



Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο
Δ.Π.Μ.Σ. Συστήματα Αυτοματισμού
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχ/κών και Μηχ/κών Υπολογιστών
Τομέας Σημάτων, Ελέγχου και Ρομποτικής

Προγραμματισμός και έλεγχος πραγματικού
χρόνου σε παράλληλο ρομποτικό μηχανισμό
τύπου διπλού-Δέλτα με ενσωματωμένο
χειρουργικό εργαλείο

Programming and real-time control of a
double-Delta parallel robotic mechanism with
integrated surgical tool

Στέφανος Ν. Αθανασόπουλος

Αναπλ. Καθ. Κων/νος Τζαφέστας
Κ. Τζαφέστας, Κ. Κυριακόπουλος, Χ. Ψυλλάκης

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	9
1 Εισαγωγή	11
1.1 Τα ρομπότ σήμερα	11
1.1.1 Χρήσεις των ρομπότ	11
1.1.2 Ρομποτικά χειρουργικά συστήματα	16
2 Ρομποτική Χειρουργική	19
2.1 Ρομποτική Χειρουργική	19
2.2 Ιστορική Αναδρομή	20
2.3 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα	21
2.4 Τηλεχειρουργικές επεμβάσεις βάσει master-slave τηλεχειρισμού	23
3 Πλάτφορμα Μεταπτυχιακής εργασίας	25
3.1 Μηχανολογική περιγραφή του ρομπότ	25
3.1.1 Ρομπότ τύπου Δέλτα	25
3.1.2 Ρομπότ τύπου διπλού Δέλτα	27
3.1.3 Χειρουργικό άκρο	28
3.1.4 Κατηγορίες τηλεχειρισμού	30
3.2 Περιβάλλον ROS (Robot Operating System)	32
4 Κινηματική ανάλυση ρομποτικών αλυσίδων	33
4.1 Σειριακά ρομπότ	33
4.2 Παράλληλα Ρομπότ	34
4.3 Κινηματική ανάλυση	36
4.3.1 Ευθεία Κινηματική ανάλυση ρομπότ τύπου δέλτα	36
4.3.2 Ανάστροφη Κινηματική ανάλυση ρομπότ τύπου Δέλτα	38
4.3.3 Χώρος εργασίας ρομπότ τύπου δέλτα	40
4.3.4 Ευθεία Κινηματική ανάλυση ρομπότ τύπου διπλού δέλτα	40
4.3.5 Ανάστροφη Κινηματική ανάλυση ρομπότ τύπου διπλού δέλτα	42
4.3.6 Χώρος εργασίας ρομπότ τύπου διπλού δέλτα	44
5 Έλεγχος ρομποτικών συστημάτων	47
5.1 Θεωρία ελέγχου στη ρομποτική	47
5.1.1 Βασική θεωρία ελέγχου	48
5.2 Λειτουργικά Συστήματα πραγματικού χρόνου	49

5.2.1	Έλεγχος πραγματικού χρόνου	51
5.3	Εφαρμογή στην εργασία	51
5.3.1	Έλεγχος διπλού Δέλτα	51
5.4	Αρχιτεκτονική προγράμματος	53
5.4.1	Προγράμματα οδήγησης (Drivers)	55
6	Αποτελέσματα πειραμάτων	57
6.1	Απόκριση συστήματος	57
6.1.1	Βηματική απόκριση στον x άξονα	57
6.1.2	Βηματική απόκριση στον y άξονα	59
6.1.3	Βηματική απόκριση στον z άξονα	60
7	Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία	63
7.1	Συμπεράσματα	63
7.2	Μελλοντική εργασία	63
	Βιβλιογραφία	65

Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία ασχολείται με τον προγραμματισμό και τον έλεγχο σε πραγματικό χρόνο, ενός παράλληλου ρομποτικού μηχανισμού τύπου διπλού-Δέλτα, το οποίο φέρει λαπαροσκοπικό χειρουργικό εργαλείο. Αποτελεί μια εργασία λογισμικού, συνεπικουρούμενη από μία σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση των σημαντικότερων χαρακτηριστικών που χρησιμοποιήθηκαν. Συγκεκριμένα, γίνεται μία αναφορά στο πεδίο της ρομποτικής χειρουργικής, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που εμφανίζει, καθώς και στα τηλεχειρουργικά συστήματα master-slave. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η πειραματική πλατφόρμα τύπου διπλού-δέλτα που χρησιμοποιήθηκε, και αναλύεται η κινηματική της συμπεριφορά. Γίνεται αναφορά στον θεωρητικό και πρακτικό έλεγχο της πλατφόρμας, καθώς και στα συστήματα πραγματικού χρόνου με έμφαση στην συγκεκριμένη αρχιτεκτονική του παρόντος. Τέλος παρουσιάζονται διάφορα πειράματα για την ακρίβεια ελέγχου του λαπαροσκοπικού εργαλείου, καθώς και τα εργαλεία που αναπτύχθηκαν, όπως οδηγοί κινητήρων κ.α. Τα ερευνητικά αντικείμενα της εργασίας αφορούν στην μοντελοποίηση και στον έλεγχο, μέσω της ανάπτυξης κατάλληλου λογισμικού, της κίνησης παράλληλων ρομποτ, στον απομακρυσμένο τηλεχειρισμό ρομποτικών συστημάτων και στον έλεγχο συστημάτων σε πραγματικό χρόνο. Δόθηκε μεγάλη έμφαση στην σωστή προγραμματιστική υλοποίηση όλων το συστημάτων υλικού και λογισμικού καθώς το περιβάλλον της ρομποτικής χειρουργικής είναι ιδιαίτερο απαιτητικό ως προς την απόκριση και την λειτουργία του συστήματος, με μικρά περιθώρια λάθους.

Abstract

The present master thesis focuses in the development of the software and the real-time control for a parallel robotic mechanism of double-Delta type that is equipped with a laparoscopic end effector. This thesis mainly focus on software development but also presents a small literature survey. More specifically, in the literature survey there is focus on the field of surgical robotics, pros and cons that can offer but also in teleoperation systems of type master-slave. Furthermore, the robotic platform of double-Delta type that was used for this thesis is presented, also giving the kinematics behaviour of the robot is analysed. In addition, this thesis presents the theoretical and practical aspects of controlling said platform focusing greatly in real time systems, always having in mind the architecture of the current system. Moreover, the results from the experiments about the accuracy of the laparoscopic end effector are given. Finally, the tools developed such as drivers for the motors are presented. The research subject of this master thesis lies in the modelization and control achieved by developing the software, in the kinematics of parallel robots, in the teleoperation of robotic systems and the real-time control of systems. Great focus was given to correctly develop the software of the system due to the nature of field in surgical robotics. The software must be responsive and fully operational with small margins for error.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα, αρχικά, να ευχαριστήσω τους γονείς μου που με έχουν στηρίξει καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Κ. Τζαφέστα για την κατανόηση που έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αλλά και για την καθοδήγηση του. Παράλληλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον μεταδιδακτορικό ερευνητή στο εργαστήριο ρομποτικής της Σχολής ΗΜ&ΜΥ του ΕΜΠ κ. Γ. Μούστρη, χωρίς τη βοήθεια του οποίου αυτή εργασία δεν θα ήταν εφικτή.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η μεταπτυχιακή εργασία έχει ως θέμα τον προγραμματισμό και την δημιουργία ενός API για τον έλεγχο ενός ρομπότ 9 βαθμών ελευθερίας τύπου διπλού Δέλτα (Double Delta robot). Το ρομπότ αυτό προορίζεται να χρησιμοποιηθεί σε χειρουργικές επεμβάσεις και κατά συνέπεια η ταχύτητα αλλά και η ακρίβεια του είναι από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά στα οποία στοχεύουμε. Η εργασία αυτή χωρίζεται στις εξής ενότητες: Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία γενική αναφορά στα ρομπότ και στις χρήσεις τους με μια εκτενέστερη αναφορά στα ρομπότ για χειρουργικές επεμβάσεις. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση της χειρουργικής ρομπότικής καθώς αποτελεί και το κίνητρο της εργασίας αυτής. Στη συνέχεια στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πλατφόρμα της μεταπτυχιακής εργασίας με περιγραφή του ρομπότ αλλά και των επιμέρους στοιχείων του. Στο τέταρτο κεφάλαιο ακολουθεί η κινηματική ανάλυση του ρομπότ της μεταπτυχιακής εργασίας ενώ γίνεται και μία αναφορά πιο γενική στις διάφορες ρομποτικές αλυσίδες. Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύεται η ενότητα του ελέγχου του ρομπότ, με γενική περιγραφή της θεωρίας αλλά και συγκεκριμένα για το ρομπότ της μεταπτυχιακής εργασίας. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο γίνεται μία σύνοψη κάποιων αποτελεσμάτων με χρήση διαγραμμάτων και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας καθώς και η πιθανή μελλοντική εργασία.

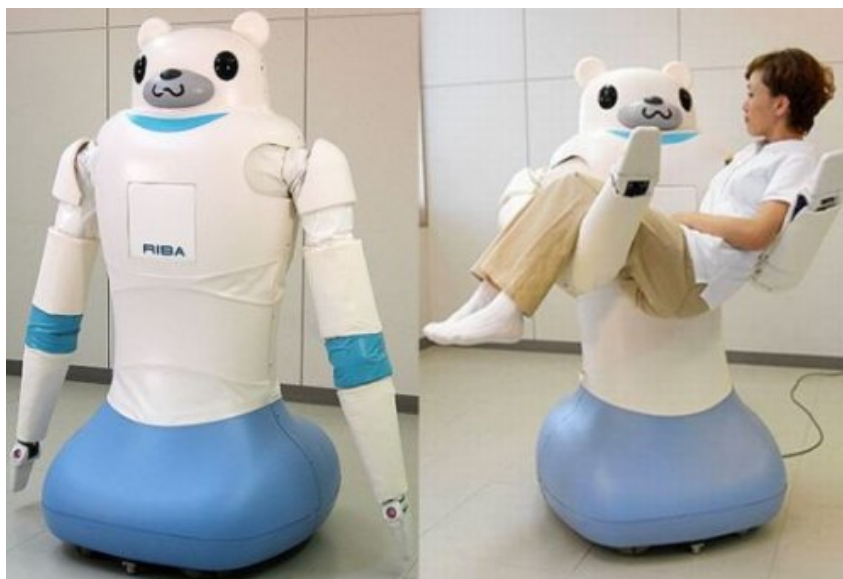
1.1 Τα ρομπότ σήμερα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι διάφορες χρήσεις των ρομπότ στην σημερινή εποχή, τόσο σε βιομηχανικό επίπεδο όσο και σε επίπεδο υπηρεσιών.

1.1.1 Χρήσεις των ρομπότ

Το πρώτο ψηφιακό προγραμματιζόμενο ρομπότ, εμφανίστηκε το 1954. Συγκεκριμένα οι George Devol και Joseph Engelberger ήταν οι πρώτοι που ανέπτυξαν το πρώτο ρομπότ, το οποίο ζύγιζε δύο τόνους ενώ ο έλεγχος του γινόταν μέσω μαγνητικού τυμπάνου (Magnetic Drum). Μόλις το 1961 εγκαταστάθηκε το πρώτο βιομηχανικό ρομπότ στην αυτοκινητοβιομηχανία General Motors [1]. Το ρομπότ αυτό, με την ονομασία Unimate, τοποθετούσε και συναρμολογούσε εξαρτήματα πιέζοντας διάφορα χυτά μέταλλα, χωρίς όμως να υποστηρίζει συνεργασία με αισθητήρες. Αργότερα τα βιομηχανικά αυτά ρομπότ άρχισαν να εισέρχονται και σε άλλες βιομηχανικές εργασίες όπως αυτή του βαψίματος, της σύνδεσης εξαρτημάτων, τις εργασίες μεταφοράς ή ακόμα και την επιθεώρηση εξαρτημάτων με μεγάλη ταχύτητα και ακρίβεια [2].

Με την ανάπτυξη του κλάδου της ρομποτικής, οι νέες ανάγκες που δημιουργήθηκαν έδωσαν έδαφος για εκτενή έρευνα σε διάφορα πεδία. Μερικά από αυτά είναι η ανάπτυξη αισθητήρων,



Σχήμα 1.1: Ρομπότ υπηρεσιών σε νοσοκομείο [6]

νέων μεθόδων ελέγχου αλλά και νέων κατασκευαστικών χαρακτηριστικών ώστε να μεταφερθεί η ρομποτική από τις βιομηχανίες στην καθημερινότητα του ανθρώπου.

Αποτέλεσμα της έρευνας πάνω στην ρομποτική, ήταν η εισαγωγή διάφορων ρομποτικών συστημάτων στην καθημερινότητα όλο και περισσότερων ανθρώπων, χωρίς να απαιτείται κάποια ειδικευση. Τα ρομπότ αυτά, εξοπλισμένα με αισθητήρες υπερήχου, γυροσκοπία, GPS κ.α. μπορούν να κάνουν εργασίες που στο παρελθόν είχαν θεωρηθεί αδύνατες χωρίς τη μεσολάβηση του ανθρώπου. Η συνεχής επαφή των ρομπότ με τους ανθρώπους οδήγησε σε άνθηση το ερευνητικό πεδίο της ρομποτικής με αποτέλεσμα σήμερα να έχουμε ρομποτικά συστήματα μεγάλης ακρίβειας με χαμηλό κόστος αλλά και εφαρμογές σε πολλά και διαφορετικά πεδία.

Έτσι έχουμε τα εξής παραδείγματα για διάφορες χρήσεις από ρομπότ υπηρεσίας:

- Παροχή Υπηρεσιών (σχήμα 1.1). Ρομπότ τα οποία μπορούν να μεταφέρουν φάρμακα στους ασθενείς, ενώ άλλα προσφέρουν ψυχολογική υποστήριξη σε μικρούς ασθενείς [3]. Έχουν αναπτυχθεί επίσης, ρομποτικά συστήματα για την μεταφορά παλετών σε αποθήκες και την σωστή τοποθέτηση εξαρτημάτων πάνω σε αυτές (Amazon Robotics [4]). Τέλος, μία ακόμη υπηρεσία που προσφέρουν τα ρομπότ είναι οι επισκευές, ο έλεγχος ή το καθάρισμα φτερών αεροπλάνων που γίνεται από ρομπότ με εύκαμπτους βραχίονες [5]. Παρόμοιες, αλλά και πληθώρα άλλων υπηρεσιών γίνονται σήμερα με την βοήθεια διάφορων ρομπότ γρήγορα και με αξιοπιστία.
- Συντροφιά (σχήμα 1.2). Τα ρομπότ αυτά είναι σε θέση να ικανοποιήσουν την ανάγκη των ανθρώπων, ως ένα βαθμό, για συντροφιά. Έτσι, σε οίκους ευγηρίας [7] μπορούμε να βρούμε ρομπότ που με την μορφή τους ή με τα χαρακτηριστικά τους ικανοποιούν εν μέρη την ανάγκη του ανθρώπου για συντροφιά. Αντίστοιχα και σε παιδιατρικές κλινικές [8] υπάρχουν ρομπότ που χρησιμοποιούνται ως μέσο ψυχοθεραπείας [9] (σχ. 1.2).
- Οικιακές Εργασίες (σχήμα 1.3). Μπορούμε να συναντήσουμε στην αγορά, ρομπότ για οικιακές χρήσεις, όπως σκούπες (σχ. 1.3), κούρεμα γκαζόν, καθαρισμό πισίνας κ.α. [11]. Τέτοια ρομπότ είναι σε θέση να αντικαταστήσουν τον άνθρωπο στις συγκεκριμένες δουλειές, ενώ ταυτόχρονα μπορούν να μαθαίνουν κάθε φορά, μέσω χαρτογράφησης του χώρου, τρόπους για να εκτελέσουν τις εργασίες πιο γρήγορα και αποτελεσματικά. Υπολογίζεται ότι μέχρι το έτος 2019 θα έχουν πουληθεί πάνω από 33 εκατομμύρια ρομπότ υπηρεσίας [12]. Σταδιακά όλες οι οικιακές εργασίες θα γίνονται από ρομπότ με στόχο την διευκόλυνση των ανθρώπων.



Σχήμα 1.2: Ρομπότ για συντροφιά [10]



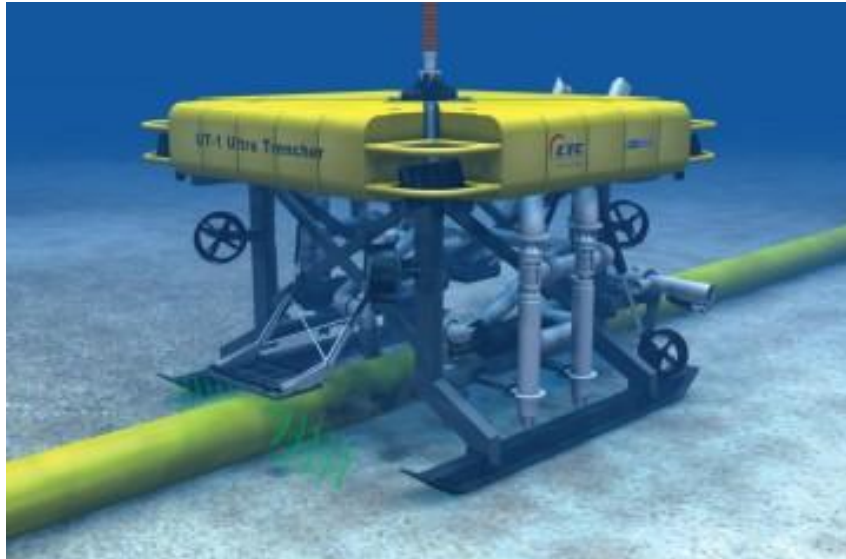
Σχήμα 1.3: Ρομπότ σκούπα [13]

- Διάστημα (σχήμα 1.4). Στο διάστημα τα ρομπότ μπορούν να κινούνται, να χαρτογραφούν ενώ ταυτόχρονα με τα επιστημονικά όργανα και τα εργαλεία που είναι προσαρμοσμένα σε αυτά μπορούν να εξετάζουν και την χημική σύσταση του περιβάλλοντος. Ως παράδειγμα μπορούμε να αναφέρουμε τα ρομποτικά οχήματα που βρίσκονται στον Άρη (σχήμα 1.4). Συγκεκριμένα, αυτά τα ρομπότ έχουν εξετάσει τη σύσταση του εδάφους και των βράχων ενώ, χρησιμοποιώντας τις ενσωματωμένες τους κάμερες, αυτά έχουν πάρει περισσότερες από 100.500 εικόνες του εδάφους, κρατήρων, νεφών και των θυελλών σκόνης. Επιπροσθέτως, υπάρχει ρομποτικός βραχίονας στον διαστημικό σταθμό [14], ο οποίος εξετάζει για πιθανά προβλήματα και τα επιδιορθώνει.



Σχήμα 1.4: Ρομπότ στο διάστημα [15]

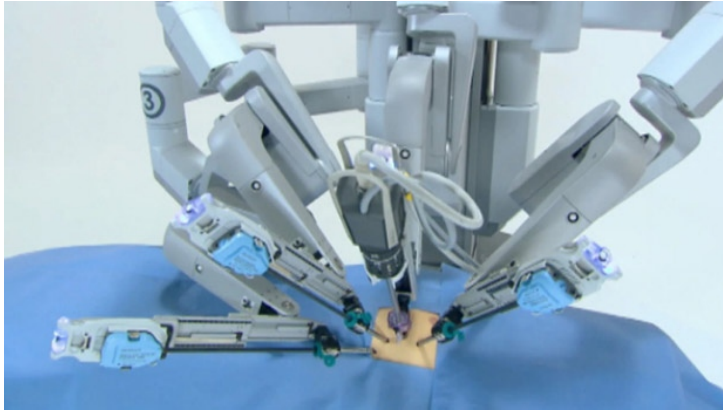
- Υποθαλάσσιες Επιχειρήσεις (σχήμα 1.5). Αυτόνομα υποβρύχια οχήματα χρησιμοποιούνται από τους θαλάσσιους-επιστήμονες για να εξερευνήσουν τον ωκεανό (σχήμα 1.5). Άλλες υποθαλάσσιες εφαρμογές των ρομπότ περιλαμβάνουν τις επιχειρήσεις αναζήτησης και ανέλκυσης, την επιθεώρηση των τηλεπικοινωνιακών καλωδίων, τον εντοπισμό φαλαινών, καθώς και ναρκαλιευτικών επιχειρήσεων στον ωκεανό.
- Έρευνα και Διάσωση (σχήμα 1.6). Τα ρομπότ χρησιμοποιούνται συχνά σε περιπτώσεις, φυσικών και μη, καταστροφών. Τα ρομποτικά αυτά οχήματα έχουν την δυνατότητα να επιχειρούν σε μέρη που ο άνθρωπος δε μπορεί να πλησιάσει. Χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης τέτοιων ρομπότ είναι στην καταστροφή του Παγκόσμιου Κέντρου Εμπορίου [17] (σχήμα 1.6). Συγκεκριμένα, ο οργανισμός Crasar [18] επιχείρησε την πρώτη χρήση ρομπότ σε τέτοιες καταστάσεις. Το μοναδικό ρομπότ με ασύρματη επικοινωνία που χρησιμοποιήθηκε στα συντρίμια του εμπορικού κέντρου ήταν το Solem [19]. Σε μία επιχείρηση διάσωσης υπάρχουν πολλοί κίνδυνοι για τους ανθρώπους. Η πιθανή κούραση των ανθρώπων της σωστικής ομάδας είναι το πρώτο πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπίσουν καθώς πολλές φορές η διασωστική διαδικασία μπορεί να κρατήσει μέρες. Επιπροσθέτως, πολλές φορές λόγω διαρροής χημικών ή άλλων βλαβερών ουσιών, δημιουργείται ένα απροσπέλαστο εμπόδιο για την διασωστική διαδικασία. Τέλος οι χώροι στους οποίους κινούνται οι άνθρωποι μπορεί να υποστούν περαιτέρω καταστροφές με αποτέλεσμα να τίθεται σε κίνδυνο η ζωή των σωστικών ομάδων ακόμα και μετά την αρχική καταστροφή.



Σχήμα 1.5: Υποθαλάσσιο ρομπότ [16]



Σχήμα 1.6: Ρομπότ διάσωσης [20]



Σχήμα 1.7: Βραχίονας για λαπαροσκοπική επέμβαση [24]

- Ιατρική (σχήμα 1.7). Η ρομποτική ιατρική έχει διεισδύσει σε αρκετά νοσοκομεία, τα οποία έχουν προμηθευτεί χειρουργικά και εν γένει ιατρικά ρομπότ[21]. Αυτά παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα όπως, μηδαμινή απώλεια αίματος, λιγότερες μεταγγίσεις αίματος, χαμηλότερο κόστος νοσηλείας, ταχύτερη έξοδος από το νοσοκομείο, ελαχιστοποίηση μετεγχειρητικού πόνου, ελάχιστο χειρουργικό τραυματισμό των ιστών, καλύτερο αισθητικό αποτέλεσμα και μικρότερες ουλές, ταχύτερη ανάρρωση και γρηγορότερη κινητοποίηση των ασθενών, μεγέθυνση εικόνας κατά 10 έως 15 φορές και καλύτερος φωτισμός, μηδαμινές μετεγχειρητικές επιπλοκές που σχετίζονται με το τραύμα, σημαντικά μικρότερη καρδιαγγειακή και αναπνευστική επιβάρυνση, δυνατότητα αντιμετώπισης ασθενών με επιβαρυσμένο ιατρικό ιστορικό, ταχύτερη επάνοδος στις καθημερινές δραστηριότητες και στην καθημερινή εργασία [22]. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η χρήση ρομπότ για λαπαροσκοπικές επεμβάσεις [23] (σχ. 1.7) το οποίο τηλε-χειρίζεται ο χειρουργός.

Η ρομποτική ιατρική βρίσκει εφαρμογή σε πολλές ειδικότητες της χειρουργικής ιατρικής, όπως τη γενική χειρουργική, τη χειρουργική κατά της νοσογόνου παχυσαρκίας, την καρδιοχειρουργική, τη θωρακοχειρουργική, την αγγειοχειρουργική, την παιδιατρική χειρουργική, την ουρολογία, τη γυναικολογική χειρουργική, τη μεταμόσχευση νεφρού για τη λήψη μοσχεύματος και την χειρουργική ενδοκρινών αδένων. Οι πιο συνηθισμένες λαπαροσκοπικές επεμβάσεις που γίνονται με τη βοήθεια ενός ρομπότ, είναι οι επεμβάσεις κατά της νοσογόνου παχυσαρκίας, η χολοκυστεκτομή, η αντιμετώπιση των παθήσεων του παχέος εντέρου, η αποκατάσταση της γαστροοισοφαγικής παλινδρόμησης, η χειρουργική αντιμετώπιση των γυναικολογικών παθήσεων, η χειρουργική του προστάτη, η νεφρεκτομή, η ενδοκρινική χειρουργική και πολλές ακόμη[25].

1.1.2 Ρομποτικά χειρουργικά συστήματα

Τα ρομποτικά συστήματα μπορούν να χωριστούν σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με το πως ο κάθε ερευνητής προσπαθεί να κάνει τον διαχωρισμό αυτό[26]. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι ταξινόμησης των ρομποτικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται σε ιατρικό περιβάλλον. Ένας πρώτος διαχωρισμός, που έγινε από τον Taylor και τον Stoianovici [27] χωρίζει τα ρομποτικά συστήματα σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

1. Χειρουργικά συστήματα με χρήση υπολογιστικών προγραμμάτων CAD/CAM.
2. Χειρουργικά συστήματα βοηθητικών ρομποτικών συστημάτων.

Η πρώτη κατηγορία έχουν αναπτυχθεί για να μπορούν να στηρίζουν τον χειρουργό στην επέμβαση, προσφέροντας του παραπάνω πληροφορία κατά τη διάρκεια της επέμβασης (τριδιάστατες εικόνες)

αλλά και να είναι σε θέση να προτείνουν κάποιες κινήσεις ώστε να επιτευχθεί μία ταχύτερη και ασφαλέστερη επέμβαση.

