, και κυρίως ο εμπνευστής και τελικός δημιουργός, Ανέστης Μαμπλέκος – Αλεξίου, συνέγραψαν το συγκεκριμένο paper ρομποτικής με σκοπό να ενημερώσουν την επιστημονική κοινότητα για τον σχεδιασμό και τη δυναμική μοντελοποίηση ενός ρομποτικού εργαλείου για την χειρουργική επέμβαση υαλοειδούς-αμφιβληστροειδούς. Το πρωτότυπο κείμενο έχει σκοπό να ενημερώσει την κοινότητα για μια νέα καινοτομία. Οπότε, ανατρέχοντας στη διάκριση που κάνει η μεταφράστρια-γλωσσολόγος Katharina Reiß (1977:97-100) [8], το πρωτότυπο κείμενο ανήκει στην κατηγορία των πληροφοριακών, αφού έχει ως κυρίαρχη επικοινωνιακή λειτουργία την πληροφοριακή. Αποσκοπεί, δηλαδή, στην πληροφόρηση του αναγνωστικού κοινού για τη μοντελοποίηση ενός νέου ρομποτικού εργαλείου. Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται με τη χρήση αντίστοιχων γλωσσικών και υφολογικών στοιχείων. Η λεπτομερής επεξήγηση των απαιτήσεων που οδηγούν στο σχεδιασμό του εργαλείου, κάνει το κείμενο πιο ελκυστικό και παράλληλα πιο κατανοητό σε όσους ασχολούνται με τον κλάδο της ρομποτικής. Ο λεπτομερής αυτός χαρακτήρας δε θα μπορούσε να λείπει σαφώς και από το μετάφρασμα. Επομένως,

γίνεται λόγος για ομοιολεειτουργική μετάφραση, όπου συνήθως οι δέκτες δεν αντιλαμβάνονται ότι διαβάζουν μια μετάφραση, και όχι ένα πρωτότυπο κείμενο.

Περνώντας τώρα στην πραγματολογία του δέκτη, θα πρέπει να αναλύσουμε το που απευθύνεται τόσο το πρωτότυπο κείμενο όσο και το μετάφρασμα. Στην πρώτη περίπτωση, πέρα από την επιτροπή έγκρισης του paper, δέκτης είναι ο καθένας που ασχολείται με τη ρομποτική και κυρίως όσοι έχουν θέση στα χειρουργεία που γίνεται χρήση ρομπότ για επεμβάσεις στην περιοχή του οφθαλμού. Το κείμενο σαφώς θα μπορούσε να το διαβάσει και να το κατανοήσει, εν μέρει, κάποιος που ασχολείται γενικά με τη μηχανολογία, αλλά σίγουρα θα δυσκολευόταν με ορισμένες ορολογίες. Χωρίς αμφιβολία είναι ένα κείμενο που σε καμία περίπτωση δε μπορεί να γίνει κατανοητό από απλούς αναγνώστες, τόσο λόγω του λεξιλογίου όσο και της δομής του κειμένου. Θα αναφερθούμε όμως παρακάτω λεπτομερώς σε θέματα που αφορούν την ορολογία και το λεξιλόγιο και γενικότερα τους εσωκειμενικούς παράγοντες του κειμένου. Όσον αφορά τώρα τον δέκτη του μεταφράσματος, πρόκειται, όπως και πριν, για όσους ασχολούνται με τον κλάδο της ρομποτικής, καθώς επίσης και τους γιατρούς που ειδικεύονται στις επεμβάσεις στην περιοχή του οφθαλμού, με τη χρήση ρομπότ.

Σε αυτή την ενότητα θα μιλήσουμε για το λεξιλόγιο του κειμένου. Σε τέτοια επιστημονικά κείμενα, η χρήση ορολογίας είναι από τα πιο συχνά φαινόμενα. Το λεξιλόγιο είναι περίπλοκο και έχει αρκετές ιδιομορφίες, καθώς δεν απευθύνεται σε απλούς ανθρώπους. Η δυσκολία εύρεσης - και ορισμένες φορές η ανυπαρξία - αντιστοιχιών στα ελληνικά, μας οδήγησε στην παράφραση τόσο μεμονωμένων όρων όσο και ολόκληρων προτάσεων (π.χ. anti-backlash, the normal to pitch helix forces). Με λίγα λόγια, η μετάφραση αρχικά ήταν αρκετά δύσκολη καθώς η ορολογία είτε μεταφραζόταν λάθος από τις μηχανές αναζήτησης είτε δεν αποδιδόταν σωστά. Στη συνέχεια όμως που η ίδια ορολογία επαναλαμβάνονταν, η μετάφραση κυλούσε πιο ομαλά.