Η δευτερη κατηγορία χωρίζεται με τη σειρά της σε δύο επιμέρους κατηγορίες:

1. Εργαλεία χειρουργικής επέκτασης. Σε αυτή τη κατηγορία, τα εργαλεία τα χρησιμοποιεί απευθείας ο χειρουργός και ουσιαστικά προσφέρουν περισσότερες δυνατότητες σε αυτόν.
2. Βοηθητικά Εργαλεία. Τα εργαλεία αυτά λειτουργούν παράλληλα με τον χειρουργό και έχουν βοηθητικό ρόλο, όπως να κρατάνε το ενδοσκόπιο.

Σε συνέχεια του προηγούμενου διαχωρισμού ο Wolf και ο Shoham [28] έχουν προτείνει έναν ακόμα διαχωρισμό βάσει του βαθμού αυτονομίας του εκάστοτε ρομποτικού συστήματος. Έτσι προτείνουν τέσσερις κατηγορίες:

1. Παθητικά ρομπότ.
2. Ημι-ενεργά ρομπότ.
3. Ενεργά ρομπότ.
4. Ρομποτικοί βραχίονες με χρήση τηλεχειρισμού.

Η παρούσα εργασία αφορά στον προγραμματισμό ενός πειραματικού ρομποτικού χειρουργικού συστήματος τύπου Master-Slave, ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη ακρίβεια των λεπτών χειρουργικών κινήσεων. Η βάση που χρησιμοποιήθηκε για αυτό είναι ένα τροποποιημένο ρομπότ τύπου Δέλτα.

Κεφάλαιο 2

Ρομποτική Χειρουργική

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία εκτενής αναφορά στην επιστήμη της ρομποτικής χειρουργικής και στα πλεονεκτήματα που μπορεί να προσφέρει στην ιατρική. Πιο συγκεκριμένα γίνεται μία ιστορική αναδρομή στην ρομποτική χειρουργική και στη συνέχεια αναφέρονται τα πλεονεκτήματα αλλά και τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει η χρήση της. Τέλος γίνεται μία αναφορά στο πως διαμορφώνεται η χειρουργική ιατρική στο σήμερα αλλά και στο μέλλον.

2.1 Ρομποτική Χειρουργική

Ρομποτική χειρουργική είναι η τεχνολογία στην οποία χρησιμοποιούνται ρομποτικά συστήματα που υποστηρίζουν τους γιατρούς στις χειρουργικές επεμβάσεις. Η ρομποτική χειρουργική ουσιαστικά αναπτύχθηκε ώστε να ξεπεραστούν οι δυσκολίες που υπήρχαν στα θέματα των επεμβάσεων αλλά και για να ενισχύσει τις ικανότητες των χειρουργών.

Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας, και της ψηφιακής ανάλυσης δόθηκε η δυνατότητα να μεταφέρεται η πληροφορία σε μεγάλη απόσταση. Έτσι, δεν χρειαζόταν ο χειρουργός και ο ασθενής να βρίσκονται στον ίδιο χώρο. Κατά τη διάρκεια της επέμβασης με χρήση κάποιου ρομπότ, ο χειριστής-γιατρός που κάνει την επέμβαση βρίσκεται μπροστά σε κάποιον Η/Υ όπου με τη βοήθεια ενδοσκοπικής κάμερας βλέπει το χειρουργικό πεδίο τροποποιημένο κατάλληλα (μεγεθυμένο, πιο σταθερό κλπ) και χρησιμοποιώντας ειδικά τηλεχειριστήρια εκτελεί την επέμβαση (σχέση master-slave). Οι κινήσεις του χειρουργού μεταφέρονται με πολύ μεγάλη ακρίβεια στους βραχίονες του εκάστοτε ρομπότ, οι οποίοι τελικά πραγματοποιούν την επέμβαση. Σημειώνεται ότι ο χειρουργός πρέπει να είναι ειδικά εκπαιδευμένος στην ρομποτική χειρουργική για να πραγματοποιήσει τέτοιες επεμβάσεις.

Όπως αναφέρθηκε μία μεγάλη πρόκληση που έπρεπε να αντιμετωπίσει η ρομποτική χειρουργική είναι αυτή της τηλεϊατρικής (σχήμα 2.1). Η NASA αλλά και ο Αμερικάνικος στρατός προείδαν την αξία της ρομποτικής χειρουργικής και της αποσύνδεσης του χειρουργού από το χειρουργικό πεδίο/ασθενή. Στόχος τους ήταν να μπορεί να γίνει κάποια επέμβαση τόσο σε αστροναύτες, ενώ ο χειρουργός θα βρισκόταν στη γη, αλλά και σε τραυματισμένους στρατιώτες ενώ ο χειρουργός θα βρισκόταν σε ένα ασφαλές σημείο. Αυτές οι ανάγκες αποτέλεσαν την αρχή της ρομποτικής χειρουργικής.

Ένα ακόμα πρόβλημα που έπρεπε να λύσει η τεχνολογία της ρομποτικής χειρουργικής είναι αυτή της μηχανολογικής σκοπιότητας, δηλαδή η δημιουργία κατάλληλων εύκαμπτων εργαλείων, για λαπαροσκοπικές επεμβάσεις. Έτσι, στο τομέα της ρομποτικής χειρουργικής υπήρξε ανάπτυξη από σχεδιαστική σκοπιότητα, που προσέφερε περισσότερα εύκαμπτα εργαλεία με περισσότερους βαθμούς ελευθερίας, πιο εργονομική θέση της χειρουργικής ομάδας και τριδιάστατη και ακριβέστερη απεικόνιση του χειρουργικού πεδίου [29].



Σχήμα 2.1: Ρομποτικό Χειρουργικό Σύστημα DaVinci (Σύστημα για τηλείατρικής) [30]

2.2 Ιστορική Αναδρομή

Η ρομποτική χειρουργική έχει πολλές εφαρμογές και συνεχίζει να επεκτείνεται και να εφαρμόζεται και σε άλλα πεδία της ιατρικής. Ενώ η επιστήμη αυτή είναι σχετικά νέα, η εξέλιξη που έχει γίνει είναι αξιοσημείωτη. Το μέλλον της διαγράφεται πιο ενδιαφέρον, αφού σήμερα είμαστε ουσιαστικά στα πρώτα βήματα της.

Ιστορικά η ρομποτική χειρουργική μπορεί να χωρισθεί σε 5 γενιές:

- Λαπαροσκοπικές επεμβάσεις (Μηδενική γενιά) [31].
- Στερεοτακτικές επεμβάσεις (Πρώτη γενιά).

Τέτοιου είδους συστήματα προσφέρουν ακρίβεια και χρησιμοποιήθηκαν κυρίως σε νευρολογικές και ορθοπαιδικές εγχειρήσεις. Τα ρομπότ αυτού του είδους έτειναν να γίνουν πιο μικρά και ελαφριά.

- Επιδέξια "άκαμπτα" ρομπότ για ελάχιστη επεμβατική χειρουργική (Δεύτερη γενιά)

Με την ανάπτυξη των παραπάνω ρομποτικών συστημάτων-γενιών οδήγηθήκαμε στην ανάγκη για ευελιξία κινήσεων πέρα από τις ανθρώπινες δυνατότητες καθώς και μία όσο το δυνατόν καλύτερη απεικόνιση της χειρουργικής επέμβασης. Τα ρομπότ αυτής της γενιάς προσπάθησαν να δώσουν λύση σε αυτά τα προβλήματα. Σε αυτή τη γενιά ανήκει και το ρομπότ Da Vinci, το οποίο αποτελεί και το πιο γνωστό και πετυχημένο ρομπότ για χειρουργικές επεμβάσεις. Η γενιά αυτή έθεσε τη βάση για την επόμενη.

- Επιδέξια "εύκαμπτα" ρομπότ για ελάχιστη επεμβατική χειρουργική (Τρίτη γενιά)

Αν και πρόκειται για μία πολύ πρόσφατη γενιά, ο κύριος στόχος είναι η βελτιστοποίηση όλων των παραπάνω, με σημαντικότερη την ανάγκη για ελαχιστοποίηση των τραυματών εισόδου. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκαν τα πρώτα ρομπότ με εύκαμπτα χειρουργικά εργαλεία. Τα εργαλεία αυτά αποτελούν με την σειρά τους εξαρτήματα μικρό-μηχανοτρονικής τα οποία θα έχουν ενεργό έλεγχο σχήματος, κάτι που μέχρι τώρα δεν γινόταν.

- Αποσυνδεδεμένες χειρουργικές επεμβάσεις (Τέταρτη γενιά)



Σχήμα 2.2: Πλεονεκτήματα ρομποτικής χειρουργικής

Πρόκειται για μικροσκοπικά ρομπότ τα οποία θα εισέρχονται στο σώμα του ασθενή και χωρίς να δημιουργούν καθόλου τραύματα θα μπορούν να εκτελούν τη δουλειά του χειρουργού. Η γενιά αυτή των ρομπότ βρίσκεται ακόμα σε πρώιμο στάδιο, αλλά τα μέχρι στιγμής πειραματικά αποτελέσματα είναι πολλά υποσχόμενα.

Η εξέλιξη της χειρουργικής ρομποτικής έχει οδηγήσει πολλές επεμβάσεις να θεωρούνται επεμβάσεις "ρουτίνας". Είναι πλέον κατανοητό ότι μόνο με την συνεργασία ρομπότ ανθρώπου θα μπορέσουμε να έχουμε πραγματική εξέλιξη στον τομέα της χειρουργικής ρομποτικής. Ο χειρουργός με την εμπειρία του και τις γνώσεις δίνει τις εντολές και το ρομπότ με την ακρίβεια και την ταχύτητα τις εκτελεί.

2.3 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα

Στην ενότητα αυτή γίνεται μια σύντομη αναφορά στα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η χειρουργική ρομποτική τόσο από τη μεριά του ασθενή όσο και από τη μεριά του χειρουργού (σχήμα 2.2).

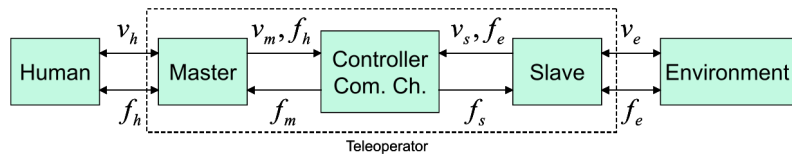
Έτσι έχουμε:

- Πλεονεκτήματα από τη μεριά των χειρουργών:
 1. Ο χρόνος που απαιτείται για να μάθει ένας χειρουργός να χρησιμοποιεί ένα τέτοιο σύστημα, είναι σχετικά μικρός με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ιδιαίτερα νεκρός χρόνος εκμάθησης.
 2. Η απεικόνιση που προσφέρει το σύστημα είναι από 10 έως 15 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους.
 3. Τα προβλήματα των λαπαροσκοπικών επεμβάσεων λύνονται.

4. Ο χειρουργός έχει μία τρισδιάστατη απεικόνιση του χειρουργικού πεδίου το οποίο οδηγεί σε πολύ καλύτερη δυνατότητα κίνησης κατά την επέμβαση, αφού έχει πολύ καλύτερη κατανόηση της πραγματικότητας.
 5. Η εικόνα που προσφέρει ένα σύστημα ρομποτικής χειρουργικής επιτρέπει στον χειρουργό να βλέπει σε σημεία που μέχρι τώρα ήταν αδύνατο. Κατά συνέπεια μπορεί να επέμβει σε σημεία χωρίς να δημιουργήσει μεγάλο τραύμα χωρίς ιδιαίτερη δυσκολία.
 6. Πολλές περίπλοκες κινήσεις όσο αφορά μια χειρουργική διαδικασία ξεπερνιούνται με σχετική ευκολία. Τα λαπαροσκοπικά εργαλεία τελευταίας γενιάς είναι σε θέση να κάνουν όλες τις κινήσεις που θα μπορούσε να κάνει το ανθρώπινο χέρι (7 βαθμοί ελευθερίας) και ακόμα παραπάνω. Τα εργαλεία αυτά πέρα από την τεράστια ακρίβεια και δεξιοτήτα που προσφέρουν, επιτρέπουν και κινήσεις που είναι αδύνατες για το ανθρώπινο χέρι, όπως την στροφή 360 μοιρών.
 7. Το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται ο χειρουργός κατά τη διαδικασία επέμβασης είναι εργονομικά σχεδιασμένο. Σε αντίθεση με τις συμβατικές επεμβάσεις ο χειρουργός σε μία ρομποτική χειρουργική επέμβαση μπορεί να είναι καθισμένος σε ένα ειδικά διαμορφωμένο χώρο με όσο δυνατόν πιο ευχάριστο περιβάλλον. Αυτό εξασφαλίζει μία όσο το δυνατόν πιο ξεκούραστη επέμβαση από τη μεριά του χειρουργού κάνοντας τον πιο αποδοτικό και αποτρέποντας προβλήματα που μπορεί να εμφανιστούν λόγω κόπωσης.
 8. Ίσως το πιο σημαντικό προτέρημα που προσφέρει η επέμβαση με τη βοήθεια ενός ρομπότ, πέρα από το κομμάτι της τηλεϊατρικής, είναι ότι οι κινήσεις που κάνει το ρομπότ αποτελούν φιλτραρισμένες κινήσεις που έρχονται από την κονσόλα του χειρουργού. Έτσι υπάρχει δυνατότητα εξάλειψης πλήρως του φυσιολογικού τρόμου των χεριών. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται μία άριστη δεξιότητα κινήσεων κατά τη διάρκεια της επέμβασης.
- Πλεονεκτήματα από την μεριά των ασθενών:
 1. Ο χειρουργικός τραυματισμός των ιστών του ασθενή μειώνεται σε πολύ μεγάλο βαθμό, το οποίο οδηγεί σε μικρότερες ουλές και άρα σε καλύτερο αισθητικό αποτέλεσμα.
 2. Λόγω ότι το χειρουργικό τραύμα είναι μικρότερο, υπάρχουν μικρότερες απώλειες αίματος με αποτέλεσμα να απαιτούνται λιγότερες μεταγγίσεις.
 3. Επιπροσθέτως, λόγω του μικρότερου τραύματος ο χρόνος ανάρρωσης και ο χρόνος εξόδου από το νοσοκομείο μειώνεται αισθητά πράγμα που οδηγεί σε χαμηλότερο κόστος όσο αφορά το κόστος νοσηλείας.
 4. Λόγω των δυνατοτήτων που προσφέρει η επέμβαση με τη βοήθεια ενός ρομπότ, ο χρόνος επέμβασης είναι πολύ μικρότερος και λιγότερο επίπονος για τον ασθενή με αποτέλεσμα να μειώνεται ο κίνδυνος για καρδιαγγειακά και αναπνευστικά προβλήματα.

Εκτός από πλεονεκτήματα, μία χειρουργική επέμβαση με ρομπότ μπορεί να έχει και μειονεκτήματα, όπως:

- Μιας και η ρομποτική χειρουργική είναι σχετικά νέα, δεν υπάρχουν δεδομένα για το μακροπρόθεσμο όφελος της σε σχέση με τις κλασσικές μεθόδους. [32].
- Το κόστος απόκτησης ενός ρομποτικού συστήματος είναι αρκετά μεγάλο (1.5-2 εκατ. €) και αποτελεί ένα σημαντικό μειονέκτημα [32].
- Ένα ακόμα μειονέκτημα είναι το μέγεθος που έχουν συνήθως αυτά τα συστήματα. Το βασικό πρόβλημα βρίσκεται στο γεγονός ότι συνήθως ο χώρος της επέμβασης, στα σημερινά νοσοκομεία, είναι σχετικά περιορισμένος [32].



Σχήμα 2.3: Master-Slave διάγραμμα [35]

- Τα επεμβατικά εργαλεία βρίσκονται ακόμα σε στάδιο ανάπτυξης σαν τεχνολογία με αποτέλεσμα αυτά που απαιτούνται σε μία επέμβαση να μην είναι έτοιμα διαθέσιμα για ρομπότ [32].

Τα περισσότερα, αν όχι όλα τα μειονεκτήματα που αναφέρθηκαν, θα ξεπεραστούν με την ωρίμανση της τεχνολογίας. Παρόλα αυτά ο χρόνος είναι αυτός που θα δείξει αν θα πρέπει να κατευθυνθούμε κι άλλο προς την χειρουργική ρομποτική και κατά πόσο θα γίνει ευρέως αποδεκτή από την ιατρική κοινότητα.

2.4 Τηλεχειρουργικές επεμβάσεις βάσει master-slave τηλεχειρισμού

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω ένας από τους βασικούς τρόπους που γίνονται οι χειρουργικές επεμβάσεις σήμερα είναι με την χρήση σχέσης master-slave τηλεχειρισμού. Σε αυτή την ενότητα θα γίνει μία προσπάθεια για επεξήγηση του όρου καθώς και μια πιο τεχνική αναφορά στην σχέση αυτή, αφού είναι και η βάση που αναπτύχθηκε η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία.

Μία σχέση master-slave είναι ουσιαστικά μία σχέση μεταξύ δύο επιμέρους τμημάτων. Το ενεργό τμήμα στο οποίο επεμβαίνει ο χειριστής μεταφράζει τις κινήσεις αυτές στο παθητικό. Η διμερής σχέση αυτή προσφέρει μία οπτική αίσθηση στον χειριστή σε σχέση με το παθητικό τμήμα, που όπως έχει αναφερθεί παραπάνω μπορεί να βρίσκεται σε απόσταση.

Τα βασικά στοιχεία που αποτελούν ένα τυπικό σύστημα Master-Slave είναι πέντε (εικόνα 2.3). Αυτά είναι ο χειριστής, το master ρομπότ που ο χειριστής επενεργεί πάνω του, το κανάλι επικοινωνίας, το slave ρομπότ το οποίο κάνει τις κινήσεις που του έχει στείλει το Master και τέλος το περιβάλλον κίνησης [33], [34]. Ο χειριστής χρησιμοποιεί το master ρομπότ για να κινήσει το slave ρομπότ στο περιβάλλον κίνησης του. Αυτή η διαδικασία γίνεται με την βοήθεια ενός συστήματος ελεγκτή, το οποίο περιλαμβάνει τους τοπικούς ελεγκτές (master), του ελεγκτές του απομακρυσμένου συστήματος (slave) καθώς και το σύστημα επικοινωνίας.

Η επικοινωνία μπορεί να είναι μίας κατεύθυνσης ή και αμφίδρομη. Στην πρώτη περίπτωση η επικοινωνία ουσιαστικά συνίσταται στην αποστολή δεδομένων θέσης και δύναμης από το master στο slave. Αντίθετα, στην δεύτερη περίπτωση υπάρχει ανατροφοδότηση θέσης και δύναμης και από το slave στο master. Πρέπει να σημειωθεί ότι και στις δύο περιπτώσεις η απεικόνιση του περιβάλλοντος και του ίδιου του slave στο master είναι απαραίτητη. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι σε αυτή την επικοινωνία υπάρχει μια σχετική καθυστέρηση της τάξης των ms ανάμεσα στο πακέτο από το master στο slave και από το slave στο master.

Στόχος ενός τέτοιου συστήματος τηλεχειρισμού είναι να προσφέρει στον χειριστή την αίσθηση ότι πραγματοποιεί την επέμβαση χωρίς τη χρήση ρομπότ. Η μονάδα μέτρησης αυτού του στόχου ονομάζεται διαφάνεια (transparency). Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορα κριτήρια για την μέτρηση της διαφάνειας όπως η ακρίβεια κινήσεων ή η αντίσταση που νοιώθει ο χειριστής από το σύστημα για να αισθάνεται ότι κάνει την επέμβαση ο ίδιος[35].

Κεφάλαιο 3

Πλάτφορμα Μεταπτυχιακής εργασίας

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει η γενική περιγραφή όλων των τμημάτων του ρομπότ που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα μεταπτυχιακή εργασία. Έτσι θα γίνει αναφορά τόσο στο ρομπότ της εργασίας όσο και στα επιμέρους εξαρτήματα όπως το άκρο εργασίας, το σύστημα επικοινωνίας με το χειρουργό αλλά και τα επιμέρους μικρότερα τμήματα όπως τους σερβοκινητήρες και τα συστήματα επικοινωνίας του ρομπότ με τον υπολογιστή (DAC).

3.1 Μηχανολογική περιγραφή του ρομπότ

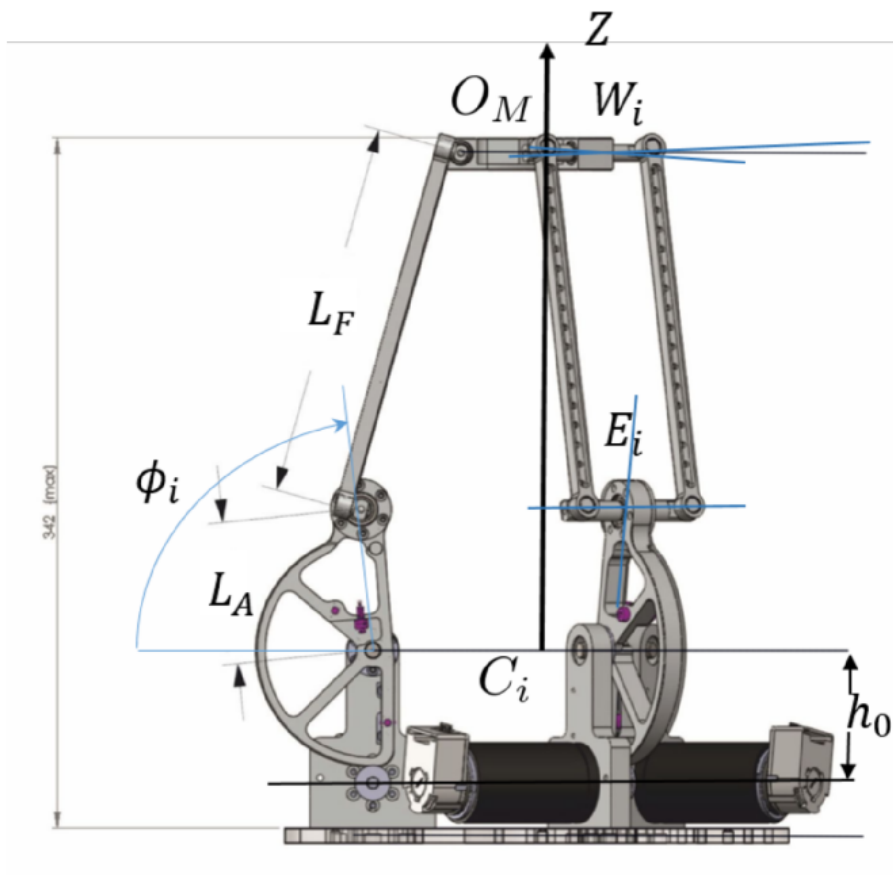
Στην ενότητα αυτή γίνεται μια σύντομη περιγραφή των μηχανολογικών χαρακτηριστικών τόσο του απλού ρομπότ Δέλτα όσο και του Διπλού Δέλτα. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται εκτενέστερη ανάλυση των τεχνικών χαρακτηριστικών του ρομπότ που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία καθώς και μία γενικότερη αναφορά στα παράλληλα ρομπότ.

3.1.1 Ρομπότ τύπου Δέλτα

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει μία ανάλυση στα ρομπότ Δέλτα καθώς και μία πιο συγκεκριμένη περιγραφή του συγκεκριμένου ρομπότ που χρησιμοποιήθηκε στην μεταπτυχιακή εργασία.

Το ρομπότ δέλτα εμφανίστηκε για πρώτη φορά στις αρχές του 1980 στο Πολυτεχνείο της Λωζάνης (École Polytechnique Fédérale de Lausanne) από τον Reymond Clavel [36] [37], με στόχο να μπορεί να εκτελέσει γρήγορα εργασίες pick and place σε αντικείμενα με μικρό σχετικά βάρος.

Πρόκειται για ένα μηχανισμό που κινείται στις τρεις διαστάσεις με χρήση στροφικών αρθρώσεων. Είναι ένα παράλληλο ρομπότ και έτσι παρουσιάζει τα θετικά στοιχεία που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Ένα από τα χαρακτηριστικά που κάνουν το ρομπότ Δέλτα να ξεχωρίζει και να χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία αλλά και στην έρευνα [38], είναι η απομόνωση των κινητήρων κοντά στο έδαφος, κάνοντας το να μην χρειάζεται να έχει βαριά συνδετικά τμήματα. Επίσης παρουσιάζει μια από τις καλύτερες σχέσεις χώρου εργασίας και μεγέθους μηχανισμού. Διατηρεί πάντα τον προσανατολισμό του άκρου εργασίας του. Κατά κύριο λόγο τα ρομπότ αυτά χρησιμοποιούνται σε δραστηριότητες που απαιτούν πολύ μεγάλες ταχύτητες όπως pick and place δουλειές[39].