Οι μεταφραστικές οδηγίες προσδιορίζουν τις συνθήκες υπό τις οποίες το κείμενο αφίξεως θα πληροί τις συγκεκριμένες του λειτουργίες. Στις οδηγίες αυτές περιλαμβάνονται η επιδιωκόμενη κειμενική λειτουργία, ο παραλήπτης, ο αναμενόμενος χρόνος αλλά και χώρος πρόσληψης του κειμένου, το μέσο μετάδοσής του και το κίνητρο για τη δημιουργία του. Σύμφωνα με το εργαλειακό μοντέλο του Karl Bühler (1934) [1], υπάρχουν τέσσερις βασικές λειτουργίες της γλώσσας: η αναφορική, η εκφραστική, η κλητική και η φατική. Όσον αφορά το δικό μας κείμενο, επιδιώκεται η αναφορική κειμενική λειτουργία και πιο συγκεκριμένα η πληροφοριακή, καθώς ο συγγραφέας έχει σκοπό να ενημερώσει την επιστημονική κοινότητα της ρομποτικής για μια νέα ανακάλυψη, ένα νέο προϊόν, αυτό το ρομποτικό εργαλείο που θα διευκολύνει τις επεμβάσεις υαλοειδούς-αμφιβληστροειδούς. Ο αναμενόμενος χώρος πρόσληψης του μεταφράσματος είναι σαφώς ο ελληνικός επιστημονικός χώρος της ρομποτικής και ο χρόνος είναι η παρούσα στιγμή. Το μέσο μετάδοσης του μεταφράσματος, όπως και στο πρωτότυπο, αποτελεί ένα επιστημονικό άρθρο συνεδρίου (paper). Τέλος, το κίνητρο που οδήγησε στη δημιουργία του paper είναι, όπως προαναφέραμε, η ενημέρωση της επιστημονικής κοινότητας της ρομποτικής για ένα νέο εργαλείο κατά τη διάρκεια της χειρουργικής επέμβασης στην περιοχή του οφθαλμού.

Οι προαναφερόμενοι παράγοντες φέρνουν τον μεταφραστή αντιμέτωπο με διάφορα μεταφραστικά προβλήματα. Σύμφωνα με τη Nord (1977) υπάρχουν τέσσερις κατηγορίες προβλημάτων, ανάλογα και με ποιόν τομέα καλύπτουν:

- **Πραγματολογικά μεταφραστικά προβλήματα**: προκύπτουν από τις διαφορές στις περιστάσεις και αναγνωρίζονται συγκρίνοντας τους εξωκειμενικούς παράγοντες (πομπός, δέκτης, κ.λπ.),
- **Πολιτισμικά μεταφραστικά προβλήματα**: απορρέουν από τις διαφορές που έχει ο πολιτισμός της γλώσσας- πηγή από αυτόν της γλώσσας- στόχος,

- **Γλωσσικά μεταφραστικά προβλήματα:** παρατηρούνται σε ορισμένα ζεύγη γλωσσών και σε συγκεκριμένες περιπτώσεις (π.χ. ψευδόφιλες λέξεις → αγγλ. Actually=στην πραγματικότητα, γαλλ. actuel = επίκαιρος),
- **Κειμενοϊδιομορφικά μεταφραστικά προβλήματα:** αφορούν το περιεχόμενο του κειμένου, τα εξωγλωσσικά στοιχεία κ.λπ.

Στην παρούσα εργασία τα προβλήματα που προέκυψαν ήταν κυρίως γλωσσικά και κειμενοϊδιομορφικά. Λόγω της φύσης του κειμένου και δεδομένου ότι η λειτουργία και ο σκοπός του παραμένουν ίδια, δεν υπήρχαν πραγματολογικά μεταφραστικά προβλήματα, παρά μόνο ότι το μετάφρασμα έπρεπε να προσαρμοστεί στα δεδομένα της ελληνικής κοινωνίας, τόσο σε επίπεδο μακροδομής (προσαρμογή κειμένου), όσο και μικροδομής (προσαρμογή φωτογραφιών).