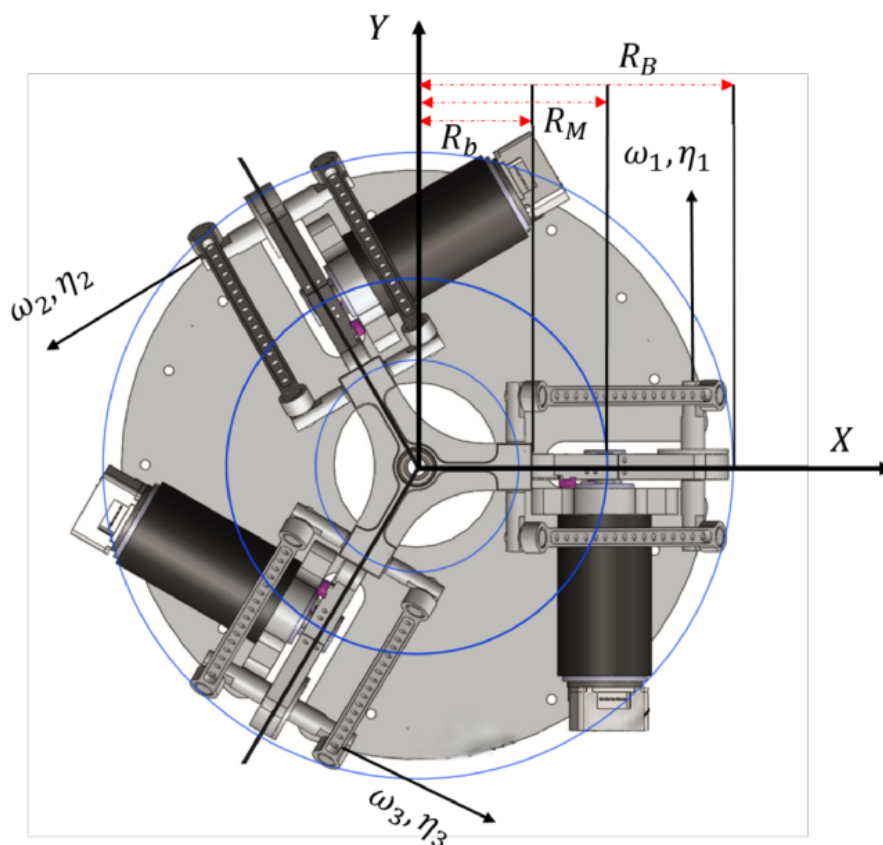


Σχήμα 3.1: Πλάγια όψη ρομπότ δέλτα [40]

Γεωμετρικά στοιχεία	
Ονομασία	Τιμή
R_b	42mm
R_M	80mm
R_B	150mm
L_A	70mm
L_F	183mm

Η μεγάλη ταχύτητα που έχει, μπορεί να το κάνει έναν πολύ καλό σύμμαχο σε δουλειές που απαιτούν έναν συνδυασμό ταχύτητας και ακρίβειας. Έτσι εύκολα μπορούμε να σκεφτούμε την χρήση ενός τέτοιου ρομπότ για χειρουργικές επεμβάσεις. Το βασικό μειονέκτημα ενός συμβατικού ρομπότ δέλτα για χειρουργικές χρήσεις είναι ο μειωμένος βαθμός ευελιξίας λόγω των τριών βαθμών ελευθερίας. Το πρόβλημα αυτό επιχειρείται να λυθεί με την χρήση ενός Διπλού ρομπότ Δέλτα για το οποίο θα γίνει ανάλυση στην επόμενη ενότητα.

Το ρομπότ που χρησιμοποιήσαμε κατασκευάστηκε από την εταιρεία ACCREA Engineering και παρουσιάζεται στην εικόνα 3.2 μαζί με κάποια βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του. Όπως φαίνεται και από την εικόνα 3.1, το ρομπότ Δέλτα είναι ανεστραμμένο σε σχέση με τυπική διαμόρφωση του ρομπότ Δέλτα του Clavel. Η ίδια εταιρεία είναι αυτή που προσέφερε στο εργαστήριο ρομποτικής το τροποποιημένο ρομο



Σχήμα 3.2: Άνω όψη ρομπότ δέλτα [40]

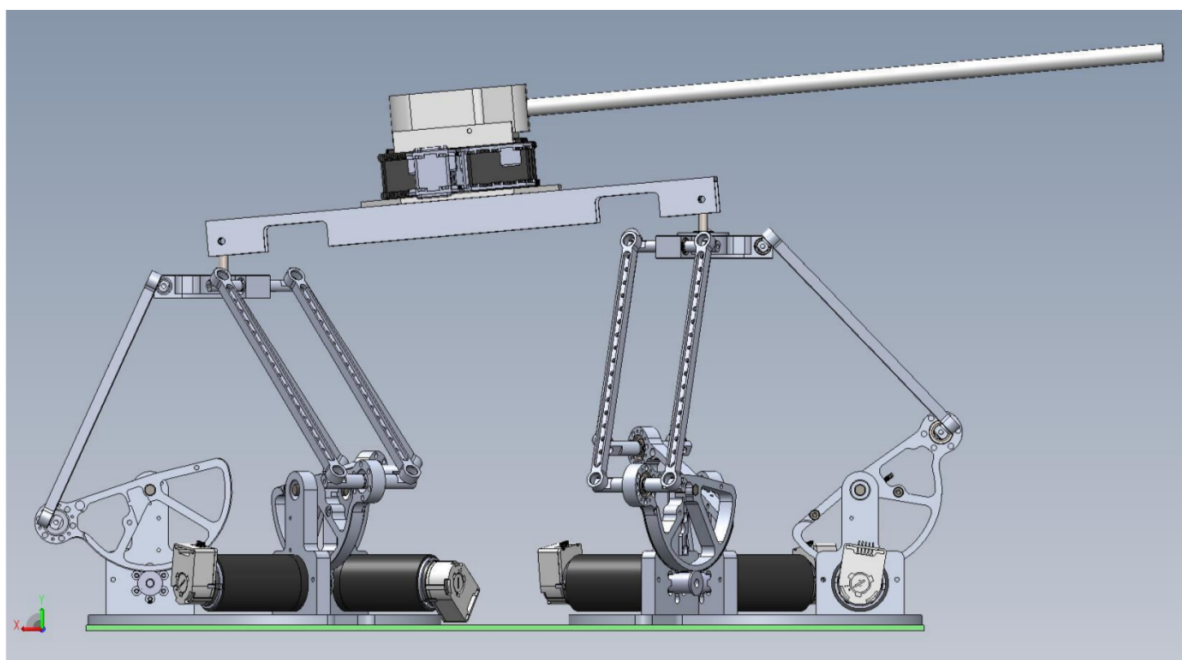
3.1.2 Ρομπότ τύπου διπλού Δέλτα

Όπως έχει αναφερθεί ένα ρομπότ τύπου Δέλτα παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα με κύριο το μειωμένο εύρος κινήσεων. Η εργασία αυτή επικεντρώνεται σε ένα ρομπότ διπλού Δέλτα όπως αυτό που φαίνεται στην εικόνα 3.3.

Το πρόβλημα του περιορισμένου χώρου εργασίας, επιχειρείται να λυθεί με τη χρήση ενός τροποποιημένου δέλτα ρομπότ το οποίο αποτελείται από δύο ρομπότ τύπου Δέλτα τοποθετημένα σε παράλληλη διάταξη, όπως φαίνεται και στην εικόνα ???. Οι βαθμοί ελευθερίας του Διπλού Δέλτα αυξάνονται στους πέντε με αποτέλεσμα να έχουμε μεγαλύτερο χώρο εργασίας και ευελιξία κινήσεων. Επιπλέον, παρέχεται η δυνατότητα για πολύ καλύτερο έλεγχο των κινήσεων λόγω της παράλληλης κινηματικής του συστήματος, πράγμα απαραίτητο για την ορθή λειτουργία σε χειρουργικό περιβάλλον.

Στην εικόνα 3.3 φαίνεται ολόκληρος ο μηχανισμός μαζί με το άκρο εργασίας. Όπως φαίνεται, ουσιαστικά το ρομπότ αποτελείται από δύο επιμέρους ρομπότ Δέλτα τα οποία είναι συνδεδεμένα παράλληλα με μία ράβδο, η οποία φέρει το χειρουργικό εργαλείο.

Έτσι έχουμε όλα τα πλεονεκτήματα ενός ρομπότ δέλτα, δηλαδή την μεγάλη ταχύτητα και την ακρίβεια των κινήσεων χωρίς να περιοριζόμαστε από τις μειωμένες κινήσεις που μπορεί να κάνει. Να σημειωθεί ότι οι βαθμοί του ρομπότ ορίζονται ως προς την ράβδο που ενώνει τα δύο δέλτα ρομπότ, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.3. Πιο συγκεκριμένα οι βαθμοί ελευθερίας ορίζονται ως προς τη βάση του άκρου της ράβδου το οποίο αποτελεί και την βάση του χειρουργικού άκρου του ρομπότ.



Σχήμα 3.3: Ρομπότ τύπου δυπλού δέλτα

Με τη σειρά του, το χειρουργικό εργαλείο έχει άλλους τέσσερις βαθμούς ελευθερίας, ανεβάζοντας τους συνολικούς βαθμούς του συστήματος στους εννιά.

Σε παρακάτω ενότητα θα γίνει και η ανάλυση της κινηματικής συμπεριφοράς τόσο του απλού ρομπότ δέλτα όσο και του διπλού ρομπότ δέλτα.

3.1.3 Χειρουργικό άκρο

Σε αυτό το σημείο αξίζει να γίνει μια αναφορά στο άκρο εργασίας του ρομπότ, δηλαδή το χειρουργικό άκρο. Πρόκειται για ένα εργαλείο Endowrist από την σειρά Intuitive Surgical's EndoWrist [41].

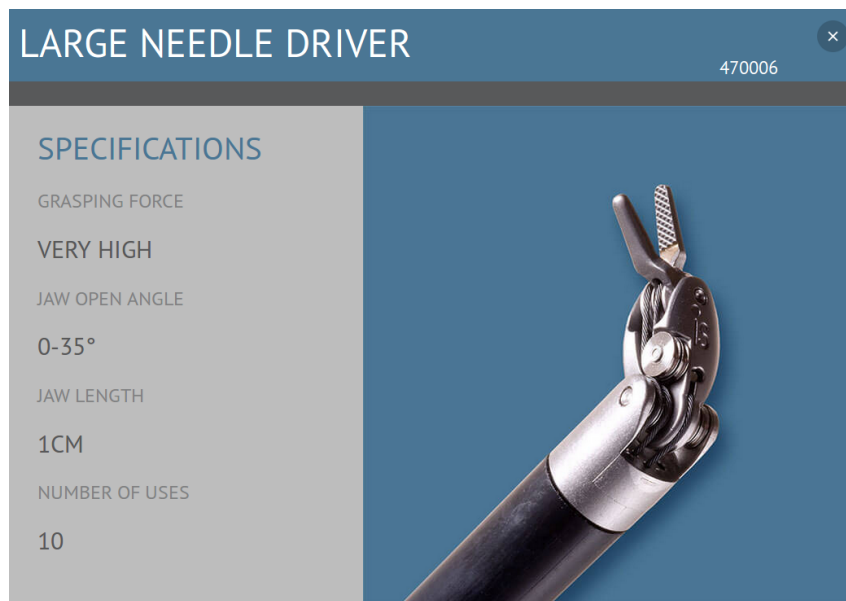
Τα ενδοσκοπικά εργαλεία τύπου EndoWrist (σχήμα 3.4) διαθέτουν 4 βαθμούς ελευθερίας και παρέχουν μεγαλύτερη δυνατότητα κίνησης από το ανθρώπινο χέρι (π.χ. στροφή 360 μοίρες) ενώ ταυτόχρονα μιμούνται την ευκινησία του ανθρώπινου καρπού, γι' αυτό και ονομάστηκαν και Endo – Wrist (Ενδο – Καρπός). Καθένα από αυτά έχει μία συγκεκριμένη χειρουργική αποστολή όπως για παράδειγμα σύσφιξη, συρραφή και χειρισμό των ιστών. Μία μεγάλη ποικιλία από εργαλεία τύπου EndoWrist είναι διαθέσιμα στον χειρουργό κατά τη διάρκεια μιας εγχείρισης ενώ συνδεδεμένοι μοχλοί δίνουν τη δυνατότητα γρήγορης αλλαγής της ταχύτητας. Τα ενδοσκοπικά εργαλεία, τα οποία είναι συνδεδεμένα με τους ρομποτικούς βραχίονες, εισάγονται μέσα από μικροτομές, λίγων χιλιοστών, στο σώμα του ασθενούς. Καθώς δεν χρησιμοποιούν το σημείο εισόδου στο σώμα του ασθενούς ως υπομόχλιο μειώνεται σημαντικά η βλάβη των ιστών στο σημείο εισόδου των εργαλείων, γεγονός που αποτελεί ένα μεγάλο πλεονέκτημα της λαπαροσκοπικής χειρουργικής.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το χειρουργικό εργαλείο (tip) που έχει χρησιμοποιηθεί είναι της εταιρείας της Intuitive Surgical©. Πιο συγκεκριμένα πρόκειται για το μοντέλο Large Needle Driver 3.5 το οποίο έχει τέσσερις βαθμούς ελευθερίας: Roll, Yaw και δύο έξτρα βαθμούς ελευθερίας που ελέγχουν την κίνηση των δύο επιμέρους σιαγόνων του tip.

Τα εργαλεία αυτά πρέπει να αντιμετωπίσουν το βασικό πρόβλημα της αντιστοίχισης (mapping) των κινήσεων του χειρουργού στο εκάστοτε master σύστημα στην τελική κίνηση του εργαλείου. Για



Σχήμα 3.4: Endowrist Instrument [41]



Σχήμα 3.5: Endowrist χειρουργικό εργαλείο [42]

να επιτευχθεί αυτό είναι απαραίτητο να υπάρχει μία προσαρμοστικότητα του συστήματος στον εκάστοτε χειριστή [43].

Στην παρούσα μεταπτυχιακή, το σύστημα του χειρουργικού tip ελέγχεται με την χρήση σερβοκινητήρων. Συγκεκριμένα οι σερβοκινητήρες που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι HerkuleX DRS-0201 Smart Robot Servo©3.6. Οι κινητήρες αυτοί έχουν ιδιαίτερα καλά χαρακτηριστικά, όπως:

- Προσφέρουν δύο ειδών ελεγκτές PID και Feedforward. Στην μεταπτυχιακή εργασία χρησιμοποιήσαμε τον PID ελεγκτή.
- Προσφέρουν τραπεζοειδές προφίλ ταχύτητας, που κάνει την κίνηση αρκετά ομαλή και ικανοποιητική για το σκοπό της παρούσας εργασίας.
- Προσφέρει μεγάλη δυνατότητα παραμετροποίησης ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικά σενάρια.

Για να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν στο σύστημα μας, αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα οδήγησης (driver) των συγκεκριμένων σερβοκινητήρων σε C++ με χρήση του περιβάλλοντος του ROS. Στόχος του εν λόγω προγράμματος ήταν να έχουμε ένα σύστημα με ελεγχόμενη και σταθερή συμπεριφορά.

Στα πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασίας αναπτύχθηκε το software για να μπορεί να κινηθεί το endowrist με ακρίβεια του δεκάτου της μίρας. Κατά τη σχεδίαση της αρχιτεκτονικής του συστήματος



Σχήμα 3.6: HerkuleX DRS-0201 Smart Robot Servo [42]

για την κίνηση του χειρουργικό εργαλείου σχεδιάστηκε ο έλεγχος του με λύση του ανάστροφου κινηματικού του μοντέλου, με την προϋπόθεση ότι το άκρο εργασίας θα κινείται στην γραμμική περιοχή λειτουργίας (μετά από κάποιες μοίρες οι βαθμοί ελευθερίας δεν είναι γραμμικά ανεξάρτητοι) αλλά και με τηλεχειρισμό και άμεση εκτέλεση των κινήσεων του Master στο Slave με κάποιο σταθερό συντελεστή. Επιλέξαμε να κινήθουμε με την δεύτερη μέθοδο καθώς θεωρήσαμε ότι θα ήταν καλύτερο οι κινήσεις του χειρουργού να μεταφραζόνται άμεσα στην κίνηση του άκρου για να έχουμε την καλύτερη δυνατή ανταπόκριση του συστήματος.

Για τον κώδικα του συστήματος μπορεί κανείς να δει εδώ <https://bitbucket.org/4cc3pt4nc3/>.

3.1.4 Κατηγορίες τηλεχειρισμού

Στον τηλεχειρισμό υπάρχουν διαφόρων ειδών αρχιτεκτονικές και μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα την επικοινωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο master και στο slave. Έτσι έχουμε τις εξής κλάσεις τηλεχειρισμού.

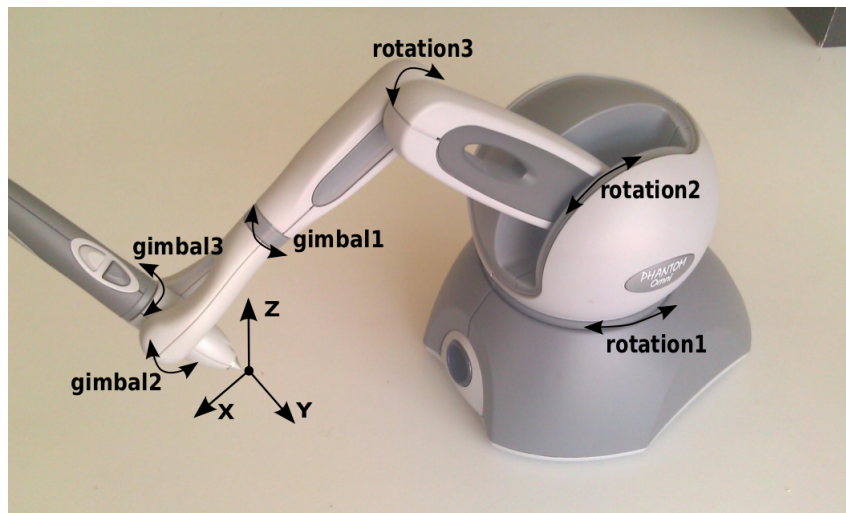
- Τηλεχειρισμός με σχέση θέσης-θέσης[44].
- Τηλεχειρισμός με σχέση θέσης-δύναμης [45], [46].
- Τηλεχειρισμός με σχέση δύναμης-δύναμης [47].
- Τηλεχειρισμός με τετραπλή σχέση επικοινωνίας. Σε αυτή την περίπτωση τόσο το master όσο και το slave δέχονται δεδομένα για τη θέση/ταχύτητα και τη δύναμη από την αντίθετη μεριά. [35], [48], [49].

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, η συγκεκριμένη μεταπτυχιακή εργασία χρησιμοποιεί σαν παράδειγμα επικοινωνίας αυτό της σχέσης master-slave. Για να μπορέσουμε να πετύχουμε μία τέτοια κίνηση χρειαζόμασταν κατάλληλο εξοπλισμό που θα προσομοίωνε την κίνηση που θα έκανε ο χειρουργός. Για το λόγο αυτό επιλέξαμε το Phantom Omni 3.7, το οποίο είναι ένα απτικό χειριστήριο με έξι βαθμούς ελευθερίας το οποίο έχει αναπτυχθεί από την Sensable Technologies[50].

Το απτικό αυτό εργαλείο προσφέρει τη δυνατότητα στους χειριστές να κινήσουν διάφορα αντικείμενα που μπορεί να βρίσκονται μακριά από το σημείο του χειριστή. Οι έξι βαθμοί ελευθερίας που φαίνονται και στην εικόνα 3.8 και τα δύο κουμπιά που έχει το καθιστούν εξαιρετικό εργαλείο για τέτοια συστήματα τηλεχειρισμού. Επισυναπτικά για το απτικό αυτό εργαλείο έχουμε [52]:



Σχήμα 3.7: Phantom Omni haptic Device [51]



Σχήμα 3.8: Βαθμοί ελευθερίας του Phantom Omni haptic Device [52]

- Αποτελεί μία πολύ καλή επιλογή από άποψη σχέσης ποιότητας-κόστους.
- Έχει δυνατότητα να προσφέρει ανάδραση δύναμης (μέχρι 3,3N), καθώς υπάρχουν κινητήρες στο εσωτερικό του. Με αποτέλεσμα να μπορεί να δημιουργήσει στον χειριστή την αίσθηση ότι κάνει κανονικά την κίνηση (στην δικιά μας περίπτωση την επέμβαση).
- Προσφέρει κίνηση σε τρεις διευθύνσεις στο άκρο εργασίας χάρες στις gimbal αρθρώσεις (roll, pitch, yaw), ενώ η θέση του άκρου παραμένει σταθερή.
- Το πρωτόκολλο επικοινωνίας "FireWire" επιτρέπει η χρήση της συσκευής σε ένα σύστημα πραγματικού χρόνου (τα συστήματα πραγματικού χρόνου αναλύονται στο Κεφάλαιο 4))
- Προσφέρει ένα μεγάλο εύρος λειτουργιών στο API, που έχει αναπτυχθεί σε C/C++.

Πρέπει να σημειωθεί ότι και οι 6 βαθμοί ελευθερίας του είναι στρωφικοί αλλά μόνο οι πρώτοι 3 (από τη βάση του) έχουν επενεργητή (κινητήρα) και κατά συνέπεια μπορούν να παρέχουν ανάδραση δύναμης.

Στη εργασία αυτή χρησιμοποιήσαμε τους 5 βαθμούς ελευθερίας του Omni για τον τηλεχειρισμό του μηχανισμού διπλού Δέλτα (Double Delta). Λόγω μη-συμβατότητας των περιφερειακών εξαρτημάτων με τον υπολογιστή στον οποίο εκτελείται το πρόγραμμα του Delta, το πρόγραμμα ελέγχου για το απτικό χειριστήριο εκτελείτο σε δεύτερο υπολογιστή (με windows) και η επικοινωνία γινόταν μέσω ενός UDP socket, χωρίς όμως να παρουσιάζεται εμφανής μείωση στην απόκριση του συστήματος.

3.2 Περιβάλλον ROS (Robot Operating System)

Στα πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασίας χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον του Robot Operating System (ROS). Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η έκδοση indigo του ROS σε συνδυασμό με C++ πάνω σε λειτουργικό σύστημα Ubuntu 14.04 με πυρήνα πραγματικού χρόνου Preempt-RT. Θεωρήθηκε σημαντικό να γίνει μία μικρή αναφορά σε αυτό το εργαλείο το οποίο αποτελεί ένα σημαντικό χαρακτηριστικό στη εκπόνηση της εργασίας αυτής.

Το ROS είναι ένα ευέλικτο περιβάλλοντην για ανάπτυξη λογισμικού ρομποτικών εφαρμογών. Αποτελείται από ένα σύνολο εργαλείων, βιβλιοθηκών και συνθηκών που στοχεύουν στην αυτοματοποίηση και στη διευκόλυνση του ν' αναπτύσσει κάποιος εύρωστα συστήματα γύρω από το επιστημονικό πεδίο της ρομποτικής.

Το ROS αναπτύχθηκε αφού παρατηρήθηκε ότι το να γράφει κανένας πραγματικά εύρωστο λογισμικό για ένα ρομπότ είναι τρομερά δύσκολο. Αυτό γιατί πολλές φορές ένα πρόβλημα που από τη μεριά του ανθρώπου μπορεί να θεωρείται απλό για το ρομπότ μπορεί να είναι μία σειρά από πολύπλοκες κινήσεις σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Τέτοιες δυσκολίες καθιστούν αδύνατο να μπορεί κάποια ομάδα να αναπτύξει λύσεις από το μηδέν δουλεύοντας μεμονωμένα.

Το αποτέλεσμα ήταν να δημιουργηθεί το Robot Operating System (ROS) για να ενισχύσει τη συνεργασία ανάμεσα στις διάφορες ομάδες ώστε να υπάρχει ταχύτερη εξέλιξη στον τομέα της ρομποτικής. Το ROS είναι ένα σύστημα ανοιχτού λογισμικού με αποτέλεσμα κάθε χρήστης ή ομάδα να μπορεί να συνεισφέρει στον τομέα εξειδίκευσης του. Για παράδειγμα, ένα εργαστήριο σε κάποιο πανεπιστήμιο μπορεί να έχει μεγάλη εμπειρία στην χαρτογράφηση κλειστών χώρων και έτσι μπορεί να προσφέρει στο ROS αλγόριθμους εξαιρετικής ποιότητας στον τομέα αυτό. Ομοίως ένα άλλο εργαστήριο μπορεί να έχει εμπειρία στην μηχανική όραση και κατά συνέπεια να μπορεί να προσφέρει λογισμικό εξαιρετικής ποιότητας σε αυτόν τον τομέα αυτό. Εν κατακλείδι, το ROS σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε για να μπορέσει να συνδέσει ερευνητικές, και όχι μόνο, ομάδες έτσι ώστε η κάθε μια να μπορεί να χτίσει κάτι χρησιμοποιώντας έτοιμα εργαλεία που αλλιώς θα της ήταν αδύνατο να αναπτύξει μόνη της [53].

Κεφάλαιο 4

Κινηματική ανάλυση ρομποτικών αλυσίδων

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια αναφορά στα σειριακά καθώς και στα παράλληλα ρομπότ, ενώ εξειδικεύεται η ανάλυση στα ρομπότ Δέλτα και την κινηματική τους.

4.1 Σειριακά ρομπότ

Οι σειριακοί βραχίονες (εικόνα 4.1) αποτελούν τους πιο διαδεδομένους ρομποτικούς βραχίονες στη βιομηχανία. Αποτελούνται από μία σειρά επιμέρους συνδέσμων που κινούνται με την βοήθεια κινητήρων. Έχουν μία σταθερή βάση και ένα άκρο εργασίας. Στη γενική περίπτωση οι βραχίονες αυτοί έχουν έξι βαθμούς ελευθερίας καθώς είναι οι βαθμοί που απαιτούνται για να μπορεί να τοποθετηθεί ένα αντικείμενο σε οποιαδήποτε θέση και προσανατολισμό στο χώρο εργασίας. [54].



Σχήμα 4.1: Ρομποτικός βραχίονας [55]

Τα βασικά πλεονεκτήματα ενός τέτοιου ρομπότ είναι:

- Ο χώρος εργασίας του, δηλαδή ο χώρος μέσα στον οποίο μπορεί να κινηθεί. Τα σειριακά ρομπότ προσφέρουν μεγάλο χώρο εργασίας σε σύγκριση με το μέγεθος τους.
- Συνήθως έχει σχετικά εύκολη κινηματική ανάλυση, ειδικά στο ευθύ κινηματικό και λιγότερο στο αντίθετο.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές διαφορετικές εργασίες, από εργασίες pick and place μέχρι εργασίες βαφής.

Τα ρομπότ αυτά από την άλλη παρουσιάζουν κάποια μειονεκτήματα όπως:

- Μικρή στιβαρότητα η οποία οφείλεται στην ανοιχτή κινηματική αλυσίδα του ρομπότ.
- Τα σφάλματα της κάθε άρθρωσης αθροίζονται στο τελικό σημείο δράσης.
- Αναγκαστικά τα περισσότερα ρομπότ πρέπει στις κινήσεις τους να σηκώνουν και το βάρος των κινητήρων των επόμενων αρθρώσεων πράγμα που καθιστά απαραίτητη την ανάγκη για μεγάλους και ισχυρούς κινητήρες.
- Μπορούν να σηκώσουν σχετικά μικρό φορτίο σε σχέση με το μέγεθος τους και το βάρος τους.
- Δεν παρουσιάζουν καλή συμπεριφορά σε μεγάλες επιταχύνσεις και ταχύτητες λόγω των αδρανειακών χαρακτηριστικών τους.

4.2 Παράλληλα Ρομπότ

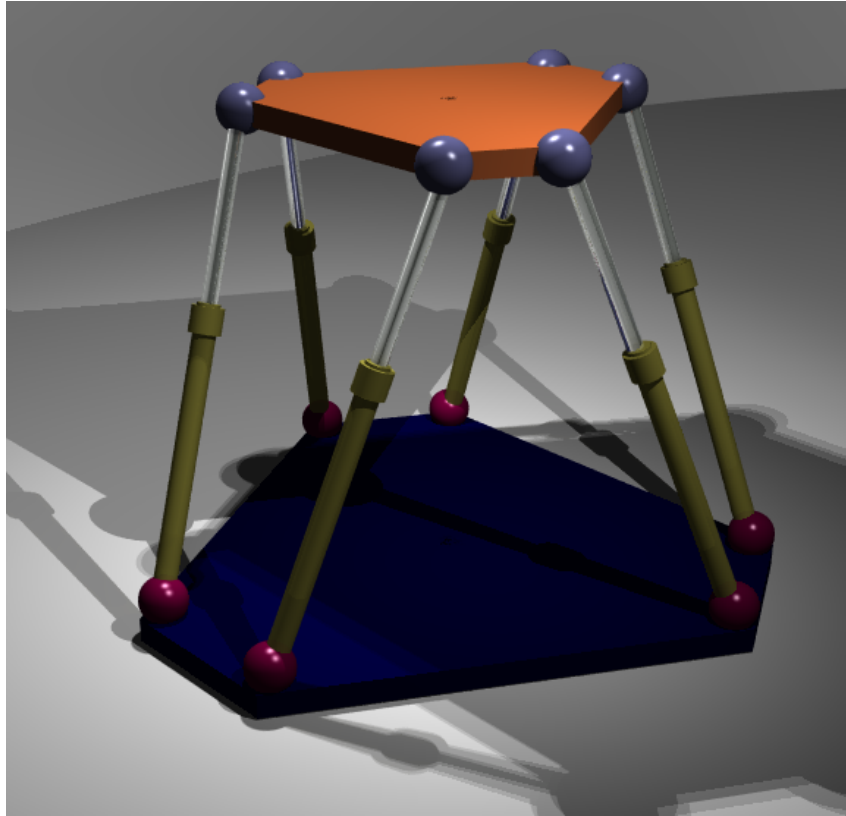
Τα παράλληλα ρομπότ είναι μηχανικά συστήματα που χρησιμοποιούν διάφορες επιμέρους σειριακές κινηματικές αλυσίδες ώστε να κινήσουν μία πλατφόρμα ή κάποιο άκρο εργασίας. Ένα από τα πιο γνωστά παράλληλα ρομπότ είναι η πλατφόρμα Stewart, η οποία αποτελείται από έξι γραμμικές αρθρώσεις που στηρίζουν μία βάση (εικόνα 4.2).

Τα σειριακά ρομπότ όπως αναφέραμε και παραπάνω χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στη βιομηχανία, αλλά λόγω μειονεκτημάτων τους με κυριότερο την κακή συμπεριφορά τους σε υψηλές ταχύτητες, γίνονται προσπάθειες για την αντικατάστασή τους με κλειστές κινηματικές αλυσίδες, δηλαδή με παράλληλα ρομπότ. Περιπτώσεις που χρειάζεται να γίνει αυτή η μετάβαση είναι:

- Για εργασίες συναρμολόγησης.
- Για εργασίες επεξεργασίας υλικών (με χρήση ανάδρασης δεδομένων).
- Για εργασίες που απαιτούν πολύ μεγάλες ταχύτητες, όπως pick and place.
- Για εργασίες με μεγάλη ακρίβεια (όπως χειρουργικές επεμβάσεις).

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στον προγραμματισμό ενός τέτοιου παράλληλου ρομπότ για χειουργικές επεμβάσεις.

Η στροφή προς τα παράλληλα ρομπότ στηρίζεται στα προτερήματα που αυτά παρουσιάζουν όπως π.χ : Η μεγαλύτερη στιβαρότητα και ακρίβεια αφού δεν έχουν ογκώδεις και βαρείς συνδέσμους σαν κι αυτούς των σειριακών βραχιόνων, μεγάλη σχέση δύναμης και ροπής σε σύγκριση με το μέγεθος των κινητήρων τους. Το σημαντικότερο όμως χαρακτηριστικό που παρουσιάζουν τέτοιου είδους ρομπότ είναι η ευκολία λύσης του ανάστροφου κινηματικού, πράγμα που τα κάνει ιδιαίτερα εύχρηστα σε εφαρμογές ελέγχου πραγματικού χρόνου. Τέλος λόγω του μεγέθους τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μέρη που δεν χρειάζεται μεγάλος χώρος εργασίας αλλά η ακρίβεια και η ταχύτητα. Σημαντικό επίσης είναι, η αντοχή που παρουσιάζουν τέτοια ρομπότ σε δυναμικές φορτίσεις. Όλα τα παραπάνω σενάρια μπορούν να υπάρξουν σε μια χειρουργική επέμβαση [57].



Σχήμα 4.2: Παράλληλα ρομπότ [56]

Μια σύγκριση των σειριακών και παράλληλων ρομπότ δίδεται στον παρακάτω πίνακα [58]:

Συγκριτικός πίνακας		
Χαρακτηριστικό	Σειριακά Ρομπότ	Παράλληλα ρομπότ
Χώρος εργασίας	Μεγάλος	Μικρός και σχετικά περίπλοκος
Λύση ευθέως κινηματικού	Εύκολη	Πολύ δύσκολη
Λύση ανάστροφου κινηματικού	Δύσκολη	Εύκολη
Σφάλμα θέσης	Προσθετικό	Μέσου όρου
Μέγιστη δύναμη	Περιορίζεται από τη δύναμη του εκάστοτε κινητήρα	Άθροισμα όλων των επιμέρους κινητήρων
Στιβαρότητα	Μικρή	Μεγάλη
Δυναμικά Χαρακτηριστικά	Άσχημα σε σχέση με τον όγκο	Πολύ καλά
Λύση δυναμικών χαρακτηριστικών	Εύκολη	Πολύπλοκη
Αδρανειακά χαρακτηριστικά	Μεγάλα	Μικρά
Εφαρμογές	Μέγαλο εύρος	Μικρότερο εύρος
Σχέση φορτίου/βάρους	Χαμηλή	Υψηλό
Ταχύτητα και επιτάγχυση	Χαμηλή	Υψηλή
Ακρίβεια	Μικρή	Υψηλή
Ομοιομορφία του συστήματος	Μικρή	Μεγάλη
Σφάλμα Δύναμης	Μέσου όρου	Προστίθεται
Διαδικασία αρχικοποίησης	Σχετικά απλή	Σύνθετη
Σχέση Χώρου εργασίας/μεγέθους ρομπότ	Μεγάλη	Μικρή

Στην εργασία αυτή αναπτύχθηκε το λογισμικό ελέγχου του ρομπότ Διπλού Δέλτα, για τηλεχειρισμό σε χειρουργικές επεμβάσεις. Η διαδικασία της επέμβασης θα γίνεται σε μία σχέση master-slave, οπότε και είναι απαραίτητο οι εντολές του ο χειριστή να μπορούν να εκτελεστούν από το ρομπότ με πλήρη ακρίβεια. Για να επιτευχθεί αυτό, θα πρέπει να υπάρχει πλήρης έλεγχος στις κινήσεις του ρομπότ. Αυτό με τη σειρά του οδηγεί στην ανάγκη να υπάρχουν αναλυτικές λύσεις για την κινηματική του ρομπότ, τόσο του απλού Δέλτα όσο και του διπλού, έτσι ώστε ανα πάσα στιγμή να υπάρχει δυνατότητα να γνωρίζει κανείς την κατάσταση (state) που βρίσκεται το ρομπότ.

4.3 Κινηματική ανάλυση

4.3.1 Ευθεία Κινηματική ανάλυση ρομπότ τύπου δέλτα

Η ευθεία κινηματική ανάλυση ενός παράλληλου ρομπότ, το παρόν, είναι αρκετά σύνθετη και περίπλοκη. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την λύση της ευθείας κινηματικής του ρομπότ Δέλτα. Στην πάρουσα μέθοδο, που περιγράφεται στην δημοσίευση [40] η οποία αναπτύσσεται περιγραφικά σε αυτή την ενότητα.

Το ευθύ κινηματικό δίνει την θέση και τον προσανατολισμό του άκρου εργασίας του Δέλτα βάσει των γωνιών ϕ_i . Αυτή η πόζα ορίζεται από ένα κινούμενο σύστημα συντεταγμένων του οποίου οι άξονες μένουν πάντα παράλληλοι με τη βάση του ρομπότ ενώ η αρχή του συστήματος είναι στην ίδια διεύθυνση με το O_B πάνω στο Z άξονα όταν $\phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = 0$. Οι άξονες αυτοί φαίνονται και στις εικόνες 3.2 και 3.1). Ουσιαστικά, εμείς ζητάμε την θέση του συστήματος συντεταγμένων του άκρου εργασίας, δηλαδή το σημείο O_M .

Ορίζουμε τα κέντρα των αρθρώσεων ως $CC_i = [R_M * \cos(\theta), R_M * \sin(\theta), 0]^T$ και τα μοναδιαία διανύσματα ως $\eta_i = [\sin(\theta_i), \cos(\theta_i), 0]^T$ όπου οι γωνίες $\theta_i = 0, 2\pi/3, -2\pi/3$. Το πρώτο βήμα που κάνουμε είναι να υπολογίσουμε την θέση των τριών βραχιόνων, για να το κάνουμε αυτό χρησιμοποιούμε τη γεωμετρική πληροφορία καθώς και τις μετατοπίσεις των αρθρώσεων, έτσι έχουμε:

$$E_i = L_i + CC_i \quad (4.1)$$

όπου

$$L_i = [L_A \cos(\phi_i) \cos \theta_i, L_A \cos(\phi_i) \sin(\theta), L_A \sin(\phi_i)]^T \quad (4.2)$$

Το L_i περιλαμβάνει και τη διεύθυνση του εκάστοτε βραχίονα. Ουσιαστικά στη λύση αυτή θεωρείται ότι οι τρεις βραχίονες ανήκουν σε μία σφαίρα με κέντρο το O_M που τέμνει όλα τα E_i , όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.3

Το άκρο εργασίας ουσιαστικά είναι το O_M μετατοπισμένο. Την μετατόπιση αυτή μπορούμε εύκολα να την υπολογίσουμε με χρήση απλών γεωμετρικών σχέσεων.

Από την εικόνα 4.3 μπορούμε να πάρουμε το τρίγωνο με κορυφές τα E_1, E_2, E_3 . Ορίζουμε ένα νέο σύστημα συντεταγμένων με αρχή το E_1 και άξονες τα v_1, v_2 και v_3 , όπως φαίνονται στην εικόνα και ορίζονται ως:

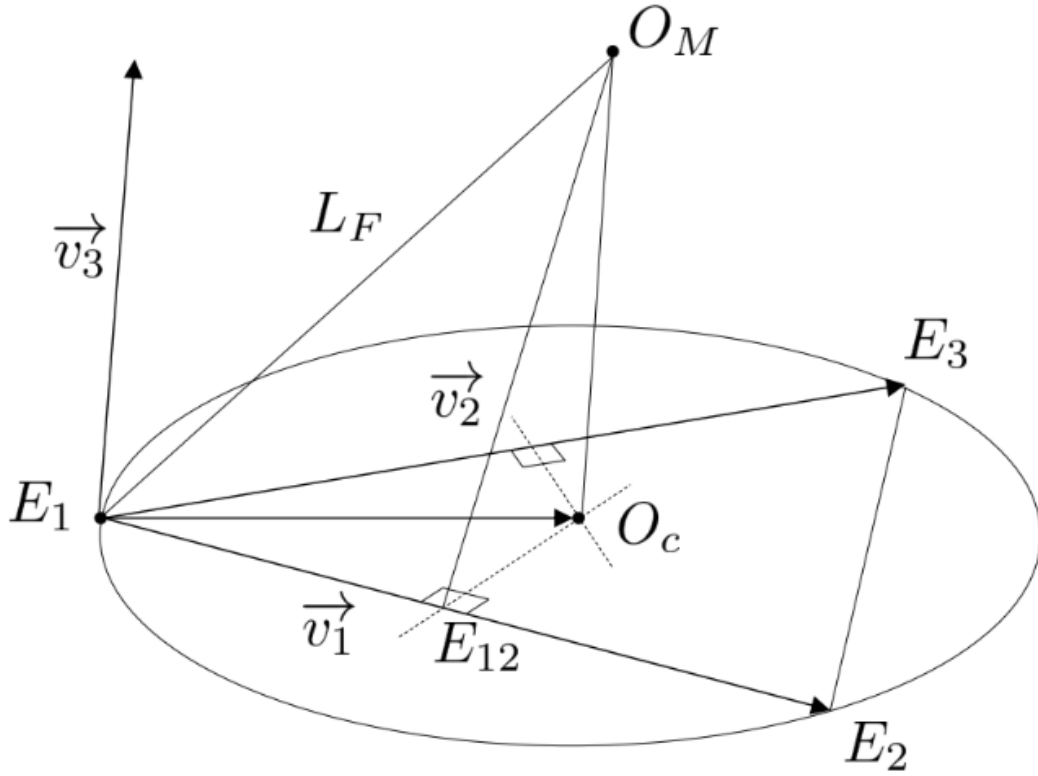
$$v_1 = E_1 - E_2 \quad (4.3)$$

$$v_2 = E_3 - E_1 \quad (4.4)$$

$$v_3 = v_1 \times v_2 \quad (4.5)$$

Έστω O_c η θέση του σχετικού συστήματος του περιγεγραμμένου κύκλου. Παρατηρούμε ότι το σημείο αυτό αποτελεί το βαρύκεντρο του τριγώνου που σχηματίζεται από τα E_1, E_2, E_3 . Έτσι έχουμε:

$$\begin{bmatrix} v_1^T \\ v_2^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} O_c - v_1/2 \\ O_c - v_2/2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$



Σχήμα 4.3: Σφαίρα για υπολογισμό του ευθύ κινηματικού

Κάνοντας τώρα λίγες πράξεις και χρησιμοποιώντας την ψευδο ανάστροφη μπορούμε τελικά να πάρουμε:

$$O_c = (v_1 C_{22}(C_{11} - C_{12}) + (v_2 C_{11}(C_{22} - C_{12}))/2\Delta) \quad (4.7)$$

όπου,

- $C_{11} = |v_1|$
- $C_{22} = |v_2|$
- $C_{12} = v_1^T v_2$

Ενώ το Δ είναι η διακρίνουσα της ψευδοαντίστροφης με μορφή $\Delta = C_{11} * C_{22} - C_{12}C_{12}$. Η κάθετη μετατόπιση στον v_3 μπορεί εύκολα να υπολογισθεί με την χρήση του πυθαγόρειου θεωρήματος για το τρίγωνο (O_M, O_c, E_1) . Έτσι έχουμε:

$$\gamma_3 = \sqrt{\frac{L_f^2 - O_c^T O_c}{v_3^T v_3}} \quad (4.8)$$

Τελικά τη λύση για το σύστημα μας είναι:

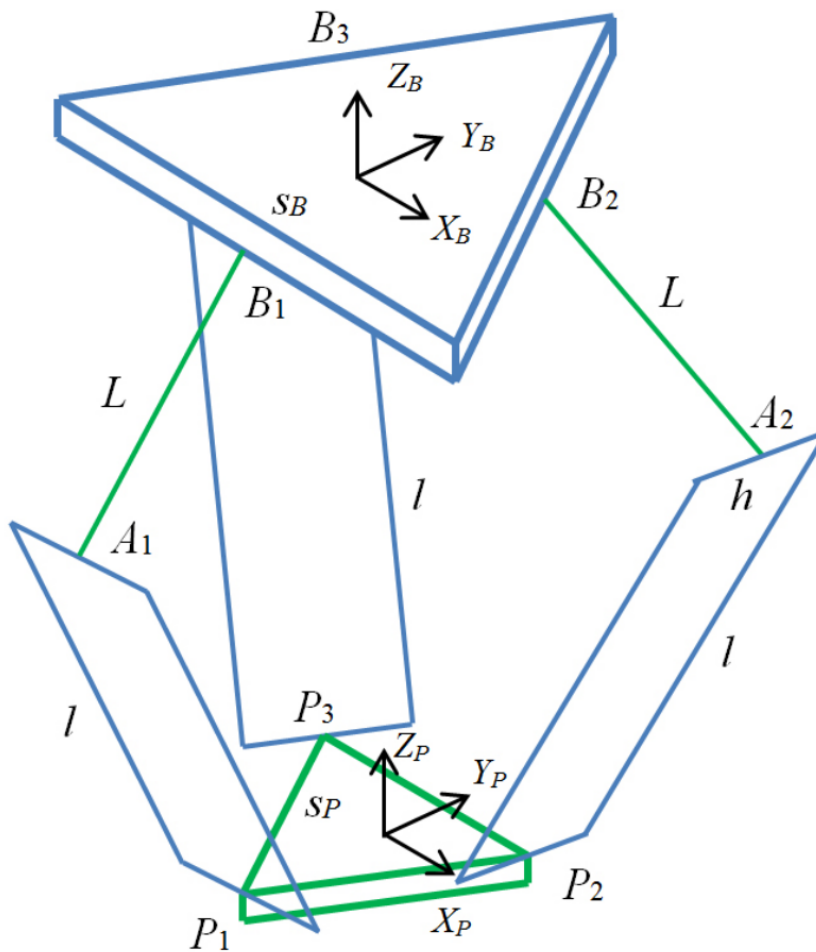
$$O_M = E_1 + O_c + v_3 \gamma_3 \quad (4.9)$$

Η ευθεία κινηματική δεν έχει τόσο ενδιαφέρον για τον έλεγχο του ρομπότ αλλά είναι απαραίτητη για να μπορούμε να έχουμε μία επιβεβαίωση ότι οι κινήσεις που κάνει το σύστημα είναι σωστές, καθώς και για να μπορούμε να έχουμε μία πλήρη εικόνα κατά τη διαδικασία αρχικοποίησης (initialisation) του ρομπότ.

4.3.2 Ανάστροφη Κινηματική ανάλυση ρομπότ τύπου Δέλτα

Για τον έλεγχο κίνησης του ρομπότ απαραίτητη προϋπόθεση είναι η λύση του ανάστροφου κινηματικού του ρομπότ. Για τα παράλληλα ρομπότ και κατά συνέπεια και για το Δέλτα το ανάστροφο η ανάστροφη κινηματική είναι σχετικά εύκολη. Η λύση που χρησιμοποιήθηκε περιγράφεται από τον Williams [59].

Για να μπορέσουμε να λύσουμε το ανάστροφο κινηματικό πρόβλημα πρέπει να ορίσουμε κάποια βασικά στοιχεία για την γεωμετρία του ρομπότ. Το ρομπότ αυτό είναι ικανό να κουνηθεί ελεύθερα μέσα στο χώρο εργασίας χωρίς να περιστρέφεται το άκρο του. Οι βασικές διαστάσεις έχουν οριστεί προηγουμένως.



Σχήμα 4.4: Κινηματική περιγραφή του δέλτα [59]

Από την εικόνα 4.4 παίρνουμε τις παρακάτω εξισώσεις, οι οποίες είναι οι κλειστές διανυσματικές εξισώσεις για το ρομπότ δέλτα.:

$$\{^B B_i\} + \{^B L_i\} + \{^B I_i\} = \{^B P_P\} + [^B_P R] \{^B P_i\} = \{^B P_i\} + \{^B P_P\} \quad (4.10)$$

Το διάνυσμα της περιστροφής είναι μοναδιαίο αφού ένα ρομπότ δέλτα δεν επιτρέπει την περιστροφή. Από τους γεωμετρικούς περιορισμούς του συστήματος θεωρούμε ότι τα μήκη του κάτω τμήματος υπακούουν στην παρακάτω σχέση, η οποία αν υψώσουμε στο τετράγωνο παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$l_i = \|\{^B I_i\}\| = \|\{^B P_i\} + \{^B P_P\} - \{^B B_i\} + \{^B L_i\}\| \quad (4.11)$$

$$l_i^2 = \|\{^B I_i\}\|^2 = l_{ix}^2 + l_{iy}^2 + l_{iz}^2 \quad (4.12)$$

Το $\{^B I_i\}$ εξαρτάται άμεσα από τις γωνίες των αρθρώσεων, οι οποίες έχουν την διανυσματική μορφή:

$${}^B L_1 = \begin{Bmatrix} 0 \\ -L \cos \theta_1 \\ -L \sin \theta_1 \end{Bmatrix}$$

$${}^B L_2 = \begin{Bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} L \cos \theta_2 \\ \frac{1}{2} L \cos \theta_2 \\ -L \sin \theta_2 \end{Bmatrix}$$

$${}^B L_3 = \begin{Bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} L \cos \theta_3 \\ \frac{1}{2} L \cos \theta_3 \\ -L \sin \theta_3 \end{Bmatrix}$$

Αφαιρώντας το διάνυσμα $\{^B I_L\}$ στις δυναμισηματικές εξισώσεις έχουμε:

$$2L(y + \alpha) \cos \theta_1 + 2zL \sin \theta_1 + x^2 + y^2 + z^2 + a^2 + L^2 + 2y\alpha - l^2 = 0 \quad (4.13)$$

$$-L(\sqrt{3}(x + b) + y + c) \cos \theta_2 + 2zL \sin \theta_2 + x^2 + y^2 + z^2 + b^2 + c^2 + L^2 + 2xb + 2yc - l^2 = 0 \quad (4.14)$$

$$L(\sqrt{3}(x - b) - y - c) \cos \theta_3 + 2zL \sin \theta_3 + x^2 + y^2 + z^2 + b^2 + c^2 + L^2 - 2xb + 2yc - l^2 = 0 \quad (4.15)$$

Η ανάστροφη κινηματική συνίσταται στο παρακάτω πρόβλημα. Έχοντας το διάνυσμα θέσης ${}^B P_P = \{xyz\}^T$ πρέπει να υπολογιστούν οι γωνίες των αρθρώσεων του ρομπότ που οδηγούν σε αυτή τη θέση. Η λύση για ένα ρομπότ Δέλτα είναι σχετικά απλή αφού μπορούμε να πάρουμε την λύση για κάθε βραχίονα του δέλτα ξεχωριστά και συνδυάζοντας τες να πάρουμε το τελικό αποτέλεσμα.

Γεωμετρικά κάθε λύση του ανάστροφου κινηματικού είναι μία τομή γύρω από ένα γνωστό κύκλο (με ακτίνα L , κέντρο το τρίγωνο που είδαμε στην 4.4) και μίας γνωστής σφαίρας (με ακτίνα το l , και κέντρο την κινούμενη πλατφόρμα). Η λύση που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή είναι αναλυτική. Έτσι ουσιαστικά η λύση που έχουμε προκύπτει από τις εξισώσεις 3.13-3.15. Πιο συγκεκριμένα:

$$E_i \cos \theta_i + F_i \sin \theta_i + G_i = 0 \quad (4.16)$$

όπου:

- $E_1 = 2L(y + \alpha)$
- $F_1 = 2zL$
- $G_1 = x^2 + y^2 + z^2 + \alpha^2 + L^2 + 2y\alpha - l^2$
- $E_2 = -L(\sqrt{3}(x + b) + y + c)$
- $F_2 = 2zL$
- $G_2 = x^2 + y^2 + z^2 + \alpha^2 + L^2 + 2y\alpha - l^2$
- $E_3 = L(\sqrt{3}(x - b) - y - c)$
- $F_3 = 2zL$
- $G_3 = x^2 + y^2 + z^2 + \alpha^2 + L^2 + 2y\alpha - l^2$

Τα a, b, c εξαρτώνται από την γεωμετρία του συστήματος και συγκεκριμένα από τις γωνίες με τις οποίες είναι τοποθετημένα οι βραχίονες στο ρομπότ Δέλτα.

Η εξίσωση $E_i \cos \theta_i + F_i \sin \theta_i + G_i = 0$ αποτελεί μία εξίσωση που εμφανίζεται συχνά στην ρομποτική και μπορεί να λυθεί εύκολα χρησιμοποιώντας τον γνωστό τριγωνομετρικό τύπο:

$$t_i = \tan \frac{\theta_i}{2} \quad (4.17)$$

Τότε

$$\cos \theta_i = \frac{1 - t_i^2}{1 + t_i^2} \quad (4.18)$$

και

$$\sin \theta_i = \frac{2t_i}{1 + t_i^2} \quad (4.19)$$

Χρησιμοποιώντας την 3.17 στην 3.16 έχουμε:

$$E_i(1 - t_i^2) + F_i(2t_i) + G_i(1 + t_i^2) = 0 \quad (4.20)$$

$$(G_i - E_i)t_i^2 + (2F_i)t_i + (G_i + E_i) = 0 \quad (4.21)$$

Λύνοντας την δευτεροβάθμια εξίσωση για t_i , έχουμε $t_{i,1,2} = \frac{-F_i \pm \sqrt{E_i^2 + F_i^2 - G_i^2}}{G_i - E_i}$ και τελικά τα θ_i προκύπτουν:

$$\theta_i = 2 \operatorname{atan}(t_i) \quad (4.22)$$

Η θετική και η αρνητική λύση είναι σωστή στην δευτεροβάθμια εξίσωση αλλά συνήθως προτιμάται η λύση που έχει τους βραχίονες του δέλτα να κινούνται εξωτερικά από το χώρο του δέλτα, το ίδιο επιλέξαμε και εμείς στη διπλωματική.

4.3.3 Χώρος εργασίας ρομπότ τύπου δέλτα

Σε αυτή την ενότητα επικεντρωθήκαμε στον χώρο εργασίας ενός ρομπότ Δέλτα. Η γνώση του χώρου εργασίας είναι απαραίτητη καθώς αποτελεί τη βάση για να εξαχθούν οι εξισώσεις και οι περιορισμοί για το ευθύ και το ανάστροφο κινηματικό του ρομπότ διπλού Δέλτα, το οποίο τελικά χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

Ο υπολογισμός του χώρου εργασίας ενός ρομποτικού συστήματος είναι εύκολος από την στιγμή που είναι γνωστό το ανάστροφο κινηματικό. Προσομοιώνοντας το ευθύ κινηματικό για το ρομπότ Δέλτα έχουμε την εικόνα 4.5.