Ένα από τα γλωσσικά προβλήματα που υπήρχε μέσα στο κείμενο ήταν αυτό της λέξης *lead-screw*. Οι περισσότερες μηχανές αναζήτησης απέδιδαν τον όρο σαν *κοχλία*. Ο κοχλίας, ή με πιο απλά ελληνικά *βίδα*, είναι ένα στοιχείο μηχανής που εξυπηρετεί τη μετατροπή της ροπής σε αξονική δύναμη και αντίστροφα, τη μετατροπή της περιστροφικής κίνησης σε γραμμική και αντίστροφα, και είναι ένα στοιχείο σύνδεσης που έχει τη δυνατότητα της λύσης και της επανασύνδεσης. Είναι όμως ο όρος *lead-screw* απλά ένας κοχλίας; Μήπως χρειάζεται περαιτέρω επεξήγηση ο όρος; Εάν το κείμενο δεν είχε σκοπό να προσεγγίσει κοινό του επιστημονικού κλάδου της ρομποτικής, αλλά αντιθέτως απευθυνόταν στον απλό καθημερινό κόσμο, καθώς επίσης και σε κάποιον που μόλις είχε μπει στο χώρο της μηχανολογίας, δε θα υπήρχε πρόβλημα ο όρος να μεταφραστεί ως *κοχλίας-βίδα* για διευκόλυνση στην κατανόηση του όρου. Επειδή όμως είναι ένα κείμενο που μιλάει για μία νέα ανακάλυψη, ένα νέο προϊόν που μπορεί να εισαχθεί στο χειρουργείο για επεμβάσεις στην περιοχή του οφθαλμού, πρέπει να είμαστε ακριβείς στο τι μεταφράζουμε. Πιο συγκεκριμένα, οι κοχλίες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες [3] ανάλογα με το σκοπό τους: σε *κοχλίες σύσφιγξης* (*clamping screws*) και σε *κοχλίες κίνησης* (*lead screws*). Οι πρώτοι συνδέουν στοιχεία μεταξύ τους, είτε με τη χρήση *περικοχλίου* (κοινώς *παξιμάδι*) (*nut*) είτε κατασκευάζουν *σπειρώματα* (*spirals*) πάνω στα ίδια τα τμήματα που πρόκειται να συνδεθούν. Η χρήση κοχλιωτών συνδέσεων είναι πιο συχνή στο σχεδιασμό μηχανών λόγω του χαμηλού τους κόστους, της τυποποίησής τους και της ευκολίας στην αποσυναρμολόγηση των συνδεόμενων μερών τους. Αντιθέτως, οι *κοχλίες κίνησης* (*lead screws*) είναι τα μηχανικά αυτά στοιχεία που συμβάλλουν στη μετατροπή της περιστροφικής κίνησης σε ευθύγραμμη και μεταδίδουν ισχύ. Επομένως, παρουσιάζουν ακρίβεια στην κίνηση μηχανών, στην επιβολή φορτίων-μετατοπίσεων σε μηχανές δοκιμών, έχουν απλό σχεδιασμό και το μέγεθος τους βοηθάει στην δημιουργία συμπαγών κατασκευών.