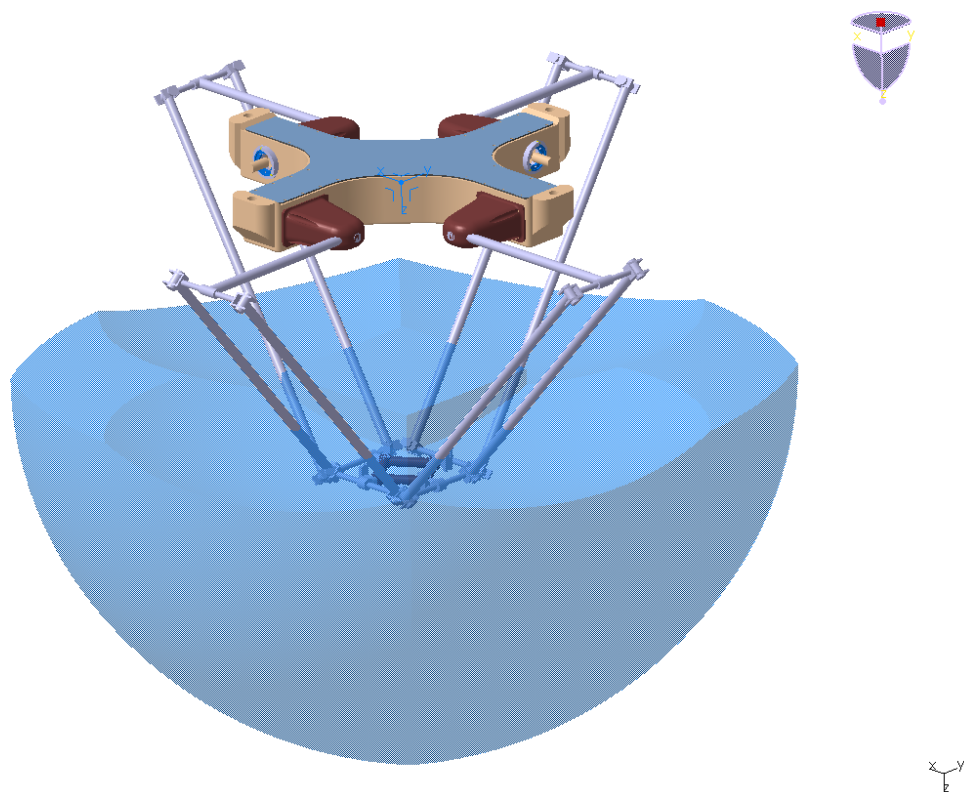
Χωρίς να έχουμε βλάβη της γενικότητας, προσεγγίζουμε τον χώρο εργασίας του Δέλτα με έναν κώνο.

4.3.4 Ευθεία Κινηματική ανάλυση ρομπότ τύπου διπλού δέλτα

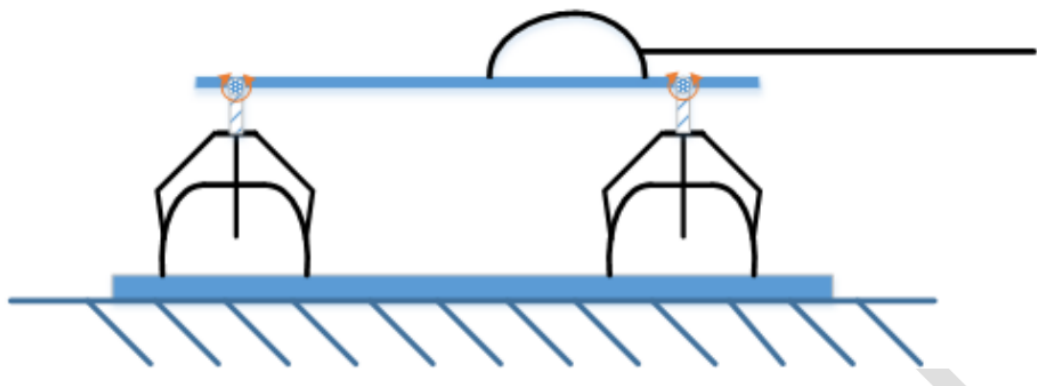
Το ρομπότ της μεταπτυχιακής εργασίας είναι ένα ρομπότ τύπου διπλού Δέλτα. Μία απεικόνιση φαίνεται στο σχήμα 3.3. Για λόγους ευκολίας και χωρίς ιδιαίτερη βλάβη της γενικότητας θεωρούμε ότι ο χώρος εργασίας του ενός ρομπότ δέλτα είναι ένας κώνος, αυτό θα αποτελέσει τη βάση για τη λύση των κινηματικών προβλημάτων του διπλού δέλτα.

Ένα διάγραμμα ελευθέρου σώματος μπορεί παρουσιάζεται στη 4.6. Η πλατφόρμα του άκρου του δέλτα αναπαρίσταται από ένα σημείο το οποίο κινείται στο χώρο εργασίας του κάθε δέλτα, δηλαδή στον κώνο. Τα σημεία αυτά συνδέονται με μία ράβδο η οποία αποτελεί τη βάση του χειρουργικού εργαλείου endowrist.

Για να μπορέσουμε να κάνουμε ευκολότερη την ανάλυση απλοποιούμε περαιτέρω το σχήμα, όπως φέρεται στην 4.7. Το σημείο P_0 είναι το άκρο εργασίας του πρώτου Δέλτα ενώ το P_1 είναι το άκρο εργασίας του δεύτερου Δέλτα. Τέλος, το σημείο P_T είναι το άκρο εργασίας του διπλού



Σχήμα 4.5: Workspace για ένα τυπικό ρομπότ δέλτα

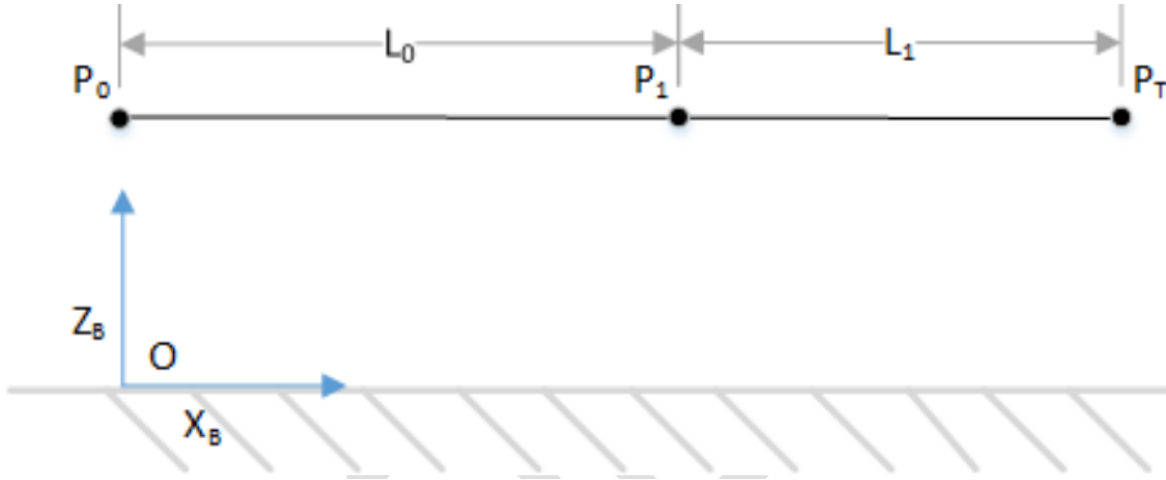


Σχήμα 4.6: Διάγραμμα ελευθέρου σώματος του διπλού δέλτα

Δέλτα (πρέπει να σημειωθεί ότι στην πραγματικότητα το άκρο εργασίας του διπλού δέλτα είναι μετατοπισμένο στον z άξονα κατά ένα μικρό μέγεθος το οποίο έχει ληφθεί υπόψιν στην ανάλυση).

Τόσο για το ευθύ όσο και για το ανάστροφο κινηματικό είναι απαραίτητο να ορίσουμε μία βάση πάνω στην οποία θα μπορούμε να υπολογίσουμε όλες τις τιμές. Το επίπεδο αυτό είναι στη βάση του πίσω ρομπότ δέλτα, όπως φαίνεται και από την εικόνα 4.7, στο O.

Το πρόβλημα του ευθέως κινηματικού ορίζεται ως εξής: γνωρίζοντας τις Καρτεσιανές τιμές $[xyz]$ του κάθε Δέλτα, να υπολογιστεί η θέση και ο προσανατολισμός του άκρου εργασίας. Έτσι αρχικά θα πάρουμε τις τιμές αυτές του κάθε δέλτα μετασχηματισμένες ως προς το σύστημα συντεγμένων που έχουμε ορίσει, δηλαδή αν $F_i T_o B$ είναι ο μετασχηματισμός του κάθε δέλτα στη βάση και $P T_i$ το



Σχήμα 4.7: Αφαιρετική απεικόνιση του διπλού δέλτα

διάνυσμα θέση του δέλτα, έχουμε μετασχηματισμένα τα:

$$d1_{xyz}FB = F_1 T_{oB} * PT_1 \quad (4.23)$$

$$d2_{xyz}FB = F_2 T_{oB} * PT_2 \quad (4.24)$$

Τότε το διάνυσμα από τη βάση στο πρώτο δέλτα είναι:

$$S_L = d2_{xyz}FB - d1_{xyz}FB \quad (4.25)$$

Και ο προσανατολισμός του άκρου εργασίας είναι:

$$\phi = \text{acos}(S_L(z)/L_0) \quad (4.26)$$

$$\theta = \text{atan2}(S_L(y), S_L(x)) \quad (4.27)$$

Ενώ το άκρο εργασίας βρίσκεται υπολογίζοντας το διάνυσμα S_T 4.9:

$$S_T = d1_{xyz}FB + aa + (d2_{xyz}FB - d1_{xyz}FB) * K \quad (4.28)$$

Με aa συμβολίζουμε την απόσταση στο z άξονα από το τραπέζι που στέκεται το ρομπότ και K το λόγο $\frac{L}{L_0}$

4.3.5 Ανάστροφη Κινηματική ανάλυση ρομπότ τύπου διπλού δέλτα

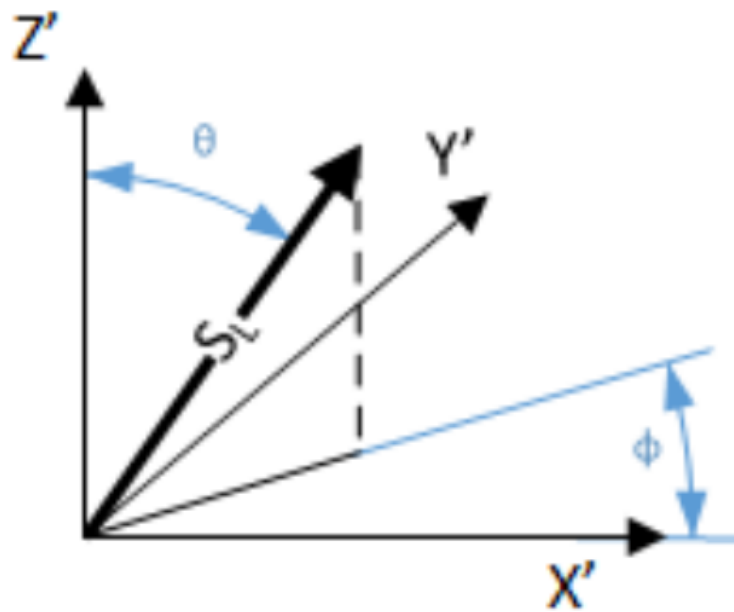
Το πρόβλημα του ανάστροφου κινηματικού είναι το εξής: Έχοντας γνωστή την θέση και τον προσανατολισμό του άκρου εργασίας, θέλουμε να υπολογίσουμε τις θέσεις του άκρου εργασίας του κάθε δέλτα, που με τη σειρά του θα μεταφραστούν σε γωνίες στους κινητήρες του εκάστοτε δέλτα έτσι ώστε να έχουμε τελικά την κίνηση που θέλουμε.

Αρχικά μεταφέρουμε το S_L στις σφαιρικές συνταγμένες του, έτσι έχουμε $S_L = \{\sin\theta * \cos\phi, \sin\theta * \cos\phi, \cos\theta\}^T$. Συνδυάζοντας τώρα την σφαιρική μορφή του S_L μπορούμε να πάρουμε τις θέσεις του κάθε άκρου του ρομπότ δέλτα. Έτσι έχουμε για τα δύο δέλτα:

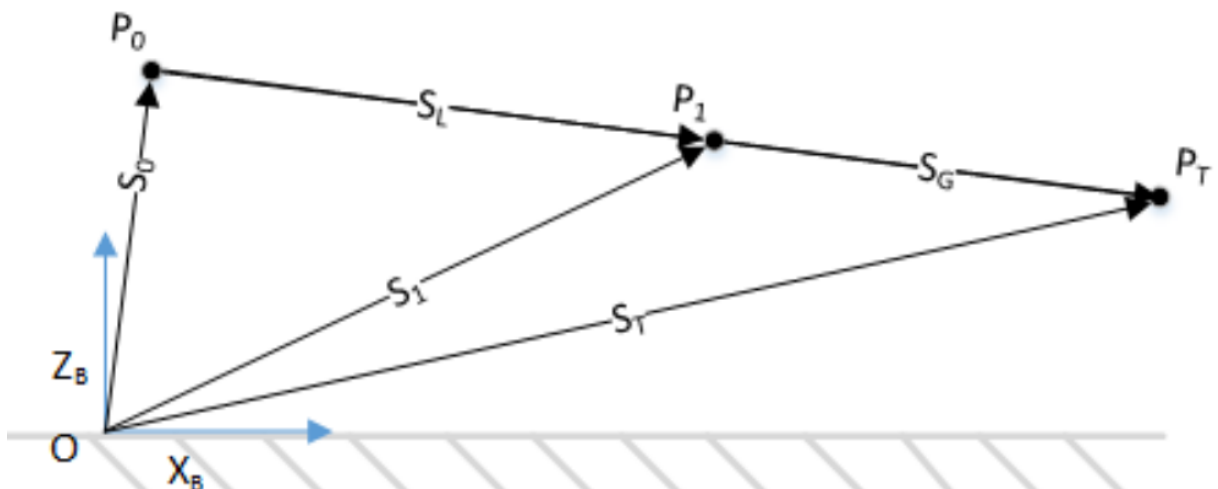
$$d1_{xyz}F1 = F_1 T_{oB} * PT_1 * (S_T - L * S_L - aa) \quad (4.29)$$

$$d2_{xyz}F1 = F_2 T_{oB} * PT_2 * (S_T - L_1 * S_L - aa) \quad (4.30)$$

$$(4.31)$$



Σχήμα 4.8: Σφαιρικές συντεταγμένες για το διάνυσμα S_L



Σχήμα 4.9: Διπλό δέλτα κινηματική ανάλυση

Με S_T συμβολίζουμε το διάνυσμα θέσης του άκρου εργασίας. Φυσικά θα πρέπει να γίνεται έλεγχος για την ορθότητα των αποτελεσμάτων του ανάστροφου κινηματικού. Ο περιορισμός αυτός είναι οι λύσεις που προκύπτουν να είναι μέσα στο χώρο εργασίας του κάθε Δέλτα, δηλαδή στον κωνικό χώρο. Ο περιορισμός αυτός σε μαθηματική μορφή εκφράζεται ως:

$$0 \leq \theta_i \leq \tan(r/h) \quad (4.32)$$

$$0 \leq z_i \leq h \quad (4.33)$$

Με τα θ_i και z_i αφορούν τις μετασχηματισμένες κωνικές συντεταγμένες, πιο συγκεκριμένα

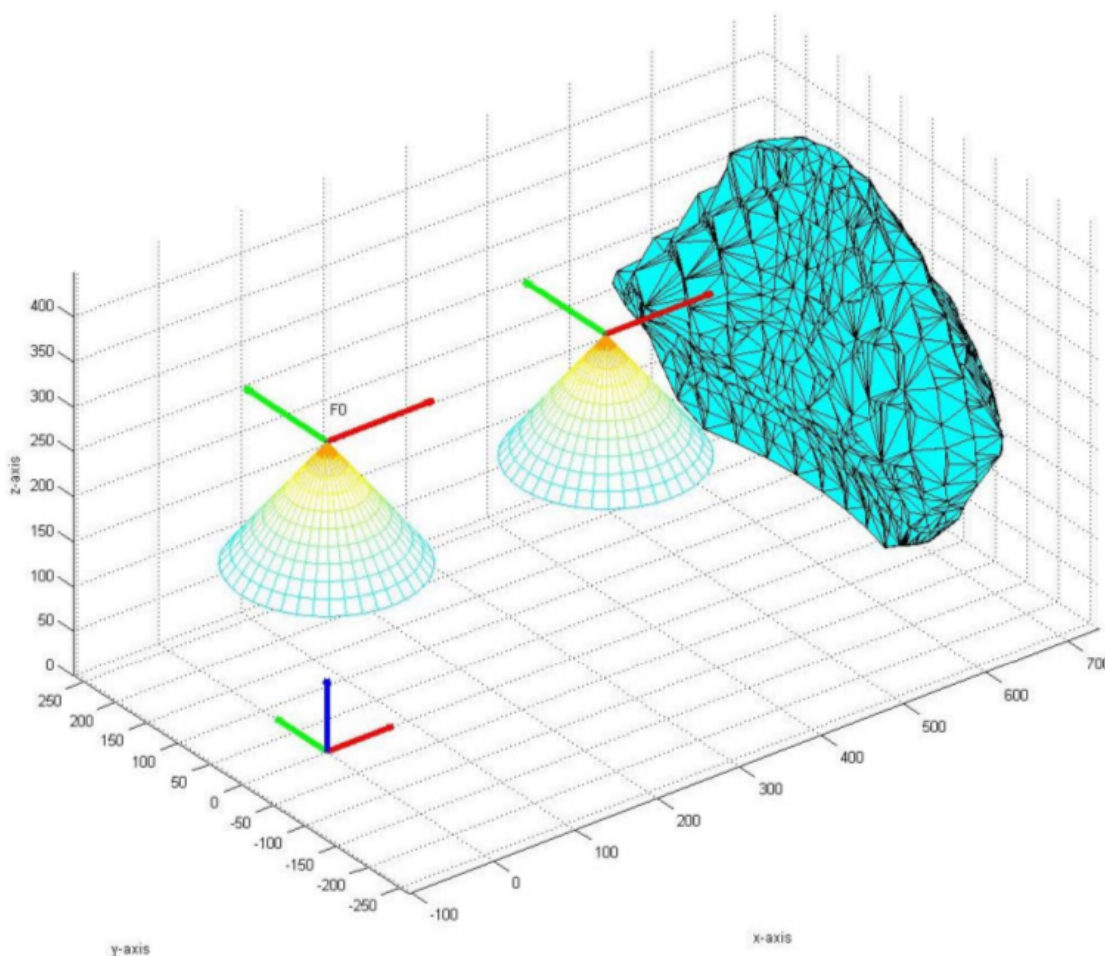
$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_i \tan(\theta_i) \cos(\phi_i) \\ z_i \tan(\theta_i) \sin(\phi_i) \\ z_i \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

$$\begin{bmatrix} \theta_i \\ \phi_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{atan2}(\sqrt{x_i^2 + y_i^2}, z_i) \\ \text{atan2}(y_i, x_i) \\ z_i \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι σε όλη την ανάλυση που έχει γίνει στον περιγραφή του προβλήματος του διπλού δέλτα το άκρο εργασίας είναι σταθερό και θεωρείται παθητικό (δεν υπάρχει επενέργεια του endwrist tip).

4.3.6 Χώρος εργασίας ρομπότ τύπου διπλού δέλτα

Ο χώρος εργασίας ενός ρομπότ διπλού δέλτα μπορεί να αλλάξει αλλάζοντας την σχετική θέση των εκάστοτε Δέλτα καθώς και την κλίση στην οποία βρίσκονται (π.χ. η βάση των ρομπότ να βρίσκονται σε ένα κεκλιμένο επίπεδο). Παρόλα αυτά παρακάτω παρουσιάζεται ο χώρος εργασίας του ρομπότ της μεταπτυχιακής εργασίας σε επίπεδο έδαφος και με ίδιο προσανατολισμό όπως φαίνονται και στην εικόνα 4.6. Ο χώρος εργασίας φαίνεται στην εικόνα 4.10



Σχήμα 4.10: Χώρος εργασίας διπλού δέλτα

Παρατηρούμε ότι ο χώρος εργασίας δίνει τη δυνατότητα στο ρομπότ να κινηθεί σε ένα μεγάλο εύρος περιοχών σε σχέση με ένα συμβατικό ρομπότ δέλτα.

Κεφάλαιο 5

Έλεγχος ρομποτικών συστημάτων

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μία αναφορά στην θεωρία ελέγχου που ακολουθήθηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία. Πιο συγκεκριμένα, θα γίνει μία ανάλυση στην θεωρία ελέγχου πάνω στον τομέα της ρομποτικής. Τέλος, θα αναφερθούμε αναλυτικά στα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα εργασία για την ανάπτυξη και προγραμματιστική υλοποίηση ενός συστήματος ελέγχου του ρομποτικού μηχανισμού διπλού-Δέλτα για χειρουργικές επεμβάσεις, που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

5.1 Θεωρία ελέγχου στη ρομποτική

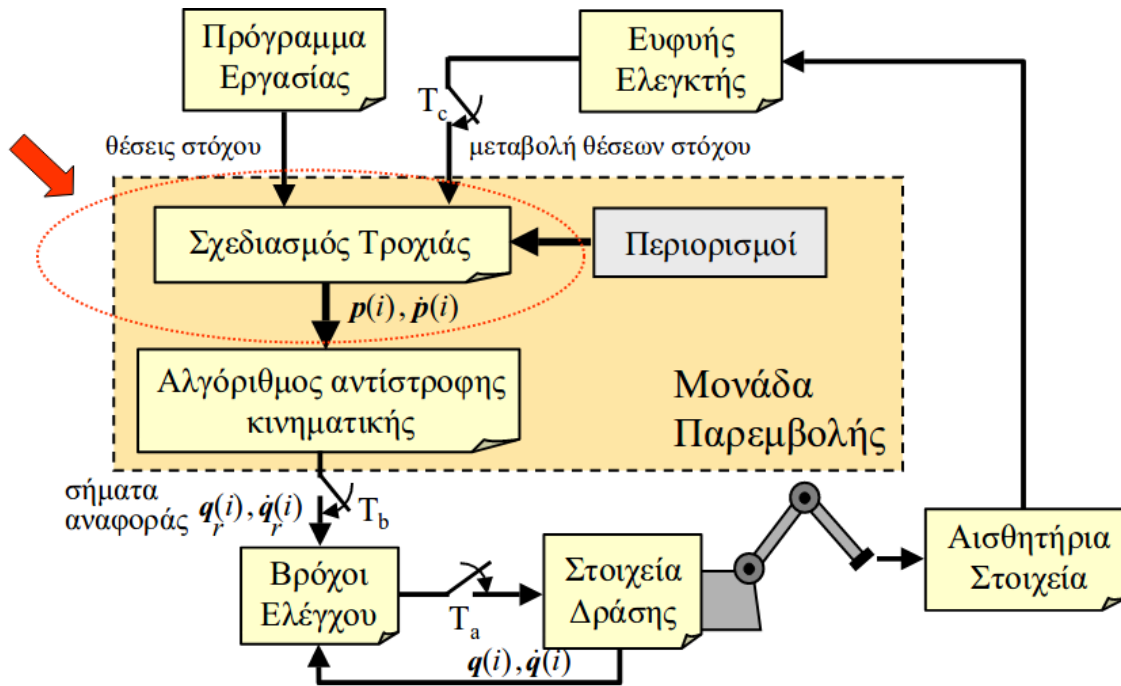
Η θεωρία ελέγχου για τη ρομποτική ουσιαστικά σχετίζεται με το ακόλουθο πρόβλημα: Ποιές εντολές θα πρέπει να δώσουμε στους επενεργητές έτσι ώστε το ρομποτικό εργαλείο να εκτελέσει συγκεκριμένη εργασία (όπως πραγματοποίηση επιθυμητής τοποθέτησης) στο χώρο ή να επιδείξει συγκεκριμένη συμπεριφορά (π.χ. προσαρμοστική δυναμική απόκριση σε εξωτερικά φορτία). Η είσοδος στους επενεργητές μπορεί να είναι δυνάμεις, ροπές ή ακόμα και ρεύμα ή τάση στους κινητήρες. Υπάρχουν διάφορα είδη για το τι ακριβώς θα χρησιμοποιηθεί σαν είσοδος το οποίο καθορίζεται από την λειτουργία που θέλουμε να εκτελέσει το ρομπότ.

Υπάρχει πληθώρα διαφορετικών μεθόδων ελέγχου ενός ρομπότ και η επιλογή εξαρτάται από τον σκοπό λειτουργίας του ρομπότ. Μία λάθος επιλογή στην μέθοδο ελέγχου μπορεί να οδηγήσει το ρομπότ σε αδυναμία να πραγματοποιήσει μία λειτουργία που υπό άλλες συνθήκες θα ήταν εύκολο να την κάνει. Επιπρόσθετα, ο μηχανολογικός σχεδιασμός ενός ρομπότ πολλές φορές καθορίζει την θεωρία ελέγχου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Για παράδειγμα ένας καρτεσιανός βραχίονας απαιτεί τελείως διαφορετική προσέγγιση από ένα σύστημα κλειστής κινηματικής αλυσίδας. Ο μηχανολογικός περιορισμός δημιουργεί την ανάγκη να υπάρχει κάποιος συμβιβασμός ανάμεσα στην μηχανολογική μορφή του ρομπότ και στην αλγοριθμική πλευρά του συστήματος[60].

Ένα τυπικό διάγραμμα ελέγχου ενός ρομπότ μπορεί να δει κανείς στη παρακάτω εικόνα 5.1:

Στην θεωρία ελέγχου μπορούμε να συναντήσουμε διάφορες αρχές χειρισμού ενός συστήματος (ρομπότ), παρακάτω αναφέρουμε κάποιες από αυτές με τις επιμέρους κατηγορίες:

- Ανεξάρτητος έλεγχος αρθρώσεων.
 1. Παρακολούθηση σημείου αναφοράς.
 2. Προβλεπτικός(Predictive) έλεγχος και έλεγχος ροπής.
 3. Σχεδιασμός στο χώρο κατάστασης.
- Πολυμεταβλητός έλεγχος βάση μοντέλου.



Σχήμα 5.1: Βρόχος ελέγχου [61]

1. Τροποποιημένος έλεγχος για παρακολούθηση σημείου αναφοράς.
 2. Έλεγχος ανάστροφης υπολογιζόμενης ροπής (computed torque).
 3. Έυρωστος και προσαρμοστικός έλεγχος.
- Έλεγχος Δύναμης / Μηχανικής Εμπέδησης.
 1. Έλεγχος συστημάτων συντεταγμένων-περιορισμών.
 2. Έλεγχος συμμόρφωσης (compliance).
 3. Έλεγχος operational space control (έλεγχος στο χώρο εργασίας).
 - Μη γραμμικός έλεγχος.

5.1.1 Βασική θεωρία ελέγχου

Σε αυτήν την ενότητα θα γίνει μια σύντομη αναφορά στη θεωρία δυο βασικών/γνωστών χαρακτηριστικών της θεωρίας ελέγχου που χρησιμοποιείται με μεγάλη επιτυχία τόσο στη βιομηχανία όσο και στην έρευνα. Πιο συγκεκριμένα θα αναφερθούμε στον ελεγκτή τύπου PID και στο τρόπο εφαρμογής σε κάποιο σύστημα (Ziegler Nichols)

Ο ελεγκτής PID αυτός είναι ο πιο διαδεδομένος ελεγκτής στη βιομηχανία, ο οποίος ουσιαστικά υπολογίζει το σφάλμα $y(\tau)$ ανάμεσα στο σήμα αναφοράς και στη πραγματική μέτρηση $e(\tau)$ και προσαρμόζει την εντολή που στέλνει στους κινητήρες αντίστοιχα. Ένας τέτοιος ελεγκτής έχει τρεις παραμέτρους για να υπολογίσει αυτό το σφάλμα [62].

1. Αναλογικό κέρδος (K_p)
2. Ολοκληρωτικό κέρδος (K_i)
3. Διαφορικό κέρδος (K_d)

Οι εξίσωση που υπολογίζει το σήμα εισόδου, στην περίπτωση μας το σήμα για τους κινητήρες, είναι:

$$u(\tau) = K_p y(\tau) + K_i \int y(\tau') d\tau' + K_d \frac{dy(\tau)}{d\tau} \quad (5.1)$$

όπου το $e(\tau)$ το σφάλμα ανάμεσα στο σήμα εισόδου και στο σήμα που μετράμε στην έξοδο. Για τον υπολογισμό των κερδών ακολουθήσαμε τη μεθοδολογία Ziegler-Nichols[63]. Έτσι ακολουθήσαμε τα παρακάτω βήματα:

1. Ξεκινάμε με όλα τα κέρδη στο 0.
2. Αυξάνουμε σταδιακά το K_p μέχρι να παρατηρήσουμε μία σταθερή μικρή ταλάντωση στο σύστημα.
3. Αυξάνουμε το K_d μέχρι να εξαφανίσουμε τις ταλαντώσεις που εμφανίστηκαν από το K_p .
4. Επαναλαμβάνουμε τα βήματα 2 και 3 μέχρι το K_d να μην μπορεί να επηρεάσει άλλο τις ταλαντώσεις.
5. Κρατάμε σταθερές τις τελευταίες τιμές των K_p και K_d όπου το σύστημα δε βρισκόταν σε ταλάντωση.
6. Τέλος αυξάνουμε το K_i και ελέγχουμε τη απόκριση του συστήματος, δηλαδή αν φτάνει στο σημείο αναφοράς όπως επιθυμούμε. Γενικά πρόκειται για μία αρκετά επαναλαμβανόμενη διαδικασία ώστε να ρυθμιστούν τα κατάλληλα κέρδη.

5.2 Λειτουργικά Συστήματα πραγματικού χρόνου

Η μεταπτυχιακή εργασία ασχολείται με ένα ρομπότ για χειρουργικές επεμβάσεις. Για να έχουμε ένα αξιόπιστο σύστημα το οποίο θα μπορεί να εκτελεί αξιόπιστες κινήσεις σε ένα χειρουργικό περιβάλλον, πρέπει να υπάρχει ντετερμινιστική καθυστέρηση στο σύστημα. Τούτο επιτυγχάνεται με ένα λειτουργικό σύστημα "Πραγματικού χρόνου". Σε αυτή την ενότητα θα γίνει μία σύντομη αναφορά πάνω σε αυτά τα συστήματα. (RTOS).

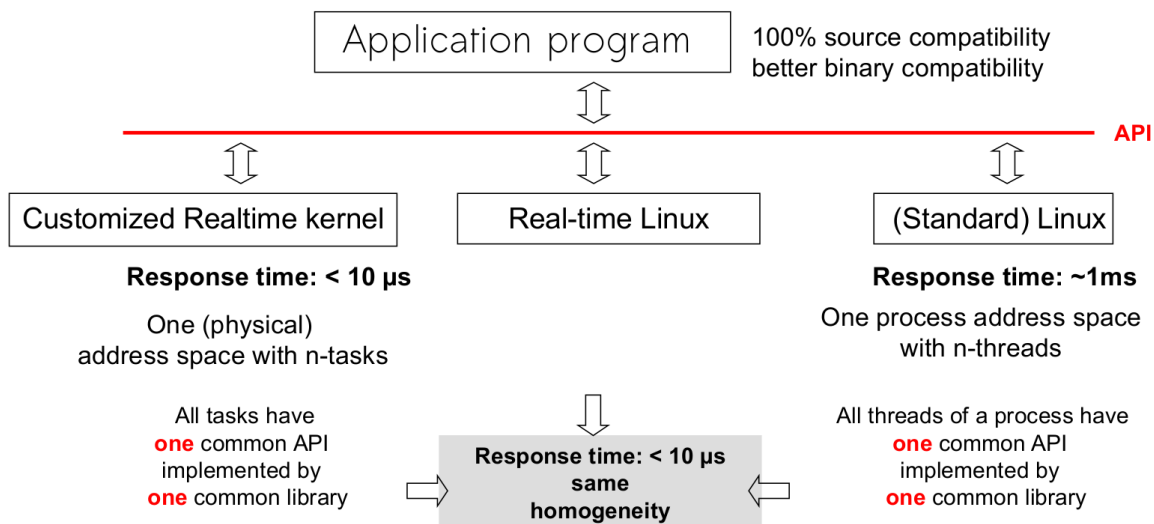
Πρέπει να σημειωθεί ότι ένα σύστημα πραγματικού χρόνου δεν είναι ένα "γρήγορο" σύστημα, αλλά ένα σύστημα που χαρακτηρίζεται από ντετερμινισμό. Υπάρχουν δύο στάδια συστημάτων πραγματικού χρόνου:

- Συστήματα "αυστηρού" πραγματικού χρόνου (Hard real time). Το οποίο σημαίνει ότι αν χαθεί μία διορία για την εκτέλεση ενός προγράμματος τότε έχουμε ολική αποτυχία του προγράμματος.
- Συστήματα "ελαστικού" πραγματικού χρόνου (Soft real time). Το οποίο σημαίνει ότι αν χαθεί μία διορία για την εκτέλεση ενός προγράμματος τότε, το σύστημα εξακολουθεί να λειτουργεί αλλά με μειωμένη απόδοση.

Η εργασία αναπτύχθηκε στο λειτουργικό σύστημα Linux το οποίο δεν είναι σύστημα πραγματικού χρόνου. Στόχος του λειτουργικού συστήματος αυτού, είναι να μπορεί να εκτελέσει πολλά διεργασίες παράλληλα χωρίς να ενδιαφέρεται τόσο για τον ντετερμινιστικό χαρακτήρα εκτέλεσης των διεργασιών. Χαρακτηριστικά στο σχήμα 5.2 μπορεί κανείς να δει την διαφορά στις ταχύτητες εκτέλεσης των διεργασιών σε διάφορα συστήματα Linux.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.2 υπάρχουν δύο τρόποι για να μετατραπεί ένα σύστημα σε σύστημα πραγματικού χρόνου [64]:

1. Το `rt-preempt`, το οποίο:



Σχήμα 5.2: Συστήματα πραγματικού χρόνου [64]

- Επιτρέπει στο σύστημα να επιλέγει τη σειρά με την οποία θα γίνονται οι διεργασίες, μειώνοντας έτσι τις καθυστερήσεις.
- Προγραμματίζει αυστηρά όλες τις διεργασίες που θα πρέπει να γίνουν.

2. Επεκτάσεις για εφαρμογές πραγματικού χρόνου.

- Προσθέτει επιπλέον σχέσεις ανάμεσα στο hardware του υπολογιστή και στον Kernel (πυρήνα) του Linux για να μπορεί να εκτελεί τα τμήματα τις διεργασίες που πρέπει σαν διεργασίες πραγματικού χρόνου.

Όλες οι περιπτώσεις αλλάζουν τη συμπεριφορά του δρομολογητή (scheduler) του συστήματος, ο οποίος έχεις τις παρακάτω βασικές λειτουργίες:

- Αποφασίζει ποια εφαρμογή θα εκτελέσει επόμενη.
- Αναθέτει τους χρόνους που θα εκτελέσει κάθε εφαρμογή.
- Πραγματοποιεί πολλές εργασίες παράλληλα σε κάθε πυρήνα του υπολογιστή.
- Επηρεάζει την συμπεριφορά του συστήματος από άποψη ντετερμινισμού.

Όπως μπορεί κανείς εύκολα να καταλάβει σε ένα σύστημα που αναπτύσσεται για να λειτουργήσει σε ένα χειρουργικό περιβάλλον απαιτεί αυστηρά ντετερμινιστική συμπεριφορά όσον αφορά τους χρόνους που απαιτούνται για την εκτέλεση κάθε λειτουργίας. Έτσι, ήταν επιτακτική ανάγκη να τροποποιηθεί το λειτουργικό σύστημα ώστε να εκτελείται για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Το μοντέλο που χρησιμοποιήσαμε ήταν αυτό του rt-preempt.

Το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε στη μεταπτυχιακή εργασία, μπορεί να κινείται και να εκτελεί λειτουργίες με ντετερμινιστικό χαρακτήρα. Παρόλα αυτά, μερικοί περιορισμοί που αφορούν τέτοια συστήματα τα κάνουν ακόμα λιγότερα αποδεκτά στις βιομηχανίες.

- Τα συστήματα πραγματικού χρόνου δεν είναι τόσο διαδεδομένα με αποτέλεσμα να μην υπάρχει αρκετή υποστήριξη από την κοινότητα του Linux.
- Η ανάθεση μνήμης ακόμα και σε rt-preempt δεν έχει ντετερμινιστικό χρόνο. Ωστόσο οι εφαρμογές πραγματικού χρόνου πρέπει να αναλαμβάνουν την ανάθεση αυτή στο εσωτερικό τους και να μην αφήνουν τον scheduler να το κάνει.

- Τα προγράμματα οδήγησης για διάφορα συστήματα (USB, PCI κ.α.) δεν έχουν αναπτυχθεί για συστήματα πραγματικού χρόνου, με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος καθυστέρησης σε αυτά.
- Η διαχείριση μνήμης λειτουργεί αυτόνομα ακόμα και με μοντέλα rt-preempt.

Γίνεται προσπάθεια για την χρήση πλήρως συστημάτων πραγματικού χρόνου με εφαρμογές όπως τα VxWorks, μcos, Qnx, Rtlinux, window embedded και άλλα τα οποία φεύγουν από τη σκοπιά της μεταπτυχιακής εργασίας [65].

5.2.1 Έλεγχος πραγματικού χρόνου

Στο ρομποτικό σύστημα της μεταπτυχιακής εργασίας, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο του rt-preempt με αποτέλεσμα το thread στο οποίο εκτελείται ο βρόχος ελέγχου να βρίσκεται σταθερά στο 1kHz. Φυσικά αυτή η συχνότητα επηρεάζεται από το hardware του υπολογιστή και κυρίως των περιφερειακών.

Πιο συγκεκριμένα ενώ το κύριο τμήμα του ρομπότ, δηλαδή τα δύο Δέλτα, μπορούν να εκτελούν τις λειτουργίες τους στο 1kHz χάρις της DAC που χρησιμοποιήθηκε (αναλύεται σε επόμενη ενότητα) το χειρουργικό ακροφύσιο λόγω των σερβοκινητήρων αλλά και λόγω της συνδεσμολογίας τους (USB) κινείται και εκτελεί τις λειτουργίες του σε πολύ μικρότερη συχνότητα και κατά συνέπεια με μικρότερο ντετερμινισμό.

5.3 Εφαρμογή στην εργασία

Στην ενότητα αυτή θα αναφερθούμε στις μεθόδους ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν, γίνεται μία μικρή αναφορά στην αρχιτεκτονική του συστήματος και στον τρόπο με τον οποίο τελικά το ρομποτικό σύστημα λειτουργεί.

5.3.1 Έλεγχος διπλού Δέλτα

Ο έλεγχος του διπλού Δέλτα είναι συνδυασμός της κινηματικής για την οποία έγινε ανάλυση στο προηγούμενο κεφάλαιο, της διαφορικής κινηματικής και της αντιστάθμιση της βαρύτητας (gravity compensation) τα οποία θα αναλύσουμε στην παρούσα ενότητα. Σε χαμηλό επίπεδο ο έλεγχος είναι ένας έλεγχος ρευμάτων στους κινητήρες.

Το πρώτο κομμάτι του ελέγχου αποτελεί και το κλασικό (συμβατικό) σύστημα ελέγχου που στηρίζεται στη θεωρία του PID ελέγχου. Πρόκειται για έλεγχο σε κάθε άρθρωση του κάθε Δέλτα ξεχωριστά, αφού πρώτα έχουν υπολογιστεί οι γωνίες αναφοράς για την κάθε άρθρωση με τη βοήθεια της κινηματικής πληροφορίας που έχουμε από τις κινηματικές εξισώσεις. Στόχος μας είναι το ρομπότ να ακολουθεί όσο το δυνατόν πιο γρήγορα τα σήματα αναφοράς χωρίς να έχουμε προβλήματα υπερακόντισης, καθώς πρόκειται για ένα σύστημα για χειρουργικές επεμβάσεις και η περίπτωση υπερακόντισης θα μπορούσε να αποβεί μοιραία κατά την επέμβαση. Τέλος το σύστημα θα πρέπει να είναι μόνιμα στην περιοχή της ευστάθειας, για έναν dc κινητήρα αυτό είναι σχετικά απλό.

Ο έλεγχος της κάθε άρθρωσης παρουσιάζει αδυναμία στο να αντιμετωπίσει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης που εμφανίζεται εξαιτίας της βαρύτητας. Για τον λόγο αυτό στη παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήσαμε μία μέθοδο αντιστάθμισης βαρύτητας ώστε να εξαλειφθεί το σφάλμα αυτό. Για τον υπολογισμό, πέρα από την κινηματική ανάλυση που έχει γίνει σε προηγούμενο κεφάλαιο, απαιτείται και η επίλυση της διαφορικής κινηματικής. Ακολουθεί η ανάλυση για τον υπολογισμό της κατάλληλης ροπής για την αντιστάθμιση βαρύτητας.

Ουσιαστικά, για το στατικό κομμάτι της συμπεριφοράς του ρομπότ χρησιμοποιούμε τον έλεγχο αντιστάθμισης βαρύτητας έτσι ώστε να μειώσουμε ή ιδανικά να εξαφανίσουμε σφάλματα που οφείλονται στη βαρύτητα. Για το δυναμικό κομμάτι της συμπεριφοράς του ρομπότ χρησιμοποιούμε τη συμβατική θεωρία ελέγχου με έναν ελεγκτή τύπου PID.

Για την διαφορική κινηματική ακολουθήσαμε τη μέθοδο που αναλύεται στη δημοσίευση " An Optimal Geometric Model for Clavels Delta Robot" [40]. Ουσιαστικά, το πρόβλημα της διαφορικής κινηματικής είναι ο υπολογισμός του J_d από την:

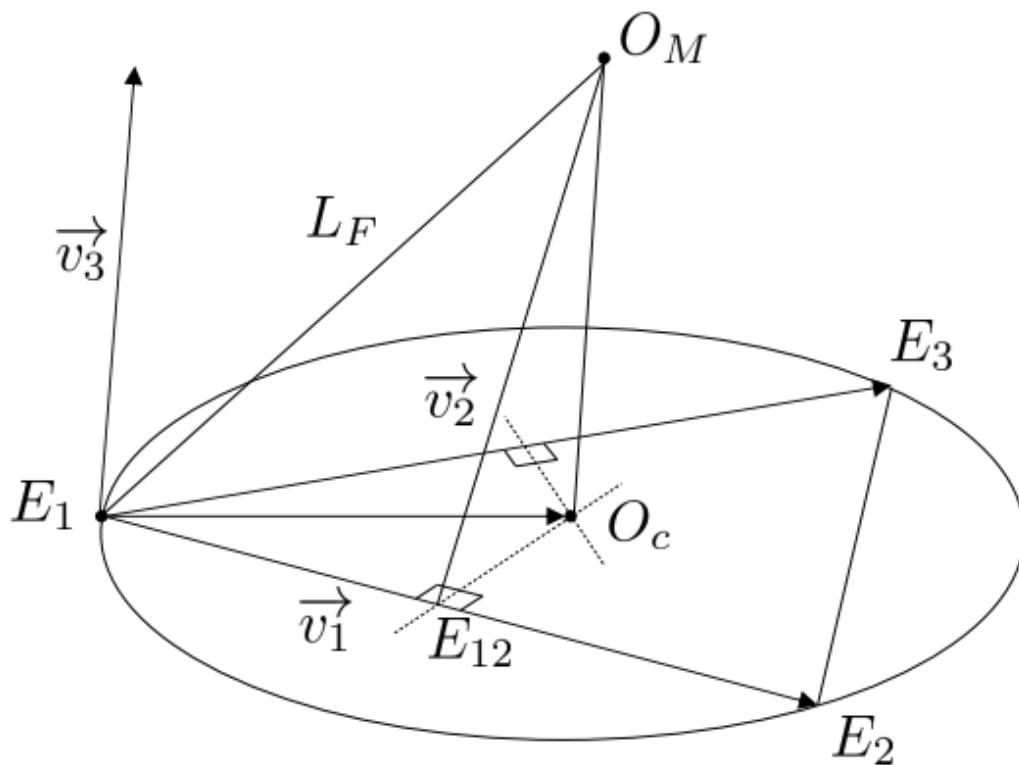
$$\dot{O}_M = J_d \omega \quad (5.2)$$

Ενώ ο στόχος για τον υπολογισμό της αντιστροφής διαφορικής κινηματικής είναι ο υπολογισμός του J_{inv} στην:

$$\omega = J_{inv} \dot{O}_M \quad (5.3)$$

Με $\omega = [\omega_1 \omega_2 \omega_3]^T$ και

- J_d την Ιακωβιανή μήτρα.
- O_M το κέντρο της σφαίρας που σχηματίζονται από τους βραχίονες του κάθε ρομπότ τύπου δέλτα, όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.3



Σχήμα 5.3: Γεωμετρικό μοντέλο για τον υπολογισμό της διαφορικής κινηματικής

Τόσο το ευθύ όσο και το ανάστροφο διαφορικό πρόβλημα υπολογίζονται παράλληλα για το Δέλτα, στη μέθοδο που ακολουθήσαμε θεωρείται ότι τα μήκη στα πάνω μέρη από τους βραχίονες δεν αλλάζουν. Έτσι έχουμε:

$$(O_M - E_i)^T (\dot{O}_M - \dot{E}_i) = 0 \quad (5.4)$$

Το οποίο μας βοηθάει να υπολογίσουμε το αντιστροφο διαφορικό κινηματικό πρόβλημα, αφού αντικαθιστόντας τα \dot{E}_i με $\eta_i x L_i \omega_i$ έχουμε:

$$(O_M - E_i)^T \dot{O}_M = (O_M - E_i)^T (\eta_i x L_i \omega_i) = 0 \quad (5.5)$$

$$\omega_i = \frac{(O_M - E_i)^T \dot{O}_M}{(O_M - E_i)^T (\eta_i x L_i)} \quad (5.6)$$

Και έτσι μπορούμε να πάρουμε την αναλυτική μορφή του J_{inv} :

$$J_{inv} = \frac{(O_M - E_i)^T}{(O_M - E_i)^T (\eta_i x L_i)} \quad (5.7)$$

Το ευθύ διαφορικό κινηματικό μπορεί εύκολα να υπολογισθεί αρκεί να θεωρήσουμε ότι μόνο μία άρθρωση κινείται τη φορά. Για παράδειγμα, αν η άρθρωση τρία κινείται τότε τα E_1 E_2 που ορίσαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο παραμένουν σταθερά και το τρίγωνο (O_M, E_1, E_2) περιστρέφεται γύρο από έναν άξονα, έστω v_1 . Η φορά που περιστρέφεται μπορεί να βρεθεί υπολογίζοντας το εξωτερικό γινόμενο ανάμεσα στο v_1 και τη γραμμή που ενώνει τη κινούμενη πλατφόρμα του ρομπότ Δέλτα και το μέσω των E_1 και E_2 . Έτσι έχουμε:

$$\bar{J}_{d3} = (O_M - E_{12}) x v_1 \quad (5.8)$$

Όπου

$$E_{12} = \frac{1}{2}(E_1 + E_2) \quad (5.9)$$

Τελικά αφού προσδιορίσουμε και τη φορά περιστροφής παίρνουμε:

$$J_{di} = \bar{J}_{di} / (J_{inv} \bar{J}_{di}) \quad (5.10)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι η πλειοψηφία των υπολογισμών γίνεται στην εκκίνηση του προγράμματος και όχι μέσα στο βρόχο ελέγχου πράγμα που προσφέρει ταχύτητα στους υπολογισμούς. Για τον υπολογισμό της ροπής έχουμε:

$$T_q = g J_d * d_m + M_0 * R_v \quad (5.11)$$

Με:

- g τη σταθερά της βαρύτητας.
- d_m τη μάζα του πάνω βραχίονα του Δέλτα.
- M_0 τη μάζα του κάτω βραχίονα του Δέλτα.
- $R_v = \cos(f_i + F_{cog})$, με f_i της γωνίες κίνησης στους κινητήρες και F_{cog} της γωνίες από τη μηχανολογική σχεδίαση του ρομπότ.

Για να πάρουμε τελικά το ρεύμα που θα στείλουμε στους κινητήρες για να γίνει η κίνηση αρκεί να διαιρέσουμε την παραπάνω ροπή με την σταθερά του κινητήρα.

5.4 Αρχιτεκτονική προγράμματος

Σε αυτή την ενότητα θα δώσουμε κάποιες γενικές πληροφορίες για την αρχιτεκτονική του λογισμικού που αναπτύχθηκε στη παρούσα διπλωματική, την επικοινωνία αλλά και απαραίτητα εργαλεία που έπρεπε να χτιστούν για να έχουμε την κίνηση του ρομπότ. Σε αυτό το σημείο συνοπτικά θα αναφέρουμε τις βασικές λειτουργίες του συστήματος.

Το σύστημα αποτελείται ουσιαστικά από τρία υποσυστήματα που αυτά με τη σειρά τους έχουν επιμέρους λειτουργίες:

1. Κόμβος τηλεχειρισμού. Πρόκειται για το απτικό σύστημα που θα χρησιμοποιεί ο χειριστής για να κάνει τις επεμβάσεις και κατά συνέπεια είναι η είσοδος στο σύστημα μας. Βασικές λειτουργίες:

- Προσομοιώνει με φυσικό τρόπο την κίνηση που θα έκανε ο χειρουργός σε μία πραγματική επέμβαση.
- Στέλνει τις κινήσεις των αρθρώσεων του σαν είσοδο στο διπλό Δέλτα για να τις ακολουθήσει. Η αποστολή αυτή, επειδή ο κόμβος του τηλεχειρισμού είναι σε περιβάλλον με windows ενώ το διπλό Δέλτα σε Linux, γίνεται μέσω ενός udp socket.
- Η απεικόνιση των κινήσεων του απτικού μέσου σε σχέση με το διπλό Δέλτα θεωρούμε ότι είναι γραμμική.

2. Κόμβος ελέγχου διπλού Δέλτα. Πρόκειται για το κύριο υπο-σύστημα, χειρίζεται όλες τις λειτουργίες του διπλού Δέλτα. Επικοινωνεί τόσο με το απτικό σύστημα όσο και με το σύστημα του άκρου εργασίας endowrist.

- Εκτελεί τις κινήσεις που του στέλνει το απτικό μέσο με πολύ μεγάλη ακρίβεια.
- Προσφέρει την πλειοψηφία των δυνατοτήτων ολόκληρου του συστήματος για τον χρήστη, όπως επιλογές για να θέσει κέρδη ελεγκτών, ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση των ρευμάτων στο σύστημα κ.α.
- Η διαδικασία κίνησης είναι η εξής: Το διπλό Δέλτα δέχεται την είσοδο από το απτικό σύστημα το οποίο ουσιαστικά είναι η θέση που θα θέλαμε να βρίσκεται το άκρο εργασίας και στη συνέχεια με χρήση των αναλυτικών κινηματικών εξισώσεων σε διαδοχικά βήματα καταλήγουμε να έχουμε τις απαραίτητες γωνίες που θα πρέπει να εκτλεσθούν από την κάθε άρθρωση του ρομπότ.

3. Κόμβος άκρου εργασίας Endowrist. Πρόκειται για το τελευταίο υπό-σύστημα, το οποίο είναι αυτό που εκτελεί την εγχείρηση με την χρήση της χειρουργικής λαβίδας. Επικοινωνεί με το σύστημα του διπλού Δέλτα.