Ένα ακόμη πρόβλημα απόδοσης στα ελληνικά ήταν και η λέξη *anti-backlash*. Ένα γνωστό φαινόμενο της αγγλικής γλώσσας, όταν θέλουμε να ερμηνεύσουμε την αντίθετη έννοια ενός όρου, είναι η χρήση του προθέματος *anti-*. Αν και στα ελληνικά μπορούμε να το μεταφράσουμε ως *κατά* ή *αντί* και να βγαίνει νόημα (πχ. *Anti-racism* = *αντιρατσιστικός*, *anti-corruption* = *κατά της διαφθοράς*), στην συγκεκριμένη περίπτωση στο κείμενο κάτι τέτοιο δε μπορεί να συμβεί, καθώς θα έχουμε ελλιπή απόδοση. Πιο συγκεκριμένα, στη μηχανική, «διάκενο» (*backlash*) [9] ονομάζεται η χαμένη κίνηση σε ένα μηχανισμό που προκαλείται από κενά μεταξύ των τμημάτων. Μπορεί να οριστεί ως η μέγιστη απόσταση ή γωνία μέσω της οποίας οποιοδήποτε τμήμα ενός μηχανικού συστήματος μπορεί να μετακινηθεί προς μία κατεύθυνση, χωρίς να ασκηθεί αισθητή δύναμη ή κίνηση στο επόμενο τμήμα με μηχανική αλληλουχία. Το διάκενο αυτό ορισμένες φορές μπορεί να είναι επιθυμητό ή και όχι. Οι λόγοι της ύπαρξής του είναι η αποτροπή της υπερθέρμανσης και η φθορά των γραναζιών. Παρόλα αυτά, το διάκενο μπορεί να προκαλέσει χαμένη κίνηση ανάμεσα στους άξονες εισόδου και εξόδου του μειωτήρα, κάνοντας έτσι δύσκολο τον ακριβή έλεγχο θέσης (*positioning*) σε εξοπλισμό όπως όργανα, μηχανές και ρομπότ. Στο συγκεκριμένο ρομποτικό εργαλείο που παρουσιάζεται στο paper γίνεται χρήση των όρων *anti-backlash nut* και *anti-backlash lead screw*, καθώς ο συγγραφέας θέλει να δείξει ότι οι *κοχλίες κίνησης* και τα *περικόχλια* που θα χρησιμοποιηθούν, έχουν ως σκοπό την εξάλειψη του διακένου. Επομένως, δεν γίνεται

το *anti-backlash* να μεταφραστεί στα ελληνικά ως *αντιδιάκενο*, καθώς όχι μόνο δεν γίνεται κατανοητός ο όρος αλλά παράλληλα δεν υπάρχει αντιστοιχία. Γι' αυτό και καταλήγουμε στην περιφραστική μετάφραση της λέξης ως *τεχνική εξάλειψης διάκενου*.

Συνεχίζοντας με ένα ακόμη παράδειγμα λανθασμένης απόδοσης στα ελληνικά, και πιο συγκεκριμένα με τον όρο *coarse-to-fine*. Με μια γρήγορη αναζήτηση, κάποιος θα βρει την μετάφρασή τους ως *χονδροειδής και ψιλός*, αντίστοιχα. Διαβάζοντας την πρόταση του κειμένου, καταλαβαίνουμε ότι η χρήση αυτής της μετάφρασης εκτός από λανθασμένη είναι και άστοχη καθώς δεν είναι αυτό που θέλει να πει ο συγγραφέας. Με λίγα λόγια το χειρουργικό ρομπότ δε χτίζεται από ένα χονδροειδές και ένα ψιλό μέρος, αλλά χτίζεται σταδιακά από χαμηλής ποιότητας μέρη, χαμηλού κόστους, έως υψηλής ποιότητας μέρη, άρα και υψηλού κόστους.

Αναφορικά με την τελευταία κατηγορία προβλημάτων, τα κειμενοϊδιομορφικά, ένα πρόβλημα που κλήθηκα να αντιμετωπίσω αφορούσε τη δομή του πρωτότυπου, καθώς σε τέτοιου είδους επιστημονικά άρθρα συνεδρίου παρεμβάλλονται εικόνες, οι οποίες μάλιστα περιέχουν κείμενο τόσο στη περιγραφή τους υπό τη μορφή λεζάντας όσο και στην περιγραφή του αντικειμένου που απεικονίζεται, επεξηγώντας έτσι τα διάφορα τμήματα του ρομπότ. Επομένως, είναι απαραίτητη η μετάφραση τόσο των περιγραφών τους όσο και του εσωτερικού τους περιεχομένου, για να γίνουν έτσι κατανοητές στο αναγνωστικό κοινό. Παράλληλα, μιας και μιλάμε για επιστημονικό κλάδο της ρομποτικής, γίνεται σε μεγάλο βαθμό χρήση εξισώσεων και πινάκων, αναλύοντας έτσι τις εξισώσεις κίνησης του ρομπότ, καθώς και παραμέτρους του. Οι πίνακες δημιουργήθηκαν εκ νέου στο Microsoft Word και μεταφράστηκαν, ενώ οι εξισώσεις, λόγω του όγκου τους και των συμβόλων τους, πάρθηκαν με screenshot (αρχείο εικόνας με την απεικόνιση της οθόνης του υπολογιστή) και εισήχθησαν στο μετάφρασμα ως εικόνες. Οι εξισώσεις θα μπορούσαν να αναδιατυπωθούν είτε μέσω της καρτέλας εισαγωγής εξισώσεων του Word είτε με τη χρήση του προγράμματος Overleaf, αλλά κάτι τέτοιο θα ήταν χρονοβόρο και όχι απαραίτητο, μιας και οι εξισώσεις δεν απαιτούν κάποια μετάφραση-επεξήγηση στα ελληνικά.