- Ακολουθεί με ακρίβεια του χιλιοστού της μοίρας τις κινήσεις που του στέλνει ο χειριστής.
- Για να ξεκινήσει την λειτουργία του πρέπει να υπάρξει κατάλληλη επικοινωνία με το διπλό Δέλτα.
- Προσφέρει ένα API με πολλές λειτουργίες για τη χρήση του χειρουργικού tip, όπως αλλαγή μεθόδων ελέγχου, ορισμός ελάχιστων-μέγιστων κινήσεων κ.α.
- Το σύστημα του χειρουργικού tip καθώς απαιτεί τρομερή ακρίβεια, αν δεν έχει πρώτα υποστεί αρχικοποίηση (calibration tool) δεν μπορεί να ξεκινήσει καθώς θα μπορούσε να δημιουργήσει προβλήματα κατά τη διάρκεια της επέμβασης.

Όπως έχει αναφερθεί το σύστημα μας είναι ένα ρομπότ για χειρουργικές επεμβάσεις το οποίο λειτουργεί σε μία σχέση Master-Slave. Έτσι ο χειριστής μπορεί άμεσα να επέμβει σε όλες τις λειτουργίες του ρομπότ. Κατά συνέπεια είναι αυτός που αποφασίζει πότε θα πρέπει να αλλάξει η λειτουργία του ρομπότ, από την κίνηση ολόκληρου του διπλού Δέλτα σε αυτή του χειρουργικού άκρου εργασίας και το ανάστροφο.

Για να γίνουν όλα αυτά έπρεπε να αναπτυχθούν προγράμματα οδήγησης για το ρομποτικό σύστημα μας, τα οποία παρουσιάζονται στην επόμενη υποενότητα.

5.4.1 Προγράμματα οδήγησης (Drivers)

Για να μπορέσουμε να έχουμε μία ομαλή κίνηση απαραίτητο ήταν να έχουμε κατάλληλα προγράμματα οδήγησης ώστε να μπορέσουμε να λειτουργήσουμε με ακρίβεια το ρομπότ. Έτσι σε αυτήν την εργασία πέρα από το καθαρά προγραμματιστικό κομμάτι του ελέγχου (ευθεία και ανάστροφη κινηματική, συστήματα τηλεχειρισμού κλπ) ήταν απαραίτητο, και μάλιστα πρωταρχικός σκοπός, να έχουμε κατάλληλα προγράμματα οδήγησης για τους dc κινητήρες που κινούν το διπλό Δέλτα αλλά και για τα servo motors του άκρου εργασίας.

Όπως έχει αναφερθεί η συχνότητα στην οποία λειτουργεί το διπλό Δέλτα είναι 1Khz. Για να μπορέσουμε να πετύχουμε να στέλνουμε εντολές σε αυτή τη συχνότητα χρησιμοποιήσαμε μία DAC (data acquisition card). Μία τέτοια κάρτα ουσιαστικά χρησιμοποιείται για να μετράει σε πολύ μεγάλη συχνότητα πραγματικές καταστάσεις που μπορεί να επικρατούν γύρω από ένα σύστημα. όπως παραδείγματος χάριν οι τιμές των encoders σε κινητήρες. Επιπροσθέτως, υπάρχουν κάρτες που προσφέρουν ακροδέκτες (pins) εξόδων, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα να μπορούμε με κατάλληλο προγραμματισμό αυτών των pins να ενεργοποιούμε τους κινητήρες κάποιου συστήματος ή κάποια άλλη έξοδο.

Η κάρτα που χρησιμοποιήσαμε στην παρούσα διπλωματική είναι η "PCI Express Multifunction I/O Board" και συγκεκριμένα το μοντέλο S826 της εταιρίας Sensoray (5.4). Οι λόγοι που επιλέξαμε την συγκεκριμένη κάρτα είναι οι εξής [66]:

- Δίνει τη δυνατότητα να προγραμματιστεί και να λειτουργήσει σε πολύ μεγάλες συχνότητες.
- Προσφέρει 48 ψηφιακά κανάλια για εισόδους-εξόδους τα οποία είναι πολυπληθέστερα από αυτά που χρησιμοποιήσαμε για τον έλεγχο του ρομποτικού συστήματος. Αλλά με αυτόν τον τρόπο υπάρχει η δυνατότητα επέκτασης του συστήματος οδήγησης.
- Έχει 6 απαριθμητές (counters) με πολύ καλή ανάλυση και συγχρονισμένοι σε πολύ υψηλή συχνότητα, πράγμα που κάνει τη κάρτα αυτή ιδιαίτερα καλή για συστήματα που πρέπει για παράδειγμα να ξέρουμε την τιμή του encoder του κινητήρα κάθε στιγμή.
- Έχει 16 αναλογικά κανάλια εισόδου τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να έχουμε αναλογικές εισόδους από αισθητήρες.
- Έχει 8 αναλογικά κανάλια εξόδου τα οποία έχουν μεγάλο εύρος τάσεων ανάλογα τον προγραμματισμό τους ± 15 δεδομένο που κάνει την κάρτα ικανή να προσφέρει ενέργεια σε διάφορα διαφορετικά εξαρτήματα.
- Γενικά, αυτή η κάρτα προσφέρει πολύ μεγάλη επεκτασιμότητα για μελλοντική εργασία, τόσο από άποψη κι άλλων λειτουργιών λογισμικού αλλά και συμβατότητα με άλλα κομμάτια εξοπλισμού.

Οι βασικές λειτουργίες, που έχουν υλοποιηθεί στο υπάρχον πρόγραμμα οδήγησης, είναι:

1. Ενεργοποίηση των κινητήρων.
2. Ανάγνωση των encoders των κινητήρων.
3. Ανάγνωση των ψηφιακών εισόδων, ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία.
4. Ανάγνωση λαθών, στις εντολές εισόδου.

Όσο αφορά το πρόγραμμα οδήγησης για το άκρο εργασίας, όπως έχει αναφερθεί, έχει χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα από τέσσερις σερβοκινητήρες σε συνδεσμολογία daisy chain. Οι σερβοκινητήρες αυτοί είναι οι Herkulex DRS-0201 και έχουν ένα σειριακό πρωτόκολλο (εικόνα 5.5). Βασιζόμενοι πάνω σε αυτό το πρωτόκολλο αναπτύχθηκε ολόκληρο το πρόγραμμα οδήγησης. Σε προηγούμενο κεφάλαιο



Σχήμα 5.4: S826 Sensoray [67]

Packet								
Type	Header	Packet Size	pID	CMD	Check Sum1	Check Sum2	Data[n]	
Value	0xFF 0xFF	7~223	0~0xFE	1~9	Refer to Detail	Refer to Detail	Refer to Detail	
Byte	1 1	1	1	1	1	1	MAX 216	

Σχήμα 5.5: Πακέτο επικοινωνίας για τους σερβοκινητήρες [68]

αναλύσαμε γιατί επιλέχθηκαν τέτοιου είδους κινητήρες. Τώρα θα αναφέρουμε επισυναπτικά τα τμήματα που είναι υλοποιημένα όσο αφορά το πρόγραμμα οδήγησης.

Έτσι έχουμε:

1. Δυνατότητα προσαρμογής των κερδών του PID ελεγκτή.
2. Δυνατότητα ανάγνωσης των τιμών του encoder, του ρεύματος, της θέσης, της ταχύτητας.
3. Δυνατότητα ορισμού μέγιστης και ελάχιστης θέσης. Κάτι ιδιαίτερα σημαντικό στην εφαρμογή μας αφού το άκρο εργασίας είχε περιορισμένη δυνατότητα κίνησης και υπήρχε κίνδυνος να καταστραφεί.
4. Δυνατότητα κίνησης με βάση τη θέση προορισμού.
5. Δυνατότητα επαναφοράς στις αρχικές συνθήκες (εργοστασιακές), το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περίπτωση κάποιας βλάβης.
6. Πρέπει να σημειωθεί ότι για αυτές τις λειτουργίες εσωτερικά έχουν αναπτυχθεί και άλλες που εκτελούνται εσωτερικά και στις οποίες δεν έχει πρόσβαση ο χρήστης, όπως ορισμός λειτουργίας των σερβοκινητήρων (ενεργοποιημένο φρένο, ελεύθερη περιστροφή κ.α.)

Κεφάλαιο 6

Αποτελέσματα πειραμάτων

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια παρουσίαση κάποιων αποτελεσμάτων που εξάγαμε από τη ρομποτική πλατφόρμα της μεταπτυχιακής εργασίας ενώ στη συνέχεια γίνεται ένας σχολιασμός των αποτελεσμάτων αυτών.

6.1 Απόκριση συστήματος

Για να μπορέσουμε να έχουμε μία γραφική απεικόνιση της απόκρισης του συστήματος αποφασίσαμε να δημιουργήσουμε κάποια διαγράμματα. Για τα διαγράμματα αυτά χρησιμοποιήθηκε το πακέτο του ROS, `rqt_multiplot`.

Θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα τριών πειραμάτων:

1. Βηματική απόκριση (Step response) στον άξονα τον x με πλάτος: $0.04m$.
2. Βηματική απόκριση (Step response) στον άξονα τον y με πλάτος: $0.04m$.
3. Βηματική απόκριση (Step response) στον άξονα τον z με πλάτος: $0.04m$.

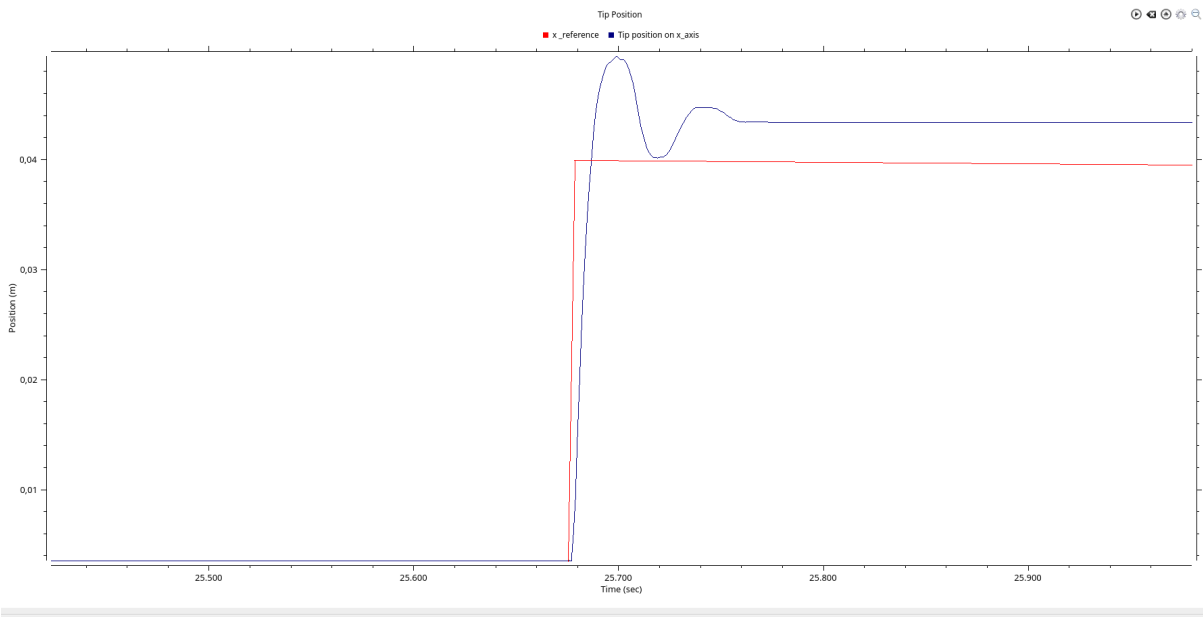
Τα διαγράμματα που έχουμε θα αφορούν τόσο την θέση του άκρου εργασίας της ρομποτικής πλατφόρμας όσο και των θέσεων των επιμέρους αρθρώσεων. Τέλος θα γίνουν κάποιοι σχολιασμοί όσο αφορά τα αποτελέσματα των πειραμάτων.

6.1.1 Βηματική απόκριση στον x άξονα

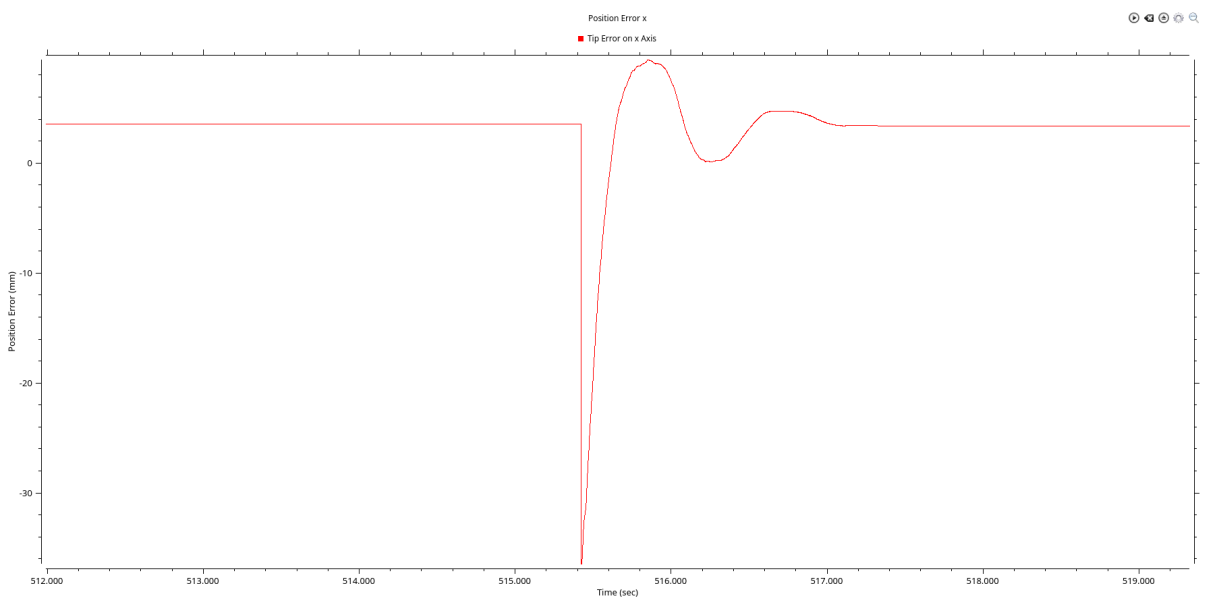
Αρχικά θα παρουσιασθεί η απόκριση του άκρου εργασίας συναρτήση του χρόνου σε σχέση με την βηματική είσοδο 6.1.

Παρατηρούμε ότι ο χρόνος απόκρισης από την στιγμή που έχουμε το σήμα εισόδου μέχρι να κινηθεί το ρομπότ είναι πάρα πολύ μικρό, της τάξεως των $0,025sec$. Έχουμε μία μικρή υπερακόντιση 20% πράγμα που είναι φυσιολογικό για μία τόσο απότομη αλλαγή της κατάστασης της ρομποτικής πλατφόρμας. Ο χρόνος αποκατάστης είναι σχετικά μικρός, της τάξεως $0,8sec$, πράγμα που είναι πολύ σημαντικό για ένα ρομπότ τέτοιου είδους. Τέλος, βλέπουμε ότι έχουμε σφάλμα μόνιμης θέσης για το οποίο θα μιλήσουμε παρακάτω. Όπως βλέπουμε στην εικόνα 6.2, έχουμε σφάλμα μόνιμης θέσης πριν δώσουμε τη βηματική είσοδο. Το σφάλμα θέσης πριν την είσοδο είναι της τάξεως των $2mm$.

Το πρώτο διάγραμμα είναι η απόκριση κατά τον x άξονα με βηματική είσοδο $0,02m$. Παρατηρούμε ότι έχουμε πολύ γρήγορη απόκριση με κάποια υπερακόντιση και ένα σχετικό γρήγορο χρόνο αποκατάστασης. Το σφάλμα αυτό υπολογίζεται ως: $error = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, όπου x,y,z η θέση του άκρου εργασίας του ρομπότ στους αντίστοιχους άξονες. Πρέπει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο,



Σχήμα 6.1: Απόκριση του συστήματος στον x άξονα

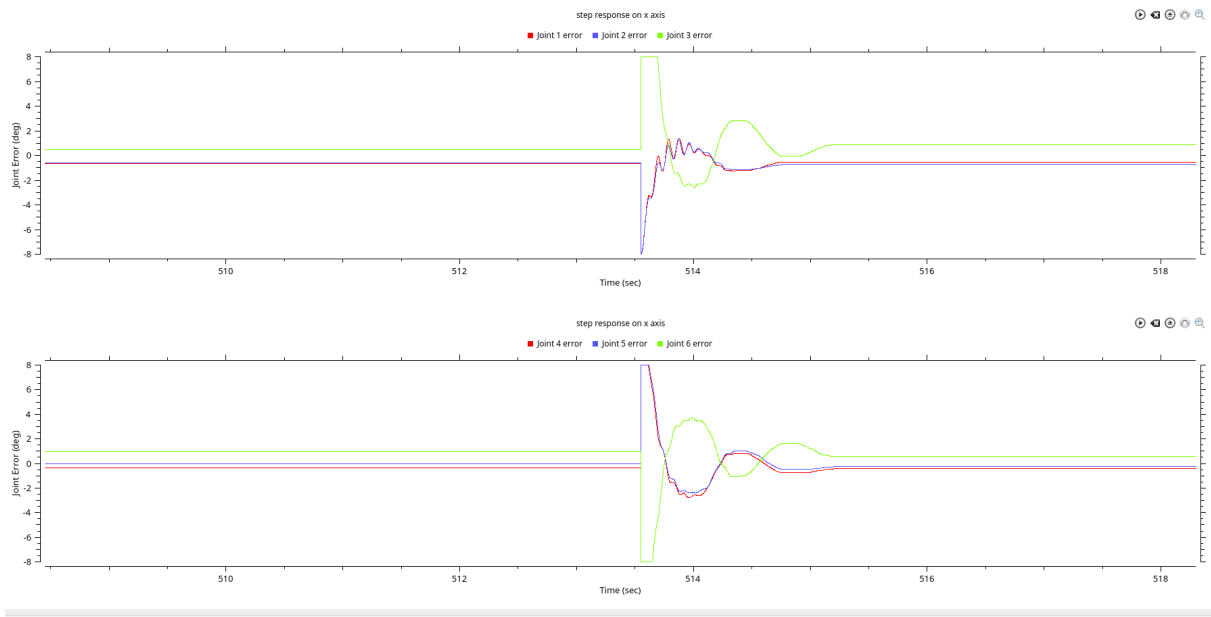


Σχήμα 6.2: Απόλυτο σφάλμα θέσης

ότι στις βηματικές εισόδους κατά τον x άξονα έχουμε τα μεγαλύτερα σφάλματα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ενώ έχουμε αντιστάθμιση της βαρύτητας για το διπλό δέλτα, η διαμόρφωση της ρομποτικής πλατφόρμας δεν παραμένει συμμετρική στον x άξονα, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται τα μεγαλύτερα σφάλματα. Σε επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται πιθανές λύσεις για αυτό το πρόβλημα.

Τέλος παρουσιάζονται τα διαγράμματα των αρθρώσεων 6.3. Βλέπουμε ότι έχουμε σφάλμα μικρότερο της μοίρας σε κάθε άρθρωση, το σφάλμα ορίζεται σαν το σήμα είσοδου στον κινητήρα (υπολογισμένο από τις κινηματικές εξισώσεις του ρομπότ) και της πραγματικής θέσης (μετρημένο από encoders). Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν κάποιες μικρές ταλαντώσεις που οφείλονται σε μηχανολογικά σφάλματα της ρομποτικής πλατφόρμας. Συγκεκριμένα, στον τρόπο μετάδοσης της

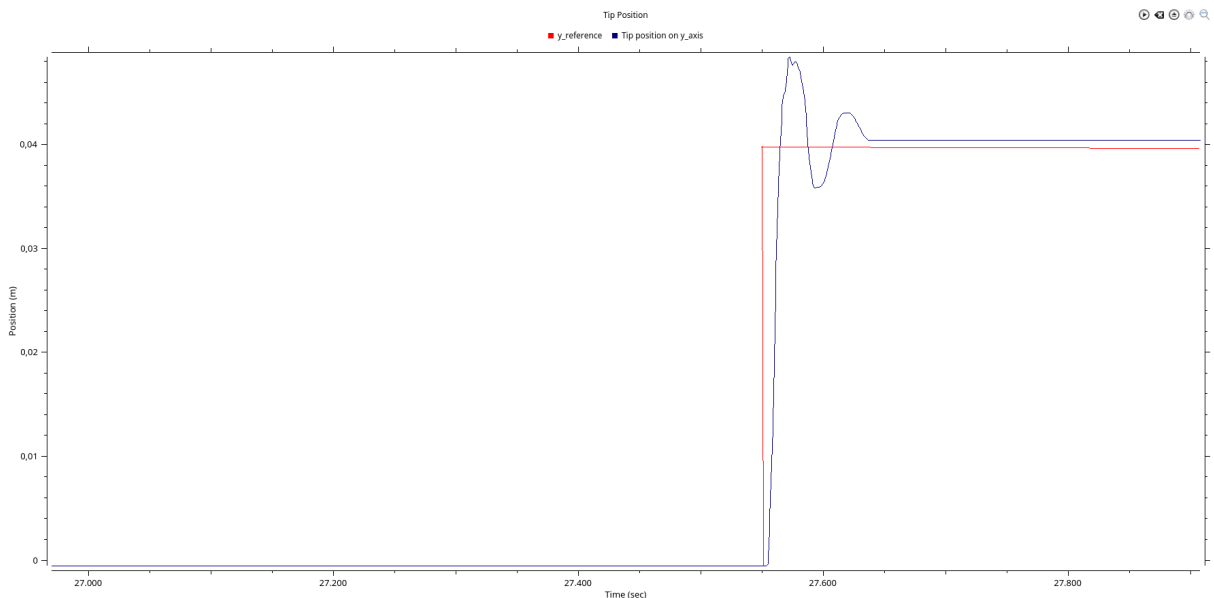
κίνησης που στηρίζεται στην τριβή ανάμεσα σε βαρούλκο και συρματόσχοινο.



Σχήμα 6.3: Σφάλματα αρθρώσεων

6.1.2 Βηματική απόκριση στον y άξονα

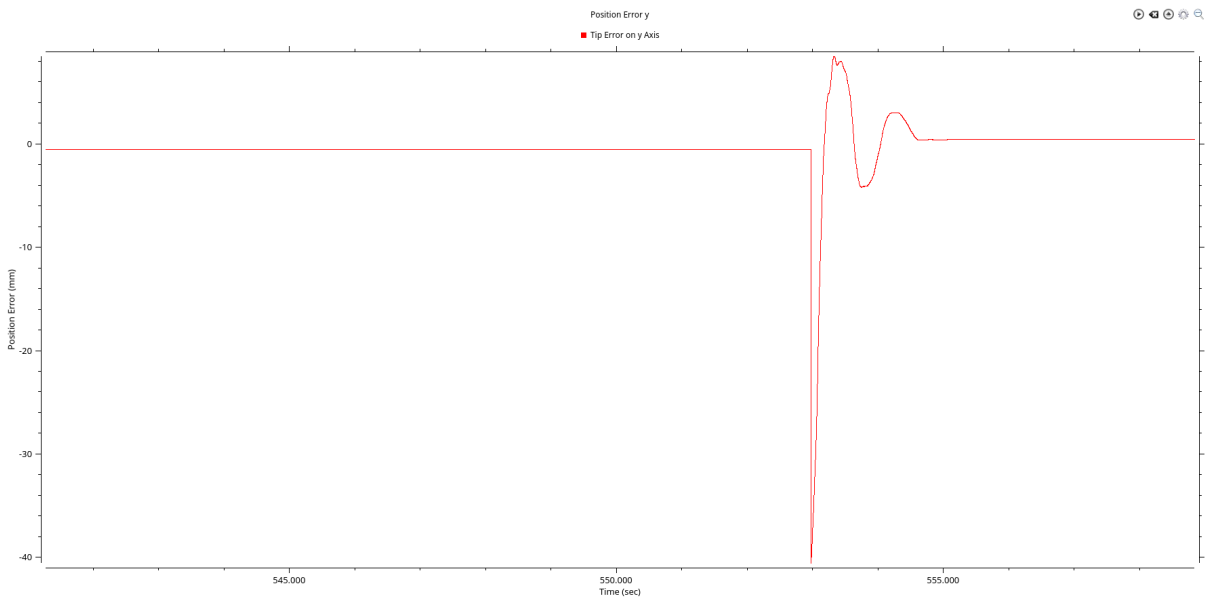
Σε αυτό το σημείο θα παρουσιασθεί η απόκριση της ρομποτικής πλατφόρμας σε βηματική είσοδο στον y άξονα 6.4.



Σχήμα 6.4: Απόκριση του συστήματος στον y άξονα

Η συμπεριφορά του ρομπότ σε είσοδο βηματική στον άξονα y είναι παρόμοια με αυτή που είχε στον x με κάποιες διαφορές. Ο χρόνος αντίδρασης και ο χρόνος αποκατάστασης όπως και ο χρόνος ανύψωσης (0.03sec) είναι σχεδόν ίδιος. Έχουμε όμως μεγάλη διαφορά στο σφάλμα μόνιμης κατάστασης. Σε αυτή τη περίπτωση το σφάλμα είναι της τάξεως 0.002m και ο λόγος είναι ότι κατά

τον y άξονα έχουμε πολύ πιο συμμετρικό μοντέλο από αυτό στον x. Τη συμπεριφορά αυτή μπορεί κανείς να την παρακολουθήσει και στο διάγραμμα 6.5 όπου βλέπουμε μικρότερο σφάλμα από αυτό στον x άξονα 6.2.



Σχήμα 6.5: Απόλυτο σφάλμα θέσης

Εύκολα μπορεί κανείς να δει 6.5 ότι το σφάλμα που έχουμε κατά την κίνηση στον y άξονα είναι πολύ μικρότερο πράγμα που περιμέναμε άλλωστε. Παρόλα αυτά, έχουμε σφάλμα μόνιμης θέσης το οποίο οφείλεται στο σχεδιασμό του ρομπότ. Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια μιας χειρουργικής επέμβασης ο αλγόριθμος ελέγχου κλείνει με την όραση του χειρουργού, όπως ακριβώς γίνεται και στη ρομποτική πλατφόρμα Da Vinci [69].