Συγκεφαλαιώνοντας, ήρθα αντιμέτωπος με ένα κείμενο που είχε αρκετές δυσκολίες, προβλήματα και απαιτήσεις, τόσο ως προς τη δομή όσο και στο λεξιλόγιο, το οποίο ήταν ιδιαίτερο και απαιτούσε ειδικές γνώσεις στον τομέα της μηχανολογίας. Η διαδικασία της μετάφρασης που ακολούθησα χωρίστηκε σε δυο στάδια: αρχικά, έψαξα για διάφορες μεταφράσεις παράλληλων επιστημονικών κειμένων στον κλάδο της μηχανολογίας-ρομποτικής προκειμένου να κατανοήσω το ύφος που συναντάται σε τέτοιου είδους κείμενα και να προσπαθήσω να το αναπαράξω και στο μετάφρασμά μου. Παράλληλα, αναζήτησα και paper αυτού του τομέα που είχαν συνταχθεί στην ελληνική γλώσσα, για να δω αν και στα ελληνικά ακολουθείται το μοτίβο με τις δυο στήλες, τις εξισώσεις, τις εικόνες και τους πίνακες. Σε γενικές γραμμές, προσπάθησα το μετάφρασμα να μην θυμίζει μετάφρασμα αλλά πρωτότυπο κείμενο. Σε δεύτερο στάδιο, ακολούθησε η αναζήτηση άγνωστης ορολογίας και λέξεων, που καταγράφηκαν σε πίνακα excel κατά τη διάρκεια της μεταφραστικής διαδικασίας. Κατόπιν, ξεκίνησα τη μετάφραση του κειμένου, σημειώνοντας όποιο πρόβλημα πρόκυπτε, έτσι ώστε να προχωρήσω στη συνέχεια με το σχολιασμό, όπου και ανέφερα μερικά από αυτά τα προβλήματα, καθώς επίσης και τη λύση που έδωσα. Τα σημεία που με δυσκόλεψαν περισσότερο ήταν αφενός η μετάφραση της ορολογίας, η οποία όπως και προανέφερα, είτε δεν αποδιδόταν σωστά είτε έπρεπε να αποδοθεί περιφραστικά, καθώς η λέξη στα ελληνικά δεν υπήρχε, και αφετέρου η μετάφραση του περιεχομένου των εικόνων καθώς έπρεπε να χρησιμοποιήσω *Adobe Illustrator* για κάθε μια από αυτές και να μετατρέψω το αγγλικό κείμενο σε ελληνικό, καθώς επίσης και να προσαρμόσω το περιεχόμενο, έτσι ώστε να χωράει στα πλαίσια της εικόνας. Τα προβλήματα ήταν κυρίως γλωσσικά και κειμενοϊδιομορφικά. Αυτά οφείλονται κυρίως στις διαφορές που έχουν οι δυο γλώσσες, όσον αφορά στην απόδοση των όρων και τις συνήθειες γραφής αντίστοιχα. Παρόλα αυτά, ο μεταφραστής οφείλει να βρει μέσα από έρευνα τη σωστή απόδοση της ορολογίας καθώς επίσης και να καταφέρει να δημιουργήσει νέα στη γλώσσα-στόχο, σε περίπτωση που αυτή δεν υπάρχει ήδη.

Βιβλιογραφία

1. Bühler, K. (1934). *Sprachtheorie*. Jena: Fischer.
2. Catford, J. C. (1965). *A Linguistic Theory of Translation*. London: Oxford University Press
3. Κερμανίδης, Α. . *Κοχλίες*. Ελλάδα: Ανακτήθηκε 29 Ιανουαρίου, 2019, Δικτυακός τόπος: http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/Kochlies.pdf.
4. Mablekos-Alexiou, A., Ourselin, S., Da Cruz, L., and Bergeles, C. (2018). *Requirements based design and end-to-end dynamic modeling of a robotic tool for vitreoretinal surgery*. In 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pages 135–141, Brisbane, QLD, Australia
5. Nida, E. (1964). *Toward a Science of Translating. With special reference to principles and procedures involved in Bible translating*. Leiden: Brill.
6. Nida, E. & Taber, C. (1969). *The Theory and Practice of Translation*. Leiden: Brill.
7. Nord, C. (1997). *Translating as a Purposeful Activity: Functionalist Approaches Explained*. Manchester. Manchester: St. Jerome.
8. Reiß, K. (1977). *Texttypen, Übersetzungstypen und die Beurteilung von Übersetzungen*. : Lebende Sprachen 22(3).
9. Sanmugan, R. (2016). *What is the backlash in gears? How is it advantageous or disadvantageous?*. Ανακτήθηκε 29 Ιανουαρίου, 2019, από <https://www.quora.com/What-is-the-backlash-in-gears-How-is-it-advantageous-or-disadvantageous>.
10. Wills, W. (1977). *Translation Science. Problems and Methods*. Tübingen: Gunter Narr Verlag.

vitreoretinal	υαλοειδο-αμφιβληστροειδής
kinematics	κινηματική
Degree of Freedom (DoF)	βαθμός ελευθερίας
retinal	αμφιβληστροειδικός
worm-gear	ατέρμονας κοιλίας
subretinal	υπαμφιβληστροειδικός
peeling	απολέπιση
stem cell	βλαστοκύτταρο
micrometer	μικρόμετρο
coarse-to-fine	από χαμηλής σε υψηλής ακρίβειας μέρη (Ανεπαρκής ερμηνεία-Δε βρέθηκε αντιστοιχία στην ελληνική γλώσσα)
actuator	επενεργητής
transmission system	σύστημα μεταδόσεως
off-the-shelf	προκατασκευασμένος
end-effector	επενεργητής πέρατος/τελικός τελεστής
lead screw	κοιλίας κίνησης
Computer-Aided Design (CAD)	Λογισμικό σχεδίασης με υπολογιστή/σχεδιασμός με χρήση υπολογιστή
operating table	χειρουργικό τραπέζι
intraocular pressure	ενδοοφθαλμική πίεση
eye chamber	θάλαμος οφθαλμού
Remote Center of Motion (RCM)	απομακρυσμένο κέντρο περιστροφής (Ανεπαρκής ερμηνεία-Δε βρέθηκε αντιστοιχία στην ελληνική γλώσσα)
manipulator	χειριστής
flanges	βάσεις στήριξης
self-locking	αυτοκλειδούμενος
positioning accuracy	ακρίβεια στον έλεγχο θέσης (Δεν υπάρχει ακριβής μετάφραση του όρου)
low profile	λεπτός
epiretinal membrane	επιθηλιακή μεμβράνη
roboticists	ρομποτιστές
probe	καθετήρας
translational	μεταφορά (γραμμική)
piezo	πιεζοηλεκτρικός
velocity	ταχύτητα
nm	νανόμετρο
wormwheel gearbox	σύστημα ατέρμονα κορώνα
wormwheel	ατέρμων κορώνα
forward kinematics	ευθεία κινηματική
The coordinate frame assignment in space	Το σύστημα συντεταγμένων στο χώρο (Δεν υπάρχει ακριβής μετάφραση του όρου)
roll	διαμήκης άξονας
tilt	εγκάρσιος άξονας
roll motion	περιστροφή γύρω από τον διαμήκη άξονα
tilt motion	περιστροφή γύρω από τον εγκάρσιο άξονα
roll mechanism	μηχανισμός περιστροφής γύρω από τον διαμήκη άξονα
tilt mechanism	μηχανισμός περιστροφής γύρω από τον εγκάρσιο άξονα
Center of Mass (CoM)	Κέντρο μάζας
matrices	πίνακες (μήτρες)
expression	παράσταση (μαθηματική)
equations of motion (EoM)	εξισώσεις κίνησης
backlash	διάκενο
anti-backlash	τεχνική εξάλειψης διάκενου (Δεν υπάρχει ακριβής μετάφραση του όρου)
free body diagrams (FBD)	διαγράμματα ελευθέρων σωμάτων (σελ 26, 5.1, σελ 27, 5.1)
lead angle	γωνία κλίσεως
pressure angle	γωνία πίεσης
sliding surfaces	επιφάνεια τριβής
spiral	σπείρωμα
nominal torque	ονομαστική ροπή
nut	περικόγλιο