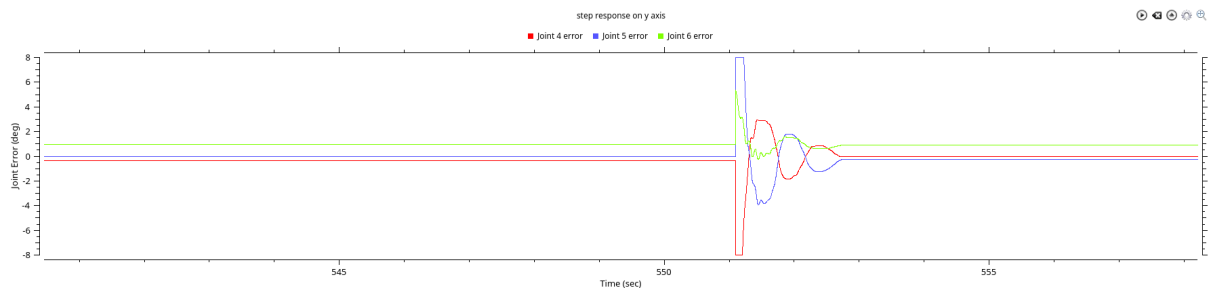
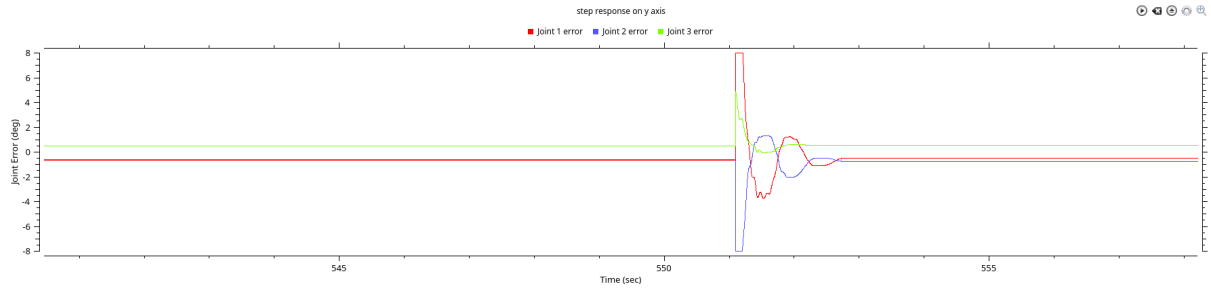
Τέλος παρουσιάζονται και εδώ τα διαγράμματα των αρθρώσεων 6.6 όπως και προηγουμένως. Η συμπεριφορά είναι πανομοιότυπη και το μόνο που αλλάζει είναι το ποια άρθρωση κατά κύριο λόγο ενεργεί για την επιθυμητή κίνηση.

6.1.3 Βηματική απόκριση στον z άξονα

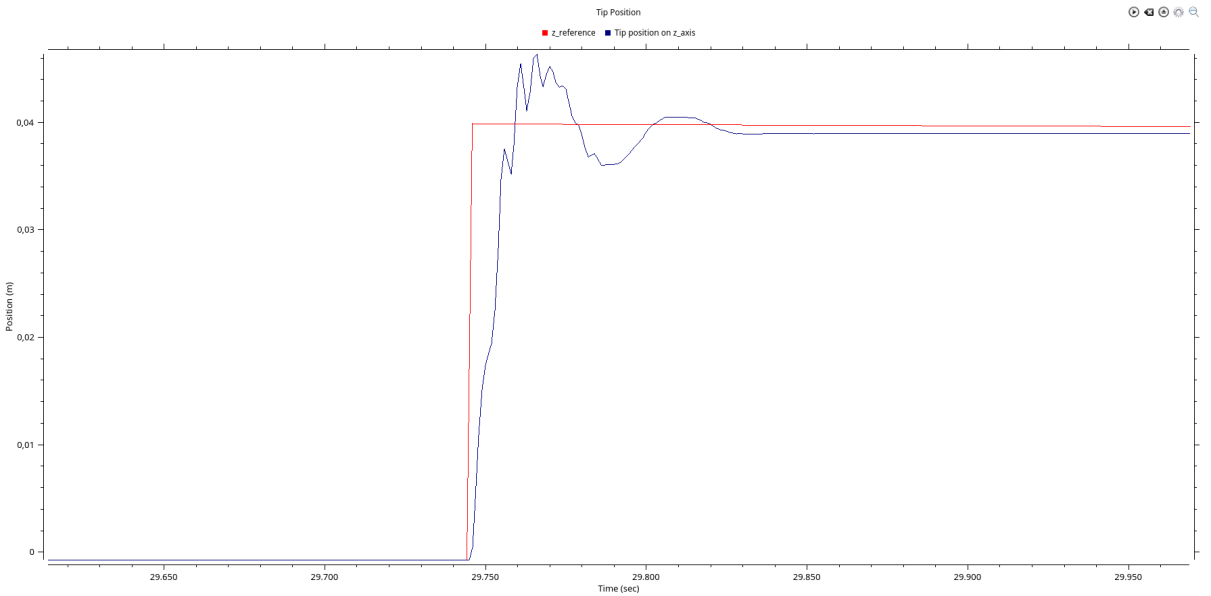
Τέλος, θα παρουσιασθεί η απόκριση της ρομποτικής πλατφόρμας σε βηματικές διεγέρσεις στον z άξονα. Αρχικά έχουμε το διάγραμμα της θέσης του άκρου εργασίας στο ίδιο διάγραμμα με την είσοδο 6.7. Στο διάγραμμα αυτό μπορούμε να δούμε αντίστοιχη συμπεριφορά με αυτή των προηγούμενων διαγραμμάτων. Μια σημαντική διαφορά είναι το σφάλμα μόνιμης κατάστασης που είναι αρκετά μικρό. Αυτό οφείλεται στον έλεγχο αντιστάθμισης βαρύτητας που δρά στον z άξονα. Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν κάποιες μικρές ταλαντώσεις. Αυτές οφείλονται σε φθορά του ρομπότ στις θέσεις μετάδοσης της κίνησης.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το συνολικό σφάλμα θέσης 6.8. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το μόνιμο σφάλμα είναι πολύ μικρό αλλά έχουμε κάποιες μικρές ταλαντώσεις. Ύστερα από μία σειρά πειραμάτων παρατηρήθηκε ότι αυτές οι ταλαντώσεις οφείλονται στη μηχανολογική συμπεριφορά του ρομπότ και όχι και στο λογισμικό.

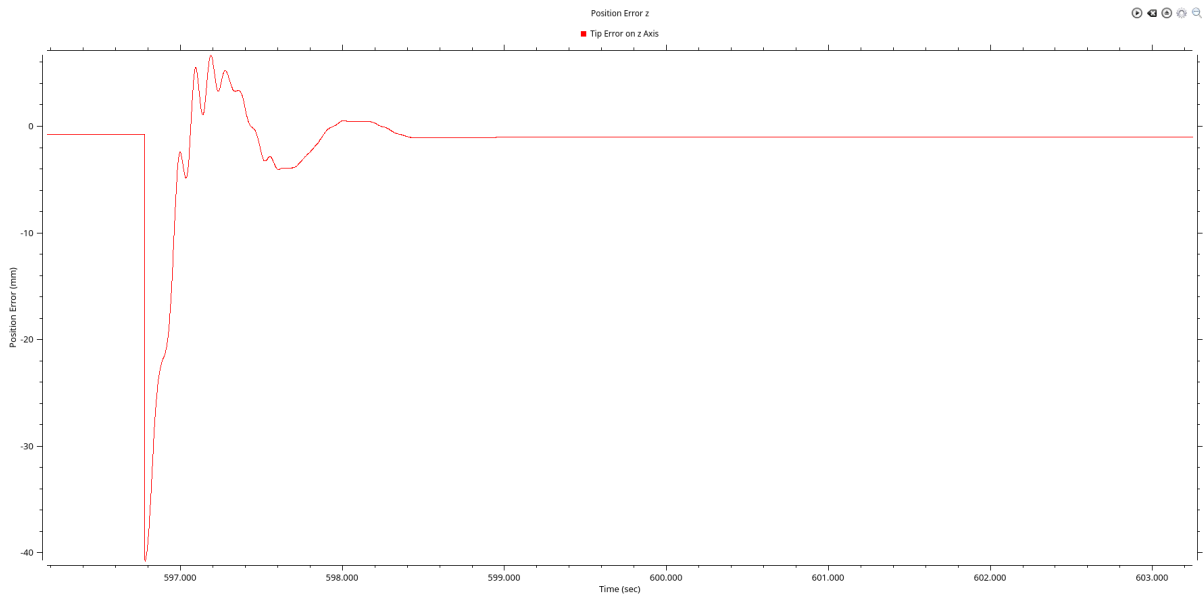
Τέλος, παρουσιάζονται τα σφάλματα αρθρώσεων που είχαμε κατά την κίνηση στον z άξονα 6.9. Όπως και προηγουμένως το κύριο χαρακτηριστικό που αλλάζει σε σχέση με τα προηγούμενα διαγράμματα είναι το ποια άρθρωση κινείται.



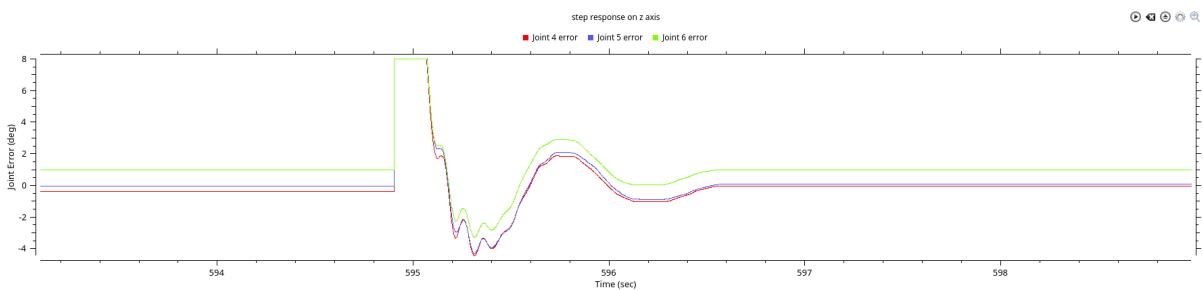
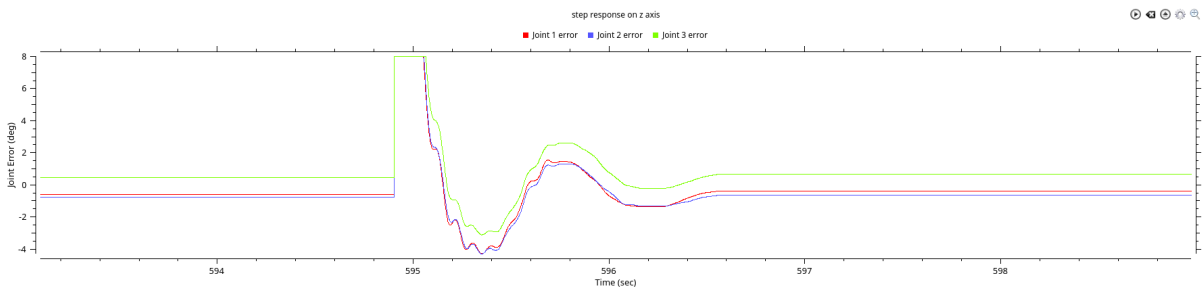
Σχήμα 6.6: Σφάλματα αρθρώσεων



Σχήμα 6.7: Απόκριση του συστήματος στον z άξονα



Σχήμα 6.8: Απόλυτο σφάλμα θέσης



Σχήμα 6.9: Σφάλματα αρθρώσεων

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

Με το πέρας της μεταπτυχιακής εργασίας καταλήξαμε σε κάποια γενικά συμπεράσματα τα οποία παρατίθενται παρακάτω. Επιπλέον, γίνονται κάποιες αναφορές για μελλοντική εργασία που μπορεί να γίνει γύρω από την παρούσα.

7.1 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα στα οποία οδηγηθήκαμε με την ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι τα εξής:

- Έγινε ανάλυση για την ανάπτυξη λογισμικού του συστήματος, με όλα τα βήματα που είναι απαραίτητα για να μπορέσει να γίνει αποτελεσματικός έλεγχος τηλεχειρισμού σε ένα τέτοιου είδους ρομπότ.
- Αναδείχθηκε η σημασία του ανοιχτού λογισμικού αφού με τη βοήθεια του ROS μπορέσαμε να χρησιμοποιήσουμε αρκετά εργαλεία που είναι ήδη διαθέσιμα.
- Οι παράλληλοι μηχανισμοί έχουν εξαιρετικά αποτελέσματα σε θέματα ακρίβειας, ταχύτητας και με την τροποποίηση αυτών, όπως έγινε με το διπλό δέλτα, τα μειονεκτήματά τους μειώνονται.
- Για συστήματα που απαιτούν συμπεριφορά πραγματικού χρόνου, τόσο η C++ όσο και το rt-preempt φέρουν πολύ καλά αποτελέσματα.
- Ένας έλεγχος που δεν περιλαμβάνει εσωτερικά το μοντέλο (model based control) δεν είναι αρκετός για να έχουμε ακρίβεια καλύτερη από αυτή που επιτύχαμε στην εργασία αυτή.
- Η ρομποτική πλατφόρμα είναι ιδιαίτερα επιρρεπής στις εκάστοτε διαμορφώσεις. Αν για παράδειγμα η πλατφόρμα στραφη κατά κάποιες μοίρες έτσι ώστε να είναι υπό γωνία θα έχουμε πολύ μεγαλύτερο σφάλμα καθώς ο έλεγχος δε θα το λαμβάνει υπόψιν του.

7.2 Μελλοντική εργασία

Μελλοντική εργασία που μπορεί να γίνει γύρω από την διπλωματική εργασία είναι:

- Ανάπτυξη κατάλληλου λογισμικού ελέγχου έτσι ώστε να μπορέσουμε να προσφέρουμε στο χειριστή ανάδραση δύναμης.

- Δημιουργία μοντέλου για την προσομοίωση σε κάποια μηχανή προσομοίωσης όπως αυτή του Gazebo το οποίο θα μας έδινε την δυνατότητα να δοκιμάσουμε νέες λειτουργίες στο σύστημα χωρίς κίνδυνο να του προκαλέσουμε ζημιά.
- Αλλαγή του συστήματος κίνησης του endowrist έτσι ώστε να μπορέσουμε να έχουμε καλύτερο έλεγχο στο άκρο εργασίας. Συγκεκριμένα, θα ήταν ιδιαίτερα καλό να έχουμε ένα καλό force-feedback σύστημα το οποίο να μας δίνει πληροφορίες κατά την επέμβαση. Αυτή τη στιγμή ο κώδικας οδήγησης για το endowrist προσφέρει αυτή τη δυνατότητα αλλά λόγω αδυναμίας του hardware τα αποτελέσματα είναι πολύ θορυβώδης.
- Χρήση embedded λειτουργικού συστήματος για να πετύχουμε ένα σύστημα Hard real-time.
- Διεξαγωγή πειραμάτων με την παρουσία χειρουργού για να έχουμε μία καλύτερη εκτίμηση των πιθανών λαθών που μπορεί να έχουν γίνει.
- Δημιουργία συστήματος απεικόνισης της χειρουργικής επέμβασης σε απομακρυσμένο περιβάλλον.
- Τροποποίηση του ελέγχου αντιστάθμισης βαρύτητας έτσι ώστε να μπορούμε να έχουμε μειωμένο σφάλμα και για τις άλλες διευθύνσεις.
- Αλλαγή της θεωρίας ελέγχου που έχει χρησιμοποιηθεί καθώς με τον έλεγχο που γίνεται τώρα κάποια σφάλματα δεν μπορούν να διορθωθούν ανεξαρτήτως των παραμέτρων των κερδών.

Βιβλιογραφία

- [1] History of industrial robots. http://www.ifr.org/fileadmin/user_upload/downloads/forms_--_info/History_of_Industrial_Robots_online_brochure_by_IFR_2012.pdf.
- [2] Industrial robot. https://en.wikipedia.org/wiki/Industrial_robot.
- [3] Nao (robot). [https://en.wikipedia.org/wiki/Nao_\(robot\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Nao_(robot)).
- [4] Amazon robotics. https://en.wikipedia.org/wiki/Amazon_Robotics.
- [5] Boeing's new bots slash painting work. <http://www.paintsquare.com/news/?fuseaction=view&id=9721>.
- [6] Meet robear, a japanese robot nurse with the face of a bear. <http://www.digitaltrends.com/cool-tech/riken-robear/>.
- [7] Joost Broekens, Marcel Heerink, and Henk Rosendal. Assistive social robots in elderly care: a review. *Gerontechnology*, 8(2):94–103, 2009.
- [8] Brian Scassellati, Henny Admoni, and Maja Mataric. Robots for use in autism research. *Annual review of biomedical engineering*, 14:275–294, 2012.
- [9] Kazuyoshi Wada, Takanori Shibata, Takashi Asada, and Toshimitsu Musha. Robot therapy for prevention of dementia at home. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 19(6):691, 2007.
- [10] Byd qin plug in hybrid with onboard robot unveiled in beijing. <http://thechargingpoint.azurewebsites.net/news/BYD-Qin-plug-in-hybrid-with-onboard-robot-unveiled-in-Beijing.html>.
- [11] Personal / domestic robots. <http://www.ifr.org/service-robots/products/>.
- [12] Robot statistics. <http://www.ifr.org/service-robots/statistics/>.
- [13] Samsung navibot sr8855. http://robotbg.com/robots/floor_cleaners/samsung/navibot_sr8855.
- [14] Ewald Heer. Robots and manipulators. *Mechanical Engineering*, 103:42–49, 1981.
- [15] Curiosity rover finds nitrogen, vital for life, on mars. <http://www.eteknix.com/curiosity-rover-finds-nitrogen-vital-for-life-on-mars/>.
- [16] Massive underwater ditch-digging robot. <http://www.popsci.com/scitech/article/2008-04/massive-underwater-ditch-digging-robot>.
- [17] 9/11 rescue robots. <http://www.livescience.com/15999-9-11-rescue-robots.html>.

- [18] Center for robot assisted search and rescue (crasar) at texas a&m university. <http://crasar.org/about/>.
- [19] Foster-miller talon. https://en.wikipedia.org/wiki/Foster-Miller_TALON.
- [20] Battlefield search and rescue robots. <https://ramtc.wordpress.com/2010/03/16/battlefield-search-rescue-robots/>.
- [21] Robotic surgery. <http://www.northside.com/robotics>.
- [22] Παπανικολαΐδη Ιωάννα. The da vinci surgical system: Μια καλύτερη τοποθέτηση της Βάσης του Ρομποτικού Συστήματος με τη χρήση του Δείκτη Επιδεξιότητας yoshikawa και την εφαρμογή Βασικού Γενετικού Αλγορίθμου, Πτυχιακή Εργασία, 2011.
- [23] Santiago Horgan and Daniel Vanuno. Robots in laparoscopic surgery. Journal of Laparoendoscopic & Advanced Surgical Techniques, 11(6):415–419, 2001.
- [24] Robotic surgery news. <http://abcnews.go.com/topics/lifestyle/health/robotic-surgery.htm>.
- [25] Ρομποτική Χειρουργική: η Νέα Πρόκληση για το Ιατρικό και Νοσηλευτικό Προσωπικό στον 21ο αιώνα. http://journal-ene.gr/wp-content/uploads/2010/11/TOMOS3TEFXOS3_GREEK-dragged.pdf.
- [26] George P Moustris, Savas C Hiridis, Kyriakos M Deliparaschos, and Konstantinos M Konstantinidis. Evolution of autonomous and semi-autonomous robotic surgical systems: a review of the literature. The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 7(4):375–392, 2011.
- [27] Russell H Taylor, Arianna Menciassi, Gabor Fichtinger, Paolo Fiorini, and Paolo Dario. Medical robotics and computer-integrated surgery. In Springer handbook of robotics, pages 1657–1684. Springer, 2016.
- [28] Alon Wolf and Moshe Shoham. Medical automation and robotics. In Springer Handbook of Automation, pages 1397–1407. Springer, 2009.
- [29] ΠΟΜΠΟΤΙΚΗ ΧΕΙΡΟΥΡΓΙΚΗ. <http://www.kkonstantinidis.gr>.
- [30] The robo-doctor will see you now. <https://www.asme.org/engineering-topics/articles/robotics/robo-doctor-will-see-you-now>.
- [31] Christos Bergeles and Guang-Zhong Yang. From passive tool holders to microsurgeons: safer, smaller, smarter surgical robots. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 61(5):1565–1576, 2014.
- [32] Anthony R Lanfranco, Andres E Castellanos, Jaydev P Desai, and William C Meyers. Robotic surgery: a current perspective. Annals of surgery, 239(1):14, 2004.
- [33] Paolo Arcara and Claudio Melchiorri. Control schemes for teleoperation with time delay: A comparative study. Robotics and Autonomous systems, 38(1):49–64, 2002.
- [34] Septimiu E Salcudean. Control for teleoperation and haptic interfaces. In Control problems in robotics and automation, pages 51–66. Springer, 1998.
- [35] Dale A Lawrence. Stability and transparency in bilateral teleoperation. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 9(5):624–637, 1993.

- [36] Peter Vischer and Reymond Clavel. Kinematic calibration of the parallel delta robot. *Robotica*, 16(2):207–218, 1998.
- [37] L Rey and R Clavel. The delta parallel robot. In *Parallel Kinematic Machines*, pages 401–417. Springer, 1999.
- [38] Erik J Shahoian, Bruce M Schena, and Louis B Rosenberg. Haptic interface for laptop computers and other portable devices, November 23 2004. US Patent 6,822,635.
- [39] The true Origins of Parallel Robots. <http://www.parallemic.org/Reviews/Review007.html>. Accessed: 2018-02-24.
- [40] Carlo Alberto Avizzano, Alessandro Filippeschi, Juan Manuel Jacinto Villegas, and Emanuele Ruffaldi. An optimal geometric model for clavels delta robot. In *In: Proceedings of the 2015 Modelling Symposium (EMS)*, pages 232–237. IEEE, 2015.
- [41] Intuitive surgical’s endowrist. <https://www.intuitivesurgical.com/products/instruments/>.
- [42] Endowrist instrument & accessory catalog. https://www.intuitivesurgical.com/products/871145_Instrument_Accessory_%20Catalog.pdf.
- [43] Akhil J Madhani, Günter Niemeyer, and J Kenneth Salisbury. The black falcon: A teleoperated surgical instrument for minimally invasive surgery. In *In: Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, volume 2, pages 936–944. IEEE, 1998.
- [44] G Jagannath Raju, George C Verghese, and Thomas B Sheridan. Design issues in 2-port network models of bilateral remote manipulation. In *In: Proceedings of the 1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA’1989)*. IEEE.
- [45] Blake Hannaford. A design framework for teleoperators with kinesthetic feedback. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 5(4):426–434, 1989.
- [46] Gary MH Leung, Bruce A Francis, and Jacob Apkarian. Bilateral controller for teleoperators with time delay via/spl mu/-synthesis. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 11(1):105–116, 1995.
- [47] Hami Kazerooni, T-I Tsay, and Karin Hollerbach. A controller design framework for telerobotic systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1(1):50–62, 1993.
- [48] Yasuyoshi Yokokohji and Tsuneo Yoshikawa. Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling-formulation and experiment. In *In: Proceedings of the 1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA’1989)*, pages 1316–..., 1989. IEEE.
- [49] Keyvan Hashtrudi-Zaad and Septimiu E Salcudean. Analysis of control architectures for teleoperation systems with impedance/admittance master and slave manipulators. *The International Journal of Robotics Research*, 20(6):419–445, 2001.
- [50] Phantom omni 6 dof master device. <http://www.delfthapticslab.nl/device/phantom-omni/>.
- [51] The feasibility of using haptic devices to engage people with chronic traumatic brain injury in virtual 3d. https://www.researchgate.net/figure/PhantomR-Omni-A-haptic-device-used-in-our-experiments_fig3_264630767.
- [52] Haptic device/v-rep communication. <http://cooperative-haptics.blogspot.gr/>.
- [53] About ros, ros operating system. <http://www.ros.org/about-ros/>.

- [54] Donald L Peiper. The kinematics of manipulators under computer control. Technical report, Stanford Univ Ca Dept Of Computer Science, 1968.
- [55] Industrial robot. <https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/industrial-robots>.
- [56] The parallel information center. <http://www.parallemic.org/>.
- [57] K-M Lee and Dharman K Shah. Kinematic analysis of a three-degrees-of-freedom in-parallel actuated manipulator. IEEE Journal on Robotics and Automation, 4(3):354–360, 1988.
- [58] Zoran Pandilov and Vladimir Dukovski. Comparison of the characteristics between serial and parallel robots. Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering, 7(1):143, 2014.
- [59] Robert L Williams. The delta parallel robot: Kinematics solutions. Mechanical Engineering, Ohio University, 2015.
- [60] Mark W Spong, Seth Hutchinson, Mathukumalli Vidyasagar, et al. Robot modeling and control, volume 3. Wiley New York, 2006.
- [61] Κ. Τζαφέστας, Αυτόματος Ρομποτική Ι. Σημειώσεις μαθήματος Ρομποτικός έλεγχος, ΔΠΜΣ Συστήματα Αυτοματισμού. http://mycourses.ntua.gr/courses/PSTGR1127/document/%C4%C9%C1%D6%C1%CD%C5%C9%C5%D3_%C4%C9%C1%CB%C5%CE%C5%D9%CD/4_robotics-I-dpms-control-1.pdf.
- [62] Pid theory explained. <http://www.ni.com/white-paper/3782/en/>.
- [63] Ziegler nichols method. http://kurser.iha.dk/m/mtpri1/control/3_PID/f_ziegler/ziegler_nichols_method.html.
- [64] Making linux do hard real-time. <https://www.slideshare.net/jserv/realtime-linux>.
- [65] Real time operating system (rtos). https://www.electronicshub.org/real-time-operating-system-rtos/#Real_Time_Operating_Systems.
- [66] Pci express multifunction i/o board instruction manual. http://www.sensoray.com/downloads/man_826_hw_3.0.10.pdf.
- [67] Multifunction analog/digital i/o l model 826. http://www.sensoray.com/PCI_Express_digital_output_826.htm.
- [68] Herkulex drs-0101-0201 user manual. <https://www.robotshop.com/media/files/pdf/manual-drs-0201.pdf>.
- [69] Remote telesurgery. <http://www.cnds.jhu.edu/~dano/RemoteTelesurgery.pdf/>.