Γλωσσάρι

<http://iate.europa.eu/FindTermsByLilId.do?lilId=1511541&langId=el>

<http://www.wordreference.com/engr/kinematics>

https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%92%CE%B1%CE%B8%CE%BC%CE%BF%CE%AF_%CE%B5%CE%BF

Reference: ΕΛΕΤΟ/Συλλογικό Μέλος “Ομάδα Ορολογίας ΙΑΤΡΟΤΕΚ” - ΟΜΑΔΑ-ΚΑΤΣΑΡΑΚΗΣ (ΙΑΤΕ)

Reference: Α.Σ.Χονδρογιάννη,Συστήματα Μετάδοσης Κίνησης και Μεταφοράς ΙΙ,Αθήνα,1987

https://www.proz.com/kudoz/english_to_greek/science/368205-subretinal_space.html?print=1

Reference: <http://www.derm.gr/dermatitis.php> (ΙΑΤΕ)

<http://www.wordreference.com/engr/stem%20cell>

<http://www.wordreference.com/engr/micrometer>

Reference: ΟΜΑΔΑ-Γ.ΚΑΤΣΑΡΑΚΗΣ - ΕΛΕΤΟ (Ελληνική Εταιρεία Ορολογίας) (ΙΑΤΕ)

Reference: ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΟΣ (ΙΑΤΕ)

<http://www.wordreference.com/engr/off-the-shelf>

<http://iate.europa.eu/FindTermsByLilId.do?lilId=1549079&langId=el>

http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/%CE%9A%CE%BF%CF%87%CE%BB%CE%AF%CE%B5%CF%82.pdf

Reference: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος (ΙΑΤΕ)

<http://www.wordreference.com/engr/operating%20table>

Reference: Εναρμονισμένο Σύστημα και (τροποποιημένη) Ονοματολογία του Συμβουλίου Τελωνειακής Συνεργ

Reference: Δαστηρίδου, Άννα Ιορδάνης. Οφθαλμική ελαστικότητα και αιματική ροή σε φυσιολογικούς και γλαυ

<https://www.igi-global.com/dictionary/remote-center-of-motion-rcm/43372>

Reference: Reg. 3381/94 OJ L 367/94 p.140 (ΙΑΤΕ)

Reference: Γ.Χαλκιαδάκης, διπλ.αεροναυπηγός μηχανικός (ΙΑΤΕ)

Reference: Ν.Α.Κυριάκης,Δρ.Μηχανολόγος-Ηλεκτρολόγος Μηχανικός,Λεκτ.Α.Π.Θ. (ΙΑΤΕ)

<http://www.wordreference.com/engr/low%20profile>

<https://translate.google.gr/?hl=el#view=home&op=translate&sl=en&tl=el&text=epiretinal%20membrane>

<https://translate.google.gr/#en/el/roboticists>

<http://www.wordreference.com/gren/%CE%BA%CE%B1%CE%B8%CE%B5%CF%84%CE%AE%CF%81%C>

Reference: ΕΛΚΕΠΙΑ ΛΟΠ (ΙΑΤΕ)

<http://www.wordreference.com/engr/piezoelectric>

<http://www.wordreference.com/engr/velocity>

Reference: Ινστιτούτο Μελετών Περιβάλλοντος, Αθήνα Ακαδημία Αθηνών (ΙΑΤΕ)

<http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/Drawing/THEORIA/SXEDIASH%20TROXWN.html>

<http://iate.europa.eu/FindTermsByLilId.do?lilId=1136314&langId=el>

<https://eclass.teiwm.gr/modules/document/file.php/BSMM121/%CE%9A%CE%95%CE%A6%CE%91%CE%91>

https://el.wikiversity.org/wiki/%CE%A3%CF%8D%CF%83%CF%84%CE%B7%CE%BC%CE%B1_%CF%83

<https://valadis-kotorlos.blogspot.com/2016/05/3.html>

<https://valadis-kotorlos.blogspot.com/2016/05/3.html>

https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CE%AD%CE%BD%CF%84%CF%81%CE%BF_%CE%BC%CE%A

<http://www.wordreference.com/engr/matrix>

<http://www.wordreference.com/engr/expression>

https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CE%BE%CE%AF%CF%83%CF%89%CF%83%CE%B7_%CE%8C%

<http://www.wordreference.com/gren/%CE%BC%CF%80%CF%8C%CF%83%CE%B9%CE%BA%CE%BF>

Δεν υπάρχει πηγή μιάς και ο όρος αποδόθηκε περιφραστικά

<http://nefeli.lib.teicrete.gr/browse/stef/epp/2015/ArnaoutakiAikaterini/attached-document-1427182710-530361-1>

Reference: Α.Σ.Χονδρογιάννη,Συστήματα Μετάδοσης Κίνησης και Μεταφοράς ΙΙ,Αθήνα,1987 (ΙΑΤΕ)

Reference: Αγγλοελληνικό Λεξικό Επιστημονικών και Τεχνικών Όρων,Michigan Press,Εκδ.Π.Κουτσουμπός (ΙΑ

Reference: Χ.Πυργίδης,Πολιτικός Μηχανικός,Δρ Συγκοινωνιολόγος,Α.Π.Θ. (ΙΑΤΕ)

<https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/TME106/Presentations/%CE%BA%CE%BF%CF%87%CE%B>

Reference: Σ.Μανιάς,επ.καθηγητής Ε.Μ.Π.,Κ.Καγκαράκης,καθηγητής Ε.Μ.Π. (ΙΑΤΕ)

Reference: Εναρμονισμένο Σύστημα και (τροποποιημένη) Ονοματολογία του Συμβουλίου Τελωνειακής Συνεργ

Requirements Based Design and End-to-End Dynamic Modeling of a Robotic Tool for Vitreoretinal Surgery

A rigorous kinematics and dynamics analysis of the robot’s part

a dynamics study of a multi-Degree of Freedom (DoF) robotic system

during the retinal surgery phase is provided.

worm-gear velocities

the precise subretinal delivery of upcoming sight-restoring therapeutics necessitate micrometer level precision.

common tasks that require high dexterity, such as epiretinal membrane peeling

new treatment methods offering capabilities that together with emerging stem cell

necessitate micrometer level precision

a coarse-to-fine surgical robot

By combining the robot’s equations of motion with novel mathematical models of its corresponding actuators

That description includes all the nonlinearities due to friction that arise from the use of transmission systems

avoid off-the-shelf products that might affect the manipulator’s precision

Sec. III derives the dynamics of the 3-DoF end-effector

The six-bar linkage is actuated by a motorized lead screw drive

have been replicated using Computer-Aided Design (CAD) software

the operating table (Opmaster 506P from Lab-Med)

to keep the intraocular pressure constant

all motions of the tool into the eye chamber

three rotational DoF around a Remote Center of Motion (RCM)

a coarse manipulator and a fine manipulator

Custom flanges are designed to connect the S-Robot with the hexapod

Both manipulators are self-locking when switched off

positioning accuracy is not affected by external disturbances

an off-the-shelf low profile stage

epiretinal membrane peeling

the technological contributions from roboticists have driven the field to a high level of maturity

one for the endoillumination probe

one translational that passes through it

The insertion assembly employs an off-the-shelf piezo actuator

maximum velocity

a step size at around 300nm

The components that constitute this mechanism are a wormwheel gearbox

A wormwheel based configuration is designed to produce roll motion

In this section forward kinematics of the S-Robot manipulator are briefly developed

The coordinate frame assignment in space is illustratedin Fig. 4

The S-Robot consists of a roll and a tilt mechanism

The S-Robot consists of a roll and a tilt mechanism

A wormwheel based configuration is designed to produce roll motion

Concerning the tilt motion, a six-bar mechanism that provides a mechanical RCM is selected

The S-Robot consists of a roll and a tilt mechanism

The S-Robot consists of a roll and a tilt mechanism

Finally, each vector denotes the position of the Center of Mass (CoM)

For the derivation of the robot’s homogeneous transformation matrices

The derived expressions of the above functions

The Euler-Lagrange equations of motion (EoM)

eliminating backlash.

an anti-backlash lead screw assembly and a worm drive.

the free body diagrams of the worm and gear are depicted in Fig. 5

In Fig. 5, λw denotes the worm’s lead angle

θw the spiral’s pressure angle

the frictional forces between the sliding surfaces

Assuming that the coefficient of friction is constant across the length of the spiral

a motor with nominal torque at 10mNm or higher is considered suitable

the pushing nut of the lead screw